

中国昆虫趋光性及灯光诱虫技术的发展、成就与展望*

桑文^{1,2**} 黄求应¹ 王小平¹ 郭墅濠² 雷朝亮^{1***}

(1. 华中农业大学植物科学技术学院, 湖北省昆虫资源利用与害虫可持续治理重点实验室, 武汉 430070;

2. 华南农业大学昆虫学系, 广东省生物农药创制与应用重点实验室, 广州 510640)

摘要 害虫灯光诱控技术是一种利用昆虫的趋光性来进行害虫防治的技术, 具有高效、环保、无残留、不产生抗性等特点。本文系统综述了我国建国 70 年来灯光诱控技术的发展与成就, 分析了该技术研究 and 应用存在的问题, 进而展望了其未来的发展趋势。

关键词 灯光诱控; 趋光性; 光胁迫; 光陷阱; 绿色防治

Progress in research on insect phototaxis and future prospects for pest light-trap technology in China

SANG Wen^{1,2**} HUANG Qiu-Ying¹ WANG Xiao-Ping¹ GUO Shu-Hao² LEI Chao-Liang^{1***}

(1. Hubei Insect Resources Utilization and Sustainable Pest Management Key Laboratory, College of Plant Science and Technology,

Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Key Laboratory of Bio-Pesticide Innovation and Application,

Guangdong Province, Department of Entomology, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, China)

Abstract Light-trap technology is an efficient, environmentally friendly way of controlling pest insects without the problem of insecticide resistance. This paper systematically reviews the development and achievements of light trap technology in China during the past 70 years, analyzing existing problems in the research and application of this technology, and forecasts future trends in its development.

Key words trapping technology of light; phototaxis; light stress; light trap; eco-friendly control

害虫防治是农业生产的重要组成部分, 它为保障我国粮食增产增收做出了卓越贡献。长期以来, 化学防治一直是害虫防治的主要手段。随着社会主义现代化建设步伐的加快, 人们的生活水平日益提高, 社会对高品质农产品需求开始加大。我国的害虫防治手段和方法开始进行结构性的优化, 由原来单一的采用化学防治的手段逐渐向农业防治、生物防治、物理防治、化学防治并重的害虫综合治理方式转变。利用昆虫的行为特性进行害虫防治, 能够大大降低化学农药的使用。害虫灯光诱控技术作为害虫物理防治的重要

手段之一, 就是利用了昆虫趋光行为促使昆虫聚集某一固定位置集中消灭的方法, 该技术安全、环保、高效、无残留、不产生抗性, 将是未来害虫绿色防控的有力手段(桑文等, 2016, 2018a, 2018b)。我国劳动人民早在 2000 多年前就开始利用昆虫的趋光行为为农业生产服务, 但直到建国以后, 才开始对昆虫的趋光行为进行系统深入的研究, 并发展出一系列害虫灯光诱控技术。本文系统综述了我国建国 70 年来害虫灯光诱控技术的发展与成就, 分析了该技术研究 and 应用存在的问题, 以为害虫绿色防控提供试验依据和理论基础。

*资助项目 Supported projects: 国家自然科学基金青年基金项目 (31701793); 国家重点研发计划项目 (2017YFD0200900)

**第一作者 First author, E-mail: sangwen@scau.edu.cn

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: ioir@mail.hzau.edu.cn

收稿日期 Received: 2019-06-13; 接受日期 Accepted: 2019-06-26

1 灯光诱控技术的理论基础

1.1 昆虫趋光的行为学研究

昆虫趋光性是昆虫固有的行为学特性之一,它影响昆虫的取食、交配、繁殖,同时人们也利用昆虫的趋光行为进行害虫防治。建国以来,我国许多学者对昆虫的趋光行为学进行了大量细致的研究,包括光源波长、偏振性、强度、昆虫性别、发育、环境因子、节律对昆虫趋光行为的影响。

1.1.1 光源波长对昆虫趋光行为的影响 大多数趋光昆虫对单色光具有较强烈的反应,由于昆虫成虫的复眼主要有3种光感受器类型:紫外光敏感型、绿光敏感型和蓝光敏感型,分别含有能接受紫外光、绿光和蓝光的视紫红质(靖湘峰和雷朝亮,2004;Warrant and Nilsson,2006),因而一般情况下昆虫的光谱反应敏感区主要集中在紫外光区、蓝光区和黄绿光区(丁岩钦等,1974;Hay and Crossley,1977;魏国树等,2000;江幸福等,2010)。然而,每种昆虫对这三个区域内具体的波长偏好存在差异,有的甚至对其它波长的光谱反应更强。对棉铃虫 *Helicoverpa armigera* (Hübner) 趋光行为的研究表明,棉铃虫成虫对333-383 nm的紫外光、400-450 nm的紫光和525-538 nm的绿光具有明显的趋性(丁岩钦等,1974;侯无危等,1997;陈惠祥等,1999;魏国树等,2000)。对草蛉的趋光行为研究发现,中华通草蛉 *Chrysoperla sinica* (Tjeder) 对400 nm的紫光、460 nm的蓝光、380 nm紫外光和562 nm的绿光趋性较强;而丽草蛉 *Chrysopa formosa* Brauer 的趋光行为不明显,仅对605 nm橙光有相对较强的反应(魏玮,2009)。龟纹瓢虫 *Propylaea japonica* (Thunberg) 对340 nm的紫外光趋性最强,其次是524 nm绿光、483 nm蓝光和400-440 nm紫光(陈晓霞,2009)。研究发现草地螟 *Loxostege sticticatis* L.成虫对340-605 nm范围内不同的单色光波长均表现出一定趋性,但仅对360 nm的紫外和400 nm的紫光趋性最强(江幸福等,2010)。通过对几种金龟子趋光行为研究发现,棕色鳃金龟 *Holotrichia titanis* Reitter、铅灰鳃金龟 *Holotrichia*

plumbea Hope、铜绿丽金龟 *Anomala corpulenta* Motschulsky 比暗黑鳃金龟 *Holotrichia parallela* 和大黑鳃金龟 *Holotrichia oblita* Faldermann 的趋光行为十分明显,且这几种金龟对405 nm、465 nm的紫光和蓝光趋性最强(鞠倩等,2010)。梨小食心虫 *Grapholitha molesta* (Busck) 对465 nm蓝光、520 nm绿光、590 nm黄光和624 nm红光都有趋性,但对绿光的趋性最强(于海利,2011)。对绿盲蝽 *Apolygus lucorum* Meyer-Dür 的研究发现,其对400 nm的紫光和450 nm的蓝光趋性最强(李耀发等,2011)。黑绒鳃金龟 *Serica orientalis* Motschulsky 对400-420 nm紫光、498 nm蓝光、524 nm绿光的趋性最强(吕飞,2012)。东亚小花蜻对340-380 nm紫外光、524 nm绿光和582-605 nm黄橙光趋性较强(范凡,2012)。绿盲蝽 *A. lucorum* 雌成虫对紫光440、400、420 nm及绿光562 nm处的趋光率较(董松等,2017)。枸杞棉蚜 *Aphis gossypii* Glover 的敏感光谱范围420-650 nm,但在575 nm时趋性最强(罗一玮,2018)。对异色瓢虫 *Harmonia axyridis* (Pallas) 趋光性研究却出现不同的结果,之前报道异色瓢虫对360 nm的紫外光趋性最强,其次在420 nm蓝光和524 nm绿光(吴春娟,2011);最近的研究发现,异色瓢虫对500 nm和550 nm的绿光、605 nm的橙光趋性最强(徐练,2016)。

此外,两种或多种波长的单色光混合后会产生复色光,复色光引发的昆虫趋光行为比单色光更显著(边磊等,2012)。例如,棉铃虫在两种波长的灯光下趋光率要显著高于单一单波长的光源(张艳红等,2009)。

1.1.2 光的偏振性对昆虫趋光行为的影响 光是一种电磁波,且是横波,其振动方向和光波前进方向构成振动面。自然光的振动面在各个方向上均匀分布,但当其照射到物体上时会导致振动面发生变化,使其中在某一个方向的振动增强或减弱,这种光称为偏振光,包括线型偏振光、圆型偏振光和椭圆偏振光等(Wehner,1996)。在左旋和右旋圆偏振光、水平和垂直线偏振光的同样光强度刺激下,铜绿丽金龟均能产生趋光行为反应;但对非偏振光趋光反应率明显高于圆偏振

光和线偏振光,田间诱集试验也得到同样的结果(蒋月丽,2014)。对麦红吸浆虫 *Sitodiplosis mosellana* Gehin 趋光行为研究发现,其对线偏振光有较强的偏好性(蒋月丽等,2016)。

1.1.3 光照强度对昆虫趋光行为的影响 昆虫趋光行为受光照强度的影响较大,通常昆虫的趋光行为随着光强的增强而逐渐增强。室内比较研究发现,在不同光照强度的荧光灯刺激下,棉铃虫、斜纹夜蛾 *Prodenia litura* (Fabricius) 和鳃金龟 *Holotrichia lata* (Brenske) 的趋光率随光强增强而增高(杨洪璋等,2014)。在一定的光强范围内,谷蠹 *Rhizopertha dominica* (Fabricius) 的趋光率随光照强度的增强而增大(王争艳等,2016)。草地螟趋光反应率随单色光和白光光强度的增强而升高,但在光强较高的区域,趋光率升高更快,趋光率-光强反应曲线呈“J”型(江幸福等,2010)。在复合白光刺激下,二点委夜蛾 *Athetis lepigone* (Moschler) 雌雄成虫趋光率随光强度的增加而升高,但在相对光强较高时,其趋光率下降(杨心月,2015)。棉铃虫和茶尺蠖 *Ectropis oblique hypulina* Wehrli 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,但当光强继续增加到另一个值的时候,趋光率又会随着光强的增加缓慢,趋光率-光强反应曲线呈“S”型(魏国树等,2000;蔡侠,2014)。

1.1.4 性别对昆虫趋光行为的影响 昆虫的趋光行为存在性别间差异。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(程文杰等,2011)。室内趋光实验表明,大黑鳃金龟暗黑鳃金龟、梨小食心雌雄虫对绿色光趋性均表现出性别差异,即雌性强于雄性(鞠倩等,2010;于海利,2011)。玉米螟 *Pyrausta nubilalis* (Hubern) 对 365 nm 紫外光和 405 nm 紫光趋性存在性别差异,其雄性趋光率较雌性高(徐练,2016)。田间灯诱试验发现,甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* Hiibner 夜间扑灯存在明显的节律性和雄性偏好,在整个发生期,上灯雄虫量均高于雌虫,雌虫主要在上半夜扑灯,雄虫主要在下半夜扑灯;

而甜菜夜蛾的这种上灯性别偏好并不是由田间自然性比所引起(Cheng *et al.*, 2016)。

1.1.5 发育对昆虫趋光行为的影响 昆虫中,不同日龄成虫的趋光行为也不相同。比较棉铃虫 1、3、5、7 日龄蛾的趋光行为发现,3 日龄蛾的趋光率最高(张艳红等,2009)。不同日龄草地螟的反应光谱、光强反应曲线也不相同,初羽化 1 日龄成虫趋光反应较不明显,随着蛾龄的增加,成虫趋光反应率明显升高,10 日龄时雌蛾还具有明显的趋光行为(江幸福等,2010)。不同日龄梨小食心虫成虫对绿光趋性研究发现,1-5 日龄成虫中,以 3 日龄成虫趋性最强,趋光率达 60%,显著高于其他 4 个日龄的趋光率(于海利,2011)。谷蠹趋光随日龄变化先增强后逐渐减弱,10-15 日龄成虫的趋光性最强(王争艳等,2016)。对锈赤扁谷盗 *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens) 成虫、土耳其扁谷盗 *Cryptolestes turcicus* (Grouvelle) 和长角扁谷盗 *Cryptolestes pusillus* (Schonherr) 雌成虫趋光性研究表明,锈赤扁谷盗的趋光性随日龄的增加而增强,土耳其扁谷盗的趋光性随日龄的增加而下降,而长角扁谷盗的趋光性随着日龄的增加略为下降(郭健玲等,2016)。

1.1.6 环境因子对昆虫趋光行为的影响 环境因素如温度、湿度、降水、气压等,对于昆虫生存造成影响的同时,也影响昆虫的成虫趋光行为。对气候因子与诱虫灯诱虫效果之间关系的研究发现,温度、湿度和降水情况与诱虫量有显著的相关性,温度表现为明显的正相关,而湿度和降雨情况则呈现负相关(杨洪璋等,2011)。夜间降雨量和平均气温是影响白背飞虱 *Sogatella furcifera* (Horváth) 扑灯的主要因素,降雨大和气温低有利于白背飞虱扑灯;风速是影响褐飞虱扑灯的主要因素,当风速为 0.3-1.5 m/s,褐飞虱可逆风扑灯;风速为 1.5-3.08 m/s,褐飞虱可顺风扑灯;风速大于 3.08 m/s 时,褐飞虱扑灯行为受到抑制。而相对湿度对稻飞虱扑灯的影响不大(许浩,2012;杨海博,2014)。

1.1.7 昆虫趋光行为的节律性 昆虫的趋光行为存在明显的节律性。对烟田夜行性昆虫的上灯节律统计后发现,多数昆虫集中在灯亮后 0.5-1.5

h 内上灯, 东方蝼蛄 *Gryllotalpa orientalis* Burmeister 和烟夜蛾 *Heliothis assulta* (Guenee) 上灯高峰期为 20:00-23:00, 小地老虎 *Agrotis ypsilon* Rottemberg 为 21:00-23:00(许浩, 2012)。水稻田昆虫的上灯节律也存在节律, 稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee 上灯高峰为 20:00-21:00 和 1:00-3:00 两个, 黄翅大白蚁 *Macrotermes barneyi* (Light) 的上灯高峰为 19:00-21:00(杨菁菁等, 2012)。此外, 整理研究团队前期明确的 10 种主要农业害虫的上灯高峰: 褐飞虱 *Nilaparvata lugens* Stål 为 20:00-21:00、二化螟 *Chilo suppressalis* Walker 为 21:00-00:00、小菜蛾 *Plutella xylostella* 为 20:00-00:00、棉铃虫为 21:00-23:00、豆野螟为 22:00-20:00、甜菜夜蛾为 01:00-04:00、暗黑鳃金龟为 20:00-23:00、铜绿丽金龟为 20:00-00:00 玉米螟为 20:00-00:00、斜纹夜蛾为 23:00-03:00, 不同害虫的上灯节律存在明显差异(桑文等, 2018a)。

1.2 昆虫趋光的生理学研究

1.2.1 昆虫感光器官的生理研究

复眼和单眼是昆虫重要的感光器官。复眼既是昆虫视觉系统中感受外界信号的重要器官, 也是进化保守且结构复杂的器官, 它由一个个独立的小眼构成的, 每个小眼主要是由外向内包括角膜、晶锥、感杆束、色素细胞、基膜等结构。地球的自转产生白天和黑夜两种不同光环境, 昆虫复眼为适应此变化产生了相应的反应机制, 即白天活动时的明视型眼和夜晚活动时的暗视型眼, 这两种类型的复眼对光照强度的敏感性存在显著差异, 能在很大程度上决定昆虫的趋光行为, 尤其对光和颜色的区分(陈元光和钦俊德, 1963; 吴梅英等, 1994; 郭炳群和李世文, 1996; Friedrich, 2006; 冷雪等, 2009; 冷雪和那杰, 2009; 沈颖等, 2012)。

昆虫的单眼可以分为背单眼和侧单眼两类。全变态类昆虫的幼虫所具备的唯一的感光器是侧单眼, 类似于成虫复眼, 具有一定的视觉作用。背单眼是昆虫成虫复眼的辅助器官, 起到视觉“激发器”的作用, 其能通过保持神经系统的电活动提高复眼的感光能力, 光的敏感性也比复眼

要高好几倍(彩万志等, 2001; 雷朝亮和荣秀兰, 2003)。

1.2.2 昆虫趋光的神经基础

昆虫趋光的本质是接受光刺激所产生的神经调控行为, 然而对于昆虫趋光的神经回路研究依旧停留在较为初级的阶段。目前, 较多的研究是围绕果蝇和蜜蜂开展的。人们已经认识到果蝇所有的光受体细胞光感受器(R1-R6、R7p 或 R7y、R8p 和 R8y) 都参与果蝇的趋光行为调节, 他们在接受外界光环境刺激后, 将光信号传递到下游的神经细胞层中。目前对于下游神经细胞的鉴定相对较少, 仅限于相邻的神经细胞层(Yamaguchi *et al.*, 2010)。中国科学院的林立研究组发现, 果蝇幼虫的 BO 光受体接受光刺激信号后, 能将光信号转化为电信号传递到 Pdf 神经元, Pdf 神经元信号的下游神经元 NP394 能调节果蝇幼虫的正负趋光性, 其突变以后, 导致果蝇幼虫的避光行为会向趋光行为转变(Gong *et al.*, 2010), 该研究将昆虫趋光性调节的神经回路研究推到了更深的层次。

1.2.3 昆虫趋光过程中的生理应激

几乎所有的昆虫都含有紫外光感受器, 其对紫外光趋性也较为强烈。紫外光虽然作为一种信号能够调节和影响昆虫行为, 但过量的紫外光照射也能引起昆虫生理胁迫。紫外光刺激能诱导昆虫产生大量的活性氧, 进而破坏细胞膜的正常结构和功能, 修饰氨基酸残基, 造成肽链断裂和交联聚合, 引起蛋白质结构的改变。此外, 蛋白质与脂类的过氧化还能够与核酸反应, 引起 DNA 突变(Meng *et al.*, 2009)。棉铃虫受到紫外线刺激后体内抗氧化酶, 如超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶、谷胱甘肽-S-转移酶及谷胱甘肽还原酶的 mRNA 表达水平和酶活性均显著上升, 用来清除自由基的损伤(Meng *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2012)。此外, 多种热激蛋白基因 *Hsp22*、*Hsp23*、*Hsp26*、*Hsp27*、*Hsp40*、*Hsp68*、*Hsp70* 和 *Hsp83* 的表达也能被紫外光显著诱导(Wang *et al.*, 2014)。对负趋光性昆虫赤拟谷盗 *Tribolium castaneum* (Herbest) 进行类似研究表明, 热激蛋白被诱导表达的同时, 具有代谢内外源毒素功能的细胞色素 P450 基因 *CYP6BQ4* 和 *CYP6BQ8*

基因的表达被上调 (Sang *et al.*, 2012)。

虽然昆虫趋光过程中受到胁迫,但胁迫下的昆虫会产生生殖补偿效应。如利用紫外光每天刺激棉铃虫成虫 5 h 或 9 h,其寿命缩短的同时产卵量显著增加 (Zhang *et al.*, 2011)。对果蝇 *Drosophila melanogaster* Meigen 的研究也发现,高强度长时间紫外光刺激导致果蝇寿命缩短,但产卵量均高于没有受到刺激的果蝇 (郑俊丽, 2011)。这种补偿现象的产生,可能与趋光过程中昆虫体内的激素代谢受到紫外光影响有关 (张长禹, 2010; 桑文等, 2016; Sang *et al.*, 2016)。昆虫在胁迫条件下生殖与寿命存在平衡,两者的能量分配具有补偿效应,能量流动将会从寿命向生殖转移。因此,补偿效应可视为昆虫在趋光行为过程中遭受光胁迫的抗胁迫适应 (Holloway *et al.*, 1990; De Jong and van Noordwijk, 1992)。

1.3 昆虫趋光假说

1.3.1 早期昆虫趋光假说 在很长的一段时间里,人们对昆虫趋光的研究形成了三个主要的假说:“光定向假说”“生物天线假说”和“光干扰假说”。他们分别从不同的角度试图结束昆虫趋光的本质,但都存在一定不足 (靖湘峰和雷朝亮, 2004; 桑文等, 2016)。

“光定向假说”认为昆虫趋光是由于昆虫光罗盘定向的原因造成的。夜间活动的昆虫以一天体做参照,以身体纵轴垂直于天体与昆虫躯体的连线进行活动。但当夜间存在其它光源时,昆虫的飞行定位活动会被其它更强的光源干扰,导致昆虫以螺旋形轨迹飞向光源 (Michael, 1980)。这一假说的前提是昆虫在趋光过程中存在干扰光源。但这个假说无法解释一个基本现象,即在实验室中单一光源存在的条件下昆虫依然存在趋光行为。

“生物天线假说”认为昆虫趋光是与性信息素信号的交流密切相关。337 μm 和 311 μm 的远红光对斜纹夜蛾和美洲棉铃虫 *Heliothis zea* Boddie 有很强的吸引作用,是因为该波段的光谱模式与性信息素物质的类似,能被昆虫触角相应的受体识别 (Callahan, 1965)。该假说推测昆虫

趋光可能是一只信号欺骗,但实际上大量的研究表明昆虫趋光的光谱和信息素光谱相差甚远。

“光干扰假说”认为夜行性昆虫在适应暗区的环境后,再次进入灯周亮区时,刺眼的强光干扰了其正常行为,使昆虫无法找到亮度低的暗区,因而继续活动而导致扑灯 (Robinson, 1952; Verheijen, 1960)。

1.3.2 昆虫趋光的光胁迫假说 华中农业大学雷朝亮教授及其所领衔的研究团队在经过 30 多年昆虫趋光行为和机制研究的基础上,提出了一种具有普遍适用性的假说——光胁迫假说。该假说强调光对夜行性昆虫的胁迫效应,夜行性昆虫的趋光行为是一种被动胁迫行为。该假说认为昆虫的趋光行为均为光胁迫下的正常运动行为受到影响后的响应结果即光胁迫的结果,而非昆虫本身喜欢或讨厌光辐射而表现出的行为。趋光性昆虫白天不活动,夜间趋光可能是由于白天受其正常的生物节律调节,处于静息状态;夜间受到光 (尤其是紫外光) 刺激,产生应激反应,乙酰胆碱酯酶活性降低,乙酰胆碱滴度高出正常水平 (Meng *et al.*, 2010),导致其处于一种持续兴奋状态进而趋向光源运动。畏光性昆虫则可能由于在长期进化过程中适应了黑暗环境,导致体内丢失修复光照 (包括紫外光和可见光) 引发细胞损伤的系统,为最大程度的减少光损伤,产生了这种见光即避的习性 (桑文等, 2016)。“光胁迫的假说”的提出为昆虫趋光机制的研究指明了新的方向,是我国科研工作者在昆虫趋光行为研究领域做出的重要贡献。

2 灯光诱控技术的发展历程

我国害虫灯光诱控技术的发展经历简单粗放到精准安全多个阶段,整个发展历程与人们对昆虫趋光行为机制研究和认识的不断深入密不可分。

2.1 白炽灯诱虫

20 世纪 50 年代,由于受当时科学技术水平限制,人们对昆虫趋光现象的认识仅仅停留在昆虫对亮光的趋性。当时最容易获得的人造光源是

白炽灯,所以,最早白炽灯是我国建国初期重要的灯光诱虫设备。在一些地方,人人点灯、家家点灯杀虫,形成“万家灯火”宏大场面,掀起灯光防治害虫的群众运动高潮,对害虫的防治起到了积极的促进作用(武予清等,2009)。然而,实际上白炽灯光对害虫的诱集效果有限,仅能诱杀一部分害虫,所以杀虫效果并不十分理想(赵季秋,2012)。

2.2 黑光灯诱虫

随着科学技术的发展,20世纪60年代初期,人们认识到大部分的昆虫对紫外光有较强的趋性。科技人员研制出黑光灯诱杀害虫,诱杀效果明显好于白炽灯光,因而受到社会的广泛关注。1973年,据浙江等12个省、市、区的不完全统计,应用黑光灯约90万盏(陈宁生和罗敬业,1979)。黑光灯的主要波长为紫外波段,其穿透能力弱,光强衰减较快诱杀害虫能力有限,并且对昆虫的诱集没有选择性环境影响较大,因而多年来,“黑光灯”仅仅作为预测预报的一种手段在继续使用(赵季秋,2012)。

2.3 高压汞灯诱虫

继黑光灯后,高压汞灯开始被用于害虫灯光诱控,高压汞灯具有诱虫谱广、亮度大、穿透力强、幅射面大等优点,当时对玉米螟起到了良好的防治效果(韩延权等,1990)。虽然高压汞灯在性能上优于黑光灯,但是高压汞灯耗电量大、输入电压高、占地面积大、无法随意移动,安全隐患和高成本的投入在一定程度上限制了其发展。

2.4 频振式杀虫灯诱虫

进入20世纪90年代,随着人们对昆虫趋光行为认识的深入,发现越来越多的昆虫对特定波长的光源趋性存在差异。河南汤阴佳多科贸有限公司在总结了白炽灯、黑光灯、高压汞灯的不足和缺点的基础上,研制生产出频振式杀虫灯,使灯光诱杀害虫有了重大的发展和突破。该灯具采用了不同波长的光源,辅以颜色和气味诱集某些靶标害虫靠近灯具后靠高压电网击杀方式杀灭

害虫。自从1993年的田间试验获得国内植保学者的一致认可,已经在大田作物和蔬菜害虫的治理上得到广泛应用(唐济民,1995)。虽然频振式杀虫大大简化了诱虫灯安装的过程、降低诱虫灯的使用成本、提高有机效果,但高压电网依旧对人畜造成安全隐患,同时对天敌造成一定的杀伤作用。

2.5 LED灯诱虫

LED灯作为第四代新型光源出现,为害虫灯光诱控技术的发展注入了新的动力。LED灯波长范围窄、光色单一、亮度高、能耗低、寿命长,使之成为最佳的诱虫光源。波长单一的LED光源不仅能够解决传统光源光谱范围广,害虫针对性差等缺点,在同样能耗情况下它的光强还较其他光源更强,灯光的覆盖面积更大,控害范围更广,大大提高了靶标害虫的诱集率,降低了对天敌和中性昆虫的潜在伤害(Cohnstaedt *et al.*, 2008; Kim and Lee, 2012; 刘彦飞等, 2013; 边磊等, 2016)。

2.6 光陷阱诱虫

经过长达30年的系统研究,华中农业大学雷朝亮教授及其所领衔的研究团队首次设计出“光陷阱”害虫灯光诱捕器,该诱捕器彻底改变了传统的诱虫灯的杀虫理念,根据不同的昆虫对波长和光强的特异性,设计适用于不同农业生态系统害虫防治的专性诱捕器,去掉高压电网,将其改造为挡板和风吸式捕获口,有助于减少电网对个体较大天敌昆虫的杀伤。此外,没有杀伤的天敌能从增设的天敌昆虫逃生通道再次返回农田生态系统。通过明确特定害虫的上灯节律,精准控制诱捕时间,降低能耗和对非靶标害虫的诱杀风险。通过这些改变,光陷阱的研制克服了传统诱虫灯靶标昆虫诱杀专一性差、对环境负面影响大和兼容性不强等缺点(桑文等,2018a)。目前,湖南本业绿色防控科技股份有限公司光陷阱诱捕器正是集成了新一代诱虫灯的发展理念,成为害虫灯光诱控技术行业内的新标杆。对光陷阱诱捕器与频振式杀虫灯对稻田昆虫的诱捕效果及其对天敌影响的比较研究表明,光陷阱对稻田

主要害虫的诱捕量明显高于频振式杀虫灯,而且能保证益虫和中性昆虫的存活率在 70%以上(何超等, 2013)。

2.7 我国灯光诱控技术应用现状

随着我国的综合国力增强,人们的生活水平提高,粮食品质安全成为当今社会主流的话题。害虫灯光诱控技术无任何残留,不会对农产品、土地、水和大气等环境造成污染,也不会使害虫产生抗性,符合有机农产品和农业可持续发展的要求,因而,在我国的农业生产中所发挥的作用越来越凸显。近年来,以灯光诱控技术为核心的害虫综合防控技术在全国多个省市的水稻、棉花、柑橘、葡萄、苹果、梨蔬菜、玉米、茶叶、花生、甘蔗主产区大面积推广应用,且推广和使用面积正在逐年扩大。此外,该技术被广泛用于园林和卫生害虫的防治(张长禹等, 2015)。

3 灯光诱控技术存在的问题与展望

我国的害虫灯光诱控技术经过几十年的研究与实践,已经取得了许多重大的成就,得到了社会的广泛认同。然而,必须认识到害虫灯光诱控技术的理论和应用方面仍存在许多问题亟待解决。在理论研究方面,缺少有力的模型评估多因子在调节昆虫趋光行为中的作用,昆虫趋光的神经信号转导研究仍处在初级的阶段,“昆虫趋光的光胁迫假说”需要进一步的丰富和完善。在实际应用方面,诱虫灯市场的准入门槛太低、市场监管不足,新能源、新光源的利用较少,灯具的智能化程度低,灯具田间应用技术缺乏统一的规范和标准,缺乏准确的生态影响评价标准。这些问题的存在制约着灯光诱控技术的发展,也是科技工作者未来需要努力研究的方向。

我国农业害虫的防治正处在粗放型向集约型和精准型转变的关键时期,防治措施也由原来的单一化学防治向绿色防控转变,害虫灯光诱控技术未来将进入高速发展的快车道。

参考文献 (References)

Bian L, Chen ZM, Chen HC, Zhu XH, 2016. Evaluation of the effect

of new LED insecticidal lamp on the insects in tea garden. *China Tea*, 38(6): 22–23. [边磊, 陈宗懋, 陈华才, 朱旭华, 2016. 新型 LED 杀虫灯对茶园昆虫的诱杀效果评价. *中国茶叶*, 38(6): 22–23.]

Bian L, Sun XL, Ga 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. [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.]

Cai WZ, Pang XF, Hua BZ, Liang GW, Song DL, 2001. General Entomology. Beijing: China Agricultural University Press. 177. [彩万志, 庞雄飞, 花保祯, 梁广文, 宋敦伦, 2001. 普通昆虫学. 北京: 中国农业大学出版社. 177.]

Cai X, 2014. Study on the phototaxis of several tea pests. Master thesis. Hangzhou: China Jiliang University. [蔡侠, 2014. 几种茶树害虫的趋光性研究. 硕士学位论文. 杭州: 中国计量学院.]

Callahan PS, 1965. Intermediate and far infrared sensing of nocturnal insects. Part I. Evidences for a far infrared (FIR) electromagnetic theory of communication and sensing in moths and its relationship to the limiting biosphere of the corn earworm. *Annals of the Entomological Society of America*, 58(5): 727–745.

Castrejón F, Rojas JC, 2010. Behavioral responses of larvae and adults of *Estigmene acrea* (Lepidoptera: Arctiidae) to light of different wavelengths. *Florida Entomologist*, 93: 505–509.

Chen HX, Zhou JR, Chen XB, Gu GH, 1999. Studies on chemotactic response of cotton bollworm to different wavelength light sources. *Jiangxi Cottons*, (5): 16–18. [陈惠祥, 周建荣, 陈小波, 顾国华, 1999. 棉铃虫对不同波长光源趋光反应的研究. *江西棉花*, (5): 16–18.]

Chen NS, Luo JY, 1979. Comprehensive Pest Control in China. Beijing: Science Press. 1103–1221. [陈宁生, 罗敬业, 1979. 中国主要害虫综合防治. 北京: 科学出版社. 1103–1221.]

Chen XX, 2009. Study on the influence factor of phototaxis and feeding behavior of *Propylea japonica* (Thunberg). Master thesis. Baoding: Agricultural University of Hebei. [陈晓霞, 2009. 龟纹瓢虫成虫趋光性和取食行为的影响因素研究. 硕士学位论文. 保定: 河北农业大学.]

Chen YG, Qin JD, 1963. An electrophysiological study on the dark adaptation of the compound eye of the armyworm moth, *Leucania separata* Walker (Noctuidae: Lepidoptera). *Acta Entomologica Sinica*, 12(1): 1–9. [陈元光, 钦俊德, 1963. 粘虫 *Leucania separata* Walker 成虫复眼暗适应的电生理研究. *昆虫学报*, 12(1): 1–9.]

Cheng WJ, Zheng XL, Wang P, Lei CL, Wang XP, 2011. Sex difference of insect phototaxis and its influencing factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22(12): 3351–3357. [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.
- Cohnstaedt LW, Gillen JI, Munstermann LE, 2008. Light emitting diode technology improves insect trapping. *Journal of the American Mosquito Control Association*, 24(2): 331–334.
- Ding YQ, Gao WZ, Li DM, 1974. Study on the phototactic behaviour of nocturnal moths: the response of *Heliothis armigera* (Hubner) and *Heliothis assulta* Guenee to different monochromatic light. *Acta Entomologica Sinica*, 17(3): 307–317. [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.]
- De Jong G, van Noordwijk AJ, 1992. Acquisition and allocation of resources: Genetic (CO) variances, selection, and life histories. *The American Naturalist*, 139(4): 749–770.
- Dong S, Lu ZB, Li LL, Li WQ, Yu Y, Men XY, Yin SY, 2017. Behavior response of *Apolygus lucorum* Meyer-Dür adults to spectrum and light intensity. *Shandong Agricultural Sciences*, 49(9): 122–127. [董松, 卢增斌, 李丽莉, 李文强, 于毅, 门兴元, 尹淑艳, 2017. 绿盲蝽成虫对光谱和光照强度的行为反应. *山东农业科学*, 49(9): 122–127.]
- Friedrich M, Dong Y, Jackowska M, 2006. Insect interordinal relationships: Evidence from the visual system. *Arthropod Systematics and Phylogeny*, 64(2): 133–148.
- Fan F, 2012. The structural basis and behavior mechanism of phototaxis of *Frankliniella occidentalis-Orius sauteri* in view of the pest-enemy relationship. Master thesis. Baoding: Agricultural University of Hebei. [范凡, 2012. 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. 硕士学位论文. 保定: 河北农业大学.]
- Gong Z, Liu J, Guo C, Zhou Y, Teng Y, Liu L, 2010. Two pairs of neurons in the central brain control *Drosophila* innate light preference. *Science*, 330(6003): 499–502.
- Guo BQ, Li SW, 1996. Comparative study on the structure and characteristics of compound eyes of two sister species with different habitat: *Altica fragariae* and *A. ampelophaga*. *Acta Entomologica Sinica*, 39(3): 260–265. [郭炳群, 李世文, 1996. 栖息不同的两种跳甲复眼结构比较. *昆虫学报*, 39(3): 260–265.]
- Guo JL, Liang QX, Zeng L, Shen BB, Liang GW, 2016. Phototaxis behavior of three species of *Cryptolestes* to lights with different wavelengths. *Journal of South China Agricultural University*, 37(3): 90–94. [郭健玲, 梁桥新, 曾伶, 沈斌斌, 梁广文, 2016. 3种扁谷盗对不同波长光趋性研究. *华南农业大学学报*, 37(3): 90–94.]
- Han YQ, Li YH, Li H, 1990. Study on the effect of high pressure mercury lamp on corn borer. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, (3): 52–53. [韩延权, 李玉华, 李桓, 1990. 高压汞灯防治玉米螟的效果研究. *吉林农业科学*, (3): 52–53.]
- Hay D, Crossley S, 1977. The design of mazes to study *Drosophila* behavior. *Behavior Genetics*, 7(5): 389–402.
- He C, Fang BH, Zhang YZ, Qing XG, 2013. Comparison of pest-controlling effect in rice fields between fan-inhaling lamps and frequency trembler grid lamps. *Hybrid Rice*, 28(3): 58–63. [何超, 方宝华, 张玉烛, 青先国, 2013. 扇吸式诱虫灯与频振式杀虫灯对稻田防虫效果比较. *杂交水稻*, 28(3): 58–63.]
- Hou WW, Li MH, Guo BQ, 1997. An observation of response of *Helicoverpa armigera* (Huber) of different levels of illumination. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 34(1): 1–3. [侯无危, 李明辉, 郭炳群, 1997. 不同照度对棉铃虫蛾活动的影响. *应用昆虫学报*, 34(1): 1–3.]
- Holloway G, Sibly R, Povey S, 1990. Evolution in toxin-stressed environments. *Functional Ecology*, 4(3): 289–294.
- 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. [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, 2014. Sensitivity and behavioral response mechanism of *Anomala Corpulenta* Motschulsky to light signal. Doctoral dissertation. Yangling: Northwest A&F University. [蒋月丽, 2014. 铜绿丽金龟对光信号的感受和行为响应机制研究. 博士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学.]
- Jiang YL, Li T, Gong ZJ, Duan Y, Miao J, Wu YQ, 2016. Phototaxis of *Sitodiplosis mosellana* (Diptera: Cecidomyiidae) adults to linearly polarized light. *Acta Entomologica Sinica*, 59(7): 797–800. [蒋月丽, 李彤, 巩中军, 段云, 苗进, 武予清, 2016. 麦红吸浆虫成虫对线偏振光的趋性. *昆虫学报*, 59(7): 797–800.]
- Jing XF, Lei CL, 2004. Advances in research on phototaxis of insects and the mechanism. *Chinese Bulletin of Entomology*, 41(3): 198–203. [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. [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.]
- Kim MG, Lee HS, 2012. Attraction effects of LED trap to *Spodoptera exigua* adults in the greenhouse. *Journal of Applied Biological Chemistry*, 55(4): 273–275.
- Leng X, Na J, 2009. Structure and function of insect compound eyes. *Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition)*, 27(2): 241–244. [冷雪, 那杰, 2009. 昆虫复眼的结构和功能. *沈阳师范大学学报*, 27(2): 241–244.]
- Leng X, Xie L, Na J, 2009. The anatomical structure and physiological function of cricket visual system. *Chinese Bulletin*

- of *Entomology*, 46(5): 815–818. [冷雪, 谢璐, 那杰, 2009. 蟋蟀视觉系统的解剖结构与生理机能. *昆虫知识*, 46(5): 815–818.]
- Lei CL, Rong XL, 2003. General Entomology. Beijing: China Agricultural Press. 177. [雷朝亮, 荣秀兰, 2003. 普通昆虫学. 北京: 中国农业出版社. 177.]
- Li YF, Gao ZL, Dang ZH, Wang JQ, Yang JK, Pan WL, 2011. Determination of sensitive band ranges of *Apolygus lucorum* Meyer-Dür. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 15(5): 57–60. [李耀发, 高占林, 党志红, 王吉强, 杨继坤, 潘文亮, 2011. 绿盲蝽对不同波段光谱选择性的初步测定. *河北农业科学*, 15(5): 57–60.]
- Liu YF, Yu HL, Wu JX, 2013. Phototaxis of the oriental fruit moth, *Grapholita molesta* (Lepidoptera: Tortricidae) to LED lights and related affecting factors. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(3): 735–741. [刘彦飞, 于海利, 仵均祥, 2013. 梨小食心虫对 LED 光的趋性及影响因素的研究. *应用昆虫学报*, 50(3): 735–741.]
- Lu F, 2009. Study on microstructure of the compound eye and phototactic and colour behavior of *Maladera orientalis* Motsch (Coleoptera: Scarabaeidae). Master thesis. Baoding: Agricultural University of Hebei. [吕飞, 2012. 黑绒鳃金龟成虫复眼显微结构及其趋光、趋色行为学研究. 硕士学位论文. 保定: 河北农业大学.]
- Luo YW, 2018. Studies on phototaxis of Chinese Wolfberry Aphid (*Aphis gossypii*). Doctoral dissertation. Lanzhou: Lanzhou University. [罗一玮, 2018. 枸杞棉蚜趋光特性研究. 博士学位论文. 兰州: 兰州大学.]
- Meng JY, Zhang CY, Zhu F, 2010. A proteomic analysis of *Helicoverpa armigera* adults after exposure to UV light irradiation. *Journal of Insect Physiology*, 56(4): 405–411.
- 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.
- Michael DA, 1980. Introduction to Insect Behavior. New York: Macmillan Publishing Co. Inc. 31–33.
- Robinson HS, 1952. On the behaviour of night-flying insects in the neighbourhood of a bright source of light. *Proceedings of the Royal Entomological Society of London Series A, General Entomology*, 27(1/3): 13–21.
- Sang W, Yu L, He L, Ma WH, Zhu ZH, Zhu F, Wang XP, Lei CL, 2016. UVB radiation delays *Tribolium castaneum* metamorphosis by influencing ecdysteroid metabolism. *PLoS ONE*, 11(3): e0151831.
- 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, Cai FY, Wang XP, Zhang S, Huang QY, Zhu F, Guo SH, Lei CL, 2018a. Application status and prospects of insect trapping lamp in fields. *China Plant Protection*, 38(10): 26–30, 68. [桑文, 蔡夫业, 王小平, 张舒, 黄求应, 朱芬, 郭墅濠, 雷朝亮, 2018a. 农用诱虫灯田间应用现状与展望. *中国植保导刊*, 38(10): 26–30, 68.]
- Sang W, Liu YM, Qiu BL, 2018b. Advances in the eco-friendly management of *Diaphorina citri*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(4): 557–564. [桑文, 刘燕梅, 邱宝利, 2018b. 柑橘木虱绿色防控技术研究进展. *应用昆虫学报*, 55(4): 557–564.]
- 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): 915–920. [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): 915–920.]
- Shen Y, Wei JQ, Mo JC, Wang DZ, Zhang LL, 2012. Advance on study of insect phototactic behavior. *Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Sciences Edition)*, 40(5): 19–23. [沈颖, 尉吉乾, 莫建初, 王道泽, 张莉丽, 2012. 昆虫趋光行为研究进展. *河南科技学院学报(自然科学版)*, 40(5): 19–23.]
- Tang JM, Zhao SY, Yu ZW, 1995. Discussion on the large area application of multi-frequency vibration insecticidal lamp to kill cotton bollworm and other pests. *China Cotton*, (3): 40. [唐济民, 赵树英, 于志文, 1995. 佳多频振式杀虫灯诱杀棉铃虫等害虫大面积应用探讨. *中国棉花*, (3): 40.]
- Verheijen FJ, 1960. The mechanisms of the trapping effect of artificial light sources upon animals. *Archives Néerlandaises de Zoologie*, 13(1): 1–107.
- 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 Y, Wang L, Zhu Z, Ma W, Lei C, 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 ZY, Miao SY, Lu YJ, Sun L, 2016. Phototaxis behavior of *Rhyzopertha dominica* (Fabricius). *Plant Protection*, 42(5): 75–79. [王争艳, 苗世远, 鲁玉杰, 孙雷, 2016. 谷蠹的趋光行为及部分影响因素研究. *植物保护*, 42(5): 75–79.]
- Warrant E, Nilsson DE, 2006. Invertebrate Vision. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 494–525.
- Wehner R, 1996. Polarisation muster analyse bei Insekten. *Nova Acta Leopoldina*, 294: 159–183.
- Wei GS, Zhang QW, Zhou MZ, Wu WG, 2000. Studies on the phototaxis of *Helicoverpa Armigera* (H bner). *Acta Biophysica Sinica*, 16(1): 89–95. [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*)成虫的趋

- 为反应. *生物物理学报*, 16(1): 89–95.]
- Wei W, 2009. Study on microstructure of the compound eye and phototactic behavior of *Chrysoperla sinica* Tjeder and *Chrysopa formosa* Brauer (Neuroptera: Chrysopidae). Master thesis. Baoding: Agricultural University of Hebei. [魏玮, 2009. 两种草蛉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.]
- Wu CJ, 2011. Study on microstructure of the compound eye and phototactic behavior of *Harmonia axyridis* Pallas. Master thesis. Baoding: Agricultural University of Hebei. [吴春娟, 2011. 异色瓢虫 *Harmonia axyridis* Pallas 成虫复眼的显微结构及趋光行为的研究. 硕士学位论文. 保定: 河北农业大学.]
- Wu HY, Wu WG, Xu ZM, Zhang W, 1994. Optical and waveguide properties of multivision receptors. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 11(2): 62–66. [吴梅英, 吴卫国, 徐智敏, 张炜, 1994. 复眼光感受器的光导与波导特性. *量子电子学*, 11(2): 62–66.]
- Wu YQ, Duan Y, Jiang YL, 2009. Reviews on lighting for insect-pests control. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 38(9): 127–130. [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.]
- Xu L, 2016. Research on the phototaxis of *Harmonia axyridis* *Ostrinia furnacalis* and *Bemisia tabaci*. Master thesis. Changsha: Hunan Agricultural University. [徐练, 2016. 异色瓢虫、玉米螟和烟粉虱的趋光性研究. 硕士学位论文. 长沙: 湖南农业大学.]
- Xu H, 2012. Insect identification and effect of some factors to attracting insects on solar light trap in tobacco field. Master thesis. Changsha: Hunan Agricultural University. [许浩, 2012. 烟田太阳能诱虫灯下昆虫鉴定及若干因素对其诱虫效果的影响研究. 硕士学位论文. 长沙: 湖南农业大学.]
- Yamaguchi S, Desplan C, Heisenberg M, 2010. Contribution of photoreceptor subtypes to spectral wavelength preference in *Drosophila*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(12): 5634–5639.
- Yang HB, 2014. Study on light-trapped behavior of *Sogatella furcifera* (Horvath) and *Nilaparvata lugens* (Stal). Doctoral dissertation. Nanjing: Nanjing Agricultural University. [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, Yang L, Gong BY, Yang YP, 2011. Relationship between effects of killing pests solar energy lamp and meteorological factors. Annual Academic Meeting of the Insect Society of Central China. Xinxiang. 45–55. [杨洪璋, 文礼章, 杨柳, 龚碧涯, 杨跃平, 2011. 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. 华中三省(湖北、湖南、河南)昆虫学会 2011 年学术年会. 新乡. 45–55.]
- 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. [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 JJ, Liang CW, Shen BB, Zhang QL, Tian CX, Huang YQ, Li XR, 2012. Study on rhythm of insect flapping lamp. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 40(1): 210–212. [杨菁菁, 梁朝巍, 沈斌斌, 张其伦, 田楚鑫, 黄煜权, 李昕然, 2012. 昆虫扑灯节律研究. *安徽农业科学*, 40(1): 210–212.]
- Yang XY, 2015. Study on microstructure of the compound eye and phototactic behavior of *Athetis lepigone*. Master thesis. Baoding: Agricultural University of Hebei. [杨心月, 2015. 二点委夜蛾成虫复眼显微结构及其趋光行为研究. 硕士学位论文. 保定: 河北农业大学.]
- Yu HL, 2011. The phototaxis of *Grapholita molesta* Busck and the effect of green light on its biological characteristics. Master thesis. Yangling: Northwest A&F University. [于海利, 2011. 梨小食心虫 *Grapholita molesta* Busck 的趋光性及绿光对其生物学特性的影响. 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学.]
- Zhang C, Meng J, Wang X, Zhu F, Lei C, 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 CY, 2010. Study on the reproductive compensation of *Helicoverpa armigera* under UV stress and cloning and expression of HSPS genes. Doctoral dissertation. Wuhan: Huazhong Agricultural University. [张长禹, 2010. UV 胁迫下棉铃虫生殖补偿研究及 Hsps 基因的克隆与表达. 博士学位论文. 武汉: 华中农业大学.]
- Zhang CY, Wang XP, Lei CL, 2015. Research progress and development trend of light trapping technology in China. *Green Prevention and Control of Pests and Diseases and Quality Safety of Agricultural Products*. Changchun. 277–282. [张长禹, 王小平, 雷朝亮, 2015. 灯光诱杀技术在我国的研究进展与发展趋势. 病虫害绿色防控与农产品质量安全——中国植物保护学会 2015 年学术年会. 长春. 277–282.]
- Zhang YH, Liu XX, Zhang QW, Wei GS, 2009. Effects of different light source on phototaxis rate of cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Hübner). *Journal of Agricultural University of Hebei*, 32(5): 69–72. [张艳红, 刘小侠, 张青文, 魏国树, 2009. 不同光源对棉铃虫蛾趋光率的影响. *河北农业大学学报*, 32(5): 69–72.]
- Zhao JQ, 2012. Development and application of the technology of light trapping and killing pests. *Liaoning Agricultural Sciences*, (1): 67–68. [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.]
- Zheng JL, 2011. Effect of UVA radiation on biological fitness and antioxidant response of fruit fly, *Drosophila melanogaster*. Master thesis. Wuhan: Huazhong Agricultural University. [郑俊丽, 2011. UVA 照射对黑腹果蝇生物学特性和抗氧化反应的影响. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学.]