

我国农业害虫物理防治研究与应用进展

桑文^{1,2} 高俏² 张长禹³ 黄求应² 雷朝亮^{2*} 王小平^{2*}

(1. 华南农业大学植物保护学院, 广东省生物农药创制与应用重点实验室, 广州 510640; 2. 华中农业大学植物科技学院, 昆虫资源利用与害虫可持续治理湖北省重点实验室, 武汉 430070; 3. 贵州大学昆虫研究所, 贵州省山地农业病虫害重点实验室, 贵阳 550025)

摘要: 自1949年以来,我国的植物保护理论和技术研究取得了巨大进步,物理防治作为重要的害虫绿色防控技术,在基础理论研究与应用技术及产品创新领域也取得了一系列重要进展。该文综述了新中国成立后我国灯光诱控、色板诱控、物理阻隔、温度控制、辐照不育等害虫物理防治的理论、技术、设备和应用研究的重要成果,并对农业害虫物理防治的未来发展方向进行展望,以期为建立现代植保技术体系,保障我国的粮食安全、环境安全和农业可持续发展提供参考。

关键词: 物理防治; 灯光诱控; 粘虫色板; 物理阻隔; 温度控制; 辐照不育

Researches and applications of physical control of agricultural insect pests in China

Sang Wen^{1,2} Gao Qiao² Zhang Changyu³ Huang Qiuying² Lei Chaoliang^{2*} Wang Xiaoping^{2*}

(1. Key Laboratory of Bio-Pesticide Innovation and Application, Guangdong Province, College of Plant Protection, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China; 2. Hubei Key Laboratory of Insect Resources Utilization and Sustainable Pest Management, College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, Hubei Province, China; 3. Guizhou Provincial Key Laboratory for Agricultural Pest Management of the Mountainous Region, Institute of Entomology, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou Province, China)

Abstract: Since 1949, theoretical and technical researches in plant protection have made great progresses in China. As an important environmental friendly prevention and control technology, physical control has also made a series of important progresses in the field of basic theoretical research, application technology and product innovation in the past decades. This article summarized the important achievements of the theory, technology, equipment and application on the physical control of agricultural insect pests in China, including light trap, color sticky trap, insect-proof screen, temperature control, and irradiation sterilization. The future development direction of physical control of agricultural insect pests was then prospected. This review is expected to provide a reference for establishing a modern plant protection technology system to ensure the food security, environmental security, and sustainable agricultural development.

Key words: physical control; light trap; color sticky trap; physical barrier; temperature control; irradiation sterilization

我国是农业大国,粮食问题直接关系到国家根本。自1949年建国以来,我国对农业的投入不断加

大,农业总产量不断增长,取得了显著成效。然而,随着大面积农作物的单一化种植、气候条件的不断改

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD1002100),广东省自然科学基金(2019A1515011062),广东省现代农业产业技术体系创新团队建设专项(2022KJ108)

* 通信作者 (Authors for correspondence), E-mail: ioir@mail.hzau.edu.cn, xpwang@mail.hzau.edu.cn

收稿日期: 2021-12-27

变以及生态条件的恶化等因素影响,我国主要农作物的害虫灾害日趋严重,防控形势较为严峻。我国农作物主要害虫有800多种,其中重大害虫有20多种。根据全国农业技术推广服务中心预测,2022年我国小麦、水稻、玉米以及马铃薯等主要粮食作物重大病虫害呈重发态势,预测全国发生面积1.35亿 hm^2 次,比2021年和2016—2020年均值分别增加13.8%和10.1%,对70%以上的粮食作物产区构成威胁。其中小麦蚜虫发生面积1400万 hm^2 次,稻飞虱发生面积2067万 hm^2 次,稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medialis* 发生面积1467万 hm^2 次,二化螟 *Chilo suppressalis* 发生面积1333万 hm^2 次,草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 发生面积533万 hm^2 次,黏虫 *Mythimna separata* 发生面积400万 hm^2 次,玉米螟发生面积1733万 hm^2 次。稻飞虱、稻纵卷叶螟、草地贪夜蛾、黏虫、飞蝗和草地螟 *Loxostege sticticalis* 等迁飞性害虫严重威胁农作物的安全生产 (<https://www.natasc.org.cn/news/des?id=21b06bea-2b6e-4bc2-a923-dc29-3b47bfa2&Category=&CategoryId=d6a35339-e804-4f90-bf93-927382b1fd22>)。传统的作物害虫防控过于依赖化学防治,既不符合现代农业的发展要求,也不能满足持续控制病虫害灾害和农业标准化生产的需要。因此,实施病虫害绿色防控是发展现代农业,促进农业生产安全、农产品质量安全和农业生态安全的有效途径。

物理防治是现代植物保护技术的重要组成部分,是利用光、热、电、温和辐射等各种物理因素和机械设备进行病虫害防治的技术方法,包括人工捕捉、灯光诱控、色板诱控、辐照不育、物理阻隔、温度控制和气调防治等(韩召军,2012)。在农作物病虫害防治中,物理防治方法具有安全环保、无残留、对害虫不产生抗性等优点,符合现代农业病虫害绿色防控理念,对保障食品安全和人民健康具有重要意义。现阶段随着国家在粮食安全和环境安全方面的投入力度不断加大,“十三五”期间国家实施“化肥农药使用量零增长行动”,开展“化学肥料和农药减施增效综合技术研发”,病虫害物理防治技术在病虫害绿色防控技术体系中所占比重不断增加,受到了广泛关注和认同。本文对我国农作物产前害虫物理防治领域的重要进展进行综述,以期为建立现代植保技术体系、保障我国的粮食安全、环境安全和农业可持续发展提供参考。

1 物理防治基础理论研究进展

相较于化学防治、生物防治和农业防治,物理防

治更加依赖设备和装备。新中国成立初期我国主要以经济建设为中心,对植物保护设备或装备的投入较少,随着国家综合实力的提升,对农业机械研发和推广力度的加大,物理防治在病虫害绿色防控中的作用才慢慢开始凸显,但大多数的基础理论、技术理念源自国外,我国原创性的病虫害物理防治基础理论研究相对较少,形成重应用轻基础的局面,进而制约着病虫害物理防治技术体系的长远发展。目前,害虫物理防治在基础理论研究上的突破主要集中在昆虫趋光机理和昆虫辐射不育机理方面。

1.1 昆虫趋光机理研究进展

我国在害虫物理防治中最早使用的是害虫灯光诱杀技术,值得注意的是该技术在世界上最早使用的国家也是中国。早在2000多年前,典籍《诗经》中就有“秉彼蠹贼,付畀炎火”的记载。我国劳动人民很早就发现飞蛾扑火的现象,即昆虫的趋光性,并用于农业生产。昆虫为什么趋光是一个未解之谜,我国学者对其研究一直没有中断,并在理论上有一定突破(桑文等,2019)。

中国科学院动物研究所陈宁生教授团队以夜蛾科昆虫为对象进行了趋光行为的系统研究,发现昆虫的趋光行为包含2个阶段,第1阶段为当夜蛾所处的周围环境明亮程度低于适合复眼的生理状态时,能引发昆虫的趋光即从较暗环境向较亮的光源飞行;第2阶段为若飞抵的位置周围环境明亮程度低于夜蛾复眼在灯光刺激下观察环境所需要的明亮程度时,能使夜蛾产生扑灯反应,因此夜蛾扑灯是昆虫的正常视觉受到干扰所致(陈宁生,1979)。该理论也被后续的试验证实,如灯诱昆虫时或诱虫灯在捕虫时,大量的昆虫被吸引至光源周围,而只有部分昆虫选择扑灯。

对于昆虫趋光的机理,国际上先后提出了光定向行为假说、生物天线假说以及光干扰假说(靖湘峰和雷朝亮,2004)。昆虫趋光扑灯是光干扰所致(陈宁生,1979),这暗示光在昆虫趋光行为中的作用是负面的。随着现代分子生物学和昆虫行为生理学的发展,华中农业大学研究团队对多种昆虫趋光的生理应激反应经过20多年的研究提出了昆虫趋光的光胁迫假说(桑文等,2016;Kim et al.,2019)。研究发现,昆虫在趋光飞行的过程中,生理环境和神经传递都处于胁迫状态(Meng et al.,2009;Wang et al.,2014),昆虫的胁迫响应水平显著增加(Zhang et al.,2011;Sang et al.,2012;Wang et al.,2012)。光胁迫假说认为昆虫的趋光行为是昆虫受到光胁迫而产生

生理应激后的被动行为反应,这一理论的提出为进一步探索昆虫趋光的内源机制提供了新思路(桑文等,2016)。

在昆虫趋光反应及行为机制方面,我国学者开展了较为系统全面的研究,包括光源的波长、偏振性及强度、昆虫的性别及发育、环境因子和节律对昆虫趋光行为的影响(桑文等,2019)。早在19世纪70年代,我国研究者就发现不同昆虫对不同波长光的趋向存在很大差异,昆虫光谱反应的敏感区域主要为紫外光、蓝光和黄绿光区(丁岩钦等,1974);侯无危等(1994)分析了桃小食心虫 *Carposina niponensis* 对5种单色光的趋光行为;随后不断有学者研究包括棉铃虫 *Helicoverpa armigera*(杨洪璋等,2014)、烟青虫 *Heliothis assulta*(杨洪璋等,2014)、飞虱(杨海博,2014;黄保宏等,2020)、斜纹夜蛾 *Spodoptera litura*(杨洪璋等,2014)、金龟子(鞠倩等,2010;杨洪璋等,2014)、蓟马(范凡等,2012)、螺旋粉虱 *Aleurodicus dispersus*(郑月等,2010)和柑橘木虱 *Diaphorina citri*(王飞凤等,2020)等重要害虫,以及草蛉(张海强,2007)、龟纹瓢虫 *Propylaea japonica*(陈晓霞等,2009)和东亚小花蝽 *Orius sauteri*(冯娜等,2015)等重要天敌昆虫对单色光的趋性。此外,混合光诱发的昆虫趋光行为也受到了关注,且其效果显著优于单色光(边磊等,2012)。光强对昆虫的影响主要表现为J型和S型曲线。草地螟趋光反应率随光强度的增强而升高,其在光强较高的区域,趋光率升高更快,趋光率-光强反应曲线呈J型(江幸福等,2010)。棉铃虫的趋光率会随着光强的增加缓慢上升,当光强达到一定程度后,趋光率会随着光强的增加迅速升高,但当光强继续增加的时候,趋光率又会随着光强的增加趋于稳定,趋光率-光强反应曲线呈S型(魏国树等,2000)。随着分子生物学的发展,在对小菜蛾 *Plutella xylostella* 和甜菜夜蛾 *S. exigua* 的研究中发现昆虫复眼感受不同波长光的视蛋白基因差异表达是导致昆虫对光波长敏感度差异的重要原因(Liu et al., 2018; Chen et al., 2021),为利用分子生物学手段高通量筛选不同害虫的特异性敏感波长提供了可能。昆虫的自身生理状态也对其趋光性有显著影响,如昆虫的趋光行为在不同性别间存在差异。这种雌雄间的趋光差异可能与昆虫的飞行能力、复眼结构、生理状态、日龄、交配与否以及光源等有关(丁岩钦等,1974;程文杰等,2011)。2000年后,昆虫的趋光节律性开始受到关注。Cheng et al. (2016)研究发现在整个夜晚昆虫的扑灯高峰存在差

异;这和昆虫复眼的明暗眼转化以及昆虫自身的生物钟紧密相关(顾国华等,2004)。

1.2 昆虫辐射不育机理研究进展

20世纪60年代,中国科学院动物研究所和中国农业科学院原子能利用研究所率先开展农业害虫的辐射不育机理研究,随后有10多个单位的研究团队加入到该领域(季清娥和黄居昌,2016)。孙少轩和李伟绩(1965)研究发现 γ 射线辐照亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 可诱变显性致死因子的原因是早期辐照使卵原细胞退化,细胞核分裂受阻,直接影响卵泡的形成。20世纪80—90年代,关于辐照对玉米螟、桃小食心虫、柑橘大实蝇 *Bactrocera minax* 的精子传导、精子活力和卵胚胎发育的影响以及辐照导致性染色体畸变等方面进行了深入系统的研究,阐明了上述害虫的辐照不育机理(李元英等,1980;胡朝辉等,1984;李元英和张维,1992)。王广利等(2014)研究发现辐照下桑天牛 *Apriona germari* 精子粘连、精核膨大和精细胞体积减小是导致其雄性不育的主要原因,从精子超微结构及精子活力方面阐明了桑天牛辐照不育的机理。

2 物理防治应用技术及产品的发展

虽然我国农业害虫物理防治的理论基础较为薄弱,但光电、材料和核能等其他物理技术的发展带动了农业害虫物理防治技术和产品的进步。我国的科研工作者在灯光诱控、色板诱控、物理阻隔、温度控制和辐照不育等技术和产品的优化方面均展开了较为系统全面的研究,并取得了一系列重要进展(季清娥和黄居昌,2016;雷朝亮等,2016)。

2.1 灯光诱控技术与产品创新

灯光诱控技术是我国使用最早也是应用最广泛的物理防治技术,即利用昆虫的趋光性诱集昆虫后,采用特定的装置集中消灭昆虫的方法。在1973年召开的全国黑光诱虫灯经验交流会上,明确提出了黑光灯是害虫综合防治的有效措施之一,经过几十年的发展,我国灯光诱控技术在诱虫灯产品和灯光诱控技术应用策略等方面均取得了较好的进展,先后制定了杀虫灯生产和应用技术的国家标准(GB/T 24689.2—2017)和行业规范(NY/T 36979—2020)。

随着科研工作者对昆虫趋光行为机制认识的不断加深,我国杀虫灯的光源研发也经历了白炽灯、黑光灯、高压汞灯、双波灯以及发光二极管(light emitting diode, LED)灯等多个阶段(赵季秋,2012)。20世纪50年代,我国主要使用白炽灯诱杀害虫,但白炽

灯对害虫的诱杀效果较差,通常需要采用灯海战术才能消灭大量害虫,在一些地方常出现家家点灯“万家灯火”杀虫的宏大场面(武予清等,2009)。20世纪60年代初期,黑光灯被引入中国,黑光灯是一种特制的气体放电灯,一般发出波长在330~400 nm之间的紫外线,大多数趋光性昆虫喜好330~400 nm的紫外光波和紫光波,特别是鳞翅目和鞘翅目昆虫对这一波段更敏感,因此对农业害虫有很大的杀伤力(杨现明等,2020)。由于黑光灯诱虫量大,诱虫谱广,充分体现了灯光诱控的技术优势,因而得到大面积推广应用(陈宁生,1979)。然而,黑光灯的穿透力差,辐射范围小,随后科技工作者又研制出了双波灯,它由黑白双光灯改造而来,双波系列灯可同时发出长短2种光波的灯光,一般长光波为585 nm的黄色光,短光波为350 nm的紫外光,具有比同功率黑光灯诱虫量更高、害虫测报更准确等优点(刘立春,1985;1993)。随后,吉林省农业科学院植物保护研究所王蕴生先生等研发出主要用于害虫防控的同样具有双波特点的高压汞灯。然而,无论是黑光灯还是双波灯均存在对中性昆虫和天敌昆虫杀伤力大以及使用寿命短等问题(雷朝亮,2019)。随着对多种昆虫特异性敏感光源的测定以及光电技术的发展,新型LED光源问世。LED光源具有波长范围窄、诱虫专一性强、亮度高、能耗低和寿命长等优点,目前已成为较理想的新型杀虫灯光源(边磊等,2019;桑文等,2019)。此外,河南省农业科学院研究团队利用蛾类昆虫对绿黄波段光(500~590 nm)敏感的特性,研发出可干扰蛾类害虫日节律的黄光灯,来降低蛾类害虫的种群密度(蒋月丽等,2018)。

我国杀虫灯的杀虫装置经历了水淹火焚式、电击式和风吸式等阶段。早期的灯光诱控技术没有成形的固定灯具,主要采用白炽灯或煤油灯配合溶解有洗衣粉或杀虫剂的水盆,以水淹或火焚的方式杀灭诱集的害虫。随着黑光灯和双波灯的研制,电击式杀虫灯研制成功,其中最具代表性的为河南佳多科工贸公司研发的频振式杀虫灯。频振式杀虫灯的灯管外配有频振式高压电网,可触杀害虫,使害虫落入灯下的接虫袋内,达到集中杀灭害虫的目的(王明亮等,2009)。虽然频振式杀虫灯对扑灯昆虫的杀伤能力强,但高压电网在野外对人和动物的安全性较差。近年来研发的风吸式诱虫灯成为新型杀虫灯的主要捕捉装备。风吸式杀虫灯利用电风扇扇吸的原理,趋光而来的昆虫不需要接触诱虫灯的任何部位,风机转动时产生负压将虫子吸入到收集器中,引诱

兼主动捕捉昆虫,实现全方位诱虫,诱捕范围更广,安全性更高(张敏和雷朝亮,2018;韩海亮等,2020)。在此基础上,华中农业大学研究团队在综合考虑农田生态系统保护的基础上研制出了光陷阱式诱虫灯,该诱虫灯不使用高压电网,而改用由玻璃挡板和风扇构成的风吸式捕捉口。当昆虫受灯光吸引撞击挡板时会被风扇吸入分虫箱,有益昆虫将从分虫箱的逃生门逃出返回农田,害虫则被杀死。这种杀虫灯提高了对靶标害虫的诱捕能力,减少了对有益昆虫的伤害,对生态环境影响小(雷朝亮,2019)。

在提高杀虫灯对害虫防控效果的同时,如何最大限度地减少对天敌和中性昆虫的杀伤倍受关注。早期的黑光灯和双波灯光谱范围较宽,诱虫谱广,整夜开灯诱虫,对天敌和中性昆虫杀伤大(张近光,1979;张广学等,2004)。为了提高杀虫灯对靶标害虫的诱集效果,减少对天敌昆虫的杀伤力,我国研究者提出了选光分离保益法、调时分离保益法和网(孔)筛分离保益法,即通过筛选害虫的特异性敏感光源、根据害虫夜间的上灯节律选择在害虫上灯高峰开灯诱虫、根据益虫个体小在集虫器设置网筛,达到提高靶标害虫诱捕率和降低对天敌和中性昆虫诱捕率的目的,同时还可以减少开灯时间,节省能源(桑文等,2019)。我国学者先后对60多种重要农业害虫和10多种天敌昆虫的敏感波长进行了测定,对水稻田(杨海博,2014)、棉田(张行国等,2017)、小麦田(张行国等,2017)、玉米田(张行国等,2017)和设施蔬菜田(万年峰等,2008)等主要农业生态系统中重要害虫的上灯节律开展了系统研究,为不同生态系统中灯光诱控技术开关灯时间的设置提供了重要参数(顾国华等,2004)。此外,我国科研人员还开发了一系列和杀虫灯配套使用的天敌保护装置,例如在光陷阱诱虫灯上装置逃生门,有益昆虫从逃生门逃出返回农田,害虫则被杀死(雷朝亮,2019)。

在1973年召开全国黑光诱虫灯经验交流会上,明确提出黑光灯是害虫综合防治的有效措施之一,并将黑光灯减轻虫害的原因归纳为消灭有效虫源、引诱害虫集中、抑制害虫活动、阻挡害虫入侵和减少天敌伤亡(陈宁生和罗敬业,1979)。此后,灯光诱控技术在全国的推广面积不断增加,取得的成效也相当显著。频振式杀虫灯的出现为棉铃虫防治提供了重要措施,自1993年起,河南佳多科工贸股份有限公司的频振式杀虫灯开始在全国范围内推广。然而,随着灯光诱控技术的广泛应用,诱虫灯对非靶标害虫的杀伤即精准性差的问题开始凸显。扇吸式诱

虫灯在2010年以后开始出现,并渐渐取代带有高压电网的频振式杀虫灯。同时,杀虫灯应用从单一技术的使用逐渐转变为与多种害虫防控技术联合使用,形成了一系列以杀虫类应用为主体的害虫绿色防控技术模式(杨普云,2016;张跃进,2016)。例如,灯光诱控技术与性诱剂的联合使用策略大大提高了灯光诱控技术的防控效果。杀虫灯与性诱剂结合使用对二点委夜蛾雄蛾的诱捕率较这2种诱集技术单独使用时可提高2~4倍(马广源等,2015)。此外,针对现阶段害虫灯光诱控技术仍然存在杀虫谱广、使用混乱等问题,2018年全国农业技术推广服务中心与华中农业大学等单位联合提出并制定了灯光诱控技术的田间应用标准,该标准指出在灯具选择上要把握智能、高效、安全、专化和经济5项原则,诱虫灯的光谱要依据目标田块生态系统中的靶标害虫种类而定。诱虫灯不应带有高压电网,可采用扇吸式灯等其他非直接杀灭作用的收集装置。具有保护天敌和中性昆虫的逃生通道等安全装置,最大限度地减少了灯具使用过程中对非靶标昆虫的误伤。灯具安装过程中要求尽量选择较为开阔的地带,降低地形或物体对诱虫灯灯光的阻挡,避免形成诱捕盲区。同时,要避开路灯的干扰。可针对不同的目的、地形和害虫分布方式采取多种诱虫灯空间布局。应根据当地特定作物上靶标害虫的成虫发生期确定诱捕时段,避免无意义的开灯。这为灯光诱控技术的正确应用提供了统一的方法和标准。

2.2 色板诱控技术与产品创新

色板诱控技术是利用昆虫对不同颜色的趋性,采用色板诱集昆虫,使用环保粘胶粘住飞向色板的昆虫,从而达到消灭害虫的目的。色板诱杀技术广泛应用于农田、果园、蔬菜地等多种农业生态系统,对蚜虫、飞虱、粉虱、蓟马以及蚊蝇类等农业微小害虫的防控具有很好的效果,并制定了诱虫板制作和生产的国家标准(GB-T 24689.4—2009)。

目前,我国很多研究主要关注黄板和蓝板对害虫的诱集效果,通过对单一害虫趋色性的研究发现黄板具有广谱性的诱集效果,据不完全统计,黄板对23科57种害虫均具有较强的诱集作用,蓝板对蓟马、粉虱、盲蝽、叶蝉、种蝇和稻弄蝶等6科11种害虫均具有明显的诱集效果(高宇等,2016)。随着对色板颜色表达模式和色谱参数的规范,我国研究者使用多种颜色的色板对设施蔬菜园(张纯胃,2007)、茶园(王彦苏等,2020)以及果园(杜浩等,2019;刘静香等,2021;贾娜等,2021)中主要害虫和天敌的诱集效

果和益害比进行了系统研究,为利用色板诱控技术防控不同生态系统中特定害虫时的色板选择提供了重要依据。与此同时,针对蚜虫、蓟马和柑橘木虱等重要害虫,我国学者对色板的形状、高度、朝向和密度等因素开展了大量研究,明确了最佳的色板诱捕技术参数(张纯胃,2007;闫凯莉等,2016;赵政等,2018)。为了增强有色粘虫板的诱捕效果和应用轻量化,生产中开始推广应用诱虫带,并将色板与信息素组合使用(田新湖等,2021)。目前,绿色诱蝇球也被广泛用于防治柑橘大实蝇,且具有较好的防治效果(Wang et al., 2019;周华等,2021)。此外,由于普通色板通常是塑料制品,使用后在田间无法降解,对环境造成二次污染,目前在色板的材质上开始推广应用可降解材料。

2.3 物理阻隔技术的推广与应用

物理阻隔技术是根据害虫的生活及为害习性采用生物或非生物材料防止害虫蔓延,是一种直接阻挡害虫对作物侵害的方法。目前应用较广的有防虫网、果实套袋以及树干涂白等方法,其中防虫网阻隔技术是农业生产中应用最为广泛的物理阻隔技术。

自1995年从国外引进推广防虫网阻隔技术,我国研究者对不同颜色和网目防虫网的防虫效果及其对作物生长的影响进行了系统研究,为防虫网的选用提供了重要依据(罗丰等,2014;陈连珠等,2019;夏长秀等,2020)。该技术在蔬菜、花卉、果树等园艺作物生产和水稻育秧过程的害虫绿色防控中发挥了重要作用,尤其在保护地蔬菜生产上的应用,可有效控制甜菜夜蛾、斜纹夜蛾、小菜蛾、甘蓝夜蛾 *Mamestra brassicae* 以及黄曲条跳甲 *Phyllotreta striolata* 等20多种主要害虫,还可阻隔蚜虫、烟粉虱 *Bemisia tabaci*、蓟马和美洲斑潜蝇 *Liriomyza sativae* 等传毒昆虫媒介;在华南地区和西南地区的水稻工厂化育秧中,广泛应用防虫网阻隔传毒昆虫,有利于防治水稻病毒病(孔祥义等,2007;黑银秀等,2013;黄保宏等,2013)。

2.4 温度控制技术的创新性开发与应用

温度控制技术是指通过改变环境温度,产生高温或低温胁迫,促使病虫害等有害生物生长发育停滞乃至死亡的物理防治技术,传统的温度控制技术多用于作物采收后仓储害虫的防控。近年来,中国农业科学院蔬菜花卉研究所研发出日晒高温覆膜防治韭蛆 *Bradysia odoriphaga* 技术,解决了韭蛆防控的难题,并在实践中得到广泛推广和应用(史彩华,2017)。该技术主要针对韭蛆不耐高温的特点,在地

面铺上透明保温的无滴膜,让阳光直射到膜上,提高膜下土壤温度,当韭蛆幼虫所在的土壤温度超过40℃且持续3 h以上,则可将其彻底杀死(Shi et al., 2018)。在晒覆膜技术方面,目前的研究主要集中在覆膜时间、日晒时间、土传病虫害杀灭效果以及高温覆膜法效果评价等方面(漆永红等,2015;Shi et al., 2018)。

2.5 辐照不育技术及其应用

辐照不育技术是指利用高能射线 γ -射线、X射线、 α -射线、 β -射线、电子束和中子流等对害虫(主要是雄成虫)进行辐照处理,引起生殖细胞产生显性致死突变,产生不育但具有交配竞争能力的昆虫,通过将不育雄成虫释放到野外与野外种群竞争性交配,导致后代死亡或无法产生后代,从而实现害虫防治的一种物理防治方法。

我国辐照不育技术的研究虽然起步较晚,但依旧取得了较大进展(季清娥和黄居昌,2016)。先后对玉米螟(李元英等,1980)、红铃虫 *Pectinophora gossypiella*、小菜蛾(柯礼道和方菊莲,1980)、桃小食心虫(张和琴和宋继学,1983)、柑橘大实蝇(李元英和张维,1992;王华嵩等,1990;1993)、三化螟 *Scirpophaga incertulas*(赵善欢,1979)、甘蔗黄螟 *Tetramoera schistaceana*(赵善欢,1979)以及大豆食心虫 *Leguminivora glycinivorella*(赵晓丽等,1992)等20多种害虫开展了辐照不育研究,研究内容比较广泛,包括害虫辐射的敏感性、辐射不育剂量的测定、害虫的人工饲养、辐照处理昆虫的性行为、昆虫的标记与诱捕方法、迁飞与扩散能力的测定、辐照处理昆虫的运输、释放技术和性行为习性的观察等(李元英等,1980;赵善欢,1981;赵晓丽等,1992),其中,对鳞翅目害虫亚不育辐照剂量的研究较为深入,发现的 F_1 代高度不育在20世纪60年代初期处于国际领先水平(张和琴,1982)。

同时,我国也开展了亚洲玉米螟、柑橘大实蝇、橘小实蝇 *Bactrocera dorsalis* 和烟青虫等害虫辐射不育雄成虫释放应用试验。如中国农业科学院原子能利用研究所于1981—1983年在辽宁省兴城市磨盘山岛释放经过亚不育剂量核辐射处理的亚洲玉米螟防治野生亚洲玉米螟取得了较好的效果,百株虫口下降了34.2%,这是我国首次利用昆虫不育技术防控田间害虫(张和琴等,1985);1987年中国农业科学院原子能利用所和浙江省农业科学院原子能所在贵州省惠水县三都区中联橘园释放了不育柑橘大实蝇雄成虫,当年该果园柑橘大实蝇的虫果率由常

年的5%~8%下降到0.2%,1989年在该果园继续释放不育雄成虫,虫果率下降到0.005%(王华嵩等,1990);1993—1994年中国农业科学院原子能利用所在贵州省惠水县6个果园释放辐射不育柑橘大实蝇雄成虫,显著压低了研究区柑橘大实蝇的虫口基数(王华嵩等,1993;1995)。福建农林大学研究团队对橘小实蝇的辐射不育技术开展了系统研究,建立了目前国内唯一一个不育橘小实蝇遗传区性品系及其饲养、复壮和保持的方法,开展了辐照剂量和辐照虫态虫龄以及不育机理的研究,明确了存储温度和甲基丁香酚对不育雄成虫的影响(季清娥等,2007a,b;梁广勤等,2008)。近年来,长江大学和中国农业科学院植物保护研究所的研究团队对柑橘大实蝇的辐照剂量、辐照时期以及辐射不育柑橘大实蝇的人工饲养技术以及辐照不育技术与诱集诱杀技术的联合使用进行了系统研究,并取得了重要进展(黄聪等,2014;2015;张桂芬等,2015)。最新的研究还对X射线辐射不育烟青虫雄成虫在田间应用的释放比例和防控效果进行了评估,发现田间烟青虫成虫羽化初期按照辐照雄成虫与正常雄成虫为8:1的比例释放辐射不育雄成虫可有效防控烟田烟青虫,防治效果最高可达64.86%(赵钧等,2021)。

3 展望

“十三五”以来,国家提出推进农业现代化和转变农业发展模式的目标,我国农业格局和生产模式发生重大改变,粮食安全、高效生产、农业生态等问题成为重点关注和亟待解决的问题。随着科学植保、公共植保、绿色植保三大理念的提出,高效精准和环境友好成为现代农业植保技术发展的重要趋势。自新中国成立以来,害虫物理防治技术经历了70多年的发展,现已成我国农业害虫防控体系中不可或缺的组成部分,特别是在提倡绿色农业、生态保护的今天,物理防治技术的重要性也愈加凸显。然而,我国物理防治技术的研究长期以来在支持和投入方面严重不足,导致现有的技术缺乏理论支撑,各种技术发展相对失衡,限制了我国农业病虫害绿色防控技术的发展和环境友好型农业生态体系的建立。加强与物理、材料和工程等多学科领域的交叉融合,开展物理防治理论和技术产品创新,将成为害虫物理防治研究发展的必然趋势。

3.1 深化物理消杀机理研究,创新物理防治技术

尽管过去我国科学家试图从不同的角度揭示昆虫趋光和物理辐射致使昆虫不育的物理消杀机理,

但目前物理防治技术相关的机制仍然未得到全面解析。未来研究需要深化对昆虫趋光、趋色机理、辐射不育机理和温控杀虫机理等方面的研究,以期物理防治技术创新提供科学依据。

3.2 研发适用于农业生产精准化和智能化物理防治产品

随着我国农业产业结构调整 and 种植制度变革,农场式农业模式逐渐替代了传统的小农模式。耕地资源、劳动力和环境约束以及工业化、信息化和智能化的高度发展,必将极大地促进物理防治技术装备的融合升级,促使物理防治技术更快的向以人工智能和无人系统为技术核心的现代化方向发展。因此,研发适用于新形势下现代农业生产的智能化、精准化物理防治产品,将成为害虫物理防治技术创新的核心内容。

3.3 建立农业害虫可持续控制的物理防治新模式

单项的物理防治技术单独使用时往往有其自身的局限性,未来研究一方面需要对单项物理技术的田间应用进行规范,建立科学统一的应用标准;另一方面需要加强不同物理防治措施的联合使用,甚至是与其他害虫防控措施的综合使用,形成以物理防治措施为核心的、可持续控制的害虫防控新模式,充分发挥物理防治的作用。

参 考 文 献 (References)

- Bian L, Cai XM, Chen ZM. 2019. Effects of light-emitting diode light traps with a suction fan on the population dynamics of the tea leafhopper *Empoasca onukii* (Hemiptera: Cicadellidae) within the effective distance. *Journal of Plant Protection*, 46(4): 902-909 (in Chinese) [边磊, 蔡晓明, 陈宗懋. 2019. LED风吸式杀虫灯对有效范围内茶小绿叶蝉虫口动态的影响. *植物保护学报*, 46(4): 902-909]
- Bian L, Sun XL, Gao Y, Luo ZX, Jin S, Zhang ZQ, Chen ZM. 2012. Research on the light tropism of insects and the progress in application. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 49(6): 1677-1686 (in Chinese) [边磊, 孙晓玲, 高宇, 罗宗秀, 金珊, 张正群, 陈宗懋. 2012. 昆虫光趋性机理及其应用进展. *应用昆虫学报*, 49(6): 1677-1686]
- Chen LZ, Zhang XB, Tao K, Yang XF. 2019. Difference of light quality under fly nets with different colours and its effects on the growth and yield of cowpea. *Guangdong Agricultural Sciences*, 46(2): 45-50 (in Chinese) [陈连珠, 张雪彬, 陶凯, 杨小锋. 2019. 彩色防虫网覆盖光质差异及其对豇豆生长和产量的影响. *广东农业科学*, 46(2): 45-50]
- Chen NS. 1979. The nature, law and navigation principle of light-taxis behavior of Noctuidae. *Entomological Knowledge*, 16(5): 193-200 (in Chinese) [陈宁生. 1979. 夜蛾趋光行为的本质、规律和导航原理. *昆虫知识*, 16(5): 193-200]
- Chen NS, Luo JY. 1979. Light trapping.//Institute of Zoology of Chinese Academy of Sciences. *Integrated control of major pests in China*. Beijing: Science Press, pp. 103-122 (in Chinese) [陈宁生, 罗敬业. 1979. 灯光防治.//中国科学院动物研究所. *中国主要害虫综合防治*. 北京: 科学出版社, pp. 103-122]
- Chen SP, Liu ZX, Chen YT, Wang Y, Chen JZ, Fu S, Ma WF, Xia S, Liu D, Wu T, et al. 2021. CRISPR/Cas9-mediated knockout of LW-opsin reduces the efficiency of phototaxis in the diamond-back moth *Plutella xylostella*. *Pest Management Science*, 77(7): 3519-3528
- Chen XX, Yan HY, Wei W, Qiao WN, Wei GS. 2009. Effect of spectral sensitivity and intensity response on the phototaxis of *Propylea japonica* (Thunberg). *Acta Ecologica Sinica*, 29(5): 2349-2355 (in Chinese) [陈晓霞, 闫海燕, 魏玮, 乔玮娜, 魏国树. 2009. 光谱和光强度对龟纹瓢虫成虫趋光行为的影响. *生态学报*, 29(5): 2349-2355]
- Cheng WJ, Zheng XL, Wang P, Lei CL, Wang XP. 2011. Sexual difference of insect phototactic behavior and related affecting factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22(12): 3351-3357 (in Chinese) [程文杰, 郑霞林, 王攀, 雷朝亮, 王小平. 2011. 昆虫趋光的性别差异及其影响因素. *应用生态学报*, 22(12): 3351-3357]
- Cheng WJ, Zheng XL, Wang P, Zhou LL, Si SY, Wang XP. 2016. Male-biased capture in light traps in *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae): results from the studies of reproductive activities. *Journal of Insect Behavior*, 29(4): 368-378
- Ding YQ, Gao WZ, Li DM. 1974. Study on the phototactic behaviour of nocturnal moths the response of *Heliothis armigera* (Hübner) and *Heliothis assulta* Guenée to different monochromatic light. *Acta Entomologica Sinica*, 17(3): 307-317 (in Chinese) [丁岩钦, 高慰曾, 李典谟. 1974. 夜蛾趋光特性的研究: 棉铃虫和烟青虫成虫对单色光的反应. *昆虫学报*, 17(3): 307-317]
- Du H, Gao XH, Liu K, Zhao G, Li Z, Zhang QW, Liu XX. 2019. Trapping effect of sticky traps in different colors on insects in pear orchards. *Plant Protection*, 45(2): 188-192 (in Chinese) [杜浩, 高旭辉, 刘坤, 赵广, 李贞, 张青文, 刘小侠. 2019. 不同颜色色板对梨园昆虫的诱集效应. *植物保护*, 45(2): 188-192]
- Fan F, Ren HM, Lu LH, Zhang LP, Wei GS. 2012. Effect of spectral sensitivity and intensity response on the phototaxis of *Frankliniella occidentalis* (Pergande). *Acta Ecologica Sinica*, 32(6): 1790-1795 (in Chinese) [范凡, 任红敏, 吕利华, 张莉萍, 魏国树. 2012. 光谱和光强度对西花蓟马雌虫趋光行为的影响. *生态学报*, 32(6): 1790-1795]
- Feng N, Fan F, Tao B, Yang XF, Wei GS. 2015. Effect of spectral sensitivity response on the phototaxis of *Orius sauteri* (Poppius). *Acta Ecologica Sinica*, 35(14): 4810-4815 (in Chinese) [冯娜, 范凡, 陶哺, 杨小凡, 魏国树. 2015. 光谱对东亚小花蝽趋光行为的影响. *生态学报*, 35(14): 4810-4815]
- Gao Y, Han Q, Liu J, Shi SS, Cui J, Xu ML. 2016. Review on the control objects and phototaxis of colored sticky trapping technology. *Northern Horticulture*, (4): 120-124 (in Chinese) [高宇, 韩琪, 刘杰, 史树森, 崔娟, 徐梦蕾. 2016. 色板诱杀技术的防治对象和常用颜色谱. *北方园艺*, (4): 120-124]

- Gu GH, Chen XB, Han J, Ge H. 2004. Phototaxis action of night activity insects and application of lighting in pest control. *Journal of Jinling Institute of Technology*, 20(1): 42–46 (in Chinese) [顾国华, 陈小波, 韩娟, 葛红. 2004. 夜行昆虫趋光特性的研究及在害虫防治中的应用. 金陵科技学院学报, 20(1): 42–46]
- Han HL, Zhang JM, Liu M, Zhao FC, Wang GY, Lü YB. 2020. The application of fan suction solar energy insecticidal lamp in fresh corn fields and its effect on the biodiversity of arthropods. *Journal of Plant Protection*, 47(6): 1234–1243 (in Chinese) [韩海亮, 章金明, 刘敏, 赵福成, 王桂跃, 吕要斌. 2020. 扇吸式太阳能杀虫灯在鲜食玉米田的应用效果及对节肢动物生物多样性的影响. 植物保护学报, 47(6): 1234–1243]
- Han ZJ. 2012. General theory of plant protection. Beijing: Higher Education Publishing, pp. 201–203 (in Chinese) [韩召军. 2012. 植物保护学通论. 北京: 高等教育出版社, pp. 201–203]
- Hei YX, Liu J, Zhang JJ, Wang Q. 2013. Application technology of insect proof net coverage. *China Plant Protection*, 33(6): 77–79 (in Chinese) [黑银秀, 刘君, 章俊军, 王强. 2013. 防虫网覆盖应用技术. 中国植保导刊, 33(6): 77–79]
- Hou WW, Ma YF, Gao WZ, Li SW, Yang ZJ. 1994. A study on the phototaxis of the peach fruit moth. *Acta Entomologica Sinica*, 37(2): 165–170 (in Chinese) [侯无危, 马幼飞, 高慰曾, 李世文, 杨自军. 1994. 桃小食心虫蛾的趋光性. 昆虫学报, 37(2): 165–170]
- Hu CH, Li YY, Li HX, Zhang HQ. 1984. Effect of ^{60}Co - γ radiation on the spermatogenesis and sperm transfer of *Carposina nipponensis* Wals. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, (1): 1–7 (in Chinese) [胡朝辉, 李元英, 黎怀燮, 张和琴. 1984. ^{60}Co 射线对桃小食心虫精子产生及传导的影响. 核农学报, (1): 1–7]
- Huang BH, Lin GK, Wang XH, Zhang XF. 2013. Control effects of fly nets to the pests of vegetables in greenhouses. *Plant Protection*, 39(6): 164–169, 187 (in Chinese) [黄保宏, 林桂坤, 王学辉, 张先锋. 2013. 防虫网对设施蔬菜害虫控害作用研究. 植物保护, 39(6): 164–169, 187]
- Huang BH, Luo DR, Liu SJ, Luo HY, Wu LJ, Ling HP, Wang Z, Chen JM. 2020. Study on optimal wavelength of *Nilaparvata lugens* (Stål). *Journal of Anhui Science and Technology University*, 34(2): 18–22 (in Chinese) [黄保宏, 罗定荣, 刘师佳, 罗华影, 吴莉君, 凌和平, 王占, 陈军民. 2020. 褐飞虱趋光性的最佳波长研究. 安徽科技学院学报, 34(2): 18–22]
- Huang C, Wang FL, Ma YK, Xu HY, Zhang GF, Li CR. 2015. Effect of irradiating at earlier pupal stages by ^{60}Co - γ radiation on the eclosion and mating of *Bactrocera minax* (Enderlein) adults. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 29(11): 2117–2122 (in Chinese) [黄聪, 王福莲, 马跃坤, 许弘毅, 张桂芬, 李传仁. 2015. ^{60}Co - γ 射线辐照柑橘大实蝇低级别蛹对成虫羽化和交配的影响. 核农学报, 29(11): 2117–2122]
- Huang C, Wang FL, Zhang GF, Li CR, Li YJ. 2014. Effects of gamma radiation with sterile dose on survival of *Bactrocera minax* (Enderlein) adult during premating period. *Journal of Environmental Entomology*, 36(2): 213–218 (in Chinese) [黄聪, 王福莲, 张桂芬, 李传仁, 李咏军. 2014. 不育剂量 γ 射线辐照对柑橘大实蝇交配前期存活的影响. 环境昆虫学报, 36(2): 213–218]
- Ji QE, Hou WR, Chen JH. 2007a. Development of a genetic sexing strain and the sterile male technique of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel). *Acta Entomologica Sinica*, 50(10): 1002–1008 (in Chinese) [季清娥, 侯伟荣, 陈家骅. 2007a. 橘小实蝇遗传性别品系的建立及雄性不育技术. 昆虫学报, 50(10): 1002–1008]
- Ji QE, Hou WR, Chen JH. 2007b. Sterile insect technique of oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel): optimal pupal age and dose of irradiation treatment for male pupae. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 21(5): 523–526 (in Chinese) [季清娥, 侯伟荣, 陈家骅. 2007b. 橘小实蝇雄性不育技术: 雄蛹辐照最佳时期和剂量. 核农学报, 21(5): 523–526]
- Ji QE, Huang JC. 2016. Development strategy of radiation sterility control technology for agricultural pests. //China Insect Sterile Technology Development Strategy Research Group. Development strategy of green pest control in China. Beijing: Science Press, pp. 134–144 (in Chinese) [季清娥, 黄居昌. 2016. 农业害虫辐射不育防治技术发展策略. //我国昆虫不育技术发展策略研究项目组. 中国农业害虫绿色防控发展战略. 北京: 科学出版社, pp. 134–144]
- Jia N, Liu J, Lu WC, Ran LX, Li J. 2021. Trapping effects of sticky traps in different colors on insects in the vineyard. *China Fruits*, (2): 31–35 (in Chinese) [贾娜, 刘靖, 卢威成, 冉隆贤, 李静. 2021. 不同颜色粘虫板对葡萄园昆虫的诱集效应. 中国果树, (2): 31–35]
- Jiang XF, Zhang ZZ, Luo LZ. 2010. Phototaxis of the beet webworm *Loxostege sticticalis* to different wavelengths and light intensity. *Plant Protection*, 36(6): 69–73 (in Chinese) [江幸福, 张总泽, 罗礼智. 2010. 草地螟成虫对不同光波和光强的趋光性. 植物保护, 36(6): 69–73]
- Jiang YL, Zhang JZ, Yuan SX, Li T, Gong ZJ, Miao J, Duan Y, Lü CF, Wu YQ. 2018. Progresses in the research and application of yellow light for pest control. *Plant Protection*, 44(3): 6–10 (in Chinese) [蒋月丽, 张建周, 袁水霞, 李彤, 巩中军, 苗进, 段云, 吕春芳, 武子清. 2018. 黄色灯防治害虫的研究与应用进展. 植物保护, 44(3): 6–10]
- Jing XF, Lei CL. 2004. Advances in research on phototaxis of insects and the mechanism. *Chinese Bulletin of Entomology*, 41(3): 198–203 (in Chinese) [靖湘峰, 雷朝亮. 2004. 昆虫趋光性及其机理的研究进展. 昆虫知识, 41(3): 198–203]
- Ju Q, Qu MJ, Chen JF, Zhao ZQ, Niu HL, Zhou Q, Yu SL. 2010. The influence of spectral and sexual differences on phototaxis action of several kinds of beetles. *Chinese Bulletin of Entomology*, 47(3): 512–516 (in Chinese) [鞠倩, 曲明静, 陈金凤, 赵志强, 牛虎力, 周强, 禹山林. 2010. 光谱和性别对几种金龟子趋光行为的影响. 昆虫知识, 47(3): 512–516]
- Ke LD, Fang JL. 1980. Preliminary report on radiation sterility of *Plutella xylostella*. *Nuclear Techniques*, 3(1): 38–43 (in Chinese) [柯礼道, 方菊莲. 1980. 小菜蛾辐射不育研究初报. 核技术, 3(1): 38–43]
- Kim KN, Huang QY, Lei CL. 2019. Advances in insect phototaxis and application to pest management: a review. *Pest Management Sci-*

- ence, 75(12): 3135-3143
- Kong XY, Xu RY, Li JS, Cao B. 2007. Research progress on application of insect-proof screens technology. *China Plant Protection*, 27(8): 12-14 (in Chinese) [孔祥义, 许如意, 李劲松, 曹兵. 2007. 防虫网覆盖技术应用研究进展. *中国植保导刊*, 27(8): 12-14]
- Lei CL. 2019. Insecticidal lamps industry should be innovated and developed. *Hubei Plant Protection*, (6): 1-3 (in Chinese) [雷朝亮. 2019. 杀虫灯行业应该创新发展. *湖北植保*, (6): 1-3]
- Lei CL, Zhu ZH, Wu YQ, Zhang QW, Wei GS. 2016. Development strategy of physical trapping and killing technology of agricultural pests.//China Insect Sterile Technology Development Strategy Research Group. Development strategy of green pest control in China. Beijing: Science Press, pp. 91-103 (in Chinese) [雷朝亮, 朱智慧, 武予清, 张青文, 魏国树. 2016. 农业害虫物理诱杀技术发展策略.//我国昆虫不育技术发展策略研究项目组. 中国农业害虫绿色防控发展战略. 北京: 科学出版社, pp. 91-103]
- Li YY, Lou HZ, Zhang HQ. 1980. Multiple mating of corn borer (*Ostrinia nubilalis* Hübner) and the application of radio-sterility method. *Scientia Agricultura Sinica*, 13(2): 79-82, 99 (in Chinese) [李元英, 楼洪章, 张和琴. 1980. 玉米螟的多配性与辐射不育法的应用. *中国农业科学*, 13(2): 79-82, 99]
- Li YY, Zhang W. 1992. Studies on the mechanism of radiation-induced sterility of Chinese citrus fly, *Dacus citri* (Dip.: Tephritidae). *Chinese Journal of Biological Control*, 8(1): 9-12 (in Chinese) [李元英, 张维. 1992. 柑桔大实蝇辐射不育机理的研究. *生物防治通报*, 8(1): 9-12]
- Liang GQ, Liang F, Zhao JP, Zou WQ, Zhou QX, Wu WL, Wu JJ, Hu XN. 2008. Study and application on sterile insect technique for oriental fruit fly *Bactrocera dorsalis* in the field to control the fly. *Guangdong Agricultural Sciences*, 35(5): 60-63 (in Chinese) [梁广勤, 梁帆, 赵菊鹏, 邹伟权, 周庆贤, 伍伟亮, 吴佳教, 胡学难. 2008. 桔小实蝇不育技术及应用研究. *广东农业科学*, 35(5): 60-63]
- Liu JX, Tian Y, Qin GW, Ma YQ, Chen HB. 2021. Study on trapping effect of different color insect luring boards on insects in citrus orchard. *Sichuan Agricultural Science and Technology*, (4): 34-37, 40 (in Chinese) [刘静香, 田悦, 秦光炜, 马雨晴, 陈华保. 2021. 不同颜色诱虫板对柑橘园昆虫的诱集效果研究. *四川农业科技*, (4): 34-37, 40]
- Liu LC. 1985. Effects of insect trapping by black-white light tubes. *Acta Entomologica Sinica*, 28(2): 148-152 (in Chinese) [刘立春. 1985. 单管黑白双光灯的诱虫效应. *昆虫学报*, 28(2): 148-152]
- Liu LC. 1993. Development and application of new black-white light tubes. *Plant Protection*, 19(6): 37-38 (in Chinese) [刘立春. 1993. 新光源双波灯的研制与应用. *植物保护*, 19(6): 37-38]
- Liu YJ, Yan S, Shen ZJ, Li Z, Zhang XF, Liu XM, Zhang QW, Liu XX. 2018. The expression of three opsin genes and phototactic behavior of *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae): evidence for visual function of opsin in phototaxis. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 96: 27-35
- Luo F, Yuan TQ, Ke YC, Wang S, Wu QX, Liu Y, Huang GS, Kong XY. 2014. Effects of different color insect-proof nets on occurrence of thrips and growth characteristics and yield of cowpea. *Journal of Southern Agriculture*, 45(9): 1584-1588 (in Chinese) [罗丰, 袁廷庆, 柯用春, 王爽, 吴乾兴, 刘勇, 黄国宋, 孔祥义. 2014. 不同颜色防虫网对豇豆生长特性、产量及蓟马发生量的影响. *南方农业学报*, 45(9): 1584-1588]
- Ma GY, Dang ZH, Li YF, Cheng Z, Pan WL, Gao ZL. 2015. Preliminary study on trapping effect of sex pheromone combined with light trap on *Athetis lepigone*. *China Plant Protection*, 35(3): 45-47 (in Chinese) [马广源, 党志红, 李耀发, 程志, 潘文亮, 高占林. 2015. 性诱剂与诱虫灯结合使用对二点委夜蛾诱捕效果初探. *中国植保导刊*, 35(3): 45-47]
- Meng JY, Zhang CY, Zhu F, Wang XP, Lei CL. 2009. Ultraviolet light-induced oxidative stress: effects on antioxidant response of *Helicoverpa armigera* adults. *Journal of Insect Physiology*, 55(6): 588-592
- Qi YH, Du H, Cao SF, Chen SL, Ye DY. 2015. Control effect of solarization mode on soil root-knot nematode. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 31(35): 122-127 (in Chinese) [漆永红, 杜蕙, 曹素芳, 陈书龙, 叶德友. 2015. 日光高温消毒方式对土壤根结线虫的防治效果. *中国农学通报*, 31(35): 122-127]
- Sang W, Huang QY, Wang XP, Guo SH, Lei CL. 2019. Progress in research on insect phototaxis and future prospects for pest light-trap technology in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(5): 907-916 (in Chinese) [桑文, 黄求应, 王小平, 郭墅濠, 雷朝亮. 2019. 中国昆虫趋光性及灯光诱虫技术的发展、成就与展望. *应用昆虫学报*, 56(5): 907-916]
- Sang W, Ma WH, Qiu L, Zhu ZH, Lei CL. 2012. The involvement of heat shock protein and cytochrome P450 genes in response to UV-A exposure in the beetle *Tribolium castaneum*. *Journal of Insect Physiology*, 58(6): 830-836
- Sang W, Zhu ZH, Lei CL. 2016. Review of phototaxis in insects and an introduction to the light stress hypothesis. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(5): 913-918 (in Chinese) [桑文, 朱智慧, 雷朝亮. 2016. 昆虫趋光行为的光胁迫假说. *应用昆虫学报*, 53(5): 913-918]
- Shi CH. 2017. Application of solarization covering film in the control of *Bradysia odoriphaga*. *China Vegetables*, (7): 90 (in Chinese) [史彩华. 2017. “日晒高温覆膜法”在韭蛆防治中的应用. *中国蔬菜*, (7): 90]
- Shi CH, Hu JR, Wei QW, Yang YT, Cheng JX, Han HL, Wu QJ, Wang SL, Xu BY, Su Q, et al. 2018. Control of *Bradysia odoriphaga* (Diptera: Sciaridae) by soil solarization. *Crop Protection*, 114: 76-82
- Sun SX, Li WJ. 1965. Histopathological studies on the effects of gamma irradiation on the ovarian tissues of *Ostrinia nubilalis* (Hübner). *Acta Entomologica Sinica*, 8(5): 423-431 (in Chinese) [孙少轩, 李伟绩. 1965. 丙种射线对玉米螟卵巢组织作用的组织病理学研究. *昆虫学报*, 8(5): 423-431]
- Tian XH, Hu QB, Xie JX, Chen LS, Chen YS, Zhan XD. 2021. Study on selective trapping effects on *Dendrothrips minowai* with different color sticky boards and pheromone. *China Tea*, 43(11):

- 45–48, 55 (in Chinese) [田新湖, 胡启镛, 谢锦秀, 陈联双, 陈益生, 詹兴堆. 2021. 不同色板和信息素选择性诱杀茶棍蓟马试验. 中国茶叶, 43(11): 45–48, 55]
- Wan NF, Jiang JX, Ji XY, Yang YJ. 2008. Preliminary report on the effect of frequency oscillation lamps on trapping insect pests and the insect pests' rhythm of dashing at lamps in protected horticultural fields. *Acta Agriculturae Shanghai*, 24(4): 65–68 (in Chinese) [万年峰, 蒋杰贤, 季香云, 杨银娟. 2008. 设施菜田频振式杀虫灯诱杀效果及害虫扑灯节律初报. 上海农业学报, 24(4): 65–68]
- Wang FF, Wang Y, Chen YC, Liu YM, Guo SH, Qiu BL, Sang W. 2020. Phototaxis of *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae) to LED lights. *Journal of Environmental Entomology*, 42(1): 187–192 (in Chinese) [王飞凤, 王也, 陈雨晨, 刘燕梅, 郭墅濠, 邱宝利, 桑文. 2020. 柑橘木虱成虫趋光行为反应. 环境昆虫学报, 42(1): 187–192]
- Wang GL, Liao WC, Wei HY, Xu H, Zhang JY. 2014. Influence of irradiation on sperm ultrastructure and fertility of *Apriona germari* (Coleoptera: Cerambycidae). *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 28(1): 69–76 (in Chinese) [王广利, 廖为财, 魏洪义, 徐宏, 张俊宇. 2014. 辐照对桑天牛精子超微结构及生育力的影响. 核农学报, 28(1): 69–76]
- Wang HS, Hu JG, Lu DG, Kang W, Zhang HQ. 1995. Control of Chinese citrus fly in large area by releasing irradiated sterile flies. *Chinese Journal of Biological Control*, 11(4): 156–159 (in Chinese) [王华嵩, 胡建国, 路大光, 康文, 张和琴. 1995. 利用辐射不育技术防治柑桔大实蝇的示范试验. 中国生物防治, 11(4): 156–159]
- Wang HS, Zhao CD, Kang W, Hu JG, Zhang HQ, Chu JM. 1993. Release effect of irradiated sterile female citrus fruit fly. *Journal Nuclear Agricultural Science*, 14(1): 26–28 (in Chinese) [王华嵩, 赵才道, 康文, 胡建国, 张和琴, 储吉明. 1993. 辐射不育雌柑桔大实蝇释放效果. 核农学报, 14(1): 26–28]
- Wang HS, Zhao CD, Li HX, Lou HZ, Liu QR, Kang W, Hu JG, Zhang HQ, Chu JM, Xia DR, et al. 1990. Control of Chinese citrus fly *Dacus citri* by male sterile technique. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 4(3): 135–138 (in Chinese) [王华嵩, 赵才道, 黎怀燮, 楼洪章, 刘琼茹, 康文, 胡建国, 张和琴, 储吉明, 夏大荣, 等. 1990. 辐射不育技术防治柑桔大实蝇的效果. 核农学报, 4(3): 135–138]
- Wang LJ, Zhou LJ, Zhu ZH, Ma WH, Lei CL. 2014. Differential temporal expression profiles of heat shock protein genes in *Drosophila melanogaster* (Diptera: Drosophilidae) under ultraviolet A radiation stress. *Environmental Entomology*, 43(5): 1427–1434
- Wang ML, Zhang Y, Wang XP, Zhou XM, Lei CL. 2009. Application of frequency-vibration insecticidal lamp in agricultural pest control. *Hubei Plant Protection*, (S1): 59–61 (in Chinese) [王明亮, 张玥, 王小平, 周兴苗, 雷朝亮. 2009. 频振式杀虫灯在农业害虫防治上的应用. 湖北植保, (S1): 59–61]
- Wang Y, Wang LJ, Zhu ZH, Ma WH, Lei CL. 2012. The molecular characterization of antioxidant enzyme genes in *Helicoverpa armigera* adults and their involvement in response to ultraviolet-A stress. *Journal of Insect Physiology*, 58(9): 1250–1258
- Wang YH, Andongma AA, Dong YC, Chen ZZ, Xu PH, Ren XM, Krosch MN, Clarke AR, Niu CY. 2019. *Rh6* gene modulates the visual mechanism of host utilization in fruit fly *Bactrocera minax*. *Pest Management Science*, 75(6): 1621–1629
- Wang YS, Han SJ, Han BY. 2020. Difference in phototaxis of insect groups and their community composition trapped on sticky colored boards in Xihu Longjing tea plantations in the midsummer. *Acta Ecologica Sinica*, 40(19): 7093–7103 (in Chinese) [王彦苏, 韩善捷, 韩宝瑜. 2020. 盛夏西湖龙井茶园色板诱杀的昆虫类群的组成及其趋色性差异. 生态学报, 40(19): 7093–7103]
- Wei GS, Zhang QW, Zhou MZ, Wu WG. 2000. Studies on the phototaxis of *Helicoverpa armigera* (Hübner). *Acta Biophysica Sinica*, 16(1): 89–95 (in Chinese) [魏国树, 张青文, 周明群, 吴卫国. 2000. 不同光波及光强度下棉铃虫(*Helicoverpa armigera*)成虫的行为反应. 生物物理学报, 16(1): 89–95]
- Wu YQ, Duan Y, Jiang YL. 2009. Reviews on lighting for insect-pests control. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 38(9): 127–130 (in Chinese) [武予清, 段云, 蒋月丽. 2009. 害虫的灯光防治研究与应用进展. 河南农业科学, 38(9): 127–130]
- Xia CX, Li MY, Xie XT, Zhang YB, Niu WC, Peng L, Chen ZX, Lou W, Zhang HM, Yan X. 2020. Effect of mesh-net with different mesh sizes on control of *Diaphorina citri*. *South China Fruits*, 49(2): 10–12, 18 (in Chinese) [夏长秀, 李梦媛, 谢秀挺, 张油兵, 牛王翠, 彭龙, 陈兆星, 姜伟, 张洪铭, 严翔. 2020. 不同孔径防虫网对柑桔木虱的阻隔作用. 中国南方果树, 49(2): 10–12, 18]
- Yan KL, Tang LD, Wu JH, Bi ZJ. 2016. Application of trap technology in integrated pest management. *China Plant Protection*, 36(6): 17–25 (in Chinese) [闫凯莉, 唐良德, 吴建辉, 毕志兼. 2016. 诱杀技术在害虫综合治理(IPM)中的应用. 中国植保导刊, 36(6): 17–25]
- Yang HB. 2014. Study on light-trapped behavior of *Sogatella furcifera* (Horvath) and *Nilaparvata lugens* (Stål). PhD thesis. Nanjing: Nanjing Agricultural University (in Chinese) [杨海博. 2014. 白背飞虱和褐飞虱扑灯行为研究. 博士学位论文. 南京: 南京农业大学]
- Yang HZ, Wen LZ, Yi Q, Xu H. 2014. Effects of light on the phototaxis of several important agricultural pests. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 30(25): 279–285 (in Chinese) [杨洪璋, 文礼章, 易倩, 许浩. 2014. 光波和光强对几种重要农业害虫趋光性的影响. 中国农学通报, 30(25): 279–285]
- Yang PY. 2016. Integration and application development strategy of green control technology of agricultural pests.//China Insect Sterile Technology Development Strategy Research Group. Development strategy of green pest control in China. Beijing: Science Press, pp. 194–203 (in Chinese) [杨普云. 2016. 农业害虫绿色防控技术集成与应用发展战略.//我国昆虫不育技术发展策略研究项目组. 中国农业害虫绿色防控发展战略. 北京: 科学出版社, pp. 194–203]
- Yang XM, Lu YH, Liang GM. 2020. Insect phototaxis behavior and light trapping technology. *China Illuminating Engineering Journal*, 31(5): 22–31 (in Chinese) [杨现明, 陆宴辉, 梁革梅. 2020.

- 昆虫趋光行为及灯光诱杀技术. 照明工程学报, 31(5): 22-31]
- Zhang CY, Meng JY, Wang XP, Zhu F, Lei CL. 2011. Effects of UV-A exposures on longevity and reproduction in *Helicoverpa armigera*, and on the development of its F1 generation. *Insect Science*, 18(6): 697-702
- Zhang CZ. 2007. Progress on color tropism of pests and its application technology in vegetables. *Journal of Changjiang Vegetables*, (8): 34-36 (in Chinese) [张纯胃. 2007. 害虫趋色性及其在蔬菜上的应用技术研究进展. 长江蔬菜, (8): 34-36]
- Zhang GF, Wang FL, Lü ZC, Huang C, Li YJ, Guo JY, Li CR, Wan FH. 2015. Research progress on the biology, ecology and the application of sterile insect technique on *Bactrocera minax* (Enderlein). *Journal of Biosafety*, 24(2): 171-176 (in Chinese) [张桂芬, 王福莲, 吕志创, 黄聪, 李咏军, 郭建英, 李传仁, 万方浩. 2015. 柑橘大实蝇生物、生态学及辐照不育技术最新研究进展. 生物安全学报, 24(2): 171-176]
- Zhang GX, Zheng G, Li XJ, Bu J. 2004. Discussion of using frequency trembler grid lamps from angle of protecting biodiversity. *Entomological Knowledge*, 41(6): 532-535 (in Chinese) [张广学, 郑国, 李学军, 卜军. 2004. 从保护生物多样性角度谈频振式杀虫灯的应用. 昆虫知识, 41(6): 532-535]
- Zhang HQ. 1982. Several problems in the research of insect radiated sterility. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, (2): 1-5 (in Chinese) [张和琴. 1982. 昆虫辐射不育研究中的若干问题. 核农学报, (2): 1-5]
- Zhang HQ. 2007. Study on microstructure of the compound eye and phototactic behavior of *Chrysopa pallens* Rambur (Neuroptera: Chrysopidae). Master thesis. Baoding: Hebei Agricultural University (in Chinese) [张海强. 2007. 大草蛉 *Chrysopa pallens* Rambur 成虫复眼显微结构及其趋光行为的研究. 硕士学位论文. 保定: 河北农业大学]
- Zhang HQ, Song JX. 1983. Sterility of peach fruit borer (*Carposina nipponensis* Wals.) resulting from irradiation. *Application of Atomic Energy in Agriculture*, (2): 1-5 (in Chinese) [张和琴, 宋继学. 1983. 桃小食心虫辐射不育的研究. 原子能农业应用, (2): 1-5]
- Zhang HQ, Zhao CD, Wang HS, Huang XZ, Wang S. 1985. The effectiveness of irradiation-substerile-technique for controlling corn borer population on Mopanshan Island. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, (2): 5-9, 43 (in Chinese) [张和琴, 赵才道, 王华嵩, 黄新治, 王树. 1985. 在磨盘山岛利用辐射亚不育技术防治玉米螟试验效果. 核农学报, (2): 5-9, 43]
- Zhang JG. 1979. Discussion on application of black light trap in cotton field. *Cotton*, 6(3): 42-44, 21 (in Chinese) [张近光. 1979. 棉区合理应用黑光灯问题的探讨. 棉花, 6(3): 42-44, 21]
- Zhang M, Lei CL. 2018. Trapping principle and application effect of fan suction insect light-trap. *Hubei Plant Protection*, (4): 60-62 (in Chinese) [张敏, 雷朝亮. 2018. 扇吸式捕虫器的诱虫原理与应用效果. 湖北植保, (4): 60-62]
- Zhang XG, Jia YF, Wen Y, Zhang YF, Wan GJ, Chen FJ. 2017. Behavioral rhythms of three lepidopteran pests: *Mythimna separata*, *Agrotis ypsilon* and *Helicoverpa armigera*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(2): 190-197 (in Chinese) [张行国, 贾艺凡, 温洋, 张逸飞, 万贵钧, 陈法军. 2017. 粘虫、小地老虎和棉铃虫三种鳞翅目害虫上灯行为节律研究. 应用昆虫学报, 54(2): 190-197]
- Zhang YJ. 2016. Application of frequency vibrating insecticidal lamp.// China Insect Sterile Technology Development Strategy Research Group. Development strategy of green pest control in China. Beijing: Science Press, pp. 252-261 (in Chinese) [张跃进. 2016. 频振式杀虫灯的应用.//我国昆虫不育技术发展策略研究项目组. 中国农业害虫绿色防控发展战略. 北京: 科学出版社, pp. 252-261]
- Zhao J, Li Q, Wang XF, Xu M, He L, Miao P, Liu DS, Li CJ, Wu KM, Li SJ. 2021. Releasing sterile male adults for control of *Heliothis assulta*. *Chinese Tobacco Science*, 42(4): 31-35 (in Chinese) [赵钧, 李琦, 王雪芬, 徐敏, 何雷, 苗圃, 刘东升, 李成军, 吴孔明, 李淑君. 2021. 释放辐射不育雄蛾防治烟青虫的效果研究. 中国烟草科学, 42(4): 31-35]
- Zhao JQ. 2012. Development and application of light trapping and killing pest technology. *Liaoning Agricultural Sciences*, (1): 67-68 (in Chinese) [赵季秋. 2012. 灯光诱杀害虫技术的发展与应用. 辽宁农业科学, (1): 67-68]
- Zhao SH. 1979. New advances in the application of radiation sterility to control pests. *Nuclear Techniques*, 2(1): 1-14 (in Chinese) [赵善欢. 1979. 应用辐射不育防治害虫的新进展. 核技术, 2(1): 1-14]
- Zhao SH. 1981. Recent advances in sterile insect science and technology. *Guangdong Agricultural Sciences*, 8(3): 4-6 (in Chinese) [赵善欢. 1981. 昆虫不育科学技术最近的一些进展. 广东农业科学, 8(3): 4-6]
- Zhao XL, Du JL, Li Y. 1992. Experiment on the control of radiation sterility of soybean heartworm. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, (3): 45-47 (in Chinese) [赵晓丽, 杜俊岭, 李尧. 1992. 大豆食心虫辐射不育防治试验. 黑龙江农业科学, (3): 45-47]
- Zhao Z, Xia CX, Yao ZC, Yan X, Fang YW, Zhang HY. 2018. The effects of different colors and different hanging modes for trapping Asian citrus psyllid. *Journal of Fruit Science*, 35(5): 596-601 (in Chinese) [赵政, 夏长秀, 姚志超, 严翔, 方贻文, 张宏宇. 2018. 不同色板和悬挂方式对柑橘木虱的诱集效果. 果树学报, 35(5): 596-601]
- Zheng Y, Wu WJ, Fu YG. 2010. Laboratory evaluation of light-emitting diodes as an attractant for the spiralling whitefly *Aleurodicus dispersus* Russell. *Journal of Environmental Entomology*, 32(3): 423-426 (in Chinese) [郑月, 吴伟坚, 符悦冠. 2010. 螺旋粉虱对不同波长发光二极管的趋光反应. 环境昆虫学报, 32(3): 423-426]
- Zhou H, Yu HP, Zhao QC, Zheng WY, Jin H, Deng XK, Chen SL. 2021. Study of suitable period for killing *Tetradacus citri* by attractant ball in Yichang of Hubei Province. *South China Fruits*, 50(4): 26-27, 32 (in Chinese) [周华, 遇和平, 赵其成, 郑文艳, 靳华, 邓小垦, 陈世林. 2021. 湖北宜昌柑桔大实蝇诱蝇球诱杀适期研究. 中国南方果树, 50(4): 26-27, 32]

(责任编辑:李美娟)