

小菜蛾在温带地区越冬研究进展

马春森*, 马 罡, 杨和平

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要:小菜蛾是世界性重要害虫。在热带和亚热带地区冬季的十字花科植物上能正常发育繁殖,可见到各种虫态。但在温带冬季十字花科植物不能生长的地区,小菜蛾的越冬成为一个重要生态学问题。综述了亚洲、北美洲和欧洲小菜蛾越冬的研究进展。小菜蛾在日本的北海道、本州岛的北陆和东北大部分地区不能越冬,越冬北限相当于冬季积雪覆盖时间为 60d 的区域;在中国,小菜蛾不能在寒冷的东北地区越冬,在长江中下游以南地区冬季可见各虫态,但越冬北限尚不清楚;小菜蛾在冬天气候温和的韩国以及澳大利亚东南部继续发生;北美洲的加拿大西部和安大略地区大量的试验证明小菜蛾不能成功越冬,在美国南部小菜蛾冬季可正常发生,北部小菜蛾的越冬尚未见系统研究报道,但确认春季从南部运输的受小菜蛾感染的甘蓝等种苗是美国北部的重要虫源。小菜蛾在欧洲各地越冬的系统研究未见报道,没有证据表明在英国小菜蛾会发生有显著意义的越冬。目前小菜蛾越冬研究主要采用冬季直接试验观察和基于耐寒性试验的越冬预测两种方法。冬季直接试验观察法包括:(1)利用人工饲养的小菜蛾在田间各种潜在的越冬场所的越冬试验;(2)在秋播、野生或残留的十字花科植物上进行冬季种群的系统抽样调查;(3)越冬前后在前茬为十字花科植物的田块广泛搜寻普查小菜蛾的存活个体。基于耐寒性试验的越冬预测法:在获取小菜蛾越冬场所温度的基础上设计低温处理模式,试验低温处理后小菜蛾的存活率及后续发育和生殖。将试验数据和各地气温或小气候相结合,对小菜蛾越冬可能性进行推断。

关键词:小菜蛾;温带地区;越冬;耐寒性;低温

Overwintering of the diamondback moth, *Plutella xylostella* in temperate countries

MA Chunsen*, MA Gang, YANG Heping

Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: The diamondback moth (DBM), *Plutella xylostella*, is one of important horticultural pests worldwide. In the tropics and sub-tropics where crucifers are planted throughout the year all life stages of DBM appears at any time. However, in temperate regions, where crucifers are not grown year-round, hibernation of DBM becomes a significant ecological issue during noncropping periods. Research progress on hibernation of the DBM in Asian, North American and European countries are reviewed in this article. The detailed original research approaches and important experiment data were demonstrated. In Japan, detailed experiments showed that DBM cannot overwinter in Hokaido and a large part of Tohoku and Hokuriku districts of Honshu. The north limit of hibernation of DBM was supposed where the duration of continuous snow cover is longer than 60 days. In China, there is evidence showing that DBM cannot overwinter in chilly North East China, but it feeds and reproduces normally during winter on south China. However, the north limit of hibernation in China remains unknown. Researchers found that DBM occurs normally during mild winter in South Korea and south-east of Australia. In North America, the detailed experiment results provided evidence that DBM cannot overwinter in Ontario and West Canada. DBM was found to feed and reproduce normally in south United States. Whether DBM hibernates in north United States remains a controversial topic. Seedlings grown in the southern states contaminated with DBM had been proven to be one of the major sources of diamondback moth infestations in northern states. In European countries, it is not known

基金项目:公益性行业(农业)科研专项资助项目(200803001)

收稿日期:2009-12-31; **修订日期:**2010-03-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ma_chunsen@caj.ac.cn

whether DBM can survive in winters in situ. The experiments have consistently shown very little survival in the U. K. , and give no reason to suppose that overwintering occurs at any significant degree. There are two approaches to explore the overwintering of DBM, i. e. direct approach via field experiments and indirect approach via forecasting based on cold tolerance experiments and environment temperature. The common methods of the direct approach include field cage experiments with all life stages of DBM under the snow cover, plant debris, volunteer plants, soil gaps; field investigations for temporal dynamic of all life stages of DBM in winter crops, and field survey for natural hibernation populations of DBM on cruciferous crops before and after winter. The indirect approach is to deduce whether DBM can overwinter or not based on the results of the cold hardness tests and temperatures in the hibernation environment. World winter temperature has increased due to climate change and global warming, which has brought significant impact on the hibernation of DBM. It should be further studied the north limit of hibernation associated with the migration of DBM in temperate countries to provide evidence for the forecast and management of DBM.

Key Words: *Plutella xylostella*; diamondback moth; temperate countries; overwintering; hibernation

小菜蛾(*Plutella xylostella*)是十字花科作物的世界性重大害虫。也是我国几个重大农业害虫之一。在长江流域以及长江以南广大地区如湖北、江苏、上海、浙江、福建、广东、广西等地,发生世代多,农药使用频繁,抗药性突出。近 20a 来,随着南菜北移,小菜蛾在中国北方造成的经济损失十分惊人。在陕西、河北、山东等地均造成严重为害,产量损失达 30% 以上^[1-3]。在内蒙古和新疆的 3 次大爆发造成近 66.7 万 hm^2 油菜绝收,田间虫口密度最高达 486 头/株^[4-5]。我国东北 7 月初的小菜蛾幼虫平均密度超过 60 头/株,造成不防治田甘蓝绝收^[6-8]。近年来,小菜蛾在我国河北、内蒙古等广大北方地区频繁大发生,给我国北方地区十字花科蔬菜生产造成了严重的损失^[9-11]。

小菜蛾在北方每年发生十分普遍,在广大的北方地区小菜蛾能否在当地越冬? 越冬虫源对春季和夏季发生的贡献有多大? 这些问题直接影响着小菜蛾的早期预警和防治策略制订,在安全越冬区,在冬季蔬菜上可见各种虫态,冬季虫源往往作为预测小菜蛾发生的依据,根据需要可适当进行冬季防治;在零星越冬区,需分析秋季种群大小及越冬存活率,越冬种群为发生虫源之一部分,同时需加强春季迁入的监测预警;在非越冬区,迁入成虫为春季发生虫源,春季迁飞监测对减少突然爆发造成的巨大损失十分必要。此外,能越冬的小菜蛾可能将抗药性基因传递到下一年,在不能越冬区域,本地生长季累积的抗性基因丧失,抗性只能来自迁出地种群^[11]。因此,总结归纳国内外小菜蛾的越冬研究现状,不仅在生产上可为小菜蛾预测和防治提供参考,且对我国和邻国开展小菜蛾远距离迁飞生态学研究有重要参考意义。

在十字花科植物不能周年生长的温带地区,小菜蛾终年发生使得一些早期的研究者相信蛹或成虫在残株落叶下越冬^[12-14]。但是,在这些研究中却没有发现任何一个在最冷月份里采集的虫体并成功越冬^[15]。针对小菜蛾的越冬问题,日本和加拿大的学者进行了系统研究,基本阐明了小菜蛾在日本和加拿大西部的越冬情况;澳大利亚、韩国、美国和欧洲对此也进行过一些研究。我国关于小菜蛾越冬的研究仅局限于东北地区。但国内一些重要著作中一直记录小菜蛾在北方以蛹越冬^[16-17],或笼统描述在多代地区幼虫、蛹、成虫各虫态均可越冬^[18],最新版《农业昆虫学》教材中也记录小菜蛾在黄河流域及其以北地区以蛹在蔬菜田残枝落叶上越冬^[19-20],我国互联网上关于小菜蛾的越冬更是众说纷纭,因此,为了澄清小菜蛾的越冬问题,为小菜蛾预测和防治提供依据,本文综述了国内外小菜蛾越冬研究的进展,并在文中尽可能保持原文的试验方法和关键试验结果,便于读者参考。

1 亚洲小菜蛾的越冬研究

在南亚和东南亚地区,小菜蛾在冬季十字花科植物上正常发生为害,不存在越冬问题,但在位于东北亚的中国、日本、朝鲜半岛小菜蛾的越冬就成为一个重要生态学问题。韩国处于朝鲜半岛南部,冬季气候温暖,小菜蛾可以任何虫态越冬^[21]。俄罗斯的远东地区、西亚和中亚地区小菜蛾越冬的研究则鲜有报道。通过耐寒

性试验,田间笼罩模拟试验和田间残留油菜及野生芜菁的自然越冬种群动态调查,表明小菜蛾能够在南半球澳大利亚东南部适宜的寄主植物上越冬^[22]。小菜蛾在全日本均有分布,从1970年代开始在日本从寒冷的北海道、本州岛的青森县、岩手县到冬季冷暖交替的宫城县进行了大量专门研究,以阐明小菜蛾在日本的越冬状况并确定在日本的越冬分界线。

北海道 Hayakawa 等在日本最寒冷的北海道(十勝郡)试验了小菜蛾的越冬存活,发现12月上旬积雪开始时,小菜蛾幼虫和蛹仍然存活,但雪被融化后的4月上旬,供试小菜蛾全部死亡^[23]。Saito 等于1984—1986年的田间试验进一步证实,在北海道小菜蛾幼虫和蛹可存活至1—2个月,但每年4月份后均全部死亡;即使在不加温的温室内,幼虫和蛹只能活到1月或2月,成虫只在少数年份越冬。得出小菜蛾在日本北海道不能或极少越冬的结论^[24]。

青森县 位于日本本州岛最北端与北海道相邻,年均积雪覆盖日长达3个月。Kimura 等于1983—1985年开展了一系列越冬试验,以阐明小菜蛾在青森县的越冬情况:(1)早春对28块田进行的小菜蛾田间越冬虫体普查未发现甘蓝植株上有存活的成虫、幼虫和蛹^[25];(2)用饲养的小菜蛾幼虫、蛹和成虫在田间甘蓝植株上或未加热的温室中进行越冬试验,冬后在田间未发现存活的小菜蛾,但在温室中有存活的幼虫、蛹和成虫^[26];(3)用饲养的小菜蛾各虫态在雪被下的试验表明,绝大多数卵、1、2、3、4龄幼虫分别在20、30、40、60、70d后死亡,但成虫在70d后仍有50%存活^[27-28]。

岩手县 与青森县西南相邻接,针对岩手县冬季雪被覆盖时间长的特点,在岩手县盛冈试验田间1m深的积雪下小菜蛾幼虫和蛹的存活率,发现33d后死亡率达82%;75d后全部死亡^[29]。Honda 进一步在盛冈的冬季调查白菜田小菜蛾越冬情况,发现1985年11月22日有5.3头/10株的3—4龄幼虫和3.3头/10株的蛹存活,但随后在1986年3月15—20日和4月10日的两次调查中则未发现存活个体;在油菜田也出现类似情况,1985年11月20日存活的幼虫和蛹分别为7.2头/m²和4.6头/m²,但在1986年3月28日、4月18和28日则未发现存活的个体。这些试验证实小菜蛾不能在盛冈越冬^[30]。

宫城县 具有冷暖交替的冬季,是日本率先系统开展小菜蛾越冬研究的地区。1975—1980年在秋播甘蓝上进行了冬季田间系统调查,表明小菜蛾确实能在当地越冬。在1976、1978、1980年3a间的越冬前后虫量变化不大,但经过极为寒冷的1977年冬季(-8℃以下持续22d)后,或极为温暖的1979年冬季后(无-8℃的低温出现),越冬虫量显著减少。此外,于1976—1978的12—3月份(积雪地为5月份)在宫城县不同海拔的菜田进行了小菜蛾越冬普查,发现小菜蛾在海拔100m以下的平原地区和海拔280m以下的丘陵地区确有越冬后存活的虫体,但在300m以上的6个调查点,在积雪融化后发现死亡虫体但未发现存活个体。因此,得出小菜蛾能够以高龄幼虫和蛹在宫城县平原地区越冬,但不能在Oho山高地越冬的结论^[31]。

越冬界限 Maeda 和 Takano 用电子温度自动记录仪测定发现冬季叶表面温度最高,卷叶间温度次之,植株中心温度较低,但均比标准百叶箱内气温高。通过分析温度数据和田间调查数据推出小菜蛾能在冬季12月、1月、2月平均温度超过0℃的地区越冬,每年越冬界限与这3个月0℃等温线一致^[32]。针对日本北部地区冬季长期积雪,Honda 测定了冬季雪被下的温度,发现不管气温如何波动,雪被下甘蓝叶片的温度接近恒定的0℃^[30]。因此,在实验室内试验了0℃下处理不同天数后小菜蛾的存活率,结果表明,卵、1—4龄幼虫和蛹分别经过50、40、60d的低温处理后全部死亡,雌成虫虽在60d后仍有10.0%存活,但低温处理50d后不再产卵,且之前所产卵均不能孵化。所以得出小菜蛾各虫态经过60d、0℃的低温处理后均不能存活和正常繁殖的结论^[30]。由于日本东北地区的气候与盛冈相似,他们根据这一试验结果和积雪覆盖数据推出了小菜蛾在日本不能越冬的区域:包括北海道,本州岛的北陆和东北大部分地区,小菜蛾的越冬北限是宫城县平原地区,也有少量小菜蛾可能在本州岛的北部沿海地区积雪覆盖时间短于60d的区域,如山形县的海边越冬^[33],并画出了小菜蛾在全日本不能越冬的地理分布图。日本岩手县盛冈市年平均连续积雪时间为79.8d,根据上述理论推定小菜蛾不能越冬,田间调查的结果证实了小菜蛾不能在盛冈越冬的推论^[30]。

2 欧美国家小菜蛾的越冬研究

在美国,小菜蛾在夏威夷和美国南部如亚利桑那州、新墨西哥州和得克萨斯州冬季可连续发生^[12],但整

体上说,小菜蛾在美国的越冬一直是一个悬而未决的问题^[15]。已有的越冬记载多为间接的现象观察,并未进行过系统的实验研究。一般认为,在美国北部如麻萨诸塞、纽约、明尼苏达、威斯康星等州,小菜蛾成虫可在田间残株落叶下越冬,春季虫源部分地来自南方的迁入成虫,但更主要是随南方菜苗长途运输而来^[34-36]。Idris 和 Grafius 于早春在美国密歇根州中部十字花科杂草上调查发现确有一些小菜蛾高龄幼虫,按发育历期推算不可能是春季迁入的成虫产生的,认为小菜蛾幼虫在残株落叶和雪被的庇护下有可能越冬,但无证据表明成虫可以在该地区越冬^[36]。也有报道在纽约的 Ithaca 冬季的田间残留植株上观察到不活动的小菜蛾成虫,但蛹不能在冬季存活,在 1990—1991 年的冬天尽管有数次持续数日的温暖期出现,但数月内性诱器未捕到成虫^[15]。

加拿大是小菜蛾越冬研究较多的国家。Harcourt 就提出小菜蛾在加拿大北部每年受冻害而不能越冬,在安大略东部只能存活到 12 月中旬^[37-38]。Putnam 推测小菜蛾不能在 Saskat Chewan 省越冬^[39],Smith 和 Sears 的试验表明小菜蛾的各虫态均不能在加拿大安大略冬季的野外和人工模拟的条件下存活^[40]。Dosdall 于春季作物和杂草出苗前设置诱捕器并进行田间调查,在 1991 年和 1993 年两年未得到小菜蛾,1992 年则采集到 13 头成虫,推断小菜蛾在气候温和的冬季在当地成功越冬,当年很早的雪被为土中的小菜蛾提供了保温层^[41]。

为了彻底澄清小菜蛾在加拿大西部的越冬问题,Dosdall 等在田间条件下开展了历时 5a 的小菜蛾越冬试验。1993 和 1994 两年在 Vegreville(53°05'N,112°02'W)的未翻耕、未翻耕再用粉碎油菜茬覆盖、翻耕、翻耕再用粉碎油菜茬覆盖 4 种类型的油菜田进行了 5 次重复的完全随机区组越冬试验。于 10 月中旬开始,小区用笼罩覆盖,每笼罩内田间采集并室内饲养 3 代后的小菜蛾成虫 425 头,蛹 200 头,幼虫 300 头和卵 500 粒,田间过冬后,第 2 年 5 月 1 日—7 月 31 日期间,检查笼罩内的存活个体数,结果均未发现存活个体。为了增加试验的可靠性,1995 开始用田间网室内繁殖的小菜蛾为材料进行试验,1996 年又增加了一个试验点 Saskatoon (106°38'N,52°07'W),越冬后仍未发现存活个体。为使试验条件更加接近自然,1997 年 10 月 20 日用 5cm 厚的泡沫塑料板盖在土壤表面模拟积雪覆盖,1998 年 4 月 20 日移去以模拟积雪融化,结果仍未发现成功越冬个体。历时 5a 的试验表明,无论是直接采用室内饲养的小菜蛾,还是经过田间适应性锻炼的小菜蛾,或模拟积雪覆盖的保护作用,小菜蛾各虫态均不能越冬存活,最终得出小菜蛾不能在加拿大西部越冬的结论^[42]。

在欧洲,小菜蛾在各地越冬的系统研究未见报道。如小菜蛾在英国能否原位越冬,在英国本地观察到的轻微发生的小菜蛾种群是来自迁飞还是来自越冬的个体等问题还不清楚。小菜蛾能否成功越冬的问题不仅局限于英国,在其他冬季寒冷的欧洲国家也存在这个问题,目前在英国东部正在进行小菜蛾各虫态的越冬试验研究,初步试验的结果表明很少有小菜蛾可以在英国越冬,没有证据表明在英国小菜蛾会发生有显著意义的越冬^[43]。

3 中国小菜蛾的越冬研究

我国地域辽阔,南北气候条件千差万别,小菜蛾在各地越冬情况不可能相同。在我国长江流域如江苏扬州^[44]及以南地区如浙江杭州^[45]可在冬季找到所有虫态。而在北方地区,小菜蛾的生物学和生态学研究十分有限,其越冬问题一直悬而未决,马春森和陈瑞鹿首次报道了我国东北地区小菜蛾的发生世代、种群动态和越冬与迁飞研究的一些结果^[6-7,46],但有关越冬与迁飞的研究只在学术会议上报告过^[46],未纳入国家文献数据库中,并未被广泛引用。直到现在很多文献记载小菜蛾以蛹在寄主茎秆及田间残留物上越冬^[16-20]。

为了阐明小菜蛾越冬问题,马春森和陈瑞鹿试验了模拟土壤缝隙、田间残留植株以及背风向阳等场所小菜蛾的越冬情况。以田间采集室内繁殖一代后的老龄幼虫和蛹为供试材料,1988 年 10 月 17 日将装有 540 头幼虫和 540 头蛹的 18 个罐头瓶埋入田间,有通气孔的瓶盖与地表齐平,瓶底 1/3 装湿润土壤,其上空间充以菜叶,以模拟土壤缝隙和落叶环境。1988 年 12 月 18 日检查发现供试的老熟幼虫化蛹率为 79.3%,这些蛹置于室温下羽化率为 39.4%,未发现有入土化蛹的个体。供试蛹的羽化率为 28.2%。1989 年 1 月 26 日,3 月 13 日 2 次检查,供试幼虫和蛹全部死亡。1988 年 10 月 25 日把室内饲养的 3、4 龄幼虫共 2000 头接于田间笼

罩的4株甘蓝植株上,于1988年12月18日、1989年1月26日和3月13日分3次从田间取回整个植株检查。结果表明所接2000头幼虫共有5.7%化蛹,但均死亡。在背风向阳的温室前,实验室窗外等较温暖的地方,用玻璃管装入10月中旬田间采集的蛹、幼虫及其羽化的成虫和室内饲养的各虫态300多头,管内充以枯菜叶,经过冬天后,3月13日检查全部死亡。此外,于1988年4月10日至20日在公主岭和长春地区上一年的秋甘蓝田、白菜田等十字花科蔬菜共18块田内,在残株落叶及其周围的杂草丛中仔细寻找小菜蛾的虫体,大量的越冬调查均未发现小菜蛾的任何存活个体^[46]。

为了推测小菜蛾在全国的越冬状况,以1988年8月田间采集的小菜蛾在室内饲养1代所得的成虫、蛹和老熟幼虫为试验材料,在0、-5、-10、-16℃4种低温下进行了小菜蛾的耐寒性试验。结果表明,在-16℃下1h,供试的成虫、蛹和老龄幼虫全部死亡;-10℃下2d,成虫存活率最高,蛹次之,幼虫最低,但处理5d后成虫全部死亡,蛹和幼虫还有25%存活,10d后蛹和幼虫全部死亡;-5℃下成虫10d内全部死亡,幼虫20d内,蛹30d内全部死亡;在0℃时,各虫态可存活1个月以上,但2个月后全部死亡^[46]。陈非洲和刘树生试验发现在4℃和6℃下小菜蛾卵和蛹在分别在55d和70d后全部死亡,蛹在低温下经过45d后,所发育的成虫不再产卵。试验表明在-5、-10、-15℃和-20℃下的LT90%分别为9d(蛹)、3.5d(3龄幼虫)、1.7d(蛹)和3h(3龄幼虫)^[47]。

综合分析以上田间越冬试验、越冬调查和耐寒性试验的结果,以及公主岭1988—1989年月平均气温(11月份,-2.8℃;12月份,-10.8℃;1月份,-11℃;2月份,-12℃),得出了小菜蛾不足以耐受公主岭冬季的低温,不能在公主岭越冬的结论。并从耐寒性试验结果推测出小菜蛾在理论上的越冬分界线为最冷月份里的60d内平均气温为0℃的等温线,在气候图上大致相当于2月份的月平均气温0℃等温线^[46]。

4 小菜蛾越冬问题的研究方法

迄今为止,阐明一个给定地点的小菜蛾是否可以越冬,主要通过田间越冬试验、田间越冬系统调查、田间越冬普查等3种直接试验观察的方法进行;控制条件下的耐寒性试验则是越冬分界线研究的重要方法;此外,过冷却点测定可作为越冬研究的辅助手段。

田间越冬试验:是小菜蛾越冬最常用的研究方法。一般将小菜蛾在冬前置于田间可能的越冬场所或人为模拟的越冬场所,在冬季期间或冬后定期抽样调查其存活率,甚至进一步调查越冬存活个体的后续发育和生殖。越冬试验材料多为田间采集并在室内饲养1—3代后的虫体,在冬前置于田间后经历一个随自然温度逐渐进入低温的适应阶段^[24, 28, 46]。为增加试验可靠性,也可在试验前对供试材料进行田间适应性锻炼^[42]。针对小菜蛾有在田间残株落叶上、积雪下、地表或土壤缝隙中越冬的可能,冬前可将供试虫源接种在十字花科残留植株的笼罩中^[22, 24, 28, 46]、埋入积雪下或采用泡沫塑料板模拟积雪覆盖^[23, 25-26, 28, 42]、接种在地表或埋入土壤缝隙中^[42, 46]以及置于未加热的温室中^[24]进行越冬试验。

田间系统调查:是在秋播或收获后残留的十字花科植物上,在冬季每隔一段时间定期抽样调查自然发生的小菜蛾的数量,不仅可明确冬季小菜蛾的存活情况,还可通过冬季各虫态组成比例,明确小菜蛾的越冬虫态^[28, 32]。此方法适用于小菜蛾有可能越冬的地区或处于越冬分界线附近地区的越冬试验。还可在冬季或春季寄主植物尚未长出来之前,设置成虫诱捕器,以推断成虫在当地是否能成功越冬^[15, 41]。

田间越冬普查:越冬前和/或越冬后在不同地形地貌和不同海拔地区,在茬口为各种十字花科寄主植物的田间残留植株、菜叶下、各种缝隙中、附近杂草丛以及背风向阳的温暖小生境中,寻找调查小菜蛾各种虫态并记录数量,以揭示小菜蛾在当地各种环境中越冬的可能性及其地理分布^[25, 32, 46]。

基于耐寒性试验的越冬界限预测:是小菜蛾越冬研究的重要方法。首先收集或测量当地冬季的气温或小菜蛾可能的越冬场所的小气候温度,据此设计低温梯度和持续时间,试验小菜蛾不同虫态在不同低温下处理不同时间后的存活率以及存活个体的后续发育和生殖指标。再利用这些试验数据和各地气温或小气候物候相结合,对小菜蛾在较大的时间和空间尺度上的越冬可能性进行推断。小菜蛾的耐寒性试验表明,低龄幼虫的耐寒性最弱,老龄幼虫次之,蛹和成虫的耐寒性较强^[22, 30-32]。通过耐寒性试验,推断出小菜蛾在日本能越冬

的地区为 12—2 月份的 3 个月平均温度超过 0°C 的地区^[32]。进一步试验小菜蛾各虫态在 0°C 下全部死亡或丧失繁殖能力所需的时间,得出小菜蛾不能在积雪覆盖天数超过 60d 的地区正常越冬,并画出了小菜蛾在日本不能越冬的地理分布图^[30]。在我国也根据小菜蛾在不同温度经过不同时间后的存活率推测出小菜蛾在理论上的越冬分界线为最冷 60d 内平均气温为 0°C 的等温线^[46]。

过冷却点测定:过冷却点是表明小菜蛾抗结冰性的指标,能体现短期骤降的低温对小菜蛾的伤害作用。但小菜蛾无滞育^[38],其越冬是在亚低温条件下长时间暴露的缓慢生存的过程。因此,过冷却点的高低在阐明小菜蛾越冬能力方面的作用就大大降低。小菜蛾蛹的过冷却点显著低于 4 龄老熟幼虫^[6,23,48]。不同作者测定的过冷却点颇为接近,在公主岭秋季田间采集的幼虫和蛹为材料测定过冷却点老熟幼虫平均 -13.5°C ,最低 -18.7°C ,最高 -8°C ,蛹平均 -20.1°C ,最低 -23.6°C ,最高 -11.5°C ^[6];而日本北海道十勝郡 10—12 月份采集的幼虫和蛹的过冷却点分别为 -14.3°C 和 -19.2°C ;从日本北海道札幌甘蓝田采集的小菜蛾蛹的过冷却点约为 -20°C ^[48]。进一步研究发现小菜蛾幼虫和蛹的过冷却点没有规则的季节性变化,但个体间差异很大,即使从同一批卵发育的 4 龄幼虫、蛹和成虫的过冷却点也不同。小菜蛾消化道中可能存在冰核细菌,与过冷却点的高低有关^[49]。

5 讨论与展望

小菜蛾为世界性广布种,但迄今为止,有关小菜蛾越冬的研究主要来自日本北部和加拿大西部,在澳大利亚东南部和我国东北地区也有少量研究报道。但在十字花科作物广泛种植,小菜蛾为害严重的美国很少有人对小菜蛾的越冬进行系统研究,人们普遍认为美国北部春季小菜蛾的主要虫源来自种苗的远距离运输。在欧洲,小菜蛾的越冬研究几乎是一片空白,在英国只有少量个体能够在冬季存活,但不能构成有意义的春季虫源。在俄罗斯文献一般描述小菜蛾以老熟幼虫、蛹或成虫在残株落叶下,土壤中缝隙越冬,但未见有说服力的研究报道。在我国广大的东北地区、华北地区和西北地区以及西南的高海拔地区,小菜蛾的越冬问题尚不清楚。目前我们在湖北、江苏、安徽、河南、河北、北京、山西、辽宁进行的越冬试验旨在阐明小菜蛾在我国越冬的概况。

通过在各地冬季直接试验观察小菜蛾越冬,需要大量合格的供试小菜蛾,尽可能涵盖各种潜在的越冬小生境,通常需要试验数年,不仅消耗大量人力物力,而且试验结果的应用带有很大的地域和年份局限性。因此,这种方法只适用于有代表性的典型地区的越冬研究,大多数地区没有可能也没有必要均采用这种方法来阐明本地小菜蛾的越冬情况。冬季田间系统调查法只适用于研究小菜蛾在冬季十字花科植物上不会彻底冻死的气候较为温和地区的越冬问题。田间越冬普查法广泛适用于各种地区各种小生境小菜蛾的越冬研究,但是需要消耗大量的人力,且容易疏漏潜在的越冬场所,而且各类小生境调查的数据难以相互比较,只能作为辅助方法。以上这 3 种小菜蛾越冬的直接试验观察方法只能说明当年当地或近似条件的越冬情况,事实上,不同年度间冬季温度不是一成不变的,小菜蛾的越冬界限也不可能是固定不变的,特别是在全球气候变暖,北方冬季显著变暖的气候环境下,小菜蛾的越冬界限又可能逐年北移,这些方法难以阐明小菜蛾越冬的未来变化趋势。

小菜蛾能否越冬取决于冬季十字花科植物或积雪等地表覆盖物造成的环境温度和小菜蛾本身的持续耐寒能力。因此,基于耐寒性试验的越冬预测法就是研究小菜蛾在广泛的时间和空间尺度内越冬的一个可行的方法。首先需要测定小菜蛾潜在越冬场所小生境冬季温度的高低和变化规律,根据这些测定结果,设计典型越冬场所的冬季温度变化模式,再在人工气候箱内详细试验经过温度适应的小菜蛾各种虫态在这些低温模式下的存活率和后续的发育和繁殖。根据耐寒性试验的数据建立小菜蛾低温存活率模型和越冬判别模型,最后通过在全国典型地区设点进行田间越冬试验和调查,采集田间越冬场所小生境的温度和小菜蛾虫口的实际观察数据,对越冬模型进行有效性检验。甚至可利用遥感的全面覆盖功能,GIS 强大的空间数据操作和分析功能,以及越冬模型的可靠性,构建小菜蛾越冬区域地理信息系统。人们正逐步开展这些研究,期望在不远的将来阐明小菜蛾在我国的越冬这一重要生态问题。

References:

- [1] Zhang Z X, Zheng K M. Occurrence and management technology of diamondback moth. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 1998, (12): 24.
- [2] Pan J H, Luo X Z, Ji J P. Occurrence and control of diamondback moth in Weixian, Hebei Province. Plant Doctor, 1999, 12(4): 14-15.
- [3] Xue M, Mao Y X, Li Q. Study on the biological character and insecticide controlling of *Plutella xylostella*. Journal of Laiyang Agricultural College, 1994, 11(suppl): 137-140.
- [4] Wang C D, Li Q, Zhang S Y, Guo Y C. Main insect pest species and integrated management technology in Xilinguole. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 1995, (4): 18-20.
- [5] Wang C J. Occurrence and control of diamondback moth. Xinjiang Agricultural Sciences, 1999, (6): 287-288.
- [6] Ma C S, Chen R L. Effect on temperature on the development and fecundity of *Plutella xylostella*. Jilin Agricultural Sciences, 1993, (3): 44-49.
- [7] Ma C S, Chen R L. Population dynamics and generation differentiating of the diamondback moth, *Plutella xylostella* L. in Gongzhuling. Journal of Jilin Agricultural University, 1995, 17(2): 27-31.
- [8] Sun Q, Lu H, Chen J Z. Preliminary study on the development period and population dynamics of *Plutella xylostella* L. in the spring rape field. Heilongjiang Agricultural Science, 2003, (5): 16-17.
- [9] Gu L Q, Li C H. Ecological division and integrated management of diamondback moth in Tangshan. China Plant Protection, 2009, 29(4): 20-21.
- [10] Xu F Z, Guo Y H, Zhang Y F, Zhi X Q, Han C Z. Occurrence and management technology of diamondback moth in Wulanchabu. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2005, (7): 382-383.
- [11] Xue S M, Chang X Q. Severe occurrence of diamondback moth in 2002. Plant Protection Technology and Extension, 2002, 22(11): 44.
- [12] Marsh H O. Life history of *Plutella maculipennis*. Journal of Agricultural Research, 1917, 10: 1-10.
- [13] Miles H W. The diamondback moth, *Plutella maculipennis* Curt. Kirton Agricultural Institute Annual Report, 1923: 45-48.
- [14] Theobald F V. The diamondback moth. Journal of Kent Farmers' Union, 1926, 20: 91-95.
- [15] Talekar N S, Shelton A M. Biology, ecology, and management of the diamondback moth. Annual Review of Entomology, 1993, 38: 275-301.
- [16] Lu P K. Illustrate Handbook of Chinese Crop, Economic and Medical Plant Pests. Hohhot: Yuanfang Press, 2007: 737-738.
- [17] Lu P K. Illustrate Handbook of Chinese Vegetable Pests. Beijing: Science Press, 2009: 467-468.
- [18] Li Y R. Agricultural Entomology (Southern Edition). Beijing: Chinese Agriculture Press, 2002: 276-279.
- [19] Wu J X. Agricultural Entomology (Northern Edition). Beijing: Chinese Agriculture Press, 2002: 185-187.
- [20] Yuan F. Agricultural Insect Pests (3rd Edition). Beijing: Chinese Agriculture Press, 2001: 362-364.
- [21] Kim M H, Lee S C. Bionomics of diamond-back moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) in southern region of Korea. Korean Journal of Applied Entomology, 1991, 30(3): 169-173.
- [22] Gu H N. Cold tolerance and overwintering of the diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae) in southeastern Australia. Environmental Entomology, 2009, 38(3): 524-529.
- [23] Hayakawa H, Tsutsui H, Goto C. A survey of overwintering of the diamondback moth, *Plutella xylostella* Linne, in the Tokachi district of Hokkaido. Annual Report of the Society of Plant Protection of North Japan, 1988, 39: 227-228.
- [24] Saito O, Mizushima S, Okuyama S, Hanada T, Torikura H, Hachiya K, Sato K. Biology of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.), in Hokkaido. Research Bulletin of the Hokkaido National Agricultural Experiment Station, 1998, 167: 69-110.
- [25] Kimura T, Fujimura T, Araya E. Overwintering of the diamondback moth, *Plutella xylostella* Linne, in Aomori Prefecture. 1. Field research on survivors after winter. Annual Report of the Society of Plant Protection of North Japan, 1987, 38: 135-137.
- [26] Kimura T, Fujimura T, Araya E. Overwintering of the diamondback moth, *Plutella xylostella* Linne, in Aomori Prefecture. 2. Overwintering of adults, larvae and pupae released in a field or in a glass house before winter. Annual Report of the Society of Plant Protection of North Japan, 1987, 38: 138-140.
- [27] Kimura T, Fujimura T, Araya E. Overwintering of the diamondback moth, *Plutella xylostella* Linne, in Aomori Prefecture. 3. Mortality of the second instar larvae under the snow. Annual Report of the Society of Plant Protection of North Japan, 1987, 38: 141-142.
- [28] Kimura T, Fujimura T. Overwintering of the diamondback moth, *Plutella xylostella* Linne, in Aomori Prefecture. 4. Longevity of egg, larvae, pupae and adults under the snow. Annual Report of the Society of Plant Protection of North Japan, 1988, 39: 229-231.
- [29] Honda K I, Miyahara Y. Estimation of the hibernating areas of the diamondback moth, *Plutella xylostella* Linne, in the Tohoku District. Annual Report of the Society of Plant Protection of North Japan, 1987, 38: 133-134.

- [30] Honda K I. Hibernation and migration of diamondback moth in northern Japan//Taleker N S ed. Diamondback Moth and Other crucifer Pests. Asian Vegetable Research and Development Center, 1992: 43-50.
- [31] Saito O. Tolerance of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.) (Lepidoptera: Yponomeutidae), to low constant temperature. Annual Report of the Society of Plant Protection of North Japan, 1994, 45: 158-159.
- [32] Maeda M, Takano T. Seasonal prevalence and the possibility of overwintering of diamond-back moth, *Plutella xylostella* (L.), in Miyagi Prefecture. Bulletin of Miyagi Prefecture Horticulture Experiment Station, 1984, 5: 1-20.
- [33] Ishigaki H, Saito S, Sato M, Ohba S. Hibernation of the diamondback moth in the Shōnai district of Yamagata Prefecture in 1989. Annual Report of the Society of Plant Protection of North Japan, 1990, 41: 212.
- [34] Andaloro J T. Insect of crucifers: the diamondback moth, *Plutella xylostella*. Vegetable Crops, 1983, 751: 20.
- [35] Mau R F, Kessing J L. *Plutella xylostella* (Linnaeus) Diamondback Moth. (April 2007) [2009-11-26]. <http://www.extento.hawaii.edu/kbase/crop/Type/plutella.htm>.
- [36] Idris A B, Grafius E J. Evidence of pre-imaginal overwintering of diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) in Michigan. Great Lakes Entomologist, 1996, 29: 25-30.
- [37] Harcourt D G. Biology of the diamondback moth, *Plutella maculipennis* (Curt.), in eastern Ontario II. Life-history, behaviour, and host relationships. The Canadian Entomologist, 1957, 89: 554-564.
- [38] Harcourt D G, Cass L M. Photoperiodism and fecundity in *Plutella maculipennis* (Curt.). Nature, 1966, 210: 217-218.
- [39] Putnam L G. Diapause and cold hardiness in *Microplitis plutellae*, a parasite of the larvae of the diamondback moth. Canadian Journal of Plant Science, 1978, 58: 911-913.
- [40] Smith D B, Sears M K. Evidence for dispersal of diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae), into southern Ontario. Proceedings of the Entomological Society of Ontario, 1982, 113: 21-27.
- [41] Dosdall L M. Evidence for successful overwintering of diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.) (Lepidoptera: Plutellidae), in Alberta. The Canadian Entomologist, 1994, 126: 183-185.
- [42] Dosdall L M, Mason P G, Olfert O, Kaminski L, Keddle B A. The origins of infestations of diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.) in canola in western Canada//Endersby N M, Ridland P M eds. Proceedings of the Fourth International Workshop on the Management of Diamondback Moth and Other Cruciferous Pests. Melbourne, Australia: Institute of Horticultural Development, 2004: 95-100.
- [43] Chapman J W, Reynolds D R, Smith A D, Riley J R, Pedgley D E, Woiwod I P. High-altitude migration of the diamondback moth *Plutella xylostella* to the U. K.: a study using radar, aerial netting, and ground trapping. Ecological Entomology, 2002, 27: 641-650.
- [44] Lu Z Q, Chen L F, Zhu S D. Effect of temperature on development and fecundity of diamondback moth. Chinese Bulletin of Entomology, 1988, 25(3): 147-149.
- [45] Ke L D, Fang J L. Biology of diamondback moth: Life history and correlation of generation and temperature. Acta Entomologica Sinica, 1979, 22(3): 300-319.
- [46] Ma C S, Chen R L. Overwintering and migration of diamondback moth, *Plutella xylostella*//Proceedings of 1st National Conference of Young Scientists in Plant Protection. Beijing: Chinese Science & Technology Press, 1991: 294-300.
- [47] Chen F Z, Liu S S. Effects of low and subzero temperature on a *Plutella xylostella* laboratory population. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(1): 99-102.
- [48] Kaneko J, Kita K, Tanno K. Bacteria in the gut determines the supercooling point of diamondback moth, *Plutella xylostella*, pupae reared on germinating radish seeds (*Raphanus sativus* L. var. *acanthiformis* Makino). Japanese Journal of Applied Entomology and Zoology, 1989, 33(2): 82-91.
- [49] Kaneko J. Supercooling point of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.): seasonal variations in field collecting individuals and differences by stage in rearing ones. Annual Report of the Society of Plant Protection of North Japan, 1995, 46: 147-152.

参考文献:

- [1] 张振祥, 郑克明. 小菜蛾的发生与防治技术. 农业科技通讯, 1998, (12): 24.
- [2] 潘进红, 罗秀枝, 靳建萍. 河北蔚县小菜蛾的发生与防治. 植物医生, 1999, 12(4): 14-15.
- [3] 薛明, 毛永逊, 李强. 小菜蛾生物学特性及药剂防治研究. 莱阳农学院学报, 1994, 11(增): 137-140.
- [4] 王成德, 李谦, 张士元, 郭元朝. 锡盟油菜主要虫害种类及其综合防治技术. 内蒙古农业科技, 1995, (4): 18-20.
- [5] 王承君. 小菜蛾的发生与综合防治. 新疆农业科学, 1999, (6): 287-288.
- [6] 马春森, 陈瑞鹿. 温度对小菜蛾(*Plutella xylostella*)发育和繁殖影响的研究. 吉林农业科学, 1993, (3): 44-49.
- [7] 马春森, 陈瑞鹿. 公主岭地区小菜蛾(*Plutella xylostella*)发生动态和世代的研究. 吉林农业大学学报, 1995, 17(2): 27-31.

- [8] 孙强,路浩,陈建卓.小菜蛾在春油菜生育历期及田间种群动态初探.黑龙江农业科学,2003,(5):16-17.
- [9] 顾丽端,李朝辉.唐山市小菜蛾的生态区划及综合防治技术.中国植保导刊,2009,29(4):20-21.
- [10] 许富祯,郭永华,张艳芳,智小青,韩常在.乌兰察布地区小菜蛾的发生、为害与防治技术.内蒙古农业科技,2005,(7):382-383.
- [11] 薛守茂,常秀清.2002年小菜蛾在四子王旗再次大面积发生.植保技术与推广,2002,22(11):44.
- [16] 吕佩珂.中国粮食作物经济作物药用植物病虫原色图鉴(下册)第三版.呼和浩特:远方出版社,2007:737-738.
- [17] 吕佩珂.中国蔬菜病虫原色图鉴(珍藏现代版).北京:学苑出版社,2009:467-468.
- [18] 李云瑞.农业昆虫学(南方本).北京:中国农业出版社,2002:276-279.
- [19] 仵均祥.农业昆虫学(北方本).北京:中国农业出版社,2002:185-187.
- [20] 袁锋.农业昆虫学(第三版).北京:中国农业出版社,2001:362-364.
- [44] 陆自强,陈丽芳,祝树德.温度对小菜蛾发育与增殖影响的研究.昆虫知识,1988,25(3):147-149.
- [45] 柯礼道,方菊莲.小菜蛾生物学的研究:生活史、世代数及温度关系.昆虫学报,1979,22(3):300-319.
- [46] 马春森,陈瑞鹿.菜蛾(*Plutella xylostella*)越冬与迁飞问题的研究.首届植保中青年工作者学术讨论会论文集.北京:中国科学技术出版社,1991:294-300.
- [47] 陈非洲,刘树生.低温对小菜蛾实验种群的影响.应用生态学报,2004,15(1):99-102.