ResearchGate

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: https://www.researchgate.net/publication/296701901

Thoughts of a travelling ecologist 9. What money cannot buy – monetarising ecosystem services

Article · December 2015

CITATIONS
0

READS
113

1 author:

Gábor L. Lövei
Aarhus University & Fujian University of Agriculture & Forestry
213 PUBLICATIONS **3,386** CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:

AMIGA project View project

Environmental impact assessment View project

All content following this page was uploaded by Gábor L. Lövei on 04 March 2016.

The user has requested enhancement of the downloaded file.

2015, 24(4): 253-255
http://www.jbscn.org

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2015.04.001

Thoughts of a travelling ecologist 9.

What money cannot buy – monetarising ecosystem services

Gábor L. LÖVEI

Institute of Applied Ecology, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, *China & Department of Agroecology, Aarhus University, Flakkebjerg Research Centre, DK*-4200 *Slagelse, Denmark*

A few years before the millennium, due to a desire to make the occasion significant, there was a flurry of activities. Various summaries and initiatives were born, mostly of transient importance, and more than one of these aresimply marks of hubris. Ecologists were not exempt from this spirit of the times – but they were successful in making an impact. A group of American ecologists initiated the Millennium Ecosystem Assessment (MEA, 2005), a global exercise, to synthesise our knowledge about the state of the Earth's ecosystems, with the intent of influencing policy, and of triggering a higher awareness of the importance of ecosystems for human well-being. An important aspect of the MEA was to document the usefulness of ecosystem services (ESs). This concept exploded into the public consciousness with a famous and much-discussed article in Nature, by Roberto Costanza and co-workers (Costanza *et al.*, 1997). Costanza's team sought to calculate the financial value of ESs globally, and came to the amount of 33 trillion US dollars/year, which is about double of the then-total global GDP. The juggernaut of monetarising ESs has started.

The MEA solidified the terminology of the ESs, grouping them into four classes: productive, regulating, cultural and supporting services. Four scenarios were also developed, looking at developed and developing countries separately. The "global orchestration", and "order from strength" scenarios promised declining living standards by harming important ESs. The techno-garden scenario would result in a world where unknown human psychological problems lurked, due to a steep decline in cultural services. The only meaningful scenario was the "adaptive mosaic", in which natural, and not political boundaries would determine the management of natural resources.

After the MEA, more evaluations started to appear, with more and more detailed and refined estimates of the monetary value of ecosystems (see, e.g. TEEB Foundation, 2010). Work on valuing ESs became a veritable bandwagon: search any database with the words "ecosystem service", and you will get tens of thousands of hits. In 2010, the General Assembly of the United Nations decided that an Inter-governmental Panel on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES, see www.ipbes.net) should be established that is now working very actively to estimate the value of biodiversity, as well as of ecosystem services. A success story, therefore? Not yet obvious. There are various important, unclear aspects.

Corresponding address: G. L. Lövei, Aarhus University, Department of Agroecology, Flakkebjerg Research Centre, Forsoegsvej 1, DK-4200 Slagelse, Denmark. E-mail: gabor.lovei@agro.au.dk

One group of objections against this approach is technical. There has been a lot of criticism of the original figures published by Costanza *et al.* in their 1997 paper. Nevertheless, the exercise has been repeated for various sub-groups (Losey & Vaughan, 2006), regions (Kubiszewski *et al.*, 2013), habitats (Fausto *et al.*, 2012), and even the global estimate has been updated (Costanza *et al.*, 2014). Still, if these figures are used to direct decisions to manage, restore, or ignore various ecosystems or habitats, losses are inevitable because of the time-and-place fixation of values. We cannot know how future generations will value the same things – but very likely, they will do so differently from us. What today we do not value and thus do not protect from harm, may become very valuable for future generations.

A second uncertainty concerns biodiversity. What level of biodiversity is necessary for a continued functioning of the ecological processes that underpin these services? While this has been intensively studied and hotly debated since the early 1990ies, the answer, even today, is far from obvious. One of the first papers documenting the importance of biodiversity for plant production, on the basis of mesocosm studies at Silwood Park in the United Kingdom (Naeem *et al.*, 1995), found that a mesocosm had higher plant production when it was more species-rich. This and other experiments were criticised as statistical artefacts (Huston, 1997) and today the consensus is that it is not diversity per se what is important. Ecosystems are redundant – they have more species than necessary for their "proper" functioning. However, a recent review, summarising field experiments world-wide (Isbell *et al.*, 2011) proves that redundancy is a permanent but shifting condition: the necessary set of species, while always a sub-set of those present, is different in every year, location or habitat. The more locations, ecosystem functions, large environmental shifts, or longer timespan are considered, the more of the species present will play an important role – even if not everywhere, every time.

But perhaps we are completely on the wrong track if we seek to monetarize the value of nature to us? In a recent update, Costanza *et al.* (2014) feel compelled to exonerate themselves from the excesses of the monetarizing approach, acknowledging that certain important values cannot be monetarized. However, what if the whole approach is faulty? A strong warning signal is provided by the eminent scholar of economics, a professor of philosophy, Michael Sandel. In his book (Sandel, 2013), he describes how economists have been gradually emboldened by their successes, aggressively seeking to extend the validity of their approach to more and more areas of life. Originally, economics was an attempt to describe the workings of the market. Emboldened by their success, economists started to extend their approach to whole nations, then other areas of human behaviour. In the 1980ies, they were making claims that human behaviour, and even all areas of human enterprise can not only be described, but understood by the economic approach, and money is the common currency by which this can also be measured. And this is plainly not so, as Sandel convincingly argues (ch. 22 in Sandel, 2013).

An even more profound question can also be formulated: is the world to be understood, and its various parts handled, guided by only their utility to humans? In the slender book "The value of species", Edward McCord (McCord, 2012) presents profound arguments that if only those things that have value for humans remain, we cannot keep or create a liveable world for our descendants. To a large extent, humans are now able to shape the world as they wish. What should be the guiding principles?

It seems that in this quest, utilitarianism is a trap, because if we equate value with human benefit, little will remain of our world. Proponents of the ES valuation still hope that more ecology can be brought-into decision making by using this approach, and the outcome will be a better management of the living world. In spite of all the current hype surrounding the ES valuation efforts, this is just that: a hope. The protection of life on earth is too important a thing to leave it exposed to utility as the only criterion, however sophisticated.

References

Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, Oneill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P and van den Belt M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387: 253–260.

Costanza R, de Groot R, Sutton P, van der Ploeg S, Sharolyn J, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S and Turner R K. 2014. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26: 152–158.

Fausto M, Incerti G, Salvatori E, Vitale M, Ricotta C and Costanza R. 2012. Urban ecosystem services: tree diversity and stability of tropospheric ozone removal. *Ecological Applications*, 22: 349–360.

Huston M A. 1997. Hidden treatments in ecological experiments: re-evaluating the ecosystem function of biodiversity. *Oecologia*, 110: 449–460.

Isbell F, Calcagno V, Hector A, Connolly J, Harpole W S, Reich P B, Scherer-Lorenzen M, Schmid B, Tilman D, van Ruijven J, Weigelt A, Wilsey B J, Zavaleta E S and Loreau M. 2011. High plant diversity is needed to maintain ecosystem services. *Nature*, 477: 199–203.

Kubiszewski I, Costanza R, Dorji P, Thoennes P and Tshering K. 2013. An initial estimate of the value of ecosystem services in Bhutan. *Ecosystem Services*, 3: e11–e21.

Losey J E and Vaughan M. 2006. The economic value of ecological services provided by insects. *BioScience*, 56: 311–323.

McCord E L. 2012. *The Value of Species*. New Haven, CT, U.S.A: Yale University Press.

Millennium Ecosystem Assessment (MEA). 2005. *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press.

Naeem S, Thompson L J, Lawler S P, Lawton J H and Woodfin R M. 1995. Empirical evidence that declining species diversity may alter the performance of terrestrial ecosystems. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 347: 249–262.

Sandel M. 2013. *What Money can't Buy. The Moral Limits of the Markets*. London: Penguin.

TEEB Foundation. 2010. *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations*. London and Washington: Earthscan.

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2015.04.002

苹果蠹蛾的综合防控和遗传控制研究进展

申建茹[1+], 武 强[1+], 万方浩[1,2*]

[1]中国农业科学院植物保护研究所,植物病虫害生物学国家重点实验室,北京 100193;

[2]青岛农业大学农学与植物保护学院,山东 青岛 266109

摘要: 苹果蠹蛾是仁果类水果的重要检疫害虫,在世界各地造成了巨大的经济损失。目前对其化学防治、化学生态调控、病毒等防治方法研究较多,但仍不能满足防控该害虫的需要,对新型防控技术的需求日益增强。不育昆虫释放技术(SIT)是一种可控制甚至根除靶标害虫的环境友好型防控技术,但传统 SIT 技术存在一定的局限性,如较难区分性别与筛选雌雄虫、辐射不育昆虫的交配竞争力和适合度降低等问题,这些缺陷随着昆虫遗传修饰技术的发展将得以解决,并将在害虫防控进程中起到积极作用。本文综述了苹果蠹蛾主要防控技术研究现状,介绍了通过遗传修饰技术改善 SIT 的技术策略,并综合分析了我国开展苹果蠹蛾遗传修饰研究情况和将其应用在苹果蠹蛾防控体系中的可行性及优势。

关键词: 苹果蠹蛾; 害虫综合治理; 昆虫不育释放技术; 遗传修饰昆虫; 可行性

The status of the integrated pest management of the codling moth, *Cydia pomonella* (L.) in China, and the prospects for the application of genetically modified insects

Jian-ru SHEN[1+], Qiang WU[1+], Fang-hao WAN[1,2*]

[1]*State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing* 100193, *China*; [2]*Department of Agronomy and Plant Protection, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong* 266109, *China*

Abstract: The codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae), is a worldwide quarantine pest of fruits and nuts. Efforts to control the codling moth in the past mostly relied on broad-spectrum chemical pesticides. Recently, alternative non-chemical control methods such as mating disruption and the granulovirus of *C. pomonella* (CpGV) are increasingly being adopted, the pest could not be eradicated or suppressed effectively. This lead to a demand for new control tactics that are not only effective but also friendly to the environment. The sterile insect technique (SIT) is one of the cost effective methods for eradication or suppression of the target population. However, the traditional SIT have some drawbacks: the amount of radiation required for full sterilization leads to lower competitiveness and field performance than those of the wild type, and the sex identification requires manual separation, making the method very labor-intensive. The developments of the genetically modified insects may address some of these limitations. Research progress in the SIT developmental history and the improvement caused by the genetically modified approach in the codling moth is reviewed, and the advantages and the feasibility of the genetically modified approach for codling moth control in China is also discussed.

Key words: *Cydia pomonella*; IPM; sterile insect technique; genetically modified insect; feasibility

1 苹果蠹蛾的危害、起源及对我国的入侵

苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* (L.),俗称苹果小卷蛾、苹果食心虫,异名有 *Laspeyresia pomonella* (L.)、*Carpocapsa pomonella* (L.)、*Grapholitha pomonella* (L.),属鳞翅目 Lepidoptera 小卷蛾科 Olethreutidae (蔡青年和张青文,2005; 张学祖,1957)。苹果蠹

收稿日期(Received): 2015-06-08 **接受日期(Accepted)**: 2015-09-10

基金项目: 国家"十一五"科技支撑计划项目(2006BAD08A17); 公益性行业(农业)科研专项经费项目(200903042)

作者简介: 申建茹, 女, 博士后。研究方向: 入侵昆虫抗逆性生物防治。E-mail: sjrhappy2008@126.com

[+]同等贡献作者(The two authors contributed equally to this work)

[*]通讯作者(Author for correspondence), E-mail: wanfanghaocaas@163.com

蛾是苹果的主要害虫,也是全球最重要的检疫性害虫之一。其以幼虫蛀食果肉、果心和种子,从而严重降低果实品质,并造成大量的落果,对产量影响很大(金瑞华,1997; 翟小伟等,2010a、2010b; Schwartz & Klassen,1981)。

1.1　起源和分布

苹果蠹蛾可能起源于欧亚大陆中南部地区,即欧洲泰加林带南部、前苏联中亚地区和亚洲西南部地区(林伟等,1996)。野生苹果是其最原始的寄主(Drake *et al.*,2000),苹果、梨、杏、桃、野山楂、野生酸苹果和山楂等植物也是其适宜寄主。苹果蠹蛾的自然传播主要靠自身的飞行或风力和气流,幼虫和蛹可随虫果、果品包装箱、填充物和运载工具等进行远距离传播。19 世纪后,随着苹果种植面积扩大,苹果蠹蛾的危害范围也逐步增大,迄今为止,已分布于全世界的 69 个国家和地区,除东亚以外的所有苹果和梨产地都受到危害(Franck *et al.*, 2007)。

1.2　入侵我国历史

苹果蠹蛾在我国的发生已有 50 多年的历史。1957 年,苹果蠹蛾首次被发现在我国新疆局部发生(张学祖,1957),至 20 世纪 80 年代初期,新疆发生普遍,受害较重(巴哈提古丽,2009)。1986 年苹果蠹蛾向东扩散入侵甘肃省;1989 年到达敦煌市,之后一路向东扩散,连续在酒泉、张掖和嘉峪关市部分县发生(金瑞华,1997; 翟小伟等,2010a)。2007 年,苹果蠹蛾跨越河西走廊进入兰州,并向陕西省苹果优势产区逼近(门秋雷等,2012)。2006 年在黑龙江省牡丹江市东宁县发现苹果蠹蛾,之后在牡丹江市和鸡西市的大部分地区发生(于广胜,2011; 赵星民,2011),并威胁到我国东部苹果优势产区。此外,在宁夏、内蒙古和吉林等省、自治区也有发生(刘伟等,2012; 张润志等,2012)。

苹果蠹蛾在我国的适生区广泛,除上述已入侵的省份外,还包括了我国其他苹果、梨等产区,如陕西、山西、河北、北京、天津、山东和辽宁等省区(杨瑞,2008)。随着交通和旅游的发展,苹果蠹蛾的潜在扩张趋势严重威胁到我国甘肃陇东南、黄土高原苹果优势产区和东部地区果业生产和出口产业,其一旦扩散蔓延至这些水果产区,将给我国水果生产和销售带来毁灭性的灾难。因此,制定科学有效的检疫和防控技术,有效阻止其在我国的进一步扩张,保护我国水果安全生产,是当前迫切需要解决的问题。

2　苹果蠹蛾的综合防控现状

2.1　非疫区建设和疫区的虫源根除

对于非疫区,每年采用信息素诱捕策略监测苹果蠹蛾的发生。一旦确认为疫区,则采用综合防治方法进行根除,即化学防治、性诱剂防治和耕作等措施相结合,也可以同时采用其他方法,以达到最好的防治效果。另外,还必须采取应急状态下的一些检疫措施,包括停止疫区和非疫区内一切植物材料的调运、追查疫情的来源、清理果园等,以防止疫情的进一步传播。

2.2　疫区的综合防治现状

2.2.1　*化学防治*　化学防治是控制苹果蠹蛾的主要措施。传统的化学防治方法依赖于广谱杀虫剂的单一控制策略(Pringle *et al.*,2003; Riedl *et al.*, 1998),如长期使用有机磷杀虫剂。然而,化学处理频率和强度的增加导致苹果蠹蛾对各类杀虫剂产生抗性。1928 年美国发现砷酸盐对苹果蠹蛾的杀虫效果降低是其抗性的首次报道(Hough,1928)。此后各国陆续报道了苹果蠹蛾对各种杀虫剂的抗性(Bush *et al.*,1993; Cutright,1954),且发现了交互抗性现象(Reyes *et al.*,2007)。对杀虫剂的抗性已成为苹果蠹蛾化学防治所面临的主要问题之一。

2.2.2　*化学生态调控*　化学防治会伤害捕食性和寄生性天敌,从而降低生物防治的效果,同时会严重影响授粉昆虫,进而间接影响果实产量,所以不依赖于杀虫剂的防控策略更具安全性(Witzgall *et al.*,2008)。化学生态调控方法具有高效、无毒、专一性强、不伤害益虫、不污染环境等优点,逐步成为监控苹果蠹蛾的重点策略。苹果蠹蛾化学生态调控是以信息化合物为应用基础(Witzgall *et al.*, 2005),主要包括应用性信息素进行大区域的交配干扰和以寄主植物源气味进行诱集 2 个方面。该方法在苹果蠹蛾的监测、诱杀和防治方面取得了较好的效果,并减少了农药的使用(Pasqualini *et al.*, 2005; Witzgall *et al.*,2005、2008)。但其控害效果在很大程度上受虫口密度的制约,只有在虫口密度较低时才能有效控制种群数量,而在密度太高时不易奏效(Calkins *et al.*,2000; Trimble,1995)。因此,

在实施交配干扰前必须在生长季节早期辅以杀虫剂或颗粒体病毒等防治措施。此外,化学生态调控的诱杀效果受到地形、气候、降雨、风向等生态因子的影响。

2.2.3 生物防治——苹果蠹蛾颗粒体病毒 苹果蠹蛾颗粒体病毒(Granulovirus of codling moth, CpGV)于 1964 年从墨西哥受侵染的幼虫体内分离得到(Tanada,1964)。该病毒是高效的昆虫特异性病毒,在发生苹果蠹蛾的地区广泛存在(Kundu *et al.*,2003; Rezapanah *et al.*,2002)。其基因型一般分为 CpGV-M、CpGV-R 和 CpGV-E 等 3 种(Crook *et al.*,1985; Harvey & Volkman,1983),保守性很高。

最初 CpGV 的商业化产品均以 CpGV-M 为基础菌株,1965~1972 年将 CpGV-M 大量培养并形成商业化制剂 SAN406。随后 15 年的时间里该产品的应用非常成功,成为法国、瑞士和德国苹果蠹蛾杀虫剂抗性治理的关键组分。在欧洲,该制剂在仁果类水果上的应用面积将近 10 万 hm^2(Eberle & Jehle,2006)。目前 CpGV 产品仍多基于 CpGV-M,单一种类的病毒长期广泛应用导致虫体抗性的快速出现。自 2004 年起,德国和法国在频繁应用 CpGV 的有机果园中陆续检测到 CpGV 对苹果蠹蛾杀虫活性的降低(Eberle & Jehle,2006; Zichova *et al.*,2013),某些苹果蠹蛾种群的抗性比例甚至超过了 1000 倍(Asser-Kaiser *et al.*,2007)。因此,鉴定和分离更高毒力的 CpGV 分离株,尤其是与 CpGV-M 具有遗传差异的病毒株(Berling *et al.*,2009; Crook *et al.*,1985; Eberle *et al.*,2008; Zichova *et al.*,2013),能够辅助治理病毒抗性,如伊朗分离株 CpGV-I12 能够杀死对 CpGV-M 产生抗性的苹果蠹蛾幼虫(Eberle *et al.*,2008)。但是,新型病毒株的发现以及商业化应用比较困难。

2.2.4 农业防治 苹果蠹蛾一年发生 1~3 代,危害活动时期长达 7 个月。幼虫孵化盛期也是蛀果高峰期,对果实的危害程度最大。秋季末 5 龄老熟幼虫寻找越冬场所,以滞育幼虫在松动的树皮、树洞或根际土壤中做茧越冬。根据苹果蠹蛾的发生危害规律,可以在开春前及时摘除树上的僵果,并将干枯枝、落叶、烂果和杂草彻底清出果园,集中烧毁或深埋,以降低当年虫口基数(张学祖,1957)。在产卵高峰期,摘除着卵量大的虫果;发现虫眼果及时摘除并处理;秋末在树干基部围捆纸板以诱集越冬幼虫;刮除老树皮,消灭潜藏在树皮里的越冬老熟幼虫等。这些措施能够显著降低第 2 年的虫源基数,减少苹果蠹蛾的危害。

2.2.5 生物遗传控制——不育昆虫释放技术(Sterile insect technique, SIT) (1)SIT 及其在苹果蠹蛾上的研究和应用。SIT 是一种对环境无毒无害的环境友好型可持续性控制方法。传统 SIT 使用特定辐射源将害虫辐射致不育或亚不育,大量的不育昆虫释放到野外后与野生雌性交配,产生的后代不能存活或不育,最终通过种群自毁的方式抑制或根除靶标昆虫种群(Klassen & Curtis, 2005; Knipling, 1955)。SIT 具有物种特异性,释放的不育雄虫只与靶标雌虫交配,即使最相近的物种也不受影响;应用 SIT 方法控制害虫不易产生抗性;另外,SIT 与其他生物防治方法具有协同增效作用,如寄生物、天敌和病原等(Carpenter *et al.*,2005)。

1995 年以来,美国(Calkins *et al.*,2000)、阿根廷、加拿大(Bloem *et al.*, 2005; Vreysen *et al.*, 2010)、南非(Addison,2005)等国相继大规模应用 SIT 技术对苹果蠹蛾进行防控,并取得了显著效果,证明应用传统 SIT 可以较有效地控制苹果蠹蛾的发生与危害。近年来,学者们改进了苹果蠹蛾的饲养技术以提高其飞行和扩散能力、生活史参数、耐辐射性及交配竞争能力等(Vreysen *et al.*,2010)。多位学者从苹果蠹蛾 SIT 技术的不育机理、剂量策略、质量控制及释放技术等方面进行分析(刘伟等,2012; 路大光和王华嵩,2002; 钟国华等,2012),认为该技术可成为我国苹果安全生产的重要技术支撑。

(2)传统 SIT 的不足。传统 SIT 技术也有一定的局限性,如不能区分与筛选雌雄性别、辐射不育昆虫的交配竞争力和适合度降低等。苹果蠹蛾的 SIT 项目是释放其雌雄混合的群体,不育雌性除直接危害作物外,还影响不育雄性搜索和寻找野生雌性的效率,从而影响控害效果(Alphey & Andreasen,2002)。同时,致苹果蠹蛾不育的辐射剂量高达 250~350 Gy,远高于地中海实蝇 *Ceratitis capiata* WiedGman 等双翅目昆虫(Blomefield *et al.*,2010; LaChance,1967),高辐射剂量所导致的竞争力低下问题也严重制约着 SIT 技术对苹果蠹蛾的控害效果(刘伟等,2012; Bloem *et al.*,1999; Scolari *et al.*, 2009)。另外,为评估 SIT 的防控效果,需要区分释放区域内诱集的不育雄虫与野生雄虫(Simmons *et*

al.,2011)。传统 SIT 技术是通过荧光粉对辐射处理后的雄虫蛹进行标记,然而野生雄虫与释放雄虫接触后可能会沾上荧光粉从而造成错误判断,且该方法存在费用昂贵、对人体有害等缺点(Hagler & Jackson,2001)。

3　昆虫遗传修饰技术及对 SIT 的改进

1982 年,首例遗传修饰转化果蝇成功获得,该研究通过 P-转座元件将调控野生型玫瑰色眼睛颜色基因插入果蝇基因组(Rubin & Spradling,1982),开启了昆虫遗传修饰研究的先河。经过 30 多年的发展,基于昆虫遗传转化技术的基因表达系统已成为对一些模式昆虫进行基因功能分析等研究的重要试验工具,还能用于昆虫自身性状的改良等(周秀娟等,2008)。目前研究较多也最有应用前景的是其与传统 SIT 技术的结合,克服了传统 SIT 技术的上述缺陷,从而达到更好更稳定的防控效果。昆虫遗传修饰技术对传统 SIT 的改进主要表现在以下几个方面。

3.1　释放前转化昆虫的标记

针对荧光粉标记的可靠性低和有毒性等缺点,昆虫遗传修饰技术利用荧光蛋白 EGFP 和 DsRed 构建荧光标记品系,该标记易于鉴定且更加准确(Catteruccia *et al.*,2005; Handler,2001; Scolari *et al.*,2008)。此外,遗传修饰技术可以用组织特异性表达基因的启动子驱动特定性荧光基因的表达,如精巢特异表达基因的启动子能使荧光标记只在雄虫精巢中稳定表达,更便于准确检测(Scolari *et al.*,2008)。该方法还可以检测到与不育雄虫交配的野生雌虫,便于评估其防控效果等。

3.2　致死或不育处理

针对辐射剂量会降低昆虫本身的交配竞争力等缺陷,通过遗传修饰技术可以实现用胚胎早期特异高表达基因的启动子驱动四环素调控激活因子(tetracycline-controlled transactivator,tTA),进而调控致死基因如头部退化缺陷基因(*head involution defective*,*hid*)等的异位表达,达到使其在卵期或发育早期致死的目的,即为胚胎或发育早期条件性致死体系(Conditional embryonic lethality system)的原理。该体系首先在果蝇中建立(Horn & Wimmer,2003),并成功转移应用于地中海实蝇和加勒比按实蝇 *Anastrepha suspensa* Loew 上(Schetelig *et al.*,2009; Schetelig & Handler,2012a)。该类转化品系雄虫不需要辐射处理,与野生雌虫交配后产生的子代在胚胎期或幼虫早期死亡,克服了辐射不育导致雄虫适合度降低及竞争力下降等缺点(Gong *et al.*,2005; Schetelig *et al.*,2009)。

3.3　性别区分与筛选

遗传修饰技术在实现有效性别分离的同时,能获得只产雄虫的雌性特异致死品系,即在胚胎条件致死体系的基础上,用雌性特异表达基因的启动子代替胚胎早期发育基因的启动子来驱动该体系,如卵黄蛋白基因等,使致死作用只发生在雌虫中,即可达到雌虫特异致死的效果,但一般为成虫期致死。利用雌性特异剪接基因,如性别决定相关基因 *transformer* 和 *doublesex* 等的特定内含子区调控致死基因只在雌虫胚胎中表达,也可达到使雌虫在胚胎期特异死亡的目的。该转化体系已在加勒比按实蝇(Schetelig & Handler,2012b)和地中海实蝇(Ogaugwu *et al.*,2013)上成功建立。

4　苹果蠹蛾遗传修饰转化研究现状与限制性因素

基于昆虫遗传修饰技术的发展,多个鳞翅目物种的转化品系已成功构建,如家蚕 *Bombyx mori* L.(Tamura *et al.*,2000; Uhlirova *et al.*,2002)和棉红铃虫 *Pectinophora gossypiella* (Saunders)(Peloquin *et al.*,2000)等。学者们使用显性致死基因系统进行了苹果蠹蛾转化昆虫释放技术方面的相关研究,并建立了检测单拷贝转化基因的筛选体系(Paladino *et al.*,2014; Maréc *et al.*,2005、2007)。Ferguson *et al.*(2011)用携带 EGFP 标记基因的 *piggyBac* 转座载体,成功建立了苹果蠹蛾的绿色荧光标记品系,该品系的绿色荧光标记能够稳定遗传。这些成果都初步展示了在苹果蠹蛾中开展遗传修饰研究的可行性,其荧光标记品系的获得也为构建遗传不育或致死品系打下了基础。

但是,缺少苹果蠹蛾遗传修饰研究所需元件的相关分子信息是阻碍该项研究快速开展的主要因素之一。果蝇和家蚕是遗传修饰转化研究最多且最为深入的模式昆虫,但这 2 个物种并不是农业害虫或卫生害虫。果蝇特异性的遗传工具不能直接用于其他昆虫物种,其启动子的表达强度或驱动致死效应基因表达的能力等方面存在很大差异(Ber-

ger *et al.*, 1985; Koukidou *et al.*, 2006)。遗传修饰不育或致死策略中提到的各种遗传元件,如内源的胚胎早期发育基因的启动子、雌性特异剪接元件和细胞凋亡基因等是该不育体系所必需的。但是,在缺乏基因组信息的情况下,通过抑制消减杂交(SSH)技术、反向 PCR、同源克隆或 RACE 等基本分子生物学技术手段获取此类遗传元件的难度非常大。

开展苹果蠹蛾的遗传修饰研究将是一项极具挑战性且意义极其重大的工作。朱虹昱等(2012)从转座子、遗传性别品系、显性条件致死基因等方面对遗传修饰昆虫相关的部分元素和步骤进行了简要总结,认为这项技术将对我国苹果蠹蛾大区域综合治理工作产生重大的有益影响;但同时指出,此项目的开展对研究人员掌握相关理论知识和开展大量相关分子生物学试验技术的熟练度要求较高,且需要较大科研课题经费的支撑,及政府相关行政机构的支持和管理。

5 我国开展苹果蠹蛾遗传修饰转化品系研究前景

苹果蠹蛾自 1957 年传入我国以来,蔓延速度有逐年加快的趋势,而我国的水果主产区基本全是苹果蠹蛾的适生区,一旦传入很难根除。昆虫遗传修饰技术是一种可以有效控制或根除害虫的新技术,因此在我国开展苹果蠹蛾遗传修饰转化品系研究具有多方面的基础和优势。

5.1 地理分布与非疫区建设的需求

苹果蠹蛾在我国发生近 50 年来,仅在西北地区的新疆和甘肃 2 个省普遍发生,内蒙古、宁夏、黑龙江、辽宁和吉林有零星分布,因此西北地区疫情仍是防治的重点。这种现象的形成是由于苹果蠹蛾在从西向东传播扩散过程中受到千里戈壁滩的阻隔,形成其在我国西北地区的岛状分布效应,这为释放苹果蠹蛾遗传转化品系提供了最佳地理条件。为保护我国优势苹果产区的安全生产,国家正在实施检疫性有害生物阻截带控制工程和以苹果蠹蛾为主要防控对象的苹果非疫区建设工程(王福祥等,2012),引入和应用基于辐射或遗传修饰的苹果蠹蛾是非常必要的。

5.2 种群遗传结构波动小

SIT 技术或遗传修饰不育或致死技术是通过雄性的交配行为达到根除靶标物种的目的。释放的转化昆虫与野生种群之间以及不同地理种群之间的生殖隔离都会显著削弱防治效果(Benedict *et al.*, 2009)。我国西北地区多年来虽然存在苹果蠹蛾多次传入的风险,但是从国内的种群遗传结构分析发现,新疆的苹果蠹蛾种群具有明显的奠基者效应(Men *et al.*, 2013),推测新疆和甘肃地区种群的亲缘关系可能比较接近,西北地区不同地理种群之间可能不存在生殖隔离。另外,将室内饲养 14 代的苹果蠹蛾种群与越冬种群的成虫混合饲养,能够产下可育性后代(数据未发表)。这些结果都预示了释放遗传修饰苹果蠹蛾能够发挥较好的控害效果。

5.3 分子生物学基础

热激基因的启动子具备优良的通用启动子活性,研究最多的是果蝇的 *hsp*70 热激启动子,常用来驱动昆虫遗传修饰转化品系中报告基因或其他基因的表达,且已用作多种昆虫转化品系的构建。但在非果蝇物种中获得外源基因高效表达的最佳方案是筛选靶标物种中高效驱动热激基因表达的内源 *hsp*70 启动子。申建茹等(2011a、2011b)已克隆得到了苹果蠹蛾的热激基因 *hsp*90 和 2 个 *hsp*70 cDNA 全长,下一步将克隆这些基因的上游启动序列,并将其用于遗传修饰转化品系相应载体的构建。

另外,我国入侵生物学专家已经联合昆虫分子生物学和生物信息学领域的很多专家,开展了苹果蠹蛾的全基因组和年龄阶段及性别差异组织转录组测序工作。该项目的完成将为苹果蠹蛾遗传修饰的研究提供所需遗传元件的分子生物学信息,极大地推动苹果蠹蛾遗传修饰转化品系的构建。

5.4 实验室种群饲养技术和田间防效评估体系

苹果蠹蛾大量饲养的历史和生物学研究都为其遗传修饰转化品系的顺利构建提供了基础条件(Bloem *et al.*, 2004; Calkins & Parker, 2005)。申建茹(2011a)在参考国外苹果蠹蛾人工饲料配方的基础上,筛选并改进了胚芽苹果粉法、小麦胚芽法和斑豆法 3 种人工饲料的配方,建立了健康的实验室种群;并对实验种群的生物学潜能和各种适应性进行了研究,为开展苹果蠹蛾遗传修饰转化研究提供了虫源保障。

翟小伟等(2010a、2010b)从苹果蠹蛾生物学特性出发,研究了性信息素诱捕器和空间格局对苹果

蠹蛾雄蛾诱捕效果的影响、性信息素和植物挥发物不同配方对苹果蠹蛾的诱捕效果、苹果蠹蛾成虫与性信息素和寄主植物的互作行为等,并取得了很大的进展;同时,在苹果蠹蛾不同防治方法的效果评定等方面具备了较好的研究基础,这为评估释放遗传修饰苹果蠹蛾的防效提供了条件。

6　小结与展望

化学防治一直是害虫防治的主要手段,但是"3R"问题的产生已经引起了人们的高度关注,多种苹果蠹蛾的控制策略仍存在很多问题,不能满足防控或根除该害虫的需要,因此对新防控技术的需求日益增强。不育昆虫技术是一种对环境无毒无害的特异性根除或抑制靶标种群的方法,且不存在抗性问题。利用遗传修饰技术改进传统 SIT,是利用生物技术防控害虫的新思路,研究以生物技术为手段的苹果蠹蛾遗传转化品系,是今后苹果蠹蛾防控技术发展的趋势(Ferguson *et al.*,2011)。

苹果蠹蛾不育昆虫释放技术的研究和应用在国际上已有较成熟的经验,遗传修饰转化研究也取得了阶段性的进展,验证性研究已经证实了能够用于该物种转化的启动子和标记基因,同时证明了构建转化品系的可行性。目前,苹果蠹蛾的饲养技术、生物学研究和检测调查技术均已较为完善,且具备了一定的分子生物学研究基础,这为苹果蠹蛾遗传修饰转化品系的构建以及释放效果的评定创造了条件。我们应充分利用现在的各种优势,开展苹果蠹蛾的遗传防控技术和应用基础研究,使其与生物防治和化学生态调控等其他防控方法协同作用,形成以遗传修饰昆虫释放技术为核心的防控技术体系,并进行示范应用和推广,以控制其扩散,逐步降低其种群数量,并最终达到在我国根除苹果蠹蛾的目的。

参考文献

巴哈提古丽. 2009. 苹果蠹蛾在新疆地区的危害情况和防治措施. 防护林科技, (4): 118-120.

蔡青年, 张青文. 2005. 苹果蠹蛾//万方浩, 郑小波, 郭建英. 重要农林外来入侵物种的生物学与控制. 北京: 科学出版社, 363-375.

金瑞华. 1997. 检疫性危险害虫苹果蠹蛾在我国分布的调查研究. 中国科学基金, (2): 124-125.

林伟, 林长军, 庞金. 1996. 生态因子在苹果蠹蛾地理分布中的作用. 植物检疫, 10(1): 1-7.

刘伟, 徐婧, 张润志. 2012. 苹果蠹蛾不育昆虫释放技术研究进展. 应用昆虫学报, 49(1): 268-274.

路大光, 王华嵩. 2002. 鳞翅目害虫辐射遗传不育研究的回顾与展望. 核农学报, 16(1): 58-63.

门秋雷, 陈茂华, 张雅林, 冯纪年. 2012. 中国疫区内苹果蠹蛾微卫星位点的扩增稳定性及遗传多样性. 植物保护学报, 39(4): 341-346.

申建茹. 2011a. 苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* (L.)人工繁育和热胁迫适应性研究. 重庆: 西南大学.

申建茹, 李明福, 陈乃中, 王进军, 万方浩. 2011b. 苹果蠹蛾热激蛋白 Hsp90 基因的克隆及热胁迫下的表达分析. 昆虫学报, 54(11): 1236-1248.

王福祥, 刘慧, 杨桦, 徐婧, 张润志. 2012. 苹果非疫区建设中的苹果蠹蛾监测与防控. 应用昆虫学报, 49(1): 275-280.

杨瑞. 2008. 苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* (L.)在中国的适生性研究. 杨陵: 西北农林科技大学.

于广胜. 2011. 牡丹江苹果蠹蛾的发生规律及防治措施. 中国植保导刊, 31(7): 47-48.

翟小伟, 刘万学, 张桂芬, 万方浩, 徐洪富, 蒲崇建. 2010a. 苹果蠹蛾性信息素诱捕器田间诱捕效应影响因子. 应用生态学报, 21(3): 801-806.

翟小伟, 刘万学, 张桂芬, 万方浩, 徐洪富. 2010b. 苹果蠹蛾不同防治方法的控害效应比较. 植物保护学报, 37(6): 547-551.

张润志, 王福祥, 张雅林, 陈汉杰, 罗进仓, 王勤英, 刘万学, 艾尼瓦尔·木沙, 等. 2012. 入侵生物苹果蠹蛾监测与防控技术研究——公益性行业(农业)科研专项(200903042)进展. 应用昆虫学报, 49(1): 37-42.

张学祖. 1957. 苹果蠹蛾(*Carpocapsa pomonella* L.)在我国的新发现. 昆虫学报, 7(4): 467-472.

赵星民. 2011. 北方寒地苹果蠹蛾发生规律及综合防治研究. 植物检疫, 25(1): 87-88.

钟国华, 陈永, 杨红霞, 胡美英. 2012. 昆虫辐照不育技术研究与应用进展. 植物保护, 38(2): 12-17.

周秀娟, 牛长缨, 雷朝亮. 2008. 转基因昆虫的应用研究进展. 昆虫知识, 45(3): 368-373.

朱虹昱, 徐婧, 张润志. 2012. 转基因在苹果蠹蛾不育昆虫释放技术中的应用. 应用昆虫学报, 49(1): 20-26.

Addison M F. 2005. Suppression of codling moth *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera: Tortricidea) populations in South African apple and pear orchards using sterile insect release. *Acta Horticulturae*, 671: 555-557.

Alphey L and Andreasen M. 2002. Dominant lethality and insect population control. *Molecular and Biochemical Parasitology*, 121: 173-178.

Asser-Kaiser S, Fritsch E, Undorf-Spahn K, Kienzle J, Eberle

K E and Gund N A. 2007. Rapid emergence of baculovirus resistance in codling moth due to dominant, sex-linked inheritance. *Science*, 317: 1916-1918.

Benedict M Q, Knols B G, Bossin H C, Howell P I, Mialhe E, Caceres C and Robinson A S. 2009. Colonisation and mass rearing: learning from others. *Malaria Journal*, 8(Suppl 2): S4.

Berger E M, Marino G and Torrey D. 1985. Expression of *Drosophila hsp*70-CAT hybrid gene in *Aedes* cells induced by heat shock. *Somatic Cell Molecular Genetics*, 11: 371-377.

Berling M, Rey J B, Ondet S J, Tallot Y, Soubabere O, Bonhomme A, Sauphanor B and Lopez-Ferber M. 2009. Field trials of CpGV virus isolates overcoming resistance to CpGV-M. *Virologica Sinica*, 24: 470-477.

Bloem K A, Bloem S and Carpenter J E. 2005. Impact of moth suppression/eradication programmes using the sterile insect technique or inherited sterility// Dyck V A, Hendrichs J and Robinson A S. *Sterile Insect Technique: Principles and Practice in Area-wide Integrated Pest Management*. Dordrecht, the Netherlands: Springer, 677-700.

Bloem S, Bloem K A, Carpenter J E and Calkins C O. 1999. Inherited sterility in codling moth (Lepidoptera: Tortricidae): effect of substerilising doses of radiation on wild competitiveness. *Environmental Entomology*, 28: 669-674.

Bloem S, Carpenter J E, Bloem K A, Tomlin L and Taggart S. 2004. Effect of rearing strategy and gamma radiation on field competitiveness of mass-reared codling moths (Lepidoptera: Tortricidae). *Journal of Economic Entomology*, 97: 1891-1898.

Blomefield T L, Bloem S and Carpenter J E. 2010. Effect of radiation on fecundity and fertility of codling moth *Cydia pomonella* (Linnaeus) (Lepidoptera: Tortricidae) from South Africa. *Journal of Applied Entomology*, 134: 216-220.

Bush M, Abdel-Aal Y A I and Rock G. 1993. Parathion resistance and esterase activity in codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) from North Carolina. *Journal of Economic Entomology*, 86: 660-666.

Calkins C O, Knight A L, Richardson G and Bloem K A. 2000. Area-wide population suppression of codling moth// Tan K H. *Area-wide Control of Fruit Flies and Other Insect Pests*. Pulau Pinang: Penerbit Universiti Sains Malaysia, 215-219.

Calkins C O and Parker A G. 2005. Sterile insect quality// Dyck V A, Hendrichs J and Robinson A S. *Sterile Insect Technique: Principles and Practice in Area-wide Integrated Pest Management*. Dordrecht, the Netherlands: Springer, 269-296.

Carpenter J E, Bloem S and Marec F. 2005. Inherited sterility in insects// Dyck V A, Hendrichs J and Robinson A S. *Sterile Insect Technique: Principles and Practice in Area-wide Integrated Pest Management*. Dordrecht, the Netherlands: Springer, 115-146.

Catteruccia F, Benton J P and Crisanti A. 2005. An anopheles transgenic sexing strain for vector control. *Nature Biotechnology*, 23: 1414-1417.

Crook N E, Spencer R A, Payne C C and Leisy D J. 1985. Variation in *Cydia pomonella* granulosis virus isolates and physical maps of the DNA from three variants. *Journal of General Virology*, 66: 2423-2430.

Cutright C R. 1954. A codling moth population resistant to DDT. *Journal of Economic Entomology*, 47: 189-190.

Drake S R, Robertson H R, Moffitt H R and Hansen J D. 2000. A two-component quarantine treatment for postharvest control of codling moth on apple cultivars intended for export to Japan and Korea. *HortTechnology*, 10: 186-194.

Eberle K E, Asser-Kaiser S, Sayed S M, Nguyen H T and Jehle J A. 2008. Overcoming the resistance of codling moth against conventional *Cydia pomonella* granulovirus (CpGV-M) by a new isolate CpGV-I12. *Journal of Invertebrate Pathology*, 98: 293-298.

Eberle K E and Jehle J A. 2006. Field resistance of codling moth against *Cydia pomonella* granulovirus (CpGV) is autosomal and incompletely dominant inherited. *Journal of Invertebrate Pathology*, 93: 201-206.

Ferguson H J, Neven L G, Thibault S T, Mohammed A and Fraser M. 2011. Genetic transformation of the codling moth, *Cydia pomonella* L, with *piggyBac* EGFP. *Transgenic Research*, 20: 201-214.

Franck P, Reyes M, Olivares J and Sauphanor B. 2007. Genetic architecture in codling moth populations: comparison between microsatellite and insecticide resistance markers. *Molecular Ecology*, 16: 3554-3564.

Gong P, Epton M J, Fu G L, Scaife S, Hiscox A, Condon K C, Condon G C, Morrison N I, *et al*. 2005. A dominant lethal genetic system for autocidal control of the Mediterranean fruitfly. *Nature Biotechnology*, 23: 453-456.

Hagler J R and Jackson C G. 2001. Methods for marking insects: current techniques and future prospects. *Annual Review of Entomology*, 46: 511-543.

Handler A M. 2001. Polyubiquitin-regulated DsRed marker for transgenic insects. *Biotechniques*, 31: 820-828.

Harvey J P and Volkman L E. 1983. Biochemical and biological variation of *Cydia pomonella* (codling moth) granulosis virus. *Virology*, 124: 21-34.

Horn C and Wimmer E. 2003. A transgene-based, embryo-specific lethality system for insect pest management. *Nature Biotechnology*, 21: 64-70.

Hough W S. 1928. Relative resistance to arsenical poisoning of two codling moth strains. *Journal of Economic Entomology*, 21: 325-329.

Klassen W and Curtis C F. 2005. History of sterile insect technique // Dyck V A, Hendrichs J and Robinson A S. *Sterile Insect Technique: Principles and Practice in Area-wide Integrated Pest Management, Part I*. Dordrecht, the Netherlands: Springer, 3-36.

Knipling E F. 1955. Possibilities of insect control or eradication through the use of sexually sterile males. *Journal of Economic Entomology*, 48: 459-462.

Koukidou M, Klinakis A, Reboulakis C, Zagoraiou L, Tavernarakis N, Livadaras I, Economopoulos A and Savakis C. 2006. Germ line transformation of the olive fly *Bactrocera oleae* using a versatile transgenesis marker. *Insect Molecular Biology*, 15: 95-103.

Kundu J K, Stara J, Kocourek F and Pultar O. 2003. Polymerase chain reaction assay for *Cydia pomonella* granulovirus detection in *Cydia pomonella* population. *Acta Virologica*, 47: 153-157.

LaChance L E. 1967. The induction of dominant lethal mutations in insects by ionizing radiation and chemicals-as related to the sterile-male technique of insect control // Wright J W and Pal R. *Genetics of Insect Vectors of Disease*. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier, 617-650.

Maréc F, Neven L G and Fukova I. 2007. Developing transgenic sexing strains for the release of non-transgenic sterile male codling moths (*Cydia pomonella*) // Vreysen M J B, Robinson A S and Hendrichs J. *Area-wide Control of Insect Pests*. Dordrecht, the Netherlands: Springer, 103-111.

Maréc F, Neven L G, Robinson A S, Vreysen M, Goldsmith M R, Nagaraju J and Franz G. 2005. Development of genetic sexing strains in Lepidoptera: from traditional to transgenic approaches. *Journal of Economic Entomology*, 98: 248-259.

Men Q L, Chen M H, Zhang Y L and Feng J N. 2013. Genetic structure and diversity of a newly invasive species, the codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae) in China. *Biological Invasions*, 15: 447-458.

Ogaugwu C E, Schetelig M F and Wimmer E A. 2013. Transgenic sexing system for *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae) based on female-specific embryonic lethality. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 43: 1-8.

Paladino L Z C, Nguyen P, Síchová J and Marec F. 2014. Mapping of single-copy genes by TSA-FISH in the codling moth, *Cydia pomonella*. *BMC Genetics*, 15(Suppl 2): S15.

Pasqualini E, Schmidt S, Espinha I, Civolani S, Cristofaro A D, Molinari F, Villa M, Ladurner E, Sauphanor B and Ioriatti C. 2005. Effects of the kairomone ethyl (2E, 4Z)-2, 4-decadienoate (DA 2313) on the oviposition behaviour of *Cydia pomonella*: preliminary investigations. *Bulletin of Insectology*, 58: 119-124.

Peloquin J J, Thibault S T, Staten R and Miller T A. 2000. Germ-line transformation of pink bollworm (Lepidoptera: Gelechiidae) mediated by the *piggyBac* transposable element. *Insect Molecular Biology*, 9: 323-333.

Pringle K L, Eyle D K and Brown L. 2003. Trends in codling moth activity in apple orchards under mating disruption using pheromones in the Elgin area, Western Cape Province, South Africa. *African Entomology Journal*, 11: 65-75.

Reyes M, Franck P, Charmillot P J, Loriatti C, Olivares J, Pasaualini E and Sauphanor B. 2007. Diversity of insecticide resistance mechanisms and spectrum in European populations of the codling moth, *Cydia pomonella*. *Pest Management Science*, 63: 890-902.

Rezapanah M R, Kharrazi-Pakdel A, Kamali K and Huber J. 2002. Survey on natural occurrence of *Cydia pomonella* granulovirus in apple orchards of Iran. *Applied Entomology and Phytopathology*, 69(2): 49-55.

Riedl H, Bloemfield T L and Giliomee J H. 1998. A century of codling moth control in South Africa: II current and future status of the codling moth management. *Journal of the South African Society for Horticultural Science*, 8(2): 32-54.

Rubin G M and Spradling A C. 1982. Genetic transformation of *Drosophila* with transposable element vectors. *Science*, 218: 348-353.

Schetelig M F, Caceres C, Zacharopoulou A, Franz G and Wimmer E A. 2009. Conditional embryonic lethality to improve the sterile insect technique in *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae). *Biomedcentral Biology*, 7: 4.

Schetelig M F and Handler A M. 2012a. Strategy for enhanced transgenic strain development for embryonic conditional lethality in *Anastrepha suspensa*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109: 9348-9353.

Schetelig M F and Handler A M. 2012b. A transgenic embryonic sexing system for *Anastrepha suspensa* (Diptera: Tephritidae). *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 42: 790-795.

Schwartz P H and Klassen W. 1981. Estimate of losses caused by insects and mites to agricultural crops // Pimentel D. *Handbook*

of Post Management. Boca Raton: CRC Press, 15-77.

Scolari F, Schetelig M F, Bertin S, Malacrida A R, Gasperi G and Wimmer E A. 2008. Fluorescent sperm marking to improve the fight against the pest insect *Ceratitis capitata* (Wiedemann; Diptera: Tephritidae). *New Biotechnology*, 25 (1): 76-84.

Scolari F, Schetelig M F, Gabrieli P, Siciliano P, Gomulski L M, Karam N, Wimmer E A, Malacrida A R and Gasperi G. 2009. Insect transgenesis applied to tephritid pest control. *Journal of Applied Entomology*, 132(9-10): 820-831.

Simmons G S, McKemey A R, Morrison N I, O'Connell S, Tabashnik B E, Claus J, Fu G, Tang G, *et al*. 2011. Field performance of a genetically engineered strain of pink bollworm. *PLoS ONE*, 6: e24110.

Tamura T, Thibert C, Royer C, Kanda T, Abraham E, Kamba M, Komoto N, Thomas J L, *et al*. 2000. Germline transformation of the silkworm *Bombyx mori* L. using a *piggyBac* transposon-derived vector. *Nature Biotechnology*, 18: 81-84.

Tanada Y. 1964. A granulosis virus of the codling moth, *Carpocapsae pomonella* (Linnaeus) (Olethreutidae, Lepidoptera). *Journal of Insect Pathology*, 6: 378-380.

Trimble R M. 1995. Mating disruption for controlling the codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera, Tortricidae), in organic apple production in southwestern Ontario. *The Canadian Entomology*, 127: 493-505.

Uhlirova M, Asahina M, Riddiford L M and Jindra M. 2002. Heat-inducible transgenic expression in the silkmoth *Bombyx mori*. *Development Genes and Evolution*, 212: 145-151.

Vreysen M J B, Carpenter J E and Marec F. 2010. Improvement of the sterile insect technique for codling moth *Cydia pomonella* (Linnaeus) (Lepidoptera Tortricidae) to facilitate expansion of field application. *Journal of Applied Entomology*, 134: 165-181.

Witzgall P, Ansebo L, Yang Z H, Angeli G, Sauphanor B and Bengtsson M. 2005. Plant volatiles affect oviposition by codling moths. *Chemoecology*, 15(2): 77-83.

Witzgall P, Stelinski L, Gut L and Thomson D. 2008. Codling moth management and chemical ecology. *Annual Review of Entomology*, 53: 503-522.

Zichova T, Stara J, Kundu J K, Eberle K E and Jehle J A. 2013. Resistance to *Cydia pomonella* granulovirus follows a geographically widely distributed inheritance type within Europe. *Biocontrol*, 58: 525-534.

(责任编辑:杨郁霞)

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2015.04.003

分子模拟技术及其在苹果蠹蛾代谢杀虫剂分子机制研究中的应用进展

杨雪清[1,2], 刘吉元[2,3], 张雅林[2*]

[1]沈阳农业大学植物保护学院,辽宁 沈阳 110866; [2]西北农林科技大学植保资源利用与病虫害防治教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100; [3]中国人民解放军第四军医大学药学系药物化学教研室, 陕西 西安 710032

摘要: 苹果蠹蛾是世界性重要的果树害虫,也是我国一类进境检疫性有害生物,严重威胁着我国黄土高原和环渤海湾优势苹果产区的果业生产。化学防治是当前苹果蠹蛾防治最经济有效的措施,然而频繁使用化学杀虫剂引发的抗药性问题也在世界范围内相继报道。代谢抗性是苹果蠹蛾抗性中重要的机制,苹果蠹蛾解毒酶代谢杀虫剂的分子机制是当前代谢抗性研究的重点方向。基于分子模拟的方法在相关研究中扮演着越来越重要的角色,本文综述了分子模拟涉及的主要方法及其在苹果蠹蛾代谢杀虫剂分子机制研究中的应用,并展望未来可能的研究方向。

关键词: 苹果蠹蛾; 分子模拟; 解毒酶; 杀虫剂; 代谢抗性

Molecular simulation and its application progress on molecular metabolic mechanisms of insecticide in *Cydia pomonella*

Xue-qing YANG[1,2], Ji-yuan LIU[2,3], Ya-lin ZHANG[2*]

[1]*College of Plant Protection, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning* 110866, *China*; [2]*Key Laboratory of Plant Protection Resources & Pest Management of Ministry of Education, College of Plant Protection, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; [3]*Department of Medicinal Chemistry and Pharmaceutical Analysis, the Fourth Military Medical University of the Chinese People's Liberation Army, Xi'an, Shaanxi* 710032, *China*

Abstract: The codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae) is a major global pest of pome fruits, and it was considered a serious invasive species, threatening the safety of fruit production areas in Loess Plateau and Bohai Bay. The effective management of the codling moth mainly depends on chemical insecticides. However, a major problem associated with chemical control of the codling moth is the development of insecticide-resistance worldwide. Among them, metabolic resistance is the main mechanism for *C. pomonella* resistance. To understand the metabolic mechanisms of insecticide resistance in *C. pomonella*, the molecular changes of detoxification enzymes were examined. Molecular simulation based methods can be important for such related research. This paper reviews the molecular simulation methods and its application in elucidating molecular metabolic mechanisms of insecticide resistance in *C. pomonella*. Future potential research directions using molecular simulation are put forward.

Key words: *Cydia pomonella*; molecular simulation; detoxifying enzyme; insecticide; metabolic resistance

苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* (L.)属鳞翅目卷蛾科小卷蛾属,是世界性的果树重要害虫(Fuentes-Contreras *et al.*,2007; Reyes *et al.*,2011; Voudouris *et al.*,2011),也是我国重要的检疫性害虫之一。频繁使用化学杀虫剂使得苹果蠹蛾种群对各类化学杀虫剂产生了严重的抗药性(Brun-Barale *et al.*, 2005; Reyes *et al.*,2007; Yang & Zhang,2015)。苹果蠹蛾对杀虫剂抗性的机理研究是近年来的研究热点,其中解毒代谢增强是苹果蠹蛾抗药性最普遍的机制(Reyes *et al.*,2007)。苹果蠹蛾中参与解毒

收稿日期(Received): 2015-05-13 **接受日期(Accepted)**: 2015-06-07
基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(200903042); 国家自然科学基金(31501666)
作者简介: 杨雪清, 男, 博士, 讲师。研究方向: 昆虫毒理与抗药性。E-mail: sling233@hotmail.com
* 通讯作者(Author for correspondence), E-mail: yalinzh@nwsuaf.edu.cn

代谢的酶系包括多功能氧化酶(MFO)、谷胱甘肽转移酶(GST)和羧酸酯酶(CarE)(Rodríguez *et al.*, 2011; Voudouris *et al.*, 2011)。然而目前从分子水平研究苹果蠹蛾解毒酶代谢杀虫剂分子机制的研究还相对较少。

当杀虫剂作用于昆虫后,靶蛋白、解毒酶以及杀虫剂分子之间必然存在着相互识别、相互反应和信息传递,并伴随着分子间的静电相互作用、范德瓦斯相互作用和疏水相互作用以及化学键的形成和断裂。然而,通过传统的试验手段研究上述反应过程中的每个步骤都十分困难。随着计算机技术、量子化学、生物信息学和结构生物学等研究学科的快速发展,使得利用分子模拟技术研究解毒酶—杀虫剂的相互作用、揭示代谢杀虫剂的分子机制以及杀虫剂的合理设计与改造和对解毒酶的定点突变改造成为了可能。分子模拟(Molecular simulation, MS)是以计算机技术为依托,以量子化学、统计力学为理论基础,对物理和化学过程中分子的微观行为进行仿真的一门新兴学科(陈正隆等,2007; 吕玲红等,2014)。

1 分子模拟方法

目前,分子模拟广泛应用于分子生物学中,用于认知、预测和模拟蛋白质、核酸的结构和性质,以及模拟 DNA 的双螺旋结构。分子模拟方法主要有量子力学方法(Quantum mechanics, QM)、分子力学方法(Molecular mechanics, MM)、分子动力学(Molecular dynamics, MD)和蒙地卡罗方法(Monte carlo, MC)(陈正隆等,2007)。

2 分子模拟研究涉及的主要方法

2.1 同源模建

蛋白质的结构决定其功能。但要获得一个蛋白质准确的分子结构并不容易。在传统方法中,X-射线单晶衍射技术和核磁共振技术(NMR)是解析蛋白分子结构的经典方法,但前者需要将纯化的靶蛋白(>10 mg · mL^{-1})结晶,而许多蛋白质在如此高的表达量时容易形成包涵体,需要通过变/复性才能使蛋白质正确折叠;后者则要求靶蛋白在非常高的浓度下可溶、稳定、不聚集,且该技术难以解析大分子质量的蛋白质分子结构。此外,解析蛋白质分子结构费时费力,花费巨大(刘吉元,2014)。

蛋白质三维结构预测是目前研究蛋白质结构信息的一个快速、有效、低廉的手段,包括从头预测法、比较模建法和折叠识别法(Cozzetto & Tramontano, 2005)。其中,比较模建法又称同源模建(Homology modeling),是目前最成熟、最常用的预测方法。Swiss model(Schwede *et al.*, 2003)和 Modeller 是目前最常用的免费同源构建工具。除此之外,Sybyl、Discovery Studio 和 MOE 等商业化软件也可用于同源模建。学者普遍认为,蛋白质在进化过程中三维结构的保守性远大于氨基酸序列的保守性。因此,当 2 个蛋白质氨基酸序列的一致性超过 30% 时,它们的三维结构高度一致。根据该理论,对于一个未知三维结构的蛋白质,只要在蛋白质晶体结构数据库(Protein data bank, PDB)中找到与其同源性较高、晶体结构的 R-factor 以及解析度较好的蛋白质,便能以该蛋白质的晶体结构为模板,构建未知蛋白质的三维结构模型(刘吉元,2014)。对构建好的结构模型还需要进行结构优化和评估。目前常用的模型评估方法主要有拉氏分布图、Contact 曲线图、Profiles-3D 等(Luethy *et al.*, 1992)。同源模建过程见图 1。

2.2 分子对接

深入研究蛋白质(受体)与小分子(配体)的相互作用,需要获得准确的蛋白质—小分子复合物的空间结构。分子对接(Molecular docking)是分子模拟的重要方法之一,是预测蛋白质与小分子结合模式的重要手段。在受体—配体相互作用过程中,主要有 2 个学说,即“Lock and key”学说(也称“锁钥”学说)和“Induced fit”学说(又称“诱导契合”学说)。“锁钥学说”指的是,药物(配体)与蛋白质分子(受体)相互识别过程类似于钥匙与锁关系,这种识别关系认为受体与配体相互识别是刚性的几何结构匹配过程,只有当它们的立体结构互补才能结合。随着受体学说的发展,Koshland(1958)提出了“Induced fit”学说,他认为受体与配体的形状不一定是互补的,在受体与配体相互作用时,受体柔性的结合口袋会随着配体的诱导而发生构象上的变化,以达到最佳的互补性契合。通过分子对接确定复合物中的配体与受体的结合模式,研究它们之间关键的相互作用,为揭示配体的作用机制和设计新的配体提供了理论基础。目前,分子对接广泛应用于药物设计、材料设计等领域。

昆虫解毒酶并不是杀虫剂的作用靶标(受体)，但许多杀虫剂与解毒酶结合得十分紧密，它们的 IC_{50} 甚至可达 μmol · L^{-1} 级别(Liu *et al.*, 2014; Prapanthadara *et al.*, 1998; Yang *et al.*, 2014)。因此，利用分子对接研究解毒酶和杀虫剂的相互作用，已经成为研究害虫代谢杀虫剂分子机制的重要手段。

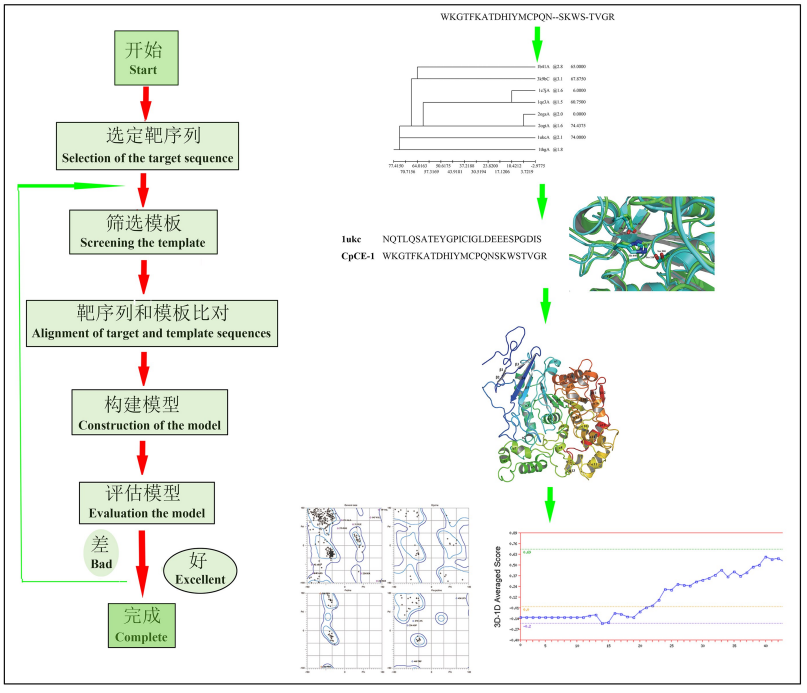

图 1　同源模建示意图(以 CpCE-1 为例)(引自 Yang *et al.*, 2014)

Fig.1　Schematic diagram of Homology modeling (a case study of CpCE-1) (quoted from Yang *et al.*, 2014))

随着受体学说的不断完善，分子对接模型从基于几何空间匹配的刚性模型发展成为基于几何空间匹配与能量匹配的柔性模型。几何空间匹配是蛋白质与配体之间产生相互作用的基础，能量匹配是分子间保持稳定结合的基础。各种分子对接方法对体系均有一定的简化，根据简化的程度和方式，可以将分子对接分为 3 类：刚性对接、半柔性对接和柔性对接。刚性对接是指在计算过程中，配体与受体的构像均不发生变化，适用于大分子之间的对接。该方法简化程度最高，计算量相对较小且粗略；半柔性对接是指对接过程中小分子的构像发生一定程度的变化，但大分子的构像保持不变或仅有部分氨基酸残基发生构象变化。半柔性对接在对接精确度和计算量方法采取了折中的策略，应用非常广泛，Dock 和 Autodock 是目前应用最为广泛的分子对接软件；柔性对接方法在对接过程中允许研究体系的构像发生自由变化，由于变量随着体系的原子数呈几何级数增长，因此柔性对接方法的计算量非常大，适合精确考察分子间的识别情况，应用有限，Accelrys 公司研发的 Affinity(Affinity, Accelrys Inc.USA)就是用于柔性对接的工具(刘吉元，2014)。

2.3　分子动力学模拟

分子动力学模拟(Molecular dynamics simulations, MDS)是基于经典力学、模拟生物大分子运动行为的一种分子模拟方法。分子动力学模拟依靠牛顿力学模拟每个原子及体系的运动，计算体系中所有原子的运动轨迹，通过当前状态预测其在任意时刻的运动状态(刘吉元，2014)。分子动力学模拟的经典牛顿运动方程可表示为：

$$\vec{F}_i = m_i \vec{a}_i = m_i \frac{\partial^2 \vec{r}_i}{\partial t^2} = -\frac{\partial U(\vec{r}_i)}{\partial \vec{r}_i} \quad (1)$$

$$U(r_i) = \sum \frac{1}{2} k_{ij}^b (r_{ij} - r_{ij}^0)^2 + \sum \frac{1}{2} k_{ijk}^\theta (\theta_{ijk} - \theta_{ijk}^0)^2 + \sum \frac{1}{2} k_\xi (\xi_{ijkl} - \xi_{ijkl}^0)^2 + \sum k_\phi [1 + \cos(n\phi - \phi_0)] + r_{ij} \sum [\frac{C_{ij}^{12}}{r_{ij}^{12}} - \frac{C_{ij}^6}{r_{ij}^6} + \frac{q_i q_j}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon_r r_{ij}} i] \quad (2)$$

式中，$\vec{F}_i$ 表示所有其他原子作用到第 i 原子上

的合力，m_i 表示第 i 原子的质量，$\vec{a_i}$ 表示第 i 原子的加速度，$\vec{r_i}$ 是第 i 原子的位移矢量，$U(\vec{r_i})$ 为体系势函数，k_{ij}^b、k_{ijk}^θ、k_ξ、k_ϕ 分别表示共价键的键能、键角能、非正常二面角能以及正常二面角能的力常数，C_{ij}^{12} 和 C_{ij}^6 代表范德瓦斯相互作用势的系数，q_i 和 q_j 分别代表第 i 和第 j 原子的电荷，r_{ij} 代表第 i 和第 j 原子之间的距离（刘吉元，2014）。

常规的分子动力学模拟流程包括初始构型的确定、能量优化与体系缓慢升温（Heating）、平衡相（Equilibrium phase）和生产相（Production phase）4 个阶段。

目前，AMBER 是进行分子动力学模拟最常用的分子力场。

2.4 结合自由能计算

受体和配体之间结合自由能（Binding free energy）是评价不同状态下复合物稳定性、描述分子间相互作用的核心问题数据。在配体和受体的相互作用过程中，牵涉到 2 类相互作用，即非键相互作用和共价相互作用。非键相互作用包括静电相互作用和范德瓦斯相互作用等，这些相互作用都可以通过力场计算进行比较简单的表达；而共价相互作用则牵涉到化学键的断裂和生成，需要用量子力学的方法进行考察（刘吉元，2014）。在药物分子和受体的相互作用时，一般只牵涉到非键相互作用；而共价相互作用只存在少数体系中。根据热力学原理，结合自由能和结合常数 K_i 存在定量的关系（Ost *et al.*，2004）：$\Delta G = -RT\ln K_i$。

自由能的计算方法主要分为 3 类：自由能微扰（Free energy perturbation，FEP）、热力学积分（Thermodynamic integration，TI）、基于主方程的分子力学/泊松—波尔兹曼表面积方法（Molecular mechanics poisson-boltzmann surface area，MM-PBSA）（Chong *et al.*，1999；Gohlke & Klebe，2002；Marco *et al.*，2005）。FEP 法在原理上比较严格，计算结果也较为精确，但需要长时间的数据采集，对计算体系有严格的限制，只能适合较为简单的情况；TI 法把结合自由能分解为不同的相互作用能量项，通过一组训练集并利用统计方法得到自由能计算的经验公式，取样简单，计算量小，但这类方法不能很好地考虑体系的柔性以及溶剂效应，因此一般只能对一些体系做有限预测，只能作为初筛的手段；MM-PBSA 法是近几年发展起来的基于分子动力学采样的自由能预测方法，该方法可用来计算配体与蛋白质受体复合物体系的绝对和相对结合自由能（Srinivasan *et al.*，1998）。在此基础上还派生了分子力学/广义波恩表面积方法（Molecular mechanics generalized born surface area，MM-GBSA）（Kollman *et al.*，2000）。MM-PBSA 和 MM-GBSA 这 2 种方法都是基于分子动力学采样，不需要通过线性拟合而得到经验参数，对不同体系具有较好的普适性，计算速度快且结果较为准确，已成为应用前景最为广阔的计算结合自由能的方法（刘吉元，2014）。

3 分子模拟在苹果蠹蛾代谢抗性研究中的应用

近年来，分子模拟技术在昆虫解毒酶与杀虫剂的相互作用中得到了一定程度的应用。利用同源模建，Li *et al.*（2004）以芽孢杆菌 CYP102 为模板构建了棉铃虫 *Helibthis armigera* Hübner CYP6B1 和 CYP6B8 的 3D 模型，并成功预测了棉铃虫 CYP6B1 和 CYP6B8 的活性口袋和参与催化的关键氨基酸。Chiu *et al.*（2008）对冈比亚按蚊 *Anopheles gambiae* Giles CYP6Z1 和 CYP6Z2 的底物结合位点进行了比较，并利用分子模拟方法分析了 CYP6Z1 和 CYP6Z2 与 DDT 的结合能力和对 DDT 的潜在代谢能力；预测结果与代谢试验相吻合，表明 CYP6Z1 能够代谢 DDT。Stevenson *et al.*（2011）将溴氰菊酯与冈比亚按蚊 CYP6M2 进行了对接，并发现溴氰菊酯结合于靠近亚铁血红素催化中心的 4′-苯氧基苄基。利用分子模拟和量子力学/分子力学（QM/MM）方法，Li *et al.*（2014）预测并证实了在冈比亚按蚊 epsilon 家族的 agGSTe-2 中，Arg 112、Glu 116 和 Phe 120 对 DDT 的代谢至关重要。然而，分子模拟技术在苹果蠹蛾代谢杀虫剂分子机制研究中的应用尚处于起步阶段。

3.1 在苹果蠹蛾 GSTs 代谢杀虫剂分子机制研究中的应用

近年来，越来越多的昆虫 GSTs 蛋白晶体结构得到解析，促使昆虫 GSTs 代谢杀虫剂分子机制的

研究进入了一个新的局面。Chen *et al.*(2003)从 DDT 抗性冈比亚按蚊中解析了一个 δ 家族的 GST 蛋白 agGSTd1-6 的晶体结构(PDB ID：1pn9)，该蛋白由 8 个 α-螺旋和 4 个 β-折叠构成，这是昆虫中第一个解析的 GST 晶体结构，也拉开了昆虫 GSTs 蛋白结构研究和利用同源模建研究昆虫 GSTs 功能的序幕。此后，Kakuta *et al.*(2013)解析了家蚕 GST 蛋白 bmGSTu 的晶体结构(PDB ID：3AY8)，并发现该蛋白中谷胱甘肽结合区域内的氨基酸残基 Val 55、Glu 67、Ser 68、Tyr 7 和 Ser 12 对 GST 的催化功能至关重要。

以 agGSTd1-6 晶体结构为模板，利用同源模建技术，Liu *et al.*(2014)构建了苹果蠹蛾 CpGST1 的三维结构。利用高效液相色谱检测，Liu *et al.*(2014)发现原核表达的 CpGST1 蛋白能代谢高效氯氟氰菊酯，但不能代谢甲基毒死蜱。CpGST1 活性位点包含 2 个亚位点，即 GSH 结合位点(G 位点)和疏水性结合位点(H 位点)。其中，G 位点由主要的亲水和极性的氨基酸残基 Ser 10、Gln 39、His 51、Thr 52、Val 53、Glu 65、Ser 66 和 Arg 67 组成；H 位点由疏水性的氨基酸残基 Val 7、Ala 11、Pro 12、Leu 34、His 35、Tyr 106、Phe 109、Tyr 114、Leu 117、Phe 118、Phe 205 和 Val 209 组成。通过分子对接发现，高效氯氟氰菊酯的苯醚基团主要占据了蛋白活性位点中的 H 亚位点，而其余基团与 G 位点中的氨基酸残基相互作用；苯醚基团与 Val 7、Ala 11、Leu 34、Tyr 114、Phe 118、Phe 205 和 Val 209 之间具有较强的疏水作用，三氟甲基上的氟原子与 Gln 50 具有极性作用。此外，高效氯氟氰菊酯与 CpGST1 形成 2 对氢键，包括羰基上的氧原子和 Thr 52 侧链的 OH 间形成的氢键(1.7 Å)以及氰基上的氮原子 与 Val 53 间形成的另外一对氢键(2.0 Å)。氢键网络好像“钳子”一样，紧紧地将高效氯氟氰菊酯固定在 CpGST1 的活性区域。与高效氯氟氰菊酯不同的是，甲基毒死蜱仅结合于活性位点中的 G 亚位点。甲基毒死蜱的三氯吡啶基团与 Thr 52 具有极性作用；磷酸基团上的氧原子与 Ser 66 上的 NH 形成了一对氢键(1.9 Å)，但带负电荷的 Glu 65 残基通过静电排斥，使得磷酸基团与该氨基酸残基保持一定的距离(图 2)。静电排斥作用降低了甲基毒死蜱与 CpGST1 的结合能力，加之甲基毒死蜱-CpGST1 复合物中只存在一对氢键，这就使得甲基毒死蜱与 CpGST1 很难形成一个相对稳定的复合体。结合自由能计算表明，CpGST1-高效氯氟氰菊酯复合物的稳定性明显强于 CpGST1-甲基毒死蜱，其结合自由能 ΔG_{bind} 分别为-28.26 和-16.08 kJ·mol^{-1}(杨雪清，2014；Liu *et al.*，2014)。

3.2　在苹果蠹蛾 CarE 代谢杀虫剂分子机制研究中的应用

CarE 是昆虫体内含量最丰富的蛋白之一，此类蛋白与含羧酸酯、酰胺酯、硫酸酯等基团的内源或外源物质的代谢有关(Birner-Gruenberger *et al.*，2012)，还与昆虫的生长发育、生殖等重要行为有关(李永强，2012)。

为从结构上研究 CarE 与杀虫剂的相互作用，进而揭示 CarE 代谢杀虫剂的分子机制，Jackson *et al.*(2013)解析了铜绿蝇 *Lucilia cuprina* (Wied.) 羧酸酯酶 LcαE7 的晶体结构，这为利用同源模建等分子模拟技术在其他昆虫中开展 CarE 代谢含酯类键化合物的分子机制研究奠定了基础。但在此之前，CarE 晶体结构在昆虫中尚未见报道。

Yang *et al.*(2014)利用同源模建，选择了与 CpCE-1 氨基酸序列一致性高达 38%的黑曲霉 *Aspergillus niger* EstA(PDB：1ukc：A)为模板，构建了 CpCE-1 的三维模型；在此基础上进行分子对接、分子动力学模拟和计算丙氨酸扫描。研究表明，CpCE-1(GenBank 登录号：KC832922)中 Asn 233 残基在 CpCE-1 与乙酰甲胺磷作用中的能量贡献近乎于热点“Hot-spot”(Moreira *et al.*，2007)，突变为丙氨酸 Ala 后，模拟的结合自由能差值 ΔG_{bind} 为 3.66 kcal·mol^{-1}；乙酰甲胺磷对野生型 CpCE-1 的抑制中浓度 IC_{50} 值为 42.18 μmol·L^{-1}，而对 N232A 突变体的 IC_{50} 值高于 10000 μmol·L^{-1}；计算得到的 N232A 结合自由能差值 ΔG_{bind} 为 3.17 kcal·mol^{-1}，与计算机模拟值接近；代谢试验表明野生型CpCE-1 能够代谢乙酰甲胺磷，而 N232A 不能代谢乙酰甲胺磷，表明 Asn 232 是与乙酰甲胺磷结合和代谢的关键氨基酸残基。N232A 突变后，“烟斗状”的活性口袋基本构象并没有发生明显的改变，蛋白的正确折叠也没有受到影响，说明 N232A 突变对酶活性无影响，但 N232A 突变使得 CpCE-1 产生了一个向里延伸的空洞(图 3)，这或许是 N232A 突变体难以结合和代谢乙酰甲胺磷的原因。

在其他昆虫中，CarE 发生 A/G137D 和 W251L/S(A/G137 和 W251 分别对应 CpCE-1 中的 A121 和 W233)突变是昆虫对有机磷杀虫剂产生抗性的普遍机制(Cui *et al.*,2011; Newcomb *et al.*,1997),而这个与乙酰甲胺磷结合和代谢的关键氨基酸 Asn 232 残基在其他抗性昆虫种群中均未被报道。通过对采自甘肃武威、法国、德国卡尔斯鲁厄、瑞士库尔、澳大利亚、白俄罗斯明斯克、意大利莫利塞 7 个地理种群的苹果蠹蛾成虫样本的 *CpCE*-1 基因第 122、232、233 位氨基酸残基进行突变检测,结果表明,233 位点发生 N232T 和 N232A 的频率分别为 20%和 30%(Yang *et al.*,2014),表明 Asn 232 与乙酰甲胺磷的代谢密切相关,而该位点发生突变可能与苹果蠹蛾对乙酰甲胺磷潜在抗性的形成有关(刘吉元,2014; 杨雪清,2014)。

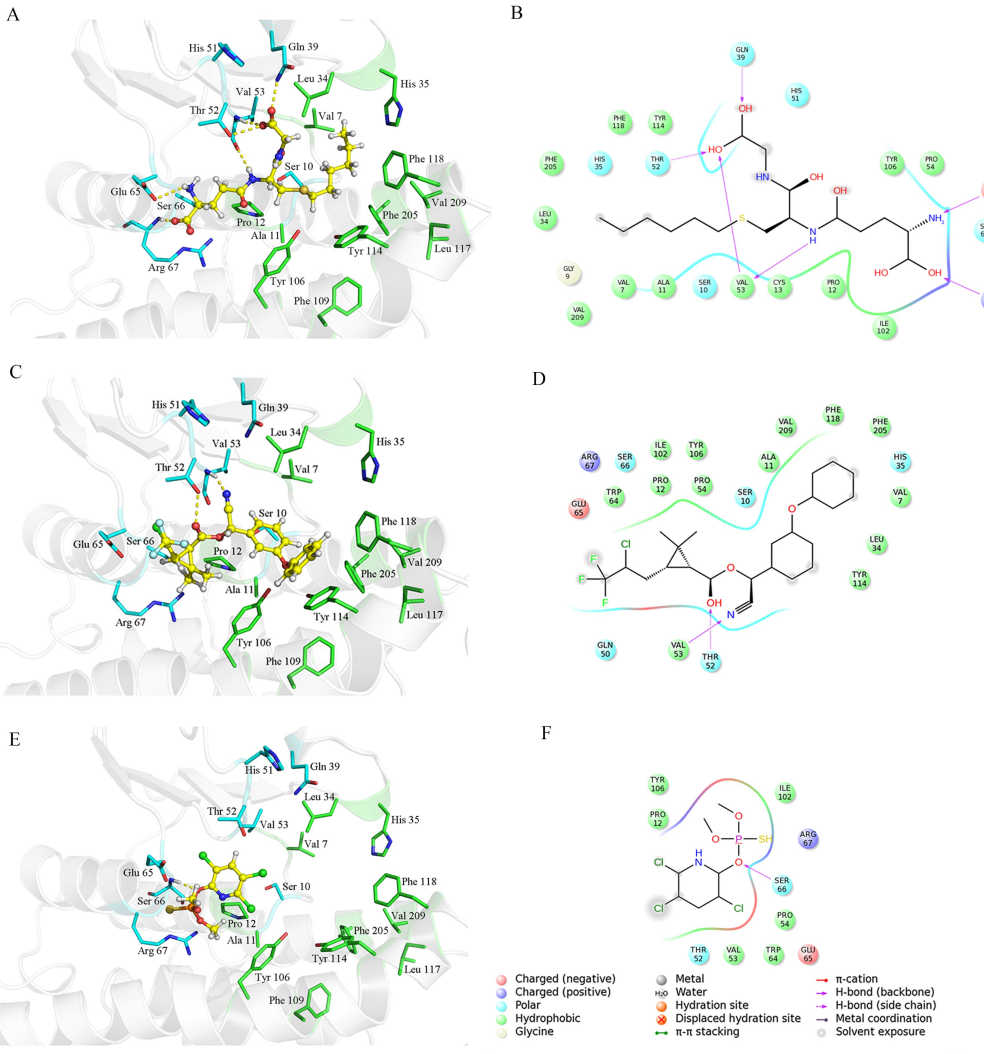

图 2　3 个分子与 CpGST1 结合位点示意图(引自 Liu *et al.*,2014)

Fig.2　The schematic representation of the CpGST1 3D model around all of the substrates' binding site(quoted from Liu *et al.*,2014)

抑制剂 GTX 与 CpGST1 结合模式(A)和作用网络(B);高效氯氟氰菊酯与 CpGST1 结合模式(C)和作用网络(D);甲基毒死蜱与 CpGST1 结合模式(E)和作用网络(F)。黄色虚线表示氨基酸残基与小分子基团形成的氢键。

The binding model (A) and interaction diagram (B) of GTX with CpGST1. The binding model (C) and interaction diagram (D) of lambda-cyhalothrin with CpGST1. The binding model (E) and interaction diagram (F) of chlopyrifos-methyl with CpGST1. The yellow dotted lines show hydrogen bonds among the atoms for the key residues and the substrates.

有关苹果蠹蛾代谢杀虫剂分子机制的研究相对较少。除上述研究外,Yang *et al.*(2013)还克隆了一个苹果蠹蛾 P450 基因 *CYP9A61*,并对其时空表达模式和杀虫剂诱导表达模式进行了研究。研究结果表明,*CYP9A61* 可能与高效氯氟氰菊酯的代谢相关(Yang *et al.*,2013);啶虫脒对苹果蠹蛾 3 龄

幼虫有较好的胃毒活性，其 IC_{50} 值为 3.16 mg · L^{-1}，但亚致死剂量的啶虫脒对解毒酶 *CYP9A61*、*CpGST1* 及 *CpCE*-1 基因表达量无明显影响（Yang *et al.*，2015）；亚致死剂量的乙基毒死蜱和高效氯氟氰菊酯能显著诱导苹果蠹蛾 *CpCE*-1 基因表达上调，并抑制异源表达的 CpCE-1 蛋白羧酸酯酶活性（Yang，2015）。为进一步阐述解毒酶基因在杀虫剂代谢和潜在抗性形成方面的作用，分子模拟是阐释解毒酶与杀虫剂相互作用的强有力的方法。上述研究表明，分子模拟与生物学试验相结合是研究昆虫解毒酶与杀虫剂相互作用的可靠方法，为深入研究昆虫解毒酶对杀虫剂代谢分子机制提供了理论保障。

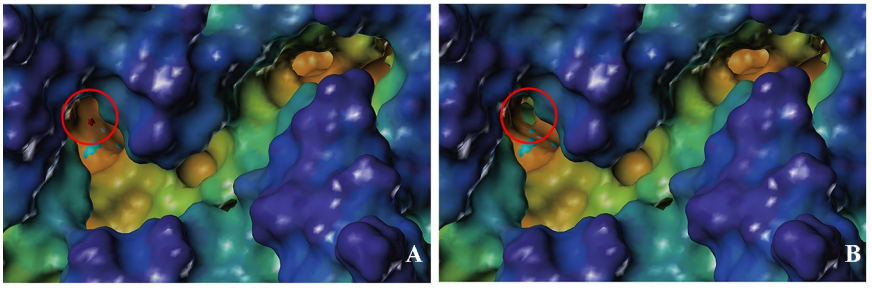

图 3　抗原表位图（引自 Yang *et al.*，2014）

Fig.3　Cavity depth potential surface of the wild CpCE-1 and N232A（quoted from Yang *et al.*，2014）

A：野生型 Wild CpCE-1；B：N232A 突变体 Mutant N232A。

4　展望

随着计算机技术、量子化学和统计力学的发展，分子模拟技术在蛋白质的结构和功能研究方面的应用将越来越广泛。仅靠传统的试验方法难以揭示所研究的科学问题的机制，联合分子模拟和其他方法已成为现今研究的主流。当然，基于蛋白质序列的分子模拟，可能忽视了活体细胞中的修饰对其构型的影响，使得结果不够可靠。随着相关理论和技术的不断完善和发展，分子模拟的准确度越来越高，已成为蛋白质功能研究中强有力的工具。分子模拟技术应用最广、最有发展前景的领域是药物开发和设计。虽然目前分子模拟技术在昆虫学研究中的应用尚处在起步阶段，但随着人们对分子模拟技术认识的逐步深入，以及对利用计算机科学、生物信息学、统计力学等多学科联合探究生物学问题的意识的增强，分子模拟将在苹果蠹蛾等昆虫代谢杀虫剂分子机制研究中，以及抗性机制的阐释和基于受体结构的新杀虫剂的设计、具有杀虫剂残留去除功能的昆虫源工程菌的开发等方面研究中发挥巨大作用。

参考文献

陈正隆，徐为人，汤立达. 2007. 分子模拟的理论与实践. 北京：化学工业出版社.

李永强. 2012. 棉铃虫羧酸酯酶表达及解毒作用研究. 杨凌：西北农林科技大学.

刘吉元. 2014. 蛋白质与配体相互作用分子模拟研究. 杨凌：西北农林科技大学.

吕玲红，陆小华，刘维佳，朱育丹. 2014. 分子模拟在化学工程中的应用. 化学反应工程与工艺，30(3)：193-202.

杨雪清. 2014. 苹果蠹蛾解毒酶基因的克隆及功能研究. 杨凌：西北农林科技大学.

Birner-Gruenberger R，Bickmeyer I，Lange J，Hehlert P，Hermetter A，Kollroser M，Recberger G N and Kühnlein R P. 2012. Functional fat body proteomics and gene targeting reveal in vivo functions of *Drosophila melanogaster* α-Esterase-7. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*，42：220-229.

Brun-Barale A，Bouvie J C，Pauron D，Bergé J B and Sauphanor B. 2005. Involvement of a sodium channel mutation in pyrethroid resistance in *Cydia pomonella* L. and development of a diagnostic test. *Pest Management Science*，61：549-554.

Chen L，Hall P R，Zhou X E，Ranson H，Hemingway J and Meehan E J. 2003. Structure of an insect δ-class glutathione S-transferase from a DDT-resistant strain of the malaria vector *Anopheles gambiae*. *Acta Crystallographica Section D-Biological Crystallography*，59：2211-2217.

Chiu T L，Wen Z，Rupasinghe S G and Schuler M A. 2008. Comparative molecular modeling of *Anopheles gambiae* CYP6Z1，a mosquito P450 capable of metabolizing DDT. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*，105：8855-8860.

Chong L T，Duan Y，Wang L，Massoval I and Kollman P A. 1999. Molecular dynamics and free-energy calculations applied to affinity maturation in antibody 48G7. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*，96：14330-14335.

Cozzetto D and Tramontano A. 2005. Relationship between multiple sequence alignments and quality of protein comparative models. *Proteins: Structure, Function, and Bioinformatics*, 58: 151-157.

Cui F, Lin Z, Wang H, Liu S, Chang H, Reeck G, Qiao C, Ray M and Kang L. 2011. Two single mutations commonly cause qualitative change of nonspecific carboxylesterases in insects. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 41: 1-8.

Fuentes-Contreras E, Reyes M, Barros W and Sauphanor B. 2007. Evaluation of azinphos-methyl resistance and activity of detoxifying enzymes in codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) from central Chile. *Journal of Economic Entomology*, 100: 551-556.

Gohlke H and Klebe G. 2002. Approaches to the description and prediction of the binding affinity of small-molecule ligands to macromolecular receptors. *Angewandte Chemie International Edition*, 41: 2644-2676.

Jackson C J, Liu J W, Carr P D, Younus F, Coppin C, Meirelles T, Lethier M, Pandey G, Ollis D L, Russell R J, Weik M and Oakeshott J G. 2013. Structure and function of an insect α-carboxylesterase (αEsterase7) associated with insecticide resistance. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110: 10177-10182.

Kakuta Y, Usuda K, Nakashima T, Kimura M, Aso Y and Yamamoto K. 2013. Crystallographic survey of active sites of an unclassified glutathione transferase from *Bombyx mori*. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 1810: 1355-1360.

Kollman P A, Massova I, Reyes C, Kuhn B, Huo S, Chong L, Lee M, Lee T, Duan Y, Wang W, Donini O, Cieplak P, Srinivasan J, Case D A and Cheatham T E. 2000. Calculating structures and free energies of complex molecules: combining molecular mechanics and continuum models. *Accounts of Chemical Research*, 33: 889-897.

Koshland D E. 1958. Application of a theory of enzyme specificity to protein synthesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 44: 98.

Li X C, Baudry J, Berenbaum M R and Schuler M A. 2004. Structural and functional divergence of insect CYP6B proteins: From specialist to generalist cytochrome P450. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101: 2939-2944.

Li Y, Shi X, Zhang Q, Hu J, Chen J and Wang W. 2014. Computational evidence for the detoxifying mechanism of epsilon class glutathione transferase toward the insecticide DDT. *Environmental Science & Technology*, 48: 5008-5016.

Liu J Y, Yang X Q and Zhang Y L. 2014. Characterization of lambda-cyhalothrin metabolizing glutathione S-transferase GST1 from *Cydia pomonella* (L.). *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98: 8947-8962.

Luethy R, Bowie J U and Eisenberg D. 1992. A common cross-species function for the double epidermal growth factor-like modules of the highly divergent *Plasmodium* surface proteins MSP-1 and MSP-8. *Nature*, 356: 83-85.

Marco E, Negri A, Luque F J and Gago F. 2005. Role of stacking interactions in the binding sequence preferences of DNA bis-intercalators: insight from thermodynamic integration free energy simulations. *Nucleic Acids Research*, 33: 6214-6224.

Moreira I S, Fernandes P A and Ramos M J. 2007. Computational alanine scanning mutagenesis — An improved methodological approach. *Journal of Computational Chemistry*, 28: 644-654.

Newcomb R D, Campbell P M, Ollis D L, Cheah E, Russell R J and Oakeshott J G. 1997. A single amino acid substitution converts a carboxylesterase to an organophosphorus hydrolase and confers insecticide resistance on a blowfly. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 94: 7464-7468.

Ost T W B, Clark J P, Anderson J L R, Yellowlees L J, Daff S and Chapman S K. 2004. 4-Cyanopyridine, a versatile spectroscopic probe for cytochrome P450 BM3. *Journal of Biological Chemistry*, 279: 48876-48882.

Prapanthadara L, Ranson H, Somboon P and Hemingway J. 1998. Cloning, expression and characterization of an insect class I glutathione S-transferase from *Anopheles dirus* species B. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 28: 321-329.

Reyes M, Collange B, Rault M, Casanelli S and Sauphanor B. 2011. Combined detoxification mechanisms and target mutation fail to confer a high level of resistance to organophosphates in *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 99: 25-32.

Reyes M, Frank P, Charmillot P J, loriatti C, Olivares J, Pasqualini E and Sauphanor B. 2007. Diversity of insecticide resistance mechanisms and spectrum in European populations of codling moth, *Cydia pomonella*. *Pest Management Science*, 63: 890-902.

Rodríguez M A, Marques T, Bosch D and Avilla J. 2011. Assessment of insecticide resistance in eggs and neonate larvae of *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 100: 151-159.

Schwede T, Kopp J, Guex N and Peitsch M C. 2003. SWISS-MODEL: an automated protein homology-modeling server.

Nucleic Acids Research, 31: 3381-3385.

Srinivasan J, Cheatham T E, Cieplak P, Kollman P A and Case D A. 1998. Continuum solvent studies of the stability of DNA, RNA, and phosphoramidate-DNA helices. *Journal of the American Chemical Society*, 120: 9401-9409.

Stevenson B J, Bibby J, Pignatelli P, Muangnoicharoen S, O′ Neill P M, Lian L Y, Müller P, Nikou D, Steven A, Hemingway J, Sutcliffe M J and Paine M J I. 2011. Cytochrome P450 6M2 from the malaria vector *Anopheles gambiae* metabolizes pyrethroids: Sequential metabolism of deltamethrin revealed. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 41: 492-502.

Voudouris C C, Sauphanor B, Frank P, Reyes M, Mamuris Z, Tsitsipis J A, Vontas J and Margaritopoulos J T. 2011. Insecticide resistance status of the codling moth *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) from Greece. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 100: 229-238.

Yang X Q. 2015. Gene expression analysis and enzyme assay reveal a potential role of the *Carboxylesterase* gene *CpCE*-1 from *Cydia pomonella* in detoxification of insecticides. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, DOI: 10.1016/j.pestbp.2015.10.018.

Yang X Q, Li X C and Zhang Y L. 2013. Molecular cloning and expression of *CYP9A*61: a chlorpyrifos-ethyl and lambda-cyhalothrin-inducible cytochrome P450 cDNA from *Cydia pomonella*. *International Journal of Molecular Sciences*, 14: 24211-24229.

Yang X Q, Liu J Y, Li X C, Chen M H and Zhang Y L. 2014. Key amino acid associated with acephate detoxification by *Cydia pomonella* carboxylesterases based on molecular dynamics with alanine scanning and site-directed mutagenesis. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 54: 1350-1370.

Yang X Q, Wu Z W, Zhang Y L and Barros-Parada B. 2015. Toxicity of six insecticides on codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) and effect on expression of detoxification genes. *Journal of Economic Entomology*, DOI: 10.1093/jee/tov297.

Yang X Q and Zhang Y L. 2015. Investigation of insecticide-resistance status of *Cydia pomonella* in Chinese populations. *Bulletin of Entomological Research*, 105: 316-325.

（责任编辑：郭堂）

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2015.04.004

新疆荒漠绿洲生态区苹果蠹蛾生物学、生态学和防治技术研究与应用进展

郭文超*, 吐尔逊·艾合买提, 付开赟, 丁新华, 许建军, 何 江
新疆农业科学院植物保护研究所/农业部西北荒漠绿洲作物有害生物综合治理重点实验室,
新疆 乌鲁木齐 830091

摘要: 苹果蠹蛾是我国重要的检疫害虫,自 1953 首次在新疆库尔勒地区发现以来,疫情保持不断扩张的趋势,目前已经在我国新疆、甘肃、宁夏、内蒙古、黑龙江、辽宁和吉林 7 个省区发现,对我国苹果产业构成了严重威胁。新疆在苹果蠹蛾生物学、生态学等研究领域起步较早,开展了大量的相关研究和应用工作。本文通过对新疆苹果蠹蛾相关文献的搜集、整理和分析,回顾和总结了新疆绿洲荒漠生态区苹果蠹蛾生物学、生态学和综合防治技术等领域的研究和应用进展,以期对今后该虫的研究和防治提供参考。

关键词: 新疆荒漠绿洲; 苹果蠹蛾; 生物学; 生态学; 防治技术

Review of the current biological and ecological research and control techniques of *Cydia pomonella* (L.) in ecological regions of Xinjiang desert oasis

Wen-chao GUO*, Tursun·AHMAT, Kai-yun FU, Xin-hua DING, Jian-jun XU, Jiang HE
Key Laboratory of Integrated Pest Management on Crop in Northwestern Oasis/Institute of Plant Protection, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Ministry Agriculture P. R. China, Urumqi, Xinjiang 830091, *China*

Abstract: *Cydia pomonella* (L.) is an important quarantine pest in China. Since *C. pomonella* was found in Korla, Xinjiang, in 1953, it has become an invasive species in seven provinces, including Xinjiang, Gansu, Ningxia, Inner Mongolia, Heilongjiang, Liaoning and Jilin. It is a serious threat to apple production. Xinjiang was the first province to start research about the biology, ecology and control techniques of *C. pomonella* and carry out extensive research and work on pest control. Through a literature review, we summarize the current information about the biology and ecology of *C.pomonella* in Xinjiang desert oasis and the existing control techniques. This study provides references and basis for future studies and prevention of the codling moth.

Key words: Xinjiang desert oasis; *Cydia pomonella*; biology; ecology; control technique

苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* (L.) 是世界上具有毁灭性的果树蛀果类害虫之一,已被列为我国对内、对外重大检疫对象。该虫隶属于鳞翅目卷蛾科 Tortricidae 小卷蛾亚科 Olethreutidae 小卷蛾属 *Cydia*,俗称食心虫。苹果蠹蛾原产于欧亚大陆中南部地区,目前广泛分布于世界各地的苹果种植区,我国于 1953 在新疆库尔勒地区首次发现,随后在新疆北部的伊犁河谷地区、塔城地区、乌鲁木齐地区,东疆的吐鲁番地区,南疆的库尔勒市、轮胎县以及阿克苏地区、和田地区和喀什地区的主要县市果园也相继发现。苹果蠹蛾主要危害苹果、沙果、香梨、桃、李、杏、山楂和核桃等几十种水果(张学祖,1957),作为新疆苹果、梨和杏等果树的重要害虫,其发生和危害十分严重(秦晓辉等,2006; 茹克亚·阿不力孜,2009; 张学祖,1957)。每年全疆因苹果蠹蛾为害而造成的受害果树面积达数十万公顷,被害果树的虫果率普遍超过 50%,部分虫果率可达 80%~100%。2012 年新疆苹果、香梨等林果面积已达到 15.4151 万 hm^2(新疆维吾尔自治区统计局,2013)。而果园苹果蠹蛾和梨小食心虫发生

收稿日期(Received): 2015-05-21 **接受日期(Accepted)**: 2015-07-13
基金项目: 农业部公益性行业科技专项(201103026-2)
作者简介: 郭文超, 男, 研究员。研究方向: 农作物病虫害防治。
* 通讯作者(Author for correspondence), E-mail: gwc1966@163.com

普遍,且常年危害严重,即使使用化学农药防治,产量也会损失 20%~30%,使得新疆苹果、香梨等特色林果遭受巨大经济损失(张润志等,2012)。

我国自 1953 年在新疆库尔勒首次发现苹果蠹蛾以来,其发生地一直仅限于新疆,但于 1986 年开始传入甘肃敦煌后迅速沿河西走廊向东扩散至甘肃的酒泉、张掖、武威、白银、兰州等地,并进一步扩散蔓延,到 2008 年已在我国新疆、甘肃、黑龙江、内蒙、宁夏等地发生,疫情发生面积达 32.67 万 hm^2,每年造成的经济损失达 9.61 亿元(曹爱东和秦庆红,2009)。根据苹果蠹蛾的发生危害和传播扩散趋势,其进一步向我国其他苹果主产区扩散的风险依然较大。而新疆有关苹果蠹蛾的研究工作起步较早,多年来在生物学、生态学和防治技术的研究与应用领域取得了一些重要成果。因此,回顾和总结这些成果对于我国苹果蠹蛾的合理治理将具有一定的指导作用。

1　生物学及发生与环境的关系研究进展

由于苹果蠹蛾在我国的最早发现地是新疆,并且在相当长的历史时期内仅分布于新疆。因此,新疆在苹果蠹蛾的生物学和生态学领域的研究工作起步较早。张学祖等(1957、1958b、1960)首次对苹果蠹蛾的形态进行了描述,并对其年生活史、生活习性、危害情况及各虫态发育历期,以及发生与环境的关系进行了研究。结果表明,伊犁河谷地区和库尔勒地区苹果蠹蛾一年发生 2~3 代;对不同品种的苹果而言,苹果蠹蛾产卵和蛀果率有所不同,晚熟品种产卵最多,蛀果率最高,中熟品种次之,早熟品种产卵最少,危害最轻;苹果蠹蛾对不同品种苹果的"入蛀"部位各异,中熟品种(夏立蒙)主要从果实"萼洼"和"胴部"入蛀;而晚熟品种(阿波尔特)主要从"胴部"和"梗洼"入蛀;幼虫具有滞育现象,第 1 代幼虫滞育率高达 50%以上;营养条件对苹果蠹蛾的幼虫发育影响作用较强。这些开创性的研究工作不仅为后来苹果蠹蛾的研究奠定了基础,而且为新疆荒漠绿洲区苹果蠹蛾的监测和科学防治提供了重要依据。

近年来,新疆植保科技工作者不断探索,在已有的基础上,进一步对苹果蠹蛾的生物学、生态学进行了系统研究,取得了重要进展。于江南等(2004)在新疆乌鲁木齐地区通过系统调查,结合黑光灯和性信息素诱集,发现苹果蠹蛾幼虫越冬主要在离地 30~90 cm 处的树皮下和裂缝中越冬,幼虫化蛹和成虫羽化始期分别在 4 月下旬和 5 月中下旬,羽化高峰在 5 月底至 6 月初,越冬蛹的发育起点温度 9.4 ℃,有效积温 216.4 日度。

苹果蠹蛾在新疆喀什疏勒县杏复合系统(杏—麦、杏—棉花间作模式下)一年发生 3 代(李宏,2010)。在新疆阿克苏地区苹果和香梨园一年发生 4 代(排除越冬代,实际为 3 代),越冬代成虫于 4 月中旬梨花萌动时开始羽化,4 月 24 日左右达到全年羽化最高峰。第 1 代幼虫 4 月底开始出现,成虫 6 月 14 日左右达到羽化高峰;第 2 代幼虫于 6 月下旬出现,一部分幼虫从果实的萼部或两果实交接处钻蛀果实,成虫 8 月下旬达到羽化高峰;第 3 代幼虫于 8 月底开始出现,成虫于 9 月初达到羽化高峰。第 4 代幼虫于 9 月底出现,由于摘果,不能完成发育,是一个局部世代。

苹果蠹蛾成虫发生期无明显的间断,表明有世代重叠现象,同一调查点的越冬代、第 1 代和第 3 代所诱到的雄成虫有逐渐减少的趋势,表明其有明显的兼性滞育现象,给防治带来一定的困难(林伟丽等,2006a、2006b)。

徐婧等(2012)于 2005~2010 年使用性信息素诱捕器对新疆、甘肃及内蒙古不同区县的 16 个果园苹果蠹蛾成虫发生规律进行长期监测。结果表明,苹果蠹蛾在西北地区每年发生 2.5 代,正常气候条件下 3 个成虫发生高峰分别出现在 5 月上旬、7 月中下旬和 8 月中下旬,但不同地区及同一地区不同果园之间存在较大差异,化学防治和迷向防治等措施对苹果蠹蛾成虫捕获量的影响较大。

林伟丽(2006a)采用 Taylor 幂法则和 Iwao's 回归分析法测定出苹果蠹蛾分布格局:苹果蠹蛾成虫在平均密度 $m \leqslant 3$ 时,个体间相互吸引,分布的基本成分为个体群,呈聚集分布,且聚集强度随种群密度的升高而增加;在 $m>3$ 时,个体间相互排斥,呈均匀分布。构建了苹果蠹蛾的种群数量消长模型,越冬代、第 1 代苹果蠹蛾成虫种群密度消长拟合模型分别为:$N_t = 0.02669t^{3.07095} \cdot e^{-0.26881t}$,$R = 0.9373$;$N_t = 5.27497\times10^{-7}t^{6.70833} \cdot e^{-0.24771t}$,$R = 0.9074$。

在分子生物学研究领域,冯宏祖等(2012)对采集自新疆阿拉尔地区的苹果蠹蛾幼虫线粒体 DNA 细胞色素氧化酶Ⅰ亚基(COI)基因进行了扩增、克隆和测序,并对 COI 序列进行了分析。结果表明,

苹果蠹蛾 DNA 扩增出的 COI 基因序列片段长度为 709 bp,序列中 A+T 含量极高,占 68.7%,而 G + C 的含量只有 31.3%。经基因序列比对,与其他几种食心虫的同源性为 85.4%~88.1%,遗传距离 0.130~0.162;采用 NJ 法构建了卷蛾科系统树,所得的聚类结果与传统的分类结果基本一致。该研究结果为苹果蠹蛾快速鉴定的 DNA 条形码技术研究奠定了重要基础。

2 监测技术的研究与应用

苹果蠹蛾作为蛀果性害虫,其防治适期的有效监测既是技术难点,也是决定害虫防治效果的关键。张学祖(1958a)提出了利用有效积温法预测喷药防治苹果蠹蛾卵的始期监测技术,根据苹果蠹蛾的发育起点和平均有效积温,通过对春季有效积温的预测来预测苹果蠹蛾的发蛾期。实践证明,利用有效积温法预测苹果蠹蛾卵的孵化始期与果园实际发生情况较为吻合。该监测技术方法简便、准确,较好地解决了蛀果性害虫的科学监测难题,成为我国最早利用有效积温法则监测害虫发生期的成功范例之一,对后来多种害虫的预测预报起到积极而重要的指导作用。

随着昆虫化学信息学的发展,苹果蠹蛾性信息素得到成功开发,使苹果蠹蛾的监测技术发生了革命性变化。国外在应用苹果蠹蛾性信息素进行监测、诱杀和迷向防治方面,取得了较好效果。王崇德等(1981)引进美国产苹果蠹蛾性引诱剂进行引诱苹果蠹蛾成蛾的试验。20 世纪 80 年代,中国科学院新疆化学所成功研制并生产了苹果蠹蛾性信息素,为新疆逐步大规模推广基于性信息素引诱剂的使用奠定了基础。宋美杰(1988)于 1981~1986 年对中国科学院新疆化学所研制的苹果蠹蛾性信息素的引诱效果与传统黑光灯的田间诱蛾效果进行了比较,认为利用信息素诱蛾效果优于传统黑光灯。以 1986 年诱蛾为例,春季 4 月初在库尔勒地区采用引诱剂诱蛾,其成蛾始见期较黑光灯诱集提前 10 d,而秋季 10 月初成蛾终见期比黑光灯晚 30 d,全年单个诱捕器(碗型诱捕器)诱蛾量比单盏黑光灯诱蛾量高 5.52 倍。周成军和刘文平(1997)认为诱捕器的类型、设置密度、悬挂高度、植被遮盖以及天气状况等对诱捕效果均有显著影响。张新平等(2011)研究发现,在苹果蠹蛾诱捕过程中应用三角盒粘胶法好于水盆法。由于新疆夏季气候较为干燥,且浮沉天气较为频繁,灰尘粘附在粘虫板会直接影响粘虫效果。从粘虫板和诱芯的更换周期等对引诱效果的影响来看,每 10 d 更换 1 次粘虫胶的诱捕效果好于 30 d 更换 1 次,但诱芯更换周期对引诱效果影响并不明显(阿地力·沙塔尔等,2011)。此外,对诱芯载体的研究和多点试验发现,5 种新型(毛细管诱芯)诱捕性能较传统(橡胶)诱芯平均诱蛾量高 42.7%(李晶等,2011)。

3 防控技术的研究与应用

近年来,通过大量的试验、研究和多点示范,新疆植保科技工作者总结制定了适宜新疆绿洲荒漠生态区的苹果蠹蛾综合防控技术,经大规模田间应用,取得了显著的经济效益和生态效应(郭文超,2010),并提出苹果蠹蛾的关键防控时期为越冬代和第 1 代发生期。主要防控技术包括物理诱杀、越冬场所治理、环境友好型化学防治、自然天敌资源的保护利用,以及利用人工繁殖寄生蜂及其综合配套技术等(阿地力·沙塔尔等,2011;郭文超,2010;林伟丽,2006a;王兰等,2011;许建军等,2014;余江华,2007)。

3.1 加强果园管理、压低越冬基数

果园管理重点在 3 月结合果园春季修剪(复剪),刮除树干(离地 30~90 cm)老翘皮,以降低越冬虫口基数。同时,根据各地苹果蠹蛾的发生规律,于 8 中旬至 9 月初,在果树主干距地面 20~30 cm处绑 10 cm 宽麻布片,翌年春天去除,消灭化蛹幼虫。在第 2、3 代发生期,即 6 月以后对梨园重点清理授粉品种,摘除虫果,捡拾落果并深埋,苹果园重点清理早熟品种。

3.2 信息素防治措施的应用

3.2.1 诱捕器诱杀成虫 在新疆监测和防治苹果蠹蛾一般使用盆式、杯式诱捕器,但新疆地区由于蒸发量大、风沙大等不利天气因素,这 2 种诱捕器的使用受到很大限制。目前常见的诱捕器为三角形胶粘式诱捕器,该诱捕器不受蒸发量的影响,诱捕量高,重点用于防治苹果蠹蛾越冬代和第 1 代成虫。诱捕器的设置密度一般为每 667 m^2 挂 2 个诱芯(或迷向丝,对于苹果蠹蛾和梨小食心虫混合发生区,可选用含有苹果蠹蛾和梨小食心虫 2 种性信息素的“双价迷向丝”),诱捕器安放于苹果蠹蛾的寄主植物上,若没有寄主植物,也可安放于其他树

木上。三角形胶粘式诱捕器的悬挂高度一般为树冠上部 1/3 处通风较好且稍粗的枝条上,距地面高度不低于 1.7 m,诱捕器内若使用粘虫板,应注意粘虫胶的粘性,以便及时更换粘虫胶(阿地力·沙塔尔等,2011)。苹果蠹蛾发生较重的地方,可增加诱捕器的数量。虽然苹果蠹蛾诱捕器能有效降低虫口数量,但利用性诱剂诱捕并不能作为唯一防治该害虫的方法。Knight & Larsen(2004)研究表明,在苹果蠹蛾种群密度较大时,性诱剂诱捕效果不明显且不稳定。Witzgall *et al.*(1994)发现,种群密度高时利用性诱剂干扰交配的防治效果不明显。因此对苹果蠹蛾应采用综合防治,不能完全依赖性诱捕器诱杀成虫。

3.2.2　*迷向法防治*　迷向又称阻断交配(Mating disruption,MD),主要通过使用高浓度的性信息素进行弥散干扰,阻断和延迟害虫交配从而达到防治的目的。该技术具有极强的物种专一性,可同时结合其他方法进行综合防治。朱虹昱等(2012)在新疆、甘肃和宁夏的 3 个实验点进行了苹果蠹蛾国产迷向剂的释放研究,发现在进行迷向处理后,果园中雄虫平均净诱捕量下降 28.6%~100% ,平均下降 74.1%;迷向处理区中成虫平均诱捕量明显减少,对照区域则存在诱集高峰。目前,生产上主要使用双管手挂式迷向信息素,在越冬代成虫羽化期进行防治。手挂式迷向信息素一般持效时间 150~180 d,基本涵盖整个发生期,其间不用更换。迷向信息素悬挂于树冠上部 1/3 处稍粗且通风较好的枝条上,距地面不低于 1.7 m,一般每 0.67 hm^2 挂 1~2 个。成虫的整个发生期均可使用该方法防治。

3.3　物理防治技术的应用

利用黑光灯进行诱杀是苹果蠹蛾综合防治及疫情监测的重要措施之一。付文君和吉别克(2013)指出,黑光灯的田间布局和波长的选择直接影响诱捕效果,在伊犁河谷地区挂灯时间为每年 4 月下旬至 9 月下旬,黑光灯设置密度为每 1.67 公顷果园设置 1 盏,呈棋盘式或闭环式分布,安放高度以高出树冠为宜。朱银飞等(2010)通过研究认为,苹果蠹蛾对黑光灯最敏感的波长为 351 nm, 11 次试验共诱集到苹果蠹蛾成虫 69 头, 与其他波长的灯管在诱集数量上差异极显著;3 个时间段内诱集总量比较表明, 黑光灯诱集效果最佳时间段为黄昏后 2 h ,在该时间段内诱集到的苹果蠹蛾数量占诱集总数的 69.38 %。张润志等(2012)在野外测试了黑光灯对苹果蠹蛾的诱捕效果,14 d 共诱到成虫 376 头,该诱捕量显著大于信息素和雌雄均诱诱捕器的诱捕量,表明苹果蠹蛾对黑光灯具有良好的趋性,黑光灯极具监测与防治苹果蠹蛾的潜力。

3.4　化学防治技术的研究与应用

重点防治第 1 代幼虫是有效控制苹果蠹蛾危害的关键。根据诱芯测报确定适施期,一般越冬代成虫盛发期后 5 d 为产卵盛期和孵化始期(此时一般为沙枣花盛花期),进行喷药防治,可选用高效、低毒、低残留的农药,如菊酯类农药 2.5%三氟氯氰菊酯乳油 2000 倍、1.8%阿维菌素 2500~3000 倍、3%甲氨基阿维菌素苯甲酸盐 2000 倍、3%啶虫脒等新烟碱类 2500~3000 倍、0.3%苦参碱等生物农药 600~800 倍、1.2%烟碱苦参碱 800~100 倍。同时,对于兼防果园其他害虫,如蚜虫、木虱、粉虱等同翅目害虫,在喷施上述农药的同时,可适当混配 20%吡虫啉 4000~5000 倍液,混配 20%三唑锡悬浮剂 1000~1200 倍液可兼防叶螨(李晶等,2011; 余江华,2007)。

3.5　生物防治技术的研究进展

近年来,随着农村产业结构的调整,新疆南部绿洲荒漠区果树面积发展十分迅速,截至目前环塔里木盆地杏、核桃、香梨、苹果和红枣等果树面积超过 133 万 hm^2。由于南疆塔里木盆地绿洲人多地少,林果发展以间套模式的复合种植体系为主,果—粮和果—棉复合生产体系发展普遍,在此背景下,针对苹果蠹蛾等主要害虫危害,积极探索和挖掘果园天敌资源,开发相关生物防治和天敌保护利用技术对发展开发新疆特色的绿色果品,提升其市场竞争力具有重要意义。为此,结合新疆林果业发展的需要,近年来,新疆植保科技工作者在该领域开展了大量的研究和开发工作,取得了一系列具有国内先进水平的成果,研究开发的苹果蠹蛾生物防治及其综合配套技术在林果生产上发挥了重要的作用,取得了显著的社会和经济效益。

3.5.1　*天敌资源的研究*　通过系统研究和调查,摸清了新疆南部喀什地区疏勒县杏复合系统(杏—麦、杏—棉间作模式下)主要害虫的捕食性天敌资源种类 37 种(表 1)。由此可见,新疆南部喀什地区疏勒县杏—棉和杏—麦间作果园天敌资源较为

丰富,保护和利用果园各种捕食性天敌对于有效控制苹果蠹蛾、蚜虫、介壳虫、叶螨等多种果园害虫具有重要作用(李宏,2010)。

表 1 新疆南部不同间作模式下主要害虫捕食性天敌种类(2010,新疆喀什)

Table 1 List of species of predators under different intercropping pattern in Southern Xinjiang (2010, Kashi, Xinjiang)

目 Order	科 Family	种 Species
鞘翅目 Coleoptera	瓢虫科 Coccinellidae	孪斑唇瓢虫 *Chilocorus geminus* Zaslavskij
		深点食螨瓢虫 *Stethorus punctillum* Weise
		菱斑巧瓢虫 *Oenopia conglobata* L.
		孪斑瓢虫 *Coccinella geminopunctata* Liu
	方头甲科 Cybocephalidae	日本方头甲 *CybocephaIus nipponicus* Endroby-Yonge
		敦煌方头甲 *Cybocephalus dunhuangensis* Tian
脉翅目 Neuroptera	草蛉科 Chrysopidae	晋草蛉 *Chrysopa shansiensis* Kuwayama
		普通草蛉 *Chrysopa carnea* Stephens
		叶色草蛉 *Chrysopa phyllochroma* Wemael
		大草蛉 *Chrysopa septempunctata* Wesmael
半翅目 Heteroptera	盲蝽科 Miridae	黑食蚜盲蝽 *Deraeocoris punctulatus* Falien
	花蝽科 Anthocoridae	肩毛小花蝽 *Orius niger* Wolff
蜘蛛目 Araneida	蟹蛛科 Thomisidae	三突花蛛 *Misumenopos tricuspidata* Fahricius
		冠花蟹蛛 *Xysticus cristatus* Clerck
		蒙古花蟹蛛 *Xysticus mongolicus* Schenkel
	跳蛛科 Salticidae	考氏伊蛛 *Icius courtauldi* Bristowe
	卷叶蛛科 Dictynidae	合古卷叶蛛 *Archaeodictyna consecuta* O.P.Cambridge
		王氏卷叶蛛 *Dictyna wangi* Song & zhou
	园蛛科 Araneidae	大腹园蛛 *Araneus ventricosus* L. Koch
		灌木新园蛛 *Neoscona adianta* Walckenaer
		黑亮腹蛛 *Singa hamata* Clerck
		四点亮腹蛛 *Singa pygmaea* Sundevall
	肖蛸科 TetragnatIfidae	直伸肖蛸 *Tetragnatha extensa* L.
		锥腹肖蛸 *Tetragnatha maxillosa* Thoren
		圆尾肖蛸 *Tetragnatha shikokiana* Yaginuma
	皿蛛科 Linyphiidae	弱小皿蛛 *Microlinyphia pusilla* Sundevall
	暗蛛科 Amaurobiidae	刺瓣隙蛛 *Coelotes spinivulva* Simon
	狼蛛科 Lycosidae	鹿熊蛛 *Arctosa cervina* Schenkel
		波氏艾狼蛛 *Evippa potanini* Schenkel
		雾豹蛛 *Pardosa nebulosa* Thorell
		星豹蛛 *Pardosa astrigena* L. Koch
	逍遥蛛科 Philodromidae	新疆逍遥蛛 *Philodromus xinjiangensis* Tang et song
		草皮逍遥蛛 *Philodromus cespitum* Walckener
		阿拉逍遥蛛 *Philodromus alascensis* Keyserling
		蚁形狼蟹蛛 *Thanatus formicinus* Clerck
		普通狼蟹蛛 *Thanatus vuilgaris* Simon
		短胸长蟹蛛 *Tibellus oblongus* Walckenaer

在寄生性天敌资源研究方面,张学祖等(1960)在新疆库尔勒地区发现苹果蠹蛾卵寄生蜂——赤眼蜂 *Trichogramme* sp.,苹果蠹蛾第 2 代卵自然寄生率最高可达 44%;李保平和孟玲(2012)、孟玲等(2001)通过对新疆伊梨地区野苹果林和栽培苹果园的苹果蠹蛾寄生性天敌的系统调查,发现了光点瘤姬蜂 *Liotryphon punctatus*、蠹蛾玛姬蜂 *Mastrus ridibundus* (Gravenhorst)、红足微茧蜂 *Microdus rufipes* Nees、四齿革腹茧蜂 *Ascogaster quandridentata* Wesmaels、凹腹双短刺金小蜂 *Dibrachys cavus* (Walker)5 种幼虫和蛹寄生蜂,其中凹腹双短刺金小蜂是苹果蠹蛾的重寄生蜂,并记述了迄今世界范围内已发现的苹果蠹蛾幼虫和蛹寄生蜂共 7 科 30 属 43 种,这一研究结果为今后进一步挖掘和利用苹果蠹蛾寄生性蜂资源奠定了基础。

在昆虫病原微生物方面,Kučera(1971)报道,捷克斯洛伐克正研究高致病力的白僵菌菌系发酵生产方法。有关白僵菌防治鳞翅目害虫在我国已有大量报道。哈密植检站(1985)首次从苹果蠹蛾僵虫中分离并鉴定发现了感染苹果蠹蛾幼虫的病

原菌——白僵菌 *Beauvevia* sp.。王敦等(2012)首次分离获得了苹果蠹蛾颗粒体病毒(CypoGV)中国本土分离株 3 株,分别是分离自甘肃张掖的张掖株(CypoGV-ZY)、分离自新疆喀什的喀什株 1(CypoGV-KS1)、喀什株 2 (CypoGV-KS2)。通过对病毒本土株的分离、鉴定、扩繁,对 3 株病毒的毒力进行了测定,分别为 3.43×10^4、8.81×10^4 和 1.04×10^4 OBs · mL^{-1}。并对三者的田间防效与国外同类制剂(苹果蠹蛾颗粒体病毒比利时株,CypoGV-BG)进行了比较,发现 3 株本土病毒株的田间防效与化学药剂灭幼脲接近,单位面积果园的诱虫数量显著降低,显示了良好的应用前景。

3.5.2　利用赤眼蜂等寄生蜂防治苹果蠹蛾技术研究与应用　为了适应新疆荒漠绿洲生态条件的果品精品化和无害化发展的需要,针对苹果蠹蛾等果树害虫种类增多,危害趋于严重的局面(郭文超和马祁,2004),新疆植保科技工作者积极探索相关的生物防治技术,取得了重要成果。

冯宏祖等(2013)研究了赤眼蜂对新疆荒漠绿洲生态区苹果蠹蛾卵功能反应及自身的干扰反应,表明在 25 ℃下不同密度的苹果蠹蛾卵对松毛虫赤眼蜂 *Trichogramma pintoi*(吉林品系)、(新疆抗旱品系)、螟黄赤眼蜂 *Trichogramme chilonis* Ishii 的寄生作用有明显的影响,其寄生效应符合功能反应模型 Holling Ⅱ 型,其方程分别为 $N_a = 0.9459N_t/(1 + 0.0446N_t)$、$N_a = 0.9675N_t/(1 + 0.0416N_t)$ 和 $N_a = 0.7403N_t/(1+0.0356N_t)$,对苹果蠹蛾卵的日最大寄生量为 21.20、23.24 和 20.79 粒,寄生 1 粒卵所需的时间为 0.0472、0.043 和 0.048 h,搜索效率分别为 0.9459、0.9675 和 0.7403;赤眼蜂自身密度对寄生作用也存在干扰效应,用 Hassell-Varley 模型可表示为 $E=0.4411P_t-0.5231$、$E=0.3462P_t-0.6205$ 和 $E=0.3326P_t-0.4441$。这一研究结果为正确评价赤眼蜂控制苹果蠹蛾的作用提供了依据。

王兰等(2011)通过研究人工繁殖赤眼蜂在果园生态环境中的自然扩散规律,发现赤眼蜂在果园自然扩散距离可达 16 m,但 2~8 m 范围内赤眼蜂的寄生数量最多,寄生卵占总卵数的 93.4%,在 2、4、6 和 8 m 范围内平均寄生率分别为 32.6%、21%、14.3%和 9.5%。在此基础上,提出了利用赤眼蜂防治苹果蠹蛾的田间释放技术,即在各代卵始盛期开始放蜂,放蜂 2~ 3 次,蜂卡间隔距离 8 m 为宜。

许建军等(2014)通过试验筛选出了适宜新疆南部荒漠绿洲生态区果园环境条件对苹果蠹蛾有效的赤眼蜂蜂种。果园试验表明,经过高温驯化的抗旱松毛虫赤眼蜂对苹果蠹蛾有较好的寄生效果,室内外试验对苹果蠹蛾卵寄生率最高分别达到 79.92%和 30.16%,田间罩笼试验释放松毛虫赤眼蜂,最高防效可达 83.48%。针对荒漠绿洲果园特点,通过田间多点示范,提出了“应用抗旱松毛虫或螟黄赤眼蜂+性引诱剂(或喷施生物源农药)”为重点的果树害虫生物防治或绿色综合配套防治技术,苹果蠹蛾蛀果减退率最高达 74.34%,平均 56.58%,释放赤眼蜂配合双向迷向丝蛀果减退率达 85.93%,化学防治为 82.71%,累计应用面积超过 66667 公顷次,连续释放赤眼蜂持续防治效果十分明显。此外,张新平等(2012)在新疆阿克苏地区开展了利用周氏啮小蜂 *Chouioia cunea* Yang 防治苹果蠹蛾的初步试验,结果表明释放周氏啮小寄生的柞蚕蛹 30 和 90 粒 · hm^{-1},平均防效均达 80%以上。

4　展望

虽然新疆在苹果蠹蛾相关研究领域起步较早,在苹果蠹蛾生物学、生态学和防治学等领域做了大量的研究和应用工作。但是,随着现代分子生物学的迅速发展,从分子水平探讨和揭示苹果蠹蛾遗传变异性、与梨小食心虫等其他蛀果类害虫种间竞争机制、苹果蠹蛾滞育诱导机制等相关基础性的研究尚需进一步加强。随着人们对于果品和农产品安全问题日益关注,针对苹果蠹蛾发生和猖獗危害的现状,在已有技术基础上,积极探索符合新疆荒漠绿洲生态区生产实际的绿色有机生产标准的单项防控和集成防控技术,将是新疆植保科技工作者未来工作的重点方向。

参考文献

阿地力 · 沙塔尔, 陶万强, 张新平, 岳朝阳,马四国, 牛天翔, 阿马努. 2011. 5 种引诱剂田间诱捕苹果蠹蛾效果比较. 西北农业学报, 20(3): 203-206.

曹爱东, 秦庆红. 2009. 苹果蠹蛾的发生及防治. 果树实用技术与信息, (9): 18-19.

冯宏祖, 王兰, 郭文超, 聂蒙, 张红涛, 许建军. 2013. 赤眼蜂对苹果蠹蛾卵功能反应的研究. 中国生物防治学报, 29(2): 307-311.

冯宏祖, 王兰, 郭文超, 许建军. 2012. 苹果蠹蛾线粒体 DNACO Ⅰ基因克隆与序列分析. 应用昆虫学报, 49(6):

1503-1507.

付文君, 吉别克. 2013. 伊犁河谷地区苹果蠹蛾的发生与防治. 现代农业科技, (4): 155-156.

郭文超. 2010. 苹果蠹蛾应急防控技术//张国良. 农业重大外来入侵生物的应急防控技术指南. 北京: 科学出版社.

郭文超, 马祁. 2004. 二十一世纪新疆植物保护的形势与对策. 新疆农业科学, 41(5): 257-262.

哈密植物检疫站. 1985. 从自然死亡的苹果蠹蛾幼虫体内分离到白僵菌. 新疆农业科技, (2): 24-25.

李保平, 孟玲. 2012. 苹果蠹蛾幼虫和蛹寄生蜂种类. 昆虫天敌, 23(4): 185-187.

李宏. 2010. 新疆杏复合系统节肢动物群落特征及主要害虫防治对策研究. 北京: 中国林业科学研究院.

李晶, 刘燕, 熊英, 章玲, 石生香, 阿丽亚, 马德成. 2011. 5种新型性诱剂对苹果蠹蛾诱捕试验的初报. 新疆农业科技, (4): 43-44.

林伟丽. 2006a. 新疆香梨园昆虫种类与苹果蠹蛾和梨小食心虫的种群动态研究. 乌鲁木齐: 新疆农业大学.

林伟丽, 于江南, 薛光华, 王永平. 2006b. 新疆阿克苏地区苹果蠹蛾和梨小食心虫消长规律的研究. 新疆农业科学, 43(2): 100-102.

孟玲, 李保平, 陈舒方, 刘绪斌. 2001. 新疆苹果蠹蛾幼虫期及蛹期的寄生蜂调查初报. 植物检疫, 15(4): 211-212.

秦晓辉, 马德成, 张煌, 李广华, 王培. 2006. 苹果蠹蛾在我国西北发生危害情况. 植物检疫, 20(2): 95-96.

茹克亚·阿不力孜, 于江南, 陈卫民. 2009. 伊犁河谷苹果蠹蛾的发生规律与防治措施. 新疆农垦科技, (2): 39-40.

宋美杰. 1988. 国内合成苹果蠹蛾性诱剂的应用. 植物保护, (1): 53.

王崇德, 汤渝琼, 刘新齐, 王维利. 1981. 美国苹果蠹蛾性诱剂初次应用. 新疆农垦科技, (4): 79-80.

王敦, 徐兵强, 阿不都克尤木·卡德尔, 吕婷婷, 刘强, 李晓峰. 2012. 苹果蠹蛾颗粒体病毒中国本土株的发现与利用. 首届"全国青年昆虫学科技工作者创新论坛"论文摘要集, 19-20

王兰, 冯宏祖, 郭文超, 张辉, 杨力, 许建军. 2011. 苹果蠹蛾消长动态及果园中赤眼蜂释放技术的研究. 新疆农业科学, 48(2): 261-265.

新疆维吾尔自治区统计局. 2013. 新疆统计年鉴. 北京: 中国统计出版社.

徐婧, 姜红霞, 阿丽亚, 郭静敏, 张润志. 2012. 甘肃、新疆、内蒙苹果蠹蛾成虫消长规律. 应用昆虫学报, 49(1): 89-95.

许建军, 冯宏祖, 吐尔逊, 王兰, 郭文超. 2014. 释放赤眼蜂防治苹果蠹蛾、梨小食心虫效果研究. 中国生物防治学报, 30(5): 690-695.

余江华. 2007. 苹果蠹蛾的无公害综合防治. 农村科技, (5): 41-42.

于江南, 吾木尔汗, 肉孜加玛丽, 范菊兰. 2004. 苹果蠹蛾越冬生物学及有效积温的研究. 新疆农业科学, 41(5): 319-321.

张润志, 王福祥, 张雅林, 陈汉杰, 罗进仓, 王勤英, 刘万学, 艾尼瓦尔·木沙, 等. 2012. 入侵生物苹果蠹蛾监测与防控技术研究—公益性行业(农业)科研专项(200903042)进展 . 应用昆虫学报, 49(1): 37-42.

张新平, 岳朝阳, 刘爱华, 杨明禄, 盛承发, 阿里木, 张静文. 2011. 不同诱捕方法对苹果蠹蛾和梨小食心虫的诱捕效果. 新疆农业科学, 48(2): 306-310.

张新平, 王成祥, 岳朝阳, 张静文, 王玉兰, 刘爱华, 阿里木·阿依夏木. 2012. 利用周氏啮小蜂防治苹果蠹蛾的研究. 江苏农业科学, 40(10): 128-129.

张学祖. 1957. 苹果蠹蛾(*Cydia pomonella* L.)在我国的新发现. 昆虫学报, 7(4): 467-472.

张学祖. 1958a. 利用有效积温法则预测喷药防治苹果蠹蛾的始期. 新疆农业科学, (2): 123-124.

张学祖, 周绍来, 刘景富. 1960. 伊宁苹果蠹蛾之研究. 昆虫学报, 5(1): 41-51.

张学祖, 周绍来, 王庸俭. 1958b. 库尔勒苹果蠹蛾的初步研究. 昆虫学报, 8(2): 134-136.

周成军, 刘文萍. 1997. 两种诱捕器诱捕苹果蠹蛾试验. 北方果树, (2): 22.

朱虹昱, 刘伟, 崔艮中, 张增福, 张润志. 2012. 苹果蠹蛾迷向防治技术效果初报. 应用昆虫学报, 49(1): 121-129.

朱银飞, 马荣, 张卫星, 温俊宝. 2010. 苹果蠹蛾成虫对不同波长黑光灯的趋性研究初探. 新疆农业大学学报, 33(6): 506-508.

Kučera M. 1971. Toxins of the entomophagous fungus *Beauveria bassiana*. II. Effect of nitrogen sources on formation of the toxic protease in submerged culture. *Journal of Invertebrate Pathology*, 17: 211-215.

Knight A L and Larsen T E. 2004. Improved deposition and performance of a mieroen capsulated sex pheromone formulation for codling month (Lepidoptera: Tortricidae). *Journal of the Entomological Society of British Columbia*, 101: 109 -116.

Witzgall P, Bgekman A C, Svensson M, Koch U, Rama F, El-Sayed A, Brauchli J, Arn H, Bengtsson M and Löfqvist J. 1994. Behavioral observations of codling month, *Cydia pomonella*, in orchards permeated with synthetic pheromone. *BioControl*, 44: 211 -237.

(责任编辑:郭莹)

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2015.04.005

甘肃苹果蠹蛾的发生现状与研究进展

罗进仓*, 周昭旭, 刘月英, 魏玉红, 张大为
甘肃省农业科学院植物保护研究所,甘肃 兰州 730070

摘要: 苹果蠹蛾是果园最重要的害虫之一,1987 年入侵甘肃敦煌,2005 年苹果蠹蛾在河西地区严重发生。各地先后开展了一系列的防控与监测工作,并对苹果蠹蛾的发生规律及防治技术进行了大量的研究。本文就甘肃苹果蠹蛾的发生历史、为害与防控现状及其生物学、生态学及防治技术方面的研究进展进行概述,以期为全国苹果蠹蛾的防控提供参考。

关键词: 苹果蠹蛾; 扩散; 为害; 生物学; 生态学; 防治; 甘肃

Occurrence status and research advance of the codling moth in Gansu

Jin-cang LUO*, Zhao-xu ZHOU, Yue-ying LIU, Yu-hong WEI, Da-wei ZHANG
Institute of Plant Protection, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, *China*

Abstract: The codling moth, *Cydia pomonella*, is one of the most damaging pests in fruit orchards. It was first introduced to Dunhuang in 1987. Since 2005, the codling moth has become a serious pest in Hexi region of Gansu Province. Series of control and monitoring programs have been developed, and a lot of research on the occurrence regularity and control techniques of the moth have been carried out. This paper introduces the status of occurrence and control for the codling moth in Gansu, and the research advancement done on the biology, ecology and control technology of the species. Such information could be useful for its integrated management in China.

Key words: *Cydia pomonella*; diffusion; damage; biology; ecology; control; Gansu

苹果蠹蛾 *Cydia pomonella*(L.)属鳞翅目 Lepidoptera 卷蛾科 Totricidae,原产于欧亚大陆南部,现已广泛分布于世界各大苹果产区,是为害苹果、梨、沙果、桃、杏等仁果类和核果类果树的一种世界性检疫害虫。1987 年该虫从新疆传入甘肃敦煌后逐渐向东扩散(秦晓辉等,2006),到 2005 年相继在河西局部地区严重发生,造成重大经济损失,并进一步向东扩散,对甘肃乃至我国东部地区的苹果产业造成严重威胁(王春林和王福祥,2009)。为了有效控制苹果蠹蛾危害及疫情的扩散蔓延,在中央及省地有关部门的大力支持下,甘肃有关科研院校及农技推广部门先后对甘肃苹果蠹蛾的灾变机理及防控技术进行了大量研究,并按照农业部的统一部署,从 2006 年开始了阻截苹果蠹蛾疫情的"百日防控行动",通过几年的努力有效控制了苹果蠹蛾的扩散与危害。本文就甘肃苹果蠹蛾的发生与防控现状及研究进展做一简要综述,旨在为全国苹果蠹蛾的防控决策提供借鉴和依据。

1 甘肃苹果蠹蛾的发生与为害现状

1.1 苹果蠹蛾在甘肃的扩散与传播

20 世纪 80 年代,随着我国旅游事业和果品贸易的发展,苹果蠹蛾随游客携带的果品由新疆传入敦煌市后(秦晓辉等,2006),逐步由河西走廊向东扩散蔓延,为害程度也逐年加重。1991 年扩散至瓜州县(赵生梅,2012)和玉门市;1994 年在肃州城区西部果园发现苹果蠹蛾危害(杨晓萍和王文军,2008);1999 年又扩散至金塔县鼎新镇笈笈村(成玉萍和袁大兴,2008),但在此期间,苹果蠹蛾的传播与扩散速度相对缓慢。

进入 21 世纪,随着果品调用尤其是果品加工业的飞速发展,苹果蠹蛾的扩散速度明显加剧,发生范围急剧扩大,并且越过河西走廊的天然屏障乌

收稿日期(Received): 2015-06-08 **接受日期(Accepted)**: 2015-08-02
基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(200903042); 甘肃省科技支撑计划项目(097JKCA084)
作者简介: 罗进仓, 男, 研究员。研究方向: 农作物害虫综合防治。
* 通讯作者(Author for correspondence), E-mail: jincang_luo@139.com

鞘岭,进一步向东扩散。2003 年在张掖市高台县监测到苹果蠹蛾(张文军,2008);2004 年在与高台县相邻的临泽县临泽农场发现苹果蠹蛾(刘晓刚和魏周秀,2009);2005 年又相继在张掖市甘州区(赵泽普,2012)和民乐县南古镇黑崖头村发现苹果蠹蛾(柴武高等,2009);2006 年传入山丹县东乐乡山羊堡村(鲁月蛾,2008);2007 年在金昌市永昌县、武威市民勤县(王兆平,2012)及兰州市的七里河区和西固区发现新的疫点;2008 年在武威市古浪县(张开骅,2010)、白银市景泰县、白银区以及兰州市安宁区、城关区、皋兰县和平凉市静宁县先后发现苹果蠹蛾;2009 年传入武威市凉州区和兰州市永登县;2012 年在兰州市红古区和白银市靖远县又先后发现苹果蠹蛾疫情。

从甘肃苹果蠹蛾传播扩散的情况看,苹果蠹蛾主要沿国道、省道、铁路等交通要道沿线扩散传播,且呈现跨越式、跳跃式传播的特点,传播途径主要是随果品和包装材料以及务工和旅游人员携带的水果进行远距离传播,近距离扩散主要靠其自身的飞行能力及走亲串户者所携带的虫果传播。

1.2 甘肃苹果蠹蛾的发生与为害现状

苹果蠹蛾于 1987 年初传入甘肃省敦煌市时发生面积仅 0.6 hm^2,后扩散到敦煌全市,苹果平均蛀果率达 45%;1992 年已扩散至酒泉市的 63 个乡(镇),发生面积增至 0.54 万 hm^2,年均经济损失约 4000 多万元(秦晓辉,2006)。到 2005 年,苹果蠹蛾的发生范围和面积迅速扩大,其分布区域已遍及酒泉、嘉峪关、张掖 3 市的 9 个县(区)87 个乡(镇),发生面积 1.69 万 hm^2,严重地块沙果蛀果率高达 37.9%、苹果蛀果率 15.6%、梨蛀果率 14.3%。2006 年苹果蠹蛾的发生范围和面积进一步扩大,已扩至 11 个县(区)97 个乡(镇),发生面积 2.71 万 hm^2,平均被害株率 40%以上,平均蛀果率 7%,重发区面积约 1 万 hm^2。

2006 年后,随着防控力度的加大,甘肃苹果蠹蛾的发生面积和为害程度逐年下降,但分布区域有所扩大。2007~2012 年,其发生面积由 2.08 万 hm^2(2007 年)下降至 1.69 万 hm^2(2012 年),平均被害株率由 19.8%(2007 年)下降至 2.46%(2012 年),平均蛀果率由 2.75%(2007 年)下降至 0.28%(2012 年),发生范围则由 15 个县(区)(2007 年)扩大至 26 个县(区)(2012 年)。截至目前,甘肃苹果蠹蛾被控制在兰州、白银及河西走廊地区,其为害程度也得到了有效控制。

1.3 苹果蠹蛾对不同寄主的为害程度

杨晓萍和王文军(2008)报道,苹果蠹蛾主要为害苹果和梨,零星为害桃、杏;苹果品种中以沙果、倭锦、金冠、秋李受害较重,尤其是沙果和倭锦的蛀果率可达 70.0%以上,而国光、元帅等受害较轻;梨树中以早酥梨、砀山酥梨、鸭梨、长把梨受害较重,苹果梨、锦丰梨受害轻。

2 生物学特性研究

2.1 越冬规律

苹果蠹蛾主要以老熟幼虫在树干和主枝的粗皮裂缝、翘皮下、树洞中及主枝分叉处的缝隙中结茧越冬(秦占毅等,2007; 许永锋,2008; 闫玉兰,2008; 翟小伟等,2010; 周昭旭等,2008)。在主干和主枝上的越冬虫量分别占总虫数的 77.47%和 22.53%;在主干和主枝上的越冬部位主要集中在距地面 1 m 内的主干和距主干 1 m 内的主枝上,其越冬虫量分别占主干和主枝上越冬虫量的 88%以上;且在树冠下的土壤中未发现其越冬虫态(周昭旭等,2008)。另据许永锋(2008)报道,在树干及主枝分叉处的越冬量占 91.8%,在蛀果(落果)中的越冬比例占 6.4%;另在根基土缝中发现了 1.8%的越冬幼虫。

2.2 生活史

大多数研究表明,苹果蠹蛾在甘肃一年发生 2~3 代。4 月上旬苹果发芽时越冬幼虫开始化蛹。越冬代成虫最早出现在 4 月下旬,并可持续至 6 月上中旬,5 月上中旬为越冬代成虫的羽化高峰期(秦占毅等,2007; 石磊等,2009; 许永锋,2008; 翟小伟等,2010)。越冬代成虫的发生期与第 1 代成虫的发生期分界明显,且有一个明显的间隔期(许永锋,2008; 翟小伟等,2010; 周昭旭等,2008)。5 月上旬至 6 月中旬为第 1 代卵的发生期,盛期在 5 月中旬(闫玉兰,2008; 翟小伟等,2010)。5 月上中旬第 1 代幼虫开始为害,6 月上中旬为第 1 代幼虫的蛀果盛期,6 月中下旬为第 1 代幼虫的脱果盛期(秦占毅等,2007; 闫玉兰,2008)。6 月中下旬出现第 1 代成虫,7 月中旬为第 1 代成虫的羽化高峰期,7 月底至 8 月初进入羽化末期(许永锋,2010; 翟小伟等,2010)。7 月初出现第 2 代卵,第 2 代卵的发

生盛期在 7 月中旬;7 月上旬第 2 代幼虫开始孵化蛀果,7 月底至 8 月初为第 2 代幼虫的孵化高峰期(许永锋,2008; 翟小伟等,2010)。第 2 代幼虫于 8 月上旬开始陆续脱果,脱果较早的小部分幼虫结茧化蛹并发育成第 3 代,而大部分幼虫则寻找适宜的场所越冬。8 月中旬至 9 月中旬可见第 2 代成虫,8 月下旬出现第 3 代幼虫,9 月中旬约有 87%的幼虫脱果,剩余幼虫继续在果实中为害,直至采收后在贮藏场所及包装物上做茧越冬(秦占毅等,2007)。

2.3　生活习性

2.3.1　*成虫*　成虫具有趋光性和趋化性,黑光灯、糖醋液均可诱捕到成虫(张耀荣和蒋银荃,2001)。白天多潜伏于叶背和树干背光处,黄昏进行交尾(秦占毅等,2007)。成虫主要在白天羽化,羽化高峰期在 8:00 ~ 13:00,羽化量占当天羽化量的 50.18%,傍晚至凌晨羽化较少;雌虫羽化后第 2 天开始产卵,产卵期可持续至羽化后的第 9 天,羽化后第 2~5 天的产卵量最多;雌蛾的日产卵时间主要集中在 18:00~22:00,其产卵量占 24 h 产卵量的 92.8%,凌晨有少量产卵(魏玉红等,2014)。单雌产卵量一般 40 粒,最多 118 粒(秦占毅等,2007)。在 20~31 ℃恒温条件下,单雌产卵量 87~165 粒,产卵前期 2~3 d(刘月英等,2012)。

2.3.2　*产卵习性*　成虫产卵对树种和品种有明显的选择性。张耀荣和蒋银荃(2001)报道,苹果、沙果树上的卵多于梨树;在苹果树中,中秋里蒙、倭锦、黄元帅等苹果品种上的产卵量较多,而国光、祝光、红元帅、富士等品种上的卵量较少;在梨树中,以早酥梨最多,苹果梨、锦丰梨、乌酒香次之,鸭梨最少。这一产卵趋势与田间不同树种的受害程度基本吻合。

苹果蠹蛾的卵可产于果实、叶片、果柄甚至枝条上(秦占毅等,2007)。研究表明,苹果蠹蛾第 1 代卵多产于果实胴部,第 2 代卵多产于叶正面,在树冠上层及向阳、背风处产卵多(张耀荣和蒋银荃,2001)。从梨树上卵的分布情况上看,第 1 代卵高峰期幼果上的着卵量显著高于叶片,第 2 代卵高峰期叶片上的着卵量高于果实,而 1、2 代叶片上的卵主要分布于叶片背面(翟小伟等,2009)。从苹果园第 2 代卵的分布情况上看,2 代卵在叶片上的着卵量显著高于果实,且以叶片正面的着卵量最多;无论是叶片上还是果实上,均以树冠东、南面的着卵量较多,但在树冠不同层次上的着卵量差异不显著(魏玉红等,2012)。而据许永锋(2008)报道,在苹果树上,果实上的着卵量高于叶片,在树冠上以东、南面的卵量较多,而在树冠不同层次上的分布没有显著差异。

2.3.3　*卵的孵化*　苹果蠹蛾的卵主要在白天孵化,从黎明(5:00)开始,孵化的数量逐渐上升,到 8:00~09:00 达到孵化高峰(占 26.7%),15:00 后数量急剧减少,并可持续到 18:00,其中 14:00 以前卵的孵化数占 88.6%。因此药剂防治苹蠹蛾时,施药时间应在上午 9:00 以后至中午 14:00 以前进行,以使药剂直接接触大部分初孵幼虫,从而提高防治效果(魏玉红等,2014)。

2.3.4　*幼虫的蛀果习性*　幼虫孵化后即开始向果实爬行,常从萼洼处、果柄洼及两果相接处蛀入果实为害;第 1 代有 65%以上的初龄幼虫从萼洼处蛀果,第 2 代有 84%以上的幼虫从果实胴部和两果相接处入果(张开骅,2010)。据观察,远离果实的初孵幼虫在向果实爬行的过程中,啃食叶肉作为补充营养;在没有寻找到果实的情况下,蛀入嫩梢为害并可发育至 3 龄。初孵幼虫先在果皮下反复取食形成虫室,2 龄后向种室方向钻蛀,3 龄后蛀入种室并取食果核,4 龄开始向外钻蛀(许永锋,2008)。幼虫有偏食种子和转果为害的习性,一般一头幼虫可为害 3~4 个果实(秦占毅等,2007)。

2.4　发育历期

苹果蠹蛾雌蛾寿命 4~13 d,雄蛾 4~7 d,第 1 代卵期 5~24 d,第 2、3 代卵期 5~10 d,幼虫期约 30 d,越冬代、第 1 代、第 2 代和第 3 代蛹的发育历期分别为 12~36 d、9~19 d、13~14 d 和 12~19 d(秦占毅等,2007)。在 18.8~21.86 ℃的自然变温条件下,平均卵期 6.67 d,幼虫期 21.56 d,蛹期 10.98 d,雌蛾寿命 10.51 d,雄蛾寿命 6.7 d(周昭旭等,2008)。刘月英等(2011)还研究了恒温条件下苹果蠹蛾各虫态的发育历期。

3　生态学特性研究

3.1　气象因子

3.1.1　*温度*　刘月英等(2011、2012)研究了温度对苹果蠹蛾生长发育、存活及繁殖的影响,结果表明:在 15~31 ℃的恒温条件下,各虫态的发育历期随温度的升高而缩短,世代发育历期由 15 ℃时的 112 d

缩短至 31 ℃时的 26.2 d;世代存活率在 20 ℃和 25 ℃下最高,达 80%以上;在 15 ℃和 34 ℃下,各虫态虽有一定的存活率(51.3%和 4.4%),但无有效的产卵;25 ℃时其种群的内禀增长率(r_m)和种群趋势指数(I)最高,表明 25 ℃为苹果蠹蛾生长发育和繁殖的最适宜温度;并测得卵、幼虫、蛹及世代发育的起点温度 10.64、10.68、9.33 和 10.41 ℃,有效积温 75.46、293.57、147.63 和 508.86 日度。这一研究结果与国外有关报道基本一致(Aghdam *et al.*, 2009a)。Aghdam *et al.*(2009b)报道,苹果蠹蛾伊朗种群在 10 和 35 ℃下,不能完成发育;在 14 和33 ℃下,虽然能完成发育,但成虫不能完成交配或产卵,27 ℃时的内禀增长率(r_m)最高,但 25 ℃时的产卵量最大。可见,苹果蠹蛾甘肃种群与伊朗种群在温度的适应性上并没有出现明显的分化,当温度低于 15 ℃或高于 33 ℃时,不利于其生长发育,种群发育的起点温度在 10 ℃左右。

3.1.2 湿度 作者曾研究过苹果蠹蛾的卵和蛹对湿度条件的适应能力,发现在相对湿度为 10%的极端干燥条件下,卵和蛹的存活率分别达到 89.7%和 72.2%,而在饱和湿度(100%)条件下,两者的存活率仍保持在 77.1%和 89.6%;相比较而言,卵具有较强的耐干燥能力,而蛹具有较高的耐湿能力,卵和蛹存活的适宜相对湿度分别为 30%~70%(存活率 95.7%~99.1%)和 90%~100%(存活率 89.6%~93.8%)。林伟等(1996)认为,当大气相对湿度降至 35%~49%,对成虫产卵无影响;相反,当相对湿度大于 74%时,成虫飞行能力受阻,也间接地影响了成虫的交配和产卵,成虫只有在相对湿度小于 74%的条件下才能产卵。由此可见,湿度对苹果蠹蛾的影响主要表现为对成虫的影响。

3.1.3 降雨 金瑞华等(1996)通过室内模拟降雨研究了降雨对苹果蠹蛾的影响,结果表明:浸水时间越长及降雨强度愈大,幼虫和蛹的死亡率愈高,而化蛹率和羽化率则愈低;经模拟不同降雨、降雨强度和降雨次数组合试验表明,降雨量愈大、降雨强度愈高及降雨次数愈多,幼虫和蛹的死亡率愈高,化蛹率和羽化率愈低。

3.2 滞育

张耀荣和蒋银荃(2001)报道,在甘肃酒泉苹果蠹蛾的自然滞育率达 28%。刘月英等(2015)研究了光周期和温度对苹果蠹蛾滞育诱导的影响,结果表明:苹果蠹蛾张掖种群属于典型的兼性滞育,其滞育率随光照时数的缩短而显著增高,尤其是当光照时数缩短至 12 h 时,滞育急剧增加,20、25 和 30 ℃下的滞育率由 L14 ∶ D10 时的 44.7%、38.6%和 36.9%增至 L12 ∶ D12 时的 100%、81.2%和 76.7%;光周期、温度及其交互作用均对其滞育诱导具有重要影响,其中光周期起主导作用,温度伴随着光周期起作用,低温对滞育诱导有很好的促进作用;在 20、25 和 30 ℃条件下,幼虫滞育的临界日长分别为 14.21、13.68 和 13.73 h;苹果蠹蛾对光照反应的 2 个最敏感虫期是初孵幼虫阶段和预蛹期阶段,卵期对光照反应不敏感。苹果蠹蛾张掖种群的临界光周期与美国密歇根州种群基本相同(Garcia-Salazar *et al.*, 1988)。

3.3 寄主

杨富银等(2009)研究了红玉苹果、红元帅苹果、张掖 2 号苹果、沙果、苹果梨、早酥梨、杏对苹果蠹蛾生长发育和繁殖的影响,结果表明:不同寄主对苹果蠹蛾幼虫和蛹的发育历期、存活率、蛹重、雌成虫寿命、产卵量等均有显著影响;幼虫取食沙果、早酥梨、红玉苹果最有利于其生长发育和繁殖;取食红元帅苹果和张掖 2 号苹果的影响居中;而取食杏和苹果梨,对其生长发育和繁殖表现出明显的不利性,主要表现为幼虫死亡率增加,幼虫期延长,蛹期延长,蛹重减轻,雌成虫寿命缩短,单雌产卵量降低。

4 监测与防治

4.1 监测技术研究

自苹果蠹蛾传入敦煌后,甘肃省就开始了利用性诱剂监测苹果蠹蛾的工作(宋东宏等, 1993)。2006 年后,不少学者在甘肃对不同诱捕器的监测效果进行了研究。杜磊等(2007)认为三角胶粘式诱捕器的诱捕量不仅是水盆式诱捕器的 2.84 倍,而且最早监测到成虫的时间早于水盆式诱捕器 3~4 d。石磊等(2009)认为三角胶粘式、水盆式和水瓶式 3 种诱捕器中,以三角胶粘式诱捕器的诱捕效果最好,其诱捕量分别是水盆式诱捕器和水瓶式诱捕器的 3.7 和 4.6 倍。王安勇等(2009)报道,三角式和飞翼式诱捕器的诱捕效果显著优于水盆式和圆筒式,诱捕器的悬挂高度以 4 m 处的诱蛾量最高,绿色诱捕器的诱捕效果优于粉红色和黑色诱捕器。

作者于 2013 年通过标记回收技术研究了三角

胶粘式诱捕器的有效诱捕距离,结果表明:在距释放点 100 m 的范围内均可诱捕到苹果蠹蛾雄虫,但以 20 m 范围内的诱捕量最多,50 m 后诱捕量急剧下降,因此建议在苹果蠹蛾监测中诱捕器的悬挂密度最低为 3 个 · hm^{-2}。

4.2　防治技术研究

4.2.1　*性信息素迷向技术*　魏玉红等(2010)利用苹果蠹蛾性信息素迷向丝开展了迷向技术防治苹果蠹蛾的试验,结果表明:对照区连续 3 年全年每个诱捕器的诱蛾量分别为 16.67、34.0 和 19.25 头,而迷向区只有 0.17、0.33 和 0 头;9 月上中旬调查,对照区的蛀果率分别为 1.87%、0.55%和 0.19%,而迷向区均未发现蛀果。多数研究表明,迷向技术不仅有效控制苹果蠹蛾的危害,而且降低了化学农药的使用量和使用次数(魏玉红等,2010; 涂洪涛等,2012; 朱虹昱等,2012)。

4.2.2　*老熟幼虫诱杀技术*　作者在甘肃省金塔县金塔镇上杰村进行了瓦楞纸诱捕老熟幼虫试验,试验结果表明:瓦楞纸诱虫带对苹果蠹蛾老熟幼虫具有较好的诱捕效果,平均每条诱虫带的诱捕量为 18.8 头(魏玉红等,2012)。林明极等(2012)在黑龙江东宁县比较了编织袋、旧衣物和瓦楞纸 3 种材料对老熟幼虫的诱捕效果,发现旧衣物对老熟幼虫的诱捕效果最好,其诱捕量占总诱捕量的 68.42%,而瓦楞纸的诱捕量仅占总诱捕量的 5.2%。可见,不同诱虫带的褶皱对老熟幼虫的诱捕效果有明显影响。

4.2.3　*药剂防治*　苹果蠹蛾发生后,各地普遍采用高效氯氰菊酯、阿维菌素、吡虫啉等药剂进行防治(秦占毅等,2007; 王兆平,2012; 杨晓萍和王文平,2008)。杨建强等(2011)比较了甲氰菊酯、联苯菊酯、溴氰菊酯、丙溴磷、甲氨基阿维菌素苯甲酸盐、苏云金芽孢杆菌(*Bt*)及灭幼脲等 7 种药剂对苹果蠹蛾的田间防治效果,结果表明:各药剂在药后 1 d 的卵果和蛀果率防效就达到 79.4%~91.8%,药后 30 d 的防效仍保持在 74.0%~80.8%;各药剂中以甲氨基阿维菌素苯甲酸盐和 *Bt* 效果最好,药后 3 d 防效达到 95%以上,药后 30 d 防效达到 80%。张润志等(2012)分别在甘肃省张掖市甘州区和酒泉市金塔县进行了高效氯氰菊酯、毒死蜱和 *Bt* 防治第 2 代苹果蠹蛾试验,试验表明:4.5%高效氯氰菊酯乳油 1000 倍液防治苹果蠹蛾的效果最好,其药后 5、10、15 d 的蛀果率防效分别达到 88.1%、82.4%和 83.6%;其次为 *Bt*,其 300~500 倍液药后 5、10、15 d 的蛀果率防效分别达到 72.4%~83.7%、70.6%~71.7%和 70.2%~71.0%;而 48%毒死蜱乳油 1000 倍液对苹果蠹蛾几乎没有效果,其最高防效只有 35.2%。

5　结束语

自 2005 年苹果蠹蛾在甘肃严重发生后,引起了各级政府的高度重视,先后投入了大量的人力、物力,开展了苹果蠹蛾疫情的监测、防控与阻截工作,甘肃省先后颁布实施了《苹果蠹蛾疫情监测技术规范》(DB 62/T 2145—2011)和《苹果蠹蛾综合防控技术规范》(DB 62/T 2145—2011)2 个地方标准,建立健全了疫情监测体系和防控工作机制,并连续多年开展了以农业措施、物理诱杀、迷向防治及药剂防治为内容的苹果蠹蛾“百日防控行动”,虽然苹果蠹蛾的危害得到了有效控制,疫情扩散蔓延的势头得以遏制,但仍不能放松警惕。纵观苹果蠹蛾在甘肃发生危害的过程可以看出,苹果蠹蛾之所以迅速扩散蔓延、危害加剧,其原因在于没有长期坚持苹果蠹蛾的防控工作。20 世纪 90 年代苹果蠹蛾在甘肃酒泉局部区域发生危害后,当地有关部门就采取了一系列的措施,使苹果蠹蛾的危害得到控制,但此后逐步放松了对苹果蠹蛾的防控,造成虫源逐年积累,危害程度加重,加之果品流通领域的飞速发展和检疫不力,最终导致苹果蠹蛾迅速扩散蔓延。因此,今后除继续做好发生区苹果蠹蛾的防控工作之外,应加大果品调用过程中的检疫力度,以防止其进一步扩散蔓延,并加强防治技术及抗药性方面的研究。

参考文献

柴武高, 段志山, 张其展, 吴海燕. 2009. 民乐县苹果蠹蛾的发生与综合防治. 甘肃农业科技, (5): 58-59.

成玉萍, 袁大兴. 2008. 金塔县苹果蠹蛾的发生与防治. 现代农业科技, (15): 159.

杜磊, 张润志, 蒲崇建, 贾迎春. 2007. 两种苹果蠹蛾性引诱剂诱捕器诱捕效率比较及地面植被的影响. 昆虫知识, 44(2): 233-237.

金瑞华, 张家娴, 白章红, 刘龙, 李冬明, 张遵雄, 姚文图, 张从仲, 耿秉晋, 张平, 蔺创业, 张积儒. 1996. 苹果蠹蛾分布与降雨关系研究初报. 植物检疫, 10(3): 129-136, 141.

林明极, 焦晓丹, 隋广义. 2012. 苹果蠹蛾老熟幼虫诱杀技

术. 应用昆虫学报, 49(1): 104-108.
刘晓刚, 魏周秀. 2009. 临泽县苹果蠹蛾发生特点及防治技术. 中国植保导刊, 29(6): 27-28.
刘月英, 罗进仓, 周昭旭, 魏玉红. 2011. 甘肃张掖地区苹果蠹蛾发育起点温度和有效积温的研究. 植物保护, 37(6): 183-185.
刘月英, 罗进仓, 周昭旭, 魏玉红. 2012. 不同温度下苹果蠹蛾实验种群生命表. 植物保护学报, 39(3): 205-210.
刘月英, 罗进仓, 周昭旭, 张大为, 魏玉红. 2015. 光周期和温度对苹果蠹蛾滞育诱导的影响. 植物保护学报, 39(3): 205-210.
林伟, 林长军, 庞金. 1996. 生态因子在苹果蠹蛾地理分布中的作用. 植物检疫, 10(1): 1-7.
鲁月娥. 2008. 山丹县苹果蠹蛾发生规律及防治. 甘肃农业科技, (11): 58-59.
秦晓辉, 马德成, 张煜, 李广华, 王培. 2006. 苹果蠹蛾在我国西北发生为害情况. 植物检疫, 20(2): 95-96.
秦占毅, 刘生虎, 岳彩霞, 张家银. 2007. 苹果蠹蛾在甘肃敦煌的生物学特性及综合防治技术. 植物检疫, 21(3): 170-171.
石磊, 陈明, 罗进仓. 2009. 3 种性诱捕器诱捕苹果蠹蛾效果比较及成虫的时序动态变化. 甘肃农业大学学报, 44(2): 115-117.
宋东宏, 贾迎春, 白桦, 张平. 1993. 警惕苹果蠹蛾向东传播. 植物检疫, 7(6): 442.
王安勇, 张雅林, 罗进仓, 冯纪年. 2009. 不同类型诱捕器对苹果蠹蛾的诱捕效果. 植物保护学报, 36(4): 383-384.
王春林, 王福祥. 2009. 苹果蠹蛾疫情防控阻截动态及思考. 植物保护, 35(2): 102-103.
王兆平. 2012. 民勤县苹果蠹蛾的发生规律及防治措施. 甘肃农业科技, (9): 53-54.
魏玉红, 罗进仓, 刘月英, 周昭旭, 张大为. 2014. 苹果蠹蛾羽化产卵及卵孵化的昼夜节律. 植物保护, 40(3): 143-146.
魏玉红, 罗进仓, 周昭旭, 刘月英. 2010. 性信息素迷向技术防治苹果蠹蛾试验初报. 中国果树, (3): 48-50.
魏玉红, 罗进仓, 周昭旭, 刘月英. 2012. 甘肃省苹果蠹蛾卵的空间分布格局. 应用昆虫学报, 49(1): 49-53.
涂洪涛, 张金勇, 罗进仓, 王春良, 宝山, 刘延杰, 陈汉杰. 2012. 苹果蠹蛾性信息素缓释剂的控害效果. 应用昆虫学报, 49(1): 109-113.
许永锋. 2008. 苹果蠹蛾在张掖市发生与为害规律调查. 植物检疫, 22(4): 246-248.
闫玉兰. 2008. 苹果蠹蛾在酒泉市的发生规律及综合防治. 甘肃农业科技, (4): 59-60.
杨富银, 陈明, 罗进仓, 周昭旭. 2009. 不同食料对苹果蠹蛾生长发育和繁殖的影响. 植物保护, 35(5): 62-64.
杨建强, 赵骁, 严勇敢, 张雅林, 冯纪年. 2011. 7 种药剂对苹果蠹蛾的防治效果. 西北农业学报, 20(9): 194-196.
杨晓萍, 王文平. 2008. 肃州区苹果蠹蛾的发生及综合防治措施. 甘肃农业科技, (3): 47-48.
翟小伟, 刘万学, 徐洪富, 万方浩, 蒲崇建. 2009. 苹果蠹蛾卵在梨园中的分布特性和空间格局. 植物保护学报, 36(4): 343-348.
翟小伟, 刘万学, 万方浩, 蒲崇建. 2010. 甘肃酒泉苹果蠹蛾的发生规律. 植物保护, 47(4): 715-719.
赵生梅. 2012. 苹果蠹蛾在瓜州县的发生与防治. 甘肃农业科技, (11): 54-55.
赵泽普. 2012. 张掖试验场苹果蠹蛾防治采取的措施及取得的成效. 甘肃农业, (19): 71.
张开骅. 2010. 古浪县苹果蠹蛾的危害及综合防治. 甘肃农业科技, (5): 61-62.
张润志, 王福祥, 张雅林, 陈汉杰, 罗进仓, 王勤英, 刘万学, 艾尼瓦尔·木沙, 等. 2012. 入侵生物苹果蠹蛾监测与防控技术研究——公益性行业(农业)科研专项(200903042)进展. 应用昆虫学报, (1): 27-42.
张文军. 2008. 高台县苹果蠹蛾疫情防控工作取得的经验及成效. 农业科技与信息, (14): 21-22.
张耀荣, 蒋银荃. 2001. 苹果蠹蛾生物学特性及综合防治. 中国森林病虫, (1): 21-23.
周昭旭, 罗进仓, 陈明. 2008. 苹果蠹蛾的生物学特性及消长动态. 植物保护, 34(4): 111-114.
朱虹昱, 刘伟, 崔艮中, 张增幅, 张润志. 2012. 苹果蠹蛾迷向防治技术效果初报. 应用昆虫学报, 49(1): 121-129.
Aghdam H R, Fathipour Y, Kontodimas D C, Radjabi G and Rezapanah M. 2009a. Age-specific life table parameters and survivorship of an Iranian population of the codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) at different constant temperatures. *Annals Entomological Society of America*, 102: 233-240.
Aghdam H R, Fathipour Y, Radjabi G and Rezapanah M. 2009b. Temperature-dependent development and temperature thresholds of codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) in Iran. *Environmental Entomology*, 38: 885-895.
Garcia-Salazar C, Podoler H and Whalon M E. 1988. Effects of temperature on diapause induction in the codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Olethreutidae). *Environmental Entomology*, 17: 626-628.

(责任编辑:郭莹)

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2015.04.006

苹果蠹蛾种群遗传多样性研究进展

李玉婷, 陈茂华*
西北农林科技大学植物保护学院,农业部西北黄土高原作物
有害生物综合治理重点实验室,陕西 杨凌 712100

摘要: 苹果蠹蛾是重要的世界性果树害虫,寄主广泛,通过形成各种生态型或种群适应新入侵环境,对当地果品生产造成严重损失。本文综述了国内外有关苹果蠹蛾遗传多样性的研究进展。相关研究表明,寄主植物、地理隔离和杀虫剂等因素影响种群间的遗传多样性和遗传分化。其中,地理隔离是种群间形成遗传分化的主要原因之一,寄主分布格局、气候条件、虫体飞行能力和人为活动等因素都会影响种群间遗传分化的程度。苹果蠹蛾是我国重要的入侵害虫,我国东北地区和西北地区的苹果蠹蛾种群具有不同的遗传多样性水平,并且种群间有一定程度的分化,今后需要进一步研究影响我国苹果蠹蛾种群遗传的重要因素,明确该虫种群间分化情况、入侵来源和扩散路径,这对于延缓苹果蠹蛾在我国的扩散,制定合理有效的综合防治策略具有重要意义。

关键词: 苹果蠹蛾; 遗传多样性; 遗传分化

Recent advances concerning the population genetic diversity of the codling moth, *Cydia pomonella* (L.)

Yu-ting LI, Mao-hua CHEN*
Key Laboratory of Crop Pest Integrated Pest Management on the Loess Plateau, Ministry of Agriculture, College of Plant Protection, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, *China*

Abstract: The codling moth, *Cydia pomonella* is an important cosmopolitan fruit pest. This species has a wide host range, and forms various ecotypes or populations to adapt newly invaded habitats, thus causing serious economic losses to fruit production every year. The research progresses of *C. pomonella* genetic diversity in China and other counties were reviewed in the current paper. The previous research showed that some factors including host plants, geographic isolation and insecticide application could affect the population genetics of *C. pomonella*. Geographic isolation was one of the major factors which caused genetic differentiation of the pest, whilst other factors including host plant distribution, climate, flight capacity and anthropogentic measures could also influence the extent of genetic differentiation. *C. pomonella* populations from the northwestern vs. northeastern China have different level of genetic diversity, and show genetic differentiation. The further research need to be done to analyze the major factors that influence the population genetics of the codling moth in China, and to clarify the genetic differentiation, invasion origins, distribution routes of the pest, which will be important for slowing down the spread and help the development of integrated control of the pest in China.

Key words: codling moth; genetic diversity; genetic differentiation

苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* (L.)属鳞翅目 Lepidoptera 卷蛾科 Tortricidae 小卷蛾属 *Cydia*,分布于全世界大多数温带区域(Shel′Deshova,1967),是世界性重要果树害虫之一。该虫起源于欧洲东南部,之后随着苹果的移植和人为因素扩散到整个欧洲大陆,目前已广泛分布于美洲、非洲、澳洲和亚洲除东亚以外的所有苹果产区(林伟等,1996; Franck *et al.*, 2007; Meraner *et al.*, 2008; Shel′ Deshova, 1967)。苹果蠹蛾寄主广泛,包括仁果类的苹果、苹果梨、沙果、梨、山楂、海棠,核果类的桃、李、杏、枣、樱桃等植物(杨瑞,2008; Michelbacher & Ortega, 1958)。该虫主要以幼虫蛀果危害并取食种子,有

收稿日期(Received): 2015-06-08 **接受日期(Accepted)**: 2015-10-20
基金项目: 国家自然科学基金(31071687); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(博导类)(20110204110001); 国家科技支撑计划课题(2012BAK11B03)
作者简介: 李玉婷, 女, 博士。研究方向: 分子生态学。E-mail: yutingli1989@163.com
* 通讯作者(Author for correspondence), E-mail: maohua.chen@nwsuaf.edu.cn

转果为害习性,蛀果率普遍在 50%以上,严重时可达 100%;其危害常造成大量落果,降低果品的产量和品质,对水果生产造成巨大损失,也严重影响水果的出口(李明远,2006; 万方浩等,2009; 张学祖,1957; 朱淑梅,2007; Barnes,1991)。

遗传多样性主要指种内不同群体或种群内不同个体间的遗传变异的总和(胡志昂和张亚平,1997; Hughes *et al.*,2008),可以体现在不同的水平上,而最直接和最显著的表现形式是遗传差异的程度。遗传多样性的根本来源是遗传物质的改变,但也受外在环境因素如寄主植物、地理隔离、农药使用、人为协助的扩散、气候等因素的影响和制约(Berg *et al.*,2002; Chen & Dorn,2009; DeChaine & Martin,2004; Feder *et al.*,1994; Fuentes-Contreras *et al.*,2014; Lande & Shannon,1996; Medina *et al.*,2014; Zheng *et al.*,2013)。苹果蠹蛾具有较强的适应性,通过形成各种生态型和种群成功适应不同的栖境,从而在寄主选择、抗药性、繁殖能力、活动能力等方面产生差异(Boivin *et al.*,2001、2003、2005; Gu *et al.*,2006; Keil *et al.*,2001; Neven,1999; Sauphanor *et al.*,1998; Schumacher *et al.*,1997; Timm *et al.*,2006),且一些特性可以在种群内遗传并在选择压力的作用下不断加强(Meraner *et al.*,2008; Timm *et al.*,2006)。

种群遗传多样性反映了物种对环境的适应能力,通过分析苹果蠹蛾不同种群间的遗传多样性,可以深入了解其种群结构动态和抗药性,揭示具有不同生物学特性的种群或生态型背后的遗传学基础,并为科学合理地制定防治策略提供依据。目前,针对苹果蠹蛾遗传多样性已开展了一系列的研究,本文主要从寄主隔离、地理隔离和抗药性等方面综述国内外有关苹果蠹蛾遗传多样性的研究,深入理解遗传多样性的变化规律。

1 国外苹果蠹蛾遗传多样性研究

1.1 不同寄主种群的遗传多样性

寄主植物与植食性昆虫在长期的演化过程中协同进化、相互作用(钦俊德,1995),昆虫对不同寄主植物的选择和适应是形成种群间遗传多样性的原因之一(Drès & Mallet,2002; Medina *et al.*,2014)。早期的生理学和行为学相关研究发现,采自苹果、李和核桃等寄主植物上的苹果蠹蛾存在明显的生物学差异(Phillips & Barnes,1975)。有分析认为,苹果蠹蛾存在明显不同的寄主相关的寄主型,核桃寄主型来自苹果寄主型,李寄主型来自核桃寄主型(Barnes,1991; Phillips & Barnes,1975)。因此,苹果蠹蛾对不同寄主植物的适应性不仅影响种群的遗传多样性,而且对种群分化具有重要作用。

Buès *et al.*(1995)利用 7 个等位酶多态位点对来自法国和智利苹果、梨、核桃和杏的苹果蠹蛾种群进行分析,发现虽然不同寄主种群间遗传分化程度很低,但是不同种群的等位基因频率差异显著。Timm *et al.*(2006)通过 5 对 AFLP 引物对南非不同寄主植物(梨、苹果和核果)上的苹果蠹蛾种群间的遗传多样性进行研究,并选取 1 个英国田间种群和 1 个加拿大实验室种群用以比较,结果显示,南非种群间的遗传多样性高于英国和加拿大种群,且不同寄主植物上的种群间无遗传分化。Voudouris *et al.*(2012)用 11 个微卫星位点分析了希腊和法国苹果、梨和核桃上的苹果蠹蛾种群的遗传结构和基因流,结果表明,不同寄主种群间无显著分化且不影响苹果蠹蛾的遗传结构。Thaler *et al.*(2008)运用 AFLP 标记研究发现,采自意大利核桃和苹果上的苹果蠹蛾种群存在遗传分化。Chen & Dorn(2009)选取 9 个微卫星位点对瑞士的苹果、杏和核桃园中的苹果蠹蛾种群的遗传分化和基因流进行研究,结果表明,瓦莱州 3 种寄主植物上的苹果蠹蛾种群间存在显著的遗传分化,分析认为,苹果蠹蛾对寄主的产卵选择性以及寄主的物候差异造成了该虫种群间的分化。

1.2 不同地理种群的遗传多样性

地理隔离使生物种群的遗传多样性产生差异,是影响种群间基因交流和种群遗传结构,并促进种群间遗传分化的重要因素(Oldroyd & Fewell,2007; Slatkin,1993)。苹果蠹蛾分布范围广泛,且飞行能力较弱,地理屏障如峡谷、山脉、海拔等会限制苹果蠹蛾的扩散和迁移,从而影响种群间的遗传多样性。

Pashley & Bush(1979)利用等位酶多态性分析了南非、澳大利亚、奥匈帝国、智利、加拿大及新西兰等 6 个国家的苹果蠹蛾种群的遗传差异,结果表明这些种群间无显著的遗传分化。Espinoza *et al.*(2007)选取了 8 个微卫星位点对智利的 6 个苹果蠹蛾地理种群的遗传多样性进行了研究,结果显示,尽管一些种群间的地理距离约 180 km,但是种

群间遗传分化程度较低(FST = 0.0 ~ 0.00097),地理距离和遗传距离间无显著相关性。Fuentes-Contreras *et al.*(2008)对智利苹果蠹蛾种群的研究也表明,与水果生产相关的人为活动促进了不同果园间苹果蠹蛾种群间的基因交流,种群间的遗传分化程度较低(FST = 0.002176),该地区果园管理模式(废弃果园、有机果园、传统果园)与苹果蠹蛾种群的遗传结构不相关。Franck *et al.*(2007)使用 7 个微卫星位点研究了法国、意大利、亚美尼亚和智利的 27 个苹果蠹蛾种群的遗传多样性和遗传结构,结果表明,4 个国家的苹果蠹蛾种群间存在遗传分化,遗传距离与地理距离相关,但法国的 24 个苹果蠹蛾种群间遗传分化不明显。Timm *et al.*(2006)发现,南非的 9 个苹果蠹蛾地理种群间有显著的种群遗传结构,当地苹果蠹蛾种群的基因流动较少,相隔 1 km以内的种群都存在遗传多样性。Thaler *et al.*(2008)采用 AFLP 标记研究了意大利的苹果蠹蛾种群遗传多样性,结果显示,虽然苹果蠹蛾各种群内个体的遗传多样性很低,但即使在小范围内,苹果蠹蛾各种群间也显示出高水平的遗传分化;分析认为,分布地的微气候、生态环境和地理隔离使苹果蠹蛾种群分成许多局部种群,害虫防治活动也对苹果蠹蛾具有选择压力,这些因素影响了苹果蠹蛾意大利种群的遗传结构。Khaghanina *et al.*(2011)利用 RAPD 标记分析了伊朗西北部 13 个地理种群的遗传结构,结果显示,种群间和种群内遗传分化显著,遗传距离与地理距离显著相关,认为苹果蠹蛾弱的飞行能力和当地的气候条件是影响其种群遗传分化的重要因素。Chen & Dorn (2009)研究表明,瑞士的 15 个苹果蠹蛾地理种群间存在显著的遗传分化,即使来自距离较近(10 km)果园的苹果蠹蛾种群间遗传分化也非常明显;分析认为,造成该结果的主要因素是苹果蠹蛾自身迁移能力、人为因素以及地理隔离。Gund *et al.*(2012)选取 6 个微卫星位点和线粒体 COI 基因分析了欧洲的苹果蠹蛾遗传多样性和遗传结构。微卫星结果表明,4 个国家(德国、瑞士、荷兰和奥地利)所有种群的整体遗传分化不显著,且遗传距离和地理距离不相关,方差分析显示,6 个地区的苹果蠹蛾种群间存在显著的遗传分化,但莱茵河流域的 4 个地区种群间无显著的分化;线粒体 COI 基因结果显示,3 个国家(德国、荷兰和奥地利)的 8 个苹果蠹蛾种群的所有单倍型分为 2 支,德国的苹果蠹蛾种群与邻近国家的种群具有遗传分化。

1.3　抗药性种群的遗传多样性

防治苹果蠹蛾的主要方法有化学杀虫剂、干扰交配以及苹果蠹蛾颗粒体病毒(CpGV),其中化学杀虫剂是最主要的防治方法(Fuentes-Contreras *et al.*,2007; Voudouris *et al.*,2012)。长期的化学防治和不合理的用药导致苹果蠹蛾对大多数杀虫剂产生抗性(段辛乐等,2015; Asser-Kaiser *et al.*,2011; Franck *et al.*,2007; Mota-Sanchez *et al.*,2008; Reyes *et al.*,2009; Rodríguez *et al.*,2010)。杀虫剂选择压力促进了苹果蠹蛾种群间遗传差异的产生,而抗性基因在种群中的积累和扩散会进一步影响苹果蠹蛾的遗传结构和遗传多样性(Boivin *et al.*,2005; Bouvier *et al.*,2001; Meraner *et al.*,2008)。

Franck *et al.*(2007)对法国、意大利、亚美尼亚和智利的 27 个苹果蠹蛾抗性种群研究发现,杀虫剂对这些苹果蠹蛾种群遗传多样性和微卫星等位基因丰富度的影响低于对种群遗传结构的影响。杀虫剂的使用影响了苹果蠹蛾种群动态,并在一定程度上影响种群的等位基因丰富度。Cheney *et al.*(2008)应用 AFLP 标记分析了德国 8 个 CpGV 抗性种群的遗传多样性,结果显示,苹果蠹蛾种群具有高的遗传多样性,田间敏感种群遗传多样性略高于抗性种群,CpGV 处理的选择压力使抗性种群内部的遗传多样性随着时间推移而丢失。Meraner *et al.*(2008)利用线粒体基因标记研究了意大利苹果蠹蛾的 21 个实验室种群和 4 个野外种群的遗传多样性和系统进化关系与除虫脲抗性之间的关系。结果表明,意大利的苹果蠹蛾种群分为 2 个大的遗传群,这 2 个遗传群很可能在更新世的前期或中期就已相互分离,但除虫脲抗性和敏感种群间无显著的遗传分化,未发现与除虫脲抗性相关的单倍型或单倍型组合,因此,线粒体单倍型分布模式不能预测田间杀虫剂选择压力下苹果蠹蛾种群的抗性。Thaler *et al.*(2008)研究了意大利苹果蠹蛾除虫脲抗性种群的遗传多样性和遗传结构,结果显示,除虫脲抗性和敏感种群间无显著的分化,除虫脲抗性与地理距离或遗传距离不相关, AFLP 标记不适用于田间苹果蠹蛾抗药性的预测。Franck & Timm (2010)基于 3 个微卫星位点和 2 个杀虫剂抗性标记(钠离子通道基因和细胞色素 P450 基因)对法国

2 个苹果蠹蛾抗性种群的遗传多样性进行了研究。结果发现,杀虫剂的使用历史促进了 2 个种群的分化,微卫星和钠离子通道基因标记发现种群间无遗传结构,而细胞色素 P450 基因的结果显示,苹果蠹蛾种群中 P450 活性易受时间的影响。因此,杀虫剂使用是苹果蠹蛾种群间遗传多样性短暂变化的一个重要因素。Pajač *et al.*(2011)选用 10 个微卫星位点对克罗地亚 3 个苹果蠹蛾种群的遗传结构和基因流进行了研究,其中 2 个种群在过去 15 年一直使用化学防治,1 个种群未使用化学防治,结果发现苹果蠹蛾种群间遗传分化不显著。Gund *et al.*(2012)对苹果蠹蛾 CpGV-M 抗性和敏感种群的遗传多样性分析发现,抗性种群和敏感种群间遗传分化不显著,且种群水平和个体水平均没有与抗性相关的遗传结构。Kil′ & Besedina(2013)利用 RAPD 和微卫星标记研究了俄罗斯 2 个地区 5 个苹果蠹蛾种群的遗传多样性,发现杀虫剂处理和不处理的种群间遗传多样性差异不显著,杀虫剂的使用影响种群大小但不影响种群的遗传多样性。Fuentes-Contreras *et al.*(2014)利用 5 个微卫星位点对智利一个农药防治的经济果园和未使用农药防治的果园 2 个世代的苹果蠹蛾种群遗传多样性和遗传结构进行了研究,结果表明,种群间存在显著的遗传分化,2 种类型果园中第 1 代和第 2 代苹果蠹蛾种群间遗传分化显著,成虫在果园周边的扩散影响种群动态,不对称的杀虫剂选择压力影响当地苹果蠹蛾种群的遗传结构。

2 国内苹果蠹蛾遗传多样性研究

苹果蠹蛾是我国禁止入境和全国检疫性有害生物,1953 年首次在我国新疆库尔勒地区被发现(张学祖,1957),随后扩散至新疆全境,20 世纪 80 年代中期该虫传入甘肃敦煌境内,并持续向东扩张,目前在张掖、酒泉、武威等地严重发生,正沿着河西走廊逼近我国苹果优势产区陕西及其东部地区(秦晓梅等,2006; 吴立峰,2015)。该虫 2006 年在黑龙江地区被发现,后在牡丹江市和鸡西市的大部分地区普遍发生(吴立峰,2015; 赵星民,2011)。近年来,苹果蠹蛾在我国的扩散速度加快,并且危害程度日趋加重,严重威胁我国水果产业的安全。

相较于国外,我国关于苹果蠹蛾种群遗传多样性和遗传结构的研究较少。董昆(2010)基于线粒体 COI 基因研究了新疆和甘肃的 10 个苹果蠹蛾种群的遗传分化,结果表明,种群间的分化不明显,伊犁种群较为古老,可能是新疆或整个西部疫区最早的入侵地。李玉婷等(2013)基于线粒体 COI 基因序列对甘肃河西走廊 8 个苹果蠹蛾种群的遗传多样性和遗传分化进行了研究,发现河西走廊苹果蠹蛾遗传多样性较低,种群间具有一定程度的遗传分化,而种群间地理距离与遗传距离不相关。门秋雷(2012)和 Men *et al.*(2013)选用 8 个微卫星位点对我国 12 个苹果蠹蛾种群的遗传结构和遗传多样性进行分析,并采集了德国和瑞士的种群作为对照。结果表明,相较于德国和瑞士种群,我国苹果蠹蛾种群的遗传多样性较低,而东北种群的遗传多样性高于西北种群,虽然未发现瓶颈效应,但入侵过程中奠基者种群连续的扩散导致遗传多样性的降低,东北地区较高的遗传多样性可能来源于多次入侵;苹果蠹蛾种群在分布上具有明显的遗传结构,而东北的 2 个种群与德国和瑞士的种群具有相似的遗传结构,因此欧洲可能是我国东北地区苹果蠹蛾种群的入侵来源之一;西北种群间地理距离与遗传距离不相关,但 2 个东北种群加入后变得显著相关,且东北和西北种群间有高的遗传分化。李玉婷(2013)和 Li *et al.*(2015)通过 3 个线粒体基因标记(COI、COII 和 Cytb)对我国主要疫区新疆、甘肃和黑龙江的 14 个苹果蠹蛾的遗传多样性和遗传分化进行了研究,并加入 9 个国外种群分析我国苹果蠹蛾的入侵来源。结果显示,东北种群与国外田间种群均表现高的单倍型数量和高的遗传多样性,但西北种群遗传多样性明显较低;东北和西北种群均与国外种群共享一些单倍型,且单倍型在东北和西北的分布不同,东北种群拥有较多的独享单倍型,而西北种群的大量个体共享几个单倍型;新疆和甘肃种群间遗传分化不显著,但东北和西北种群间遗传分化显著,并且东北、西北和欧洲种群间遗传分化显著。分析认为,东北和西北种群具有不同的入侵来源,苹果蠹蛾首先从中亚入侵到新疆,随后从新疆传到甘肃,而东北种群与俄罗斯相邻,频繁的贸易交流加速了苹果蠹蛾的入侵。

3 总结与展望

苹果蠹蛾是扩散能力较弱的蛾类害虫,其种群遗传结构和遗传多样性容易受到分布地区的环境因子和人为活动的影响,因此在世界不同地区,该虫具有不同的遗传多样性和遗传结构特点,其综合

防治要考虑当地的遗传多样性和遗传分化情况。苹果蠹蛾入侵我国后整体遗传多样性水平降低,不同地理种群间有一定程度的分化,但东北地区苹果蠹蛾种群遗传多样性水平和遗传结构与欧洲地区相似,表明欧洲可能是东北地区苹果蠹蛾的入侵来源之一,而西北的苹果蠹蛾种群可能来自中亚地区。

针对入侵害虫种群遗传多样性的研究不仅有利于全面了解其遗传分化、适应性、入侵来源和扩散路径,而且对入侵种群的防治具有重要的指导意义。目前,有关我国苹果蠹蛾遗传多样性的研究仍较少,今后需深入研究寄主、地理环境和气候条件、农药的选择压力等因素对我国苹果蠹蛾种群的影响,进一步明确该虫种群间分化情况、入侵来源和扩散路径,从而制定合理有效的综合防治策略,切断或延缓苹果蠹蛾在我国的进一步传播扩散。

参考文献

董昆. 2010. 基于 COI 基因的苹果蠹蛾地理种群遗传差异分析及幼虫快速分子鉴定. 杨凌: 西北农林科技大学.

段辛乐, 乔宪凤, 陈茂华. 2015. 苹果蠹蛾抗药性研究进展. 生物安全学报, 24(1): 1-8.

胡志昂, 张亚平. 1997. 中国动植物的遗传多样性. 杭州: 浙江科学技术出版社.

李明远. 2006. 苹果蠹蛾的发生与防治. 河北果树, (6): 14.

李玉婷. 2013. 基于线粒体基因标记的我国苹果蠹蛾遗传多样性与入侵来源分析. 杨凌: 西北农林科技大学.

李玉婷, 王康, 郑燕, 门秋雷, 钱路, 安榆林, 冯纪年, 张雅林, 陈茂华. 2013. 甘肃河西走廊苹果蠹蛾种群遗传分化研究——基于 COI 基因序列分析. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 41(9): 85-90.

林伟, 林长军, 宠金. 1996. 生态因子在苹果蠹蛾地理分布中的作用. 植物检疫, 10(1): 1-7.

门秋雷. 2012. 基于微卫星分子标记的中国疫区内苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* (L.)种群遗传多样性和遗传结构研究. 杨凌: 西北农林科技大学.

钦俊德. 1995. 昆虫与植物关系的研究进展和前景. 动物学报, 41(1): 12-20.

秦晓梅, 马德成, 张煜, 李广华, 王培. 2006. 苹果蠹蛾在我国西北发生危害情况. 植物检疫, 20(2): 95-96.

万方浩, 马子龙, 马瑞燕, 王瑞, 王源超, 左平, 冯洁, 冯玉龙, 等. 2009. 中国生物入侵研究. 北京: 科学出版社.

吴立峰. 2015. 2014 年全国植物检疫性有害生物发生情况分析. 中国植保导刊, (8): 62-63.

杨瑞. 2008. 苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* (L.)在中国的适生性研究. 杨凌: 西北农林科技大学.

张学祖. 1957. 苹果蠹蛾(*Carpocapsa pomonella* L.)在我国的新发现. 昆虫学报, 7(4): 467-472.

赵星民. 2011. 北方寒地苹果蠹蛾发生规律及综合防治研究. 植物检疫, 25(1): 87-88.

朱淑梅. 2007. 苹果蠹蛾的发生与防治. 河北果树, (6): 41.

Asser-Kaiser S, Radtke P, El-Salamouny S, Winstanley D and Jehle J A. 2011. Baculovirus resistance in codling moth (*Cydia pomonella* L.) caused by early block of virus replication. *Virology*, 410: 360-367.

Barnes M M. 1991. Codling moth occurrence, host race formation and damage// Geest L P S and Evenhuis H H. *Tortricid Pest: Their Biology, Natural Enemies and Control*. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier, 313-328.

Berg D J, Garton D W, Macisaac H J, Panov V E and Telesh I V. 2002. Changes in genetic structure of North American *Bythotrephes* populations following invasion from Lake Ladoga, Russia. *Freshwater Biology*, 47: 275-282.

Boivin T, Bouvier J C, Chadoeuf J, Beslay D and Sauphanor B. 2003. Constraints on adaptive mutations in the codling moth *Cydia pomonella* (L.): measuring fitness trade-off and natural selection. *Heredity*, 90: 107-113.

Boivin T, Chabert d'Hieres C, Bouvier J C, Beslay D and Sauphanor B. 2001. Pleiotropy of insecticide resistance in the codling moth, *Cydia pomonella*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 99: 381-386.

Boivin T, Chadoeuf J, Bouvier J C, Beslay D and Sauphanor B. 2005. Modelling the interactions between phenology and insecticide resistance genes in the codling moth. *Pest Management Science*, 61: 53-67.

Bouvier J C, Buès R, Boivin T, Boudinhon L, Beslay D and Sauphanor B. 2001. Deltamethrin resistance in the codling moth (Lepidoptera: Tortricidae): inheritance and number of genes involved. *Heredity*, 87: 456-462.

Bùes R, Toubon J F and Poitout H S. 1995. Variabilité écophysiologique et enzymatique de *Cydia pomonella* L en function del' origine géographique et de la plante hôte. *Agronomie*, 15: 221-231.

Chen M H and Dorn S. 2009. Microsatellites reveal genetic differentiation among populations in an insect species with high genetic variability in dispersal, the codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae). *Bulletin of Entomological Research*, 14: 1-11.

Cheney S, Hadapad A B and Zebitz C P W. 2008. AFLP analysis of genetic differentiation in CpGV resistant and susceptible *Cydia pomonella* (L.) populations. *Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für Allgemeine und Angewandte Ento-*

mologie, 16: 117-120.

DeChaine E G and Martin A P. 2004. Historic cycles of fragmentation and expansion in *Parnassius smintheus* (Papilionidae) inferred using mitochondrial DNA. *Evolution*, 58: 113-127.

Drès M and Mallet J. 2002. Host races in plant-feeding insects and their importance in sympatric speciation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 357: 471-492.

Espinoza J L, Fuentes-Contreras E, Barros W and Ramírez C C. 2007. Utilización de microsatélites para la determinación de la variabilidad genética de la polilla de la manzana *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera: Tortricidae) en Chile central. *Agricultura Técnica (Chile)*, 67: 244-252.

Feder J L, Opp S B, Wlazlo B, Reynolds K, Go W and Spisak S. 1994. Host fidelity is an effective premating barrier between sympatric races of the apple maggot fly. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 91: 7990-7994.

Franck P, Reyes M, Olivares J and Sauphanor B. 2007. Genetic differentiation in the codling moth: comparison between microsatellite and insecticide resistant markers. *Molecular Ecology*, 16: 3554-3564.

Franck P and Timm A E. 2010. Population genetic structure of *Cydia pomonella*: a review and case study comparing spatio-temporal variation. *Journal of Applied Entomology*, 134: 191-200.

Fuentes-Contreras E, Basoalto E, Franck P, Lavandero B, Knight A L and Ramírez C C. 2014. Measuring local genetic variability in populations of codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) across an unmanaged and commercial orchard interface. *Environmental Entomology*, 43: 520-527.

Fuentes-Contreras E, Espinoza J L, Lavandero B and Ramírez C C. 2008. Population genetic structure of codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) from apple orchards in central Chile. *Journal of Economic Entomology*, 101: 190-198.

Fuentes-Contreras E, Reyes M, Barros W and Sauphanor B. 2007. Evaluation of azinphos-methyl resistance and activity of detoxifying enzymes in codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) from central Chile. *Journal of Economic Entomology*, 100: 551-556.

Gu H N, Huhges J and Dorn S. 2006. Trade-off between mobility and fitness in *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera: Tortricidae). *Ecological Entomology*, 31: 68-74.

Gund N A, Wagner A, Timm A E, Schulze-Bopp S, Jehle J A, Johannesen J and Reineke A. 2012. Genetic analysis of *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) populations with different levels of sensitivity towards the *Cydia pomonella* granulovirus (CpGV). *Genetica*, 140: 235-247.

Hughes A R, Inouye B D, Johnson M T J, Underwood N and Vellend M. 2008. Ecological consequences of genetic diversity. *Ecology Letters*, 11: 609-623.

Keil S, Gu H N and Dorn S. 2001. Response of *Cydia pomonella* to selection on mobility: laboratory evaluation and field verification. *Ecological Entomology*, 26: 495-501.

Khaghanina A, Mohammadi S A, Sarafrazi A M and Nejad K H I. 2011. Population variation of codling moth *Cydia pomonella* (Lep.; Tortricidae) based on molecular data from northwestern Iran. *Turkish Journal of Zoology*, 35: 571-578.

Kil′ V I and Besedina E N. 2013. Variability of molecular genetic structure in codling moth *Cydia pomonella* (L.) populations under the influence of insecticides and environmental stress. *Agriculture Biology*, 1: 61-67.

Lande R and Shannon S. 1996. The role of genetic variation in adaptation and population persistence in a changing environment. *Evolution*, 50: 434-437.

Li Y T, Duan X L, Qiao X F, Li X Y, Wang K, Men Q L and Chen M H. 2015. Mitochondrial DNA revealed the extent of genetic diversity and invasion origin of populations from two separate invaded areas of a newly invasive pest, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae) in China. *Bulletin of Entomological Research*, 105: 485-496.

Medina R, Szendrei Z, Harrison K, Isaacs R, Averill A, Malo E and Rodriguez-Saona C. 2014. Exploring host-associated differentiation in the North American native cranberry fruitworm, *Acrobasis vaccinii*, from blueberries and cranberries. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 150: 136-148.

Men Q L, Chen M H, Zhang Y L and Feng J N. 2013. Genetic structure and diversity of a newly invasive species, the codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae) in China. *Biological Invasions*, 15: 447-458.

Meraner A, Brandstätter A, Thaler R, Aray B, Unterlechner M, Niederstätter H, Parson W, Zelger R, Dalla Via J and Dallinger R. 2008. Molecular phylogeny and population structure of the codling moth (*Cydia pomonella*) in Central Europe: I. Ancient clade splitting revealed by mitochondrial haplotype markers. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 48: 825-837.

Michelbacher A E and Ortega J C. 1958. A technical study of insects and related pests attacking walnuts. *California Agriculture Experimental Station Bulletin*, 764: 1-87.

Mota-Sanchez D, Wise J C, Poppen R V, Gut L J and Holling-

worth R M. 2008. Resistance of codling moth, *Cydia pomonella* (L.)(Lepidoptera: Tortricidae), larvae in Michigan to insecticides with different modes of action and the impact on field residual activity. *Pest Management Science*, 64: 881-890.

Neven L G. 1999. Cold hardiness adaptations of codling moth, *Cydia pomonella*. *Cryobiology*, 38: 43-50.

Oldroyd B P and Fewell J H. 2007. Genetic diversity promotes homeostasis in insect colonies. *Trends in Ecology and Evolution*, 22: 408-413.

Pajač I, Barić B, Šimon S, Mikac K M and Pejić I. 2011. An initial examination of the population genetic structure of *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) in Croation apple orchards. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 9: 459-464.

Pashley D P and Bush G L. 1979. The use of allozymes in studying insect movement with special reference to the codling moth, *Laspeyresia pomonella* (L.) (Olethreutidae) // Rabb R L and Kennedy G G. *Movement of Highly Mobile Insects: Concepts and Methodology in Research*. Raleigh: North Carolina State University Press, 333-341.

Phillips P A and Barnes M M. 1975. Host race formation among sympatric apple, walnut, and plum populations of the codling moth, *Laspeyresia pomonella*. *Annals of the Entomological Society of America*, 68: 1053-1060.

Reyes M, Franck P, Olivares J, Margaritopoulos J, Knight A and Sauphanor B. 2009. Worldwide variability of insecticide resistance mechanisms in the codling moth, *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera: Tortricidae). *Bulletin of Entomological Research*, 99: 359-369.

Rodríguez M A, Bosch D, Sauphanor B and Avilla J. 2010. Susceptibility to organophosphate insecticides and activity of detoxifying enzymes in Spanish populations of *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae). *Journal of Economic Entomology*, 103: 482-491.

Sauphanor B, Brosse V, Monier C and Bouvier J C. 1998. Differential ovicidal and larvicidal resistance to benzoylureas in the codling moth, *Cydia pomonella*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 88: 247-253.

Schumacher P, Weyeneth A, Weber D C and Dorn S. 1997. Long flights in *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera: Tortricidae) measured by a flight mill: influence of sex, mated status and age. *Physiological Entomology*, 22: 149-160.

Shel′Deshova G G. 1967. Ecological factors determining distribution of the codling moth *Lapspeyresia pomonella* L. in the Northern and Southern Hemispheres. *EntoMolecular Review*, 46: 349-361.

Slatkin M. 1993. Isolation by distance in equilibrium and non-equilibrium populations. *Evolution*, 47: 264-279.

Thaler R, Brandstätter A, Meraner A, Chabicovski M, Parson M, Zelger R, Dalla Via J and Dallinger R. 2008. Molecular phylogeny and population structure of the codling moth (*Cydia pomonella*) in Central Europe: II. AFLP analysis reflects human-aided local adaptation of a global pest species. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 48: 838-849.

Timm A E, Geertsema H and Warnich L. 2006. Gene flow among *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) geographic and host populations in South Africa. *Journal of Economic Entomology*, 99: 341-348.

Voudouris C C, Franck P, Olivares J, Sauphanor B, Mamuris Z, Tsitsipis J A and Margaritopoulos J T. 2012. Comparing the genetic structure of codling moth *Cydia pomonella* (L.) from Greece and France: long distance gene-flow in a sedentary pest species. *Bulletin of Entomology Research*, 102: 185-198.

Zheng Y, Peng X, Liu G M, Pan H Y, Dorn S and Chen M H. 2013. High genetic diversity and structured populations of the oriental fruit moth in its range of origin. *PLoS ONE*, 8: e78476.

(责任编辑:杨郁霞)

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2015.04.007

苹果蠹蛾滞育特性研究进展

吴正伟, 樊江斌, 张雅林, 王 敦*
西北农林科技大学植物保护学院,植保资源与病虫害治理教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100

摘要: 苹果蠹蛾是苹果、梨等仁果类果树上的重要害虫,也是重要的入侵害虫。其具有寄主广泛、适生性强、蛀果为害等特点,一旦侵入很难彻底根除。老熟幼虫脱果后寻找隐蔽场所滞育的习性是其适应不利环境和维持种群繁衍的重要生存策略。本文就苹果蠹蛾幼虫滞育的诱导和终止因素、滞育场所的选取及聚集习性、滞育幼虫对环境的适应能力及内在生理生化特性以及针对滞育幼虫的防治技术等研究进行了综述,为探明苹果蠹蛾的灾变机理、预测预报和防治提供依据。

关键词: 老熟幼虫; 过冷却点; 低温; 光周期; 聚集

Diapause propensity in the codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera, Tortricidae)

Zheng-wei WU, Jiang-bin FAN, Ya-lin ZHANG, Dun WANG*
Key Laboratory of Plant Protection Resources & Pest Management of the Ministry of Education, College of Plant Protection, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, *China*

Abstract: The codling moth, *Cydia pomonella* (L.), is a notorious invasive fruit pest of apple, pear and other pome fruits. Eradication of this invasive pest is difficult, due to its extensive host range, high habitat suitability and larval feeding inside fruits. The mature larva leaves damaged fruit for shelter where pupation or diapause happens. The diapausing larva can survive under adverse natural conditions and diapause is also the most important survival strategy for the population. The present review summarizes the factors of inducing and terminating diapause, the selection of diapause sites, aggregation behavior, environmental adaptability and physiological and biochemical characteristics of diapausing larvae. Research on diapause propensity in *C. pomonella* can provide a reference basis for prediction and control of the pest.

Key words: mature larvae; supercooling point; low temperature; photoperiod; aggregation

苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* (L.)是苹果、梨等果树的重要蛀果害虫,也是世界性检疫害虫,目前在各大洲苹果产区都有分布。自 20 世纪 50 年代在我国新疆发生以来,其不断加剧的入侵态势已对我国黄土高原和环渤海湾两大苹果主产区构成严重的威胁。该虫寄主多,适生区广泛,除了成虫及卵以外,其他虫态均隐藏于果实内或树皮树干裂缝里,世代重叠,可在苹果生长期内对果实造成持续危害。苹果蠹蛾在我国西北地区一年发生 2~3 代,是多化性、兼性滞育昆虫。研究其滞育特性,探明其滞育诱导和终止的条件、滞育场所选择的行为特性、滞育幼虫的环境适应性及滞育幼虫的生理生化基础等,可为苹果蠹蛾的防治提供依据。

1 苹果蠹蛾老熟幼虫滞育诱导与终止因素

光照、温度、湿度、食物等均能诱导昆虫滞育,而光周期作为年变化规律性最强的自然因素,是苹果蠹蛾最主要的滞育诱导因子。临界光周期是指能诱使 50%个体进入滞育的光照时间,不同地理种群的临界光周期随纬度升高而延长,如美国加利福利亚南部(32°N)苹果蠹蛾种群临界光周期为 13.5 h,而高纬度的匈牙利(47°N)则为 16~17 h(Dyck, 2010; Stoeckli *et al.*, 2012)。温度也是诱导滞育的重要因素之一。研究表明,即使在长光照条件下,低温(14.8 ℃)饲养的苹果蠹蛾仍有 15%的幼虫进入滞育状态(Howell & Neven, 2000)。可见,短光照和低温是诱导苹果蠹蛾滞育的重要条件,通常 8~

收稿日期(Received): 2015-06-08 **接受日期(Accepted)**: 2015-10-14
基金项目: 国家自然科学基金(31270691、31170609)
作者简介: 吴正伟, 男, 博士研究生。研究方向: 资源昆虫利用与保护生物学
* 通讯作者(Author for correspondence), E-mail: dunwang@foxmail.com

12 h 光照和不低于 12 h 的 15~25 ℃低温共同作用可成功诱导该虫滞育(Dyck,2010)。然而,田间调查表明,每代苹果蠹蛾都有部分幼虫滞育,这是由外界其他因素引起的还是内在的遗传调控决定的尚不清楚。

光周期是终止滞育的最重要因素,而温度在滞育维持和终止方面起着重要的辅助作用。研究表明,在短光照 12∶12(L∶D)条件下饲养 6 个月后,有 62.9%的苹果蠹蛾处于滞育状态,而最终能羽化的只有 0.2%(Neven,2012、2013)。由此可见,短光照不足以使幼虫打破滞育而正常羽化。另外,4~7 ℃低温处理超过 50 d 才能打破苹果蠹蛾滞育(Cisneros,1971)。0 ℃以下的低温(-10 或-15 ℃)处理 2~6 d 可以缩短滞育时间并提高成虫羽化整齐度(Neven *et al.*,2000)。

2　滞育幼虫越冬场所选取及相关习性

对田间滞育幼虫的调查表明,树皮树干裂缝、修剪枝干处及近地面的树干部分均为其越冬场所,且老树明显多于幼树(Blomefield & Giliomee,2012)。但幼虫结茧位置分布,因果树树龄、品种、修剪程度等不同而异,如在老龄果树上,多数茧分布于 1.4 m 以下;而在幼龄果树 1.6 m 以下及2.6 m 以上树枝裂缝内均有越冬幼虫结茧(Blomefield & Giliomee,2012)。于江南等(2004)调查表明,离地面 30~90 cm 树皮裂缝中越冬幼虫分布最多。而杜磊等(2012)通过室内木桩模拟试验表明,离地面 50 cm 以内为苹果蠹蛾主要结茧位置。此外,由于昆虫的体温直接受到小环境温度的影响,在研究幼虫对温度反应时发现,取食阶段的幼虫在苹果内倾向于温度高的一面,而老熟幼虫对结茧位置的选择不存在温度偏好(Kührt *et al.*,2005)。

通过对结茧的老熟幼虫释放出的化合物进行收集和气相色谱分析表明,8 种化合物对幼虫具有引诱聚集的作用(Jumean *et al.*,2005),这可以解释田间调查中 40%以上幼虫存在聚集结茧的现象(Blomefield & Giliomee,2012)。这些化合物的探索将为滞育幼虫聚集行为的化学生态研究奠定分子基础。

对梨园苹果蠹蛾的滞育情况调查表明,7 月份即有小部分(8%~45%)苹果蠹蛾滞育,8 月上旬滞育幼虫已占大多数(44%~85%),8 月下旬及以后的老熟幼虫几乎全部滞育(van Steenwyk *et al.*,2004)。

3　苹果蠹蛾滞育幼虫的环境适应性

昆虫滞育是对不利环境的适应。滞育苹果蠹蛾幼虫对不同温度的适应能力直接关系到其能否安全越冬。一个月的低温(5 ℃)处理试验表明,滞育初期的幼虫死亡率明显高于经冷驯的滞育幼虫(23% *vs.* 4%),说明滞育幼虫对低温的适应性具有明显的季节性(Khani *et al.*,2007a)。对采自伊朗德黑兰的苹果蠹蛾过冷却点(Supercooling point,SCP)测定表明,取食阶段(非滞育)的幼虫 SCP 为(-12.4±1.1) ℃,结茧初期(1~2 d)幼虫的 SCP 为(-15.1±1.2) ℃,>5 d 时为(-19.2±1.8) ℃,越冬幼虫则为(-20.2±0.2) ℃(Khani & Moharramipour,2010)。报道还显示,滞育幼虫保存于 15 ℃环境中 6~18 个月,其存活率能达到 92%以上,而将其存放于 0~2 ℃可维持超过 2 年(Dyck,2010)。

热致死试验表明,滞育幼虫比非滞育幼虫有较强的耐热性,但在 50 ℃处理 5 min 后全部死亡(Wang *et al.*,2004)。另外,研究表明,结合高浓度 CO_2、低浓度 O_2 的热处理对苹果蠹蛾滞育幼虫的防治有效,但该方法需时长且杀虫机制尚不清楚(Neven *et al.*,2014)。而氧限制热耐受理论(Oxygen and capacity limitation of thermal tolerance,OCLTT)可能用于揭示高温对昆虫致死作用的机理,即低氧或高温下组织获氧气量的减少阻碍了氧化磷酸化作用 ATP 的产生(Pörtner,2010)。对不同温度(5~50 ℃)下,环境中 O_2 消耗速率及代谢热速率的实时监测表明,两者速率均随温度增加而升高(5~40 ℃);低于 40 ℃时部分代谢热量来自于同化作用,而高于 40 ℃时 O_2 消耗速率及代谢热速率接近于 0。这些结果表明,在高于 45 ℃时短时的热处理足以有效杀死滞育老熟幼虫(Neven *et al.*,2014)。

4　苹果蠹蛾滞育幼虫的生理生化特性

幼虫在滞育过程中体内会发生一系列生理生化变化,而这些改变将是其抵御不良环境的内在物质基础。Rozsypal *et al.*(2013)对中欧苹果蠹蛾种群的调查表明,其 SCP 能从夏季的-15.3 ℃降到冬季的-26.3 ℃,并且超过 83%的幼虫能够安全越冬。经分析表明,过冷能力季节性增强得益于虫体部分脱水、体液渗透压的增强、冬季特异性代谢混合物的积累。在冬季,幼虫体内糖原、谷氨酰胺含

量降低,而果糖及其他糖类、多元醇和丙氨酸等自由氨基酸含量增加;海藻糖和脯氨酸浓度在整个冬季一直很高并相对稳定,可能有助于蛋白和细胞膜在 0 ℃以下低温保持稳定。Khani *et al.*(2007a)调查也表明,越冬幼虫会积累大量海藻糖(18.4 mg · g^{-1}FW),其含量是非滞育幼虫的 3.6 倍。

对滞育和非滞育幼虫脂肪酸组成的比较分析表明,两者的 6 种主要脂肪酸均依次为油酸、棕榈酸、亚油酸、棕榈油酸、硬脂酸、亚麻酸。而滞育幼虫亚油酸含量比非滞育幼虫增加 9.7%,棕榈酸含量下降 8.7%,这使得不饱和脂肪酸含量升高,推测其与滞育密切相关(Khani *et al.*,2007b)。研究还表明,苹果蠹蛾幼虫中共有 97 种膜磷脂,但各磷脂组分季节性变化很小,并且膜的流动性一直保持非常高的水平。在滞育过程中,磷酸胆碱与磷酸乙醇胺比值没有明显增高,表明苹果蠹蛾可能采用了耐冻性抗寒策略;脂肪熔解度的不断下降可以反映出脂肪酸不饱和度的季节性升高(Rozsypal *et al.*, 2014)。

5 其他生理生化变化

由于滞育的发生与否伴随着多种生化物质的急剧变化,相关激素(保幼激素)、代谢物合成或降解相关的酶类也是滞育研究的一大焦点,包括山梨醇脱氢酶、氧化还原酶、H_2O_2 酶、谷胱甘肽 S-转移酶、热激蛋白等。对法国东南部苹果蠹蛾种群的调查表明,对灭幼脲或溴氰菊酯具有抗性的种群滞育临界光周期有延长的现象,由此推测抗性产生过程中相关基因的改变也引起了滞育特性的变化(Boivin *et al.*,2004)。

体积微小(<10 μL)的纯水过冷却至-39 ℃以下仍可不结冰,而冰核物质则可以促使水从液态向固态转变。生物冰核,如细菌、真菌、病毒、血液等,是自然界具冰核活性最强的异质冰核,可以使水在较高的亚低温下(-2 ~ -5 ℃)结冰(樊绍刚等,2009)。对于大多数越冬昆虫,在对冰冻的适应策略划分中属于不耐结冰型。其会在寒冬来临前停止取食,排除大多数水分,清除体内冰核物质,降低虫体过冷却点,同时合成并积累大量多元醇、糖类等抗寒物质,有些还可合成抗冻蛋白(Antifreeze protein, AFP)(Zachariassen & Kristiansen, 2000)。AFP 可以通过防止细胞外冰晶的形成而保护生物体免受极度低温的伤害,目前已在脊椎动物、无脊椎动物、植物、细菌、真菌中发现(Venketesh & Dayananda,2008)。对鳞翅目色卷蛾属 *Choristoneura* 4 个种抗冻蛋白的分析表明,β 螺旋结构和保守的苏氨酸残基是该类蛋白的主要特征(Tyshenko *et al.*, 2005);而在苹果蠹蛾滞育幼虫中未见抗冻蛋白产生(Neven,1999)。是否有其他相关蛋白及其在滞育幼虫中的作用尚不清楚。

昆虫滞育期间不仅代谢减慢、活动减缓,而且需要抵御外界病原物的侵染。一些发育调节物质和防御成分已在昆虫滞育时期被发现,如日本柞蚕 *Antheraea yamamai* Guerin-Meneville 蛹滞育时产生的一种抑制发育的五肽(Yamamarin)、从天蚕蛾 *Hyalophora cecropia* L.滞育蛹中分离到的天蚕素、丽蝇 *Calliphora vicina* Robineall 滞育幼虫中的防御物 Alloferons、叶甲 *Gastrophyusa atrocyanea* Mots.滞育成虫中有抗真菌活性的滞育特异性多肽等(Denlinger,2008)。而有关苹果蠹蛾滞育和非滞育幼虫免疫差异的比较及相关的防御物质少有报道。

6 苹果蠹蛾滞育幼虫防治技术

对滞育幼虫的清除是减少虫源的重要措施。研究表明,采用诱集带可以做到无公害防治苹果蠹蛾越冬幼虫,其捕杀数量是刮老翘皮方法的 13 倍(王庆波等,2014)。对诱集材料的研究发现,旧衣物效果要比编织袋和瓦楞纸好(林明极等,2012)。覆土试验表明,果园耕土可以有效阻止翻入土中(深度≥1 cm)的苹果蠹蛾滞育幼虫和蛹的正常发育(Baughman *et al.*,2015)。这说明对蛀果或落果及时掩埋可以达到防治效果。苹果运输的果箱往往是滞育幼虫结茧的场所,熏蒸处理能够达到快速杀灭该虫的目的。试验表明,用冰醋酸累计(1 h)熏蒸处理 174823 mg · L^{-1},可以杀死全部滞育幼虫,尤其对于塑料制果箱效果最好(Randall *et al.*, 2011)。在生物防治方面,滞育幼虫的聚集行为增加了自身被寄生蜂发现的可能,但似乎并未提高被寄生效率(Jumean *et al.*,2009)。由于滞育幼虫越冬场所在地表及树干近地处,使得用病原线虫防治该虫成为可能(De Waal *et al.*,2013; Navaneethan *et al.*,2010)。

7 小结

虽然已经明确光照和温度是苹果蠹蛾滞育诱导和终止的重要因素,但其他外在因素尤其在田

间,树皮树干裂缝等小环境的差异,是否对该虫滞育的发生有所影响等尚不清楚。另外,虫体自身对环境刺激的接收与反应、个体遗传水平等差异是否与兼性滞育有关需要进一步探讨。苹果蠹蛾滞育幼虫能够通过减少体内冰核,积累海藻糖、自由氨基酸,提高不饱和脂肪酸含量等途径成功度过严寒。通过对这些生化物质代谢途径及分子调控机理的研究很可能揭示调节该虫滞育的关键基因,进而发现新的作用靶标,为该虫的防治提供新途径。

参考文献

杜磊, 朱虹昱, 鲁天文, 姜红霞, 张润志. 2012. 苹果蠹蛾幼虫爬行特性. 应用昆虫学报, 49(1): 54-60.

樊绍刚, 张党权, 邓顺阳, 明付焕. 2009. 抗冻蛋白和冰核蛋白对植物抗冻性能的作用机制. 经济林研究, 27(2): 125-130.

林明极, 焦晓丹, 隋广义. 2012. 苹果蠹蛾老熟幼虫诱杀技术. 应用昆虫学报, 49(1): 104-108.

王庆波, 林明极, 郭金洪, 周进华. 2014. 诱杀苹果蠹蛾老熟幼虫试验分析. 山西果树, (3): 15-16.

于江南, 吾木尔汗, 肉孜加玛丽, 范菊兰. 2004. 苹果蠹蛾越冬生物学及有效积温的研究. 新疆农业科学, 41(5): 319-321.

Baughman W B, Nelson P N and Grieshop M J. 2015. Impact of cultivation and subsequent burial on *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) and *Conotrachelus nenuphar* (Coleoptera: Curculionidae). *Journal of Economic Entomology*, DOI: http://dx.doi.org/10.1093/jee/tov071.

Blomefield T L and Giliomee J H. 2012. Availability and location of cocooning sites for diapausing codling moth larvae (*Cydia pomonella* (L.)) (Lepidoptera: Tortricidae) on mature and young apple trees. *African Entomology*, 20: 182-186.

Boivin T, Bouvier J C, Beslay D and Sauphanor B. 2004. Variability in diapause propensity within populations of a temperate insect species: interactions between insecticide resistance genes and photoperiodism. *Biological Journal of the Linnean Society*, 83: 341-351.

Cisneros F H. 1971. *Contribution to the Biological and Ecological Characterization of Apple and Walnut Host Races of Codling Moth*, *Laspeyresia pomonella* (*L.*). Riverside, CA: University of California.

De Waal J Y, Malan A P and Addison M F. 2013. Effect of humidity and a superabsorbent polymer formulation on the efficacy of *Heterorhabditis zealandica* (Rhabditida: Heterorhabditidae) to control codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae). *Biocontrol Science and Technology*, 23(1): 62-78.

Denlinger D L. 2008. Why study diapause? *Entomological Research*, 38: 1-9.

Dyck V A. 2010. *Rearing Codling Moth for the Sterile Insect Technique*. Rome: FAO, 1-199.

Howell J F and Neven L G. 2000. Physiological development time and zero development temperature of the codling moth (Lepidoptera: Tortricidae). *Environmental Entomology*, 29: 766-772.

Jumean Z, Gries R, Unruh T, Rowland E and Gries G. 2005. Identification of the larval aggregation pheromone of codling moth, *Cydia pomonella*. *Journal of Chemical Ecology*, 31: 911-924.

Jumean Z, Jones E and Gries G. 2009. Does aggregation behavior of codling moth larvae, *Cydia pomonella*, increase the risk of parasitism by *Mastrus ridibundus*? *Biological Control*, 49: 254-258.

Khani A and Moharramipour S. 2010. Cold hardiness and supercooling capacity in the overwintering larvae of the codling moth, *Cydia pomonella*. *Journal of Insect Science*, 10: 1-12.

Khani A, Moharramipour S and Barzegar M. 2007a. Cold tolerance and trehalose accumulation in overwintering larvae of the codling moth, *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae). *European Journal of Entomology*, 104: 385-392.

Khani A, Moharramipour S, Barzegar M and Naderi-Manesh H. 2007b. Comparison of fatty acid composition in total lipid of diapause and non-diapause larvae of *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae). *Insect Science*, 14: 125-131.

Kührt U, Samietz J and Dorn S. 2005. Thermoregulation behaviour in codling moth larvae. *Physiological Entomology*, 30: 54-61.

Navaneethan T, Strauch O, Besse S, Bonhomme A and Ehlers R U. 2010. Influence of humidity and a surfactant-polymer-formulation on the control potential of the entomopathogenic nematode *Steinernema feltiae* against diapausing codling moth larvae (*Cydia pomonella* L.) (Lepidoptera: Tortricidae). *Biocontrol*, 55: 777-788.

Neven L G. 1999. Cold hardiness adaptations of codling moth, *Cydia pomonella*. *Cryobiology*, 38: 43-50.

Neven L G. 2012. Fate of codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) in harvested apples held under short photoperiod. *Journal of Economic Entomology*, 105: 297-303.

Neven L G. 2013. Effects of short photoperiod on codling moth diapause and survival. *Journal of Economic Entomology*, 106 (1): 520-523.

Neven L G, Ferguson H J and Knight A. 2000. Sub-zero cooling synchronizes post-diapause development of codling moth, *Cydia pomonella*. *Cryo Letters*, 21: 203-214.

Neven L G, Lehrman N J and Hansen L D. 2014. Effects of temperature and modified atmospheres on diapausing 5th instar codling moth metabolism. *Journal of Thermal Biology*, 42: 9-14.

Pörtner H O. 2010. Oxygen- and capacity-limitation of thermal tolerance: a matrix for integrating climate-related stressor effects in marine ecosystems. *Journal of Experimental Biology*, 213: 881-893.

Randall P, Sholberg P, Judd G and Cossentine J. 2011. Acetic acid fumigation of fruit storage bins to control diapausing codling moth larvae. *HortScience*, 46: 1634-1639.

Rozsypal J, Koštál V, Berková P, Zahradníčková H and Šimek P. 2014. Seasonal changes in the composition of storage and membrane lipids in overwintering larvae of the codling moth, *Cydia pomonella*. *Journal of Thermal Biology*, 45: 124-133.

Rozsypal J, Koštál V, Zahradnickova H and Simek P. 2013. Overwintering strategy and mechanisms of cold tolerance in the codling moth (*Cydia pomonella*). *PLoS ONE*, 8: e61745.

Stoeckli S, Hirschi M, Spirig C, Calanca P, Rotach M W and Samietz J. 2012. Impact of climate change on voltinism and prospective diapause induction of a global pest insect — *Cydia pomonella* (L.). *PLoS ONE*, 7: e35723.

Tyshenko M G, Doucet D and Walker V K. 2005. Analysis of antifreeze proteins within spruce budworm sister species. *Insect Molecular Biology*, 14: 319-326.

van Steenwyk R A, Fouche C F and Collier T R. 2004. Seasonal susceptibility of 'Bartlett' pears to codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) infestation and notes on diapause induction. *Journal of Economic Entomology*, 97: 976-980.

Venketesh S and Dayananda C. 2008. Properties, potentials, and prospects of antifreeze proteins. *Critical Reviews in Biotechnology*, 28: 57-82.

Wang S, Yin X, Tang J and Hansen J D. 2004. Thermal resistance of different life stages of codling moth (Lepidoptera: Tortricidae). *Journal of Stored Products Research*, 40: 565-574.

Zachariassen K E and Kristiansen E. 2000. Ice nucleation and antinucleation in nature. *Cryobiology*, 41: 257-279.

(责任编辑:杨郁霞)

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2015.04.008

生物源农药在苹果蠹蛾防治中的应用

吴正伟[1], 杨雪清[2], 张雅林[1*]
[1]西北农林科技大学植物保护学院,植保资源与病虫害治理教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100;
[2]沈阳农业大学植物保护学院,辽宁 沈阳 110866

摘要: 苹果蠹蛾是世界性检疫害虫,对我国苹果优势产区构成了巨大威胁。长期依赖化学防治使该虫抗性问题变得十分严峻。为了保障食品安全,以环境友好的生物源农药替代化学农药已成为当前苹果蠹蛾防治的热点。本文对国内外现有的生物源农药,如寄生蜂、不育昆虫、颗粒体病毒、病原线虫、*Bt*、病原真菌、微孢子虫、性信息素、斑蝥素、多杀菌素等,在苹果蠹蛾防治中的最新应用及其存在的问题进行论述,讨论了生物源农药凭借其种类多、来源广且在用药时期上选择性强等特点,在该虫综合治理中的重要地位及面临的挑战。

关键词: 生物农药; 苹果蠹蛾; 生物防治; 杀虫剂

Application of biological pesticides in the control of codling moth, *Cydia pomonella* (L.)

Zheng-wei WU[1], Xue-qing YANG[2], Ya-lin ZHANG[1*]
[1]*Key Laboratory of Plant Protection Resources & Pest Management of the Ministry of Education, College of Plant Protection, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; [2]*College of Plant Protection, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning* 110866, *China*

Abstract: The codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae), a notorious quarantine fruit pest worldwide, poses a serious threat to the main apple producing areas in China. In terms of food safety, environmentally friendly biological pesticides are desirable substitutes for chemical pesticides; the long-term use of the latter have caused resistance, preventing its long team use for codling moth control. The present review summarized the use of biological pesticides, including parasitoids, sterilized insect, granulovirus, entomopathogenic nematodes, *Bacillus thuringiensis*, entomopathogenic fungi, microsporidia, sex pheromone, cantharidin, and spinosad that have been either applied or suggested to control codling moth. The challenges faced by biological pesticides are also discussed, and anyhow it will play an important role in the integrated pest management of codling moth due to its characteristics of infinite variety, wide source, good selectivity in application.

Key words: biological pesticide; codling moth; biological control; insecticide

苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* (L.)是全球重要的果树害虫,也是我国重大检疫害虫之一。目前,该虫在我国新疆全境、甘肃中西部、内蒙古西部、宁夏、黑龙江等局部地区均有发生和危害(张润志等, 2012),对我国黄土高原及环渤海湾苹果优势产区的果业生产构成了严峻威胁。在新疆,苹果蠹蛾危害严重,平均蛀果率达 41.34%(10.6%~72.28%),严重时能达到 95%(巴哈提古丽,2009)。化学农药的速效性使其成为传统果园防治该虫的主要手段。然而,化学杀虫剂的频繁使用导致世界各地苹果蠹蛾种群对各类化学杀虫剂产生了严重的抗药性(Reyes *et al.*, 2007; Rodríguez *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2013)。研究表明,我国西北地区部分苹果蠹蛾种群对部分杀虫剂的敏感性下降(Yang & Zhang, 2015b)。随着有机农业这一理念的提出,环境友好的生物源农药或其他防治措施已成为新时期苹果蠹蛾防治的新手段。

生物源农药,简称生物农药,在我国《农药登记资料规定》中未给出明确的定义标准。目前,学术上通常采用张兴(2010)的分类体系,即生物农药包

收稿日期(Received): 2015-06-08 **接受日期(Accepted)**: 2015-10-14
基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(200903042-03)
作者简介: 吴正伟, 男, 博士。研究方向: 农业昆虫与害虫防治。E-mail: zhengwei_wu@126.com
*通讯作者(Author for correspondence), E-mail: yalinzh@nwsuaf.edu.cn

括生物体农药和生物化学农药,根据来源的不同将其进一步划分为动物体农药、植物体农药、微生物体农药、动物源生物化学农药、植物源生物化学农药、微生物源生物化学农药。本文拟对目前生物源农药在苹果蠹蛾防治上的应用进行论述,并指出其未来的应用方向。

1 动物体农药

寄生蜂是害虫防治中重要的天敌生物,全世界报道的苹果蠹蛾寄生蜂达 50 种之多,且其寄生率在各地分布种中有明显不同(李保平和孟玲,2001; Mills,2005)。如欧洲东部的奥地利四齿革腹茧蜂 *Ascogaster quadridentata* Wesmal 卵寄生率为 42.6%,而哈萨克斯坦蠹蛾玛姬蜂 *Mastrus ridibundus* Gravenhorst 幼虫寄生率能达到 43.9%(Mills,2005)。但多数寄生蜂的寄生率平均不超过 4.5%(Maalouly *et al.*,2013),这与果园生物多样性的减弱及化学农药的频繁施用有关(Jonsson *et al.*,2012)。虽然目前尚无大面积使用寄生蜂防控苹果蠹蛾的报道,但对寄生蜂的应用研究仍在延续。研究表明,苹果蠹蛾 2 龄幼虫和结茧期老熟幼虫最易被寄生(Mills,2005),而老熟幼虫结茧化蛹时的聚集特性似乎不利于寄生蜂的寄生(Jumean *et al.*,2009、2011)。在我国,已经商品化的赤眼蜂 *Trichogramma* 也被尝试用于苹果蠹蛾的防治,放蜂后苹果蠹蛾幼虫蛀果率能减少一半(许建军等,2014;岳朝阳等,2010);周氏啮小蜂 *Chouioia cunea* Yang 的释放甚至能达到 80% 的防治效果(张新平等,2012)。因此,利用寄生蜂防治苹果蠹蛾具有广阔的应用前景。

昆虫不育技术(Sterile insect technique,SIT),是一种通过辐射或杂交等手段使害虫丧失繁育能力而自行绝灭的害虫防治方法。自 1992 年起加拿大不列颠哥伦比亚开始实施昆虫不育技术防治苹果蠹蛾,截至 2003 年有 97.2% 的果园能够将危害控制在 0.5% 以下。但该技术成功应用的前提是实现苹果蠹蛾大规模饲养,加拿大实现了工厂化饲养该虫并保证每周有 1500 万~1600 万头成虫的产量,其还被空运至南非用于苹果蠹蛾的防治(Bloem *et al.*,2010)。然而,由于该虫大规模饲养技术在我国还未实现突破,利用苹果蠹蛾不育技术控制其种群数量还有待进一步发展。

2 微生物体农药

2.1 颗粒体病毒

苹果蠹蛾颗粒体病毒(*Cydia pomonella* granulovirus,CpGV)是一种高效、专一、安全的生物农药,在苹果蠹蛾防治中得到了广泛应用。欧美各国自 20 世纪 80 年代以来先后注册过 9 个 CpGV 制剂(南宫自艳等,2014),其中在欧洲的使用面积估计超过 10 万 hm^2(Eberle & Jehle,2006)。然而,自 2004 年以来已发现有 35 个苹果蠹蛾种群对 CpGV 产生不同程度的抗性(Speiser & Tamm,2011)。因此,具有强侵染能力的颗粒体病毒株系的筛选成为目前研究的热点之一。研究表明,抗性基因位于苹果蠹蛾性染色体 Z 上,其出现频率的不同决定着抗性水平的变化(Asser-Kaiser *et al.*,2010)。Gebhardt *et al.*(2014)通过对 5 个病毒分离株系的基因组比较及突变检测,发现病毒 *pe*38 基因中一段 24 个核苷酸序列的变异是害虫抗性形成的关键。可见,长期使用单一病毒株防治苹果蠹蛾存在抗性风险,这为制定害虫综合治理措施提出了考验。

病毒制剂在田间受紫外线照射后容易失活,影响其持久性。研究表明,通过木质素包埋将病毒制成微胶囊剂可明显提高其光稳定性;以 TiO_2 及 ZnO 作为反射剂的添加也可以提高病毒的紫外耐受性(Arthurs *et al.*,2008; Wu *et al.*,2015a)。进一步提高田间持久性是研制病毒杀虫剂所面临的共性问题,也是今后研究的方向。

2.2 昆虫病原线虫

昆虫病原线虫(Entomopathogenic nematode,EPN)可携带共生菌主动搜索寄主,通过昆虫口、肛门、气孔、节间膜及伤口进入体腔,其大量繁殖造成宿主组织损伤最终死亡(Kaya & Gaugler,1993),EPN 是近年来苹果蠹蛾生物防治的一大研究热点。多数线虫可以通过培养基生产,从而节省了寄主饲养的步骤,便于其开发利用。根据苹果蠹蛾老熟幼虫喜于树干裂缝或树皮下结茧越冬的习性,针对树干集中喷洒线虫杀虫剂可达到压制越冬虫数的目的。目前,最具应用潜力的是斯氏线虫 *Steinernema* 和异小杆线虫 *Heterorhabditis*。在南非,异小杆线虫 *H. zealandica* 和 *H. bacteriophora* 对苹果蠹蛾、苹果异胫小卷蛾 *Thaumatotibia leucotreta*(Meyrick)、暗色粉蚧 *Pseudococcus viburni*(Signoret)、庭园象甲

Phlyctinus callosus (Schönherr)均有防效(Van Zyl & Malan,2014)。在所筛选的高效病原线虫品系中,与 *S. feltiae* 和 *H. bacteriophora* 相比,*S. yirgalemense* 对寄主的田间致死率最高(Odendaal *et al.*,2014)。环境温度、湿度是线虫农药能否成功应用的两大因素,为避免冬季低温造成线虫失活,可选择春秋季施用或选育抗寒线虫(Nimkingrat *et al.*,2013),同时辅以覆盖物或保湿剂(如高吸水性聚合物),可以提高线虫对苹果蠹蛾的防治效果(De Waal *et al.*,2011、2013)。然而,昆虫病原线虫致病力较低是目前制约其广泛应用的主要因素。如何提高昆虫病原线虫在害虫防治过程中的致病力、保持其致病力的稳定性是未来亟待解决的问题。

2.3　病原细菌

苏云金芽孢杆菌(*Bacillus thuringiensis*,*Bt*)是植保领域开发利用最为广泛的微生物源农药,在杀虫剂中占约 2% 的市场份额(Adang *et al.*,2014)。*Bt* 芽孢内会产生晶体,有 70 个血清型、82 个亚种(张兴,2010),其中 Cry 家族就包含约 300 个成员(Crickmore *et al.*,2014)。针对苹果蠹蛾,研究人员已筛选出比商业 *Bt* 制剂活性高 24 倍的新 *Bt* 菌株 MPU B63,并有望开发为新的生物源农药(Konecka *et al.*,2012)。*Bt* 在营养期生长阶段开始分泌的营养期杀虫蛋白(Vegetative insecticidal protein,Vip)虽然不形成蛋白晶体,但为另一种重要的杀虫因子。Baranek *et al.*(2015)研究表明,Vip3 家族蛋白对鳞翅目害虫苹果蠹蛾、欧洲松毛虫 *Dendrolimus pini* L.、甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* Hübner 均具有很高毒性,这将为 *Bt* 菌的筛选利用提供新的参考依据,并为转基因作物提供新的抗虫基因。*Bt* 是以胃毒方式发挥作用且田间持久性低,而苹果蠹蛾以幼虫蛀果危害,因此,在田间应用中 *Bt* 防效往往低于兼具触杀活性的其他农药。为此,在苹果蠹蛾卵到幼虫蛀果前期喷施 *Bt* 将可最大限度发挥其防治效果。

2.4　病原真菌

昆虫病原真菌可以直接穿透寄主体壁进行侵染并最终导致寄主死亡。在德国,1955~2012 年对 20550 头苹果蠹蛾幼虫自然发病情况的调查表明,白僵菌 *Beauveria bassiana* 是其最主要的病原真菌,病死幼虫身体僵硬呈粉红或棕红色,发病率达 32%(Zimmermann *et al.*, 2013)。而早期试验表明,*B.bassiana*对苹果蠹蛾的防效并不理想,每树喷雾 6×10^9 个孢子才能达到 50% 的防效(Ferron *et al.*, 1978)。因此,目前很少有直接用白僵菌防治苹果蠹蛾的报道。

2.5　微孢子虫

微孢子虫(Microsporida)是一类在专性细胞内寄生的单细胞真核生物,系统发育研究表明,其进化上应归于真菌界(Hirt *et al.*,1999)。在苹果蠹蛾幼虫、蛹及成虫体内均发现有微孢子虫 *Nosema carpocapsae* 的寄生,其发生率能达到 57.3%,还会影响虫体产卵量及孵化率(Zimmermann *et al.*,2013)。对于微孢子虫杀虫剂,我国仅在蝗虫防治中有所应用(洪军等,2014)。实现微孢子虫广泛应用还需解决其寄主饲养、扩繁效率、杀虫效率、环境适应性等问题。

3　植物体农药

植物体农药是具有防治农业有害生物功能的活体植物,特指抗有害生物或抗除草剂的转基因作物(张兴,2010)。早在 1986 年,孟山都公司的抗虫棉、抗虫玉米、抗虫大豆和抗草甘膦玉米就获得美国 EPA 批准进行环境释放试验,1994 年批准商品化生产并将转基因生物列入农药范畴(张兴等,2002)。截至 2013 年,全球转基因作物种植面积已经达到 1.75 亿 hm^2,并且以每年 3% 的比例增长(James,2013)。另外,转基因树木也有至少 15 种进行了田间试验,其中转 *Bt* 欧洲黑杨 *Populus nigra* 种植面积就达 450 hm^2(胡建军等,2010)。目前,导入苹果的外源抗虫基因有 *CpTI*、*Bt*、生物素绑定蛋白基因等(李玉生等,2011),但尚无抗虫转基因苹果进入市场。虽然转基因植物仍然存在诸多争议,但相信随着科技的发展,转基因抗虫果树研究将会取得新的进展。

4　动物源生物化学农药

性信息素是目前应用最多的生物化学农药。利用苹果蠹蛾雌虫释放的性信息素对雄虫有引诱作用的原理,把合成的性信息素通过载体(诱芯、发散器)施于田间,用于诱捕或迷向干扰成虫正常交配,进而达到控制害虫的目的。我国自 20 世纪 60 年代以来已合成超过 40 种性信息素,包括苹果蠹蛾性信息素,(E8,E10)-十二碳二烯醇(Zhou *et al.*,2014)。王安勇等(2009)研究了诱捕器的类

型、颜色和悬挂高度对苹果蠹蛾诱捕效果的影响，结果表明，三角式和飞翼式诱捕器的诱捕效果显著优于水盆式和圆筒式，绿色显著优于粉红色和黑色，但与红色、白色、黄色和蓝色之间差异不显著，诱蛾量随诱捕器悬挂高度的增加而增大。而将其作为生物农药通过迷向（交配干扰）技术防治苹果蠹蛾到 20 世纪 90 年代才得以实现，截至 2012 年，世界范围针对苹果蠹蛾的交配干扰防治面积达 22 万 hm^2（Miller & Gut，2015）。研究表明，在大面积果园（100 hm^2 以上）且苹果蠹蛾越冬幼虫密度低于 1000 头 · hm^{-2} 时才适合使用该技术，同时需防止邻近果园苹果蠹蛾的迁入（Witzgall *et al.*，2008）。近几年，在我国新疆开始尝试用性信息素诱捕和迷向技术防治苹果蠹蛾，其中迷向防控能降低近一半的蛀果率，但核心示范区蛀果率仍有 2.88%（王同仁等，2014；张煜等，2014）。在田间应用中发现，“吸引并移除（Attract-and-remove）”技术比交配干扰技术更能有效控制苹果蠹蛾种群（Reinke *et al.*，2012）。而性信息素与其他引诱物质（植物利它素、醋酸）的混合使用效果反而不如其单独使用（Knight *et al.*，2014）。目前的迷向防控技术还有待改进，特别是性信息素的释放量，同时有必要与诱捕监测、选择性使用杀虫剂或其他措施相结合。

利用昆虫或其他节肢动物产生的毒素或防卫毒素进行苹果蠹蛾的防治并不多见。最近研究表明，芫菁科昆虫产生的斑蝥素对苹果蠹蛾具有杀虫活性（LC_{50} = 0.057 mg · mL^{-1}），并具有一定的田间防效（Wu *et al.*，2015b）。活体试验表明，斑蝥素可明显提升苹果蠹蛾幼虫谷胱甘肽转移酶活性，抑制其多功能氧化酶和羧酸酯酶活性（Wu *et al.*，2015b）。研究还发现，斑蝥素可明显抑制异源表达的谷胱甘肽转移酶 CpGSTd1 活性，其抑制中浓度 LC_{50} 大于 2 mmol · L^{-1}（Yang & Zhang，2015a）。但斑蝥素对苹果蠹蛾的杀虫效果还有待提高，且目前尚无法实现斑蝥素的大量生产，因此制约了其推广应用（Wu *et al.*，2015b）。

5 微生物源生物化学农药

微生物源生物化学农药包括抗生素类、毒蛋白类、糖类等。研究表明，一种植物内生真菌 *Muscodor albus*（Ascomycota：Xylariales）产生的挥发性混合物可以用作熏蒸剂，对苹果蠹蛾幼虫及成虫都有杀伤作用（Lacey *et al.*，2009）。抗生素产品已成为我国生物农药产业又一主体，其中具有杀虫活性的农用抗生素如多杀菌素已用于苹果蠹蛾的防治（Arthurs *et al.*，2007）。但抗生素的使用同样面临抗性问题，已发现苹果蠹蛾对多杀菌素与谷硫磷可以产生交互抗性（Reyes *et al.*，2007）。因此，如何高效利用微生物源生物化学农药且延长其使用寿命是其用于害虫防治的关键性问题。

6 植物源生物化学农药

在植食性昆虫和植物协同进化过程中，植物通过合成许多对植食昆虫具有毒性的次生代谢物质，达到防御或降低植食性昆虫取食的目的。目前，人们基于植物毒素已经开发出众多植物源生物化学农药，常见的有除虫菊素、苦参碱、苦皮藤素、鱼藤酮、印楝素、黎芦碱、烟碱、雷公藤等。这些化合物已被注册并商品化，丰富了用于苹果蠹蛾防治的生物农药种类。已有植物源生物化学农药防治蛀果害虫的报道，如 0.6% 苦参碱 AS 及 1.5% 除虫菊素 EW 对于桃小食心虫 *Carposina niponensis* Walsingham 的防治效果为 60%～70%（赵楠等，2014）。而最近，在对菊科蒿属 5 种植物的驱虫活性研究中发现，藜蒿 *Artemisia arborescens* L. 叶片粗提物对苹果蠹蛾初孵幼虫的最低拒食浓度为 1 mg · mL^{-1}，是 α-侧柏酮的 1/10（Creed *et al.*，2015）。但由于其效果还不够理想，在苹果蠹蛾防治中的应用仍属少见。

7 结语

苹果蠹蛾是世界性重要果树害虫，对全球林果产业造成了巨大的经济损失（万方浩等，2009）。随着人们对绿色植保、食品安全、生态调控治理等认识和要求的不断提升，环境友好的防治方法将在苹果蠹蛾综合治理中发挥越来越大的作用。可用于苹果蠹蛾防治的生物农药来源广泛、种类丰富且在使用策略及防治时期上选择性强；但是，许多生物源农药在实际应用中仍存在一些不足。因此，只有坚持综合防治的方针才能有效控制该虫的危害和扩散。例如，在密切跟踪苹果蠹蛾田间发生情况的同时，可在越冬代幼虫羽化时期进行交配干扰或不育昆虫释放，在产卵期释放卵寄生蜂并喷雾病毒制剂，之后交替喷雾病毒、多杀菌素、除虫菊素、昆虫激素、*Bt* 等生物农药；对于老熟幼虫和越冬幼虫，可结合果园灌水，喷洒病原线虫、白僵菌或释放幼虫寄生蜂等加以防治。

目前,由于生物源农药的缓效性和持久性差,加之成本投入高等问题,在一定程度上限制了其大面积使用。然而,随着有机农业的兴起、有机食品需求的不断增加、新的生物杀虫剂的不断研发和科学合理的运用,以生物农药为主,结合物理防治和农业措施,适当使用化学杀虫剂的防治策略将会在苹果蠹蛾治理中成为必然。

参考文献

巴哈提古丽. 2009. 苹果蠹蛾在新疆地区的危害情况与防治措施. 防护林科技, (4): 118-120.

洪军, 贠旭疆, 杜桂林, 齐晓. 2014. 我国草原虫害生物防治技术应用现状. 草原与草坪, 34(3): 90-96.

胡建军, 杨敏生, 卢孟柱. 2010. 我国抗虫转基因杨树生态安全性研究进展. 生物多样性, 18(4): 336-345.

李保平, 孟玲. 2001. 苹果蠹蛾幼虫和蛹寄生蜂种类. 昆虫天敌, 23(4): 185-187.

李玉生, 吴永杰, 程和禾, 吴雅琴, 赵艳华. 2011. 转基因苹果研究现状与展望. 安徽农业科学, 39(12): 6965-6967, 6970.

南宫自艳, 宋萍, 王秀娟, 王勤英. 2014. 苹果蠹蛾生物防治技术的研究和应用进展. 中国生物防治学报, 30(2): 260-265.

万方浩, 郭建英, 张峰. 2009. 中国生物入侵研究. 北京: 科学出版社.

王安勇, 张雅林, 罗进仓, 冯纪年. 2009. 不同类型诱捕器对苹果蠹蛾的诱捕效果. 植物保护学报, 36(4): 383-384.

王同仁, 艾买尔江·尼亚孜, 艾山江·吐尔逊, 刘学梅, 王红艳, 古丽白克热木, 钟仕荣, 孙晓, 刘正兴. 2014. 苹果蠹蛾发生规律监测及防效试验. 农村科技, (10): 36-37.

许建军, 冯宏祖, 李翠梅, 吐尔逊, 王兰, 李志刚, 何江, 郭文超. 2014. 释放赤眼蜂防治苹果蠹蛾、梨小食心虫效果研究. 中国生物防治学报, 30(5): 690-695.

岳朝阳, 张新平, 杨森, 刘爱华, 张静文, 徐兵强. 2010. 喀什地区杏园内食心虫消长动态及赤眼蜂防治初探. 新疆农业科学, 47(12): 2376-2380.

张润志, 王福祥, 张雅林, 陈汉杰, 罗进仓, 王勤英, 刘万学, 艾尼瓦尔·木沙, 等. 2012. 入侵生物苹果蠹蛾监测与防控技术研究——公益性行业(农业)科研专项(200903042)进展. 应用昆虫学报, 49(1): 37-42.

张新平, 王成祥, 岳朝阳, 张静文, 王玉兰, 刘爱华, 阿里木·阿衣夏木. 2012. 利用周氏啮小蜂防治苹果蠹蛾的研究. 江苏农药科学, 40(10): 128-129.

张兴. 2010. 生物农药概览. 北京: 中国农业出版社.

张兴, 马志卿, 李广泽, 冯俊涛. 2002. 生物农药评述. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 30(2): 142-148.

张煜, 艾尼瓦尔·木沙, 阿力亚·阿布拉, 艾克然木, 李晶. 2014. 新疆苹果蠹蛾性信息素迷向防控技术的示范应用. 中国植保导刊, 34(4): 66-68.

赵楠, 于毅, 张安盛, 门兴元, 周仙红, 庄乾营, 张思聪, 许永玉, 李丽莉. 2014. 莱芜地区桃小食心虫发生规律及药剂防治效果. 植物保护, 40(1): 169-172.

Adang M J, Crickmore N and Jurat-Fuentes J L. 2014. Diversity of *Bacillus thuringiensis* crystal toxins and mechanism of action. *Insect Midgut and Insecticidal Proteins*, 47: 39-87.

Arthurs S P, Lacey L A and Behle R W. 2008. Evaluation of lignins and particle films as solar protectants for the granulovirus of the codling moth, *Cydia pomonella*. *Biocontrol Science and Technology*, 18: 829-839.

Arthurs S P, Lacey L A and Miliczky E R. 2007. Evaluation of the codling moth granulovirus and spinosad for codling moth control and impact on non-target species in pear orchards. *Biological Control*, 41(1): 99-109.

Asser-Kaiser S, Heckel D G and Jehle J A. 2010. Sex linkage of CpGV resistance in a heterogeneous field strain of the codling moth *Cydia pomonella* (L.). *Journal of Invertebrate Pathology*, 103: 59-64.

Baranek J, Kaznowski A, Konecka E and Naimov S. 2015. Activity of vegetative insecticidal proteins Vip3Aa58 and Vip3Aa59 of *Bacillus thuringiensis* against lepidopteran pests. *Journal of Invertebrate Pathology*, 130: 72-81.

Bloem S, Carpenter J, Blomefield T and Harrison C. 2010. Compatibility of codling moths *Cydia pomonella* (Linnaeus) (Lepidoptera: Tortricidae) from South Africa with codling moths shipped from Canada. *Journal of Applied Entomology*, 134: 201-206.

Creed C, Mollhagen A, Mollhagen N and Pszczolkowski M A. 2015. *Artemisia arborescens* "Powis Castle" extracts and α-thujone prevent fruit infestation by codling moth neonates. *Pharmaceutical Biology*, 53: 1458-1464.

Crickmore N, Baum J, Bravo A, Lereclus D, Narva K, Sampson K, Schnepf E, Sun M and Zeigler D R. 2014. *Bacillus thuringiensis Toxin Nomenclature*. http://www.lifesci.sussex.ac.uk/home/Neil_Crickmore/Bt/.

De Waal J Y, Malan A P and Addison M F. 2011. Evaluating mulches together with *Heterorhabditis zealandica* (Rhabditida: Heterorhabditidae) for the control of diapausing codling moth larvae, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortrici-

dae). *Biocontrol Science and Technology*, 21: 255-270.

De Waal J Y, Malan A P and Addison M F. 2013. Effect of humidity and a superabsorbent polymer formulation on the efficacy of *Heterorhabditis zealandica* (Rhabditida: Heterorhabditidae) to control codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae). *Biocontrol Science and Technology*, 23: 62-78.

Eberle K E and Jehle J A. 2006. Field resistance of codling moth against *Cydia pomonella* granulovirus (CpGV) is autosomal and incompletely dominant inherited. *Journal of Invertebrate Pathology*, 93: 201-206.

Ferron P, Vincent J and Dickler E. 1978. Preliminary experiments on the use of *Beauveria bassiana* against *Carpocapsa pomonella*. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt fur Land-und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem*, 84-87.

Gebhardt M M, Eberle K E, Radtke P and Jehle J A. 2014. Baculovirus resistance in codling moth is virus isolate-dependent and the consequence of a mutation in viral gene *pe*38. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 11: 15711-15716.

Hirt R P, Logsdon J M, Healy B, Dorey M W, Doolittle W F and Embley T M. 1999. Microsporidia are related to fungi: evidence from the largest subunit of RNA polymerase II and other proteins. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96: 580-585.

James C. 2013. *Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops*: 2013. *ISAAA Brief No.* 46. Ithaca, NY, USA: International Service for the Acquisition Agri-biotech Applications (ISAAA).

Jonsson M, Buckley H L, Case B S, Wratten S D, Hale R J and Didham R K. 2012. Agricultural intensification drives landscape-context effects on host-parasitoid interactions in agroecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 49: 706-714.

Jumean Z, Jones E and Gries G. 2009. Does aggregation behavior of codling moth larvae, *Cydia pomonella*, increase the risk of parasitism by *Mastrus ridibundus*? *Biological Control*, 49: 254-258.

Jumean Z, Ma B O, Chubaty A M, Ellenor C W, Roitberg B D and Gries G. 2011. A theoretical approach to study the evolution of aggregation behavior by larval codling moth, *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae). *Journal of Insect Behavior*, 24: 249-263.

Kaya H K and Gaugler R. 1993. Entomopathogenic nematodes. *Annual Review of Entomology*, 38: 181-206.

Knight A, Cichon L, Lago J, Fuentes-Contreras E, Barros-Parada W, Hull L, Krawczyk G, Zoller B, *et al*. 2014. Monitoring oriental fruit moth and codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) with combinations of pheromones and kairomones. *Journal of Applied Entomology*, 138: 783-794.

Konecka E, Baranek J, Hrycak A and Kaznowski A. 2012. Insecticidal activity of *Bacillus thuringiensis* strains isolated from soil and water. *The Scientific World Journal*, DOI: http://dx.doi.org/10.1100/2012/710501.

Lacey L A, Horton D R, Jones D C, Headrick H L and Neven L G. 2009. Efficacy of the biofumigant fungus *Muscodor albus* (Ascomycota: Xylariales) for control of codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) in simulated storage conditions. *Journal of Economic Entomology*, 102: 43-49.

Maalouly M, Franck P, Bouvier J C, Toubon J F and Lavigne C. 2013. Codling moth parasitism is affected by semi-natural habitats and agricultural practices at orchard and landscape levels. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 169: 33-42.

Miller J R and Gut L J. 2015. Mating disruption for the 21st century: matching technology with mechanism. *Environmental Entomology*, DOI: 10.1093/ee/nvv052.

Mills N. 2005. Selecting effective parasitoids for biological control introductions: codling moth as a case study. *Biological Control*, 34: 274-282.

Nimkingrat P, Khanam S, Strauch O and Ehlers R U. 2013. Hybridisation and selective breeding for improvement of low temperature activity of the entomopathogenic nematode *Steinernema feltiae*. *Biocontrol*, 58: 417-426.

Odendaal D, Addison M F and Malan A P. 2014. Field application of entomopathogenic nematodes for the control of codling moth (*Cydia pomonella*) in apple and pear orchards. *Journal of Nematology*, 46: 213-214.

Reinke M D, Miller J R and Gut L J. 2012. Potential of high-density pheromone-releasing microtraps for control of codling moth *Cydia pomonella* and obliquebanded leafroller *Choristoneura rosaceana*. *Physiological Entomology*, 37(1): 53-59.

Reyes M, Franck P, Charmillot P J, Ioriatti C, Olivares J, Pasqualini E and Sauphanor B. 2007. Diversity of insecticide resistance mechanisms and spectrum in European populations of the codling moth, *Cydia pomonella*. *Pest Management Science*, 63: 890-902.

Rodríguez M A, Marques T, Bosch D and Avilla J. 2011. Assessment of insecticide resistance in eggs and neonate larvae of *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae). *Pesticide Bi-*

ochemistry and Physiology, 100: 151-159.

Speiser B and Tamm L. 2011. Regulation of plant protection in organic farming// Ehlers R U. *Regulation of Biological Control Agents*. Dordrecht, the Netherlands: Springer, 113-125.

Van Zyl C and Malan A P. 2014. The role of entomopathogenic nematodes as biological control agents of insect pests, with emphasis on the history of their mass culturing and in vivo production. *African Entomology*, 22: 235-249.

Witzgall P, Stelinski L, Gut L and Thomson D. 2008. Codling moth management and chemical ecology. *Annual Review of Entomology*, 53: 503-522.

Wu Z W, Fan J B, Yu H, Wang D and Zhang Y L. 2015a. Ultraviolet protection of the *Cydia pomonella* granulovirus using zinc oxide and titanium dioxide. *Biocontrol Science and Technology*, 25: 97-107.

Wu Z W, Yang X Q and Zhang Y L. 2015b. The toxicology and biochemical characterization of cantharidin on *Cydia pomonella*. *Journal of Economic Entomology*, 108: 237-244.

Yang X Q, Li X C and Zhang Y L. 2013. Molecular cloning and expression of *CYP9A61*: a chlorpyrifos-ethyl and lambda-cyhalothrin-inducible cytochrome P450 cDNA from *Cydia pomonella*. *International Journal of Molecular Sciences*, 14: 24211-24229.

Yang X Q and Zhang Y L. 2015a. Characterization of glutathione S-transferases from *Sus scrofa*, *Cydia pomonella* and *Triticum aestivum*: their responses to cantharidin. *Enzyme and Microbial Technology*, 69: 1-9.

Yang X Q and Zhang Y L. 2015b. Investigation of insecticide-resistance status of *Cydia pomonella* in Chinese populations. *Bulletin of Entomological Research*, DOI: http://dx.doi.org/10.1017/ S0007485315000115.

Zhou H, Yu Y, Tan X, Chen A and Feng J. 2014. Biological control of insect pests in apple orchards in China. *Biological Control*, 68: 47-56.

Zimmermann G, Huger A M and Kleespies R G. 2013. Occurrence and prevalence of insect pathogens in populations of the codling moth, *Cydia pomonella* L.: a long-term diagnostic survey. *Insects*, 4: 425-446.

(责任编辑:杨郁霞)

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2015.04.009

Wolbachia 对苹果蠹蛾生殖调控的作用

冯宏祖[1], 曹 玉[1], 杨明禄[1], 刘慧敏[1], 许建军[2*]
[1]塔里木大学/新疆建设兵团南疆特色果树生产工程实验室/农业部阿拉尔作物有害生物科学观测实验站/塔里木大学南疆农业有害生物综合治理重点实验室,新疆 阿拉尔 843300;
[2]新疆农业科学院植物保护研究所,新疆 乌鲁木齐 830091

摘要:【背景】苹果蠹蛾是重要的果树害虫和检疫对象。研究显示,苹果蠹蛾体内所含的 *Wolbachia* 属于具有诱导胞质不亲和(CI)现象的 A 组中 Dor 亚组。本研究目的在于摸清苹果蠹蛾体内的 *Wolbachia* 对宿主的生殖调控是否具有诱导胞质不亲和的功能。【方法】通过饲喂抗生素消除苹果蠹蛾体内的 *Wolbachia*,比较感染与消除 *Wolbachia* 的苹果蠹蛾生态适合度以及 *Wolbachia* 感染对苹果蠹蛾生殖的影响。【结果】消除 *Wolbachia* 后,苹果蠹蛾 F_1、F_2 代各虫态的发育历期、产卵量、孵化率和蛹的存活率与对照无显著差异;*Wolbachia* 对苹果蠹蛾成虫的寿命、产卵前期、平均产卵量和性别比例均无影响。不同处理苹果蠹蛾之间的杂交试验结果表明,4 种杂交的苹果蠹蛾都能产卵,且卵可以正常孵化。【结论与意义】在自然状态下苹果蠹蛾体内的 *Wolbachia* 不能诱导其宿主的胞质不亲和现象。

关键词: *Wolbachia*; 苹果蠹蛾; 生殖调控; 胞质不亲和

The effects of *Wolbachia* on the reproduction of *Cydia pomonella* (L.)

Hong-zu FENG[1], Yu CAO[1], Ming-lu YANG[1], Hui-min LIU[1], Jian-jun XU[2*]
[1]*Tarim University/Engineering Laboratory of Featured Fruit Tree in Southern Xinjiang, XPCC/Scientific Observing and Experimental Station of Crop Pests in Alar, Ministry of Agriculture, P. R. China/Southern Xinjiang Key Laboratory of IPM of Tarim University, Alar, Xinjiang* 843300, *China*; [2]*Institute of Plant Protection, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi, Xinjiang* 830091, *China*

Abstract:【Background】Codling moth (*Cydia pomonella*) is the most serious fruit tree and quarantine pest in Chinese orchards. The species is host to *Wolbachia*, Dor subgroup of the A group, which induce cytoplasmic incompatibility. The aim of this study is to find out if the *Wolbachia* induce cytoplasmic incompatibility to reproductive regulation in *C. pomonella*.【Method】The relative fitness of *C. pomonella* with active *Wolbachia* was compared to individuals in which *Wolbachia* was eliminate by antibiotics.【Result】We found no significant differences in development duration, fecundity, hatchability and pupal survival of the F_1, and F_2 generations between the two groups. *Wolbachia* infection had no effect on adult life span, the pre-oviposition period, fecundity and female ratio in *C. pomonella*. Hybridization tests showed that hybrids could lay eggs, and these eggs were normal.【Conclusion and significance】*Wolbachia* in *C. pomonella* did not induce host cytoplasmic incompatibility.

Key words: *Wolbachia*; *Cydia pomonella* (L.); reproduction manipulation; cytoplasmic incompatibility

沃尔巴克氏体 *Wolbachia* 是一类呈母性遗传的细胞内寄生细菌,属于变形菌纲 Proteobacteria 的 a 亚群。近年的研究表明,66%以上的节肢动物(包括昆虫、螨类)种类都存在 *Wolbachia* 的感染(Hilgenboecker *et al.*,2008),并因其能操纵寄主的生殖而备受关注。*Wolbachia* 对寄主生殖的调控主要包括胞质不亲和(Cytoplasmic incompatibility, CI)、孤雌生殖、雌性化和杀雄等,其中最常见的调控方式为诱导胞质不亲和(Serbus *et al.*,2008; Werren *et al.*,2008)。*Wolbachia* 导致寄主杂交细胞质不亲和现象在昆虫进化和分类学研究中具有重要意义,也为通过遗传操纵的方法防治昆虫提供了新思路(董鹏和王进军,2006)。近年来,我国在 *Wolbachia* 的分布和检测方面做了大量的工作,已在很多昆虫

收稿日期(Received): 2015-05-12 **接受日期(Accepted)**: 2015-09-28
基金项目: 国家自然科学基金(31060242); 新疆维吾尔自治区财政林业科技专项(新林计发[2014]40 号文)
作者简介: 冯宏祖, 男, 教授。研究方向: 害虫综合治理。E-mail: fhzzky@163.com
* 通讯作者(Author for correspondence), E-mail: xjj@163.com

(螨)体内发现了 *Wolbachia* 的感染,并对其系统发育进行了分析(甘波谊等,2002; 苗慧等,2006; 宋社吾等,2002; 王欢等,2006)。这些研究对全面掌握 *Wolbachia* 在我国昆虫中的感染情况以及分析其对节肢动物生殖的影响奠定了基础。

苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* (L.)原产于欧洲,是我国重要的进境植物检疫性害虫。目前,在我国新疆全境,甘肃、内蒙古、宁夏、黑龙江和吉林等部分地区发生,对我国东部苹果产业安全生产构成严重威胁(张润志等,2012)。作者前期的研究显示:苹果蠹蛾体内所含的 *Wolbachia* 与膜翅目细蜂科的锤角细蜂 *Trichopria drosophilae* (Perkins)所感染的 *Wolbachia* 具有较近的亲缘关系(冯宏祖等,2014),而锤角细蜂所含的 *Wolbachia* 属于具有诱导 CI 现象的 A 组中 Dor 亚组。本研究目的在于摸清苹果蠹蛾体内的 *Wolbachia* 对宿主的生殖调控是否具有诱导胞质不亲和的功能,以明确此共生细菌对苹果蠹蛾的生殖调控产生的作用及影响。

1　材料与方法

1.1　无 *Wolbachia* 苹果蠹蛾品系的培育

苹果蠹蛾成虫饲喂 1.2~3.0 mg · mL^{-1}头孢氨苄蜂蜜水溶液,幼虫饲喂含同样浓度抗生素的人工饲料,在 25 ℃培养(RH:75%±5%),16 h 光/8 h 暗,连续喂食 3 代,各代取 20 头经 PCR 检测(冯宏祖等,2014)体内有无 *Wolbachia* 的存在。

1.2　不同苹果蠹蛾品系杂交后的繁殖力、卵孵化率和性别比例

将消除共生微生物 *Wolbachia* 的苹果蠹蛾进行 4 组杂交试验(1.1 结果表明,抗生素饲喂 2 代后已检测不出该共生菌,杂交试验虫源为饲喂抗生素的第 3 代苹果蠹蛾):♀$^{w^-}$×♂$^{w^-}$、♀$^{w^-}$×♂$^{w^+}$、♀$^{w^+}$×♂$^{w^-}$和♀$^{w^+}$×♂$^{w^+}$,每个杂交组都配 30 对刚羽化为成虫的苹果蠹蛾,放入直径为 10 cm 的无色塑料杯中进行单对饲养。饲养条件:温度为(25±0.5) ℃、75%~80% RH。观察记录不同杂交组的产卵量、卵孵化率和性别比例。

1.3　消除 *Wolbachia* 后苹果蠹蛾 F_1、F_2 代的生态适合度

在养虫笼内放入蜡纸并接入若干苹果蠹蛾成虫,饲喂含抗生素的蜂蜜水溶液,在(25±0.5) ℃、75%~80% RH 的条件下让其产卵。24 h 后移去养虫笼中的成虫,将粘附有卵的蜡纸剪成若干小片,每一小片上只保存 1 粒卵,置于直径为 10 cm 的无色塑料杯中进行单头饲养;卵孵化后,在杯中加入少量的人工饲料(含抗生素)继续培养,羽化为成虫后雌雄配对,雌虫产卵后,挑取一定数量的卵,继续在相同条件下培养观察。试验一直进行到第 1、2 代成虫全部死亡为止。以共生有 *Wolbachia* 的苹果蠹蛾为对照,在不含抗生素人工饲料上饲养。每个处理挑取卵 135 头,重复 3 次。观察记录各虫态的发育历期、产卵量、孵化率、幼虫和蛹存活率及雌雄寿命和性别比例。

1.4　数据处理

试验所得数据按项目进行加权平均,用 SPSS 软件进行方差分析、显著性测验及模型拟合等,并组建实验种群生命表。

2　结果与分析

2.1　苹果蠹蛾体内 *Wolbachia* 的消除

在蜂蜜水和人工饲料中添加抗生素能去除苹果蠹蛾体内的 *Wolbachia*。苹果蠹蛾经抗生素处理后,F_1 代 20 头中只有 2 头检测到 *Wolbachia* 的存在,但 PCR 电泳检测条带的亮度不及对照(即田间自然种群),F_2 和 F_3 代没有扩增出相应的条带,表明 *Wolbachia* 已消除。

2.2　*Wolbachia* 对苹果蠹蛾生殖的影响

杂交试验结果(表 1)表明,4 种杂交的苹果蠹蛾都能产卵,且卵可以正常孵化。根据细胞质不亲和的理论,杂交♀$^{w^-}$×♂$^{w^+}$不能产卵或所产卵不能正常孵化,说明苹果蠹蛾体内的 *Wolbachia* 不能诱导其宿主的细胞质不亲和现象。在所有的杂交组合中,当苹果蠹蛾雌雄个体同时共生有 *Wolbachia* 时产卵量最多(31.6 粒),卵的孵化率最高(84.71%),产卵期最长(4.2 d),产卵前期最短(2.9 d),但与其他组合均无显著差异 ($P>0.05$),说明当苹果蠹蛾雌雄个体同时被 *Wolbachia* 共生时才能达到产卵的最优化,可能有利于 *Wolbachia* 在该宿主种群的稳定存在和传播。而杂交组♀$^{w^-}$×♂$^{w^-}$的产卵量、孵化率最低。

表 1 *Wolbachia* 的感染对苹果蠹蛾生殖的影响

Table 1 Effect of *Wolbachia* on the reproduction of *C. pomonella*

杂交组合 Cross combination	产卵前期 Preoviposition period (d)	产卵期 Spawning period (d)	每雌平均产卵量(粒) Average number of eggs produced by per female	孵化率 Hatching rate (%)
♀$^{w+}$×♂$^{w+}$	2.9±0.7	4.2±1.2	31.6±9.3	84.71±3.35
♀$^{w-}$×♂$^{w-}$	3.2±0.9	3.9±1.3	29.2±10.2	82.92±7.61
♀$^{w-}$×♂$^{w+}$	3.1±0.7	4.0±1.3	29.9±10.6	83.74±6.19
♀$^{w+}$×♂$^{w-}$	3.0±0.6	4.2±1.0	30.9±9.2	84.09±9.04

所有组合的处理数均为 30 对。

N=30 for all combinations.

2.3 消除 *Wolbachia* 后苹果蠹蛾 F_1、F_2 代的生态适合度

结果表明,消除 *Wolbachia* 后苹果蠹蛾 F_1、F_2 代各虫态的发育历期、产卵量、孵化率和蛹的存活率与对照均无显著差异,而幼虫存活率与对照差异显著(表 2)。这主要是由于对照的人工饲料中没有加抗生素,极易霉变,导致幼虫死亡率升高。*Wolbachia* 对苹果蠹蛾的成虫寿命、产卵前期和性别比例均无影响(表 3)。

表 2 消除 *Wolbachia* 后苹果蠹蛾各虫态的发育历期和存活率

Table 2 The development duration and survival of *C. pomonella* after eliminating *Wolbachia*

处理 Treatment	卵期 Egg stage (d)	幼虫期 Larval stage (d)	蛹期 Pupal stage (d)	全世代 Total development (d)	每雌产卵量(粒) Fecundity (no.eggs/female)	孵化率 Hatching rate (%)	存活率 Survival (%)	
							幼虫 Larva	蛹 Pupa
CK	4.87±0.76a	22.04±1.33a	10.85±1.27a	37.74±3.33a	28.80±9.26a	55.53±19.33a	36.67±6.22b	86.36±7.32a
F_1	5.12±0.73a	23.03±1.98a	11.06±1.47a	39.21±4.21a	27.07±13.23a	58.86±10.79a	54.67±6.45a	87.10±6.02a
F_2	5.07±0.79a	22.41±1.50a	10.55±0.99a	38.66±3.56a	27.80±9.98a	61.05±16.39a	56.67±6.40a	85.29±6.07a

同列数据后附不同字母者表示差异显著(P<0.05)。

Data in a column followed by different letters are significantly different (P<0.05).

表 3 消除 *Wolbachia* 后苹果蠹蛾的雌性比、寿命和产卵前期

Table 3 The female ratio, life span, preoviposition period of *C. pomonella* after eliminating *Wolbachia*

处理 Treatment	产卵前期 Preoviposition period (d)	寿命 Life span (d)		雌性比 Female ratio
		雄虫 Male	雌虫 Female	
CK	2.47±0.52	15.93±2.87	16.53±2.13	0.54±0.05
F_1	2.67±1.84	16.27±4.67	17.33±3.36	0.52±0.05
F_2	2.33±0.49	16.13±2.23	17.87±2.67	0.53±0.05

2.4 消除 *Wolbachia* 后苹果蠹蛾 F_1、F_2 代的种群生命表

根据苹果蠹蛾种群的存活率和成虫繁殖力,分别组建消除 *Wolbachia* 后苹果蠹蛾 F_1、F_2 代的实验种群特定年龄生命表(表 4),表中的起始卵数为假定数,各发育阶段的存活率、雌成虫比例、单雌产卵量均为实际观察值。下代产卵量由起始数量、世代存活率、雌性比和平均产卵量的乘积求得,种群趋势指数是预计下代卵量与当代实际卵量的比值。结果表明,CK、F_1、F_2 代的种群趋势指数分别为 2.73、3.73、2.89,均大于 1,表明下代种群数量都呈增长趋势。由于人工饲料饲养苹果蠹蛾中,产卵量低、幼虫死亡率高(尤其是不加抗生素的对照)的问题未得到解决,3 个处理的种群趋势指数均比较小。以净增殖率为指标,感染和未感染 *Wolbachia* 的苹果蠹蛾种群的适合度无显著差异。

表 4 消除 *Wolbachia* 后苹果蠹蛾 F_1、F_2 代的种群生命表

Table 4 The life table of *C. pomonella* eliminating *Wolbachia* from F_1, F_2 generation

指标 Index	CK	F_1	F_2
起始卵量(粒) Initial no. of eggs	100	100	100
幼虫存活率 Larval survival (%)	55.53	58.86	61.05
蛹存活率 Pupal survival (%)	20.36	30.41	34.60
成虫羽化率 Rate of adult emergence (%)	17.58	26.49	29.51
雌成虫比例 Female ratio	0.54	0.52	0.53
平均产卵量(粒) Average number of eggs	28.80	27.07	27.80
预计下代卵量(粒) Prediction of egg number for subsequent generation	273.47	372.83	288.88
种群趋势指数 Population trend index	2.73	3.73	2.89

3　讨论

近年来的研究表明,*Wolbachia* 除具有调控宿主生殖的作用外,对宿主适合度也有不同程度的影响,但其能够在寄主种群中稳定遗传,更多地依赖于其对寄主产生的生殖调控作用(潘雪红等,2007;杨克冬等,2008;Serbus *et al.*,2008;Werren *et al.*,2008)。一些 *Wolbachia* 品系能够提高节肢动物雌性宿主的生殖力,而双翅目和膜翅目昆虫中的 *Wolbachia* 能够降低宿主的生命周期、存活率和运动能力等(Fry *et al.*,2004)。目前,昆虫等节肢动物受 *Wolbachia* 感染后,是否存在 CI 现象、CI 产生的机理等是 *Wolbachia* 研究最热门的领域之一。本研究采用抗生素处理的方法去除了苹果蠹蛾体内的 *Wolbachia*,进而研究 *Wolbachia* 感染对苹果蠹蛾生殖及适合度的影响。结果表明,经抗生素处理后,F_2 和 F_3 代中的 *Wolbachia* 已清除。消除 *Wolbachia* 后苹果蠹蛾 F_1、F_2 代各虫态的发育历期、产卵量、孵化率和蛹的存活率与对照无显著差异;*Wolbachia* 对苹果蠹蛾成虫寿命、产卵前期和性别比例均无影响。此外,4 种杂交的苹果蠹蛾都能产卵,且卵可以正常孵化,说明在自然状态下苹果蠹蛾体内的 *Wolbachia* 不能诱导其宿主的细胞质不亲和现象。这与同苹果蠹蛾具有亲缘关系的锤角细蜂受 *Wolbachia* 的影响截然不同,是否与苹果蠹蛾的生存环境、共生菌消除方式有关,还需进一步研究。同时,本试验只对 4 组苹果蠹蛾每雌平均产卵量、孵化率进行了统计分析,而 *Wolbachia* 对苹果蠹蛾的影响是否会在其继代中表现或累计表现,也需要进一步验证。既然 *Wolbachia* 不能诱导苹果蠹蛾的细胞质不亲和现象,那么其对苹果蠹蛾起何作用仍亟待研究。

参考文献

董鹏, 王进军. 2006. 沃尔巴克氏体 *Wolbachia* 对宿主的生殖调控作用及其研究进展. 昆虫知识, 43(3): 288-294.

冯宏祖, 王月萍, 曹玉, 杨明禄, 刘慧敏, 许建军. 2014. 苹果蠹蛾体内 *Wolbachia* 的 *wsp* 基因克隆与序列分析. 应用昆虫学报, 51(3): 725-732.

甘波谊, 周伟国, 冯丽冰, 沈大棱, 李昌本. 2002. 沃尔巴克氏体在中国三种稻飞虱中的感染. 昆虫学报, 45(1): 14-17.

苗慧, 洪晓月, 谢霖, 薛晓峰. 2006. 二斑叶螨体内感染的 *Wolbachia* 的 *wsp* 基因序列测定与分析. 昆虫学报, 49(1): 146-153.

潘雪红, 何余容, 陈科伟, 潘飞, 盘梅. 2007. *Wolbachia* 感染对拟澳洲赤眼蜂寿命、生殖力和嗅觉反应的影响. 昆虫学报, 50(3): 207-214.

宋社吾, 赵彤言, 董言德, 蒋书楠, 陆宝麟. 2002. 我国蚊虫体内感染的 *Wolbachia* 的 *wsp* 基因序列测定与分析. 昆虫学报, 45(5): 571-577.

王欢, 李凯, 刘怀, 胡萃, 叶恭银. 2006. 两种金小蜂体内 *Wolbachia* 的 *wsp* 基因分子检测及序列分析. 植物保护学报, 33(3): 235-240.

杨克冬, 张海燕, 钱海涛, 董辉, 张莹, 丛斌. 2008. 沃尔巴克氏体感染对松毛虫赤眼蜂生殖力、发育历期和存活的影响. 中国生物防治, 24(3): 210-214.

张润志, 王福祥, 张雅林, 陈汉杰, 罗进仓, 王勤英, 刘万学, 艾尼瓦尔·木沙, 等. 2012. 入侵生物苹果蠹蛾监测与防控技术研究——公益性行业(农业)科研专项(200903042)进展. 应用昆虫学报, 49(1): 37-42.

Fry A J, Palmer M R and Rand D M. 2004. Variable fitness effects of *Wolbachia* infection in *Drosophila melanogaster*. *Heredity*, 93: 379-389.

Hilgenboecker K, Hammerstein P, Schlattmann P, Telschow A and Werren J H. 2008. How many species are infected with *Wolbachia*? A statistical analysis of current data. *FEMS Microbiology Letters*, 281: 215-220.

Serbus L R, Casper-Lindley C, Landmann F and Sullivan W. 2008. The genetics and cell biology of *Wolbachia* host interactions. *Annual Review of Genetics*, 42: 683-707.

Werren J H, Baldo L and Clark M L. 2008. *Wolbachia*: master manipulators of invartabrata biology. *Nature Reviews Microbiology*, 6: 741-751.

(责任编辑:杨郁霞)

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2015.04.010

一种增强苹果蠹蛾颗粒体病毒田间防效方法的建立

樊江斌, 吴正伟, 刘国锋, 王 敦*
西北农林科技大学植保资源与害虫治理教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100

摘要:【背景】苹果蠹蛾是危害苹果和梨等蔷薇科果实的世界性重要蛀果害虫之一,目前已侵入我国新疆、甘肃、黑龙江、宁夏、内蒙古、吉林、辽宁等7省市,正在向苹果主产区扩散,严重威胁我国苹果产业的发展。欧美国家的田间应用证明,CypoGV是防治苹果蠹蛾效果最佳的生防制剂。研究开发本土CypoGV商业化制剂,对保证我国苹果业健康发展有重大意义。【方法】用室内和田间生测方法,在半人工饲料中添加被紫外线处理过的氧化铁和CypoGV-ZY混合悬液,其中氧化铁的添加浓度分别为3、5、7、10、12 mg·mL^{-1},并完成其对苹果蠹蛾初孵幼虫的生物测定。【结果】在病毒悬液中添加7 mg·mL^{-1}的氧化铁能显著提高CypoGV在田间的活性和持久性,与未添加氧化铁处理相比较,初孵幼虫死亡率分别提高了53.88%和96.64%。【结论与意义】添加低剂量氧化铁,显著增强了CypoGV对田间强日光、强紫外线的适应性,提高了该病毒在田间的活性和持久性,说明氧化铁可作为商业化CypoGV制剂的助剂,提高田间CypoGV对苹果蠹蛾防治效果。本研究为我国CypoGV制剂生产过程中添加助剂提供了依据。

关键词: 氧化铁; UV; 生物测定; 存活率; 增效剂

Synergic enhancement of *Cydia pomonella* granulovirus virulence using an adjuvant

Jiang-bin FAN, Zheng-wei WU, Guo-feng LIU, Dun WANG*
Key Laboratory of Plant Protection Resources & Pest Management of the Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, *China*

Abstract:【Background】*Cydia pomonella* (L.) is a worldwide major fruit-boring pest of rosaceae family such as apples and pears. It has so far infested Xinjiang, Gansu, Heilongjiang, Ningxia, Inner Mongolia, Jilin, and Liaoning provinces, China. This pest is spreading towards the major apple production areas, which can result in a great threat to apple industry in China. CypoGV is considered the best biological agent to control codling moth (*C. pomonella*) in Europe and America. It is important to develop domestic CypoGV commercial agents to protect apple production in China.【Method】The virulence to neonate larvae were tested in laboratory and field bioassay using the mixtures of CypoGV-ZY with different Fe_2O_3 concentrations (3, 5, 7, 10, 12 mg·mL^{-1}) treated with UV, and sunlight.【Result】The virulence and persistence of CypoGV-ZY were significant increased when mixed with 7 mg·mL^{-1} Fe_2O_3 in both bioassays. It also enhanced CypoGV-ZY adaptability to strong UV and sunlight. Compared to control of CypoGV-ZY, mortality rate increased 53.88% and 96.64%, in laboratory and field bioassay, respectively.【Conclusion and significance】The virulence and persistence of CypoGV-ZY were markedly enhanced by adding low dose of Fe_2O_3, which showed that this compound was a proper candidate adjuvant for CypoGV-ZY. The results will provide the basis for commercial production of CypoGV-ZY.

Key words: Fe_2O_3; UV; bioassay; survival rate; synergistic agent

苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* (L.)是世界范围内苹果和梨等蔷薇科果树的重要害虫之一,是我国重要的入侵生物和检疫害虫(杜磊等,2012; 努尔古丽·马坎等,2014; Garczynski *et al.*,2011; Wearing *et al.*,2011)。1953年在我国新疆库尔勒首次发现苹果蠹蛾,其初孵幼虫蛀入果实内部为害直至老熟幼虫脱果,以老熟幼虫在树皮裂缝等隐蔽处越冬,对环境具有很强的适应能力(徐婧等,2012; 张学

收稿日期(Received): 2015-06-20 **接受日期(Accepted)**: 2015-07-18
基金项目: 国家自然科学基金(31170609、31270691)
作者简介: 樊江斌, 男, 硕士研究生。研究方向: 昆虫生理生化。E-mail: fanjiangbin1987@sina.com
* 通讯作者(Author for correspondence), E-mail: wanghande@nwsuaf.edu.cn

祖,1957; 周昭旭等,2008)。目前,该害虫正从西北地区(新疆、甘肃)和东北地区(黑龙江、吉林)蔓延至苹果适生区和主产区,对这些地区的苹果产量和品质构成严重威胁(张润志等,2012)。

由于化学药剂防治带来的抗药性、环境污染及农药残留问题,应用赤眼蜂 *Trichogramma chilonis* Ishii(王兰等,2011; Stef *et al.*,2010)、斯氏科线虫 *Steinernema carpocapsae* (Weiser) (Lacey *et al.*, 2003)、苏云金芽胞杆菌 *Bacillus thuringiensis* (Berliner) (liu *et al.*, 2013)、苹果蠹蛾颗粒体病毒 (*Cydia pomonella* granulovirus, CypoGV) (Berling *et al.*,2009; Lawrence *et al.*,2008)等生物防治技术控制苹果蠹蛾发展迅速。在欧美等地已有 10 种苹果蠹蛾颗粒体病毒制剂(SAN 406、Virosoft、CarpovirusineTM evo2、CarpovirusineTM 2000、CYD-XHP、MadexTM Biocontrol、GranupomTM、CarpovirusineTM、Cyd-XTM、Virosoft CP4 等)被登记(南宫自艳等, 2014; Lacey & Arthurs, 2005)。我国利用 CypoGV 防治苹果蠹蛾研究起步较晚,目前已分离到 CypoGV-ZY、CypoGV-CJ01、CypoGV-KS1、CypoGV-KS2、CypoGV-C1 等本土病毒株系,并完成了室内毒力及田间防治效果试验(甘恩宇等,2011; 申建茹等,2012; liu *et al.*,2013)。2013 年 CypoGV-ZY(张掖株)病毒杀虫剂制剂技术获得国家发明专利(专利号 201010013631.9)。这些研究成果为我国 CypoGV 商业化生产奠定了基础。

昆虫杆状病毒进入昆虫体内后,通常需要 7~10 d 才能杀死寄主,添加助剂可提高其田间防效和持久性。研究证实,添加几丁质酶和 BtCry1Ab 毒素蛋白能分别缩短 LT_{50} 和 LT_{90}(刘强等,2010; 吕婷婷等,2013);氧化铁(黑色)和增白剂能提高其他昆虫杆状病毒的紫外线耐受性(Asano, 2005; Dougherty *et al.*,1996);添加紫外线保护剂二氧化钛和氧化锌能提高 CopyGV 对紫外线的抵抗力(Wu *et al.*, 2015)。本研究利用氧化铁作为 CypoGV-ZY 在田间的保护增效剂,研究其对病毒毒力和活性的影响,为开发新型商业化 CypoGV-ZY 制剂及其田间应用提供依据。

1　材料与方法

1.1　供试虫源

苹果蠹蛾为本试验在甘肃农业大学草业学院建立的室内种群,已连续饲养 20 多代。先收集虫卵,进入黑头期后用 NaClO 表面消毒,选择孵化 8~12 h 的幼虫为供试虫源。试虫饲养条件参数:(25±0.5)℃、RH(60±7)%、16 h∶8 h(L∶D),幼虫取食的半人工饲料参照樊江斌等(2015)方法制备。

1.2　CypoGV-ZY 及氧化铁

苹果蠹蛾颗粒体病毒 CypoGV-ZY 由西北农林科技大学植物保护学院分子病毒学实验室保存,在甘肃农业大学草业学院扩繁并纯化,制成浓度 1×10^{10} OBs·mL^{-1},4 ℃保存。氧化铁购自天津市东丽区天大化学试剂厂。

1.3　试验方法

微量氧化铁 15 mg·mL^{-1}饲喂试虫,将 2 μL 该化合物添加到体积约 4.5 mm^3 的饲料块内,待初孵幼虫取食完全后更换新饲料块。测定 30 头,供试幼虫均未中毒死亡,表明低剂量氧化铁对苹果蠹蛾初孵幼虫无明显毒性。因此本试验选取氧化铁浓度 3~12 mg·mL^{-1}。设置 CypoGV-ZY 和蒸馏水 2 个对照。

1.3.1　氧化铁对 CypoGV-ZY 保护增效作用的室内生测　配制 1×10^4 OBs·mL^{-1}的 CypoGV-ZY(Wu *et al.*,2015)与不同浓度的氧化铁混匀液,氧化铁终浓度分别为 3、5、7、10、12 mg·mL^{-1}。病毒混合液在小培养皿中避光自然晾干,然后将其置于 UVB 紫外灯管(40 W)下照射 4 h,再加入等体积蒸馏水。以未添加氧化铁的病毒为对照。滴加 2 μL 上述病毒悬液至 4.5 mm^3 饲料块上,幼虫取食完饲料块后,添加新鲜饲料,逐日记录死亡和存活虫数,直至所有幼虫死亡或化蛹。参照 Eberle *et al.*(2009)计算 7 d 内死亡率,按照 Abbort(1987)方法计算校正死亡率。每个处理 30 头幼虫,3 个重复。

1.3.2　氧化铁对 CypoGV-ZY 保护增效作用的田间试验　病毒强日照田间处理选择在我国日照强烈的新疆地区进行。向 1×10^6 OBs·mL^{-1}的 CypoGV 中添加氧化铁,制成氧化铁终浓度分别为 3、5、7、10、12 mg·mL^{-1}的混合液。将混合液转移到培养皿中自然晾干,然后移至新疆塔里木大学苹果园中,选择强日照天气处理 7 d 后,用同体积蒸馏水重悬浮病毒氧化铁混合液。设置未添加氧化铁的日光处理的病毒为对照。毒力测定参照 1.3.1。

1.4　数据分析

使用 SPSS 17.0(SPSS Inc, USA)进行数据分

析,采用 Duncan 氏多重比较分析不同处理间的差异显著性。采用 GraphPad Prism 5 绘图软件做图。

2 结果与分析

2.1 氧化铁对 CypoGV-ZY 的室内保护增效作用

室内生测结果表明,添加不同浓度氧化铁的病毒经 UVB 处理 4 h 后,对苹果蠹蛾初孵幼虫的死亡率明显高于未添加氧化铁的对照组,差异极显著($F_{5,12}=22.24$, $P<0.01$)(图 1A)。当氧化铁浓度为 7 mg · mL^{-1}时,幼虫死亡率最高(70.77%),与氧化铁浓度 5 mg · mL^{-1}相比,幼虫死亡率差异不显著($P>0.05$),但比未添加病毒的处理增加了 53.88%。UVB 照射病毒后幼虫存活率 53.33%(图 1B),添加 5 mg · mL^{-1}氧化铁后再被 UVB 照射,幼虫存活率降至 33.33%,而未被 UVB 照射的对照组幼虫存活率仅为 13.33%,表明低剂量氧化铁能帮助病毒抵抗 UVB 伤害,进而提高其对宿主昆虫的毒力。

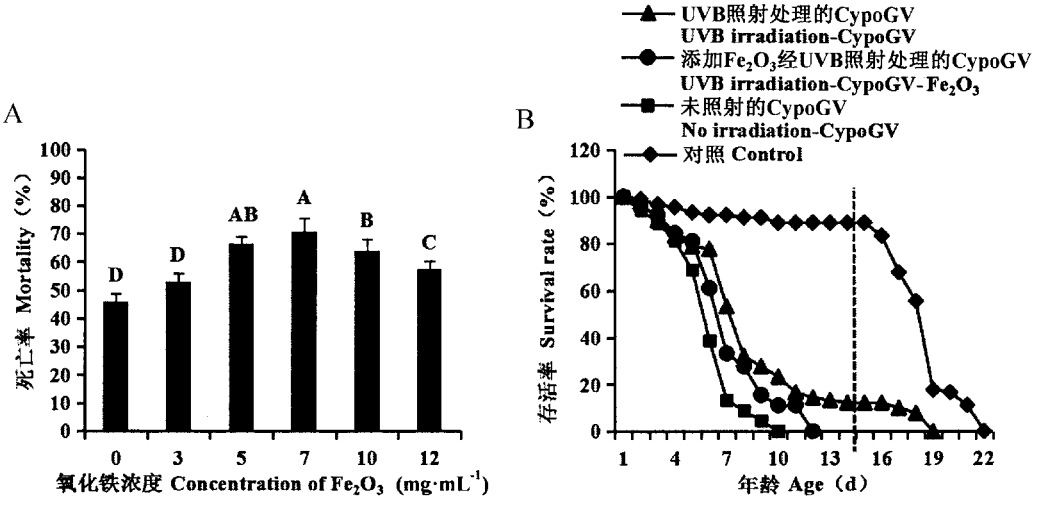

图 1 不同浓度氧化铁对 CypoGV-ZY 的增效作用(室内)

Fig.1 The enhancement on *Cydia pomonella* granulovirus virulence at different concentrations of Fe_2O_3 under laboratory conditions

A:柱状图上的不同大写字母表示经 Duncan 氏多重比较在 0.01 水平上差异显著。B:氧化铁(5 mg · mL^{-1})作为 CypoGV(1×10^4 OBs · mL^{-1})的 UVB 保护剂对初孵幼虫存活率的影响,对照处理的幼虫 88.89%在孵化后 15 d 开始化蛹。

A: Different capital letters in the bar graph represent significant differences at 0.01 levels using a Duncan's multiple ranging test.

B: The effects on survival rate of neonate larvae infested with CypoGV-ZY (1×10^4 OBs · mL^{-1}) using Fe_2O_3 (5 mg · mL^{-1}) as UVB protective agent and approximately 88.89% larvae pupated in control.

2.2 氧化铁对 CypoGV-ZY 的田间保护增效作用

昆虫病毒制剂在田间应用过程中,强紫外线容易杀死病毒,减弱病毒制剂在田间的防治效果。图 2 表明添加氧化铁的病毒经强日照处理,对苹果蠹蛾初孵幼虫的死亡率明显高于未添加氧化铁的对照组,并随着氧化铁浓度增加,差异极显著($F_{5,12}=36.23$, $P<0.01$),表明添加氧化铁能提高病毒对强日照环境的抵抗力及田间持久性。向 CypoGV-ZY 添加氧化铁终浓度 7 mg · mL^{-1},初孵幼虫死亡率 70.77%,比对照提高了 96.64%。

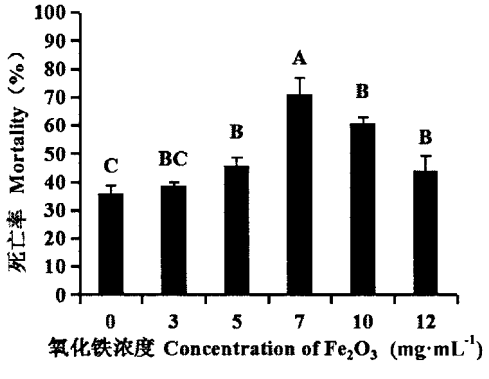

图 2 不同浓度氧化铁对 CypoGV-ZY 的增效作用(田间)

Fig.2 The enhancement on *Cydia pomonella* granulovirus virulence at different concentrations of Fe_2O_3 under field essay

柱状图上的不同大写字母表示经 Duncan 氏多重比较在 0.01 水平上差异显著。

Different capital letters in the bar graph represent significant differences at 0.01 levels using a Duncan's multiple ranging test.

3 讨论

昆虫杆状病毒具有寄主专化性和非靶标生物安全的特点,目前被广泛应用于害虫防治。但病毒离开活体寄主,其活性在外界环境中受到多种非生物因子的影响。

紫外线(UV)是一种严重影响核型多角体病毒(Nucleopolyhedrovirus,NPV)和颗粒体病毒(Granulosis virus,GV)活性和持久性的非生物因素之一。通过添加吸收剂和反射剂等紫外线保护剂,能够阻止 UV 到达病毒体上,减弱 UV 对病毒造成的伤害(Wu *et al.*,2015)。Jaques(1971)验证了 29 种物质都可作为粉纹夜蛾核型多角体病毒的 UV 保护剂。

室内研究表明,UV 造成 CypoGV 失活是一个双峰曲线,大部分(约 99%)病毒很快失去活性,而少部分表现为持久活性(Huber & Luedcke,1996)。二氧化钛和氧化铁能增强 *Helicoverpa zea* NPV 及 *Homona magnanima* GV 在 UV 下的稳定性,从而提高病毒活性和持久性(Asano,2005; Farrar *et al.*, 2003)。病毒生测试验结果证明,UV 处理时添加 1~4 mg · mL^{-1}氧化铁,能够减少 1/6~1/18 的病毒失活(Asano,2005)。本研究中,未添加氧化铁保护剂的 CypoGV 被 UVB 照射后,幼虫存活率 53.33%,而添加 5 mg · mL^{-1}氧化铁的 CypoGV, UVB 再处理时,幼虫存活率降低至 33.33%。田间应用表明,喷雾 3 d 后 CypoGV 感染活性减半,而在 4~8 周后部分 CypoGV 仍持有感染活性(Glen & Payne,1984)。添加木质素、二氧化钛和蔗糖的 CypoGV 制剂比商业化添加甘油的 CypoGV 制剂(Cyd-X),能够保护病毒免受紫外线伤害,使苹果蠹蛾的死亡率提高 26%~27%(Arthurs *et al.*,2006)。本研究通过室内和田间生测,表明添加氧化铁可提高 CypoGV 对 UVB 抵抗力。随着氧化铁浓度增加,幼虫死亡率先升后降,可能是因为高浓度氧化铁影响病毒入侵昆虫中肠细胞。当氧化铁浓度为 7 mg · mL^{-1}时,显著增强了 CypoGV 的活性和持久性;初孵幼虫存活率曲线也证明氧化铁对 CypoGV 具有保护作用,它能减弱 UV 对病毒的损害,提高 CypoGV 的防治效果。研究表明,氧化铁可作为 CypoGV 的添加剂,增强 CypoGV 对苹果蠹蛾的田间防治效果,这为我国 CypoGV 制剂本土化生产提供了依据。

参考文献

杜磊, 刘伟, 柴绍忠, 杨建强, 张润志. 2012. 苹果蠹蛾的蛀果与脱果特性. 应用昆虫学报, 49(1): 61-69.

樊江斌, 吴正伟, 尚素琴, 艾克然木·米吉提, 张雅林, 王敦. 2015. 苹果蠹蛾半人工饲料与饲养温度的优化. 植物保护学报, 42(1): 45-50.

甘恩宇, 李晓峰, 于欢, 吴正伟, 徐利, 张雅林, 王敦. 2011. 3 株苹果蠹蛾颗粒体病毒本土株的毒力测定与田间防效. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 39(10): 119-122, 133.

刘强, 刘小芸, 郑春寒, 吕婷婷, 项林平, 王敦. 2010. HearNPV 几丁质酶对 CypoGV 的协同增效作用. 林业实用技术, (10): 31.

吕婷婷, 徐兵强, 阿不都克尤木·卡德尔, 王敦. 2013. Bt-Cry1Ab 原核表达产物与苹果蠹蛾颗粒体病毒协同增效初探. 中国生物防治学报, 29(3): 469-472.

南宫自艳, 宋萍, 王永娟, 王勤英. 2014. 苹果蠹蛾生物防治技术的研究和应用进展. 中国生物防治学报, 30(2): 260-265.

努尔古丽·马坎, 岳朝阳, 克热曼, 张新平, 刘爱华, 阿里木·买买提, 焦淑萍. 2014. 苹果蠹蛾对新疆林果业发展影响的评估及风险管理, 42(6): 126-132.

申建茹, 刘万学, 万方浩, 张芬琴. 2012. 苹果蠹蛾颗粒体病毒 CpGV-CJ01 的分离和鉴定. 应用昆虫学报, 49(1): 96-103.

王兰, 冯宏祖, 郭文超, 张辉,杨力,许建军. 2011. 苹果蠹蛾消长动态及果园中赤眼蜂释放技术的研究. 新疆农业科学, 48(2): 261-265.

徐婧, 姜红霞, 阿丽亚, 郭静敏, 张润志. 2012. 甘肃、新疆、内蒙苹果蠹蛾成虫消长规律. 应用昆虫学报, 49(1): 89-95.

张润志, 王福祥, 张雅林, 陈汉杰, 罗进仓, 王勤英, 刘万学, 艾尼瓦尔·木沙, 蒲崇建, 等. 2012. 入侵生物苹果蠹蛾监测与防控技术研究——公益性行业(农业)科研专项(200903042)进展. 应用昆虫学报, 49(1): 37-42.

张学祖. 1957. 苹果蠹蛾(*Carpocapsa pomonella* L.)在我国的新发现. 昆虫学报, 7(4): 467-472.

周昭旭, 罗进仓, 陈明. 2008. 苹果蠹蛾的生物学特性及消长动态. 植物保护, 34(4): 111-114.

Abbott W S. 1987. A method of computing the effectiveness of an insecticide. *Journal of the American Mosquito Control Association*, 3: 302-303.

Arthurs S P, Lacey L A and Behle R W. 2006. Evaluation of spray-dried lignin-based formulations and adjuvants as solar protectants for the granulovirus of the codling moth, *Cydia pomonella* (L). *Journal of Invertebrate Pathology*, 93: 88-95.

Asano S. 2005. Ultraviolet protection of a granulovirus product using iron oxide. *Applied Entomology and Zoology*, 40: 359-364.

Berling M, Blachere-Lopez C, Soubabere O, Lery X, Bonhomme A, Sauphanor B and Lopez-Ferber M. 2009. *Cydia pomonella* granulovirus genotypes overcome virus resistance in the codling moth and improve virus efficiency by selection against resistant hosts. *Applied and Environmental Microbiolo-*

gy, 75: 925-930.

Dougherty E M, Guthrie K P and Shapiro M. 1996. Optical brighteners provide baculovirus activity enhancement and UV radiation protection. *Biological Control*, 7: 71-74.

Eberle K E, Sayed S, Rezapanah M, Shojai-Estabragh S and Jehle J A. 2009. Diversity and evolution of the *Cydia pomonella* granulovirus. *Journal of General Virology*, 90: 662-671.

Farrar J R R, Shapiro M and Javaid I. 2003. Photostabilized titanium dioxide and a fluorescent brightener as adjuvants for a nucleopolyhedrovirus. *Biocontrol*, 48: 543-560.

Garczynski S F, Unruh T R, Guédot C and Neven L G. 2011. Characterization of three transcripts encoding small heat shock proteins expressed in the codling moth, *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae). *Insect Science*, 18: 473-483.

Glen D M and Payne C C. 1984. Production and field evaluation of codling moth granulosis virus for control of *Cydia pomonella* in the United Kingdom. *Annals of Applied Biology*, 104: 87-98.

Huber J and Luedcke C. 1996. UV-Inactivation of baculoviruses: the bisegmented survival curve. *IOBC/WPRS Bull*, 19: 253-256.

Jaques R P. 1971. Tests on protectants for foliar deposits of a polyhedrosis virus. *Journal of Invertebrate Pathology*, 17: 9-16.

Lacey L A and Arthurs S P. 2005. New method for testing solar sensitivity of commercial formulations of the granulovirus of codling moth (*Cydia pomonella*, Tortricidae: Lepidoptera). *Journal of Invertebrate Pathology*, 90: 85-90.

Lacey L A, Unruh T R and Headrick H L. 2003. Interactions of two idiobiont parasitoids (Hymenoptera: Ichneumonidae) of codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) with the entomopathogenic nematode *Steinernema carpocapsae* (Rhabditida: Steinernematidae). *Journal of Invertebrate Pathology*, 83: 230-239.

Lawrence L, Donald T, Charles V and Steven A. 2008. Codling moth granulovirus: a comprehensive review. *Biocontrol Science and Technology*, 18: 639-663.

Liu X Y, Lei C F and Sun X L. 2013. Control efficacy of *Bacillus thuringiensis* and a new granulovirus isolate against *Cydia pomonella* in orchards. *Biocontrol Science and Technology*, 23: 691-700.

Stef R, Grozea I, Simeria G, Carabet A F, Levente M, Vîrteiu A N and Damianov S. 2010. The effectivenes of *Trichotim* in control of *Cydia pomonella* L. in western Romania. *Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences*, 75: 417-422.

Wearing C H, Attfield B A, Colhoun K and Marshal R R. 2011. Codling moth, *Cydia pomonella* L., colonisation of a newly-planted organic pome fruit orchard in Central Otago, New Zealand, and methods of pest management over the first ten years. *Crop Protection*, 40: 105-113.

Wu Z W, Fan J B, Yu H, Wang D and Zhang Y L. 2015. Ultraviolet protection of the *Cydia pomonella* granulovirus using zinc oxide and titanium dioxide. *Biocontrol Science and Technology*, 25: 97-107.

(责任编辑:郭莹)

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2015.04.011

不同剂型迷向剂处理对苹果蠹蛾控制效果比较

陈汉杰[1*], 曹川建[2], 雷银山[3], 唐 杰[2], 蒲振兴[3], 张金勇[1], 涂洪涛[1], 李晓龙[4]
[1]中国农业科学院郑州果树研究所,河南 郑州 450009; [2]宁夏森林病虫害防治检疫站,宁夏 银川 750002; [3]宁夏中卫市森林病虫害防治检疫站,宁夏 中卫 755000; [4]宁夏农林科学院种质资源研究所,宁夏 银川 750002

摘要:【背景】苹果蠹蛾是我国重要的检疫性害虫,目前从新疆迅速向东部扩散。苹果蠹蛾性信息素胶条迷向剂对防控苹果蠹蛾高效、安全,但成本较高。【方法】2013 年在宁夏中卫市常乐镇马路滩村果园使用 3 种不同剂型的迷向剂对苹果蠹蛾进行了防治试验,每个处理果园面积 3.3 hm^2,分别使用性诱剂处理后,用诱捕器监测处理后的诱蛾量,在生长期调查果实为害率,比较防治效果。【结果】通过整个生长季诱捕器监测,悬挂点以 900 个·hm^{-2}双层处理,胶条迷向剂在开花前处理 1 次,整个生长季处理区中心部位没有监测到苹果蠹蛾成虫;透明塑管迷向剂分别在开花前和 6 月底处理 2 次,整个生长季中心部位平均每个诱捕器诱到 3.3 头雄蛾;膏体迷向剂分别在开花前和 6 月底处理 2 次,整个生长季中心部位平均每个诱捕器诱到 12 头雄蛾。在 6 月下旬和果实采收前进行果实为害率调查,胶条迷向剂区平均蛀果率分别为 0 和 0.56%,透明塑管迷向剂区蛀果率分别为 0.89%和 1.38%,膏体迷向剂处理区蛀果率分别为 0.79%和 1.38%。常规农药防治区 2 个时期蛀果率分别为 1.44%和 3.13%。【结论与意义】综合考虑防治效果和使用成本,在虫口密度高、效益高的果园可以使用胶条迷向剂,膏体迷向剂和透明塑管迷向剂只有在虫口密度较低的情况下使用。

关键词: 苹果蠹蛾; 昆虫性诱剂; 迷向防治

Comparison of control efficiency of mating disruption by using different sex pheromone dispensers against codling moth (*Cydia pomonella*)

Han-jie CHEN[1*], Chuan-jian CAO[2], Yin-shan LEI[3], Jie TANG[2], Zhen-xing PU[3], Jin-yong ZHANG[1], Hong-tao TU[1], Xiao-long LI[4]
[1]*Zhengzhou Institute of Pomology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou, Henan* 450009, *China*; [2]*Ningxia Forestry Pest Control and Quarantine Station, Yinchuan, Ningxia* 750002, *China*; [3]*Zhongwei Forestry Pest Control and Quarantine Station, Zhongwei, Ningxia* 755000, *China*; [4]*Institute of Germplasm Resources, Ningxia, Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan, Ningxia* 750002, *China*

Abstract:【Background】Codling moth is an important introduced pest in China. It is rapidly spreading from Xinjiang to the eastern regions in recent years. Mating disruption can be an efficient, safe control measure for pest, but it is usually too expensive for farmers.【Method】The effectiveness of three types of dispensers — twisted ties, paste, and plastic tubes — were compared in an orchard located in Zhongwei, Ningxia Province, China, in 2013. The experiment included three plots (about 3.3 $hm^2 \cdot plot^{-1}$). The dispensers were hung in 2 heights at 900 points·hm^{-2}. One row of the dispensers were hung on the top the canopy, and the other row of dispensers were hung in the middle of the canopy in an alternating pattern.【Result】The results were monitored by sex pheromone traps and the damaged fruit rate in each of the assigned plots. During the growing seasons, no male moths were captured through the use of the twisted tie method. A larger number of male moths were caught in traps through paste and plastic tuber dispenser plots compared with the twisted ties plots. The damaged fruit rates were 0 and 0.56% in twisted ties plot at the end of June

收稿日期(Received): 2015-05-19 **接受日期(Accepted)**: 2015-06-17
基金项目: 现代苹果产业技术体系(CARS-28); 中国农业科学院科技创新工程(CAAS-ASTIP-2015-ZFRI)
作者简介: 陈汉杰, 男, 研究员。研究方向: 果树有害生物综合治理。
*通讯作者(Author for correspondence), E-mail: chenhanjie@caas.cn

and before harvesting respectively, damaged fruit rates were 0.89% and 1.38% in the paste plot, 0.79% and 1.38% in the plastic tuber plot respectively. The damaged fruit rates were 1.44% and 3.13% in the conventional pesticide control plot at the same time. 【Conclusion and significance】 If the pest population was high, or the products has high value, the twisted tie dispenser could be used. The paste and plastic tuber dispensers could be used only in the low pest population orchards.

Key words: *Cydia pomonella*; insect sex pheromone; mating disruption

苹果蠹蛾 *Cydia pomonella*(L.)属鳞翅目 Lepidoptera 卷蛾科 Tortricidae 小卷蛾亚科 Olethreutidae,俗称苹果小卷蛾,主要危害仁果类和核果类水果,寄主包括苹果、梨、杏、桃、山楂和板栗等,可严重降低果实品质并造成大量落果(蔡青年和张青文,2005)。该虫为我国重要检疫性害虫,除了日本、朝鲜半岛和我国大部分地区外,广泛分布于世界上苹果和梨产地(林伟等,1996; 全国苹果蠹蛾研究协作组,1994)。张学祖于 1953 年首次在我国新疆发现苹果蠹蛾,并于 1957 年在国内做了首次报道,是新疆自治区内危害最严重的一种果虫(张学祖,1957)。20 世纪 80 年代苹果蠹蛾随游客携带的果品传入甘肃省敦煌市(秦晓辉等,2006),然后疫区面积迅速扩大,截至 2009 年,该虫已从新疆扩散到甘肃省兰州市、内蒙古西部、宁夏回族自治区中卫市和黑龙江省牡丹江市等 5 省区局部区域,苹果蠹蛾疫情发生面积 32.96 万 hm^2(王春林和王福祥,2009)。随着各种贸易活动、果品调运、苗木种子调运、旅游等活动的频繁,极大增加了苹果蠹蛾传入苹果优势产区的风险,严重威胁我国水果生产及贸易安全(史惠玲等,2008)。

昆虫信息素是近年来发展起来的一种新技术,具有高效无毒、不伤害天敌、不污染环境等优点。该项技术在国外得到广泛应用,国内对这一新技术的研究和应用也很重视(翟小伟等,2009)。目前利用信息素防治苹果蠹蛾主要通过监测(阿地力·沙塔尔等,2011; 翟小伟等,2010a、2010b; 张涛等,2011; 张新平等,2011)、诱杀(Charmillot *et al.*, 2002; Ebbinghaus *et al.*,2001; Losel *et al.*,2000)和迷向(涂洪涛等,2010; Judd *et al.*, 1997; McDonough *et al.*, 1992; Pfeiffer *et al.*, 1993)。作者从 2009 年起,分别在甘肃、宁夏、黑龙江等地使用高密度胶条迷向剂进行了不同剂量、不同虫口密度下的防治试验,在部分新侵入虫口密度低的果园获得了铲除虫源的效果。几年来经过试验示范,果农普遍认识到迷向剂的防治效果良好,但使用成本高成为大面积推广的障碍。为降低防治成本,在 2013 年对不同剂型的迷向剂防治效果、防治成本进行了试验比较,结果报道如下。

1 材料与方法

1.1 材料

苹果蠹蛾信息素高密度胶条迷向剂有效成分含量 160 mg·根$^{-1}$,透明塑管迷向有效成分含量 80 mg·根$^{-1}$,膏体迷向剂有效成分含量 5%,均为市售产品(因比较不同公司产品效果,考虑对公司销售影响,在此未注明公司名称),监测诱捕器为三角形粘胶诱捕器,市售。

1.2 试验设计

1.2.1 试验果园 试验果园设在宁夏回族自治区中卫市常乐镇马路滩村果园,果园面积 41.3 hm^2,选择整齐方正的 10 hm^2 作为试验区,果园树龄 20 年生,品种为富士、金冠、红星和秦冠混合栽植,树冠高度平均 7 m 左右,果园管理一般,上一年苹果蠹蛾蛀果率 2%左右。

1.2.2 试验处理 将试验区域均等分 3 份作为处理区,每个处理区面积约 3.3 hm^2(165 m×200 m)。根据相关报道,当树体高大时,迷向剂采用双层处理会提高防治效果,每个处理均采用 1 行迷向剂挂在树冠顶部以下 0.5 m 左右,邻行迷向剂挂在树冠中部 3.5 m 枝条上的方式进行处理,悬挂 900 个·hm^{-2}。胶条和透明塑管迷向剂用细铁丝制成环形悬挂,膏体迷向剂由于难以直接涂抹在树冠顶部,采用装入塑料小笼后再悬挂的方式,每点 1 g。胶条迷向剂在开花初期悬挂 1 次,透明塑管和膏体迷向剂分别在开花初期、6 月底悬挂 2 次。在悬挂迷向剂的同时,在处理区不同部位悬挂三角形粘胶监测诱捕器,每周检查 1 次诱蛾情况,间隔 1 个月更换粘板和诱芯。统计监测结果以处理区中部 3 个监测诱捕器诱蛾量为比较效果数据、边缘监测数据为参考。

在相隔 2000 m 外果园设置对照区,对照区的品种为富士、金冠、红星和秦冠混合栽植,树冠高度平均 7 m 左右,面积大约 5 hm^2,喷药及管理措施与处理区相同,设置 3 个监测诱捕器定期监测。

1.3　防治效果评价方法

1.3.1　诱蛾量监测　每个处理在中心区悬挂 3 个三角式诱捕器监测田间的蛾量,每隔 7 d 调查 1 次,大约每月更换 1 次诱芯和粘板。统计平均每周单个诱捕器的诱蛾量,比较不同处理区诱到雄蛾数量变化,并统计处理期间平均每个监测诱捕器诱到的雄蛾数量。

1.3.2　蛀果率调查　在 6 月下旬调查果实受害情况,调查品种为苹果蠹蛾敏感品种金冠,每个处理区在中心部位选取 4 个点,每个点选择 2~4 株树,分别在树冠上部和下部共调查 700~800 个果实,检查苹果蠹蛾蛀果个数,调查后进行迷向剂 2 次处理,在果实成熟期再次调查蛀果率,每次每个处理调查金冠和富士 2 个品种,每个品种树冠上下部位分别调查果实 800 个,计算防治效果,用方差分析及邓肯氏新复全距法进行不同处理防治效果差异比较。

2　结果与分析

2.1　诱蛾量监测结果

不同迷向剂剂型处理区诱蛾量结果见图 1(因高密度胶条迷向剂表现出很好的防治效果,整个生长季没有诱到苹果蠹蛾成虫,数据均为 0,故图中没有体现)。在透明塑管和膏体迷向剂处理区,在越冬代成虫发生期诱到一定数量成虫,越冬代成虫有 2 个发生高峰期,分别在 4 月下旬和 5 月中旬。在 7 月上旬,迷向剂处理区出现第 1 代成虫高峰期,随后没有再监测到成虫。在 8 月上中旬和 9 月中下旬,在常规防治区有 2 个成虫发生高峰。分析认为在宁夏中卫果区苹果蠹蛾生长季有 3 个成虫发生高峰,即苹果蠹蛾在该区域可以发生 3 代。

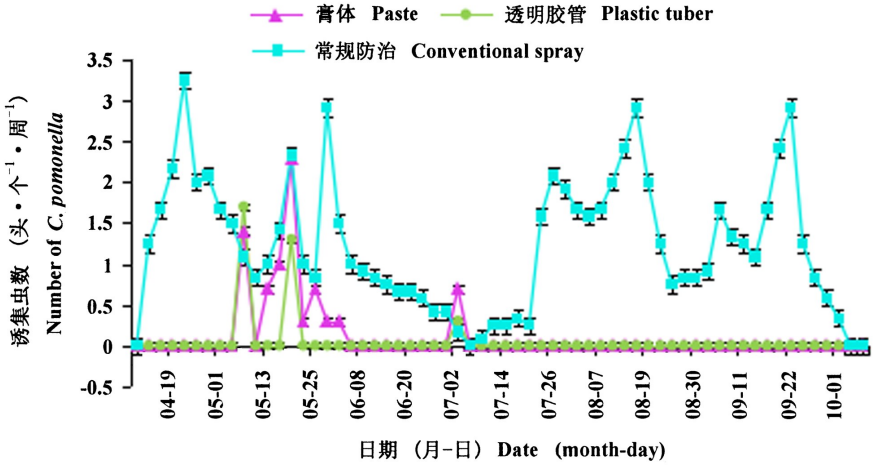

图 1　迷向剂处理后性诱剂监测诱捕器诱蛾情况(2013,宁夏中卫)

Fig.1　Number of *Cydia pomonella* males caught in traps in the control and the sex pheromones dispensers treatments (2013, Zhongwei, Ningxia)

2.2　蛀果率调查结果

在 6 月下旬调查第 1 代幼虫蛀果率(表 1)。以苹果蠹蛾敏感的金冠品种为调查对象,每个处理分别在树冠上部和下部调查 700 个果实。胶条迷向剂处理区在树冠上、下部均未发现蛀果为害,透明塑管和膏体迷向剂区树冠上部蛀果率均为 1.57%,树冠下部仅在透明塑管处理区发现 1 个蛀果,膏体迷向剂区未查到蛀果,常规药剂防治区树冠上部蛀果率 2.88%,下部 0,说明在树冠高大的果园,苹果蠹蛾主要在树冠上部为害。

在 9 月 4 日果实采收前调查(表 2),各个处理区蛀果率均有上升,高密度胶条迷向区树冠上部平均蛀果率 1.13%,膏体迷向剂区蛀果率 2.51%,透明胶管迷向剂区蛀果率 2.19%,常规防治区蛀果率 5.01%,树冠下部为害率普遍较低,3 个处理区的蛀果率分别是 0、0.26% 和 0.57%,常规防治区蛀果率 1.25%。这说明在树体高大的果园,经过双层迷向剂处理,获得了良好效果。而透明胶管迷向剂和膏体迷向剂,在处理区中部都监测到成虫,在 6 月下旬调查蛀果,各个区域在树冠下部基本没有发现蛀果,而在树冠上部,都出现一定的苹果蠹蛾为害,和常规防治区对比,为害率下降 45%左右。

表 1 3 种迷向剂处理第 1 代不同树冠部位蛀果率比较(2013,宁夏中卫)

Table 1 Comparison of the rates of damage on the fruits of the first generation in the three different dispenser treatments and the conventional plot (2013, Zhongwei, Ningxia)

剂型 Dispensers	树冠上部 Upper canopy			树冠下部 Lower canopy		
	调查果数(个) Fruit number	蛀果数(个) Bored number	蛀果率 Damaged rate (%)	调查果数(个) Fruit number	蛀果数(个) Bored number	蛀果率 Damaged rate (%)
高密度胶条 Twisted ties	700	0	0.00a	700	0	0.00a
膏体迷向剂 Paste	700	11	1.57ba	700	1	0.14a
透明胶管 Plastic tuber	700	11	1.57b	700	0	0.00a
常规防治区 Conventional spray	800	23	2.88c	800	0	0.00a

表中数据为平均值。同列数据后附不同字母者表示在 0.05 水平上差异显著。

The data in the table represent means. Different letters in the same column mean significant difference among treatments at 0.05 level.

表 2 3 种迷向剂剂型处理采收前不同品种蛀果比较(2013,宁夏中卫)

Table 2 Comparison of the amount of damage on fruits before harvesting in the three different dispenser treatments and the conventional plot (2013, Zhongwei, Ningxia)

剂型 Dispensers	金冠 Golden delicious				红富士 Fuji				合计(个) Total number	平均蛀果率 Average rate (%)
	树冠上部 Upper		树冠下部 Lower		树冠上部 Upper		树冠下部 Lower			
	果数(个) Fruit number	虫果率 Damage rate (%)	果数(个) Fruit number	虫果率 Damage rate (%)	果数(个) Fruit number	虫果率 Damage rate (%)	果数(个) Fruit number	虫果率 Damage rate (%)		
高密度胶条 Twisted ties	800	1.25	800	0.00	800	1.00	800	0.00	3200	0.56a
膏体迷向剂 Paste	800	2.13	800	0.38	800	2.88	800	0.13	3200	1.38b
透明胶管 Plastic tuber	800	1.38	800	0.38	800	3.00	800	0.75	3200	1.38b
常规防治区 Conventional spray	800	5.63	800	1.25	800	4.38	800	1.25	3200	3.125c

表中数据为平均值。同列数据后附不同字母者表示在 0.05 水平上差异显著。

The data in the table represent means. Different letters in the same column mean significant difference among treatments at 0.05 level.

3 讨论

苹果蠹蛾迷向剂在国外得到普遍应用,但在我国使用昆虫性信息素技术还处于试验、示范推广阶段。由于性信息素防治害虫的专一性,往往在使用一种害虫迷向剂的情况下,还需要喷洒农药防治其他害虫,增加了防治害虫成本。如何降低使用成本,是推广该项新技术的关键。本试验中使用的胶条迷向剂折合 3000 元 · hm^{-2}左右,膏体迷向剂成本在 1500 元 · hm^{-2}左右,透明塑管迷向剂折合 1200 元 · hm^{-2}左右,从防治效果看,不同的剂型防治效果存在差异,高密度胶条迷向剂效果好,但防治成本高,透明塑管和膏体迷向剂效果差一些,但成本较低。这种效果差异受到多种因素影响。

性诱剂有效成分含量高低和释放速率是影响效果的主要因素。此外,防治效果的好坏和果园虫口密度关系密切,当虫口密度低的情况下,迷向剂会表现出良好的效果,当虫口密度高时,迷向剂效果相应会下降。同样的迷向剂田间使用时的使用方式对效果影响也很大。李晓龙等(2013)在试验梨小食心虫迷向剂时,对比不同悬挂高度的效果差异,当树冠高度在 5 m 左右时,迷向剂悬挂在 3.5 m 时比挂在 2 m 处效果明显提高。当树冠高度在 5 m 以上时,分成树冠中部和上部 2 层悬挂,可进一步提高效果。从本试验蛀果率调查结果看,苹果蠹蛾蛀果多数在树冠上部,下部为害率较低,分析原因,一方面由于果农喷洒药剂,下部容易着药,上部药剂难以均匀覆盖,导致树冠上下部差异,另外,从苹果蠹蛾活动规律看,在生长季苹果蠹蛾成虫喜欢在树冠上部活动,产卵部位也多在树冠上部,因此,不但迷向剂要悬挂在树冠上部,喷药时也要特别注意树冠上部喷洒均匀才能获得良好的防治效果。基于此种情况,生产中可以根据防治需要选择不同的产品,在虫口密度高、对防治效果要求高的果园,可以选用胶条迷向剂,膏体迷向剂和塑管迷向剂只有在虫口密度较低的情况下使用,或者配合使用农药将虫口密度压低才能发挥迷向剂的作用。

参考文献

阿地力·沙塔尔, 陶万强, 张新平, 岳朝阳, 马四国, 牛天翔, 阿马努拉. 2011. 5 种引诱剂田间诱捕苹果蠹蛾效果比较. 西北农业学报, 20(3): 203-206.

蔡青年, 张青文. 2005. 苹果蠹蛾//万方浩, 郑小波, 郭建英. 重要农林外来入侵物种的生物学与控制. 北京: 科学出版社, 363-375

李晓龙, 夏国宁, 何建川, 贾永华, 陈汉杰, 李锋, 许泽华, 刘晓丽, 王春良. 2013. 复合式膏体迷向剂对梨小、桃小食心虫的防控效果. 植物保护, 39(6): 147-152.

林伟, 林长军, 庞金, 1996. 生态因子在苹果蠹蛾地理分布中的作用. 植物检疫, 10(1): 1-7.

秦晓辉, 马德成, 张煜, 李广华, 王培. 2006. 苹果蠹蛾在我国西北发生为害情况. 植物检疫, 20(2): 95-96.

全国苹果蠹蛾研究协作组. 1994. 查清我国东部地区无苹果蠹蛾发生. 植物保护学报, 21(2): 169-175.

史惠玲, 王培新, 李鹏飞, 任引朝. 2008. 苹果蠹蛾入侵陕西的风险分析. 陕西林业科技, (4): 76-80.

王春林, 王福祥. 2009. 苹果蠹蛾疫情防控阻截动态及思考. 植物保护, 35(2): 102-103.

魏玉红, 罗进仓, 周昭旭, 刘月英. 2010. 信息素迷向技术防治苹果蠹蛾试验初报. 中国果树, (3): 48-50.

涂洪涛, 张金勇, 罗进仓, 王春良, 宝山, 刘延杰, 陈汉杰. 2012. 苹果蠹蛾性信息素缓释剂的控害效果. 应用昆虫学报, 49(1): 109-113.

翟小伟, 刘万学, 张桂芬, 万方浩, 徐洪富, 蒲崇建. 2009. 苹果蠹蛾性信息素的研究和应用进展. 昆虫学报, 52(8): 907-916.

翟小伟, 刘万学, 张桂芬, 万方浩, 徐洪富. 2010a. 苹果蠹蛾不同防治方法的控害效应比较. 植物保护学报, 37(6): 547-551.

翟小伟, 刘万学, 张桂芬, 万方浩, 徐洪富, 蒲崇建. 2010b. 苹果蠹蛾性信息素诱捕器田间诱捕效应影响因子. 应用生态学报, 21(3): 801-806.

张涛, 赵江华, 冯俊涛, 张兴. 2011. 苹果蠹蛾性信息素田间应用技术研究. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 39(5): 167-171.

张新平, 岳朝阳, 刘爱华, 杨明禄, 盛承发, 阿里木, 张静文. 2011. 不同诱捕方法对苹果蠹蛾和梨小食心虫的诱捕效果. 新疆农业科学, 48(2): 306-310.

张学祖. 1957. 苹果蠹蛾(*Cydia pomonella* L.)在我国的新发现. 昆虫学报, 7(4): 467-472.

Charmillot P J, Pasquier D and Hofer D. 2002. Control of codling moth *Cydia pomonella* by autosterilisation. *IOBC/wprs Bulletin*, 25: 1-4.

Ebbinghaus D, Lösel P M, Romeis J, Cianciulli-Teller M G, Leusch H, Olszak R, Pluciennik1 Z and Scherkenbeck J. 2001. Appeal: efficacy and mode of action of attract and kill for codling moth control. *IOBC/wprs Bulletin*, 24: 95-99.

Losel P M, Penners G, Potting R P J, Ebbinghaus D, Elbert A and Scherkenbeck J. 2000. Laboratory and field experiments towards the development of an attract and kill strategy for the control of the codling moth, *Cydia pomonella*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 95: 39-46.

Judd G J R, Gardiner M G T and Thomson D R, 1997. Control of codling moth in organically-managed apple orchards by combining pheromone-mediated mating disruption, post-harvest fruit removal and treebanding. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 83: 137-146.

McDonough L M, Aller W C and Knight A L. 1992. Performance characteristics of a commercial controlled release dispenser of sex pheromone for control of codling moth (*Cydia pomonella*) by mating disruption. *Journal of Chemical Ecology*, 18: 2177-2189.

Pfeiffer D G, Kaakeh W, Killian J C, Lachance M W and Kirsch P. 1993. Mating disruption for control of damage by codling moth in Virginia apple orchards. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 67: 57-64.

(责任编辑:郭莹)

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2015.04.012

苹果蠹蛾性信息素对梨小食心虫的诱集和迷向作用

朱虹昱[1,2,3], 徐 婧[1], 张润志[1,2*]

[1]中国科学院动物研究所动物进化与系统学院重点实验室,北京 100101; [2]中国科学院动物研究所农业虫鼠害综合治理研究国家重点实验室,北京 100101; [3]中国科学院大学,北京 100049

摘要:【背景】在中国,苹果蠹蛾和梨小食心虫经常混合发生,但有关苹果蠹蛾迷向设置对梨小食心虫影响的研究却较少。【方法】在苹果蠹蛾和梨小食心虫同时发生的果园中设置 2 种迷向发散器,使用三角胶粘式信息素诱捕器监测 2 种昆虫的发生动态,以观察苹果蠹蛾性信息素是否会对梨小食心虫产生诱捕效果或类似的迷向作用。【结果】无论是否设置性信息素迷向发散器,苹果蠹蛾性信息素诱捕器均能诱集到梨小食心虫的雄性成虫。在 2009~2011 年的田间试验中,苹果蠹蛾性信息素诱捕器对梨小食心虫雄性成虫的诱集量最多能达梨小食心虫性信息素诱捕器的 1.1 倍,占 2 种诱捕器诱集总量的 51.7%。在设置性信息素迷向发散器的果园中,梨小食心虫雄性成虫的诱集量受苹果蠹蛾性信息素迷向发散器的影响而下降;相比无迷向设置的对照果园,同时设置 2 种昆虫迷向发散器的果园中,苹果蠹蛾性信息素诱捕器内的梨小食心虫雄性成虫诱集总量最高下降了 90.9%,梨小食心虫自身性信息素诱捕器内的梨小食心虫雄性成虫诱集总量最高下降了 92.4%;在仅设置苹果蠹蛾性信息素迷向发散器的果园中,苹果蠹蛾性信息素诱捕器内的梨小食心虫雄性成虫诱集总量最高下降了 87.5%,梨小食心虫性信息素诱捕器内的梨小食心虫雄性成虫诱集总量最高下降了 60.6%。【结论与意义】苹果蠹蛾迷向发散器对于梨小食心虫雄性成虫存在"迷向"作用。在 2 种害虫同时发生的情况下使用 2 种迷向发散器,对于 2 种害虫能够达到比较好的防治效果。

关键词: 梨小食心虫; 苹果蠹蛾; 性信息素; 诱捕; 迷向

Mating disrupting and trapping effects of the codling moth sex pheromone on oriental fruit moth, *Grapholita molesta*

Hong-yu ZHU[1,2,3], Jing XU[1], Run-zhi ZHANG[1,2*]

[1]*Key Laboratory of Zoological Systematics and Evolution, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*; [2]*State Key Laboratory of Integrated Pest Management of Pest Insects and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*; [3]*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract:【Background】In China, the oriental fruit moth (OFM), *Grapholita molesta* (Busck) and the codling moth (CM), *Cydia pomonella* (L.) often occur in orchards simultaneously. However, the impacts of CM sex pheromone mating disruption dispensers on trapping OFM which infests at the same time have not been observed.【Method】In two infested orchards, mating disruption for CM and OFM were performed, while sticky delta traps loaded with both sex pheromones were deployed to observe whether there were trappings and similar "mating disruption" effects of CM sex pheromone onto OFM male adults.【Result】The CM sex pheromone traps attracted male OFM adults, irrespective of the type of dispensers. In field trials between 2009 and 2011, CM traps caught as many male OFM as were lured by its own pheromone. Within orchards applied CM and OFM dispensers, lured OFM decreased by the performance of CM dispensers. OFM lured by CM traps mostly reduced by 90.9%, and OFM lured by OFM traps mostly reduced by 92.4%. Within orchards only applied CM dispensers, OFM lured by CM traps mostly reduced by 87.5%, and OFM lured by its own traps mostly reduced by 60.6%.【Conclusion and significance】CM pheromone dispensers also have a "mating disruption effect" on OFM. Applying both dispensers within infested orchards could improve the management of both pests.

Key words: oriental fruit moth; codling moth; sex pheromone; trapping; mating disruption

收稿日期(Received): 2015-06-08 **接受日期(Accepted)**: 2015-11-02

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(200903042)

作者简介: 朱虹昱, 男, 博士。研究方向: 苹果蠹蛾监测与防控技术。E-mail: 47481331@qq.com

*通讯作者(Author for correspondence), E-mail: zhangrz@ioz.ac.cn

梨小食心虫 *Grapholita molesta* (Busck)原产于我国西北部,但目前已和苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* (L.)一样成为世界性分布且同时危害核果和梨果类果实的害虫(Rice & Kirsch,1990; Rothschild & Vickers,1991)。这 2 种昆虫曾被归为同一属(*Grapholita* Treitschke,1829),目前均归属于卷蛾科 Tortricidae 新小卷蛾亚科 Olethreutinae 小食心虫族 Grapholitini,其进化关系非常接近,寄主非常类似(张学祖,1973; Geier,1963; Rothschild & Vickers, 1991; Wearing & McLaren,2001)。

以性信息素为媒介的监测和防治手段,如诱捕和迷向等,在蛾类害虫综合治理(IPM)中已得到广泛应用(Witzgall *et al.*,2010)。Riedl *et al.*(1990)报道,在桃园和苹果园中添加了苹果蠹蛾性信息素的梨小食心虫诱捕器中的梨小食心虫雄性成虫诱捕量分别是单独梨小诱芯诱捕数量的 1.9 和 7.2 倍。Allred (1995)通过田间试验发现,在梨小食心虫信息素中添加人工合成的苹果蠹蛾信息素后,梨小食心虫雄性成虫诱集量显著高于其他处理;苹果蠹蛾雌性成虫的存在也能提高梨小食心虫的诱集量,但效果不及添加苹果蠹蛾性信息素。风洞试验结果表明,添加苹果蠹蛾合成性信息素的梨小食心虫信息素能提高梨小食心虫振翅(Wing fanning)、飞行(Flight)以及直接接触(Contact)等交配行为反应成虫的数量,且添加较低剂量效果更显著(Allred,1995)。Evenden & McClaughlin (2005)发现,混合信息素成分能够同时诱集苹果蠹蛾和梨小食心虫,增加苹果蠹蛾诱集量但降低梨小食心虫的诱集量;同时,混合信息素成分能够增加梨小食心虫的信息素接触行为反应比例。

多年来,使用迷向方法针对梨小食心虫进行的防治研究取得了较好的效果(Cardé *et al.*,1977; Il′ichev *et al.*,2006、2007; Vickers *et al.*,1985),但有关苹果蠹蛾性信息素对于梨小食心虫诱捕量影响的研究较少。为此,本研究主要调查在设置 2 种昆虫迷向发散器的果园中 2 种诱捕器对梨小食心虫的诱捕数量,并探讨迷向设置对于防治效果的具体影响。

1　材料与方法

1.1　试验时间与地点

试验于 2009~2011 年进行,试验地点位于新疆维吾尔自治区阿克苏市、甘肃省张掖市和宁夏回族自治区中卫市,共计 18 个处理区域(新疆 13 个、甘肃 3 个、宁夏 2 个;表 1~2)。其中包括 5 个设置对照的迷向处理组(表 1),剩余则为监测梨小食心虫诱捕效果的处理(仅 2009 年;表 2)。

表 1　迷向及诱捕器设置情况

Table 1　Mating disruption (MD) and traps set-ups for trials

年份 Year	地点 Location	处理组 Group	目标生物 Target species	果园编号 Orchard	迷向/对照 MD/CK	面积 Area (hm^2)	发散器数量(个·hm^{-2}) Dispensers per hectare	诱捕器数量(个)* Number of traps
2009	新疆阿克苏	1	CM+OFM	CL	迷向 MD1	0.64	380	12/9
	Akesu, XJ			LG1	对照 CK	0.67	–	20/20
		2	CM+OFM	AB	迷向 MD2	0.67	270	12/10
				WD	对照 CK	0.60	–	10/10
		3	CM+OFM	TG1	迷向 MD3	1.33	250	6/6
				TG1C	对照 CK	0.07	–	5/5
2010	甘肃张掖	4	CM	JGM1	迷向 MD4	1.27	647	15/15
	Zhangye, GS		CM+OFM	JGM2	迷向 MD5	2.11	612	22/22
				JGC	对照 CK	0.36	–	3/3
2011	宁夏中卫	5	CM	SCM	迷向 MD6	2.67	602	45/45
	Zhongwei, NX			SCC	对照 CK	1.00	–	8/8

CM 指苹果蠹蛾,OFM 指梨小食心虫。* 该列中"/"前、后分别为苹果蠹蛾性信息素诱捕器、梨小食心虫性信息素诱捕器的布设数量。

CM is *Cydia pomonella*, OFM is *Grapholita molesta*. * The number of laying traps before "/" after respectively for codling moth sex pheromone traps and pear moth sex pheromone trap.

1.2　迷向设置

田间迷向处理使用了 4 种迷向发散器。来自北京中捷四方生物科技有限公司的 3 种发散器分别针对苹果蠹蛾、梨小食心虫以及同时针对该 2 种昆虫;来自深圳 Bioglobal 公司的一种发散器(Isomate-C)则

单独针对苹果蠹蛾。前 3 种迷向发散器于 2009～2011 年应用于新疆、甘肃以及宁夏的试验果园,最后一种则仅于 2010 年应用于甘肃的试验果园。

表 2 2009 年梨小食心虫诱集监测区域设置(新疆阿克苏)

Table 2 Monitoring trapping OFM set-ups in 2009 (Akesu, XJ)

果园编号 Orchard	面积 Area (hm^2)	诱捕器数量(个) Number of traps	
		苹果蠹蛾 CM	梨小食心虫 OFM
LG2	0.47	10	12
GM	1.73	3	3
YL	1.47	44	44
TG2	0.53	4	4
SF	2.67	27	27
SL	0.60	16	16
HQ	1.33	26	26

1.3 诱捕装置

性信息素诱捕器的作用有 2 个方面:(1)监测梨小食心虫雄性成虫的发生动态;(2)验证迷向处理对于梨小食心虫是否存在效果。

在所有区域内按照 15 个 · hm^{-2}的密度悬挂载有 2 种昆虫性信息素诱芯的三角胶粘式诱捕器(北京中捷四方生物科技有限公司)。诱捕器中设置的中空反口橡皮塞诱芯由中国科学院动物研究所研制生产(国家专利公开号:CN201217257),每个诱芯含性信息素 1 mg(美国 BRI 公司 Bedoukian Research Inc.)。每周定期调查雄性成虫诱捕数量,并定期维护。

1.4 数据统计分析

根据诱捕数据计算单个诱捕器在整个生长季内的平均净诱捕量。采用 SPSS 19.0 统计分析软件中的独立样本 t 检验(Independent-sample t-test)及单因素方差分析(One-way ANOVA)比较分析各处理的平均净诱捕量,确定处理之间的差异显著性。使用邓肯氏新复极差法在显著性水平为 0.05 时进行分组比较检验。

2 结果与分析

2.1 诱捕效果

在所有试验区域中,苹果蠹蛾性信息素诱捕器平均诱集量占 2 种诱捕器总诱集量的 16.3%,范围为 0.2%～51.7%。2009 年,苹果蠹蛾性信息素诱捕器中梨小食心虫的平均诱集比例为 2.2%,范围为 0.2%～5.9%;2010 和 2011 年,平均诱集比例分别为 4.7% 和 44.0%,最高诱集比例分别达 10.4% 和 51.7%。在迷向区域中,苹果蠹蛾性信息素诱捕器中梨小食心虫的平均诱集比例为 8.9%,范围为 0.4%～36.4%;在无迷向区域中,平均诱集比例为 7.8%(表 3)。

梨小食心虫自身性信息素诱捕器内诱集到的成虫数量占 2 种诱捕器总诱集量的平均比例为 89.1%,最高甚至达到 99.8%(表 3)。

表 3 苹果蠹蛾信息素诱捕器和梨小食心虫信息素诱捕器对梨小食心虫的诱集数量

Table 3 The attraction of male adults of the oriental fruit moth *G. molesta* to pheromones of the codling moth vs. the oriental fruit moth

处理 Treatment	年份 Year	果园编号 Orchard	平均诱捕量(头) Average number of trapped OFM male adults	
			CM 诱捕器 In CM traps	OFM 诱捕器 In OFM traps
诱捕 Trapping	2009	LG2	0.4±0.1a	7.8±1.7a
		GM	0.2±0.1a	107.3±16.6d
		YL	0.1±0.0a	4.0±1.4a
		TG2	2.8±1.3c	45.6±6.4bc
		SF	0.1±0.0a	5.4±0.7a
		SL	0.3±0.2a	13.0±1.9a
		HQ	0.1±0.0a	9.9±1.5a
迷向 MD1	2009	CL	0.0±0.0a	2.1±0.4a
对照 CK		LG1	0.2±0.1a	9.8±1.6a
迷向 MD2		AB	0.0±0.0a	0.5±0.1a
对照 CK		WD	0.0±0.0a	6.9±1.3a
迷向 MD3		TG1	1.1±1.1ab	23.0±21.2ab
对照 CK		TG1C	1.0±0.4ab	55.2±10.1c
迷向 MD4	2010	JGM1	0.0±0.0a	2.3±0.3a
迷向 MD5		JGM2	0.0±0.0a	0.2±0.1a
对照 CK		JGC	0.1±0.1a	2.2±0.3a
迷向 MD6	2011	SCM	0.4±0.1a	0.9±0.2a
对照 CK		SCC	2.0±0.4ab	2.6±0.4a

同列数据后附不同字母者表示经邓肯氏新复极差法分析在 0.05水平上差异显著。

Numbers with different letters indicate significatn differences at $p<0.05$ level by Duncan's multiple range test.

2.2 迷向对诱捕量的影响

2 种昆虫性信息素诱捕器内梨小食心虫雄性成虫的诱集数量会随迷向设置而降低(表 3、图 1)。在 6 个迷向区域中,苹果蠹蛾性信息素诱捕器内梨小食心虫的诱集数量最高降低了 90.9%(2009 MD1; $t=-2.782$, $P<0.01$)。2010 年 2 个迷向区域的梨小食心虫诱集数量与对照区相比分别降低了 87.5% 和 68.8%($t_1=-1.317$, $P_1=0.195$; $t_2=-0.990$, $P_2=0.328$)。2011 年迷向区域中的梨小食心虫诱集数量与对照区相比降低了 78.9%($t=-2.109$, $P=0.042<0.05$)。

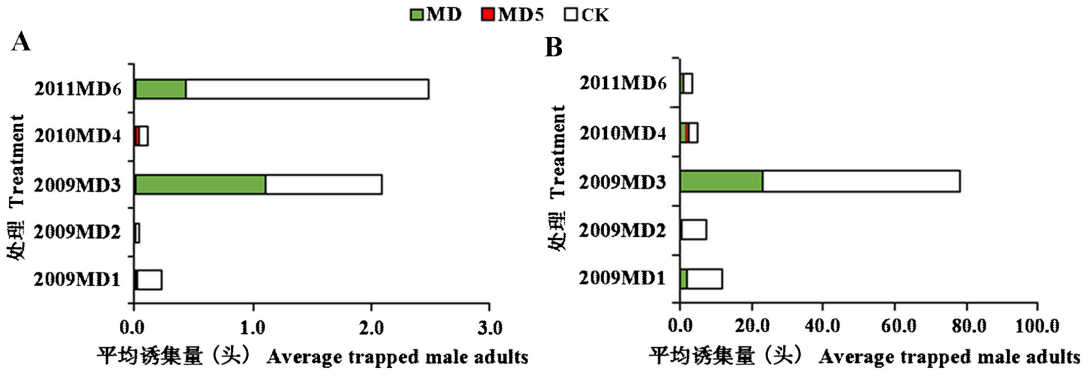

图 1　迷向与对照周平均梨小食心虫诱集量

Fig.1　Average weekly lured OFM with or without MD dispensers treatments

A:CM 诱捕器;B:OFM 诱捕器。

A: CM traps; B: OFM traps.

在梨小食心虫性信息素诱捕器内,梨小食心虫雄性成虫的诱集数量由于迷向最高降低了 92.4%(2009 MD2; $t=-4.864$, $P<0.01$)。2011 年,苹果蠹蛾单独性信息素迷向区域内梨小食心虫诱集数量与对照区相比降低了 60.6%($t=-1.572$, $P=0.124$)(表 3、图 1)。

2.3　总体诱捕量比较

将全部区域 2 种性信息素诱捕器的梨小食心虫诱集数据进行总体 ANOVA 比较,可以看出:(1)苹果蠹蛾性信息素诱捕器中,大多数区域内梨小食心虫的诱集数量都相似;(2)梨小食心虫性信息素诱捕器内,最高成虫诱集量发生在无迷向区域中,迷向及对照区域仅有一组成虫诱集量显著高于其他无迷向区域(表 3)。不同诱捕器间的独立样本 t 检验结果表明,在大多数处理区域内,2 种诱捕器诱集到的梨小食心虫数量有明显差异(表 4)。

表 4　2 种诱捕器内梨小食心虫诱集数量的 t 检验结果

Table 4　t test results of number of lured OFM in CM and OFM traps

年份 Year	果园编号 Orchard	t 值 t value	p 值(双尾) p-value (2-tails)	年份 Year	果园编号 Orchard	t 值 t value	p 值(双尾) p-value (2-tails)
2009	CL	−5.075	<0.001	2009	SF	−7.231	<0.001
	LG1	−5.870	<0.001		SL	−5.254	<0.001
	LG2	−4.322	<0.001		HQ	−5.410	<0.001
	GM	−6.465	<0.001	2010	JGM1	−7.132	<0.001
	YL	−2.490	0.017		JGM2	−1.601	0.117
	AB	−3.619	0.001		JGC	−6.195	<0.001
	WD	−5.269	<0.001	2011	SCM	−0.925	0.361
	TG1	−1.030	0.316		SCC	0.133	0.895
	TG1C	−5.122	<0.001				
	TG2	−5.876	<0.001				

3　讨论

3.1　结果说明

2009 年迷向设置区域 TG1 的苹果蠹蛾性信息素诱捕器内梨小食心虫诱捕量高于对照区域(TG1C)。其原因可能是该对照区本身不规则,是围绕着 TG1 果园外围分布的长条形区域。由于迷向的“边界效应”,在该区域中布设的 2 种性信息素诱捕器会诱集到更多的梨小食心虫。

2010 年苹果蠹蛾性信息素单独迷向区域(JGM1)内梨小食心虫诱捕器的梨小食心虫诱捕量与对照区(JGC)相似($t=0.210$, $P=0.834$)。其原因在于该区域仅设置了苹果蠹蛾的迷向剂而未设置梨小食心虫的迷向剂。

另外,试验中观察到了梨小食心虫性信息素诱捕器内诱集到苹果蠹蛾成虫的现象,但数量仅有 1 头(SCM)。这说明梨小食心虫性信息素成分对于苹果蠹蛾雄性成虫没有反向引诱作用,同时确定了试验设置中不存在剂型之间的污染对结果的干扰。

3.2 迷向设置前后的诱集数量变化

所有的迷向处理均进行了 2 次,以控制中后期的蛀果危害。在第 1 次迷向设置之后梨小食心虫雄性成虫虫口数量显著下降。但如果果园本身虫口密度较高,再加上生长季中后期的自然增高,那么配合其他防治方法进行压制是必要的,这一观点也被 Cardé & Minks (1995)所确认。

3.3 "异种"迷向的可能原因

Cardé & Minks (1995)指出,迷向的机理可能包括适应驯化、竞争吸引以及气味伪装(掩盖)等几个类型,且该虫在接触其自身信息素气味的过程中可能已发生了适应和驯化。Miller *et al.*(2010)证明了苹果蠹蛾迷向的完整过程包括性信息素迷向制剂的竞争结合和对于雄性成虫的失活,并从信号感受相关信号通路以及酶的相互作用方面进行了确认。Baker & Cardé (1979)曾认为,梨小食心虫是无法被高剂量的信息素所吸引的 2 种蛾类之一。Stelinski *et al.*(2005)和 Miller *et al.*(2006)猜测,梨小食心虫迷向并非由竞争吸引所导致。Reinke *et al.*(2013)通过试验确认了梨小食心虫在高释放量的发散器设置下,迷向机理并非竞争吸引。

苹果蠹蛾和梨小食心虫 2 种害虫信息素的主要成分结构极其相似,主链碳原子数均为 12 个,均属长链烷烃衍生物类,是结构较为简单的昆虫信息素类型。苹果蠹蛾信息素为共轭二烯醇,而梨小食心虫信息素为单烯醇乙酸酯和单烯醇等,两者最主要成分仅有一对共价双键和衍生化合物的末端基团存在差别(Cardé *et al.*,1979; McDonough & Moffitt,1974; Roelofs & Comeau,1969; Roelofs *et al.*,1971)。很多研究证实,苹果蠹蛾次要性信息素成分十二醇的微量添加能造成其较为明显的诱捕效果差异(Einhorn *et al.*,1984、1986; El-Sayed *et al.*,1999; Witzgall *et al.*,2001)。因此,包括十二醇在内的多个在 2 个物种间共享的次要信息素成分对于梨小食心虫的诱集效果可能有着重要的影响,这也是在两者共同危害的果园中同时进行迷向处理时很可能发生的情况。

Baker & Cardé (1979)曾经通过试验得到,梨小食心虫 3 种主要信息素成分 Z-8-dodecenyl acetate、E-8-dodecenyl acetate 和 Z-8-dodecenyl alcohol 同时存在的情况下,其成虫的行为反应最为强烈,高于任何 2 种成分的组合和单独的某种成分。他们指出,如果要达到最好的梨小食心虫迷向效果,那么仅仅使用标准浓度的高纯度合成信息素是不够的,因为某一种组分含量的不同能够明显影响雄性成虫的行为反应。Z-8-dodecenyl alcohol 作为商用梨小食心虫迷向制剂增效的重要添加成分(Charlton & Cardé,1981),在高剂量的条件下对于梨小食心虫雄性成虫反而存在诱集抑制作用(Han *et al.*,2001; Riedl *et al.*,1990; Roelofs & Cardé,1974; Roelofs *et al.*,1973)。

Allred (1995)研究表明,添加苹果蠹蛾性信息素主成分 E,E-8,10-dodecadien-1-ol 的梨小食心虫信息素对于梨小食心虫的触角电位反应明显不同于单独使用其自身性信息素。这说明梨小食心虫诱集量升高的原因可能在于其信号感受细胞和神经通路被苹果蠹蛾性信息素所影响。

致谢:感谢孙世国、蒲崇建、姜红霞、张建朝、张增福、蒋旭东和周红玲等农林业及植保植检部门领导老师对于本试验的大力支持。感谢北京中捷四方生物科技有限公司的崔艮中先生提供试验材料,感谢甘肃农业科学院的罗进仓老师免费提供 Bioglobal 发散器以及使用技术。另外,中国科学院动物研究所外来物种鉴定与控制研究组的任立和王志良老师在试验设计、准备以及进行过程中提供了各种帮助,在此一并感谢。

参考文献

张学祖. 1973. 梨小食心虫在新疆的发现. 新疆农业科技,(5): 14-17.

Allred D B. 1995. *Responses of Males to A Pheromone Blend of Female Oriental Fruit Moth with and without E*8, *E*10-*dodecadien*-1-*ol*, *A Peromone Component of Codling Moth* (*Lepidoptera*: *Tortricidae*). Corvallis: Oregon State University.

Baker T C and Cardé R T. 1979. Analysis of pheromone-mediated behaviors in male *Grapholitha molesta*, the oriental fruit moth (Lepidoptera: Tortricidae). *Environmental Entomology*, 8: 956-968.

Cardé A M, Baker T C and Cardé R T. 1979. Identification of a four-component sex pheromone of the female oriental fruit moth, *Grapholitha molesta* (Lepidoptera: Tortricidae). *Journal of Chemical Ecology*, 5: 423-427.

Cardé R T, Baker T C and Castrovillo P J. 1977. Disruption of sexual communication in *Laspeyresia pomonella* (codling moth),

Grapholitha molesta (oriental fruit moth) and *G.prunivora* (lesser appleworm) with hollow fiber attractant sources. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 22: 280-288.

Cardé R T and Minks A K. 1995. Control of moth pests by mating disruption — Successes and constraints. *Annual Review of Entomology*, 40: 559-585.

Charlton R and Cardé R. 1981. Comparing the effectiveness of sexual communication disruption in the oriental fruit moth (*Grapholitha molesta*) using different combinations and dosages of its pheromone blend. *Journal of Chemical Ecology*, 7: 501-508.

Einhorn J, Beauvais F, Gallois M, Descoins C and Causse R. 1984. Secondary components of the codling moth (*Cydia pomonella* L.) (Lepidoptera, Tortricidae) sex pheromone. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Serie* 3 *Sciences de la Vie*, 299.

Einhorn J, Witzgall P, Audemard H, Boniface B and Causse R. 1986. Secondary components of the codling moth (*Cydia pomonella* L.) (Lepidoptera, Tortricidae) sex pheromone. 2. First results on the behavourial effects. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Serie* 3 *Sciences de la Vie*, 302.

El-Sayed A, Bengtsson M, Rauscher S, Lofqvist J and Witzgall P. 1999. Multicomponent sex pheromone in codling moth (Lepidoptera: Tortricidae). *Environmental Entomology*, 28: 775-779.

Evenden M L and McClaughlin J R. 2005. Male oriental fruit moth response to a combined pheromone-based attracticide formulation targeting both oriental fruit moth and codling moth (Lepidoptera : Tortricidae). *Journal of Economic Entomology*, 98: 317-325.

Geier P. 1963. The life history of codling moth, *Cydia pomonella* (L) (Lepidoptera: Tortricidae), in the Australian Capital Territory. *Australian Journal of Zoology*, 11: 323-367.

Han K S, Jung J K, Choi K H, Lee S W and Boo K S. 2001. Sex pheromone composition and male trapping of the oriental fruit moth, *Grapholita molesta* (Lepidoptera: Tortricidae) in Korea. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 4: 31-35.

Il'ichev A L, Stelinski L L, Williams D G and Gut L J. 2006. Sprayable microencapsulated sex pheromone formulation for mating disruption of oriental fruit moth (Lepidoptera: Tortricidae) in Australian peach and pear orchards. *Journal of Economic Entomology*, 99: 2048-2054.

Il'ichev A L, Williams D G and Gut L J. 2007. Dual pheromone dispenser for combined control of codling moth *Cydia pomonella* L. and oriental fruit moth *Grapholita molesta* (Busck) (Lep., Tortricidae) in pears. *Journal of Applied Entomology*, 131: 368-376.

McDonough L M and Moffitt H R. 1974. Sex pheromone of the codling moth. *Science*, 183: 978.

Miller J R, Gut L J, Lame F M and Stelinski L L. 2006. Differentiation of competitive vs. non-competitive mechanisms mediating disruption of moth sexual communication by point sources of sex pheromone (Part I): theory 1. *Journal of Chemical Ecology*, 32: 2089-2114.

Miller J R, McGhee P S, Siegert P Y, Adams C G, Huang J and Grieshop M J. 2010. General principles of attraction and competitive attraction as revealed by large-cage studies of moths responding to sex pheromone. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107: 22-27.

Reinke M D, Siegert P Y, McGhee P S, Gut L J and Miller J R. 2013. Pheromone release rate determines whether sexual communication of oriental fruit moth is disrupted competitively vs. non-competitively. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 150: 1-6.

Rice R and Kirsch P. 1990. Mating disruption of oriental fruit moth in the United States // Ridgway R, Silverstein R and Inscoe M. *Behavior-modifying Chemicals for Insect Management*. New York: Marcel Dekker, 193-211.

Riedl H, Song Y, Barnett W W and Gaggero J. 1990. *Synergism of the Pheromone Response of Oriental Fruit Moth* (*Lepidoptera*: *Tortricidae*) *by* (*E*, *E*)-8, 10-*dodecadien*-1-*ol*. Hood River, USA: OR.

Roelofs W L and Cardé R T. 1974. Oriental fruit moth and lesser appleworm attractant mixtures refined. *Environmental Entomology*, 3: 586-588.

Roelofs W L, Cardé R T and Tette J P. 1973. Oriental fruit moth attractant synergists. *Environmental Entomology*, 2: 252-254.

Roelofs W L and Comeau A. 1969. Sex pheromone specificity: taxonomic and evolutionary aspects in Lepidoptera. *Science*, 165: 398-400.

Roelofs W L, Comeau A, Hill A and Milicevic G. 1971. Sex attractant of the codling moth: characterization with electroantennogram technique. *Science*, 174: 297-299.

Rothschild G and Vickers R. 1991. Biology, ecology and control of the oriental fruit moth // Geest L P S and Evenhuis H H. *Tortricid Pests*: *Their Biology*, *Natural Enemies and Control*. *World Crop Pests*. 5. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier, 389-412.

Stelinski L L, Gut L J, Ketner K C and Miller J R. 2005. Orientational disruption of codling moth, *Cydia pomonella* (L.)

(Lep., Tortricidae), by concentrated formulations of micro-encapsulated pheromone in flight tunnel assays. *Journal of Applied Entomology*, 129(9-10): 481-488.

Vickers R A, Rothschild G H L and Jones E L. 1985. Control of the oriental fruit moth, *Cydia molesta* (Busek) (Lepidoptera: Tortricidae), at a district level by mating disruption with synthetic female pheromone. *Bulletin of Entomological Research*, 75: 625-634.

Wearing C H and McLaren G F. 2001. Evidence that sweet cherry, *Prunus avium* L. is not a host of codling moth, *Cydia pomonella*, (Lepidoptera: Tortricidae). *Crop Protection*, 20: 571-579.

Witzgall P, Bengtsson M, Rauscher S, Liblikas I, Bäckman A C and Coracini M. 2001. Identification of further sex pheromone synergists in the codling moth, *Cydia pomonella*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 101: 131-141.

Witzgall P, Kirsch P and Cork A. 2010. Sex pheromones and their impact on pest management. *Journal of Chemical Ecology*, 36: 80-100.

(责任编辑:杨郁霞)

更正声明

本刊 2015 年 8 月第 24 卷第 3 期第 125~126 页,由于我部统稿时的排版失误,误删了 3.1 节的内容,现予以增补,具体如下:

3 口岸检疫要点

3.1 现场检疫要有针对性

柜装原木须卸货查验,在集装箱门口及地板仔细查找有无爬落的害虫;对原木的四周进行查看,注意查找有无虫孔和虫害的痕迹;带皮的原木要扒开树皮检查是否有树皮小蠹、对原木木质部带有坑道及长有真菌的,应注意检查有无食菌小蠹;截获的害虫和抽取的样本要及时送实验室检验。对大宗散装入境原木卸货要根据疫情风险来堆放,风险高的货要单独堆放。欧洲、南美来的原木,在境外基本上是采用喷洒药水的检疫处理方式,处理效果差,携带活虫几率很高。而非洲来的原木,熏蒸处理效果较差,常携带林木害虫。这类风险高的货物不得与其他批次混放,堆垛高度不宜过高,防止需要熏蒸处理时再次进行移垛造成费用、增加货主负担(洪树毅等,2000)。

特此声明!

生物安全学报编辑部

2015 年 10 月 23 日

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2015.04.013

苹果蠹蛾在中国的扩散与危害

徐 婧[1], 刘 伟[1,2,3], 刘 慧[4], 吴立峰[4], 张润志[1,2*]

[1]中国科学院动物研究所动物进化与系统学院重点实验室,北京 100101; [2]中国科学院动物研究所农业虫鼠害综合治理研究国家重点实验室,北京 100101; [3]中国科学院大学,北京 100049; [4]全国农业技术推广服务中心植物检疫处,北京 100125

摘要:【背景】苹果蠹蛾原产于欧亚大陆,是世界著名的严重危害苹果生产的入侵害虫,也是中国的重要对外检疫性有害生物。【方法】通过收集整理历史文献、资料,并于2005~2013年使用标准性信息素诱芯对全国各苹果、梨主产区的苹果蠹蛾发生情况进行系统监测,明确该虫在我国的分布现状及扩散历史;此外,使用特定公式对苹果蠹蛾在发生区造成的当前经济损失和扩散完成后的潜在经济损失进行了系统评估,以明确该虫在我国的现有和潜在危害。【结果】苹果蠹蛾于1953年首次在中国新疆被发现,目前在中国分布于新疆、甘肃、内蒙古、宁夏、黑龙江、辽宁和吉林7省的144个县(市、区、旗),主要集中分布在东经74.56°~106.8°以及东经120.02°~132.95°,发生面积约49410 hm^2;经济损失评估结果显示,苹果蠹蛾导致中国苹果和梨的潜在减产数量为185.01万和81.33万t。【结论与意义】该虫已在中国形成东西2个分布区,对占据中国苹果产量80%的西北黄土高原(陕西为主)和渤海湾(山东、河北、辽宁为主)两大苹果主产区构成了严重威胁,须引起高度重视。

关键词: 苹果蠹蛾; 入侵生物; 中国; 分布; 扩散; 经济损失

Spread and impact of the codling moth *Cydia pomonella* (L.) in China

Jing XU[1], Wei LIU[1,2,3], Hui LIU[4], Li-feng WU[4], Run-zhi ZHANG[1,2*]

[1]*Key Laboratory of Zoological Systematics and Evolution, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*; [2]*State Key Laboratory of Integrated Pest Management, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*; [3]*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*; [4]*Plant Quarantine Department, The National Agro-Tech Extension and Service Center, Beijing* 100125, *China*

Abstract:【Background】Originating in Eurasia, the codling moth *Cydia pomonella* (L.) has become a notorious invasive pest that has caused severe damage to the world's pome and drupe fruit industries. This insect is also an important foreign quarantine pest in China.【Method】In order to clarify the current distribution and dispersal history of this pest, historical literature and documents were collected, and a systematic monitoring program was conducted in China's major apple and pear producing areas by using standard sex pheromone lures. The current and potential damage of codling moth to China's fruit industry were calculated using specific formulas.【Result】The codling moth was first detected in Xinjiang Province in 1953. By October, 2013, this pest was present in 144 counties in 7 Chinese provinces, including Xinjiang, Gansu, Inner Mongolia, Ningxia, Liaoning, Heilongjiang and Jilin. The main concentrations were between 74.56°E~106.8°E and 120.02°E~132.95°E. The currently infested areas cover 49410 hm^2. The potential yield loss in China caused by the codling moth were 1850100 tons of apple and 813300 tons of pear.【Conclusion and significance】Our study confirmed that the distribution of the codling moth in China was divided into two regions, a western and an eastern one, and this distribution pattern posed serious threat to the apple industry of the Northwest Plateau (primarily in Shaanxi Province) and Bohai Bay (primarily in Shandong, Hebei, and Liaoning provinces). Because these two regions represented the two major apple producing areas and account for 80% of apple production in China.

Key words: codling moth; invasive biology; China; distribution; spread; economic loss

收稿日期(Received): 2015-06-08 **接受日期(Accepted)**: 2015-10-22

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(200903042)

作者简介: 徐婧, 女, 助理研究员。研究方向: 入侵害虫综合治理。E-mail: xujing@ioz.ac.cn

*通讯作者(Author for correspondence), E-mail: zhangrz@ioz.ac.cn

苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* (L.)是世界著名的入侵性害虫,严重威胁温带地区仁果类(苹果、梨)和核果类(杏、李、桃、油桃和樱桃)水果的生产。该虫原产于欧亚大陆南部地区,19 世纪后随苹果种植栽培面积的扩大而在世界范围内传播扩散(Franck *et al.*, 2007; Lin *et al.*,1996; Shel′Deshova,1967)。在欧亚大陆,该虫已扩展到最初分布区以外的广阔地区,欧洲的所有苹果种植国(Meraner *et al.*,2008; Shel′Deshova,1967)和亚洲的中国(张学祖,1957)、哈萨克斯坦(Sugonyaev,2009)、巴基斯坦(Ahmad *et al.*,2003)、伊朗(Aghdam *et al.*,2009)、以色列(Reuveny & Cohen,2004)、叙利亚(Mansour,2002)等国均有苹果蠹蛾的发生。在北美洲,苹果蠹蛾分布北界位于加拿大南部,南界位于美国南部与墨西哥北部(Tang *et al.*,2007; Wearing *et al.*,2001; Willett *et al.*,2009)。在南半球,苹果蠹蛾在澳洲的澳大利亚(Geier, 1963)、新西兰(Wearing,1979),非洲的南非(Timm *et al.*,2006),南美洲的阿根廷(Botto & Glaz,2010)、乌拉圭(Nuñez & Scatoni, 2001)、巴西(Kovaleski & Mumford,2007)、智利(Basoalto *et al.*, 2010)、秘鲁(Willett *et al.*,2009)和哥伦比亚(Judd *et al.*,1997)等国均有发生。

由于国际贸易和运输活动的日益增多,那些尚无苹果蠹蛾发生的果树产区持续受到外界苹果蠹蛾传入压力的影响。1991 年,巴西首次监测到苹果蠹蛾的地点为瓦卡里亚,它是巴西第二大苹果产区,其与重要港口城市阿雷格里港相距不足 200 km (Kovaleski & Mumford,2007)。1987~1999 年,美国加州出口到日本和韩国的樱桃中共查出苹果蠹蛾幼虫 11 头(Wearing *et al.*,2001)。2000 年以后,我国台湾防检部门多次从美国、法国、新西兰、智利等国进口的苹果中截获苹果蠹蛾幼虫(Hansen *et al.*,2007; Oung,2007; Staff,2007; Wright,2007)。这些迹象表明,苹果蠹蛾正在威胁最后的苹果蠹蛾非发生区。

中国是苹果生产大国,2012 年苹果产量和种植面积均位居世界首位,分别为 3700.15 万 t 和206.02 万 hm^2,占世界苹果产量的 48.44%和世界苹果种植面积的 42.54%(FAOSTAT,2015)。1953 年最早报道苹果蠹蛾在中国新疆造成危害(张学祖,1957),1984~1994 年中国东部地区没有苹果蠹蛾发生(National Codling Moth Cooperative Research Group, 1994)。Men *et al.*(2013)指出,苹果蠹蛾在新疆全境、甘肃大部分地区及黑龙江局部地区发生。目前,有关苹果蠹蛾在中国发生与分布的详细报道较少。因此,本研究提供了苹果蠹蛾在中国扩散和分布的详细信息,以及该虫对苹果、梨等造成的现有危害情况,并根据该虫的潜在分布区研究结果,评估其在中国的潜在危害。

1 材料与方法

1.1 历史文献整理

20 世纪 50~70 年代,苹果蠹蛾在我国的分布信息主要来源于张学祖(1957、1960)和中华人民共和国农业部(2015)。

1.2 苹果蠹蛾的监测

使用苹果蠹蛾性信息素诱捕器对苹果蠹蛾进行监测。诱剂为美国 BRI (Bedoukian Research Inc.)公司合成的苹果蠹蛾信息素(反,反-8, 10-十二碳二烯-1-醇),纯度约为 97%;诱芯为反口小橡皮塞,形状中空,每个质量为 0.3~0.5 g,由中国科学院动物研究所研制生产(专利号:CN201217257);每个诱芯中性信息素的含量为 1 mg,采用微量注射器滴定法制备。诱捕器为白色三角粘胶式诱捕器(中捷四方生物科技有限公司生产),由钙塑瓦楞版制成,其横向截面为边长 18 cm 的等边三角型,其纵向长度为 25 cm,底部放置粘虫胶板(长 25 cm×宽 18 cm)。

2005~2013 年,对全国苹果生产区的苹果蠹蛾进行了监测,每个县(市)设 5~10 个固定监测点,每个监测点设置 6 个诱捕器;此外,在公路、果汁加工厂、苹果贸易市场等容易传入的地方,部署补充监测点。诱捕器安放高度保持在 1.5~2.0 m。每年 4~10 月份进行监测调查,每周检查诱蛾情况,每 4 周更换一次诱芯和粘胶片。当监测发现苹果蠹蛾成虫后,对附近 30 km 内的果园进行剖果调查,以确认苹果蠹蛾是否真正定居或是偶然携带传入。

1.3 经济损失评估

经济损失评估包括当前经济损失评估和扩散完成后的潜在经济损失评估 2 个部分。损失组分包括产量损失和防治费用。

经济损失按照以下方法计算:

$E=A+C$, $A=Y\times r\times(1-e)\times a\times i\times P$, $C=S\times C_u\times i\times a$

其中,E 表示经济损失,A 表示产量损失(苹果和梨),C 表示防治费用,Y 表示作物产量,r 表示防

治前产量损失率(按 50% 计算)(巴哈提古丽,2009; 张学祖,1957),e 表示防效(按 90% 计算)(秦占毅等,2007),a 表示适生系数[指适生程度,该系数与损失率相关;当前损失计算中该系数为 1,潜在损失计算中参照杨瑞(2008)的方法确定不同省份的适生系数(表 1)],i 表示发生面积系数[指发生面积占区域面积的比例系数;当前损失计算中该系数为 1,潜在损失计算中以适生面积除以该省行政面积获得(杨瑞,2008;表 1)],P 表示市场价格[苹果按 5829 元 · t^{-1}(954 美元 · t^{-1},根据 2012 年人民币兑美元平均汇率 6.11 转换为人民币单位,下同),梨按 5328 元 · t^{-1}(872 美元 · t^{-1})计算(FAOSTAT,2015)],S 表示分布区作物面积[当前分布区数据来源于有关省区植保部门,潜在分布区数据来源于中国农业年鉴编辑委员会(2013);表 1],C_u 表示单位面积防治成本(中国当前苹果蠹蛾发生省份的实际防治费用按 1650 元 · hm^{-2}计算)。

2　结果与分析

2.1　地理分布

截至 2013 年 10 月,苹果蠹蛾已在中国 7 省区的 144 个县(市、区、旗)内发生,总发生面积约为 49410 hm^2,其具体分布情况详见表 2。在新疆境内,苹果蠹蛾的发生县(市)共有 85 个,发生面积约为 29493 hm^2,占该区 2012 年苹果、梨、杏这 3 种主要寄主总种植面积(344079 hm^2)的 8.57%。在甘肃境内,苹果蠹蛾的发生县(市)共有 27 个,发生面积约为 16866 hm^2,占该省 2012 年苹果和梨总种植面积(320200 hm^2)的 5.27%。在内蒙古境内,苹果蠹蛾的发生县(市、旗)共有 4 个,发生面积约为 230 hm^2,占该区 2012 年苹果和梨总种植面积(25600 hm^2)的 0.90%。在宁夏境内,苹果蠹蛾的发生县(市)共有 3 个,发生面积约为 1667 hm^2,占该区 2012 年苹果和梨总种植面积(41800 hm^2)的 0.40%。在黑龙江境内,苹果蠹蛾的发生县(市)为 21 个,发生面积约为 744 hm^2,占该省 2012 年苹果和梨总种植面积(15600 hm^2)的 4.77%。在辽宁境内,苹果蠹蛾的发生县(市)共有 3 个,发生面积约为 220 hm^2,占该省 2012 年苹果和梨总种植面积(112700 hm^2)的 0.20%。在吉林境内,苹果蠹蛾仅在珲春市发生,发生面积约为 190 hm^2,占该省 2012 年苹果和梨总种植面积(27300 hm^2)的 0.70%。

从经度上分析,在东经 90°以西,苹果蠹蛾的发生县(市)一共为 79 个,发生省份仅为新疆。在东经 90°~110°,苹果蠹蛾的发生县(市)一共为 40 个,发生省份包括新疆、甘肃、宁夏以及内蒙古。在东经 120°及以东,苹果蠹蛾的发生县(市)一共为 25 个,发生省份包括辽宁、黑龙江和吉林。苹果蠹蛾在我国的最东端发生点为黑龙江的虎林市,经度为东经 132.95°;最西端发生点为新疆乌恰县,经度为东经 74.56°(表 2、图 1)。

从纬度上分析,在北纬 35°~40°,苹果蠹蛾的发生县(市)一共为 55 个,发生省份包括甘肃、内蒙古、宁夏以及新疆。在北纬 40°~45°,苹果蠹蛾的发生县(市)一共为 63 个,发生省份包括甘肃、内蒙古、新疆、辽宁、吉林和黑龙江。在北纬 45°往北,苹果蠹蛾发生县(市)有 26 个,发生省份包括黑龙江及新疆。苹果蠹蛾在我国的最南发生点为甘肃兰州市西固区,纬度为北纬 35.89°,已进入陕西省苹果主产区的边缘;最北发生点为新疆哈巴河县,纬度为北纬 48.04°(表 2、图 1)。

从海拔上分析,在海拔 500 m 以下,苹果蠹蛾的发生县(市)一共为 34 个,发生省份包括新疆、辽宁、吉林和黑龙江。在海拔 500~1000 m,苹果蠹蛾的发生县(市)一共为 27 个,发生省份包括新疆、内蒙古和黑龙江。在海拔 1000~1500 m,苹果蠹蛾的发生县(市)一共为 57 个,发生省份包括新疆、甘肃、宁夏和内蒙古。在海拔 1500~2000 m,苹果蠹蛾的发生县(市)一共为 16 个,发生省份包括新疆、甘肃及内蒙古。在海拔 2000 m 以上,苹果蠹蛾的发生县(市)一共有 10 个,包括甘肃的 7 个县(市、区)和新疆的 3 个县(市、区)。苹果蠹蛾在我国的最低发生点为新疆的吐鲁番市,海拔高度-38 m;最高发生点为甘肃肃南县,海拔高度为 3200 m(表 2)。

2.2　扩散路线和阶段

苹果蠹蛾在中国的扩散路线主要有 2 条:(1)新疆—甘肃一线由西北地区向东朝中国中部地区延伸(称为西部路线,图 1A);(2)黑龙江—吉林一线由东北地区向华东地区延伸(称为东部路线,图 1A)。

表 1 苹果蠹蛾当前分布区和潜在分布区的苹果和梨的产量(万 t)、种植面积(万 hm^2)及当前经济损失和潜在经济损失(百万元 · 年$^{-1}$)

Table 1 Production ($\times10^4$ t) and cultivated area ($\times10^4$ hm^2) of apples and pears in currently infested areas and areas potentially subject to infestation, and the current economic loss and potential economic loss ($\times10^6$ RMB per year) of each region

省份 Province	产量 Production				面积 Cultivated area				a	i	产量损失 Yield loss						防治费用 Control cost						合计 Total					
	苹果 Apple		梨 Pear		苹果 Apple		梨 Pear				苹果 Apple		梨 Pear		合计 Total		苹果 Apple		梨 Pear		合计 Total		苹果 Apple		梨 Pear		合计 Total	
	当前 Current	潜在 Potential	当前 Current	潜在 Potential	当前 Current	潜在 Potential	当前 Current	潜在 Potential			当前 Current	潜在 Potential	当前 Current	潜在 Potential	当前 Current	潜在 Potential	当前 Current	潜在 Potential	当前 Current	潜在 Potential	当前 Current	潜在 Potential	当前 Current	潜在 Potential	当前 Current	潜在 Potential	当前 Current	潜在 Potential
陕西 Shaanxi	0.00	965.09	0.00	89.69	0.00	64.52	0.00	4.86	0.90	1.00	0.00	2531.48	0.00	215.04	0.00	2746.52	0.00	958.12	0.00	72.17	0.00	1030.29	0.00	3489.60	0.00	287.21	0.00	3776.81
山东 Shandong	0.00	871.04	0.00	119.09	0.00	27.96	0.00	4.25	0.75	1.00	0.00	1903.98	0.00	237.94	0.00	2141.93	0.00	346.01	0.00	52.59	0.00	398.60	0.00	2249.99	0.00	290.54	0.00	2540.53
河北 Hebei	0.00	311.46	0.00	445.05	0.00	23.57	0.00	19.40	0.85	1.00	0.00	771.59	0.00	1007.77	0.00	1779.36	0.00	330.57	0.00	272.09	0.00	602.65	0.00	1102.16	0.00	1279.86	0.00	2382.01
甘肃 Gansu	9.79	185.62	1.68	32.05	1.50	28.39	0.19	3.63	0.95	1.00	28.53	513.94	4.47	81.11	33.00	595.05	24.70	445.01	7.37	56.90	32.07	501.91	53.23	958.95	11.84	138.01	65.07	1096.97
山西 Shanxi	0.00	375.24	0.00	66.36	0.00	15.07	0.00	3.51	0.75	1.00	0.00	820.23	0.00	132.59	0.00	952.82	0.00	186.49	0.00	43.44	0.00	229.93	0.00	1006.72	0.00	176.02	0.00	1182.74
辽宁 Liaoning	0.23	263.41	0.16	154.72	0.01	13.90	0.01	9.88	0.80	0.90	0.66	552.75	0.42	296.77	1.08	849.52	0.20	165.13	0.69	117.37	0.89	282.51	0.86	717.88	1.11	414.14	1.97	1132.02
新 疆 Xinjiang	12.79	82.10	22.22	95.01	1.31	8.39	1.64	7.02	0.95	1.00	37.28	227.32	59.20	240.45	96.48	467.77	21.57	131.51	97.68	110.04	119.25	241.55	58.84	358.83	156.89	350.49	215.73	709.32
河南 Henan	0.00	436.70	0.00	104.39	0.00	17.88	0.00	5.20	0.25	1.00	0.00	318.19	0.00	69.52	0.00	387.71	0.00	73.76	0.00	21.45	0.00	95.21	0.00	391.95	0.00	90.97	0.00	482.92
宁夏 Ningxia	2.05	48.94	0.00	1.42	0.17	3.98	0.00	0.20	0.95	1.00	5.98	135.50	0.00	3.59	5.98	139.10	2.76	62.39	0.00	3.14	2.76	65.52	8.74	197.89	0.00	6.73	8.74	204.62
云南 Yunnan	0.00	32.24	0.00	41.63	0.00	4.06	0.00	5.22	0.35	1.00	0.00	32.89	0.00	38.82	0.00	71.70	0.00	23.45	0.00	30.15	0.00	53.59	0.00	56.33	0.00	68.96	0.00	125.30
江苏 Jiangsu	0.00	60.12	0.00	74.82	0.00	3.43	0.00	3.94	0.20	1.00	0.00	35.04	0.00	39.86	0.00	74.91	0.00	11.32	0.00	13.00	0.00	24.32	0.00	46.36	0.00	52.87	0.00	99.23
安徽 Anhui	0.00	38.66	0.00	106.93	0.00	1.55	0.00	3.73	0.20	1.00	0.00	22.53	0.00	56.97	0.00	79.51	0.00	5.12	0.00	12.31	0.00	17.42	0.00	27.65	0.00	69.28	0.00	96.93
四川 Sichuan	0.00	48.83	0.00	96.03	0.00	3.29	0.00	8.33	0.20	0.80	0.00	22.77	0.00	40.93	0.00	63.70	0.00	8.69	0.00	21.99	0.00	30.68	0.00	31.46	0.00	62.92	0.00	94.38
北京 Beijing	0.00	10.30	0.00	16.26	0.00	0.78	0.00	0.91	0.80	1.00	0.00	24.02	0.00	34.65	0.00	58.67	0.00	10.30	0.00	12.01	0.00	22.31	0.00	34.31	0.00	46.67	0.00	80.98
内蒙古 Inner Mongolia	0.06	14.37	0.15	7.49	0.01	1.81	0.02	0.75	0.75	0.80	0.19	25.13	0.40	11.97	0.58	37.10	0.13	17.92	0.66	7.43	0.79	25.34	0.32	43.05	1.06	19.40	1.37	62.44
湖北 Hubei	0.00	1.06	0.00	53.64	0.00	0.20	0.00	3.73	0.25	1.00	0.00	0.77	0.00	35.72	0.00	36.50	0.00	0.83	0.00	15.39	0.00	16.21	0.00	1.60	0.00	51.11	0.00	52.71
黑龙江 Heilongjiang	0.52	15.07	0.32	3.73	0.04	1.16	0.03	0.40	0.70	0.80	1.51	24.60	0.84	5.56	2.36	30.16	0.66	10.72	1.39	3.70	2.05	14.41	2.17	35.31	2.24	9.26	4.41	44.58
天津 Tianjin	0.00	4.96	0.00	3.62	0.00	0.47	0.00	0.41	0.85	1.00	0.00	12.29	0.00	8.20	0.00	20.48	0.00	6.59	0.00	5.75	0.00	12.34	0.00	18.88	0.00	13.95	0.00	32.83
吉林 Jilin	0.23	16.67	0.00	11.26	0.02	1.36	0.00	1.37	0.40	0.60	0.68	11.66	0.00	7.20	0.68	18.86	0.31	5.39	0.00	5.43	0.31	10.81	0.99	17.05	0.00	12.62	0.99	29.67
贵州 Guizhou	0.00	2.49	0.00	21.72	0.00	0.96	0.00	4.81	0.10	0.80	0.00	0.58	0.00	4.63	0.00	5.21	0.00	1.27	0.00	6.35	0.00	7.62	0.00	1.85	0.00	10.98	0.00	12.83
青海 Qinghai	0.00	0.59	0.00	0.47	0.00	0.17	0.00	0.09	0.25	1.00	0.00	0.43	0.00	0.31	0.00	0.74	0.00	0.70	0.00	0.35	0.00	1.05	0.00	1.13	0.00	0.66	0.00	1.79
西藏 Tibet	0.00	0.44	0.00	0.12	0.00	0.13	0.00	0.01	0.20	1.00	0.00	0.26	0.00	0.06	0.00	0.32	0.00	0.43	0.00	0.03	0.00	0.46	0.00	0.69	0.00	0.10	0.00	0.78
合计 Total	25.67	3785.40	24.52	1545.50	3.05	223.03	1.89	91.65			74.83	7987.94	65.33	2569.69	140.16	10557.63	50.33	2801.69	107.80	883.06	158.12	3684.75	125.15	10789.63	173.13	3452.75	298.28	14242.38

a 表示适生系数[指适生程度,该系数与损失率相关;当前损失计算中该系数为 1,潜在损失计算中参照杨瑞(2008)的方法确定不同省份的适生系数];i 表示发生面积系数[指发生面积占区域面积的比例系数;当前损失计算中该系数为 1,潜在损失计算中以适生面积除以该省行政面积获得(杨瑞,2008)]。

"a" is the coefficient of suitability [represents the degree of suitability and has a relationship with the loss rate. For the estimation of current economic loss (CEL) "a" was assigned a value of 1. For the estimation of potential economic loss (PEL), the values for the different provinces were determined according to the suitability analysis of Yang (2008)]; "i" is the coefficient for the infested area [represents the proportion of the total area that is infested. For the estimation of CEL, "i" was assigned a value of 1. For the estimation of PEL, the values for the different provinces were calculated by dividing the area suitable for the codling moth (Yang 2008) by the total administrative area].

表 2　苹果蠹蛾在中国的分布情况

Table 2　The distribution of codling moth in China

省份 Province	县/市/旗[纬度,经度,平均海拔高度(m)] County/city [latitude, longitude and average altitude (m)]	首次发现时间[b] Year of first detection	发生面积[b] Infested area (hm^2)
新疆 Xinjiang	库尔勒市 Korla (41.68°, 86.06°, 935)	1953[a]	29493
	阿克苏市 Aksu (41.15°, 80.32°, 1108),拜城县 Baicheng (41.82°, 81.85°, 1254),额敏县 Emin (46.54°, 83.64°, 521),巩留县 Gongliu (43.47°, 82.22°, 774),和布克赛尔县 Hoboksar (46.80°, 85.70°, 1323),霍城县 Horgas (44.17°, 80.47°, 692),和田县 Hotan (37.15°, 79.92°, 1340),和田市 Hotan Shi (37.15°, 79.92°, 1340),伽师县 Jiashi (39.49°, 76.80°, 1201),喀什市 Kashi (39.50°, 75.99°, 1324),库车县 Kuqa (41.68°, 82.97°, 1036),奎屯县 Kuytun (44.45°, 84.94°, 438),轮台县 Luntai (41.79°, 84.29°, 962),玛纳斯县 Manas (44.30°, 86.22°, 469),墨玉县 Moyu (37.30°, 79.70°, 1331),尼勒克县 Nilka (43.82°, 82.50°, 1138),莎车县 Shache (38.44°, 77.22°, 1230),鄯善县 Shanshan (42.84°, 90.24°, 413),沙湾县 Shawan (44.32°, 85.57°, 560),塔城市 Tacheng (46.77°, 82.99°, 569),特克斯县 Tekes (43.22°, 81.82°, 1227),吐鲁番市 Turpan (42.90°, 89.19°, -38),乌鲁木齐市 Urumqi (43.75°, 87.60°, 937),乌苏市 Usu (44.47°, 84.69°, 430),温宿县 Wensu (41.29°, 80.22°, 1135),沙雅县 Xayar (41.24°, 82.85°, 978),新和县 Xinhe (41.54°, 82.64°, 1007),新源县 Xinyuan (43.42°, 83.27°, 963),伊宁县 Yining (43.99°, 81.60°, 798),伊宁市 Yining Shi (43.92°, 81.34°, 657),裕民县 Yumin (46.20°, 82.99°, 725)	1953～1957[a]	
	阿合奇县 Akqi (40.90°, 78.42°, 2326),阿克陶县 Akto (39.15°, 75.92°, 1321),阿拉尔市 Alear (40.50°, 81.00°, 1100),阿勒泰市 Altay (47.84°, 88.20°, 1196),阿图什市 Artux (39.70°, 76.14°, 1324),阿瓦提县 Awant (40.62°, 80.37°, 1049),巴楚县 Bachu (39.79°, 78.54°, 1121),巴里坤县 Barkol (44.42°, 93.51°, 1650),博湖县 Bohu (41.97°, 86.55°, 1052),博乐市 Bole (44.95°, 82.14°, 521),布尔津县 Burqin (47.69°, 86.99°, 488),昌吉市 Changji (44.04°, 87.30°, 561),福海县 Fuhai (47.15°, 87.52°, 496),阜康市 Fukang (44.15°, 87.97°, 568),富蕴县 Fuyun (47.04°, 89.49°, 925),哈巴河县 Habahe (48.04°, 86.44°, 521),哈密市 Hami (42.84°, 93.47°, 765),和静县 Hejing (42.30°, 86.37°, 1094),和硕县 Hoxu (42.22°, 86.85°, 1066),呼图壁县 Hutubi (44.20°, 86.90°, 510),吉木乃县 Jeminay (47.42°, 85.87°, 1021),吉木萨尔县 Jimsar (44.00°, 89.19°, 726),精河县 Jinghe (44.65°, 82.94°, 272),柯坪县 Kalpin (40.54°, 79.04°, 1178),洛浦县 Lop (37.14°, 80.19°, 1332),麦盖提县 Markit (38.94°, 77.64°, 1176),民丰县 Minfeng (37.07°, 82.65°, 1423),木垒县 Mori (43.80°, 90.35°, 1348),皮山县 Pishan (37.67°, 78.30°, 1344),察布查尔县 Qapqal (43.84°, 81.14°, 599),且末县 Qiemo (38.17°, 85.50°, 1248),青河县 Qinghe (46.70°, 90.37°, 1316),策勒县 Qira (37.04°, 80.77°, 1368),奇台县 Qitai (44.02°, 89.354°, 755),若羌县 Ruoqiang (39.02°, 88.19°, 901),石河子市 Shihezi (44.30°, 86.00°, 449),疏附县 Shufu (39.240°, 75.82°, 1365),疏勒县 Shule (39.39°, 76.04°, 1272),图木舒克市 Toumchouq (39.80°, 79.02°, 1080),托克逊县 Toksun (42.77°, 88.65°, 9),托里县 Toli (45.20°, 83.04°, 1500),温泉县 Wenquan (44.97°, 81.10°, 1276),乌恰县 Wuqia (39.80°, 74.56°, 2890),乌什县 Wushi (41.19°, 79.22°, 1440),焉耆县 Yanqi (42.04°, 86.59°, 1057),叶城县 Yecheng (37.89°, 77.37°, 1349),英吉沙县 Yengisar (38.95°, 76.15°, 1291),伊吾县 Yiwu (43.32°, 94.65°, 1862),岳普湖县 Yopurga (39.20°, 76.80°, 1202),尉犁县 Yuli (41.35°, 86.24°, 889),于田县 Yutian (36.87°, 81.65°, 1420),泽普县 Zepu (38.20°, 77.25°, 1274),昭苏县 Zhaosu (42.67°, 80.45°, 1900)	1987 年之前 Before 1987	
甘肃 Gansu	敦煌市 Dunhuang (40.14°, 94.69°, 1139)	1987	16866
	瓜州县 Guazhou (40.47°, 95.65°, 1153)	1994	
	玉门市 Yumen (39.82°, 97.59°, 2215)	1994	
	肃州区 Suzhou (39.74°, 98.52°, 1463)	1995	
	金塔县 Jinta (39.99°, 98.89°, 1270)	1999	
	高台县 Gaotai (39.39°, 99.84°, 1345)	2003	
	临泽县 Linze (39.14°, 100.15°, 1464)	2004	
	甘州区 Ganzhou (38.94°, 100.44°, 1486)	2005	
	民乐县 Minle (38.44°, 100.84°, 2306)	2005	
	肃南县 Sunan(38.28°, 100.58°, 3200)	2006	
	山丹县 Shandan (38.77°, 101.10°, 1767)	2006	
	嘉峪关市 Jiayuguan (39.80°, 98.24°, 1698)	2006	
	兰州市七里河区 Qilihe district, Lanzhou (36.00°, 103.85°, 1540)	2007	
	兰州市西固区 Xigu district, Lanzhou (35.89°, 103.92°,1560)	2007	
	永昌县 Yongchang (38.24°, 101.97°, 1993)	2007	
	民勤县 Minqin (38.62°, 103.10°, 1370)	2007	
	兰州市城关区 Chengguan district, Lanzhou (36.04°, 103.51°, 1509)	2008	

续表 2

省份 Province	县/市/旗[纬度,经度,平均海拔高度(m)] County/city [latitude, longitude and average altitude (m)]	首次发现时间[b] Year of first detection	发生面积[b] Infested area (hm^2)
	兰州市宁安区 Ning′an district, Lanzhou (36.17°, 103.72°, 1540)	2008	
	景泰县 Jingtai (37.17°, 104.04°, 1645)	2008	
	皋兰县 Gaolan (36.34°, 103.97°, 1690)	2008	
	凉州区 Liangzhou (37.91°, 102.76°, 1632)	2008	
	白银区 Baiyin (36.55°, 104.20°, 1697)	2008	
	古浪县 Gulang (37.28°, 102.51°, 2387)	2009	
	永登县 Yongdeng (36.44°, 103.16°, 2122)	2009	
	金川区 Jinchuan (38.49°, 102.32°, 2000)	2010	
	靖远县 Jingyuan (36.74°, 104.73°, 2000)	2012	
	红古区 Honggu (36.30°,103.05°, 1980)	2012	
内蒙古	额济纳旗 Ejin Qi (41.97°, 101.07°, 953)	2006	230
Inner Mongolia	阿拉善左旗 Alxa Zuoqi (38.84°, 105.69°, 1555)	2008	
	乌海市渤海湾区 Bohaiwan district, Wuhai (39.67°, 106.80°, 1093)	2009	
	阿拉善右旗 Alxa Youqi (40.18°, 102.44°, 1300)	2010	
宁夏 Ningxia	中卫市沙坡头区 Shapotou district, Zhongwei (37.59°, 105.19°, 1230)	2008	1667
	青铜峡 Qingtongxia (37.94°, 105.99°, 1136)	2009	
	中宁县 Zhongning (37.49°, 105.67°, 1186)	2009	
黑龙江	东宁县 Dongning (44.05°, 131.12°, 129)	2006	744
Heilongjiang	海林市 Hailin (44.59°, 129.35°, 261)	2007	
	虎林市 Hulin (45.79°, 132.95°, 93)	2007	
	鸡东县 Jidong (45.29°, 131.05°, 285)	2007	
	鸡西市鸡冠区 Jiguan district, Jixi (45.30°, 130.95°, 234)	2007	
	鸡西市恒山区 Hengshan district, Jixi (45.13°, 130.91°, 410)	2007	
	鸡西市城子河区 Chengzihe district, Jixi (45.37°, 131.02°, 250)	2007	
	林口县 Linkou (45.127°, 130.24°, 275)	2007	
	密山市 Mishan (45.54°, 131.84°, 147)	2007	
	牡丹江市东安区 Dong′an district, Mudanjiang (44.59°, 129.60°, 241)	2007	
	牡丹江市阳明区 Yangming district, Mudanjiang (44.58°, 129.78°, 230)	2007	
	牡丹江市爱民区 Aimin district, Mudanjiang (44.68°, 129.54°, 235)	2007	
	牡丹江市西安区 Xi′an district, Mudanjiang (44.49°, 129.58°, 240)	2007	
	宁安市 Ning′an (44.35°, 129.47°, 254)	2007	
	集贤县 Jixian (46.81°, 131.14°, 200)	2012	
	宝清县 Baoqing (46.40°, 132.40°, 100)	2012	
	勃利县 Boli (45.92°, 130.81°, 550)	2012	
	佳木斯市 Jiamusi (46.80°, 130.28°, 326)	2012	
	肇州县 Zhaozhou (45.83°, 125.30°, 150)	2013	
	七台河市新兴区 Xinxing district, Qitaihe (45.81°, 130.89°, 354)	2013	
	七台河市桃山区 Taoshan district, Qitaihe (45.76°, 130.99°, 220)	2013	
辽宁	海城市 Haicheng (40.83°, 122.78°, 300)	2012	220
Liaoning	绥中县 Suizhong (40.29°, 120.02°, 17)	2013	
	建昌县 Jianchang (40.34°, 120.32°, 368)	2013	
吉林 Jilin	珲春市 Hunchun (42.87°, 130.37°, 42)	2009	190
	总发生面积 Total infested acreage (hm^2)		49410

[a] 根据张学祖(1957)整理;[b] 其余发现时间和发生面积由全国农业技术推广服务总站及各地植保站提供。

[a]Reported by Zhang (1957); [b]The other year of first detection and the size of infested area were provided by the national agro-tech extension and service center and corresponding plant protection stations.

西部路线:以首发地库尔勒市为中心扩散至整个新疆果业产区(图 1B),然后随果品运输传入甘肃省敦煌市,在甘肃境内沿东南方向逐渐扩散至瓜州县、玉门市、肃州区、金塔县、高台县、临泽县、甘州区、民乐县、肃南县、山丹县、嘉峪关市、兰州市(七里河区、西固区、城关区和宁安区)、永昌县、民勤县、景泰县、皋兰县、凉州区、白银区、鼓浪县、永登县、金川区、靖远县、红古区等 27 个县(市、区),在甘肃省内扩散的后期,传入与甘肃交界的内蒙古额济纳旗、阿拉善左旗、乌海市渤海湾区、阿拉善右

旗以及宁夏的中卫市沙坡头区、青铜峡市和中宁县(图 1C)。在这一条扩散线路中,经过 34 年的时间,苹果蠹蛾由最初发现的新疆库尔勒向东扩散了 782 km 进入甘肃敦煌,平均每年扩散约 21.8 km。在传入甘肃后,23 年间苹果蠹蛾在该省内自西向东扩散了 1180 km,扩散速度为 51.3 km · 年$^{-1}$,特别是 2006 年以后,扩散速度加快至 112.8 km · 年$^{-1}$。

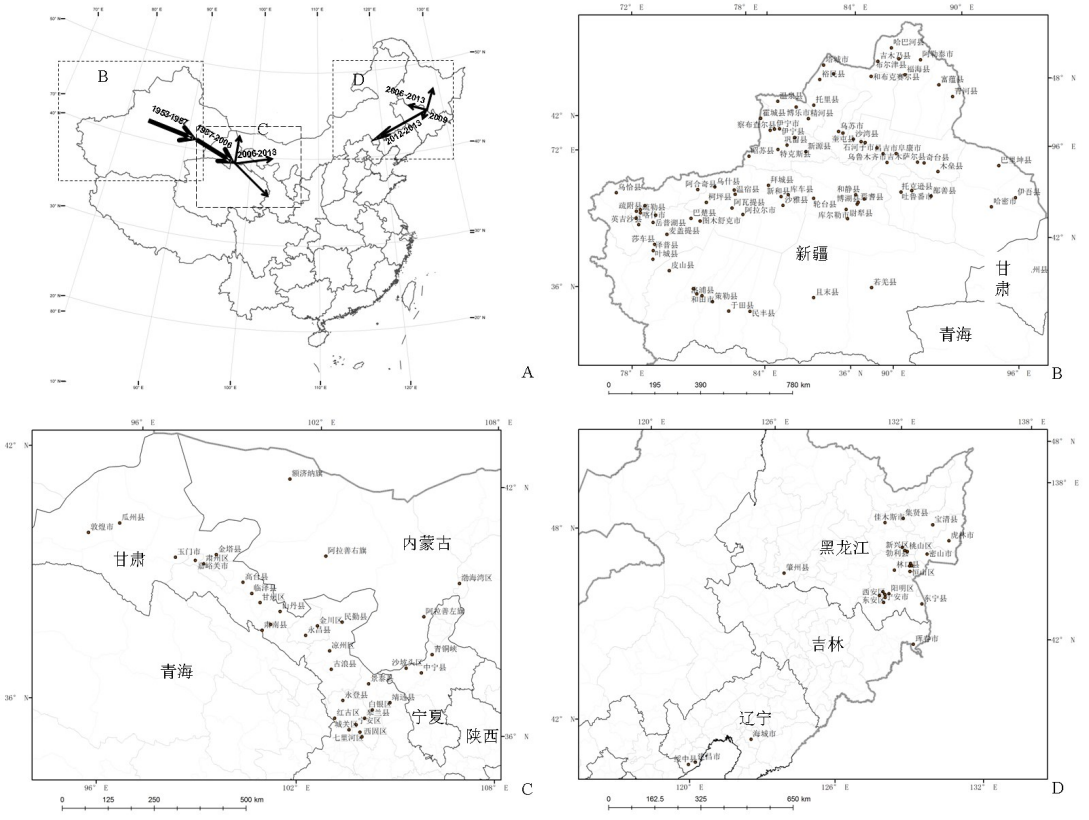

图 1　苹果蠹蛾在中国的 3 个扩散阶段及在不同地区的具体扩散路线

Fig.1　Illustration of the 3 stages of dispersal for codling moth in China and their dispersal routes into the different regions

A.扩散阶段与路线,第一阶段为 1987 年之前,第二阶段为 1987~2006 年,第三阶段为 2006 年至今;

B.新疆;C.甘肃、内蒙古及宁夏;D.辽宁、吉林及黑龙江。

A. Expansion stages and routs, stage 1 is before 1987, stage 2 is 1978~2006, stage 3 is from 2006 to now;

B. Xinjiang; C. Gansu, Inner Mongolia and Ningxia; D. Liaoning, Jilin and Heilongjiang.

东部路线:苹果蠹蛾于 2006 年首先在中俄交界的黑龙江省东宁县发生,随后迅速向西扩散至海林市、虎林市、鸡东县、鸡西市(鸡冠区、恒山区及城子河区)、林口县、密山县、牡丹江市(东安区、阳明区、爱民区及西安区)、宁安市、集贤县、宝清县、勃利县、肇州县、佳木斯市、七台河市(新兴区及桃山区)等 21 个县(市、区),向南扩散进入吉林省珲春县(图 1D)。在这一条扩散路线中,经过短短 1 年时间,苹果蠹蛾就向西扩散至距东宁县 300 多 km 的海林市,向北扩散至距东宁县 200 多 km 的虎林市;在向黑龙江省各地扩散的同时,2009 年苹果蠹蛾向南扩散至吉林省珲春市,年扩散距离约 72 km。2012 年后,东部地区的苹果蠹蛾分布范围呈现跳跃式扩张:向北,2012 年苹果蠹蛾最远扩散至距虎林市 200 km 的集贤县;向南,2012 年在距离吉林省珲春市 900 多 km 的辽宁省海城市突发苹果蠹蛾疫情,2013 年,辽宁省的苹果蠹蛾以海城市为原点,继续向西扩散,相继入侵距海城市 200 多 km 的绥中县和距海城市约 300 km 的建昌县。

苹果蠹蛾在中国的扩散过程主要分为 3 个阶段。第一阶段为 1987 年之前,苹果蠹蛾仅在中国新疆的 85 个县(市)发生(表 2、图 1)。新疆地域广阔,并且各地的果树种植区之间有众多的沙漠、草地和高山等自然屏障阻隔,因此,在这一阶段,苹果蠹蛾很可能是随中长距离的人类活动进行传播扩散。

第二阶段为 1987~2006 年,苹果蠹蛾突破了在新疆—甘肃之间以荒漠与戈壁为主的自然屏障,进入甘肃省(表 2、图 1)。苹果蠹蛾种群的自然扩散

及中短距离的人为传播是这一阶段的主要扩散方式,但由于甘肃中部适宜苹果蠹蛾生存的果树种植区狭长,对其扩散起到一定的挟制作用。这一阶段苹果蠹蛾由西向东的扩散速度相对较慢,平均年扩散距离为 30 km 左右。

第三阶段为 2006 年至今,苹果蠹蛾在除甘肃、新疆以外的省份特别是中国东部出现(表 2、图 1)。在这一阶段中,由于新发地区通常采取高强度的防治措施,短距离的自然扩散明显受到遏制,但中长距离的传播明显增强,每年平均传播距离在 100 km 以上,有时会在发生区几百公里之外出现新的疫情,表明苹果蠹蛾的传播扩散与日益密集的果品调运活动之间存在着重要联系。

2.3 苹果蠹蛾对中国苹果产业的危害

2.3.1 当前经济损失

苹果蠹蛾当前在中国造成的经济损失达 2.98 亿元·年$^{-1}$,其中产量损失为 1.40 亿元·年$^{-1}$,防治费用为 1.58 亿元·年$^{-1}$(表 1)。

从各分布省份分析,新疆的经济损失最为严重,其次为甘肃,这 2 个省经济损失之和占当前总经济损失的 94.14%。从损失组分分析,除新疆、内蒙古外,其余各省份的产量损失均高于防治费用。从作物分析,甘肃、宁夏和吉林 3 个省的苹果损失高于梨;辽宁、新疆、内蒙古 3 个省的梨损失高于苹果,而黑龙江省的 2 种作物损失基本相等。苹果上,各省的产量损失均大于防治费用;梨上,除宁夏和吉林无损失,其余各省产量损失均小于防治费用。当前,7 个苹果蠹蛾发生省份在苹果上的产量损失总数大于防治费用,而在梨上的产量损失总数小于防治费用。此外,7 个省在苹果上的产量损失总数大于梨,而在苹果上的防治费用总数则低于梨。

2.3.2 潜在经济损失

苹果蠹蛾在中国扩散完成后的潜在经济损失达 142.42 亿元·年$^{-1}$,其中潜在产量损失为 105.57 亿元·年$^{-1}$,潜在防治费用为 36.85 亿元·年$^{-1}$(表 1)。

从各分布省份分析,陕西的潜在经济损失最严重,其次为山东、河北,这 3 个省的潜在经济损失均超过 20 亿元·年$^{-1}$;甘肃、山西、辽宁 3 个省的潜在经济损失也超过 10 亿元·年$^{-1}$;上述 6 个省经济损失之和占潜在总经济损失的 85.04%。此外,潜在经济损失在 1 亿元·年$^{-1}$以上、10 亿元·年$^{-1}$以下的省份包括新疆、河南、宁夏和云南 4 个省;其余 12 个省的潜在经济损失均在 1 亿元·年$^{-1}$以下。

从损失组分分析,除贵州、青海和西藏外,其余各省的潜在产量损失均大于防治费用。潜在产量损失超过 10 亿元·年$^{-1}$的省份包括陕西、山东和河北 3 个省,在 1 亿~10 亿元·年$^{-1}$的省份包括甘肃、山西、辽宁、新疆、河南和宁夏 6 个省,其余 13 个省均小于 1 亿元·年$^{-1}$;潜在防治费用超过 10 亿元·年$^{-1}$的省份仅陕西,在 1 亿~10 亿元·年$^{-1}$的省份包括山东、河北、甘肃、山西、辽宁和新疆 6 个省;其余 15 个省均小于 1 亿元·年$^{-1}$。

从作物分析,除河北、云南、江苏、北京、四川、安徽、湖北和贵州 8 个省,其余省份苹果上的潜在经济损失均大于梨,部分省份苹果上的潜在损失远超过梨,如宁夏苹果上的损失是梨的 29.41 倍,陕西为 12.15 倍;同时,部分省份梨上的潜在损失远超过苹果,如湖北梨上的损失是苹果的 31.94 倍,贵州为 5.94 倍;新疆 2 种作物上的潜在损失基本相等(苹果上损失仅为梨的 1.02 倍)。苹果上,除湖北、贵州、青海和西藏 4 个省外,其余省份的潜在产量损失均大于潜在防治费用;梨上,除贵州和青海 2 个省外,其余省份的潜在产量损失均大于潜在防治费用。不论是苹果还是梨,潜在产量损失总数(22 个省总和)都大于潜在防治费用总数(22 个省总和),且苹果上的潜在产量损失和潜在防治费用均大于梨。

3 讨论

苹果蠹蛾信息支持系统(Codling moth information support system;http://ipmnet.org/)认为,该虫在中国分布于新疆和浙江,浙江的报道早被证实是错误的(全国苹果蠹蛾研究协作组,1994)。Wearing *et al.*(2001)指出,苹果蠹蛾在中国的分布省区为青海、宁夏、陕西、新疆和甘肃;本研究证实,苹果蠹蛾在中国陕西省和青海省并没有分布,且宁夏是 2008 年才首次发现苹果蠹蛾传入。前人错误的报道,特别是将中国最大的苹果产区陕西省列为苹果蠹蛾发生区,可能会对中国的苹果出口造成严重的负面影响。值得关注的是,近几年随着我国研究者在国际刊物上发表论文数量的增加,国际社会对中国苹果蠹蛾发生情况的了解程度也日益提高。如 2010 年欧洲和地中海植物保护组织(EPPO)在其开发的植物检疫数据检索系统(EPPO's plant quarantine data retrieval system)中,将中国的河北、湖北、吉林、辽宁和浙江 5 个省列为"尚未证实的发生区",但 2015 年该系统已将上述五省定为"无效记录",仅保留新疆、甘肃、宁

夏、内蒙古和黑龙江 5 个省为苹果蠹蛾发生区。

苹果蠹蛾自 20 世纪 50 年代传入中国以来,对中国的苹果和梨等水果生产造成了严重危害。早在 1992 年,苹果蠹蛾就被列为《中华人民共和国进境植物检疫危险性病、虫、杂草名录》(中华人民共和国农业部,1992)中的一类害虫,并且被列为全国农业植物检疫性有害生物(中华人民共和国农业部,2009)。由此看出,在中国,苹果蠹蛾的发生、扩散和危害得到了人们非常密切的关注和重视。

中国在苹果蠹蛾未发生地区,以及扩散可能的前沿地区,主要使用检疫措施进行阻截,对虫情进行动态监测,并对大众进行宣传引导。对苹果蠹蛾发生区进行产地检疫,并对从发生区运出地域界限的成品果实采取调运检疫。在产地内发现危害,即严禁果品运出发生区,根据危害状况确定采取销毁处理还是就地消化。在产地外一旦发现虫情,就直接销毁,严防疫情危害其他地区。

在苹果蠹蛾发生区仍然以化学防治为主。新疆、甘肃等苹果蠹蛾发生区普遍使用溴氰菊酯、氯氰菊酯、高渗苯氧威等高效低毒农药进行防治,取得了较好的效果,但由于农药对于环境的污染和虫体抗药性的增强,化学防治的应用范围逐渐减小。除化学防治外,农业防治(主要为清理果园、刮除树皮及树干束草诱集越冬幼虫)和物理防治(悬挂频振式杀虫灯诱杀成虫)也是苹果蠹蛾发生区常用的方法。

此外,2004 年中国的苹果蠹蛾非疫区建设正式启动,主要区域为包括陕西、山东等省在内的黄土高原、环渤海苹果优势产区,总面积达到了 133.3 万 hm^2(樊民周和周靖华,2007)。另外,在划定非疫区的同时,将甘肃等发生省份作为缓冲区采取严格的防治措施,防止苹果蠹蛾经由这些地区进入非疫区发生危害。

本文在进行苹果蠹蛾损失评估时仅考虑苹果和梨 2 类水果的损失,其他受危害水果如杏等由于危害较轻或产量极少未予以考虑。同时,防治费用也主要考虑化学防治和人工防治,信息素等无公害防治的费用因目前使用较少而未考虑。

中国苹果蠹蛾分布省份的当前经济损失仅占潜在经济损失的一小部分:新疆占 30.41%,黑龙江占 9.90%,甘肃占 5.93%,吉林占 3.34%,内蒙古占 2.20%,宁夏占 0.43%,辽宁占 0.17%。可见,即使在当前分布省份,苹果蠹蛾仍有很大的扩散危害空间,加大这些省份的防治力度对于非发生地区的苹果和梨的生产具有非常重要的意义。中国苹果生产大省陕西、山东,梨生产大省河北,遭受苹果蠹蛾的潜在经济损失最严重。这 3 个省苹果和梨的产量损失分别占本省农业生产值的 3.26%、0.66%和 0.61%。苹果蠹蛾在中国的潜在危害可高达近 20 亿美元·$年^{-1}$,是目前中国 2 类水果出口值[约 10 亿美元·$年^{-1}$(FAOSTAT,2015)]的 2 倍。由此可见,即使在严格防控的情况下,未来苹果蠹蛾可在中国造成的损失也非常巨大。

本文采用 50%的减产率和 90%的防效得到苹果蠹蛾导致的苹果和梨的潜在减产数量为 185.01 万 t 和 81.33 万 t。倘若苹果蠹蛾危害更严重,减产率将达到 80%(巴哈提古丽,2009),则潜在减产数量可达 296.01 万 t 和 130.13 万 t。目前,苹果蠹蛾仅在中国局部地区发生,受影响地区的苹果和梨产量仅为 25.67 万 t 和 24.52 万 t。换言之,在中国,占世界苹果产量 48.11%和梨产量 67.94%的地区尚未遭受苹果蠹蛾入侵。在这些地区建立苹果蠹蛾非疫区,对保护中国的苹果和梨产业具有重大意义。

参考文献

巴哈提古丽. 2009. 苹果蠹蛾在新疆地区的危害情况与防治措施. 防护林科技, (3): 122-124.

樊民周, 周靖华. 2007. 苹果非疫区建设的探索和思考. 植物保护, 33(3): 96-98.

林伟, 林长军, 宠金. 1996. 生态因子在苹果蠹蛾地理分布中的作用. 植物检疫, 10(1): 1-7.

秦占毅, 刘生虎, 岳彩霞, 张家银. 2007. 苹果蠹蛾的危害及综合防治技术. 落叶果树, (2): 40-41.

全国苹果蠹蛾研究协作组. 1994. 查明我国东部地区无苹果蠹蛾发生. 植物保护学报, 21(2): 169-175.

杨瑞. 2008. 苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* (L.)在中国的适生性研究. 杨凌: 西北农林科技大学.

张学祖. 1957. 苹果蠹蛾(*Carpocapsa pomonella* L.)在我国的新发现. 昆虫学报, 7(4): 467-472.

张学祖. 1960. 伊宁苹果蠹蛾(*Carpocapsa pomonella* L.)之研究. 昆虫学报, 10(1): 40-53.

中国农业年鉴编辑委员会. 2013. 中国农业年鉴 2012. 沈阳: 辽宁教育出版社.

中华人民共和国农业部. 1992. 中华人民共和国进境植物检疫危险性病、虫、杂草名录. http://www.law-lib.com/law/law_view.asp?id=93049.

中华人民共和国农业部. 2009. 全国农业植物检疫性有害生物名单. http://www.mofcom.gov.cn/article/b/g/200604/20060401852064.shtml.

中华人民共和国农业部. 2015. 农业部办公厅关于印发《全国农业植物检疫性有害生物分布行政区名录(2014)》和

《各地区发生的全国农业植物检疫性有害生物名单(2014)》的通知. http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201506/t20150604_4634137.htm.

Aghdam H R, Fathipour Y, Radjabi G and Rezapanah M. 2009. Temperature-dependeng development and temperature thresholds of codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) in Iran. *Environmental Entomology*, 38: 885-895.

Ahmad K F, Shah W H and Jilali S. 2003. Phenology of codling moth, *Cydia pomonella* L. (Tortricidae: Lepidoptera) on apple trees in Kashmir-Pakistan. *Sarhad Journal of Agriculture*, 19: 239-243.

Basoalto E, Miranda M, Knight A L and Fuentes-Contreras E. 2010. Landscape analysis of adult codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) distribution and dispersal within typical agroecosystems dominated by apple production in central Chile. *Environmental Entomology*, 39: 1399-1408.

Botto E and Glaz P. 2010. Potential for controlling codling moth *Cydia pomonella* (Linnaeus) (Lepidoptera: Tortricidae) in Argentina using the sterile insect technique and egg parasitoids. *Journal of Applied Entomology*, 134: 251-260.

FAOSTAT. 2015. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/E.

Franck P, Reyes M, Olivares J and Sauphanor B. 2007. Genetic differentiation in the codling moth: comparison between microsatllite and insecticide resistant markers. *Molecular Ecology*, 16: 3554-3564.

Geier P W. 1963. The life history of codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae) in the Australian capital territory. *Australian Journal of Zoology*, 11: 323-367.

Hansen J D, Watkins M A, Heidt M L and Anderson P A. 2007. Cold storage to control codling moth larvae in fresh apples. *HortTechnology*, 17: 195-198.

Judd G J R, Gardiner M G T and Thomson D R. 1997. Control of codling moth in organically-managed apple orchards by combining pheromone-mediated mating disruption, post-harvest fruit removal and tree banding. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 83: 137-146.

Kovaleski A and Mumford J. 2007. Pulling out evil by the root: the codling moth *Cydia pomonella* eradication programme in Brazil // Vreysen M J B, Robinson A S and Hendrichs J. *Area-wide Control of Insect Pests, from Research to Field Implementation*. Dordrecht, the Netherlands: Springer, 591-601.

Mansour M. 2002. Effects of gamma radiation on codling moth (*Cydia pomonella*, Lepidoptera: Tortricidae) fertility and reproductive behaviour // IAEA. *Evaluation of Lepidoptera Population Suppression by Radiation Induced Sterility*, 61-68.

Men Q L, Chen M H, Zhang Y L and Feng J N. 2013. Genetic structure and diversity of a newly invasive species, the codling moth, *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae) in China. *Biological Invasions*, 15: 447-458.

Meraner A, Brandstätter A, Thaler R, Aray B, Unterlechner M, Niederstätter H, Parson W, Zelger R, *et al*. 2008. Molecular phylogeny and population structure of the codling moth (*Cydia pomonella*) in Central Europe: I. Ancient clade splitting revealed by mitochondrial haplotype markers. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 48: 825-837.

National Codling Moth Cooperative Research Group. 1994. Investigation reveals no distribution of codling moth in the east of China. *Acta Phytophylacica Sinica*, 21: 169-175.

Nuñez S and Scatoni I. 2001. Current pest management status in IFP in Uruguay. *Integrated Fruit Production IOBC/wprs Bulletin*, 24: 259-263.

Oung A. 2007. *Ban on Imported Apples Imposed over Moth Larvae*. http://www.taipeitimes.com/News/taiwan/archives/2007/10/19/2003383783.

Reuveny H and Cohen E. 2004. Resistance of the codling moth *Cydia pomonella* (L.) (Lep., Tortricidae) to pesticides in Israel. *Journal of Applied Entomology*, 128(9-10): 645-651.

Shel'Deshova G G. 1967. Ecological factors determining distribution of the codling moth *Lapspeyresia pomonella* L. in the Northern and Southern Hemispheres. *EntoMolecular Review*, 46: 349-361.

Staff W. 2007. *Council Halts Chilean Apple Imports after Moth Larva Appears*. http://www.taipeitimes.com/News/taiwan/archives/2007/05/08/2003359963.

Sugonyaev E S. 2009. IPM programs in commonwealth of independent states and Russia // Peshin R and Dhawan A K. *Integrated Pest Management: Dissemination and Impact*. 2nd ed. Dordrecht, the Netherlands: Springer, 455-479.

Tang J, Wang S and Johnson J A. 2007. Biology and thermal death kinetics of selected insects // Tang J, Mitcham E, Wang S and Lurie S. *Heat Treatments for Postharvest Pestcontrol: Theory and Practice*. Trowbridge, UK: Crwmwell Press, 133-161.

Timm A E, Geertsema H and Warnich L. 2006. Gene flow among *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) geographic and host populations in South Africa. *Journal of Economic Entomology*, 99: 341-348.

Wearing C H. 1979. Integrated control of apple pests in New Zealand 10. population dynamics of codling moth in Nelson. *New Zealand Journal of Zoology*, 6: 165-199.

Wearing C H, Hansen J D, Whyte C, Miller C E and Brown J. 2001. The potential for spread of codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) via commercial sweet cherry fruit: a critical review and risk assessment. *Crop Protection*, 20: 465-488.

Willett M J, Neven L and Miller C E. 2009. The occurrence of codling moth in low latitude countries: validation of pest distribution reports. *HortTechnology*, 19: 633-637.

Wright A. 2007. *Codling Moth Found on New Zealand Apples in Taiwan*. http://www.biosecurity.govt.nz/media/14-04-07/moth.htm.

(责任编辑:杨郁霞)

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2015.04.014

新疆不同寄主植物苹果蠹蛾成虫动态调查

李贤超[1], 吕昭智[2*], 李 涛[3], 李 子[4], 罗树凯[5], 张祥林[6], 罗朝辉[2]
[1]新疆生产建设兵团农业技术推广总站,新疆 乌鲁木齐 830011; [2]中国科学院新疆生态与地理研究所,新疆 乌鲁木齐 830011; [3]新疆生产建设兵团第十二师农科所,新疆 乌鲁木齐 830088; [4]新疆生产建设兵团第一师 14 团,新疆 阿拉尔市 83300; [5]新疆生产建设兵团第一师农科所,新疆 阿拉尔市 83300; [6]新疆出入境检验检疫局,新疆 乌鲁木齐 830063

摘要:【背景】苹果蠹蛾是世界性重大检疫害虫,新疆是我国最早发现该虫的地区。监测苹果蠹蛾的种群动态能提高控制效率并阻止其在非疫区蔓延。【方法】利用性诱剂于 2008~2009 年期间监测苹果蠹蛾成虫在苹果园、梨园、李子园、桃园等生境下种群动态。【结果】苹果蠹蛾在北疆有 2 个明显高峰期,越冬代成虫高峰期为 5 月中旬至 6 月上旬,第 1 代成虫高峰期为 7 月中旬至 8 月中旬;在南疆有 3 个明显高峰期,分别为 6 月底至 7 月上旬、7 月下旬至 8 月上旬和 8 月底至 9 月中旬。南疆和北疆的种群数量差异不是很大,单个性诱剂高峰期的种群数量小于 10 头,平均 0.5~2.0 头;同一区域苹果蠹蛾在不同作物之间存在一定的差异,但集中在苹果园和桃园。【结论与意义】新疆北疆苹果蠹蛾成虫一年一般发生 2 代,南疆 3 代。苹果蠹蛾以苹果园为主要发生区域,同一区域的苹果蠹蛾在相邻果园的苹果、葡萄、梨树上的种群动态具有密切相关性。苹果蠹蛾的种群动态为准确判定防治关键期提供依据,其在不同作物之间的相关性,为区域重点监测对象的判定提供基础依据。

关键词: 苹果蠹蛾; 种群动态; 相关性分析

The population dynamics of codling moth adults from different host plants in Xinjiang

Xian-chao LI[1], Zhao-zhi LU[2*], Tao LI[3], Zi LI[4], Shu-kai LUO[5], Xiang-lin ZHANG[6], Chao-hui LUO[2]
[1]*Bingtuan Agricultural Extension Station, the Xinjiang Production and Construction Crops, Urumqi, Xinjiang* 830011, *China*; [2]*Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang* 830011, *China*; [3]*Agriculture Science Research Institute, the Xinjiang Production and Construction Crops Twelfth Division, Urumqi, Xinjiang* 830088, *China*; [4]*Xinjiang Production and Construction Crops First Division* 14 *Group, Alaer, Xinjiang* 843300, *China*; [5]*Agriculture Science Research Institute, the Xinjiang Production and Construction Crops First Division, Alaer, Xinjiang* 843300, *China*; [6]*Entry-exit Inspection and Quarantine Bureau, Urumqi, Xinjiang* 830063, *China*

Abstract:【Background】Codling moth is an important quarantined pest worldwide, and in China, it was first reported in Xinjiang Province. Creating a functional monitoring system for population dynamics can improve the efficiency of control and prevent widespread in non-endemic area.【Method】Population dynamics of codling moth were monitored by pheromone traps in apple, pear, plum, and peach orchards in 2008~2009 in Xinjiang.【Result】Codling moths in northern Xinjiang have two main population peak time: the first generation adults is from mid-July to mid-August and the overwintering adult peak is from mid-May to early June. In southern Xinjiang, there are three population peak, i.e. at the end of June to early July, end July to early August and end of August to mid-September. The abundance of moths is not significantly different between southern and northern Xinjiang. During peak times of the year, less than 10 individuals were attracted by the one trap, averaging from 0.5 to 2.0 moths per trap. Codling moth abundance also varied among orchards being more abundant in apple and peach orchards.【Conclusion and significance】Codling moth adults are known to have two generations in northern Xinjiang and three generations in southern part of the province. Codling moths populations concentrate in apple orchards, and population size is positively correlated with distance from apple, and pear orchards. Population dynamics provide the basis for forecasting the window of control and benefit for the regional monitoring and management.

Key words: codling moth; population dynamics; correlation analysis

收稿日期(Received): 2015-05-29 **接受日期(Accepted)**: 2015-07-18
基金项目: 中国科学院院地合作项目(Y432191); 国家质量监督检验检疫总局行业专项(201310091)
作者简介: 李贤超, 男, 高级农艺师。研究方向: 病虫监测预防。E-mail: lxchao1218@163.com
*通讯作者(Author for correspondence), E-mail: zhaozhi@ms.xjb.ac.cn

苹果蠹蛾 *Cydia pomonella*(L.)是严重危害苹果的重要入侵害虫,原产于欧亚大陆中南部地区,1953 年在我国新疆首次发现该虫(张学祖,1957),20 世纪 80 年末该虫传入甘肃省河西走廊,随后加速向东扩散;至 2010 年,苹果蠹蛾已扩散至甘肃、宁夏、内蒙古、黑龙江、吉林等 5 省区,对我国的苹果、梨等水果的生产安全造成了极大威胁(金瑞华,1997; 林伟,1996; 杨瑞,2008; 张润志等,2012)。新疆作为苹果蠹蛾在我国的最早发生地,不仅是我国境内苹果蠹蛾发生的重灾区,也是其传出源地,评估该地区苹果蠹蛾的种群动态,不仅对新疆的苹果蠹蛾防治有重要的指导意义,同时对全国苹果、梨等相关产业的健康持续发展有重要战略价值(努尔古丽·马坎等,2014)。

从发现到全国大范围的传播,苹果蠹蛾的监测和研究工作在中国处于断续状态。张学祖(1957)比较系统地研究了该害虫的生活史、生活习性、危害及一些相应的防治技术。自 2000 年至今,我国研究者对苹果蠹蛾在各地苹果园中的动态分布进行了调查和研究,结果显示,其在不同区域存在较大差别,成虫始见期从新疆南疆的 4 月中旬(谭博等,2011)到黑龙江的 5 月中旬(赵星民,2011),年发生世代数 2~4 代不等(阿地力·沙塔尔等,2011; 何树文等,2014; 林伟丽等,2007; 谭博等,2011; 徐婧等,2012; 张春海和苏红霞,2012; 周昭旭等,2008)。于江南等(2004)对乌鲁木齐市区苹果蠹蛾越冬代成虫羽化始期进行了研究,并对早期成虫动态进行了初步分析,但未对全年度世代进行详细划分。当前,利用性诱剂监测苹果蠹蛾已成为重要的监测手段,多位研究者对各种性诱剂效果进行比较分析,探讨适宜的性诱工具和性诱芯(阿地力·沙塔尔等,2011; 李晶等,2011; 罗晓亮和刘刚,2013; 王成祥等,2014; 张新平等,2011);石磊等(2009)以诱捕器捕获量反映的苹果蠹蛾时空动态,可用来进行苹果蠹蛾生活史及发生世代数的研究,从而为有效控制该虫提供基础信息。

我国对新疆南北疆苹果蠹蛾种群发生动态的主要研究区域集中在南疆阿克苏(林伟丽等,2007; 王兰等,2011; 王同仁等,2014; 魏乐樵,1985; 徐婧等,2012; 张新平等,2011),此外在伊犁地区(张煜等,2014)、奎屯(戴德成,2009)、乌鲁木齐(阿地力·沙塔尔等,2011; 于江南等,2004)、库尔勒市(谭博等,2011; 张春海和苏红霞,2012)和喀什地区(王成祥等,2014)也有一些监测工作。以上研究主要集中在单一苹果寄主作物上,而对苹果园以外的作物没有进行系统性评估。随着新疆林果业耕作模式和主要经济作物构成发生的变化,可能对苹果蠹蛾的动态造成影响,因此加强新疆地区苹果蠹蛾的种群动态监测对区域性的防控有指导意义。

本研究以性诱剂为主要监测工具,研究不同作物上苹果蠹蛾种群动态发生规律及其相关性,为精确预报和区域化防控指导提供参考。

1 材料与方法

1.1 田间布局

北疆:乌鲁木齐五一农场(北纬 43°55′55,东经 87°27′)和头屯河农场(北纬 43°50′46″,东经 87°28′49″),该区域年平均气温 6.5 ℃,≥10 ℃积温 3400 ℃,年平均降水 228.8 mm,年蒸发量 2647 mm,年日照 2800 h,无霜期 150~160 d。

南疆:阿拉尔市(北纬 40°30′15″,东经 81°18′15″),该区域年均气温 10.7 ℃,均气温℃积温 4113 ℃,年均降水量 52 mm,年日照 2900 余 h,4~10 月平均日照 9.5 h,无霜期 220 d。

1.2 试验材料

供试作物:乌鲁木齐五一农场的试验作物为苹果及邻近李子、葡萄和玉米,其中苹果园种植年限 10 年以上,葡萄园和李子园为 7 年以上成龄果园,玉米为当年种植;头屯河农场的试验作物为桃树及啤酒花和葡萄,桃园、葡萄园和啤酒花地均种植 3~5 年;阿拉尔市农一师农科所的试验作物为苹果、梨和临近苹果园的果园,园龄 15 年以上。果园防治措施基本一致,主要防治对象为梨小食心虫。

供试诱芯:苹果蠹蛾性诱芯(宁波纽康生物科技有限公司)。

1.3 试验方法

在果园和地块周边用细铁丝将诱捕器悬挂在地面 1.5 m 处外围树枝或空旷的主干上,大田人工设置立架,高度与树枝上齐,每个诱捕器相距 50 m,诱芯每 2 个月更换 1 次,换下的诱芯及时回收,统一销毁。按照不同区域不同生境作物的布局情况布置诱捕器,每种作物的监测诱捕器不少于 5 个。

2008 年,北疆乌鲁木齐的五一农场和头屯河农场试验于 7 月 30 日~9 月 27 日进行,阿拉尔市试

验于 8 月 6 日~9 月 27 日进行;各试验区按照每 5 日调查 1 次的方法。2009 年度,北疆乌鲁木齐试验时间为 4 月 26 日~9 月下旬,南疆阿拉尔为 6 月中旬~9 月下旬;北疆每个试验点按照 5~7 d 调查 1 次,南疆按照每 3 d 调查 1 次,分别记载每个诱捕器所诱到的苹果蠹蛾雄成虫数量,分析成虫动态。同一年度在同一区域的调查方法保持一致。

1.4　数据分析

数据分析采用 SPSS19.0 软件,按照监测时间、区域比较各监测点平均值,分析相关性。

2　结果与分析

2.1　苹果蠹蛾成虫种群动态

2009 年北疆苹果蠹蛾出现 2 个明显的羽化过程(图 1),越冬代出现在 5 月上旬~6 月底,第二发生阶段为 7 月初~10 月初。其中越冬代成虫高峰期为 5 月中旬~6 月上旬;第 1 代成虫发生高峰期在 7 月中旬~8 月中旬,第 2 代在 9 月上中旬有一个小的高峰期。

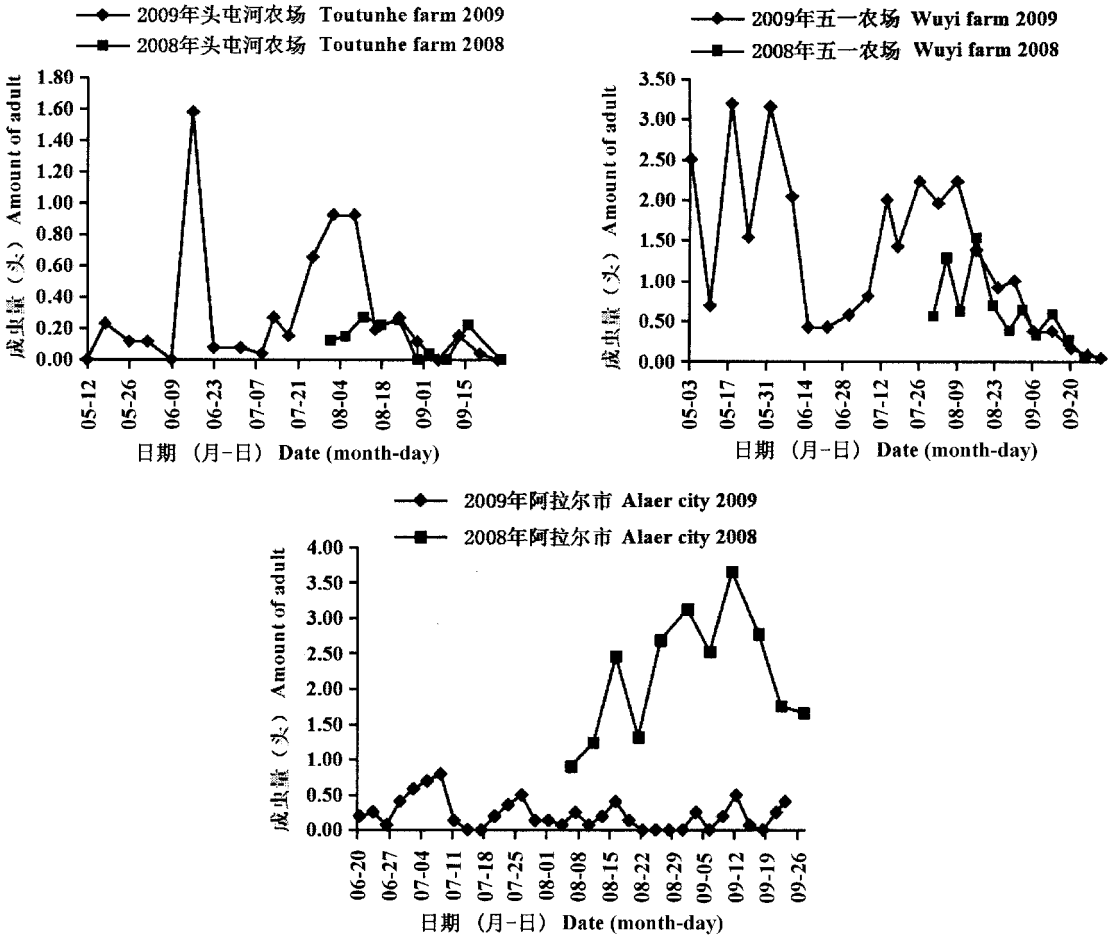

图 1　新疆苹果蠹蛾种群动态(2008~2009)

Fig.1　Codling moth population dynamics in orchards in Xinjiang (2008~2009)

乌鲁木齐头屯河农场和五一农场的成虫整体种群动态在 2009 年表现存在一定差异:五一农场越冬代成虫羽化高峰期在 5 月中旬至 6 月上旬,头屯河农场在 6 月上旬;1 代成虫高峰期五一农场出现在 7 月中旬至 8 月上旬,头屯河农场出现在 7 月下旬至 8 月上旬;五一农场成虫种群发生期较头屯河偏早 5~7 d。五一农场和头屯河农场的苹果蠹蛾发生期出现较大差异,初步分析与两地监测区域作物布局存在差异有关,五一农场苹果园较多,头屯河农场监测区没有苹果,作为苹果蠹蛾的最主要寄主,苹果园的存在对苹果蠹蛾的发生具有较强的影响作用,苹果园诱集数量均多于其他作物,且发生期偏早。

南疆阿拉尔市苹果蠹蛾成虫监测结果表明:2008 年和 2009 年同期监测的成虫发生趋势具有一致性,2008 年成虫数量远高于 2009 年,这一监测结果差异较大的原因有可能和气候以及防治措施存在较大关系(Hussain *et al.*,2015)。2009 年监测期

间,成虫高峰期出现在 6 月下旬至 7 月上旬、7 月中旬至 7 月下旬、8 月上旬至 8 月中旬和 9 月上旬至 9 月中旬。

2.2 不同作物上苹果蠹蛾种群动态

2.2.1 *不同作物种群动态分析* 同一年度、同一区域的苹果蠹蛾在不同作物上发蛾高峰表现较为一致,但发生量有一定差别(图 2)。

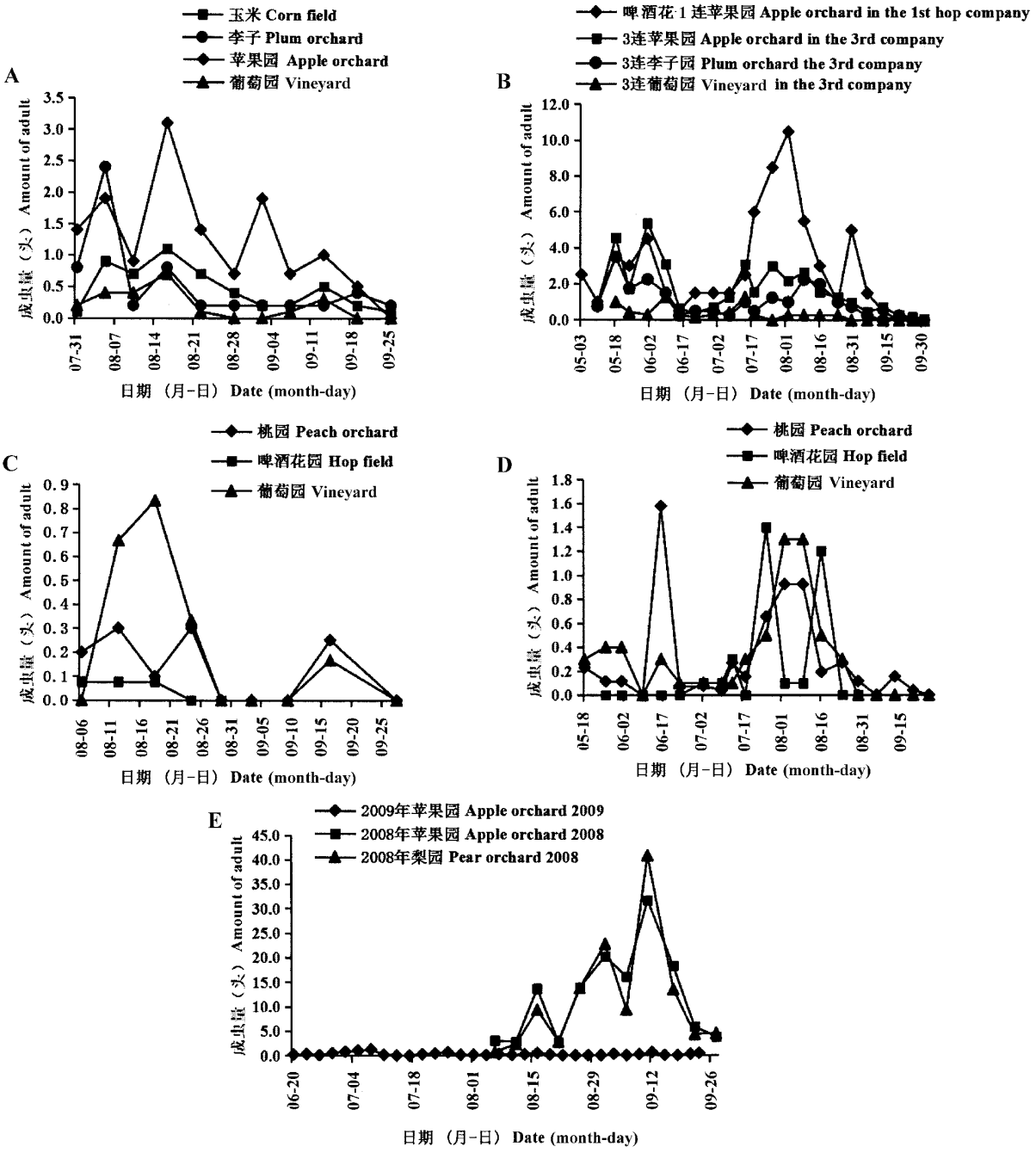

图 2 不同作物上的苹果蠹蛾成虫动态

Fig.2 Codling moth dynamics in different orchards

A:五一农场 2008 年;B:五一农场 2009 年;C:头屯河农场 2008 年;D:头屯河农场 2009 年;E:阿拉尔市。

A: Wuyi farm in 2008; B: Wuyi farm in 2009; C: Toutunhe farm in 2008; D: Toutunhe farm in 2009; E: Alaer city.

在北疆的五一农场,2008 年苹果园内单个性诱芯平均累计诱集成虫 13.50 头,大于同期李子园、玉米田、葡萄园的 5.80、5.10、2.20 头;2009 年啤酒花 1 连苹果园和 3 连苹果园平均累计诱集成虫分别为

65.00 和 36.55 头,均大于同期李子园、葡萄园的 21.50、6.86 头。2 年监测结果表明,五一农场的苹果园为该区域苹果蠹蛾的主要发生源,其次为李子园。在头屯河农场,2008 年度葡萄园内平均累计诱集成虫 2.00 头,大于同期桃园、啤酒花园的 0.95、0.15头;2009 年葡萄园诱集6.00头,大于桃园、啤酒花园的 5.92、3.30 头。总体监测数量较少,表明该区域作物种植结构和布局不利于苹果蠹蛾的发生。

南疆阿拉尔市苹果蠹蛾发生量在 2008 和 2009 年有较大差异。2008 年苹果园和梨园中的苹果蠹蛾平均累计数量比较接近,分别为 131.40 和 123.90 头;2009 年仅对苹果园进行监测,年度单个性诱点平均诱集数量仅为 9.07 头。

2.2.2　不同作物苹果蠹蛾种群动态相关性分析　对监测结果进行相关性检验:2008 年五一农场苹果园成虫数量与玉米地和葡萄园的虫数相关,但与李子园不相关;玉米地成虫仅与葡萄园相关;葡萄园蛾量与李子园不相关(表 1);头屯河农场桃园成虫数量与葡萄园无显著相关($r=0.571$);阿拉尔市苹果园和梨园成虫极显著相关($r=0.945$)。

表 1　2008 年五一农场苹果蠹蛾诱集数量平均值相关性检验表

Table 1　Average number of codling moth by sex trap correlation test table in Wuyi farm in 2008

	苹果园 Apple	玉米地 Corn	葡萄园 Vineyard	李子园 Plum
苹果园 Apple orchard	1			
玉米地 Corn field	0.687*	1		
葡萄园 Vineyard	0.712*	0.828**	1	
李子园 Plum orchard	0.453	0.468	0.462	1

* 皮尔森（Pearson）相关,相关性在 0.05 层上显著(双尾)。** 相关性在 0.01 层上显著(双尾)。

* Pearson correlation coefficient, significant at $P<0.05$. ** Significant at $P<0.01$.

2009 年五一农场啤酒花 1 连苹果园和 3 连苹果园苹果蠹蛾成虫显著相关(表 2),表明同一生境下的寄主上,苹果蠹蛾的发生动态具有显著相关性;啤酒花 1 连苹果园和 3 连葡萄园、李子园的成虫动态之间无显著相关性,3 连苹果园、葡萄园以及李子园中成虫动态极显著相关,表明不同区域的苹果园和其他寄主作物之间的苹果蠹蛾成虫发生动态没有明显相关性;在同一区域内,各监测作物间苹果蠹蛾种群动态显著相关,表明近邻区域苹果蠹蛾成虫种群具有高度一致性。

2009 年头屯河农场葡萄园和桃园的苹果蠹蛾成虫动态存在显著相关性($r=0.628$),但两者和啤酒花园的苹果蠹蛾成虫动态无显著相关性($r=0.139$)。

表 2　2009 年头屯河农场苹果蠹蛾诱集数量平均值相关性检验表

Table 2　Average number of codling moth by sex trap correlation test table in Toutunhe farm in 2009

	A1	A3	V3	P3
A1	1			
A3	0.502*	1		
V3	0.001	0.586**	1	
P3	0.403	0.826**	0.498*	1

A1:啤酒花 1 连苹果园;A3:3 连苹果园;V3:3 连葡萄园;P3:3 连李子园。* 皮尔森（Pearson）相关,相关性在 0.05 层上显著(双尾)。** 相关性在 0.01 层上显著(双尾)。

A1: Apple orchard in the 1st hop company; A3: Apple orchard in the 3rd company; V3: Vineyard in the 3rd company; P3: Plum orchard in the 3rd company. * Pearson correlation coefficient, significant at $P<0.05$. ** Significant at $P<0.01$.

3　讨论

北疆苹果蠹蛾主要有 2 个高峰期,越冬成虫高峰期在 5 月中旬至 6 月上旬,第 1 代成虫高峰期在 7 月中旬至 8 月中旬,这和阿地力·沙塔尔同期研究结果有一定差别,可能和局部的生态气候或者作物布局有一定关系。在苹果园的诱捕数量和阿地力·沙塔尔研究结果接近,平均单日单个性诱剂诱集量 0.05~0.50 头。

苹果蠹蛾 2009 年在南疆阿拉尔市苹果园发生趋势和徐婧等(2012)、王同仁等(2014)在阿克苏的研究结果一致,但与林伟丽等(2006)在阿拉尔的调查结果存在较大差异,2009 年阿拉尔市单个性诱剂平均单日诱集量 0.10~0.50 头,远低于同期徐婧和王同仁在其他区域和 2008 年的诱集数量,可能与气候条件和防治措施有较大的关系。

本研究在非果园环境中能监测到一定数量的苹果蠹蛾,表明了苹果蠹蛾在不同生境下存在一定的迁移,这对果园的布局有一定的借鉴价值,但最大的迁移距离没有得到确认。

我国对苹果蠹蛾成虫种群动态处于监测水平上,对种群动态预测未见报道。国外在种群模拟和预测方面开展了大量的工作。Shaffer & Gold (1985)利用计算机模拟技术结合生物气候学的相关原理对整个生育期的苹果蠹蛾进行了模拟预测,

用于精确指导苹果蠹蛾发生量的预测;Trapman *et al.*(2004)研究建立了苹果蠹蛾最适防治时间预测模型,用于指导有机果园的苹果蠹蛾综合防治;Hussain *et al.*(2015)认为气候是影响苹果蠹蛾种群变化的重要因素。国外研究结果对于国内苹果蠹蛾种群的预测具有较高的参考价值;国内苹果蠹蛾的种群动态与趋势预测研究需要依托地区做好长期系统性监测,在苹果蠹蛾的田间自然种群生命表基础上,结合区域的气候和管理措施建立适宜本区域的预测预报模型,为今后苹果蠹蛾的区域化预测和控制提供技术服务。

参考文献

阿地力·沙塔尔, 陶万强, 张新平. 2011. 5 种引诱剂田间诱捕苹果蠹蛾效果比较. 西北农业学报, 20(3): 203-206.

戴德成. 2009. 奎屯垦区苹果蠹蛾的发生及综合防治. 农村科技, (1): 27-28.

何树文, 达世彩, 高宜明, 伍东, 王泽浩. 2014. 苹果蠹蛾测报与防治适期确定方法研究. 现代农业科技, (5): 169.

金瑞华. 1997. 检疫性危险害虫苹果囊蛾在我国分布的调查研究. 中国科学基金, (2): 124-125.

李晶, 刘燕, 熊英, 章玲, 石生香, 阿丽亚, 马德成. 2011. 5 种新型性诱剂对苹果蠹蛾诱捕试验初报. 新疆农村科技, (4): 44.

林伟. 1996. 生态因子在苹果蠹蛾地理分布中的作用. 植物检疫, 10(1): 1-7.

林伟丽, 于江南, 薛光华, 王永平. 2006. 新疆阿克苏地区苹果蠹蛾和梨小食心虫消长规律的研究. 新疆农业科学, 43(2): 100-102.

林伟丽, 于江南, 薛光华. 2007. 苹果蠹蛾空间分布型及数学消长模型研究. 新疆农业大学学报, 30(1): 40-43.

罗晓亮, 刘刚. 2013. 不同诱捕器监测苹果蠹蛾成虫及粘虫胶粘杀老熟幼虫效果试验. 甘肃农业, (12): 56-57.

努尔古丽·马坎, 岳朝阳, 张新平, 刘爱华, 阿里木·买买提, 焦淑萍. 2014. 苹果蠹蛾对新疆林果业发展影响的评估及风险管理. 江苏农业科学, 42(6): 129-132.

石磊, 陈明, 罗进仓. 2009. 3 种性诱捕器诱捕苹果蠹蛾效果比较及成虫的时序动态变化. 甘肃农业大学学报, 44(1): 115-117.

谭博, 王岩, 曹晓艳, 刘怀锋, 马兵钢. 2011. 利用性诱剂监测新疆果树食心害虫的消长动态. 新疆农业科学, 48(7): 1287-1291.

王成祥, 张新平, 岳朝阳. 2014. 不同性信息素诱芯对苹果蠹蛾的诱捕效果比较. 安徽农业科学, 42(27): 9341, 9343.

王兰, 冯宏祖, 郭文超. 2011. 苹果蠹蛾消长动态及果园中赤眼蜂释放技术的研究. 新疆农业科学, 48(2): 261-265.

王同仁, 艾买尔江·尼亚孜, 艾山江·吐尔逊, 刘学梅, 王红艳, 古丽白克热木, 钟仕荣, 孙晓, 刘正兴. 2014. 苹果蠹蛾发生规律监测及防效试验. 农村科技, (10): 36-37.

魏乐樵. 1985. 阿克苏苹果蠹蛾发生规律及防治. 新疆农业科学, (2): 22.

徐婧, 姜红霞, 阿丽亚, 郭静敏, 张润志. 2012. 甘肃、新疆、内蒙苹果蠹蛾成虫消长规律. 应用昆虫学报, 49(1): 89-95.

杨瑞. 2008. 苹果蠹蛾 *Cydia pomonella*(L.)在中国的适生性研究. 杨凌: 西北农林科技大学.

于江南, 吾木尔汗, 肉孜加玛丽, 范菊兰. 2004. 苹果蠹蛾越冬生物学及有效积温的研究. 新疆农业科学, 41(5): 319-321.

张春海, 苏红霞. 2012. 梨小食心虫与苹果蠹蛾羽化高峰期的测定与应用. 新疆农垦科技, (11): 21-22.

赵星民. 2011. 北方寒地苹果蠹蛾发生规律及综合防治研究. 植物检疫, 25(1): 87-88.

张润志, 王福祥, 张雅林, 陈汉杰, 罗进仓, 王勤英, 刘万学, 艾尼瓦尔·木沙, 等. 2012. 入侵生物苹果蠹蛾监测与防控技术研究——公益性行业(农业)科研专项(200903042)进展. 应用昆虫学报, 49(1): 37-42.

张新平, 岳朝阳, 刘爱华. 2011. 不同诱捕方法对苹果蠹蛾和梨小食心虫的诱捕效果. 新疆农业科学, 48(2): 306-310.

张学祖. 1957. 苹果蠹蛾(*Cydia pomonella* L.)在我国的新发现. 昆虫学报, 7(4): 467-472.

张煜, 艾尼瓦尔·木沙, 阿力亚·阿不拉. 2014. 新疆苹果蠹蛾性信息素迷向防控技术的示范应用. 中国植保导刊, (4): 66-68.

周昭旭, 罗进仓, 陈明. 2008. 苹果蠹蛾的生物学特性及消长动态. 植物保护, 34(4): 111-114.

Shaffer P L and Gold H J. 1985. A simulation model of population dynamics of the codling moth *Cydia pomonella*. *Ecological Modelling*, 30: 247-274.

Trapman M, Helsen H and Polfliet M. Development of a dynamic population model as a decision support system for codling moth (*Cydia pomonella* L.) management // *Ecofruit*. 13*th International Conference on Cultivation Technique and Phytopathological Problems in Organic Fruit-Growing*, 247-251.

Hussain B, Ahmad B and Bilal S. 2015. Monitoring and mass trapping of the codling moth, *Cydia pomonella*, by the use of pheromone baited traps in Kargil, Ladakh, India. *International Journal of Fruit Science*, 15: 1-9.

(责任编辑:郭莹)

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2015.04.015

陕西省苹果蠹蛾阻截防控实践与入侵路径分析

苏小记*, 王雅丽, 杨 桦, 杨 铭, 郭 萍, 魏 静
陕西省植物保护工作总站,陕西 西安 710003

摘要: 苹果蠹蛾是威胁果业生产的检疫性有害生物,已在新疆、甘肃、宁夏、内蒙古、黑龙江、辽宁、吉林等7个省发生分布。陕西省是我国主要的苹果优质产区,阻截苹果蠹蛾向陕西扩散是保护陕西乃至全国果业生产的重要举措。通过对陕西苹果蠹蛾入侵风险、阻截防控过程取得的数据进行分析,明确了入侵路径,探讨防控策略。由新疆、甘肃、宁夏等地果汁加工原料果携带幼虫远距离方式传入陕西的风险较大;由甘肃、宁夏等地经过陕西西部果区自然传播方式进入陕西的风险加剧。提出加强果汁企业监管,拒绝携带苹果蠹蛾果品进入非疫区,是防止远距离传播的最有效措施;做好自然传播的防控策略与措施研究,已迫在眉睫。

关键词: 苹果蠹蛾; 生物入侵; 传播路径

The practice of codling moth prevention and control and the analysis of intruding ways in Shaanxi Province

Xiao-ji SU*, Ya-li WANG, Hua YANG, Ming YANG, Ping GUO, Jing WEI
Plant Protection General Station of Shaanxi Province, Xi'an, Shaanxi 710003, *China*

Abstract: The codling moth is a quarantine pest of fruits, and occurs in seven provinces, such as Xinjiang, Gansu, Ningxia, Inner Mongolia, Heilongjiang, Liaoning, and Jilin. Reducing codling moth invasion is an important measure for the protection of fruit production in Shaanxi Province and the entire country. This can be done by the analysis of the Shaanxi codling moth invasion risk and pest intercepted data from the inspection office. The presence of larvae in raw fruits to be used for fruit juice processing in regions, such as Xinjiang, Gansu, and Ningxia increases the risk for long-distance dispersal into Shaanxi. The most effective measures to prevent long-distance invasion is to strengthen supervision of juice processing enterprises and forbid the fruit carrying the codling moth to enter non-infested areas. Research on prevention, monitoring, and control strategies is needed.

Key words: codling moth; biological invasion; propagation path

苹果蠹蛾 *Cydia pomanella*(L.) 是全国农业植物检疫性有害生物,也是国际关注的苹果害虫之一,对苹果、梨等水果的生产威胁极大(王福祥等, 2012; 张润志等,2012)。陕西省果区生态环境适宜苹果蠹蛾定殖为害。在全面评价苹果蠹蛾传入风险基础上,从2003年开始,为保护苹果产业安全,陕西省全面开展苹果蠹蛾阻截防控工作。

1 陕西省苹果蠹蛾入侵的风险

陕西省目前没有苹果蠹蛾发生,属于非疫区。苹果蠹蛾自身传播能力较差,自然传播扩散速度较慢;远距离传播主要通过幼虫随果品、包装物由发生区向外扩散。

1.1 苹果蠹蛾在我国发生分布情况

苹果蠹蛾在20世纪50年代进入新疆, 80年代进入甘肃省,之后持续向东扩张;2006年,又在我国内蒙古、黑龙江等多地发现。当前,苹果蠹蛾已在甘肃省酒泉到兰州市的河西走廊地区、平凉市(郭萍等,2015),新疆全境,宁夏回族自治区中卫市、中宁县、青铜峡市(李锋等,2011),内蒙古西部地区,黑龙江南部地区,辽宁葫芦岛,吉林延边等地发生分布(徐婧等,2012)。

收稿日期(Received): 2015-06-17 **接受日期(Accepted)**: 2015-08-12
基金项目: 陕西省农业科技创新研发项目(2015095)
作者简介: 苏小记, 男, 高级农艺师。研究方向: 害虫综合治理。
* 通讯作者(Author for correspondence), E-mail: suxiaoji68@126.com

1.2 苹果蠹蛾远距离入侵威胁

果品运输是苹果蠹蛾远距离传播的主要方式。陕西是我国,乃至全球主要果汁加工基地,有果汁加工企业 27 家,年实际加工能力 340 万 t,可生产浓缩果汁 80 万 t 以上,受各种因素影响,年加工果汁量在 30 万~60 万 t 不等,原料果需求 150 万~240 万 t。陕西省内原料果供应量 150 万 t 左右,不能满足企业生产需求,致使原料果收购价格一直居高不下,新疆、甘肃、宁夏等其他省份原料果进入陕西欲望强烈。当前,原料果以虫蛀果、病残果、下拣果为主,苹果蠹蛾极易通过原料果携带远距离传播扩散。

1.3 苹果蠹蛾自然扩散威胁

苹果蠹蛾近距离传播主要靠自身传播扩散,每年扩散速度 50~60 km。目前,从公布的疫情发生区看,甘肃兰州、宁夏中卫都已发生苹果蠹蛾,这些地区距离陕西省果区直线距离 400 km 左右,间隔地带不但没有自然屏障,而且苹果等寄主作物栽植面积较大,具备自然传播条件。从监测情况看,与陕西省毗邻的一些地区已经多次诱捕到苹果蠹蛾越冬代成虫,定殖风险大。因此,苹果蠹蛾通过自然传播入侵陕西形势不容忽视。

2 陕西省苹果蠹蛾阻截防控成效

为防止和控制苹果蠹蛾人为传入,保护果业安全,陕西省从开展公路阻截、强化检疫监管、科学监测调查等方面入手,建立了一套完整的阻截防控体系(杨桦等,2012),从 2003 年开始,全方位开展了苹果蠹蛾阻截防控工作(吴金亮等,2013)。

2.1 监测调查情况

以疫情处置场、果汁加工企业、果品批发市场、高速公路服务区四周、312 国道沿线及与疫情发生区交界的县区道路沿线果园为重点,以性诱剂监测为手段,形成严密监测网,并按监测技术规范要求,每年的 4 月下旬~9 月下旬,开展苹果蠹蛾成虫监测。5 月下旬~11 月下旬,对上述重点区域监测点附近 1 km内的果园进行拉网式幼虫调查;对高速公路服务区、果汁加工企业、果品批发市场、大型超市周围的加工、食用弃果,剖果检查有无疑似幼虫。及时发现疫点和染疫果品,封锁保护和销毁扑灭。

自 2007 年开展苹果蠹蛾监测以来,在不同区域的果汁加工厂外已 5 次诱捕到成虫,对诱捕到成虫的区域半径 1 km 范围内进行喷药保护;而后在相同区域连续 2 年没有再次捕到。在陕西与甘肃、宁夏交界,主要入陕交通干线周边等高风险区也未诱捕到和发现苹果蠹蛾成虫和幼虫。

2.2 检疫监管情况

苹果蠹蛾检疫监管重点区域是果汁加工企业和果品贮存、销售市场。每年在果品加工企业收购加工期间,果汁企业所在县向企业派驻农业植物检疫人员,协助企业建立检疫检查流程,加强高风险区的无害化管理。发现疫情,按程序进行销毁,并对企业依法立案进行查处。同时,各地植物检疫机构不定期对辖区内果品批发市场及超市的商品果进行检查,核查植物检疫证书,对来自疫区和疫情发生区的果品,必要时进行复检。对有关企业建立植物检疫违法行为登记档案,并与支农惠农政策挂钩,促进企业自觉遵守苹果蠹蛾阻截防控的各项法律法规。

通过多年的监管,共截获染疫果品 2 批次,并进行直接销毁,5 家企业受到处罚;企业自律意识得到加强,调整了经营模式和思路,取消了从疫区、疫情发生区原料果的收购渠道和合同;已有 4 家集团在甘肃、宁夏、新疆建立果汁加工厂,就近收购原料进行加工,减轻了陕西省苹果蠹蛾阻截防控压力。

2.3 公路阻截情况

经陕西省政府批准,自 2007 年开始,陕西在与甘肃、宁夏等疫情发生区交界主要交通干线设立 12 个公路检查站,每年 8 月 15 日~11 月 15 日,公安、交通、农业 3 个部门抽调人员,对进入陕西的运输果品车辆进行检查。对运输商品果的车辆登记放行;对运输虫落果、残次果的,检疫人员严查果品产地,来自非疫情发生区的,登记放行; 来自疫情发生区或无法立即确认果品产地的,进入疫情处置场进行检疫检查,对违规调运行为依法处理,染疫果品深埋销毁。

8 年来,公路检查站共检查运输残次果的车辆 1755 辆,30 万 t 左右。截获并销毁染疫果品 2 批次。通过阻截和宣传,2013 和 2014 年外省原料果入陕数量急剧减少,分别仅有 15 和 8 车。

3 传入路径分析

3.1 远距离传入路径

3.1.1 随风险果传入风险大,商品果传入风险小

根据陕西苹果蠹蛾阻截防控实践结果看，苹果蠹蛾幼虫均在果汁加工原料果中截获，商品果中未发现苹果蠹蛾幼虫，说明苹果蠹蛾人为传入的主要携带者是以落果、病残果、下拣果为主的果汁加工原料果，随商品果携带传入风险较小。

3.1.2　从新疆、甘肃、宁夏等地传入风险大　截获苹果蠹蛾幼虫的果品均是来自新疆、甘肃等疫情发生区，苹果蠹蛾人为远距离传入陕西的主要途径是新疆、甘肃染疫果品随果品调运进入，宁夏疫情发生区果品调运也是重要途径。

3.1.3　果汁加工企业及其周边是传入定殖最大风险区　陕西省几次在送往果汁加工企业的原料里截获到幼虫，在果汁加工厂附近诱捕到苹果蠹蛾成虫。同时，果汁加工原料的外购需求，加大了风险系数，说明苹果蠹蛾在果汁加工企业，特别是周边果园传入定殖的风险最大。

3.2　近距离传播路径

3.2.1　毗邻甘肃、宁夏果区是自然传播的最大风险区　甘肃礼县、秦安、麦积以及平凉市等地已多次诱捕到苹果蠹蛾成虫，宁夏中卫已经是苹果蠹蛾发生区，这些区域与陕西的凤县、陈仓、陇县、千阳、长武、旬邑、黄陵、富县等果区之间均是苹果适生区，苹果连片种植，没有自然隔离区，有利于苹果蠹蛾自然传播。

3.2.2　从内蒙经榆林自然传入风险较小　与内蒙接壤的榆林地区，是毛乌素沙漠南缘风沙草滩区，苹果等仁果类、核果类果树种植面积小，苹果蠹蛾寄主缺乏，不利于自然传播。

4　防控策略

4.1　拒绝携带苹果蠹蛾果品进入非疫区

拒绝携带苹果蠹蛾果品进入非疫区是防止远距离传播的最有效措施，但工作难度大。2012 年长武果汁加工企业对果池进行改造，建立全封闭的风险果快速加工通道，对入陕风险果进行快速加工。翌年在该果汁厂诱到苹果蠹蛾成虫。这说明现有果汁加工企业设备和加工过程并不能彻底防止苹果蠹蛾传入和羽化，阻截防控必须在风险果进入非疫区以前进行。

4.2　加强果汁企业监管

加强果汁企业监管是苹果蠹蛾阻截防控的关键措施。陕西省每一次查获疫点都与果汁企业或原料果有关，说明果汁加工企业原料果的外购，特别是从疫情发生区调运原料果是苹果蠹蛾传入的主要原因，加强果汁企业监管是苹果蠹蛾阻截防控的关键措施。

4.3　研究针对自然传播的防控策略与措施

苹果蠹蛾发生区已十分接近陕西苹果主产区，自然传播也成为苹果蠹蛾传入的重要因素，隔离带建设的防控策略与可行性研究亟待开展；研究防控技术，制定防控预案，加强应对措施已成当务之急。

参考文献

郭萍，杨桦，杨铭，王雅丽，杨少雄，黄艳丽. 2015. 陕西果汁加工原料果检疫监管问题探讨. 陕西农业科学，61(2)：62-63，74.

李锋，雷银山，陈西宁，曹川建，宝山，唐杰，刘自祥，王春良，等. 2011. 苹果蠹蛾入侵宁夏的态势分析与监测建议. 植物检疫，25(2)：89-90.

王福祥，刘慧，杨桦，徐婧，张润志. 2012. 苹果非疫区建设中的苹果蠹蛾监测与防控. 昆虫应用学报，49(1)：275-280.

吴金亮，郭萍，杨桦，杨少雄. 2013. 陕西省检疫性有害生物发生现状与防控管理措施. 陕西农业科学，(6)：266-268.

徐婧，姜红霞，阿丽亚，郭静敏，张润志. 2012. 甘肃、新疆、内蒙苹果蠹蛾成虫消长规律. 应用昆虫学报，49(1)：89-95.

杨桦，宁殿林，吴金亮，杨铭，王雅丽，杨少雄，郭萍，黄艳丽. 2012. 初探苹果蠹蛾阻截防控体系的建立与实践. 植物检疫，26(5)：66-68.

张润志，王福祥，张雅林，陈汉杰，罗进仓，王勤英，刘万学，艾尼瓦尔·木沙，等. 2012. 入侵生物苹果蠹蛾监测与防控技术研究——公益性行业(农业)科研专项(200903042)进展. 应用昆虫学报，49(1)：37-42.

(责任编辑：郭莹)

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2015.04.016

黑龙江省苹果蠹蛾的发生与防治

刘延杰[1*], 林明极[2], 卜海东[1], 刘 畅[1], 冯章丽[1], 顾广军[1]
[1]黑龙江省农业科学院牡丹江分院,黑龙江 牡丹江 157041;
[2]黑龙江省牡丹江市东宁县果蔬管理总站,黑龙江 东宁 157200

摘要: 2005 年在黑龙江省东宁县部分果园中发现苹果蠹蛾的危害,由于当地果树管理粗放、果农认识不足等,最初该虫扩散较快,至 2007 年东宁县苹果蠹蛾发生面积已超过 400 hm^2。苹果蠹蛾在黑龙江 1 年发生 2 代,越冬代成虫发生时间较长,不利于化学防治。相关部门的调查研究表明,以刮老翘皮、束物诱杀、挂杀虫灯、用性诱剂与化学防治相结合能取得理想的防治效果。

关键词: 黑龙江; 苹果蠹蛾; 性信息素缓释剂; 杀虫灯

Occurrence and control of the codling moth *Cydia pomonella* (L.) in Heilongjiang Province

Yan-jie LIU[1*], Ming-ji LIN[2], Hai-dong BU[1], Chang LIU[1], Zhang-li FENG[1], Guang-jun GU[1]
[1]*Branch of Mudanjiang, Heilongjiang Academy of Agricultural Science, Mudanjiang, Heilongjiang* 157041, *China*;
[2]*Mudanjiang Dongning Fruit and Vegetable Management Station, Dongning, Heilongjiang* 157200, *China*

Abstract: The codling moth was first found in the eastern part of Heilongjiang Province in 2005. Due to extensive management, lack of awareness of farmers and natural reasons, the pest spread rapidly, and by 2007, it was present over more than 400 hm^2. Codling moth has two generations per year in Heilongjiang, with overwintering adults making it not conducive to chemical control. Investigations and researches of relevant departments show that the combined methods of scraping old tree bark, beam a decoy, hanging insecticidal lamps, using sex lure and chemical control can achieve the ideal control effects.

Key words: Heilongjiang; codling moth; sex pheromone release agent; insecticidal light

黑龙江省处于我国的东北部,气候寒冷,不适宜果树的大面积种植。在该省的中南部浅山区气候条件较好的区域,栽培了少量具有地方特色的寒地水果,面积 10 万 hm^2 左右,主要有苹果、梨、李、葡萄等,苹果以黄太平、金红、龙丰等 100 g 以下的品种为主,梨以秋香、金香水、苹果梨等秋子梨为主。苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* (L.)是重要的果树害虫,也是我国进境植物检疫性害虫。2006 年在生产中发现其危害,因而受到重视(于广胜,2011)。地方的植保部门、科研单位、果树管理部门对苹果蠹蛾的发生、危害、防治进行了调查和研究,并提出一套适宜生产应用的防治技术。

1 危害情况

苹果蠹蛾在黑龙江省北纬 45°以南比较温暖的果区被发现。2005 年发生于黑龙江省的东宁县(44.07°N)、五常市(44.93°N),最初由于当地果树管理较粗放、果农认识不足、虫害防治不及时、果实包装箱重复使用等问题,苹果蠹蛾呈现向北蔓延的趋势。

2007 年东宁县苹果蠹蛾发生面积超过 400 hm^2,果园受害率 63%,平均蛀果率 6.6%,受害严重的果园蛀果率达 18%,对果品出口造成了严重影响。在黑龙江省的虫害发生区,苹果蠹蛾以幼虫蛀果为害,主要从果和果相贴、果和叶片相邻的果实胴体或花萼处蛀入果内危害;苹果梨和东宁五号梨有 80%以上虫果是从花萼及萼洼部被蛀入。苹果蠹蛾为害的果实蛀果孔较大且不规则,孔外有虫粪堆积,幼虫进入果实后直达果心,且有取食种子的嗜

收稿日期(Received): 2015-06-08 **接受日期(Accepted)**: 2015-10-20
基金项目: 现代苹果产业技术体系专项资金资助项目(CARS-28)
作者简介: 刘延杰, 男, 研究员。研究方向: 寒地果树遗传育种
*通讯作者(Author for correspondence), E-mail: nmdjl100@163.com

好,进而造成幼果发育受阻易脱落。一个果实内通常只有 1 头幼虫,幼虫具有转果为害习性,一头幼虫蛀食 3~4 个果实。幼虫发育成熟后从原虫道脱果或向果皮方向另蛀一虫道脱果(王兆平,2012)。

2　发生规律

因黑龙江气候寒冷,苹果蠹蛾一年只发生 2 代,虫害发生期在 5 月下旬至 9 月下旬。苹果蠹蛾以老熟幼虫(3 龄以上)在树干的老翘皮内、果树根际和其他果园废弃物中越冬,越冬幼虫在根际越冬量最大。树干积雪层内和根际土内存活数量多,而树干老翘皮内越冬的部分老熟幼虫有死亡现象,原因主要是树干上喷洒的残留农药和白僵菌能直接杀死幼虫,同时暖冬能使部分幼虫饥渴死亡。

第 2 年春季越冬幼虫陆续化蛹,蛹期一般 15 d(少数为 25 d)左右。到 5 月下旬(苹果开花盛期)蛹变为成虫,在果园里准备产卵,越冬代成虫形成后在 6 d 之内产卵,卵期 7 d 或更长, 6 月初(坐果期)是产卵盛期。卵主要产在果实、叶片和枝条上,一般在果实周围的幼嫩叶片和果实向阳面产卵较多。卵孵化后,初孵幼虫在果实和叶面上爬行,寻找适当部位进入果内,在此期间如遇到大雨,会影响幼虫钻果。刚孵化的幼虫会咬破果皮并将其吐在果实外部不吞食,这给化学防治带来一定的困难。苹果蠹蛾幼虫在果内生活 25 d 左右后脱果,在 7 月上旬开始出现脱果幼虫。老熟幼虫脱果后爬到树干上寻找适宜的地方作茧化蛹形成第 1 代成虫,第 1 代老熟幼虫适应性很强,只要在遮风、遮雨、遮光的地方均可以作茧化蛹,若树干上有合适的作茧场所即不往树下爬行,这种特性有利于物理防治(树干设置诱集带)。在 2012 年的树干束物试验中发现,受害严重的果园中,1 株树的诱集带上可消灭 291 头老熟幼虫。该阶段害虫蛹期较整齐,大部分蛹在 7~14 d 内羽化,部分蛹期达到 16 d。经调查,在黑龙江发生区,诱集带(树干基部绑旧衣物)内 98%以上的第 1 代老熟幼虫会继续繁殖下一代,且死亡率非常低。第 1 代成虫形成以后继续产卵,产卵部位主要为果实,卵孵化后继续为害果实,到 9 月份气温变凉,幼虫脱果,在树干及根基部寻找合适的地方作茧越冬。

3　防治技术

3.1　人工防治

(1)刮老翘皮与清园。根据苹果蠹蛾在老翘皮、土块和化肥袋、纸箱等果园废弃物中越冬的特点,在果树萌芽前刮老翘皮,并把老翘皮和收集的枯枝落叶及其他果园废弃物集中烧毁,可消灭越冬幼虫。(2)疏果时摘除受害的果实并切开虫果杀死幼虫。(3)束物诱杀。对于树干上无老翘皮或老翘皮少的果树,大部分脱果幼虫是通过树干下树,在地面上寻找化蛹和越冬场所。因此,在树干上设置瓦楞纸、旧衣物等(图 1),对苹果蠹蛾脱果老熟幼虫有很好的引诱作用。黑龙江省 7~8 月正是第 1 代老熟幼虫作茧化蛹繁殖下一代的时期,该时段幼虫的预蛹与蛹期较短,所以每隔 7~8 d 需检查一次束物,定期消灭老熟幼虫。对栽植品种较多的果园,束物重点设在金红、龙冠、龙丰、黄太平、新帅、奎二等苹果树和早酥梨、苹果梨、金香水等梨树上。越冬幼虫对越冬场所的要求较高,用旧衣物诱集试验发现,苹果蠹蛾幼虫在颜色较深、较厚、透风性差的布料中作茧越冬数量较多(林明极等,2012)。

图 1　束物诱杀方法

Fig.1　Method of tying attractants on the tree trunk

3.2　杀虫灯诱杀

根据害虫的趋光性,在果园中挂频振式杀虫灯诱杀成虫。通过粘板诱杀成虫只能消灭雄虫,但利用杀虫灯可消灭雌雄成虫。每天挂灯诱杀时间可定为 19:00~23:00,在此期间一盏灯最多能捕捉 45

头成虫。灯与灯之间距离可设为 30~50 m。落地式杀虫灯效果不及悬挂式杀虫灯,杀虫灯的悬挂高度必须达到树冠的上半部(周进华等,2014)。

3.3 粘虫胶粘杀脱果幼虫

苹果蠹蛾老熟幼虫脱果后会在树干上爬行寻找作茧场所,如果树干上无老翘皮其会下树寻找合适的场所。根据这种特性,在树干基部设置粘虫环能有效控制下一代繁殖蔓延(图 2)。树干涂胶最佳时间:第 1 次 7 月上旬,第 2 次 7 月下旬,第 3 次 8 月下旬。涂胶宽度可在 8 cm 以上。结合刮治老翘皮效果更为明显。

图 2 粘虫胶粘杀法

Fig.2 Method of controlling by sticky adhesive

3.4 性诱芯防治

利用性信息素测报苹果蠹蛾成虫发生高峰期并诱杀成虫,诱杀成虫可利用水盆式诱捕器、三角形沾虫板等。诱捕器间距为 15~20 m。利用水盆式诱捕器时要注意保持盆中水位,利用沾板式诱捕器时注意观察沾板的粘性,若粘性变差要及时更换沾板。

3.5 药剂防治

根据成虫发生情况和产卵情况使用药剂。根据每年的监测,苹果蠹蛾成虫在黑龙江省发生有一定的规律性,越冬代成虫一般在果树开花时开始活动,到幼果期达到活动高峰,该时期为第 1 次药剂防治关键期(王庆波等,2014);当卵果率达到 0.1% 时可以进行喷药防治,隔 10 d 喷一次。第 2 次药剂防治关键期在 7 月中下旬~8 月上旬。防治苹果蠹蛾必须选择具杀卵和胃毒作用的药剂,如杜邦奥得腾、灭幼脲 3 号、甲维盐、高效氯氰菊酯、2.5% 高效氯氟氰菊酯等。

3.6 迷向法防治

迷向法防治,即利用苹果蠹蛾信息素缓释剂防治。该防治技术正在试验、示范中。在黑龙江、甘肃、宁夏等地区利用迷向法防治苹果蠹蛾的试验表明,在苹果蠹蛾发生密度较小的地区,迷向丝(澳大利亚 Bioglobal 公司进口)采用 660 根 · hm^{-2} 的悬挂密度可以达到良好的防治效果(涂洪涛等,2012)。

参考文献

林明极, 焦晓丹, 隋广义. 2012. 苹果蠹蛾老熟幼虫诱杀技术. 应用昆虫学报, 49(1): 104-108.

涂洪涛, 张金勇, 罗进仓, 王春良, 宝山, 刘延杰, 陈汉杰. 2012. 苹果蠹蛾性信息素缓释剂的控害效果. 应用昆虫学报, 49(1): 109-113.

王庆波, 林明极, 郭金洪, 周进华. 2014. 诱杀苹果蠹蛾老熟幼虫试验分析. 中国林副特产, (3): 15-16.

王兆平. 2012. 民勤县苹果蠹蛾的发生规律及防治措施. 甘肃农业科技, (9): 53-54.

于广胜. 2011. 牡丹江苹果蠹蛾的发生规律及防治措施. 中国植保导刊, 31(7): 47-48.

周进华, 林明极. 2014. 东宁苹果蠹蛾发生规律及防治技术. 中国林副特产, (2): 63-64.

(责任编辑:杨郁霞)

View publication stats