

小菜蛾抗药性及其生物防治研究进展

郭鑫楠¹, 唐晓琴^{1*}, 王文峰², 孙兆旭¹

(1. 西藏农牧学院植物科学学院, 西藏 林芝 860000; 2. 西藏自治区农牧科学院, 西藏 拉萨 850000)

摘要:小菜蛾作为一种在全球范围内普遍存在的农业害虫,对蔬菜生产构成了严重威胁。目前,针对小菜蛾的防治策略主要包括化学防治、农业防治和生物防治等方法。然而,由于化学农药的大量使用,小菜蛾已经展现出了越来越强的抗药性,这使得其防治变得愈加困难。通过分析国内外的小菜蛾防治技术,可以发现生物防治方法在有效控制小菜蛾的同时,并不会引发害虫的抗药性问题。为了更加清晰地了解小菜蛾造成的危害性,从小菜蛾的发生概况与原因、抗药性的产生及其管理措施、抗药性监测等方面进行了综述。目前,小菜蛾的生物防治主要利用的是真菌、细菌、病毒以及天敌等生物因素。通过对最新研究进展的综述,展望了未来小菜蛾生物防治的发展前景。

关键词:小菜蛾;生物防治;抗药性;抗药机制;天敌

中图分类号:S433.4

文献标志码:A

Research Progress on Resistance and Biological Control of Cress moth

GUO Xinnan¹, TANG Xiaoqin^{1*}, WANG Wenfeng², SUN Zhaoxu¹

(1. College of Plant Sciences, Tibet Agricultural and Animal Husbandry University, Tibet Linzhi 860000, China; 2. Tibet Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Tibet Lhasa 850000, China)

Abstract: Cress moth is a common agricultural pest in the world, which poses a serious threat to vegetable production. Chemical, agricultural and biological control methods can be used to control Cress moth, but nowadays the resistance of Cress moth has increased due to the massive use of chemical pesticides, which makes it difficult to control. According to the analysis of the domestic and foreign moth control technology, biological control methods can effectively control the moth without causing its resistance. In order to better understand the harmfulness of the moth, we reviewed the occurrence and causes of the moth, resistance and its management, and resistance monitoring. Currently, fungi, bacteria, viruses and natural enemies are used in the biological control of the moth, and this paper reviews the latest research progress and looks forward to its future development.

Key Words: cress moth; biological control; resistance; resistance mechanisms; natural enemies

小菜蛾(*Plutella xylostella* L.),属于鳞翅目菜蛾科菜蛾属,又称小青虫、两头尖、吊丝虫,是世界性害虫。它主要危害十字花科类的蔬菜,体型比较小,但繁殖力强。一旦泛滥,小菜蛾会造成蔬菜减产,甚至可能使作物绝收^[1]。因为化学杀虫剂的大批量使用,加之小菜蛾一年可暴发9~14代^[2],这使得小菜蛾对化学杀虫剂产生了极高的抗药性^[3]。目前,生物防治作为减少农药残留与降低小菜蛾抗性的关键技术之一,是全球响应绿色农业的发展趋势^[4-6]。关于小菜蛾的生物防治有5个方面:真菌、

病毒、线虫、细菌和天敌^[7]。这些生物防治方法为可持续和环保的农业实践提供了有效的替代方案,有望减轻传统化学杀虫剂带来的环境压力,并为农业生产的可持续发展提供保障。

小菜蛾是一种完全变态的昆虫,其一生要经过卵、幼虫、蛹和成虫4个时期^[8-9]。在成虫阶段,小菜蛾的前后翅细长,翅缘呈黄白色,当两翅合拢时,会形成3个接连的菱形斑,所以也叫方块虫。其触角呈丝状,静止时向前伸展。小菜蛾的卵呈椭圆形,颜色为淡黄色,稍扁平,表面光滑且具有光泽,常产于45°倾斜的叶片背面或叶脉上,以防止被雨滴打落^[10]。幼虫初孵时为深褐色,后转为绿色,体形呈纺锤形。小菜蛾的蛹外包裹着一层薄茧,颜色变化大,从刚化蛹的绿色渐渐变为淡黄绿色,最终变为灰褐色。其蛹、幼虫、成虫均可越夏和越冬,且

收稿日期:2024-01-02

作者简介:郭鑫楠(1999-),女,硕士研究生,主要从事农业昆虫与害虫防治研究,E-mail:1285876685@qq.com;*为通信作者:唐晓琴(1977-),女,教授,主要从事森林保护和植物保护方面的研究,E-mail:tibetxq@sina.com。

没有滞育现象,但一般情况下是以蛹越冬^[11]。小菜蛾全年有两次明显的危害高峰,其进化的优势表现在体型小、发育周期短,仅需少许食物就能存活,这使其易于逃避敌害。在适宜的温度条件下,小菜蛾最快只需10 d就能完成一代的发育。

随着科技的提升,温室大棚的出现使得小菜蛾的危害日渐严重^[12]。温室大棚蔬菜种植虽然方便了人们,但由于温室大棚的温度常年保持一致,为小菜蛾提供了有利的生存条件,让小菜蛾在冬季依然能造成危害,导致温室大棚中小菜蛾的防治难度倍增。近年来,我国科学家成功破译了小菜蛾的虫体基因组^[13],揭示了小菜蛾与十字花科蔬菜间协同进化及其抗药性的适应^[14-16],为温室大棚小菜蛾的可持续防治提供了新的研究措施和思路。

为了更有效地探究出小菜蛾生物防治的研究进展,了解和利用蠋蝽、盘绒茧蜂、弯尾姬蜂等天敌资源^[17-19]。综合国内外的研究成果,对小菜蛾的发生概况及原因、抗药性及其治理、抗药性监测及基因研究和生物防治技术进行全面的概述,以此提高人们对小菜蛾的认知,减少杀虫剂的使用,从而更好地控制小菜蛾造成的危害,降低经济损失。

1 小菜蛾发生概况及原因

1.1 发生概况

小菜蛾的危害由来已久,其问题逐渐加剧。在20世纪30年代之前,小菜蛾是被视为危害蔬菜的一种次要害虫,但到了20世纪80年代后期,它已经成为种植十字花科蔬菜地区和国家的主要害虫。1854年初次在北美洲被观察记载,1883年被发现于洛矶山脉和佛罗里达,1905年哥伦比亚的报告有它们的身影。到目前,小菜蛾的踪迹遍布我国各地,包括高海拔地区的西藏自治区,其发生情况普遍且严重^[20]。小菜蛾不单单只危害十字花科类蔬菜,偶尔还危害马铃薯、葱、洋葱、姜、番茄和一些温室植物。小菜蛾生存能力强,虫体硬朗,取食范围广,甚至能取食黄叶和落叶^[21]。一旦暴发,会形成大范围的经济损失。

随着温室大棚的出现和栽培技术的改进,温室蔬菜品种的单一化,以及小菜蛾越冬越夏能力强、世代多等因素,共同导致了小菜蛾的泛滥^[22],这不仅使得蔬菜减产50%以上,还迫使人们广泛使用杀虫剂,从而造成小菜蛾抗药性越来越强、危害越来越重的恶性循环。

1.2 发生原因分析

1.2.1 温室大棚改善了小菜蛾的生存条件

随着温室大棚技术的广泛推广,各类植株的种植成为可能,但同时也为病虫害提供了更为有利的繁殖环境^[23]。在温室大棚里种植的作物恰恰是小菜蛾喜欢取食的十字花科蔬菜。在寄主植物种植面积扩大、食物充足的情况下,小菜蛾的生长发育期变短,且世代之间的重叠增加,从而导致其大面积发生。

温室大棚内的温度常年保持在15~28℃,这恰是小菜蛾发育的适宜温度,并且在温室大棚中,没有大暴雨对小菜蛾的卵造成威胁。已有研究表明,小菜蛾的卵最容易被降雨从植株叶片表面清除^[24],由于小菜蛾无论是成虫还是幼虫、卵都体形小,在大田环境中,夏季常有暴雨,雨水落在蔬菜叶片可以清除虫体,导致小菜蛾种群大面积死亡。然而,在温室大棚中,小菜蛾种群不会受到暴雨的威胁,个体数量因此得以迅速增多,最终导致病虫害的大暴发。

1.2.2 免耕栽培推广,越冬存活虫源增多

随着蔬菜收获季的结束,农田进入了淡季,尤其是冬闲田的面积大范围增加,人们普遍不会花费人力和物力去及时清理田地、清理病残组织及田地四周的杂草,这给小菜蛾以蛹态越冬提供了适宜的条件^[25]。到第二年春季种植蔬菜时,由于田地翻耕推迟,或当代流行免耕技术^[26-27],使得当地越冬小菜蛾的存活虫源逐年增多,提高了越冬蛹态羽化率,导致第一代小菜蛾总量逐年成倍增加,加剧了小菜蛾对农作物的危害。

1.2.3 全球变暖,越冬虫体死亡率低

近年来,由于人们活动的加剧,全球变暖现象日益显著。冬季气温普遍较往年有所升高,再加上人们大量使用化肥,导致冬季土壤温度也增加^[28],越冬虫体的死亡率低,冬后虫口数量大。在这种条件下,一些地区的小菜蛾甚至可以全年繁衍,无需进入越冬状态。国内的学者指出,在原本需要越冬的地区,气候变暖导致小菜蛾全年暴发,从而更快地进化出抗药性^[29]。

1.2.4 小菜蛾抗药性的增强

由于小菜蛾可以全年发生,频繁运用化学杀虫剂,导致小菜蛾的抗药性增强,这也是它难防治的原因。据IRAC分析法统计,小菜蛾最少能抵制97种杀虫剂^[30]。抗药性使药剂防治效果失效,以及小菜蛾世代多,这有利于小菜蛾种群密度的升高。

2 小菜蛾抗药性及其治理

2.1 小菜蛾抗药性的发生和发展

多年来,化学防治一直是管理小菜蛾暴发的主要措施。之前,国内外采取的杀虫剂药剂品类通常为有机氯类、有机磷类、氨基甲酸酯类和拟除虫菊酯类等化学合成的杀虫剂^[31]。现在,我国大面积杀小菜蛾依靠昆虫生长调节剂、苏云金杆菌(Bt)类、杀虫单和杀虫双,以及阿维菌素用量的剧增^[32]。随着这些药剂的大规模、大范围使用,小菜蛾对主导的杀虫剂产生了十分强的抗药性。

滇西菜区抗药性测定显示,该地区的小菜蛾对氯虫苯甲酰胺、丁醚脲、虫螨腈、Bt、茚虫威、多杀霉素、氟啶脲、阿维菌素、高效氯氰菊酯等杀虫剂,均

具有抗性^[33]。在陕西杨凌、宝鸡和渭南3个地域,由于小菜蛾已对高效氯氰菊酯和阿维菌素产生了高水平的抗性,因此应终止使用这两种杀虫剂^[34]。

华中地区的河南、湖南、湖北等省也面临着小菜蛾抗药性的问题。这些地区的小菜蛾对2%阿维菌素乳油(EC)、16 000 IU/mg Bt工程菌WG-001可湿性粉剂(WP)、20%高效氯氰菊酯EC、5%氯虫苯甲酰胺EC、2.5%多杀菌素悬浮剂(SC)、10%溴虫腈EC、5%氟啶脲EC、20%丁醚脲EC、5%茚虫威EC都产生了抗性^[35]。

徐巨龙的研究也表明,不同地区小菜蛾种群对10种杀虫剂的抗药性存在显著差异^[36],详见表1。

根据沈晋良的抗性划分标准,江苏无锡地区的

表1 不同地区小菜蛾种群对10种杀虫剂的抗药性

| 杀虫剂 | 生产厂商 | 种群 | LC50/mg·L ⁻¹ | 抗性指数 |
|-----------------|----------------|-----------|-------------------------|---------|
| 甲氨基阿维菌素 苯甲酸盐 | 青岛瀚生生物科技股份有限公司 | 江苏无锡小菜蛾种群 | 2.03 | 11.94 |
| | | 山东泰安小菜蛾种群 | 0.36 | 2.11 |
| | | 广东白云小菜蛾种群 | 4.06 | 23.88 |
| | | 云南通海小菜蛾种群 | 16.29 | 95.82 |
| 氯虫苯甲酰胺 | 青岛瀚生生物科技股份有限公司 | 江苏无锡小菜蛾种群 | 357.04 | 1428.16 |
| | | 山东泰安小菜蛾种群 | 74.41 | 297.64 |
| | | 广东白云小菜蛾种群 | 28.81 | 115.24 |
| | | 云南通海小菜蛾种群 | 53.16 | 212.64 |
| 氟虫腈 | 青岛瀚生生物科技股份有限公司 | 江苏无锡小菜蛾种群 | 31.98 | 96.91 |
| | | 山东泰安小菜蛾种群 | 29.44 | 89.21 |
| | | 广东白云小菜蛾种群 | 3.03 | 9.18 |
| | | 云南通海小菜蛾种群 | 35.99 | 109.06 |
| 溴氰虫酰胺 | 青岛瀚生生物科技股份有限公司 | 江苏无锡小菜蛾种群 | 3.19 | 1.40 |
| | | 山东泰安小菜蛾种群 | 4.13 | 1.81 |
| | | 广东白云小菜蛾种群 | 7.98 | 3.51 |
| | | 云南通海小菜蛾种群 | 2.83 | 1.25 |
| 溴虫腈 | 青岛瀚生生物科技股份有限公司 | 江苏无锡小菜蛾种群 | 72.05 | 26.49 |
| | | 山东泰安小菜蛾种群 | 4.67 | 1.71 |
| | | 广东白云小菜蛾种群 | 5.269 | 1.94 |
| | | 云南通海小菜蛾种群 | 18.72 | 6.88 |
| 茚虫威 | 京博农化科技股份有限公司 | 江苏无锡小菜蛾种群 | 313.56 | 67.57 |
| | | 山东泰安小菜蛾种群 | 81.92 | 17.65 |
| | | 广东白云小菜蛾种群 | 5.122 | 1.11 |
| | | 云南通海小菜蛾种群 | 162.91 | 35.11 |
| 虫酰肼 | 京博农化科技股份有限公司 | 江苏无锡小菜蛾种群 | 41.62 | 7.95 |
| | | 山东泰安小菜蛾种群 | 139.94 | 26.75 |
| | | 广东白云小菜蛾种群 | 13.51 | 2.58 |
| | | 云南通海小菜蛾种群 | 221.03 | 42.26 |
| 唑虫酰胺 | 海利尔药业集团 | 江苏无锡小菜蛾种群 | 204.73 | 16.84 |
| | | 山东泰安小菜蛾种群 | 23.95 | 1.96 |
| | | 广东白云小菜蛾种群 | 60.61 | 4.98 |
| | | 云南通海小菜蛾种群 | 364.38 | 29.96 |

续表

| 杀虫剂 | 生产厂商 | 种群 | LC50/mg·L ⁻¹ | 抗性指数 |
|--------|------------------------|-----------|-------------------------|-------|
| 丁醚脲 | 海利尔药业集团 | 江苏无锡小菜蛾种群 | 191.53 | 7.07 |
| | | 山东泰安小菜蛾种群 | 77.90 | 3.13 |
| | | 广东白云小菜蛾种群 | 41.85 | 1.68 |
| | | 云南通海小菜蛾种群 | 53.46 | 2.15 |
| 高效氯氰菊酯 | 上海沪联生物药业 (夏邑)股份有限公司 | 江苏无锡小菜蛾种群 | 809.19 | 22.04 |
| | | 山东泰安小菜蛾种群 | 264.59 | 7.21 |
| | | 广东白云小菜蛾种群 | 141.55 | 3.85 |
| | | 云南通海小菜蛾种群 | 325.32 | 8.86 |

小菜蛾种群对氟虫腈表现为高水平抗性,对氯虫苯甲酰胺表现为极高水平抗性;山东泰安地区的小菜蛾种群同样对氟虫腈表现为高水平抗性,对氯虫苯甲酰胺表现为极高水平抗性;广东白云地区的小菜蛾种群对甲氨基阿维菌素苯甲酸盐表现为高水平抗性,对氯虫苯甲酰胺表现为极高水平抗性;云南通海地区的小菜蛾种群对茚虫威表现为高水平抗性,对氯虫苯甲酰胺、氟虫腈和甲氨基阿维菌素苯甲酸盐也表现为极高水平抗性。由此得出,全国大部分地区的小菜蛾种群对双酰胺类杀虫剂和苯丙吡唑类杀虫剂都表现高水平抗性。

要评估小菜蛾抗药性,对小菜蛾抗药性的测定和其抗药性机理的说明就显得非常重要。小菜蛾的抗药机理是由于化学杀虫剂的广泛使用和剂量的加重,造成不止小菜蛾甚至越来越多的昆虫都产生了抗药性。随着昆虫对杀虫剂抗药性的加强,对昆虫抗性机理的研究也受到了越来越多的关注。为了更深入地研究这些机理,科学家们已经从最初的解毒酶的分析,发展到应用分子生物学技术对抗性基因的克隆和表达^[37-38],再到基因组学的研究。借助于先进的技术手段和仪器,对于昆虫抗药性的研究愈来愈深化。昆虫对杀虫剂的抗性机理主要包含两种:对杀虫剂解毒作用的加强即代谢抗性,杀虫剂作用的靶标部位的敏感性减少即靶标抗性^[39-40]。

2.2 小菜蛾抗药性治理

抗药性治理是指采取措施和方法,减轻药剂的选择压力。小菜蛾抗药性治理是使用同样的措施,延迟缓解其抗药性的发展进程,保证药剂的可持续有效治理。在小菜蛾的抗药性治理中,首先,需明确小菜蛾的抗药性发生状况。其次,需要深入了解小菜蛾的危害特征、发生规律以及与其他生物的交互影响。再次,需要研究小菜蛾与其寄主之间的协调进化机制。最后,需要从生物学和其发生规律出

发,筛选和设计有效的防治措施。同时,需要合理使用化学防治和非化学防治技术,建立起一个有效的综合治理体系。

小菜蛾的抗药性治理可以从生物农药替代、生物防治、物理防治、寄主替代、生态调控等多个角度进行考虑和实施。

1)生物农药替代。陈洪凡等^[41]讲述了生物农药对菊花病虫害化学农药防治减量替代技术。小菜蛾的抗药性治理可以采用此技术,即用生物农药替代化学农药。

2)生物防治。周淑香等^[42]运用赤眼蜂寄生小菜蛾,实现对小菜蛾的生物防治,从而达到小菜蛾的抗药性治理。

3)物理防治。根据小菜蛾的习性,如昼伏夜出、趋光性强等,可以采用灯光诱杀、色板诱杀等物理方法进行防治。

4)寄主替代。通过调整耕作制度,选择抗性高的品种,科学管理肥、水,可以降低小菜蛾的危害程度,从而减少化学农药的使用。

5)生态监控。加强小菜蛾抗药性的监测工作,不同地区采取不同的抗药性监测方法,符合当地的小菜蛾大暴发规律。

6)研究抗药性机理。深入了解小菜蛾抗药性产生的机理,可以为制定更有效的治理策略提供科学依据。

7)化学防治规划。对化学防治进行合理的规划,响应当代绿色农业号召,尽量少使用化学杀虫剂,科学地轮换使用化学药剂,以减少对单一药剂的依赖和抗药性的产生。

8)农业管理措施。需要降低越冬虫口数量,以减少小菜蛾的世代更叠。多翻耕、除草、晒田等农业管理措施也有助于减少小菜蛾的数量。

9)性激素引诱。利用小菜蛾对性激素的敏感性,可以用性激素引诱来减少小菜蛾的种群数量。

3 小菜蛾抗药性监测

为了了解小菜蛾目前对哪些杀虫剂有抗药性,而且随时间的变化,小菜蛾对新面世的哪些杀虫剂产生抗药性,或对新的杀虫剂产生抗药性有加快的趋势,需要实时进行小菜蛾的抗药性监测。抗药性的监测方法有生测法、生理生化测定方法和分子监测方法。生测法可以直观地反应出抗药性的表现型,但不能发现基因频率的变化。生理学和生物化学测定,可使用酶标记物监测个体的目标酶或代谢酶的变化,这种方法只能测定一种酶的变化,而抗药性的产生往往是害虫体内多种酶共同作用的结果^[43]。分子监测方法包括乙酰胆碱酯酶基因、钠离子通道基因、 γ -氨基丁酸受体突变与抗体的关系、酯酶扩增与抗药性的关系和多功能氧化酶-P450与抗药性的关系。

进行小菜蛾抗药性监测是保障蔬菜生产和国民经济发展的主要前提。只有不断加强抗药性监测,及时了解其抗药情况,并找出对应的解决途径,才能更有效地控制小菜蛾造成的损失,保障农业生产。

4 小菜蛾抗药性基因研究

2013年,由福建农林大学教授尤民生牵头的小菜蛾基因组测序研究成果在《Nature genetics》上发表^[44]。小菜蛾基因组的破译,为小菜蛾的可持续防控提供了新的理论依据和技术路径。同时,李凤良研究员带领小菜蛾抗药性研究团队,在现有研究的基础上,充分运用小菜蛾的抗药性品系和敏感品系资源,对抗药性分子机理进行了深入的研究,寻找抗药性的关键基因,通过关键基因的表达、调控分析,开发了小菜蛾抗药性诊断芯片、杀虫剂增效剂和新杀虫化合物,为小菜蛾抗药性治理及新农药开发提供了科技支撑^[45]。此外,程罗根等^[46]通过反复回交建立近等基因系,发现与抗性有关的遗传因子被逐渐置换到敏感品系的基因组中。在生理生化机制方面,申本昌等^[47]的研究证实了小菜蛾抗药性的产生涉及多功能氧化酶系(MFO)和谷胱甘肽S-转移酶(GST)。最新的研究,如李文红等^[48]探究了溴氰虫酰胺浸叶处理饲喂小菜蛾后,降低多功能氧化酶活性和肠道优势细菌的相对丰度,但增加了碳水化合物活性酶基因、抗生素耐药性等功能基

因的数量。我国在研究小菜蛾基因方面,不仅取得了可喜成绩,还奠定了我国在害虫领域的国际领先地位。

5 小菜蛾生物防治技术

5.1 细菌杀虫剂

细菌杀虫剂是利用细菌活体或其代谢产物制成的杀虫制剂,也是一种环保绿色低毒无残留的杀虫制剂。细菌杀虫剂是最有潜力取代化学杀虫剂,在自然界中已鉴定出的昆虫致病细菌约有100多种,还有很多没有鉴定出来。现在防治小菜蛾的细菌杀虫剂利用最多的为苏云金芽胞杆菌、球形芽胞杆菌、色素细菌及伯克霍尔德氏菌等。

苏云金芽胞杆菌作用机理是当小菜蛾取食后,苏云金芽胞杆菌的蛋白质可溶于小菜蛾中肠内,并被中肠内的蛋白酶酶解成具有杀虫活性的毒素。这些毒素与小菜蛾中肠的上皮细胞膜结合,导致细胞肿胀和破裂,最后使小菜蛾死亡^[49]。

5.2 真菌杀虫剂

在昆虫病原微生物中,真菌种类最多,大约占昆虫病原微生物种类的一半以上。与细菌杀虫剂、病毒杀虫剂相比,真菌杀虫剂具有两个显著优点。首先,许多种类的真菌有较广的寄生范围,可以作为多种昆虫的杀虫剂。其次,真菌是通过进入昆虫表皮来感染寄主。

2003年,中国第一个国家登记的真菌杀虫剂——杀蝗虫的绿僵菌杀虫剂上市。防治小菜蛾的真菌杀虫剂主要包括绿僵菌、白僵菌和黑僵菌等。

5.2.1 白僵菌

白僵菌感染主要为附着虫体、进入虫体和进入虫体后的一系列发展^[50]。白僵菌孢子对小菜蛾的附着是小菜蛾发病的首要条件,此过程是非特异和被动的,一旦成功侵入便会吸取小菜蛾体内的营养成分,使菌丝体在小菜蛾体内进行大规模繁殖。这种大规模繁殖不仅阻碍了小菜蛾体内的正常体液循环,导致其生理上出现生理饥饿状态,而且还使小菜蛾体内细胞遭受到机械破坏。特别是脂肪体组织,会因菌丝体的侵袭而发生萎缩和解体,使得体液变得浑浊,从而造成虫体死亡。

5.2.2 绿僵菌

绿僵菌侵染小菜蛾的过程跟白僵菌类似。绿僵菌的分生孢子首先附着到虫体表,形成附着胞。

随后,这些孢子会破坏虫体外角质层,穿透体壁进入血腔。为了逃避虫体的天然免疫,真菌改变细胞壁结构以及分泌效应蛋白和次级代谢产物来对抗昆虫免疫,并以酵母样出芽方式大量繁殖占领血腔并杀死昆虫。

5.2.3 黑僵菌

黑僵菌 F061 菌株是从台湾联发生物科技公司引进的,具有高效侵染害虫的能力。当黑僵菌感染小菜蛾后,其孢子会附着于寄主体表上,并在适宜环境中发芽形成侵入菌丝。这些侵入菌丝会分泌酵素来分解昆虫体壁,并协助菌丝侵入血腔,可分泌黑僵菌素使寄主在 2 d 内死亡,或者因菌丝充满虫体而在 5~7 d 后逐渐死亡。最后,受黑僵菌感染的幼虫体表会布满墨绿色的分生孢子,形成下一周期的有效感染源。黑僵菌具有绿色环保、安全、无污染、对害虫不产生抗药性等特点,且扩散和生存能力强,适合于生物防治病虫使用。

5.3 病毒杀虫剂

近几年,病毒杀虫剂的发展十分迅速,其研究和开发工作虽然较细菌杀虫制剂起步较晚,但是技术却很成熟。国际上已报道过的昆虫病毒大多为杆状病毒,我国已从多种昆虫中分离得到 220 多株病毒,其中,核型多角体病毒运用广泛,对于防治小菜蛾也有一定成效。

核型多角体病毒是一种专性寄生的昆虫病毒,一种核型多角体病毒只能寄生相应的一种昆虫或其相近种群。核型多角体病毒主要感染寄主为鳞翅目昆虫,常见的有棉铃虫核型多角体病毒、斜纹夜蛾核型多角体病毒、甜菜夜蛾核型多角体病毒、小菜蛾核型多角体病毒等。小菜蛾核型多角体病毒可以感染小菜蛾使其致病致死。此种病毒针对性强,不会对天敌造成损害,由于病毒具有在几代害虫之间传播的流行能力,患病昆虫死亡后,会通过粪便和昆虫尸体再次感染其他昆虫,所以效果可持续较长时间,后效作用显著。小菜蛾核型多角体病毒是经小菜蛾的口腔或伤口感染,从口腔进入昆虫体内的病毒被胃液消化,松散的病毒颗粒穿透昆虫的腔道,侵入细胞并繁殖,破坏昆虫的细胞结构,然后侵入健康细胞,直至昆虫死亡。

5.4 天敌

利用田间释放天敌进行防治是一种生物防治措施,这种方法更有利于生态的调整和保护。在线虫方面,栾显群等的研究表明,用小卷蛾线虫对小菜蛾有较高的侵染力。在天敌方面,赤眼蜂、菜蛾绒茧蜂、蠋蝽 5 龄若虫、半闭弯尾姬蜂、前凹豹蛛和拟环纹豹蛛等都是小菜蛾的天敌,靠捕食或寄生降低小菜蛾虫口密度。参考余德亿、陈宗麒、孙杨等人的小菜蛾天敌田间调查数据,例举小菜蛾的部分天敌种类(表 2)。

表 2 小菜蛾部分天敌种类

| 类型 | 种名 | 拉丁学名 | 分布 | 应用范围 |
|-----------|-------|--|----------------|---------------------------------------|
| 捕食性 天敌 | 草间小黑蛛 | <i>Erigonidium graminicolum</i> Sundevall | 中南地区、西南地区 | 可用于蚜虫、蓟马、红蜘蛛、叶蝉、红铃虫、棉铃虫、小菜蛾等生物防治 |
| | 八斑球腹蛛 | <i>Coleosoma octomaculatum</i> (Boes.et. Str.) | 中南地区、西南地区、华东地区 | 可用于棉蚜、蓟马、红蜘蛛、叶蝉、小造桥虫、棉铃虫、小菜蛾等生物防治 |
| | 拟水狼蛛 | <i>Pirata subpiraticus</i> Boes. et Str. | 中南地区、华东地区 | 可用于稻飞虱、稻纵卷叶螟、二化螟、三化螟等生物防治 |
| | 三突花蛛 | <i>Misumenops tricuspidatus</i> | 除青藏高原外 | 可用于棉铃虫、小造桥虫、金刚钻、玉米螟等生物防治 |
| | 食虫沟瘤蛛 | <i>Ummeliata insecticeps</i> Boes. et Str. | 中南地区、西南地区、华东地区 | 可用于稻飞虱、稻纵卷叶螟、二化螟、三化螟等生物防治 |
| | 拟环纹狼蛛 | <i>Lycosa pseudoannulata</i> (Boes. et. Str.) | 中南地区、华东地区 | 可用于稻飞虱、叶蝉、二化螟、三化螟等生物防治 |
| | 八斑球腹蛛 | <i>Theridion octomaculatum</i> (Boes. et. Str.) | 中南地区、西南地区、华东地区 | 可用于棉蚜、蓟马、红蜘蛛、叶蝉、棉铃虫等生物防治 |
| | 斜纹猫蛛 | <i>Oxyopes sertatus</i> L. Koch | 中南地区、华东地区 | 可用于飞虱、稻纵卷叶螟、叶蝉、棉铃虫、小菜蛾、菜青虫等生物防治 |
| | 异色瓢虫 | <i>Harmonia axyridis</i> | 除广东南部、香港外 | 可用于各类蚜虫和木虱、螨类等生物防治 |
| | 四斑月瓢虫 | <i>Chilomenes quadriplagiata</i> (Swartz) | 西南地区、华东地区 | 可用于各类蚜虫和木虱、螨类等生物防治 |
| | 青翅隐翅甲 | <i>Paederus fuscipes</i> Curtis | 中南地区、西南地区、华东地区 | 可用于玉米螟、棉叶蝉、棉盲蝽、小菜蛾、棉叶螨、棉铃虫、蓟马、棉蚜等生物防治 |
| | 中华草蛉 | <i>Chrysoperla sinica</i> Tjeder | 全国 | 可用于介壳虫、粉虱、红蜘蛛、蛾类等生物防治 |

续表

| 类型 | 种名 | 拉丁学名 | 分布 | 应用范围 |
|-------|--------|--|--------------------|---------------------------|
| 寄生性天敌 | 小菜蛾绒茧蜂 | <i>Cotesia plutellae</i> (Kurdjumov) | 西南地区 | 用于小菜蛾生物防治 |
| | 菜蛾啮小蜂 | <i>Oomyzus sokolowskii</i> (Kurdjumov) | 华东地区 | 用于小菜蛾生物防治 |
| | 弯尾姬蜂 | <i>Diadegma semiclausum</i> | 华东地区 | 用于三化螟、荸荠白螟、小菜蛾等生物防治 |
| | 颈双缘姬蜂 | <i>Diadromus collaris</i> (Gravenhorst) | 华东地区 | 用于小菜蛾生物防治 |
| | 螟黄赤眼蜂 | <i>Trichogramma chilonis</i> Ishii | 华北地区、西南地区、 中南地区 | 用于玉米螟、小菜蛾等生物防治 |
| | 大腿小蜂 | <i>Brachymeria</i> sp. | 西南地区 | 用于玉米螟、小菜蛾等生物防治 |
| | 菜蛾赤眼蜂 | <i>Trichogramma</i> sp. | 华北地区、西南地区、 中南地区 | 用于小菜蛾生物防治 |
| | 东方姬蜂 | <i>Macromollen orientale</i> Ker- rich | 中南地区 | 用于小菜蛾、粘虫等生物防治 |
| | 厚唇姬蜂 | <i>Phaeogenes</i> sp. | 华东地区、西南地区、 中南地区 | 用于稻纵卷叶螟、二化螟、小菜蛾等生物防治 |
| | 黑瘤姬蜂 | <i>Pimpla</i> sp.(<i>Coccygomius</i> sp.) | 华东地区、西南地区、 中南地区 | 用于稻纵卷叶螟、二化螟、小菜蛾、银纹夜蛾等生物防治 |

在控制小菜蛾种群中,捕食性天敌和寄生性天敌是影响小菜蛾种群发展趋势的重要因素。通过表2可见小菜蛾的天敌种类众多,有卵寄生性、幼虫寄生性和蛹寄生性天敌,其中,幼虫寄生性天敌种类占绝大多数。由于小菜蛾的抗药性增强,天敌的防治方法变得尤为重要,因此,需要通过提高菜农的认知、减少使用不利于天敌存活的农药、补充优势天敌种类和数量等措施,有效地利用和保护天敌,实现对小菜蛾的持续控制,同时减少对环境的负面影响,实现农业生产的可持续发展。

6 展望

在对小菜蛾的防治方面,要结合多种因素来设计合理的防治措施,目前,生物农药的使用已成为一种趋势。我国现在防治小菜蛾的农药品种同质化严重,针对小菜蛾抗药性,需要实时进行小菜蛾的抗药性监测,了解其发生抗药性的机理,可以采取多种药剂并使,或者在使用真菌杀虫剂时,结合病毒杀虫剂,以此降低小菜蛾的抗药性。比如银杏酚酸与印楝素、苏云金杆菌与球孢白僵菌、甜菜夜蛾核型多角体病毒与苏云金杆菌、阿维菌素与多杀霉素、阿维菌素与乙基多杀菌素、球孢白僵菌与虫酰肼等的合理混配,在室内外对小菜蛾均有较好的防治效果。生物药剂虽然对环境危害小,不造成残留,但也存在保存期短、防治效果不稳定等问题,而

且生物农药通常对应用技术要求较为严格,这也是今后应该解决和优化的问题。让生物农药推动和促进我国小菜蛾防控事业,实现蔬菜化学农药使用量的减少,小菜蛾抗药性降低,确保蔬菜质量和环境安全。

参考文献:

[1]郭兆将,康师,吴青君,等.小菜蛾饲养技术与规范[J].应用昆虫学报,2015(2):492-497.

[2]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[J].昆虫学报,1979(3):310-319.

[3]董万庆,尹艳琼,郑丽萍,等.滇西菜区小菜蛾发生规律及抗药性监测[J].环境昆虫学报,2022,44(3):722-728.

[4]WEN X X,PENG J X,XIU F W,et al.Natural-Enemy-Based Bio-control of Tobacco Arthropod Pests in China [J].Agronomy,2023(13):1972.

[5]PÉREZ-MÉNDEZ N,MARTINEZ-EIXARCH M,LLEVAT R,et al.Enhanced Diversity of Aquatic Macroinvertebrate Predators and Biological Pest Control but Reduced Crop Establishment in Organic Rice Farming [J].Agriculture, Ecosystems and Environment,2023,357:108691.

[6]王嘉乐,朱佳晨,江薰垣,等.豆野螟的生物防治研究进展与展望[J].环境昆虫学报,2023,45(2):395-407.

[7]刘青娥,夏更寿.小菜蛾生物防治研究进展[J].安徽农业科学杂志,2005,33(10):1919-1920,2002.

[8]曹晓明.室内饲养的小菜蛾生物学特性的观察[J].北京农业,2010(33):53-55.

[9]SENGONCA C,LIU B.Influence of Mixed Biocide GCSC-BtA on the Pupae and Adult Stages of Apanteles Plutellae Kurd. (Hym., Braconidae) and its Host, *Plutella xylostella* (L.) (Lep., Plutellidae)[J].Anzeiger fur Schadlingskunde,2001,74(6):145-149.

- [10] MD M R, MYRON P Z, MICHAEL J F. Diamondback moth Egg Susceptibility to Rainfall: Effects of Leaf Surface Properties on the Direct and Indirect Impact of Simulated Rain[J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2023, 171(9): 704–715.
- [11] 崔瑞媛. 低温适应下小菜蛾对短期冷胁迫的生理响应[D]. 延安: 延安大学, 2022.
- [12] 常晓丽, 袁永达, 张天澍, 等. 小菜蛾生物学特性及防治研究进展[J]. *上海农业学报*, 2017, 33(5): 145–150.
- [13] 陈亚琼. 小菜蛾遗传连锁图谱构建与比较基因组[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.
- [14] 罗德. 寄主胁迫下小菜蛾种群适应性及遗传变异的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2011.
- [15] 李方圆. 小菜蛾化学感受蛋白 PxylCSP18、19 鉴定及 PxylCSP18 功能分析[D]. 太原: 山西农业大学, 2022.
- [16] 蒋颖霞. 小菜蛾双链 RNA 内切酶对 RNAi 效率的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2020.
- [17] 陈宗麒, 缪森, 杨翠仙, 等. 小菜蛾弯尾姬蜂引进及其控害潜能评价[J]. *植物保护*, 2003(1): 22–24.
- [18] 朱云, 刘杨, 王桂荣, 等. 引起小菜蛾盘绒茧蜂雌雄差异反应的气味筛选及行为学检测[J]. *植物保护*, 2018, 44(2): 29–37.
- [19] 唐艺婷, 郭义, 潘明真, 等. 蠋蛾对小菜蛾幼虫的捕食作用[J]. *植物保护*, 2020, 46(4): 155–160.
- [20] 付彩青. 西藏小菜蛾对常用药剂抗药性的初步研究[D]. 拉萨: 西藏大学, 2020.
- [21] 韩艺欣, 高德良, 庄占兴, 等. 小菜蛾的人工饲养研究进展[J]. *农业灾害研究*, 2019, 9(1): 9–10.
- [22] 何余容, 吕利华, 庞雄飞. 小菜蛾自然种群连续世代生命表的组建与分析[J]. *华南农业大学学报*, 2000, 21(1): 34–37.
- [23] 殷耀兵, 高会东. 温室大棚蔬菜病虫害防治的特色药剂[J]. *植物医生*, 1998, 11(1): 43–44.
- [24] SILVA R, FURLNG M J. Diamondback moth Oviposition: Effects of Host Plant and Herbivory [J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2012, 143(3): 218–230.
- [25] 熊立钢, 吴青君, 王少丽, 等. 小菜蛾越冬生物学特性研究[J]. *植物保护*, 2010(2): 90–93.
- [26] 鲁宗仁. 稻田免耕种植蔬菜试验[J]. *西南农业大学学报*, 1987(A2): 166–167.
- [27] 王向丽. 蔬菜地膜覆盖连续免耕高产栽培技术[J]. *农民致富之友*, 2019(11): 40.
- [28] LIU R, HU Y Y, ZHEN X S, et al. The Response of Crop Yield, Carbon Sequestration, and Global Warming Potential to Straw and Biochar Applications: A Meta-analysis [J]. *The Science of the Total Environment*, 2024, 907: 16788.
- [29] MA C S, ZHANG W, PENG Y, et al. Climate Warming Promotes Pesticide Resistance Through Expanding Overwintering Range of a Global Pest [J]. *Nature communications*, 2021, 12(1): 5351.
- [30] 尹飞, 葛天成, 肖勇, 等. 小菜蛾种群杂交对后代生长发育和解毒代谢酶活性的影响[J]. *中国农学通报*, 2023, 39(27): 126–132.
- [31] 赵建周, 朱国仁, 吴世昌. 小菜蛾抗药性及其治理的研究[J]. *世界农业*, 1991(9): 30–32.
- [32] 何玉仙, 杨秀娟, 翁启勇. 小菜蛾抗药性研究及其治理[J]. *江西农业大学学报*, 2001(3): 320–324.
- [33] 尹艳琼, 杨明文, 彭桂清, 等. 滇西南菜区小菜蛾发生规律及抗药性现状[J]. *植物保护*, 2019, 45(6): 288–291, 310.
- [34] 殷劭鑫, 张春妮, 张雅林, 等. 陕西小菜蛾对 9 种杀虫剂的抗药性监测[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2016(1): 102–110.
- [35] 夏耀民, 鲁艳辉, 朱勋, 等. 华中地区小菜蛾对 9 种杀虫剂的抗药性测定[J]. *中国蔬菜*, 2013(22): 75–80.
- [36] 徐巨龙. 小菜蛾对十种杀虫剂的抗性检测及对溴氰虫酰胺的抗性风险评估[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- [37] 田雪莲, 尹显慧, 龙友华, 等. 低剂量乙基多杀菌素对小菜蛾解毒酶的影响[J]. *农药学学报*, 2016, 18(5): 589–595.
- [38] 孙杨, 秦文婧, 黄金金, 等. 小菜蛾对三氟甲吡醚的抗性风险评价与抗性生化机制研究[J]. *应用昆虫学报*, 2018, 55(3): 481–488.
- [39] 陈之浩, 程罗根, 张晓飞, 等. 小菜蛾抗药性分子遗传机理的探讨与分析[J]. *植物保护学报*, 2005(1): 67–70.
- [40] 唐涛, 刘雪源, 邱立红. RNA 干扰及其对昆虫抗药性相关基因的沉默研究[J]. *棉花学报*, 2010(6): 617–624.
- [41] 陈洪凡, 黄蓉, 胡建坤, 等. 菊花病虫害防治化学农药减施替代技术综述[J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(14): 6–11.
- [42] 周淑香, 高芑, 赫思聪, 等. 防治小菜蛾赤眼蜂蜂种和品系筛选与田间防治效果评价[J]. *中国生物防治学报*, 2024(8): 1–10.
- [43] 向中文, 朱经云, 刘同先, 等. 八种十字花科寄主植物真叶和子叶的化学成分及其对小菜蛾生长发育及生理代谢的影响[J]. *植物保护学报*, 2023, 50(4): 1042–1054.
- [44] YOU M SH, YUE ZH, HE W Y, et al. A Heterozygous moth Genome Provides Insights into Herbivory and Detoxification. [J]. *Nature genetics*, 2013, 45(2): 220–225.
- [45] 李凤良, 程罗根, 韩招久, 等. 小菜蛾对溴氰菊酯的抗性遗传分析[J]. *西南农业学报*, 2000(4): 62–66.
- [46] 程罗根, 李凤良, 韩招久, 等. 小菜蛾对杀虫双和杀螟丹抗药性遗传的 DNA 随机扩增多态性研究[J]. *昆虫学报*, 2001(1): 15–20.
- [47] 申本昌, 乔传令. 简并引物克隆小菜蛾羧酸酯酶基因家族的初步研究[C]//中国昆虫学会. 昆虫学创新与发展——中国昆虫学会 2002 年学术年会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2002: 287–288.
- [48] 李文红, 向立刚, 郑苹, 等. 宏基因组解析溴氰虫酰胺对小菜蛾肠道菌群结构的影响[J]. *西南农业学报*, 2023, 36(2): 340–347.
- [49] 谢俊雁, 罗斯思, 朱梓荣, 等. 苏云金杆菌 Bt4.0718 不同时期比较转录组揭示芽胞和杀虫伴胞晶体形成机制[J]. *微生物学报*, 2024, 64(1): 108–129.
- [50] 况再银, 童文, 孙佩, 等. 球孢白僵菌的侵染特性及应用研究进展[J]. *微生物学通报*, 2023, 50(7): 3187–3197.