

田间不同波长诱虫灯对草地贪夜蛾和亚洲玉米螟的诱集效果研究*

雷春媚^{1,3**} 张俊杰¹ 张天涛² 周小毛³ 肖勇^{3***} 李振宇^{3***}

(1. 吉林农业大学生物防治研究所生物防治技术工程研究中心, 长春 130118; 2. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193; 3. 广东省农业科学院植物保护研究所, 广东省植物保护新技术重点实验室, 广州 510640)

摘要 【目的】研究不同波长 LED 灯对草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 和亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 的诱集效果, 为合理高效利用 LED 诱虫灯提供理论依据。【方法】本研究设置 6 种不同单一波长的 LED 灯, 研究其对玉米田草地贪夜蛾和亚洲玉米螟的诱集效果, 以波长范围在 320-420 nm 的太阳能 LED 诱虫灯作为对照, 筛选出诱集效果较好的波长, 并进一步进行两两组合形成不同复合波长的 LED 灯, 测试其对草地贪夜蛾和亚洲玉米螟的诱集效果。【结果】单一波长 LED 诱虫灯中, 波长 365 nm 对草地贪夜蛾和亚洲玉米螟的诱集效果均为最好, 诱虫量显著高于对照 ($P < 0.05$), 其次为波长 345、355 和 350 nm 的 LED 灯。复合波长 LED 诱虫灯中, 波长 365 nm+350 nm 对草地贪夜蛾和亚洲玉米螟的诱集效果最好, 其次为波长 365 nm+355 nm、355 nm+350 nm 和 345 nm+355 nm 的 LED 灯。进一步比较单一波长和复合波长诱虫灯的诱虫效果发现, 波长 365 nm +350 nm 的复合波长诱虫灯对草地贪夜蛾和亚洲玉米螟诱集效果显著强于其他单一波长和复合波长的诱虫灯 ($P < 0.05$)。【结论】复合波长 365 nm +350 nm 的 LED 诱虫灯对草地贪夜蛾和亚洲玉米螟的诱集效果最佳, 这为开发高效环保诱虫灯用于害虫绿色防控奠定基础。

关键词 草地贪夜蛾; 亚洲玉米螟; 趋光性; LED 诱虫灯; 绿色防控

Relative effectiveness of different wavelength trap lamps for *Spodoptera frugiperda* and *Ostrinia furnacalis*

LEI Chun-Mei^{1,3**} ZHANG Jun-Jie¹ ZHANG Tian-Tao² ZHOU Xiao-Mao³
XIAO Yong^{3***} LI Zhen-Yu^{3***}

(1. Biological Control Technology Engineering Research Center, Institute of Biological Control, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 2. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Plant Protection New Technology, Plant Protection Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract 【Objectives】To investigate the relative effectiveness of different wavelength LED lights to trap *Spodoptera frugiperda* and *Ostrinia furnacalis*, and thereby provide a theoretical basis rationalize and optimize the use of LED insect traps. 【Methods】The relative effectiveness of six different single wavelength LED lamps, both individually and combined in pairs, were tested with respect to trapping *S. frugiperda* and *O. furnacalis*. Solar-powered LED insect traps with wavelengths in the range of 320-420 nm were used as the control. 【Results】The relative effectiveness of the single-wavelengths was 365>345>355>350 nm. Only the 365 nm lights caught significantly more of the targeted pest species than the control ($P < 0.05$). The relative effectiveness of the combined wavelength traps was 365 nm+350 nm > 365 nm+355 nm > 355 nm+350 nm > 345

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划 (2021YFD1400700, 2019YFD0300104); 广东省重点领域研发计划 (2020B020224002); 科技创新战略专项资金 (高水平农科院建设); 2020 广东省农业科学院青年导师制项目 (R2020QD-022)

**第一作者 First author, E-mail: 2515988816@qq.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: xiaoyong@gdaas.cn; lizhenyu@gdaas.cn

收稿日期 Received: 2022-03-14; 接受日期 Accepted: 2022-10-29

nm+355 nm. Only the 365 nm+350 nm lights caught significantly more of the targeted pests than the control. Further comparison of the effectiveness of single and compound wavelengths indicates that the wavelengths of 365 nm + 350 nm caught significantly more *S. frugiperda* and *O. furnacalis* than all other single, or combined, wavelength traps ($P<0.05$).

[Conclusion] LED insect trap lamps with wavelengths of 365 nm + 350 nm were the best for trapping *S. frugiperda* and *O. furnacalis*. These results lay a foundation for developing efficient and environmentally friendly LED insect traps.

Key words *Spodoptera frugiperda*; *Ostrinia furnacalis*; phototaxis; LED insect-trapping lamp; green prevention

昆虫的视觉系统能够感知外界的光刺激,在昆虫觅食、交流、求偶和躲避天敌等方面发挥着重要作用 (Goldsmith and Bernard, 1974)。昆虫可以对光源作出行为反应,其中包括对光源的正向光吸引行为和远离光源的负向光驱离行为 (Briscoe and Chittka, 2001)。基于昆虫趋光行为的灯诱技术已广泛应用于农业害虫 (如夜蛾、象甲、金龟子等) 的预测预报、监测预警系统的建立,甚至生态友好防治策略的制定 (边磊等, 2012; Shimoda and Honda, 2013; 桑文等, 2019)。

不同类型的昆虫在田间条件下对不同波长的光具有不同的偏好。对草地螟 *Loxostege sticticatis* 的趋光行为研究表明,在波长范围 340-605 nm 的不同单色光中,草地螟成虫对波长为 360 nm 和 400 nm 的紫外光趋性最强 (江幸福等, 2010)。鞘翅目的天敌昆虫龟纹瓢虫 *Propylaea japonica* 对波长为 340 nm 的紫外光趋性最强 (陈晓霞, 2009)。对梨小食心虫 *Grapholitha molesta* 的研究发现,梨小食心虫对波长为 465 nm 的蓝光、520 nm 的绿光、590 nm 的黄光和 624 nm 的红光均具有一定趋向性,但对绿光的趋性最强 (于海利, 2011)。绿盲蝽 *Apolygus lucorum* 对 400 nm 的紫光 and 450 nm 的蓝光趋性最强 (李耀发等, 2011)。进一步研究发现,2 种或多种波长单色光混合后会形成复合光,复合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波长的光源 (张艳红等, 2009)。利用这种特定波长吸引单一昆虫的 LED 诱虫技术,具有绿色环保、高效和对天敌友好等特点。近年来,这种新一代的 LED 技术通过使用更少的能源、产生窄光谱的光和先进的捕虫器,大大提高了诱虫效率 (Park *et al.*, 2015; 徐翔等, 2017; 桑文等, 2019)。

玉米 *Zea mays* L. 是我国第一大粮食作物,在我国种植面积广泛。近年来随着播种面积的扩大和耕作制度的变革,玉米害虫为害呈加重趋势,对玉米产量和品质产生严重影响。目前,危害我国玉米的两大主要害虫分别是草地贪夜蛾和玉米螟。草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 俗称秋粘虫,属于鳞翅目夜蛾科,原产于美洲的热带及亚热带地区 (吴孔明, 2020),于 2019 年迁入我国云南省,目前已扩散至我国多个省 (直辖市、自治区) (姜玉英等, 2019)。草地贪夜蛾因其迁飞速度快,繁殖能力极强,取食量大,对我国的玉米安全生产造成了严重的威胁 (Early *et al.*, 2018; 郭井菲等, 2019); 玉米螟又名玉米钻心虫,目前我国危害比较大的主要是亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis*,属于鳞翅目螟蛾科,分布较为广泛,主要危害玉米等禾本科作物。亚洲玉米螟因其具有食性杂、危害大等特点 (王振营等, 2000),在农业上已成为重点防控的害虫之一。

目前,对于草地贪夜蛾和亚洲玉米螟这两大玉米害虫的防控措施主要有化学防治、农业防治、生物防治及物理防治等 (黎秩群等, 2021)。在物理防治措施中,利用诱虫灯防治害虫已在农业上得到较为广泛的应用,研究人员初步筛选出针对草地贪夜蛾的单一波长诱虫灯 (340 nm 和 368 nm) (陈昊楠等, 2020; 闫三强等, 2021),早在 20 世纪诱虫灯就已经用于亚洲玉米螟的防治工作,1 690 台诱虫灯可以有效控制玉米面积 3.28 万 hm^2 (王蕴生等, 1990)。本文就物理防治灯光诱杀技术展开研究,该技术的操作简便,成本低廉,对人畜安全且对环境友好,但是目前大多数诱虫灯的选择性差,且诱虫效果不一。因此,如何提高诱杀效率和专一性仍有待解决 (杨现明等, 2020)。本试验选择草地贪夜蛾和亚洲玉米螟为研究对象,在田间评估了不同波长 LED

诱虫灯对玉米田草地贪夜蛾和亚洲玉米螟的吸引效果。以期诱虫灯技术在玉米主要害虫草地贪夜蛾和玉米螟预测预报和绿色防控中的应用提供实验依据。

1 材料与方法

1.1 诱虫灯波长设置

本试验选用单一波长诱虫灯的波长为 345、350、355、360、365 和 420 nm, 同时还设置波长为 365 和 345 nm、365 和 350 nm、365 和 355 nm、345 和 350 nm、345 和 355 nm、350 和 355 nm 的 6 种复合波长诱虫灯, 以波长范围在 320-420 nm 的太阳能 LED 诱虫灯作为对照, 本实验所使用各诱虫灯除灯管波长不同其余组件均相同, 功率均为 6 W, 光强度为 (6.15 ± 0.42) lx。诱虫灯由北京黄将军科技有限公司生产。

1.2 试验方法

2020 年 8 月 10 日, 在广东省农业科学院钟落潭试验基地玉米田进行试验 (图 1: A), 按照说明书安装并使用诱虫灯, 诱虫灯放置间距约 50 m, 灯距地面约 1.2 m, 不同波长诱虫灯随机

排列, 保证互不干扰 (图 1: B)。2020 年 8 月至 2020 年 12 月, 每天 19:00 和次日 6:00 诱虫灯会自动打开和关闭, 且每一盏诱虫灯开关时间一致。在灯下放置接虫袋, 每隔 7 d 统计一次草地贪夜蛾和亚洲玉米螟的数量。

1.3 数据处理与分析

每隔 7 d 收集接虫袋里诱集的昆虫, 并统计草地贪夜蛾和玉米螟的数量。数据采用 Excel 2016 进行统计整理, 应用 SPSS 25.0 对数据进行单因素方差分析, 并应用 GraphPad Prism 8.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 单一波长诱虫灯对草地贪夜蛾和玉米螟的诱集作用

6 种不同单一波长的诱虫灯对草地贪夜蛾均有一定的诱集作用 (图 2: A), 波长为 365 nm 的诱虫灯对草地贪夜蛾的诱集作用最强, 7 d 平均诱集量为 26.33 头; 其次为 345、355 和 350 nm 波长的, 7 d 平均诱集量分别为 14.33、14.00 和 12.33 头; 360 和 420 nm 的波长诱集效果最差,

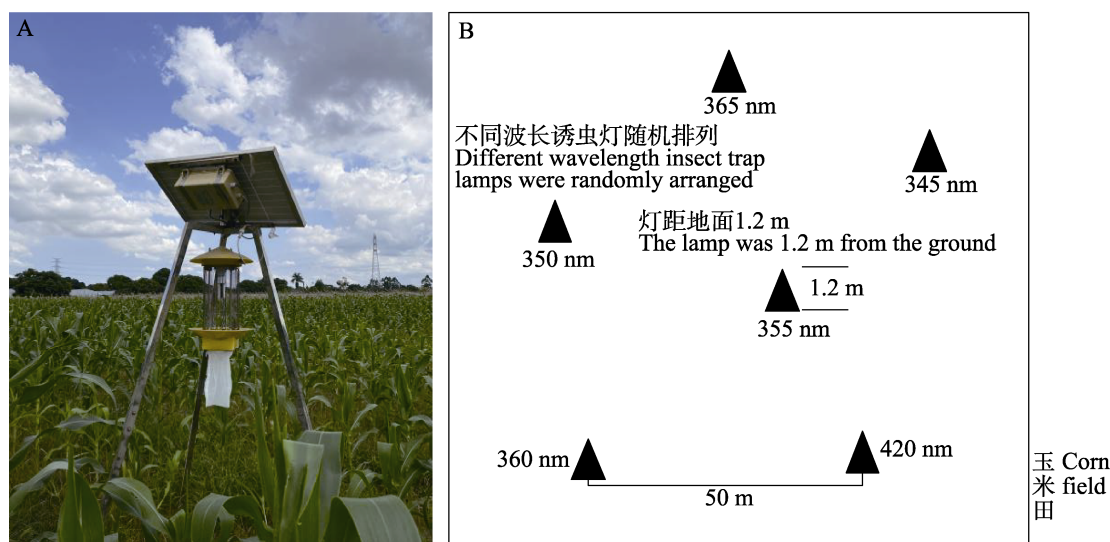


图 1 不同波长诱虫灯在田间对草地贪夜蛾和亚洲玉米螟的诱集效果试验
Fig. 1 Experiment on trapping effect of different wavelength trap lamps *Spodoptera frugiperda* and *Ostrinia furnacalis*

A. 田间诱虫灯实景图; B. 试验布置草图。

A. Real view of insect trap lamp in the field; B. Layout sketch of the test.

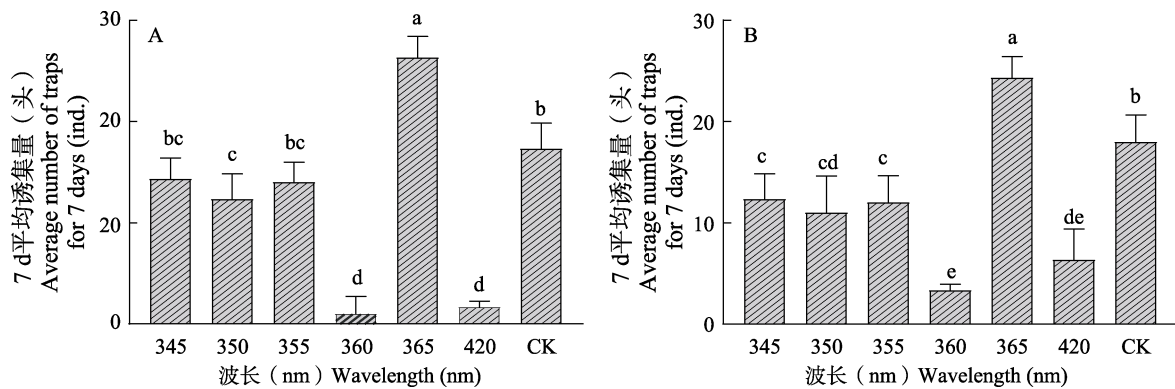


图 2 不同单一波长诱虫灯对草地贪夜蛾 (A) 和玉米螟 (B) 的诱集效果

Fig. 2 Trapping effect of single wavelength trap lamps on *Spodoptera frugiperda* (A) and *Ostrinia furnacalis* (B)

柱上标有不同小写字母表示不同处理之间经单因素方差分析 Duncan 氏检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。下图同。

Different small letters above the bars mean significant differences among treatments ($P < 0.05$, Duncan's test). The same below.

7 d 平均诱集量分别为 1.00 头和 1.66 头。对照组普通诱虫灯 7 d 平均诱集量为 17.33 头, 其诱集效果低于 365 nm 的诱虫灯而高于其余各组不同波长诱虫灯。由单因素方差分析得出, 不同波长诱虫灯对草地贪夜蛾的诱集作用存在显著性差异 ($df=6$, $F=57.376$, $P < 0.0001$), 诱集效果最好的 365 nm 与其他波长之间均存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

不同单一波长诱虫灯对亚洲玉米螟均有一定的诱集作用 (图 2: B), 且各组诱集作用差异极显著 ($df=6$, $F=21.803$, $P < 0.0001$), 对玉米螟的诱集效果最好的为 365 nm, 7 d 平均诱集量达到 24.33 头, 其次为 345、355 和 350 nm, 7 d 平均诱集量分别为 12.33、12.00 和 11.00 头, 而 360 nm 和 420 nm 对玉米螟的诱集效果最差, 7 d 平均诱集量仅有 3.33 头和 6.33 头。对照组 7 d 平均诱集量为 18.00 头, 其效果低于 365 nm。平均诱集量最高的 365 nm 与其他各组及对照组之间存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.2 复合波长对草地贪夜蛾和玉米螟的诱集作用

根据单一波长实验数据分析, 我们选择诱集效果最好的 4 种波长 345、350、355 和 365 nm, 两两组合制成复合波长 LED 灯并研究其诱虫效果。结果显示, 不同的复合波长诱虫灯对草地贪夜蛾均有一定的诱集作用 (图 3: A), 其中复合波长为 365 nm+350 nm 的诱虫灯对草地贪夜

蛾的诱集作用最好, 7 d 平均诱集量为 51.33 头, 其次为 350 nm+355 nm、355 nm+365 nm 和 345 nm+355 nm, 7 d 平均诱集量分别为 27.66、25.00 和 18.33 头, 而 365 nm+345 nm 与 345 nm+350 nm 的诱集效果最差, 7 d 平均诱集量分别只有 8.00 和 10.66 头。对照组 7 d 平均诱集量为 34.00 头, 其诱集效果仅次于效果最好的 365 nm+350 nm。由单因素方差分析得出, 不同的复合波长对草地贪夜蛾的诱集作用存在显著性差异 ($df=6$, $F=12.216$, $P < 0.0001$), 其中诱集效果最好的 365 nm+350 nm 与其他各组及对照组之间差异显著 ($P < 0.05$)。

不同复合波长的诱虫灯对亚洲玉米螟均有一定的诱集作用 (图 3: B), 其中复合波长为 365 nm+350 nm 的诱虫灯对玉米螟的诱集效果最好, 7 d 平均诱集量为 71.66 头, 其次为 345 nm+355 nm、350 nm+355 nm、355 nm+365 nm 和 345 nm+350 nm, 7 d 平均诱集量分别为 48.33、33.33、31.33 和 21.00 头, 365 nm+345 nm 的诱集效果最差, 7 d 平均诱集量仅有 0.33 头。对照组 7 d 平均诱集量为 63.33 头, 其效果仅次于诱集效果最好的 365 nm+350 nm。由单因素方差分析得出, 不同的复合波长对亚洲玉米螟的诱集作用存在显著性差异 ($df=6$, $F=30.453$, $P < 0.0001$), 其中诱集效果最好的 365 nm+350 nm 与其他各组复合波长之间差异显著 ($P < 0.05$), 而与对照组之间无显著性差异 ($P > 0.05$)。

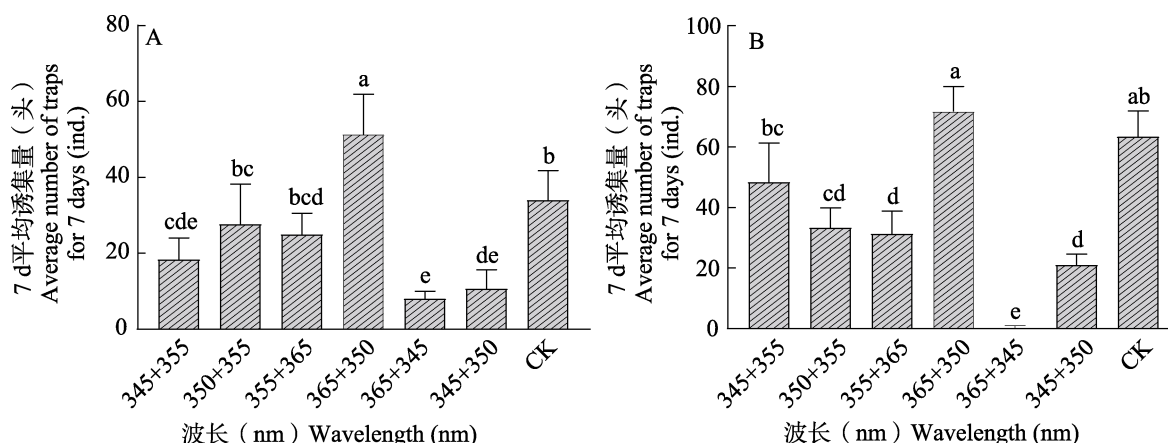


图 3 不同复合波长诱虫灯对草地贪夜蛾 (A) 和玉米螟 (B) 的诱集效果

Fig. 3 Trapping effect of different compound wavelength trap lamps on *Spodoptera frugiperda* (A) and *Ostrinia furnacalis* (B)

2.3 单一波长与复合波长的诱集效果比较

分析比较单一波长和复合波长诱虫灯对草地贪夜蛾和玉米螟的诱集效果, 结果显示, 365 nm+350 nm 的复合波长诱虫灯对草地贪夜蛾的诱集效果最好 (图 4: A), 7 d 平均诱集量为 51.50 头, 其后依次是 355 nm+365 nm、365 nm、350 nm+355 nm、350 nm、345 nm+355 nm、345 nm 和 355 nm, 7 d 平均诱集量分别为 33.50、22.00、20.50、17.50、9.00、8.50 和 8.50 头。其中, 365+350 nm 和 355+365 nm 的复合波长诱虫灯的诱集效果均显著强于单一波长诱虫灯中效果最好的 365 nm 诱虫灯 (7 d 平均诱集量为 22.00 头) ($P<0.05$)。

365 nm + 350 nm 的复合波长诱虫灯对玉米螟的诱集效果亦是最好 (图 4: B), 7 d 平均诱集量为 17.50 头, 其后依次为 355 nm + 365 nm、350 nm + 355 nm、365 nm、355 nm、345 nm + 355 nm、355 nm 和 345 nm, 7 d 平均诱集量分别为 14.00、13.50、12.50、11.00、10.50、10.50 和 6.50 头。其中, 365 nm+350 nm 的复合波长诱虫灯的诱集效果显著强于单一波长诱虫灯中效果最好的 365 nm 诱虫灯 (7 d 平均诱集量为 12.50 头) ($P<0.05$)。

3 结论与讨论

不同昆虫对不同波长光的趋光性具有不同

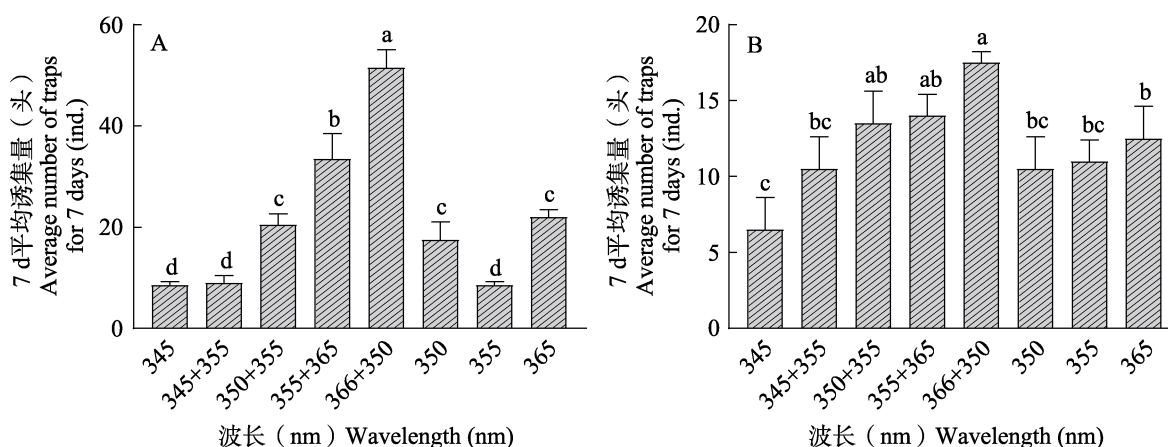


图 4 单一波长与复合波长的诱集效果比较

Fig. 4 Comparison of trapping effect between single wavelength and multiple wavelength

A. 草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*; B. 玉米螟 *Ostrinia furnacalis*.

的偏好性,研究主要集中在鳞翅目昆虫。例如,夜蛾、毒蛾和灯蛾对 340-370 nm 紫外光区的光的趋向反应明显强于可见光区的光(郭虹等, 2012)。海榄雌瘤斑螟 *Acrobasis* sp. 和毛颚小卷蛾 *Ricania speculum* 两种鳞翅目昆虫较为敏感的波长也集中在紫外波段,其中,海榄雌瘤斑螟的最敏感波长为 368 nm (Y) (产生偏黄光线),毛颚小卷蛾的最敏感波长为 340 nm (王林聪等, 2016)。对红松球果尺蛾 *Eupithecia abietaria* 的田间诱集试验证明,波长为 380 nm 诱虫灯诱集效果最好,可用于球果小花尺蛾的监测及防治(周春艳等, 2019)。波长 340 nm、功率 8 W 的诱虫灯对蜀柏毒蛾成虫 *Parocneria orientalis* 诱集效果最好(周建华等, 2013)。在对菜地昆虫的研究中,发现不同波长的诱虫灯对害虫的诱集效果不同,其中波长为 440-445 nm 的蓝光灯对莲藕潜叶摇蚊 *Stenochironomus nelumbus*、甜菜白带野螟 *Hymenia recurvalis* 和缅甸蓝叶蚤 *Altica birmanensis* 等菜地昆虫的诱集数量最多(吴霜等, 2021)。本研究筛选出的波长为 365 nm 紫外波段光源的诱虫灯对玉米田草地贪夜蛾和亚洲玉米螟的诱杀作用最强,同时也可有效降低对天敌昆虫的误伤概率。因为多数天敌昆虫趋光行为的敏感波长多集中在蓝光(400-470 nm)和绿光(505-575 nm),少量位于紫外光(350-390 nm)(张锦芳等, 2020)。

昆虫的趋光性主要是由于昆虫的复眼含有感光受体,夜行性昆虫的视觉性基因主要有紫外敏感基因、蓝光敏感基因和长波敏感基因 3 种类型,昆虫种类不同其视觉基因数量不同,从而不同昆虫对不同波长的趋光行为有一定的差异(闫硕等, 2017; Nouvian and Galizia, 2020)。前人(陈昊楠等, 2020; 闫三强等, 2021)的研究认为 340 和 368 nm 波长对草地贪夜蛾的诱集效果最好,进一步田间试验发现 368 nm 波长灯光对草地贪夜蛾的田间诱杀效果显著高于其他波长,这与本文得出的结论基本一致,也间接证明了草地贪夜蛾视觉系统可能存在紫外敏感基因。刘思敏(2022)在室内研究草地贪夜蛾成虫对不同波长光源(360-550 nm)的趋性的试验中,发

现 3 日龄雌成虫对 510、520 和 550 nm 的绿光趋性较强,3 日龄雄成虫对 420 nm 的紫光和 520 nm 的绿光趋性较强,而本文研究结果为 365 nm 的单一波长对草地贪夜蛾的诱集效果最好,造成这种差异的原因可能是昆虫对不同波长的趋光性选择不仅受环境因子的影响,还与性别和日龄等自身的生理状态有关。

前期室内行为研究发现,亚洲玉米螟在室内表现出对紫光区和蓝光区波长强烈的趋光反应(杨桂华和王蕴生, 1995; 徐练, 2016),在田间玉米螟最敏感的波长为蓝光区 480 nm 和紫外光区 400 nm 和 368 nm(闫三强等, 2021)。本研究设计主要针对紫外波段的光进行分析,其研究结果与他人研究结果存在一定的差异,例如有研究结果显示从波长 368 nm 到 445 nm 的诱虫灯对亚洲玉米螟的诱集量逐渐增加(闫三强等, 2021),而与本研究结果中的 365 nm 的诱虫量 > 420 nm 诱虫量相反。推测这种差异可能与试验时间和气象因素等影响有关。研究表明诱虫灯诱虫量与温度、相对湿度、风速、云量和月光相关,温度和相对湿度与日诱虫量的相关系数分别达到 0.37 和 0.22(郭虹等, 2012)。本研究时间长达 4 个月,从夏末至冬初,时间跨度较大,气象因素更为复杂。

2 种及以上波长的单色光组合会形成复合光,昆虫对复合光的反应比单色光更为复杂。有关烟青虫 *Heliothis assulta* 的研究发现,将波长 350 nm 的紫外光与 405 nm 和 436 nm 的可见光组合对烟青虫成虫的吸引有增效作用,而 350 nm 与 578、625 和 656 nm 光波结合却对烟青虫的吸引有干扰作用(丁岩钦, 1978)。棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 对双波灯的趋光率显著高于单波长灯(张艳红等, 2009)。对蝗虫的研究证明 465 nm 与 405 nm 形成的双短光谱复合光能增强蝗虫趋光行为,而 465 nm 与 620 nm 形成的长短光谱复合光会减弱蝗虫的趋光率。本研究发现,365 nm 和 350 nm 2 种紫外波段的单色光组成的复合光对草地贪夜蛾和亚洲玉米螟的诱集效果显著高于 365 nm 或 350 nm 单一波长的诱虫灯。昆虫的趋光行为除了受到光源波长的影响外,还与环境

因子、光强度、光偏振性以及昆虫发育状态等因素相关(桑文等, 2019)。本研究只进行了不同波长诱虫灯对草地贪夜蛾和玉米螟的田间诱集试验, 其他因素对草地贪夜蛾和玉米螟的趋光反应还有待进一步深入研究。

综合上述条件下的灯诱调查结果, 草地贪夜蛾和玉米螟主要的敏感波长集中在紫外波段, 以 365 nm+350 nm 的复合光诱集效果最佳。研究结果为开发高效环保灯光诱虫技术用于玉米害虫预测预报和绿色防控工作提供技术参考, 也为促进昆虫与光之间的生物学和行为学关系深入研究提供实验基础。

参考文献 (References)

- 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. [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.]
- Briscoe AD, Chittka L, 2001. The evolution of color vision in insects. *Annu. Rev. Entomol.*, 46: 471–510.
- Chen HN, Xu X, Deng XY, Heng XR, Liu Y, Song CC, Zhang Z, Jiang CX, Li Q, 2020. Preliminary evaluation on the trapping and killing effect of single wavelength insecticidal lamp on *Spodoptera frugiperda*. *Science and Technology of Sichuan Agriculture*, 2020(2): 41–42. [陈昊楠, 徐翔, 邓晓悦, 衡晓容, 刘勇, 宋灿灿, 张喆, 蒋春先, 李庆, 2020. 单波长杀虫灯对草地贪夜蛾诱杀效果初步评价. 四川农业科技, 2020(2): 41–42.]
- Chen XX, 2009. Study on the influence factor of phototaxis and feeding behavior of *Propylaea japonica*. Master dissertation. Baoding: Hebei Agricultural University. [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.]
- Ding YQ, 1978. Study on the phototactic behavior of nocturnal moths: The response of *Heliothis asulta* Guenee to different monochromatic light and brightness. *Acta Entomologica Sinica*, 21(1): 1–6. [丁岩钦, 1978. 夜蛾趋光特性的研究: 烟青虫成虫对双色光与光强度的反应. 昆虫学报, 21(1): 1–6.]
- Early R, González-Moreno P, Murphy ST, Day R, 2018. Forecasting the global extent of invasion of the cereal pest *Spodoptera frugiperda*, the fall armyworm. *NeoBiota*, 40: 25–50.
- Goldsmith TH, Bernard GD, 1974. The visual system of insects// *The Physiology of Insecta*. New York: Academic Press. 165–272.
- Guo H, Han XH, Xu ZC, 2012. Effect comparison of different wavelengths insecticidal lamps in lepidopteran pests trapping. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 40(2): 146–149. [郭虹, 韩献华, 许志春, 2012. 不同波长杀虫灯对鳞翅目害虫的诱杀效果. 山西农业科学, 40(2): 146–149.]
- Guo JF, He KL, Wang ZY, 2019. Biological characteristics, trend of fall armyworm *Spodoptera frugiperda*, and the strategy for management of the pest. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(3): 361–369. [郭井菲, 何康来, 王振营, 2019. 草地贪夜蛾的生物学特性、发展趋势及防控对策. 应用昆虫学报, 56(3): 361–369.]
- Jiang XF, Zhang ZZ, Luo LZ, 2010. Phototaxis of the beet webworm *Loxostege sticticatis* to different light waves and light intensities. *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 YY, Liu J, Xie MC, Li YH, Yang JJ, Zhang ML, Qiu K, 2019. Observation on law of diffusion damage of *Spodoptera frugiperda* in China in 2019. *Plant Protection*, 45(6): 10–19. [姜玉英, 刘杰, 谢茂昌, 李亚红, 杨俊杰, 张曼丽, 邱坤, 2019. 2019 年我国草地贪夜蛾扩散为害规律观测. 植物保护, 45(6): 10–19.]
- 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.]
- Li ZQ, Lin Z, Li YW, 2021. Discussion on the occurrence and development of *Spodoptera frugiperda* and its control technology. *Agricultural Development and Equipment*, 2021(8): 127–128. [黎秩群, 林忠, 黎远文, 2021. 浅谈草地贪夜蛾的发生发展及防治技术. 农业开发与装备, 2021(8): 127–128.]
- Liu SM, 2022. Phototaxis of *Spodoptera frugiperda* and the effects of different light on its biological characteristics. Master dissertation. Xinxiang: Henan Institute of Science and Technology. [刘思敏, 2022. 草地贪夜蛾的趋光性以及不同光照对其生物学特性的影响. 硕士学位论文. 新乡: 河南科技学院.]
- Nouvian M, Galizia CG, 2020. Complexity and plasticity in honey bee phototactic behaviour. *Scientific Reports*, 10(1): 7872.
- Park JH, Sung BK, Lee HS, 2015. Phototactic behavior 7: Phototactic response of the maize weevil, *Sitotroga zeamais* Motsch (Coleopter: Curculionidae), to light-emitting diodes. *Journal of the Korean*

- Society for Applied Biological Chemistry*, 58(3): 373–376.
- 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. [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.]
- Shimoda M, Honda KI, 2013. Insect reactions to light and its applications to pest management. *Applied Entomology and Zoology*, 48(4): 413–421.
- Wang LC, Li ZG, Li J, Han SC, 2016. Trapping effect of the trap lamp with different wavelengths on the pest in mangrove forest. *Journal of Environmental Entomology*, 38(5): 1028–1031. [王林聪, 李志刚, 李军, 韩诗畴, 2016. 不同波长诱虫灯对红树林主要害虫的诱集作用. 环境昆虫学报, 38(5): 1028–1031.]
- Wang YS, Zhang R, Yue DR, Yang GH, Jin FY, Zhai J, Fu WY, 1990. Research brief on the application of insect trap lamps to control *Ostrinia furnacalis*. *Plant Protection*, 16(2): 32–33. [王蕴生, 张荣, 岳德荣, 杨桂华, 靳峰云, 翟军, 傅文玉, 1990. 应用诱虫灯防治亚洲玉米螟研究简报. 植物保护, 16(2): 32–33.]
- Wang ZY, Lu X, He KL, Zhou DR, 2000. Review of history, present situation and prospect of the Asian maize borer research in China. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 31(5): 402–412. [王振营, 鲁新, 何康来, 周大荣, 2000. 我国研究亚洲玉米螟历史、现状与展望. 沈阳农业大学学报, 31(5): 402–412.]
- Wu KM, 2020. Management strategies of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in China. *Plant Protection*, 46(2): 1–5. [吴孔明, 2020. 中国草地贪夜蛾的防控策略. 植物保护, 46(2): 1–5.]
- Wu S, Zhang YM, Guo X, Huang YF, Liu JF, 2021. Effectiveness of different wavelength LED insect lamp traps in vegetable fields. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 58(1): 172–180. [吴霜, 张谊模, 郭萧, 黄云峰, 刘剑飞, 2021. 不同波长 LED 诱虫灯对菜地昆虫的诱集效果. 应用昆虫学报, 58(1): 172–180.]
- Xu L, 2016. Research on the phototaxis of *Harmonia axyridis*, *Ostrinia furnacalis* and *Bemisia tabaci*. Master dissertation. 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 X, Ma L, Yue ZL, Chen HB, 2017. Trapping effect of LED single wavelength insecticidal lamp against tea insect pests. *China Plant Protection*, 37(12): 53–56. [徐翔, 马利, 岳泽霖, 陈华保, 2017. LED 单波长光源杀虫灯对茶园害虫的诱杀效果. 中国植保导刊, 37(12): 53–56.]
- Yan S, Qin M, Zhao SQ, Wang L, Zhu JL, Liu H, 2017. Compound eyes vision of Nocturnal moth and its light trap response. *China Plant Protection*, 37(6): 30–35. [闫硕, 秦萌, 赵守歧, 王璐, 朱家林, 刘慧, 2017. 夜蛾复眼视觉与灯诱反应. 中国植保导刊, 37(6): 30–35.]
- Yan SQ, Lv BQ, Tang JH, Lu H, Tang X, Su H, 2021. Trapping effect of the insecticidal lamp with different wavelengths on three corn pests. *China Plant Protection*, 41(3): 49–53. [闫三强, 吕宝乾, 唐继洪, 卢辉, 唐雪, 苏豪, 2021. 不同波长诱虫灯对 3 种玉米害虫的诱集作用. 中国植保导刊, 41(3): 49–53.]
- Yang GH, Wang RS, 1995. Phototaxis of adult of Asian corn borer male and female to different wavelength light. *Journal of Maize Sciences*, 3(S1): 70–71. [杨桂华, 王蕴生, 1995. 亚洲玉米螟雌雄蛾对不同光波的趋性. 玉米科学, 3(S1): 70–71.]
- Yang XM, Lu YH, Liang GM, 2020. Insect phototaxis behavior and light trapping technology. *China Illuminating Engineering Journal*, 31(5): 22–31. [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.]
- Yu HL, 2011. The phototaxis of *Grapholita molesta* busck and the effect of green light on its biological characteristics. Master dissertation. 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 JF, Zhang Y, Xu WP, Tao LM, 2020. Research progress on phototaxis of insects and their application to pest control. *Journal of World Pesticides*, 42(11): 26–35. [张锦芳, 张阳, 徐文平, 陶黎明, 2020. 昆虫的趋光性及其应用于害虫治理的研究进展. 世界农药, 42(11): 26–35.]
- Zhang YH, Liu XX, Zhang QW, Wei GS, 2009. Effects of different light source on phototaxis rate of cotton bollworm, *Helicoverpa armigera*. *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.]
- Zhou CY, Zhang YD, Liu HL, Li HY, Wei W, Zhang WN, Liu WS, Li KY, 2019. Trapping effect of the insecticidal lamp with different wavelengths on *Eupithecia abietaria*. *Journal of Jilin Agriculture*, 2019(8): 44. [周春艳, 张玉东, 刘海龙, 李焕余, 魏伟, 张伟娜, 刘伟胜, 李奎友, 2019. 不同波长诱虫灯对球果尺蛾诱集效果的研究. 吉林农业, 2019(8): 44.]
- Zhou JH, Jia YZ, Fan CZ, Xiao YB, Xiong DG, 2013. Effects of the trap lamp with different wavelengths on trapping adults of *Parocneria orienta*. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 34(6): 69–71. [周建华, 贾玉珍, 范成志, 肖银波, 熊大国, 2013. 不同波长诱虫灯对蜀柏毒蛾成虫的诱集研究. 四川林业科技, 34(6): 69–71.]