应用昆虫学报 *Chinese Journal of Applied Entomology* 2016, 53(2): 247–255. DOI: 10.7679/j.issn.2095–1353.2016.032

小菜蛾专栏

小菜蛾区域性抗药性治理技术研究*

——公益性行业(农业)科研专项“十字花科小菜蛾综合防控技术研究与示范推广”研究进展

李振宇[1**] 陈焕瑜[1] 包华理[1] 胡珍娣[1] 尹 飞[1] 林庆胜[1] 周小毛[1]
吴青君[2] 谌爱东[3] 吴益东[4] 侯有明[5] 何余容[6] 李建洪[7] 谢圣华[8]
章金明[9] 符 伟[10] 马春森[11] 冯 夏[1***]

（1. 广东省农业科学院植物保护研究所，广州 510640；2. 中国农业科学院蔬菜花卉研究所，北京 100081；3. 云南省农业科学院农业环境资源研究所，昆明 650205；4. 南京农业大学植物保护学院，南京 210095；5. 福建农林大学植物保护学院/农业部亚热带农业生物灾害与治理重点开放实验室，福州 350002；6. 华南农业大学农学院，广州 510642；7. 华中农业大学植物科学技术学院，武汉 430070；8. 海南省农业科学院农业环境与植物保护研究所，海口 571100；9. 浙江省农业科学院植物保护与微生物研究所，杭州 310021；10. 湖南省植物保护研究所，长沙 410125；11. 中国农业科学院植物保护研究所，北京 100193）

摘 要 专项围绕我国蔬菜产业发展及食品安全需求，在 2008 年前期行业科研专项研究的基础上，综合应用多学科的理论和技术，以抗药性治理为核心，系统深入研究了我国小菜蛾种群灾变规律、灾变机制、预测预警、抗药性监测、抗药性机制、抗药性治理策略与关键技术体系，丰富了小菜蛾种群抗药性治理的基础理论，紧密结合实际，显著提升了我国对小菜蛾的防控技术水平，并对其它虫害的研究与防治具有重要的参考价值。

关键词 小菜蛾，抗药性，区域性抗药性治理，抗药性机理，示范推广

Progress in research on managing regional pesticide resistance in the diamondback moth in China

LI Zhen-Yu[1**] CHEN Huan-Yu[1] BAO Hua-Li[1] HU Zhen-Di[1] YIN Fei[1] LIN Qing-Sheng[1]
ZHOU Xiao-Mao[1] WU Qing-Jun[2] CHEN Ai-Dong[3] WU Yi-Dong[4] HOU You-Ming[5] HE Yu-Rong[6]
LI Jian-Hong[7] XIE Sheng-Hua[8] ZHANG Jin-Ming[9] FU Wei[10] MA Chun-Sen[11] FENG Xia[1***]

(1. Institute of Plant Protection, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Institute of Vegetables and Flowers, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing, 100081, China; 3. Institute of Agricultural Environment and Resource, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China; 4. College of Plant Protection; Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 5. College of Plant Protection, Fujian Agriculture and Forestry University, Key Laboratory of Subtropical Agro-Biological Disasters and Management, Ministry of Agriculture, Fuzhou 350002, China; 6. College of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 7. College of Plant Science & Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan, 430070, China; 8. Institute of Agricultural Environment and Plant Protection, Hainan Academy of Agricultural Sciences, Haikou 571100, China; 9. Institute of Plant Protection and Microbiology, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; 10. Hunan Plant Protection Institute, Changsha 410125, China; 11. Institute of Plant Protection; Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract The “Special Program for Agro-scientific Research in the Public Interest” in 2008, was a national project designed

*资助项目 Supported projects：公益性行业（农业）科研专项（201103021）
**第一作者 First author，E-mail：zhenyu_li@163.com
***通讯作者 Corresponding author，E-mail：fengx@gdppri.com
收稿日期 Received：2016-01-19，接受日期 Accepted：2016-02-27

to improve both the vegetable industry and food security. Focusing on resistance management, different subjects and technologies were applied to forecasting population dynamics, resistance monitoring, insecticide resistance, strategies of resistance management and critical technologies. This national project contributed to both the theory of resistance management and the level of diamondback moth control. In addition, the research conducted as part of this project provides a valuable reference for the study and management of other pests.

Key words diamondback moth, resistance, resistance mechanism, regional resistance management, demonstration

小菜蛾 *Plutella xylostella*（L.）属鳞翅目（Lepidoptera）菜蛾科（Plutellidae），是一种世界性的十字花科蔬菜毁灭性害虫（Li *et al.*，2016a；Furlong *et al.*，2013）。我国小菜蛾的发生面积逐年增加，年发生面积从 1990 年的 14.67 万 hm^2 上升到 2014 年的 213.33 万 hm^2（植物保护统计），呈现出发生面积大、危害严重等特点。

小菜蛾是国际上公认的抗药性最严重的蔬菜害虫之一（Talekar and Shelton，1993）。自 Ankersmit（1953）首次报道小菜蛾对 DDT 产生抗药性以来，小菜蛾的生物学(Endersby and Ridland，2004；Shelton *et al.*，2008；Srinivasan *et al.*，2011)、生态学（Sarfraz *et al.*，2005，2006)、抗药性（尤民生和魏辉，2007；冯夏等，2011a)和控制技术（尤民生和魏辉，2007；冯夏等，2011b）等方面成为研究的重点和热点。国际上，小菜蛾的防控理念已从单项控制技术发展到害虫综合治理（Integrated pest management，IPM）和以抗药性治理为核心的抗药性综合治理（Insecticide resistance management，IRM）技术体系（Furlong *et al.*，2013），延缓抗药性的发生发展，减少危害。在国内，经过 20 多年研究，尤其是近 5 年农业部公益性行业（农业）科研专项“小菜蛾可持续防控技术研究与示范”实施以来，提出了有针对性的农药合理使用技术，探明了小菜蛾在华南、华东、华中、西南和华北五大区域的灾变规律，明确了小菜蛾在不同区域的抗药性现状，阐明了小菜蛾对 Bt、阿维菌素等不同杀虫机理药剂的抗性机制，初步探明了小菜蛾在我国的越冬和迁移规律，研发出新的物理防治技术、生物防治技术、生态调控结合合理用药的技术体系，综合防治理念已被越来越多的农技人员和广大农民接受(尤民生和魏辉，2007；冯夏，2011b)。

本专项围绕我国蔬菜产业发展及食品安全需求，在 2008 年农业部公益性行业（农业）科研专项的研究基础上，以抗药性治理为核心，系统深入研究了我国小菜蛾种群灾变规律、灾变机制、预测预警、抗药性监测、抗药性机制、抗药性治理策略与关键技术体系，进一步开展十字花科蔬菜害虫小菜蛾综合防控技术的研究并大面积推广应用，以解决新形势下的十字花科作物的安全生产问题，全面提升我国十字花科害虫小菜蛾的综合治理技术水平。

因项目尚未结题，研究数据待发表，本文主要将研究进展结论简述如下。

1 小菜蛾种群研究

1.1 我国小菜蛾种群灾变机制

明确种群灾变机制是小菜蛾抗药性综合治理的关键。项目组经过多年系统研究，发现我国小菜蛾种群灾变的主要影响因子为温度、降水等；同时，作物栽培和耕作方式，天敌和寄主植物等也是种群灾变的重要影响因子。

1.1.1 气候变暖对小菜蛾种群的影响　气候变暖显著影响小菜蛾的种群灾变规律。随着气候变暖，我国小菜蛾发生呈北移趋势，近年来青海、内蒙古等油菜田小菜蛾发生呈加重趋势，在原来小菜蛾为害不重的北方地区（如山东）小菜蛾为害逐年加重，气候变暖为小菜蛾种群发育提供了条件。

1.1.2 降雨对小菜蛾种群的影响　降雨量是制约小菜蛾种群发生量的重要机制之一。雨日多，降雨量大，对小菜蛾的发生具有显著的抑制作用。一方面因雨水的冲刷，可冲落寄主植物叶片表面小菜蛾的卵、幼虫还有部分的蛹，尤其台风的强降雨，对成虫有致死作用。另一方面降雨影

响小菜蛾成虫的飞翔、交配与产卵等，从而降低田间虫口密度。同时，阴雨天气使得田间湿度大，有利于白僵菌、绿僵菌等病菌的传播蔓延，导致小菜蛾幼虫死亡，降低其虫口密度，大幅降低其种群数量。

1.1.3　高温干旱对小菜蛾产卵量及孵化率的影响　高温干旱等极端条件明显影响小菜蛾的产卵量及孵化率（潘飞等，2012）。总体上来看，高温低湿对小菜蛾的产卵习性有不利影响，成虫不产卵的比例较高。随着温度升高、湿度降低，不产卵的比例下降明显。如 2009 年秋季至 2010 年春季，云南省遭遇干旱天气，同期小菜蛾的田间虫量相对较少。

1.1.4　耕作制度对小菜蛾种群动态的影响　研究表明，不同耕作制度下小菜蛾种群动态差异明显，是小菜蛾灾变的另一重要因子。据广东东升、石井和花都 3 个不同小气候条件区域的调查研究，夏季休耕轮作区域的小菜蛾种群数量明显比连作区域低。小气候基本相同区域的调查结果表明休耕、轮作及连作条件下小菜蛾的种群动态差异更显著，连作地块小菜蛾种群密度非常高，而轮作水稻后的种群密度则较低。在耕作制度的影响下，广东省内小菜蛾“春峰”提前至 2 月中旬至 3 月中旬，“秋峰”则推迟至 10 月以后；在相同耕作制度下，小菜蛾发生的“春峰”与“秋峰”为害严重程度差异显著缩小，甚至有春峰高于秋峰的趋势。

1.1.5　天敌对小菜蛾种群动态影响　天敌种群对小菜蛾的发生有明显影响。调查发现寄生性天敌有半闭弯尾姬蜂 *Diadegma semiclausum* Hellen、菜蛾盘绒茧蜂 *Cotesia plutellae*、菜蛾啮小蜂 *Oomyzus sokolowskii*（Kurdjumov）是优势种，这些优势种群的抗逆性较强，有利于其生存；调查明确捕食性天敌种类有中华草蛉 *Chtysopa sinica* Tjider、异色瓢虫 *Leix axyrides*（Pallas）等共 22 种以上，其中草间小黑蛛 *Erigonidium graminicola*（Sundvall）是优势种蜘蛛，而八斑球腹蛛 *Theridion octomaculatum* Boes.et Str.为丰盛种蜘蛛（章金明等，2013）。收集筛选获得玫烟色棒束孢 *Isaria fumosoroseus* 等虫生真菌种类和菌株 143 株，其中玫烟色拟青霉菌株是目前为止所报道的对小菜蛾幼虫具最低致死浓度和最快致死速度的昆虫病原真菌，虫生真菌包括各种天敌的联合作用，对小菜蛾种群起着重要的控制作用。

1.2　小菜蛾的越冬与迁飞

越冬界限直接影响着小菜蛾的早期预警和防治策略。利用冬季低温变化模型、不同纬度地区越冬存活率模拟、田间越冬试验等明确了我国小菜蛾越冬区域约为北纬 30°区域，即河南驻马店至湖北武汉为越冬过渡带，该区域小菜蛾的越冬情况与气候条件相关（熊立钢等，2010）。越冬带的北部区域不能越冬，南部区域可安全越冬。

迁飞方面，根据春季迁飞期小菜蛾在各地的发生高峰时间和气流场推测我国小菜蛾由南向北迁飞路径。通过山东长岛的小菜蛾迁飞种群监测点，监测了小菜蛾迁飞种群动态，明确了小菜蛾从华北经过渤海湾向东北迁飞的路径（Fu *et al.*，2014）。测定小菜蛾迁飞种群与本地种群的抗药性谱，表明小菜蛾迁飞种群的抗药性谱与浙江、上海小菜蛾种群抗药性谱相似，从抗药性谱角度阐明了小菜蛾种群从华东至东北的迁飞路径。利用飞行磨对小菜蛾飞行能力进行了研究，明确了小菜蛾雌雄成虫的最大飞行距离及最长飞行时间。小菜蛾种群的遗传分化研究表明，小菜蛾不同地理种群之间的遗传分化不明显（朱勋等，2012），存在远距离迁飞特性，由于气候条件、耕作制度和栽培品种之间的差异，小菜蛾在不同区域形成了具有明显区域特点的种群。

1.3　西北地区（油菜）小菜蛾灾变规律

西北地区小菜蛾为害逐年加重。青海省春油菜主产区小菜蛾年发生 3 代，第 1 代和第 2 代幼虫是春油菜的主要害虫，第 3 代幼虫主要为害其他十字花科作物和油菜次生苗。第 1 代成虫高峰期在 5 月上旬，2 代在 7 月中旬至 8 月上旬，3 代成虫发生高峰期在 10 月中旬至 11 月上旬。越冬试验结果表明小菜蛾在青海省不能越冬，虫源从外地迁飞而来（冯丽荣，2013）。

陕西省太白县调查分析了多种十字花科植物上小菜蛾的危害情况，发现小菜蛾的大发生期基本与当地的蔬菜种植季节比较吻合，其发生高峰在 8—9 月之间，8 月末达到峰值。白菜收获期后小菜蛾的发生量大，而花椰菜与甘蓝上的小菜蛾蛹期发生量最大（牛燕琴，2014）。

1.4 小菜蛾种群灾变预警研究

小菜蛾的中长期预测预警是制定小菜蛾综合防控具体对策的依据。本项目与澳大利亚昆士兰大学合作，根据小菜蛾灾变规律、灾变机制研究结果及长期监测数据，建立了基于环境因子的小菜蛾种群灾变动态的 CLIMEX 模型（Li *et al.*，2012）和 DYMEX 模型，并利用广州多年气象数据对小菜蛾种群进行模拟，与田间调查种群拟合较好（Li *et al.*，2016b），为解决小菜蛾中期发生趋势预测预警技术打下基础，为大范围内的小菜蛾抗药性区域治理提供了极具价值的决策依据。

2 各区域小菜蛾抗药性现状

在本项目前期基础上，继续在华南、华中、华东、华北及西南等十字花科蔬菜主产区，设置小菜蛾抗药性长期监测点（表 1），统一抗药性监测方法，系统监测了小菜蛾对 9 种代表性杀虫剂的抗药性。结果表明，全国各菜区的小菜蛾都有较强的抗药性，不同药剂在全国的抗药性水平具有很大差异。在华南、西南和华东十字花科蔬菜主产区抗药性水平相对较高，其中广东省小菜蛾抗药性水平最高，个别年度海南三亚和云南通海抗药性上升明显，抗药谱广，这与当地小菜蛾的种群数量及用药频率有关。随着十字花科蔬菜大规模种植的北移，小菜蛾的发生危害逐渐加重，部分药剂相继在华中和华北的抗药性不断上升，其抗药性形势亦不容忽视。

从各药剂抗药性水平来看（图 1），阿维菌素和高效氯氰菊酯在全国普遍已经产生中等以上的抗药性，并在 15 个抗药性监测点同时产生高水平抗药性；氯虫苯甲酰胺和溴虫腈的抗药性上升明显，已在 5 个抗药性监测点产生高水平抗药性；茚虫威和啶虫隆在全国有 2 个抗药性监测点达到高水平抗药性；多杀菌素总体呈中等抗药性水平，而 Bt 制剂和丁醚脲总体抗药性较低，但 Bt 制剂在华中地区的宜昌也产生了高水平抗药性，这可能与华中地区生产和应用数量 Bt 制剂较多有关。

表 1 2011—2015 年部分抗药性监测点抗药性
Table 1 Resistance of part monitoring sites during 2011-2015

监测区域 Zones of monitoring	监测点 Sites of monitoring
华南区	海南（海口，三亚），广东（惠州，连州，广州，番禺），广西（柳州）上海
华东区	浙江（上虞，三门，温州，杭州），上海
西南/西北区	云南（通海，弥渡，昭通，临沧），陕西（太白，杨凌）
华中区	湖南(长沙，怀化，岳阳，云梦)，湖北（宜昌，武穴）
华北区	北京（延庆，南口）,湖南（洛阳）

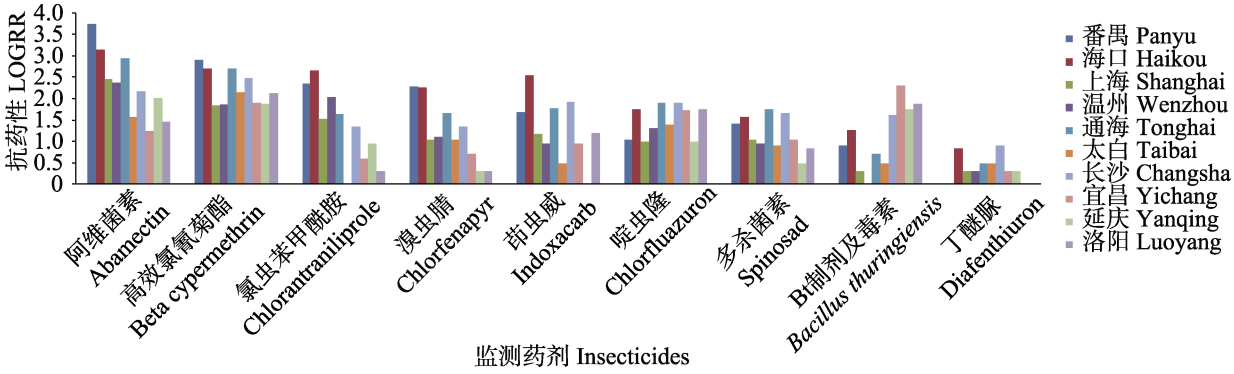

图 1 部分监测点抗药性水平
Fig. 1 Resistant level of part monitoring sites

3　小菜蛾抗药性机理研究

小菜蛾对杀虫剂抗药性的快速产生和发展是其田间种群化学防控的难点之一，项目组系统研究了小菜蛾对氯虫苯甲酰胺、阿维菌素等新型杀虫剂的抗药性机理，为田间抗药性治理技术的研究奠定了基础。

3.1　实现了小菜蛾田间种群抗药性的快速诊断和诊断试剂盒

制定了氯虫苯甲酰胺、阿维菌素、Bt（*Bacillus thuringiensis*）、高效氯氰菊酯、多杀菌素、溴虫腈、啶虫隆、丁醚脲、茚虫威 9 种常用药剂对小菜蛾的抗药性诊断剂量（邵振润等，2013），实现了小菜蛾田间种群抗药性的快速诊断，并应用于小菜蛾抗药性监测。利用分子检测技术构建了氯虫苯甲酰胺、多杀菌素、Bt 和阿维菌素等药剂抗药性快速检测试剂盒。

3.2　小菜蛾对氯虫苯甲酰胺抗药性分子机理

通过抗药性遗传分析、敏感小菜蛾种群的转录组和不同抗药性水平种群的表达谱测序分析及代谢解毒酶酶活测定等研究发现，小菜蛾对氯虫苯甲酰胺的抗药性遗传受常染色体基因控制，代谢酶介导的解毒作用在一定程度上参与了小菜蛾对氯虫苯甲酰胺抗药性的进化，但关键因子或为鱼尼丁受体靶标的基因突变和表达水平下调（Lin *et al.*，2013）。根据小菜蛾鱼尼丁受体基因 G4946E 位氨基酸突变（郭磊，2014），建立了基于等位基因特异性 PCR 的双酰胺类药剂抗药性分子检测检测技术，可准确检测田间小菜蛾种群中的抗药性基因频率。

3.3　小菜蛾对阿维菌素抗药性分子机理

通过对小菜蛾 GluClα 亚基的碱基突变、序列缺失、插入和替换等研究分析，发现了 4 个突变位点（W95R、D192N、P276L、T284A）、12 个氨基酸缺失（在 M3 和 M4 跨膜区之间胞内环区内）、一段导致 GluClα 基因表达提前终止的 64 bp 核苷酸序列和在 182-245 位置发生的氨基酸替换，这些变异可能导致了小菜蛾对阿维菌素的抗药性产生和发展，因此该基因的过量表达有可能在小菜蛾对阿维菌素抗药性中起重要作用(Liu *et al.*，2014)。利用这个结果形成了对阿维菌素抗药性早期诊断的专利技术（吴青君等，2013），用于小菜蛾对阿维菌素的早期抗药性监测。

3.4　小菜蛾拟除虫菊酯类杀虫剂抗药性分子机理

根据小菜蛾钠离子通道的 T929I 和 L1014F 突变位点，设计了敏感特异性引物组合及抗药性特异性引物组合，该引物在检测田间种群中小菜蛾个体的基因型准确率达 98%以上。小菜蛾钠离子通道上的 T929I 和 L1014F 突变是导致其对拟除虫菊酯类杀虫剂产生抗药性的重要原因，通过检测田间种群中上述两个位点的基因突变频率可为监测田间种群的抗药性发生、发展动态。

3.5　抗药性风险评估

抗药性风险评估是预测抗药性产生发展、合理选用药剂的参考标准，本研究对阿维菌素（梁延坡等，2010）、茚虫威（毕道芬，2010）、丁醚脲（姚锋娜，2010）等常用杀虫剂的抗药性风险进行了评估，研究发现小菜蛾对阿维菌素的抗药性风险最大，对丁醚脲抗药性最小，为小菜蛾田中种群化学调控过程中杀虫剂的轮用或混用策略的制定提供了重要依据。

4　小菜蛾抗药性治理新技术研究

在明确小菜蛾灾变及抗药性机制的基础上，研究开发出多项小菜蛾抗药性治理新技术，强调了生物防治的基础作用，突出了行为调控的重要性，创新研制出小菜蛾成虫电击捕杀器，研发了新型生物农药、高效农药新品种及新剂型，在小菜蛾防控实践中取得了重大进展和实效（冯夏等，2011b）。

4.1　小菜蛾天敌资源的保护利用

监测和评估不同类型农药对田间主要天敌的安全性，对于制定科学用药策略，具有非常重要的意义。草间小黑蛛 *E. graminicola* 安全性评价表明（章金明，2011a），阿维菌素和高效氯氰

菊酯毒性较高，Bt 制剂、巴丹、啶虫隆、茚虫威毒性低。卷蛾分索赤眼蜂 *Trichogrammatoidea bactrae* Nagaraja 和拟澳洲赤眼蜂 *Trichogramma confusum* Viggiani 安全性评价表明（王德森等，2010），氟啶脲、茚虫威、Bt 制剂和虫酰肼较安全，丁醚脲对成蜂的寄生能力影响极大，田间施用时应避开成蜂盛发期。半闭弯尾姬蜂安全性评价表明（尹艳琼等，2009），巴丹、高效氯氰菊酯、溴虫腈、多杀菌素对该天敌毒性高，阿维菌素的毒性较低。玫烟色拟青霉菌菌株研究表明（雷妍圆等，2011），其对小菜蛾 2 龄幼虫的致病力与菌株前 4 d 生长速率、产孢量、孢子萌发率和胞外蛋白酶水平呈极显著的正相关关系。

4.2 成虫行为调控技术研究

创新研制出小菜蛾成虫电击捕杀装置，建立相应配套应用技术（冯夏等，2011a），适用于规范化蔬菜基地使用。研究诱捕器高度和诱捕器形状对小菜蛾性信息素效能的发挥具有重要的影响，5 种形状诱捕器诱捕效能为翼形＞水桶形＞三角形或漏斗形＞干式诱捕器（章金明等，2012）。应用交配干扰技术（Wu *et al.*，2012）制定了小菜蛾性信息素及诱捕器田间使用规程，对降低田间小菜蛾种群具有重要作用。

4.3 新型 Bt 工程菌 WG-001 制剂

以 Bt（工程菌 WG-001 为材料，通过摇瓶发酵制备原粉，并对原粉进行加工，制得 WG-001 微胶囊剂。通过室内测定和田间试验相结合，利用交互测定法筛选出对防治小菜蛾有增效作用的 Bt WG-001 与茚虫威复配的最佳配方（张聪冲，2010）。

5 小菜蛾种群抗药性的区域治理技术体系集成

根据我国小菜蛾主要发生区的种植结构、气候条件、用药习惯等具体情况，将防治、作物布局与生产模式、生物防治、行为调控和药剂防治等有机融合并优化，形成了以农业措施结合科学用药的区域治理技术、以生物防治为主的区域治理技术、以生物防治为主的区域治理技术和基于抗药性监测的综合合理用药技术体系，并实践应用。提出了小菜蛾抗药性“区域治理”理念模式和技术体系，促成了规模化菜场生产模式的根本性转变。

5.1 农业措施结合科学用药的区域治理技术体系

以“改变耕作制度”为主，利用小菜蛾发生的时空差异，适时进行“南北休耕轮作”，显著减少抗药性虫源，降低抗药性选择压力。蔬菜种类合理布局，减小十字花科蔬菜田块，并在十字花科蔬菜周边布局生菜、葱蒜、韭菜等非十字花科蔬菜或其它作物，同时保留田块之间的廊道植被。目前广东省内有 490 个面积 33.33 hm^2 以上的供港菜场，其中超过 90%采用该技术，应用广泛。

5.2 以生物防治为主的区域治理技术体系

释放半闭弯尾姬蜂 *D. semiclausum* Hellen 等寄生蜂，建立稳定的田间种群，发挥天敌的控害作用；施用 Bt 工程菌制剂、植物源农药印楝素等生物农药；高效诱捕技术与化学农药相协调的小菜蛾治理技术。该技术在西南蔬菜种植区、华中油菜种植区推广应用。

5.3 以行为调控为主的区域治理防控技术体系

优化集成小菜蛾成虫电击捕杀新技术（冯夏等，2011a）、黑光灯诱杀、性信息素及诱捕器田间使用技术和成虫忌避剂的应用等。该技术适用于绿色食品、有机食品、出口欧盟蔬菜等高端蔬菜生产区域使用，产品可达到绿色食品质量标准。

5.4 基于抗药性监测的区域治理防控技术体系

针对散户种植、北方地区包菜田、油菜田等种植水平相对较低的区域，优化集成应用基于全国小菜蛾种群抗药性的系统监测的区域性抗药性治理技术。根据小菜蛾对药剂的抗药性有季节性差异和区域性差异的特点，及时监测并分析当地小菜蛾抗药性程度，因地制宜制定出科学、合理的区域性用药技术进行抗药性治理，实施周年轮换用药方案，可操作性强，减少了农民用药次数和单次用药量，已在华南区推广应用。

6 结论和展望

通过研究小菜蛾的生物学特性、生态适应、迁飞、扩散和越冬等阐明了我国十字花科小菜蛾灾变的关键因子，明确了小菜蛾的越冬界限及成虫的迁飞能力，揭示了小菜蛾在我国的迁飞路径，建立了小菜蛾种群的预警技术。同时，全面掌握了我国蔬菜主产区小菜蛾的抗药性现状和变化动态，根据各地区小菜蛾种群抗药性水平，制定了科学合理的药剂轮换使用方案，进而明确了我国小菜蛾田间种群对不同类型杀虫剂的抗药性分布和分子机理，建立了新型杀虫剂预防性抗药性治理技术，研发出以区分剂量为基础的抗药性监测技术、基于 DNA 的快速检测试剂盒和早期抗药性诊断技术，同时结合我国十字花科蔬菜和油菜产业需求，种植结构的优化升级，加上气候变化等因素，提出适合新形势下的小菜蛾防控关键新技术，并进行创新、优化和集成。

同时，由于气候变化、种植结构调整等原因，小菜蛾在油菜上的危害日趋严重，我国在该领域的研究亟待加强。随着我国十字花科蔬菜和油菜产业需求的不断提高，需要研究适合新形势下小菜蛾的综合防控新技术，建立相应的适合各区域特点的新技术体系，保障气候和栽培模式改变条件下我国十字花科作物的安全持续生产。项目将持续开展更加系统的小菜蛾抗药性监测研究，深入研究小菜蛾对常用药剂的抗药性分子机理，研制多种药剂抗药性快速诊断试剂盒，建立预防性抗药性治理技术，完善区域性抗药性治理技术体系，并重视油菜田小菜蛾的综合防治研究。

参考文献(References)

Bi DF, 2010. Study on resistance monitoring, resistance selection and resistance biochemical mechanism of indoxacard to diamondback moth (*Plutella xylostella*). Master dissertation. Wuhan: Huazhong Agricultural University. [毕道芬, 2010. 小菜蛾抗药性监测, 对茚虫威抗性选育及抗性生化机理研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学.]

Endersby NM, Ridland PM, 2004. Proceedings of the Fourth International Workshop on the Management of Diamondback Moth and Other Crucifer Pests. Melbourne, The Regional Institute, Gosford, Australia. 117–123.

Feng LR, Lai YP, Zhang DF, Guo QY, 2013. Investigation of population dynamic of *Plutella xylostella* in spring rape of Qinghai plateau. *Northern Horticulture*, 21: 129–131. [冯丽荣, 来有鹏, 张登峰, 郭青云, 2013. 高原春油菜区小菜蛾成虫种群发生动态调查. 北方园艺, 21: 129–131.]

Feng X, Li ZY, Chen HY, 2011a. Electronic-killing device of diamondback moth: Patent ZL200910036727. 4, China. 2011. 8. 31. [冯夏, 李振宇, 陈焕瑜, 2011. 移动式小菜蛾成虫捕杀装置. ZL200910036727. 4, 中国. 2011. 8. 31.]

Feng X, Li ZY, Wu QJ, Chen AD, Wu YD, Hou YM, He YR, Li JH, Xie SH, Zhang JM, Fu W, Ma CS, 2011b. Research progress of the resistance management and sustainable control of diamondback moth. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(2): 247–253. [冯夏, 李振宇, 吴青君, 谌爱东, 吴益东, 侯有明, 何余容, 李建洪, 谢圣华, 章金明, 符伟, 马春森, 2011. 小菜蛾抗性治理及可持续防控技术研究与示范——公益性行业(农业)科研专项“小菜蛾可持续防控技术研究与示范”. 应用昆虫学报, 48(2): 247–253.]

Fu XW, Xing ZL, Liu ZF, Ali A, Wu KM, 2014. Migration of diamondback moth, *Plutella xylostella*, across the bohai sea in northern china. *Crop Protection*, 64(3): 143–149.

Furlong MJ, Wright DJ, Dosdall LM, 2013. Diamondback moth ecology and management: problems, progress, and prospects. *Annual Review of Entomology*, 58: 517–541.

Guo L, 2014. Molecular mechanism of chlorantraniliprole resistance in *Plutella xylostella*(L.). Doctoral dissertation. Beijing: China Agricultural University. [郭磊, 2014. 小菜蛾对氯虫苯甲酰胺抗性的分子机制. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学.]

Lei YY, L LH, He YR, Liang SY, 2010. Correlation between biological characteristics of *Isaria fumosorosea* and its pathogenicity against *Plutella xylostella*. *Acta Phytophylacica Sinica*, 37(3): 217–221.] [雷妍圆, 吕利华, 何余容, 梁淑仪, 2010. 玫烟色棒束孢的生物学特性与其对小菜蛾致病力的相关性. 植物保护学报, 37(3): 217–221.]

Li ZY, Feng X, You MS, Liu SS, Furlong MJ, 2016a. Biology, ecology and management of the diamondback moth in China. *Annual Review of Entomology*, 61: 277–296.

Li ZY, Zalucki MP, Bao HL, Chen HY, Hu ZD, Zhang DY, Lin QS, Yin F, Wang M, Feng X, 2012. Population dynamics and ‘outbreaks’of diamondback moth, *Plutella xylostella*, in Guangdong Province, China: climate or the failure of management? *Journal of Economic Entomology*, 105(3): 739–752.

Li ZY, Zalucki MP, Yonow T, Kristicos DJ, Bao HL, Chen HY, Hu ZD, Feng X, Furlong MJ, 2016b. Population dynamics and

management of diamondback moth (*Plutella xylostella*) in China: The relative contributions of climate, natural enemies and cropping patterns. *Bulletin of Entomological Research*., 106（02）：197–214.

Liang YP, Wu QJ, Zhang YJ, Xu BY, Xie SH, Ji XC, 2010. Resistance risk assessment and cross-resistance of *Plutella xylostella* to abamectin. *Journal of Tropical Organisms*, 1(3): 228–232. [梁延坡, 吴青君, 张友军, 徐宝云, 谢圣华, 吉训聪, 2010. 小菜蛾对阿维菌素的抗性风险评估及交互抗性的室内测定. 热带生物学报, 1(3): 228–232.]

Liu F, Shi XZ, Liang YP, Wu QJ, Xu BY, Xie W, Wang SL, Zhang YJ, Liu NN, 2014. A 36-bp deletion in the alpha subunit of glutamate-gated chloride channel contributes to abamectin resistance in *Plutella xylostella*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 153(2): 85–92.

Lin QS, Jin FL, Hu ZD, Chen HY, Yin F, Li ZY, Dong XY, Zhang DY, Ren SX, Feng X, 2013. Transcriptome analysis of chlorantraniliprole resistance development in the diamondback moth *Plutella xylostella*. *PLoS ONE*, 8: e72314.

Niu YQ, 2014. Occurrence, population genetic structure and overwintering of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) in Taibai. Doctoral dissertation. Yangling: Northwest A&F University. [牛燕琴, 2014. 太白县小菜蛾的发生, 种群遗传结构和越冬问题的研究. 博士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学.]

Pan F, He YR, Wang DS, Guo XL, Chen MC, 2012. Research advances on effect of temperature on growth, development and reproduction of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.). *Journal of Environmental Entomology*, 34(1): 104–109. [潘飞, 何余容, 王德森, 郭祥令, 陈绵才, 2012. 温度对小菜蛾生长发育和繁殖影响的研究进展. 环境昆虫学报, 34(1): 104–109.]

Sarfraz M, Dosdall LM, Keddie BA, 2006. Diamondback moth-host plant interactions: implications for pest management. *Crop. Prot*., 25(7): 625–639.

Sarfraz M, Keddie AB, Dosdall LM, 2005. Biological control of the diamondback moth, *Plutella xylostella*: a review. *Biocontrol Sci. Technol*., 15(8): 763–789.

Shao ZR, Feng X, Zhang S, Li ZY, Huang JD, 2013. NY/T 2360-2013. Guideline for insecticide resistance monitoring of *Plutella xylostella* (L.) on cruciferous vegetables. Beijing. Agriculture Industry Standard of China. [邵振润, 冯夏, 张帅, 李振宇, 黄军定, 2013. NY/T 2360-2013, 小菜蛾抗药性监测技术规程. 北京. 中国农业行业标准.]

Shelton AM, Collins HL, Zhang YJ, Wu QJ, 2008. Proceedings of the Fifth International Workshop on the Management of Diamondback Moth and Other Crucifer Pests. Beijing: China Agric. Sci. Technol. Press. 112–118.

Srinivasan R, Shelton AM, Collins HL, 2012. Management of the Diamondback Moth and Other Crucifer Insect Pests: Proceedings of the Sixth International Workshop. AVRDC-The World Vegetable Center, Shanhua, Taiwan. 15–19.

Talekar NS, Shelton AM, 1993. Biology, ecology and management of the diamondback moth. *Annual Review of Entomology*, 38: 275–301.

Wang DS, L LH, He YR, Tan SS, Pan F, 2010. Effect of conventional insecticides on *Trichogrammatoidea bactrae*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 47(2): 379–383. [王德森, 吕利华, 何余容, 覃松生, 潘飞, 2010. 常用杀虫剂对小菜蛾天敌卷蛾分索赤眼蜂的影响. 应用昆虫学报, 47(2): 379–383.]

Wu QJ, Liu F, Liang YP, Kong LB, Xu BY, Zhang YJ, Wang SL, 2013. Identification of resistance to abamectin diamondback moth populations: Patent ZL201110005392. 7, China. 2013. 01. 02. [吴青君, 柳峰, 梁延坡, 孙礼兵, 徐宝云, 张友军, 王少丽, 2013. 鉴定抗阿维菌素小菜蛾种群的方法, ZL201110005392. 7, 中国. 2013. 01. 02.]

Wu QJ, Zhang SF, Yao JL, Xu BY, Wang SL, Zhang YJ, 2012. Management of diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) by mating disruption. *Insect Science*, 19 (6): 643–648.

Xiong LG, Wu QJ, Wang SL, Xu BY, Zhu GR, Zhang YJ, 2010. Biological characteristic of overwintering in the diamondback moth, *Plutella xylostella*. *Plant Protection*, 36(2): 90–93. [熊立钢, 吴青君, 王少丽, 徐宝云, 朱国仁, 张友军, 2010. 小菜蛾越冬生物学特性研究. 植物保护, 36(2): 90–93.]

You M, Wei H, 2007. Research Progress of Diamondback Moth (*Plutella xylostella* L.). Beijing: China Agriculture Press. 176–198. [尤民生, 魏辉, 2007. 小菜蛾的研究. 北京: 中国农业出版社. 176–198.]

Yao FN, 2010. Study on resistance monitoring, resistance selection and resistance biochemical mechanism of Diafenthiuron to diamondback moth (*Plutella xylostella*). Master dissertation. Wuhan: Huazhong Agricultural University. [姚锋娜, 2010. 小菜蛾抗药性监测、对丁醚脲抗性选育及抗性机理的研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学.]

Yin YQ, Li XY, Chen ZQ, Chen AD, 2010. Toxicity of commonly used insecticides against adults and pupae of *Diadegma semiclausum*. *Plant Protection*, 36(3): 169–171. [尹艳琼, 李向永, 陈宗麒, 陈福寿, 谌爱东, 2009. 杀虫剂对半闭弯姬蜂成虫和蛹的安全性评价. 植物保护, 36(3): 169–171.]

Zhang CC, 2010. Application technology for *Bacillus thuringiensis*

engineering strain WG-001 WP. Master dissertation. Wuhan: Huazhong Agricultural University. [张聪冲, 2010. 苏云金芽孢杆菌工程菌 WG-001 防治小菜蛾的使用技术研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学.]

Zhang JM, Huang F, Zhang PJ, Lü YB Liu M, Li WD, Bei YW, Zhang ZJ, 2013. An investigation of spider species on cruciferous crops in the field during spring. *Zhejiang Agriculture Scienc*e, 6: 705–706.[章金明, 黄芳, 张蓬军, 吕要斌, 刘敏, 郦卫弟, 贝亚维, 张治军, 2013. 春季十字花科作物田间蜘蛛种类调查. 浙江农业科学, 6: 705–706.]

Zhang JM, Lü YB, Lin W, Zhang PJ, Huang F, Li WD, Bei YW, Zhang ZJ, 2012. Effect of trap shape on the trapping efficiency of the sex pheromone of the diamondback moth. *Zhejiang Agriculture Scienc*e, 7: 1004–1007. [章金明, 吕要斌, 林文彩, 张蓬军, 黄芳, 郦卫弟, 贝亚维, 张治军, 2012. 诱捕器形状对小菜蛾性诱剂诱捕效能的影响. 浙江农业科学, 7: 1004–1007.]

Zhang JM, Lü YB, Lin W, Huang F, Bei YW, Zhang PJ, Chen C, 2011a. The toxicities of 11 kinds of insecticides to the diamondback moth, *Plutella xylostella* and its natural enemy *Erigonidium graminicolum*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(2): 301–305.[章金明, 吕要斌, 林文彩, 黄芳, 贝亚维, 张蓬军, 陈诚, 2011. 十一种农药对小菜蛾的毒力及其天敌草间小黑蛛的安全性. 应用昆虫学报, 48(2): 301–305.]

Zhang JM, Lü YB, Lin WC, Bei YW, Li WD, Zhang ZJ, 2011b. Trapping device of diamonback moth: Patent ZL200810120624. 1, China. 2011. 8. 10. [章金明, 吕要斌, 林文彩, 贝亚维, 郦卫弟, 张治军, 2011. 小菜蛾成虫诱捕器, ZL200810120624. 1, 中国. 2011. 8. 10.]

Zhu X, Yang JQ, Wu QJ, Li JH, Wang SL, Guo YJ, Liu YT, Zhang YJ, Yang FS, 2012. Genetic diversity of different geographical populations of *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) from China based on ISSR analysis. *Acta Entomologica Sinica*, 55(8): 981–987. [朱勋, 杨家强, 吴青君, 李建洪, 王少丽, 郭兆将, 刘雅婷, 张友军, 杨峰山, 2012. 小菜蛾不同地理种群遗传多样性的 issr 标记研究. 昆虫学报, 55(8): 981–987.]