

高 宇, 刘延超, 史树森, 等. 缨翅目害虫趋光性及趋色性研究应用进展[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(6): 1427-1434.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2017.06.033

缨翅目害虫趋光性及趋色性研究应用进展

高 宇^{1,2}, 刘延超¹, 史树森¹, 徐 伟¹, 侯向洁¹

(1. 吉林农业大学农学院/大豆区域技术创新中心, 吉林 长春 130118; 2. 农业部东北作物有害生物综合治理重点实验室, 吉林 长春 130124)

摘要: 随着国际贸易激增和气候变暖趋势加速, 缨翅目害虫快速传播和蔓延, 已逐渐成为一类世界性重要害虫。缨翅目害虫的趋光及趋色性在其各项生命活动中起着重要的作用, 基于此特性研发新型、绿色、高效、特异性的物理防治技术具有重要的理论和实践意义。本文总结了缨翅目害虫趋光及趋色性最新研究进展, 从其视觉器官、趋光性、趋色性以及主要研究方法等方面的研究现状进行了分析, 并对缨翅目害虫综合治理方面进行展望, 提出基于趋光及趋色性的物理防控技术, 旨在为更好地开展缨翅目害虫物理防控技术研究和应用提供参考和借鉴。

关键词: 蓟马; 趋光性; 趋色性; 物理防治

中图分类号: S477+.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2017)06-1427-08

Progress in research and application of phototaxis and chromatics tropism of Thysanoptera pests

GAO Yu^{1,2}, LIU Yan-chao¹, SHI Shu-sen¹, XU Wei¹, HOU Xiang-jie¹

(1. College of Agriculture, Jilin Agricultural University / The Innovation Center of Soybean Region Technology, Changchun 130118, China; 2. Key Laboratory of Integrated Pest Management on Crops in Northeast, Ministry of Agriculture, Changchun 130124, China)

Abstract: As international trades accelerating and global warming trends continuing, thrips (Thysanoptera) has been rapidly spread and gradually become an important pest in agriculture and forestry. The phototaxis and chromatics tropism of thrips plays a significant role in the life activities. Based on this characteristic, it has important theoretical principle and practical value on the research and development of new-green-efficient-specific technologies of pest physical control. We summarized the progresses on phototaxis and chromatics tropism of thrips from the aspect of visual organs, phototaxis, chromatics tropism and research methods, and analyzed the research situation of the integrated management of pest thrips. And we also proposed physical pest control technology on account of the phototaxis and chromatics tropism of thrips. This study can provide reference for physics technology research and application on the prevention and control of thrips in future.

Key words: thrips; phototaxis; chromatics tropism; physical pest control

收稿日期: 2017-05-04

基金项目: 农业部东北作物有害生物综合治理重点实验室开放基金课题 (DB201505KF03); 国家现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-04); 吉林农业大学科研启动基金资助项目 (2015010)

作者简介: 高 宇 (1983-), 男, 吉林长春人, 博士, 讲师, 主要从事昆虫生态及害虫综合治理研究。 (E-mail) 627492257@qq.com

通讯作者: 史树森, (E-mail) sss-63@263.net

缨翅目 (Thysanoptera) 昆虫通称蓟马。植食性蓟马为害多种粮食作物和经济作物, 以锉吸式口器刺吸作物的叶、芽和花等部位, 可直接造成作物萎蔫, 其分泌物还可诱发植物病害, 严重影响作物品质和产量等^[1-2]。近年来, 随着国际贸易的激增和全球性的气候变暖, 一些蓟马种类得以快速传播和蔓延, 已逐渐上升成为世界性的重要害虫^[3]。缨翅目害虫的生命周期短、繁殖力极强, 短期内可大量暴发成

灾,农业生产上主要采用化学防治控制这类害虫^[4]。长期以来,由于化学农药的不合理使用,导致害虫抗药性的产生与发展,使生产上化学防治面临巨大挑战,缨翅目害虫的抗药性潜在风险极大^[5-6]。目前许多缨翅目害虫的生物防治技术还不成熟,在田间难以取得很好的防效^[4]。物理诱控技术对于体型微小、隐匿性强的害虫或钻蛀类害虫,具有良好的应用前景。物理诱控技术具有操作简单有效、成本低廉、环保无污染等优点,对农药减量使用具有重要意义,宜在农林业生产实践中广泛推广。基于昆虫趋光性及趋色性而设计、应用的杀虫灯和有色黏板,具有高效、无污染等特点,在农林业生产中已得到了广泛应用^[7]。虽已有很多有关缨翅目害虫趋光趋色性的研究报道,但尚缺乏系统性的归纳和总结。为此,作者总结了相关研究的最新进展,包括缨翅目害虫视觉器官结构和趋光趋色性研究进展和主要研究方法,提出了基于缨翅目害虫趋光趋色性的物理诱控技术,旨在为更好地开展该类害虫的绿色防控研究和应用提供参考和借鉴。

1 缨翅目害虫视觉器官结构

植食性昆虫在接触寄主植物前的定向、降落运动阶段,主要受植物的光学和气味特点的影响,昆虫的视觉和嗅觉起着主导作用^[8]。植物产生的视觉信息源于自然光照射下自身发射的光波,其颜色取决于光谱反射率和光源的光谱成分,当光照变化时,寄主植物反射的光以及颜色也会变化^[9]。趋光及趋色性是昆虫对光及色所固有的趋向反应,从本质上讲趋色性也是一种趋光性^[10-11]。昆虫具有颜色恒定性(Colour constancy)的特性^[12]。颜色恒定性是指即使在照明光源的光谱组成发生变化,物体颜色在很大程度上保持不变的现象,即不论是在单色光源下,还是在多种颜色光源下,昆虫视觉器官对特定波长的光线敏感^[13],从而表现出优先选择某种光或色^[14]。昆虫对特定波长的光具有敏感性,原因是昆虫的眼内含有对特定范围光谱敏感的视觉细胞,其膜上有跨膜视蛋白和载色体,二者共同构成感光色素。感光色素的光谱吸收性很大程度上决定了感光细胞的光谱敏感性^[10]。昆虫的趋光及趋色性可能就是颜色恒定性的具体表现。因此,研究昆虫趋光及趋色性机制,能更深入地了解植食性昆虫与其寄主植物的互作关系^[13]。颜色恒定性使昆虫能在

复杂的不同光源和背景中准确定位寄主植物^[12],而这种特性的内在生理基础是昆虫的视觉器官。

蓟马的视觉器官主要是复眼和单眼,能够接受光波或颜色刺激,其中感觉细胞的视色素能对光谱产生生物电位,并传递给中枢神经系统而引起视觉反应。关于复眼外部形态的研究多集中在鳞翅目、膜翅目等体型较大的昆虫,对缨翅目昆虫研究很少,仅有西花蓟马(*Frankliniella occidentalis*)复眼结构研究报道。西花蓟马的复眼为聚合式复眼,由约 70 个形状及大小有差异的小眼组成,这些小眼分布在背、腹两个区域,腹区小眼排列成三角形,背区小眼排列成半球形。复眼为并列象眼,由角膜、晶锥、视杆和基膜组成。复眼中各小眼由屈光器、视杆和基膜组成。在复眼区域内,复眼上着生一些具有触觉、嗅觉功能的感受器,例如在小眼之间零星分布有刺形感受器^[15]。视觉器官是一个整体,获取和分析外界信息需要复眼和单眼共同发挥作用,当特定的光波刺激到视觉器官细胞后,不同的细胞会根据光波的特征产生自身的感受器电位传达至神经末梢,最终输入中枢神经系统后引发对应的行为^[10]。

2 缨翅目害虫的趋光性

2.1 缨翅目害虫对光谱的趋向行为

国内外学者开展了许多蓟马的光敏感性研究。蓟马视觉器官对光照度有较强的自调节及适应机制,对不同强度的光或色能做出相应的选择。现已知的利用电生理方法测定的蓟马复眼的敏感光谱峰值也都出现在紫外光区和绿光区,例如在 340~605 nm 波谱内的单色光均能引发西花蓟马、棕榈蓟马(*Thrips palmi*)的趋光反应,其光谱趋、避光行为曲线均为多峰型,西花蓟马在蓝绿区 498~524 nm 有一较宽峰,棕榈蓟马在蓝光 483 nm 处有一最高峰^[15-17]。Matteson 等^[16]研究发现,西花蓟马成虫复眼的光谱敏感峰值位于紫外光区和 540 nm 的绿光区,雌虫对紫外光区的敏感性高于雄性,这与 Otani 等^[18]的研究结果基本一致。在 405~650 nm 波谱内,大豆蓟马(*Megalurothrips susitatus*)对波长为 461 nm 的蓝光趋向反应最强^[19]。茶黄蓟马(*Scirtothrips dorsalis*)嗜好的黄绿色对应的虚拟波长为 560 nm^[20]。Kishi 等的研究表明,茶黄蓟马对 355 nm 和 525 nm 的单色光表现出了最强的趋光反应行为,其复眼的敏感光谱峰值出现在 360 nm 和 520

nm 处,行为学与电生理测定结果一致^[21]。Makabe 等的研究表明,烟蓟马(*Thrips tabaci*)复眼的敏感光谱峰值出现在 362 nm 的紫外光和 532 nm 的绿光区^[22]。陈祯研究发现,烟蓟马对除红光(649 nm)以外的 14 种单色光均表现出趋光性,敏感光谱有 2 个,分别是波长 450 nm、光照度 100 lx 的蓝光和波长 510 nm、光照度 200 lx 的绿光^[23]。这些蓟马对特定波长的紫外光和绿光较为敏感,这一趋同性可能与其他未测定的蓟马中普遍存在。值得注意的是,西花蓟马雌虫避光敏感光谱有蓝光区(440 nm)、紫外区(340 nm)和橙色光区(582 nm),雄虫避光敏感光谱有蓝光区(440 nm)和紫外区(340 nm 和 360 nm);西花蓟马对这些波长的单色光有负趋性,但在田间还没有对应颜色的研究报道,这些颜色是否具有明显趋避性尚不明确^[15]。

2.2 缨翅目害虫对光照度的趋向行为反应

蓟马对不同单色光具有明显的选择性,光谱和光照度对其趋光行为和避光行为有较大影响,光照度的影响作用与波长因素有关。例如西花蓟马随光照度增加其避光反应率增大,波长 440 nm 刺激时为较平缓直线,340 nm 刺激时为较缓波动线^[15]。在趋光率和避光率较高的单色光及白光刺激下,棕榈蓟马的趋光率随光照度的增大而提高,而避光率则随着光照度的增大而降低,光照度最弱时仍均有一定趋光率^[17]。

2.3 环境因子对缨翅目害虫趋光行为反应的影响

气候因子是生态系统中的重要因子,对昆虫的生活环境具有重要影响,且与昆虫的趋光行为有密切关系^[24]。温度、相对湿度和降雨情况与诱虫量有显著的相关性,温度表现为正相关,相对湿度和降雨表现为负相关。大气压强在正常气象条件下变化不大,对昆虫的影响有限,对诱虫效果的影响也较小^[25]。但是风向对蓟马的空间分布有影响^[26-27]。因此,一般认为高温、低湿和少雨天气有利于提高灯光或有色黏板的诱虫效率^[24]。

食物的存在与否对西花蓟马颜色趋向选择有较大影响。但西花蓟马在取食和非取食两种条件下,优势色均为绿色、黄色等,与光谱行为近似一致^[15]。性别对西花蓟马趋光行为的影响较小^[15]。光照度对西花蓟马成虫趋光行为反应有较大影响,对避光行为反应影响较小;光照度对不同性别西花蓟马行为反应影响较小^[15]。

3 缨翅目害虫的趋色性

3.1 不同种缨翅目害虫的趋色行为反应

研究不同颜色对蓟马视觉器官刺激的趋向反应,筛选不同作物上各种蓟马所偏好的颜色,有利于开发具有诱集效果的有色黏板或陷阱诱捕蓟马。这方面已有很多报道,例如大豆(*Glycine max*)田中缨翅目昆虫对不同颜色的趋向反应有差异,黑毛蓟马(*Thrips nigropilosus*)、花蓟马(*Frankliniella intonsa*)等对黄、蓝、绿等颜色的趋向反应也有差异^[28]。但对于蓟马所偏好的颜色尚存在争议,特别是在趋色性是否适合大田作物防控应用上,学者的意见也未尽统一。一些研究者发现蓟马偏好白色和黄色,例如在脐橙树(*Citrus sinensis*)上白色黏板诱捕的柑橘蓟马(*Scirtothrips citri*)显著多于蓝、黄、红、绿等颜色的黏板^[29]。榕管蓟马(*Gynaikothrips uzeli*)^[30]、榕母管蓟马(*Gynaikothrips ficorum*)^[31]、香蕉花蓟马(*Thrips hawaiiensis*)^[32-33]、梳缺花蓟马(*Frankliniella schultzei*)^[32]、普通大蓟马(*Megalurothrips usitatus*)^[32]、茶黄蓟马^[32]、牛角花齿蓟马(*Odonotothrips loti*)^[34]等对黄色有较强趋向反应。棉蓟马等对白色有较强趋向反应^[35]。白色黏板适合监测转基因水稻(*Oryza sativa*)上的稻蓟马(*Stenchaetothrips biformis*)、花蓟马、禾蓟马(*Frankliniella tenuicornis*)、稻管蓟马(*Haplothrips aculeatus*)、麦筒管蓟马(*Haplothrips tritici*)及其天敌南方小花蝽(*Orius similis*)的种群动态变化^[36]。还有很多研究者发现蓟马类害虫偏好蓝色^[37],例如苹果(*Malus domestica*)园中的蓟马(主要是花蓟马)对蓝色的趋性最强^[38]。普通大蓟马^[32]、桑蓟马(*Pseudodendrothrips mori*)^[39]、蔗蓟马(*Fulmekiola serratus*)^[40]、烟蓟马^[41]、花蓟马^[42]、华筒管蓟马(*Haplothrips chinensis*)^[43]、西花蓟马^[41,44]、棕榈蓟马^[45]等对蓝色有较强趋向反应。豆带巢针蓟马(*Caliothrips fasciatus*)^[46]、茶棍蓟马(*Dendrothrips minowai*)^[47]对绿色有较强的趋向反应。这说明不同种类蓟马对很多颜色都有一定的趋向反应,而对蓝色、黄色、白色、绿色等的趋向反应较强。

3.2 不同种缨翅目害虫在同种寄主植物上的趋色行为

影响蓟马趋色性的因素除蓟马种类和诱集颜色之外,寄主植物种类也会影响其趋向行为。例如在

小麦 (*Triticum aestivum*) 田中通过不同颜色陷阱测试发现,不同种类蓟马对颜色的嗜好不同,带蓟马属 (*Taeniothrips* spp.)、蓟马属 (*Thrips* spp.) 和纹蓟马属 (*Aeolothrips* spp.) 的一些种类强烈地趋向白色,而禾刺蓟马 (*Limothrips cerealium*)、袖指蓟马 (*Chirothrips manicatus*) 和 *Stenothrips graminum* 不趋向白色、黑色和绿色^[48]。在五色梅 (*Lantana camara*) 上的黄胸蓟马和狭翅筒管蓟马 (*Haplothrips tenuipennis*)^[49]、茶树 (*Camellia sinensis*) 上的茶黄蓟马和茶棍蓟马偏好黄色^[50]。柑橘 (*Citrus reticulata*) 上的八节黄蓟马 (*Thrips flavidulus*) 等多种蓟马偏好深蓝色^[51]。白色塑料、蓝色和金色铝箔可以诱集到多种蓟马,包括烟褐花蓟马 (*Frankliniella fusca*)、美东花蓟马 (*Frankliniella tritici*)、烟蓟马、禾刺蓟马、大豆蓟马 (*Sericothrips variabilis*)、腹小头蓟马 (*Microcephalothrips abdominalis*) 和 *Oxythrips divisus* 等^[52]。牛油果 (*Persea americana*) 上的鳄梨蓟马 (*Scirtothrips perseae*) 趋向黄色,而西花蓟马和 *Frankliniethrips orizabensis* 更趋向白色^[26]。

3.3 同种缨翅目害虫在不同寄主植物上的趋色行为

同一种蓟马在不同寄主植物上的趋色行为也有差异。例如,在棉花 (*Gossypium hirsutum*)、紫苜蓿 (*Medicago sativa*)、甜菜 (*Beta vulgaris*)、长豇豆 (*Vigna sesquipedalis*)、花生 (*Arachis hypogaea*) 等植物上,蓝色和白色基座的 CC 诱捕器 (CC-traps) 对西花蓟马成虫的诱集效果最好^[43]。而在西红柿 (*Lycopersicon esculentum*) 上,黄色黏板诱捕的西花蓟马虫量明显多于蓝色黏板^[53]。黄色的非洲菊 (*Gerbera jamesonii*) 和黄色的菊花 (*Dendranthema × grandiflorum*) 对西花蓟马有较强诱集效果,两种花的特征反射光谱黄绿色波长 (500~600 nm) 起着主要作用^[54]。黄胸蓟马在金柑 (*Fortunella hindsii*) 和山银花 (*Lonicera confusa*) 上都趋向蓝色^[42]。此外,茶黄蓟马在芒果树 (*Mangifera indica*) 上趋向蓝色,而在茶树上趋向黄色 (素馨黄)^[50-55]。保护地玫瑰上的茶黄蓟马趋向蓝色^[56-58]。

3.4 缨翅目害虫对不同形状黏板的趋色行为

在黄瓜温室中,在淡紫色背景色下圆柱形黄色黏板的诱集效果和立方体、球形、矩形等其他形状

里^[57-58]。圆形黏板对茶黄蓟马诱捕效果显著高于其他形状黏板,立体诱板和等边三角形、正方形诱板对茶黄蓟马的诱捕效果均无显著差异^[20]。

综上所述,蓟马的趋光及趋色行为不仅在种类和性别之间存在差异,同时也受其生活习性和生活环境的影响。导致这种差异的原因可能是由于蓟马视觉器官存在某些差异,或是不同试验所选取的颜色类别存在差异,也可能是由于大多数趋光及趋色性研究是在田间或温室的自然光背景下完成的,选用的光谱范围比较宽泛或者对于颜色的描述多为定性描述,致使试验结果的可比性较差或规律性不强。虽然光和色的本质相同,但二者在环境中的存在介质不尽相同,因此当二者刺激蓟马视觉器官后,经过其神经信号加工所表现出的行为反应是否完全一致还需进一步研究。

4 缨翅目害虫趋光性趋色性研究方法

趋光及趋色性研究方法主要是基于害虫的视觉和生理反应、活动或行为,通过研究观察对象行为上的客观定量或不定量表现,来评价其对外界视觉刺激的感应。害虫的视觉系统研究主要采用光学显微镜、扫描电镜和激光共聚焦显微镜等观察视觉器官的外部形态及其小眼数目,采用组织切片法和透射电镜等观察视觉器官的超微结构。趋光行为研究依据研究对象的行为特性,采用光行为反应装置测定趋光行为,采用昆虫复眼视网膜电位 (Electroretinogram, ERG) 和超极化后电位 (Hyperpolarizing afterpotential, HAP) 等视觉电生理技术研究昆虫感光机制,在田间利用特定波长杀虫灯来诱集害虫。复眼的电生理测试结果可以说明视觉器官对特定光谱区具有特定的生理反应,但并不能说明这些光谱敏感范围对蓟马具有诱集作用,而趋光行为反应测定结果可以更直观地反映蓟马对光、色的敏感趋性。趋色行为研究大多采用通用的趋色行为装置测定昆虫对不同颜色的喜好程度,根据蓟马视觉行为的活动的特点,设计专门的趋光及趋色行为测定装置,在田间用特定颜色的有色黏板或诱捕器来研究害虫趋色性及其应用技术。另外,趋光性 (特别是光波长和光照度的影响) 研究大多是在室内完成的,而趋色性研究则更多是在田间完成。田间试验环境条件更接近自然情况,干扰因素 (天气、作物、人为因素等) 较多,其研究结果能够更真实地反映田间条件下昆虫

行为状态。田间试验和室内试验互为补充,更有利于解释昆虫的趋光及趋色现象。

5 缨翅目害虫的物理诱控技术

物理诱控技术是基于“pull-push”策略理论,以生态学为基础的害虫综合治理,它把害虫作为其在生态系统中的重要组成部分进行调控,主要利用物理机械技术,同时综合考虑其他防治措施,达到防治害虫目标,实现经济效益、社会效益和生态效益相统一。“pull-push”策略是建立在植物-植食性昆虫-天敌互作关系基础上,将害虫行为调控,栽培管理,物理、生物及化学防治等多项措施进行整合,科学地配置“push”和“pull”刺激物,提高单一调控刺激物的效率,从而产生高效协同效应。基于“pull-push”策略,我们可以利用昆虫视觉行为调控刺激物及其组合诱控技术,调节靶标害虫及天敌的丰富度和分布开展害虫综合治理,充分发挥蓟马视觉刺激物的诱集或驱避作用,结合诱集植物及植物挥发物、昆虫性信息素、拒食剂和生物杀虫剂等措施调控靶标害虫行为及其种群消长。目前,基于趋光、趋色性原理的物理诱控技术已被广泛应用于蓟马的种群监测、诱集、驱避及新型诱捕器的研制等方面。

5.1 种群监测

害虫种群监测是害虫综合治理的重要组成部分。准确的虫情监测是成功开展害虫综合防控的基础和前提。现已证实杀虫灯和有色黏板适用于监测害虫种群动态^[7,59],既适用于温室大棚,也适用于保护地或露地环境^[60-64],例如蓝色黏板可用于监测豇豆上的普通大蓟马或桑树上的桑蓟马^[39,65]。有色黏板诱集法可客观地反映害虫的田间种群消长规律,以及群落结构特征,有助于分析害虫、天敌和中性昆虫等的信息^[11],是一种简单可行、操作方便、结果可靠的预测方法^[27]。

5.2 诱集技术

近年来,杀虫灯和有色黏板诱集害虫被逐渐引入农业生产中以防治田间蓟马。防治效果显著的害虫除蓟马之外,还有蚜虫、粉虱、叶蝉等。例如,利用杀虫灯在棉田中可以诱捕大量的烟蓟马^[66],通过开发特定波长诱集光源的设备可以有效提高诱捕效率。如前文所述,有色黏板对蓟马类害虫的诱集效果较好,但一些使用方法需要进一步完善。

还可采用有色黏板结合诱集植物及植物挥发物

等2种或更多的组合诱集技术。有色黏板与引诱剂组合使用可显著地增加诱虫数量,调控害虫行为;使用缓释技术可减少引诱剂用量,延长有色黏板的使用时间,使其更适合于推广应用。例如蓝色黏板和(S)-(-)-马鞭草烯酮组合使用对西花蓟马有极强的引诱力^[64]。异烟酸乙酯对烟蓟马有引诱活性^[65]。利用绿板与邻氨基苯甲酸甲酯(Methyl anthranilate)组合能诱集色蓟马(*Thrips coloratus*)、端大蓟马(*Megalurothrips distalis*)、黄蓟马和香蕉花蓟马,诱集效果显著高于已知的引诱剂对甲氧基苯甲醛(*p*-Anisaldehyde)^[67-68]。黄色或海明蓝色黏板与引诱剂(Thriplineams[®])组合使用,可以诱集更多数量的蓟马^[69-70]。在黄色黏板上涂抹异烟酸乙酯,对西花蓟马雌虫和雄虫的诱杀效果分别比对照增加4.5倍和5.2倍^[71]。(E)- β -法尼烯能提高诱集作物对西花蓟马的诱集效果^[72]。烟酸乙酯与黏板组合使用可以多诱捕100倍的蓟马(*Thrips obscuratus*)^[73]。蓝色黏板与花蓟马雄性分泌的聚集信息素化合物(R)-lavandulyl acetate和(S)-neryl-2-methylbutanoate或西花蓟马的聚集信息素(R)-lavandulyl acetate和neryl (S)-2-methylbutanoate组合使用,可以提高诱集效果^[74]。

5.3 驱避技术

可采用驱避技术,或者驱避技术与其他技术组合使用来协调控制害虫。在作物周围种植迷迭香(*Rosmarinus officinalis*),在黏板上悬挂水杨酸甲酯,在田间喷施拒食剂(Polygodyl[®]),可以驱避西花蓟马^[75];马郁兰(*Origanum majorana*)精油能趋避烟蓟马,其活性成分芳樟醇(Linalool)能抑制烟蓟马取食行为^[72]。利用大多数蓟马有入土化蛹的习性,用有色材料干扰蓟马的活动行为^[76-78]。Salas通过覆盖黑色地膜阻止西花蓟马和烟蓟马入土化蛹,使蓟马脱水致死^[79]。Kawai发现棕榈蓟马成虫趋避银色物质,在覆盖有银色地膜的温室里虫口密度较低^[80]。

5.4 害虫检疫

缨翅目害虫的虫体微小,活动隐蔽,可随人类活动不断传播扩散,使这类害虫的一般检疫处理措施难以收到理想的效果。物理诱控技术不仅可以进行诱集或驱避,还可进行害虫检疫、疫区扩散范围监测,诱捕到的虫体可用于传统的形态学特征鉴定和分子鉴定^[81]。

6 结 语

在复杂的农业生态系统中,影响害虫趋光和趋色行为、诱集效果的因素较多^[82-83]。在评价“光色”器械诱杀效果时,已有的研究大多根据诱集的害虫种类和数量来衡量。大多数研究局限于基础生物生态学和单一防治手段,一些基础理论问题和多项防治措施的协调使用还缺乏系统性研究^[24,84]。今后借助于昆虫电生理学技术、分子生物学技术和现代农业信息技术,进一步研究蓟马趋光和趋色特性机理及规律,将更加有助于利用这些规律为生产和生活服务。

参考文献:

- [1] 胡庆玲. 中国蓟马科系统分类研究(缨翅目:锯尾亚目)[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2013.
- [2] 韩运发. 中国经济昆虫志(第五十五卷:缨翅目)[M]. 北京:科学出版社, 1997.
- [3] 韩云,唐良德,吴建辉. 蓟马类害虫综合治理研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(22): 163-174.
- [4] 夏西亚,付步礼,李强,等. 蓟马类害虫诱控技术研究进展[J]. 农学学报, 2017, 7(2): 31-35.
- [5] 付步礼,曾东强,刘奎,等. 蓟马类害虫抗药性研究进展[J]. 农学学报, 2014, 4(3): 28-34.
- [6] 万岩然,何秉青,苑广迪,等. 北京和云南地区西花蓟马对多杀菌素类药剂产生抗药性[J]. 应用昆虫学报, 2016, 53(2): 396-402.
- [7] 雷朝亮,吴孔明,赵树英. 中国害虫物理监测与控制技术研究[M]. 武汉:湖北科学技术出版社, 2011.
- [8] 陆宴辉,张永军,吴孔明. 植食性昆虫的寄主选择机理及行为调控策略[J]. 生态学报, 2008, 28(10): 5113-5122.
- [9] FARUQ S, MCOWAN P W, CHITTKA L. The biological significance of color constancy: an agent-based model with bees foraging from flowers under varied illumination[J]. Journal of Vision, 2013, 13(10): 227-232.
- [10] 边磊,孙晓玲,高宇,等. 昆虫光趋性机理及其应用进展[J]. 应用昆虫学报, 2012, 49(6): 1677-1686.
- [11] 高宇,韩琪,刘杰,等. 色板诱杀技术的防治对象和常用颜色谱[J]. 北方园艺, 2016(4): 120-124.
- [12] CHITTKA L, FARUQ S, SKORUPSKI P, et al. Colour constancy in insects[J]. Journal of Comparative Physiology, 2014, 200(6): 435-448.
- [13] BRISCOE A D, CHITTKA L. The evolution of color vision in insects[J]. Annual Review of Entomology, 2001, 46(1): 471-510.
- [14] BINKENSTEIN J, SCHAEFER H M. Flower colours in temperate forest and grassland habitats: a comparative study[J]. Arthropod-Plant Interactions, 2015, 9(3): 289-299.
- [15] 范凡. 基于害虫-天敌关系的西花蓟马-东亚小花蝽趋光性的结构基础及其行为机理[D]. 保定:河北农业大学, 2012.
- [16] MATTESON N, TERRY I, ASCOLI-CHRISTENSEN A, et al. Spectral efficiency of the western flower thrips, *Frankliniella occidentalis*[J]. Journal of Insect Physiology, 1992, 38(6): 453-459.
- [17] 张安盛,于毅,庄乾营,等. 光谱和光强度对棕榈蓟马雌成虫行为反应的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(11): 3555-3561.
- [18] OTANI Y, WAKAKUWA M, ARIKAWA K. Relationship between action spectrum and spectral sensitivity of compound eyes relating phototactic behavior of the western flower thrips, *Frankliniella occidentalis*[J]. Japanese Journal of Applied Entomology & Zoology, 2014, 58(3): 177-185.
- [19] 唐良德,韩云,吴建辉,等. 豆大蓟马室内对不同颜色及光波的趋性反应[J]. 植物保护, 2015, 41(6): 169-172.
- [20] 王琛,朱文静,符悦冠,等. 茶黄蓟马嗜好颜色筛选及监测效果测定[J]. 环境昆虫学报, 2015, 37(1): 107-115.
- [21] KISHI M, WAKAKUWA M, KANSAKO M, et al. Action spectrum of phototactic behavior and compound eye spectral sensitivity in the yellow tea thrips, *Scirtothrips dorsalis* Hood (Thysanoptera: Thripidae)[J]. Japanese Journal of Applied Entomology and Zoology, 2014, 58(1): 13-16.
- [22] MAKABE T, FUTAMURA T, NOUDOMI T, et al. Phototaxis of western flower thrips, *Frankliniella occidentalis* and onion thrips, *Thrips tabaci* and the possibility of controlling thrips using ultraviolet-emitting trap in the greenhouse of Satsuma Mandarin (*Citrus unshiu*)[J]. Japanese Journal of Applied Entomology & Zoology, 2014, 58(3): 187-195.
- [23] 陈祯. 昆虫趋光特性与粘虫色板应用的生态影响——以烟田害虫及其天敌昆虫的趋光性研究为例[D]. 昆明:云南大学, 2016.
- [24] 徐练,文礼章. 影响杀虫灯诱虫效果的因素及其发展方向[J]. 中国植保导刊, 2015, 35(5): 19-22.
- [25] 杨洪璋,文礼章,杨柳. 太阳能灭虫灯在宁乡晒烟田的诱虫效果及其与气象因子的关系研究[J]. 华中昆虫研究, 2011(7): 45-55.
- [26] HODDLE M S, ROBINSON L, MORGAN D. Attraction of thrips (Thysanoptera: Thripidae and Aeolothripidae) to colored sticky cards in a California avocado orchard[J]. Crop Protection, 2002, 21(5): 383-388.
- [27] RODRIGUEZ-SAONA C R, POLAVARAPU S, BARRY J D, et al. Color preference, seasonality, spatial distribution and species composition of thrips (Thysanoptera: Thripidae) in northern high-bush blueberries[J]. Crop Protection, 2010, 29(11): 1331-1340.
- [28] 高宇,史树森,崔娟,等. 三种颜色色板对大豆田蓟马的诱集效果[J]. 中国油料作物学报, 2016, 38(6): 838-842.
- [29] BEAVERS J B, SHAW J G, HAMPTON R B. Color and height preference of the *Citrus* thrips in a navel orange grove[J]. Journal of Economic Entomology, 1971, 64(5): 1112-1113.

- [30] 黄 鹏,余德亿,姚锦爱,等. 榕管蓟马最嗜颜色筛选及粘虫色板田间诱集效果研究[J]. 环境昆虫学报, 2015, 37(2): 355-361.
- [31] 赵永霜. 榕管蓟马发生及防治试验研究[D]. 昆明: 西南林业大学, 2008.
- [32] ALIAKBARPOUR H, CHE S M R. Evaluation of yellow sticky traps for monitoring the population of thrips (Thysanoptera) in a mango orchard[J]. Environmental Entomology, 2011, 40(4): 873-879.
- [33] 黄 鹏,陈汉鑫,姚锦爱,等. 香蕉花蓟马对不同颜色的敏感性及其色板田间悬挂组合选择[J]. 中国农学通报, 2016, 32(1): 141-145.
- [34] 任智斌,王森山. 9 种颜色诱虫板对牛角花齿蓟马的诱集作用[J]. 草原与草坪, 2007(6): 49-50.
- [35] YUDIN L S, MITCHELL W C, CHO J J. Color preference of thrips (Thysanoptera: Thripidae) with reference to aphids (Homoptera: Aphididae) and leafminers in Hawaiian lettuce farms[J]. Journal of Economic Entomology, 1987, 80(1): 51-55.
- [36] RAEN A Z, YE G Y, LU Z B, et al. Impact assessments of transgenic cryIAb rice on the population dynamics of five non-target thrips species and their general predatory flower bug in Bt and non-Bt rice fields using color sticky card traps[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(10): 1807-1815.
- [37] HOBACK W W, SVATOS T M, SPOMER S M, et al. Trap color and placement affects estimates of insect family-level abundance and diversity in a Nebraska salt marsh[J]. Entomologia Experimentalis et Applicata, 2003, 91(3): 393-402.
- [38] 蒋月丽. 不同颜色诱捕器诱集昆虫多样性及诱捕效果研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [39] 杨振国,谢道燕,柴建萍,等. 蓝色粘虫板对桑蓟马的寄主趋性及发生动态监测[J]. 广东农业科学, 2015, 42(3): 62-64.
- [40] 余 玲,周曼青,林兆里,等. 甘蔗蓟马发生特点及色板诱杀的初步研究[J]. 武夷科学, 2011, 27(1): 89-94.
- [41] 梁兴慧. 两种蓟马的日活动规律及其对植物挥发物的趋性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [42] 欧善生,简 峰,苏桂花,等. 丽花蓟马对不同颜色的趋性及田间诱杀效果研究[J]. 植物保护, 2012, 38(6): 174-177.
- [43] CHU C C, JR P P, HENNEBERRY T J, et al. Use of CC traps with different trap base colors for silverleaf whiteflies (Homoptera: Aleyrodidae), thrips (Thysanoptera: Thripidae), and leafhoppers (Homoptera: Cicadellidae)[J]. Journal of Economic Entomology, 2000, 93(4): 1329-1337.
- [44] RODITAKIS N E, LYKOURESSIS D P, GOLFINOPOULOU N G. Color preference, sticky trap catches and distribution of western flower thrips in greenhouse cucumber, sweet pepper and eggplant crops[J]. Southwestern Entomologist, 2001, 26(3): 227-237.
- [45] 陈华平,贝亚维,顾秀慧,等. 棕榈蓟马(*Thrips palmi*)对不同颜色粘卡的嗜好及其蓝色粘卡诱虫量的研究[J]. 应用生态学报, 1997, 8(3): 335-337.
- [46] HARMAN J A, CHANG X M, MORSE J G. Selection of colour of sticky trap for monitoring adult bean thrips, *Caliothrips fasciatus*, (Thysanoptera: Thripidae)[J]. Pest Management Science, 2007, 63(2): 210-216.
- [47] BIAN L, YANG P X, YAO Y J, et al. Effect of trap color, height, and orientation on the capture of yellow and stick tea thrips (Thysanoptera: Thripidae) and nontarget insects in tea gardens[J]. Journal of Economic Entomology, 2016, 31(7): 598-602.
- [48] LEWIS T. A comparison of water traps, cylindrical sticky traps and suction traps for sampling thysanopteran populations at different levels[J]. Entomologia Experimentalis et Applicata, 1959, 2(3): 204-215.
- [49] MATHUR G, RAM H Y M. Significance of petal colour in thrips-pollinated *Lantana camara* L.[J]. Annals of Botany, 1978, 42(182): 1473-1476.
- [50] 林金丽,韩宝瑜,周孝贵,等. 色彩对茶园昆虫的引诱力[J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4303-4316.
- [51] 于法辉,夏长秀,李春玲,等. 不同色板对柑橘园蓟马的诱集效果及蓝板的诱捕效果[J]. 应用昆虫学报, 2010, 47(5): 945-949.
- [52] BECKHAM C M. Color preference and flight habits of thrips associated with cotton[J]. Journal of Economic Entomology, 1969, 62(3): 591-592.
- [53] CHO K, ECKEL C S, WALGENBACH J F, et al. Comparison of colored sticky traps for monitoring thrips populations (Thysanoptera: Thripidae) in staked tomato fields[J]. Journal of Entomological Science, 1995, 30(2): 176-190.
- [54] BLUMTHAL M R, CLOYD R A, SPOMER L A, et al. Flower color preferences of western flower thrips[J]. Hortotechnology, 2005, 15(4): 846-853.
- [55] 陈永森,黄国弟,覃 婵,等. 芒果茶黄蓟马(*Scirtothrips dorsalis* Hood)田间发生动态及监测方法研究[J]. 南方农业学报, 2013, 44(10): 1646-1652.
- [56] SRIDHAR V, NAIK S O. Efficacy of colour sticky traps for monitoring chilli thrips, *Scirtothrips dorsalis* Hood (Thysanoptera: Thripidae) on rose[J]. Pest Management in Horticultural Ecosystems, 2015, 21(1): 101-103.
- [57] VERNON R S, GILLESPIE D R. Influence of trap shape, size, and background color on captures of *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) in a cucumber greenhouse[J]. Journal of Economic Entomology, 1995, 88(2): 288-293.
- [58] CHEN T Y, CHU C C, HENNEBERRY T J. Influence of trap configuration and size on *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) captures[J]. Southwestern Entomologist, 2006, 31(2): 157-160.
- [59] CHEN T Y, CHU C C, FITZGERALD G, et al. Trap evaluations for thrips (Thysanoptera: Thripidae) and hoverflies (Diptera: Syrphidae)[J]. Environmental Entomology, 2004, 33(5): 1416-1420.
- [60] PIZZOL J, NAMMOUR D, HERVOUET P, et al. Comparison of two methods of monitoring thrips populations in a greenhouse rose

- crop[J]. Journal of Pest Science, 2010, 83(2): 191-196.
- [61] DIRAVIAM J, UTHAMASAMY S. A new sampling technique involving yellow sticky traps for monitoring of thrips infesting different crops[J]. Journal of Entomological Research, 1992, 16(1): 78-81.
- [62] TANIGOSHI L K, MORENO D S. Traps for monitoring populations of the citrus thrips, *Scirtothrips citri* (Thysanoptera: Thripidae). [J]. Canadian Entomologist, 1981, 113(1): 9-12.
- [63] BROUGHTON S, HARRISON J. Evaluation of monitoring methods for thrips and the effect of trap colour and semiochemicals on sticky trap capture of thrips (Thysanoptera) and beneficial insects (Syrphidae, Hemerobiidae) in deciduous fruit trees in Western Australia[J]. Crop Protection, 2012, 42(4): 156-163.
- [64] HARMAN J A, CHANG X M, MORSE J G. Selection of colour of sticky trap for monitoring adult bean thrips, *Caliothrips fasciatus*, (Thysanoptera: Thripidae)[J]. Pest Management Science, 2007, 63(2): 210-216.
- [65] TANG L D, ZHAO H Y, FU B L, et al. Colored sticky traps to selectively survey thrips in cowpea ecosystem[J]. Neotropical Entomology, 2016, 45(1): 96-101.
- [66] 任向辉,王运兵. 应用佳多诱虫灯进行室外昆虫群落调查[J]. 山西农业科学, 2009, 37(2): 60-63.
- [67] IMAI T, MAEKAWA M, MURAI T. Attractiveness of methyl anthranilate and its related compounds to the flower thrips, *Thrips hawaiiensis* (Morgan), *T. coloratus* Schmutz, *T. flavus* Schrank and *Megalurothrips distalis* (Karny) (Thysanoptera: Thripidae) [J]. Applied Entomology & Zoology, 2001, 36(4): 475-478.
- [68] MURAI T, IMAI T, MAEKAWA M. Methyl anthranilate as an attractant for two thrips species and the thrips parasitoid *Ceranisus menes*[J]. Journal of Chemical Ecology, 2000, 26(11): 2557-2665.
- [69] MUVEA A M, WAIGANJO M M, KUTIMA H L, et al. Attraction of pest thrips (Thysanoptera: Thripidae) infesting French beans to coloured sticky traps with Lurem-TR and its utility for monitoring thrips populations[J]. International Journal of Tropical Insect Science, 2014, 34(3): 197-206.
- [70] ABDULLAH Z S, GREENFIELD B P, FICKEN K J, et al. A new attractant for monitoring western flower thrips, *Frankliniella occidentalis*, in protected crops[J]. Springerplus, 2015, 4(1): 1-9.
- [71] DAVIDSON M M, BUTLER R C, WINKLER S, et al. Pyridine compounds increase trap capture of *Frankliniella occidentalis* (Pergande) in a covered crop[J]. New Zealand Plant Protection, 2007, 60(4): 56-60.
- [72] KHAN Z R, MIDEGA C A O, PITTCCHAR J O, et al. Push-Pull: A novel IPM strategy for the green revolution in Africa[M] // PESHIN R, PIMENTEL D. Integrated Pest Management. Netherlands: Springer, 2014.
- [73] PENMAN D R, OSBORNE G O, WORTNER S P, et al. Ethyl nicotinate: a chemical attractant for *Thrips obscuratus* (Thysanoptera: Thripidae) in stonefruit in New Zealand[J]. Journal of Chemical Ecology, 1982, 8(10): 1299-1303.
- [74] HAMILTON J G C, HALL D R, KIRK W D J. Identification of a male-produced aggregation pheromone in the western flower thrips *Frankliniella occidentalis*[J]. Journal of Chemical Ecology, 2005, 31(6): 1369-1379.
- [75] CHERMENS KAYA T D, BUROV V N, MANIAR S P, et al. Behavioural responses of western flower thrips, *Frankliniella occidentalis* (Pergande), to volatiles from three aromatic plants[J]. Insect Science and its Application, 2001, 21(1): 67-72.
- [76] AGUILAR-FENOLLOSA E, JACAS J A. Effect of ground cover management on Thysanoptera (thrips) in clementine mandarin orchards[J]. Journal of Pest Science, 2013, 86(3): 469-481.
- [77] STAVISKY J, FUNDERBURK J E, BRODBECK B V, et al. Population dynamics of *Frankliniella* spp. and tomato spotted wilt incidence as influenced by cultural management tactics in tomato[J]. Journal of Economic Entomology, 2002, 95(6): 1216-1221.
- [78] REITZ S R, YEABBY E, FUNAERBURK J, et al. Integrated management tactics for *Frankliniella thrips* (Thysanoptera: Thripidae) in field-grown pepper[J]. Journal of Economic Entomology, 2003, 96(4): 1201-1214.
- [79] SALAS J. Evaluation of cultural practices to control *Thrips palmi* (Thysanoptera: Thripidae) on green pepper[J]. Entomotropica, 2004, 19(1): 39-46.
- [80] KAWAI A. Control of *Thrips palmi* Karny in Japan[J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 1990, 24(1): 43-48.
- [81] 陈洪俊,张友军. 西花蓟马的鉴别与检疫[J]. 植物检疫, 2005, 19(1): 33-34.
- [82] 宗精学,杨余旺,王磊,等. 蔬菜虫害典型光谱识别方法比较[J]. 江苏农业学报, 2013, 29(4): 864-869.
- [83] TANG L D, ZHAO H Y, FU B L, et al. Colored sticky traps to selectively survey thrips in cowpea ecosystem[J]. Neotropical Entomology, 2016, 45(1): 96-101.
- [84] 闫凯莉,唐良德,吴建辉,等. 诱杀技术在害虫综合治理(IPM)中的应用[J]. 中国植保导刊, 2016, 36(6): 17-25.

(责任编辑:张震林)