

诱捕番茄潜叶蛾的高效光谱筛选及 田间诱捕效果*

石磊^{1,2**} 李丽莉¹ 崔洪莹¹ 宋莹莹¹ 郭文秀¹ 吕素洪¹
郭森¹ 门兴元^{1***} 尹淑艳^{2***}

(1. 山东省农业科学院植物保护研究所, 山东省农业有害生物绿色防控重点实验室, 济南 250100;

2. 山东农业大学植物保护学院, 泰安 271018)

摘要 【目的】筛选出诱捕番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta* 的高效光谱, 研发番茄潜叶蛾灯光诱控技术。

【方法】利用昆虫趋光行为测定装置筛选出番茄潜叶蛾趋性高的光谱, 并利用研制的 LED 灯光诱捕器比较不同光谱和光强组合对番茄潜叶蛾的田间诱捕效果。【结果】番茄潜叶蛾对光谱趋光反应率较高的波段依次为: 380-385 nm > 410-420 nm > 390-395 nm > 430-435 nm > 420-425 nm > 365-370 nm。雌蛾对 410-420 nm 的趋光率最高, 其次为 380-385 nm, 雄蛾对 380-385 nm 趋光率最高, 其次为 420-425 nm。在相同波段下, 雌蛾的趋光率普遍高于雄蛾。室内行为试验显示, 番茄潜叶蛾的趋光性随光照强度的增加先增大后降低。在番茄日光温室中, 不同功率 (12、16 和 20 W) 的 LED 灯光诱捕器在 385 nm 对番茄潜叶蛾均有优异的诱捕效果。【结论】番茄潜叶蛾成虫对 380-385 nm 紫光趋性最高, 雌虫的趋光性高于雄虫, 并随着光照强度增强先增大后降低。研制的紫光 LED 灯诱捕器能够有效减少日光温室番茄潜叶蛾的种群数量。

关键词 番茄潜叶蛾; 光波波长; 趋光率; LED 灯光诱捕器; 诱捕效果

Effectiveness of different light wave-lengths for trapping *Tuta absoluta*

SHI Lei^{1,2**} LI Li-Li¹ CUI Hong-Ying¹ SONG Ying-Ying¹ GUO Wen-Xiu¹
LÜ Su-Hong¹ GUO Sen¹ MEN Xing-Yuan^{1***} YIN Shu-Yan^{2***}

(1. Shandong Key Laboratory for Green Prevention and Control of Agricultural Pests, Institute of Plant Protection,

Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China;

2. College of Plant Protection, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract [Aim] To identify the best light wave-lengths for trapping the tomato leaf miner *Tuta absoluta*. [Methods] Wave-lengths that attracted the tomato leaf miner were identified using an insect phototaxis measurement device. The effectiveness of different wave-length and light intensity combinations were then compared using a specially developed LED light trap. [Results] The light wave-lengths tested could be ranked in order of attractiveness as follows: 380-385 nm > 410-420 nm > 390-395 nm > 430-435 nm > 420-425 nm > 365-370 nm. The more attractive wave-lengths were concentrated in the purple region of the spectrum. The most attractive wave-length to female moths was by 410-420 nm, followed by 380-385 nm. Male moths were most attracted by 380-385 nm, followed by 420-425 nm. Female moths had a stronger phototactic response than male moths to the same light wave-length. After external light interference was excluded, phototaxis first increased, then decreased, with increasing light intensity. Different intensities (12, 16, and 20 W) of 385 nm LED light traps were found to be the best for trapping tomato leaf miner moths in a greenhouse. [Conclusion] Adult tomato leaf miner moths, and especially adult females, are strongly attracted to 380-385 nm purple light. Phototaxis of the tomato leaf miner first increases, then decreases, with increasing light intensity. The use of purple LED light traps can effectively reduce the

*资助项目 Supported project: 2024 农业科技创新工程-国内高层次人才引进与培养科研启动项目 (333 工程) (06202214442066)

**第一作者 First author, E-mail: 15763515292@163.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: menxy2000@hotmail.com; shuyany@163.com

收稿日期 Received: 2024-04-12; 接受日期 Accepted: 2024-06-27

population of tomato leaf miner moths in greenhouses.

Key words *Tuta absoluta*; light wave wavelength; phototaxis rate; LED light trap; trapping effect

番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta* 属鳞翅目 Lepidoptera 麦蛾科 Gelechiidae (马菲等, 2011)。起源于南美洲西部的秘鲁, 2017 年 8 月首次在我国新疆被发现, 目前已在新疆、云南、山西、甘肃、四川、内蒙古、北京、辽宁和山东等地定殖, 呈扩展蔓延态势, 危害番茄生产可导致其减产 50% 以上, 严重威胁我国“菜篮子”保供安全 (张桂芬等, 2022; 郭文秀等, 2023)。番茄潜叶蛾寄主范围广泛, 可为害 19 科 40 种作物, 主要以幼虫为害番茄、马铃薯、辣椒和茄子等茄科作物, 尤其嗜食番茄。幼虫潜入叶片、顶梢、腋芽、嫩茎以及果实内取食为害, 发生严重时可导致番茄减产 80%-100%, 是全球最具毁灭性的入侵害虫之一 (Desneux *et al.*, 2010)。番茄潜叶蛾入侵后不仅造成直接经济损失, 还增加了杀虫剂的用量, 每个生长季节的施药次数较以往增加约 15 次 (Guedes and Picanço, 2012; Gontijo *et al.*, 2013; Potting *et al.*, 2013)。高频次大量用药不仅对授粉昆虫和天敌昆虫等有益生物产生不利影响, 还会诱发番茄潜叶蛾产生抗性 (Campos *et al.*, 2014; Roditakis *et al.*, 2015; Campos *et al.*, 2017)。此外, 番茄果实采收期长且常常鲜食, 果实上的杀虫剂残留对消费者健康构成直接威胁。因此, 生产上亟需安全高效的绿色防控技术控制番茄潜叶蛾的为害, 同时减少杀虫剂使用。利用害虫趋光性的灯光诱控技术因高效、环保、无残留和不易产生抗性等特点, 被广泛应用于农业害虫绿色防控 (桑文等, 2019)。研究番茄潜叶蛾对不同光波的趋性, 可为开发高效灯光诱捕技术提供依据 (张桂芬等, 2021, 2022; Mangrio *et al.*, 2023)。

趋光性指动物对空间内光源本身的定位和运动方式, 根据运动方向分为正趋光性和负趋光性 (Campan, 1997; 张锦芳等, 2020), 正趋光性通常用于诱捕害虫。大多数昆虫对光具有趋性, 敏感光谱多集中在 253-700 nm 范围, 不同种类昆虫对光波长的偏好不同 (郭炳群和李世

文, 1997; Oprian, 2003)。例如, 绿盲蝽 *Apolygus lucorum* 雌成虫对紫光 440、400 和 420 nm 及绿光 562 nm 的趋光率较强 (董松等, 2017); 烟蓟马 *Thrips tabaci* 对 450 nm 蓝色光趋性最强, 其次为 562 nm 的黄色光和 430 nm 的蓝紫色光 (米娜等, 2019); 柑橘木虱 *Diaphorina citri* 趋向于 380 nm 的紫外光、549 nm 的黄绿光和 414 nm 的紫光, 而柚喀木虱 *Cacopsylla citrisuga* 对 340 nm 的紫外光、白光和 50 nm 的蓝绿光趋性强 (姜静等, 2021); 松毛虫赤眼蜂 *Trichogramma dendrolimi* 对 365 nm 紫外光和 525-535 nm 绿光的趋性较强 (谷静秀, 2021)。昆虫性别也会影响其光波选择, 如草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 雌蛾对绿光区 510、520 和 550 nm 的趋性较高, 而雄蛾对绿光区 520 nm 和紫光区 420 nm 的趋性较高 (刘思敏等, 2023); 梨小食心虫 *Grapholita molesta* 成虫对 520 nm 的绿光趋性最强, 且雌虫趋光性显著高于雄虫 (刘彦飞等, 2013)。

光强也是影响昆虫趋光性的重要因素, 不同光照强度下昆虫的趋光反应存在明显差异, 有些昆虫会随着光强变化表现相反的趋性 (蔡侠等, 2015)。例如, 380 nm 紫外光对柑橘木虱成虫具有最强吸引力, 随着光强度增加, 其趋光反应逐渐增强, 达到峰值后则逐渐减弱 (袁楷等, 2020); 松蠹狄金小蜂 *Dinotiscus armandi* 的趋光行为与光强具有明显相关性, 光强较低时呈正相关, 光强较高时呈负相关 (陈友和罗长维, 2015); 草地螟 *Loxostege sticticalis* 成虫在 340-605 nm 波长范围内的趋光反应率表现为复杂的多个峰值, 成虫趋光反应率随单色光和白光光强度的增强而升高 (江幸福等, 2010)。

相较于其他光源 (如白炽灯), LED 灯波具有波长范围窄、光色单一、亮度高、能耗低和寿命长的特点, 在设施温室里诱虫效果显著 (Kim and Lee, 2012; Park *et al.*, 2014)。为研发番茄潜叶蛾的高效灯诱技术, 本研究利用昆虫趋光行为测定装置筛选出了番茄潜叶蛾趋性较高的光

谱, 并利用自制的 LED 诱虫灯比较了不同光谱和光强组合在田间的诱捕效果。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试虫源 供试番茄潜叶蛾成虫为山东省农业科学院植物保护研究所农业昆虫创新团队饲养的室内种群, 饲养条件为温度(26±1)℃, 相对湿度 65%±5%, 光周期 16 L : 8 D。

1.1.2 试验装置 昆虫趋光行为测定装置如图 1, 装置中间为密闭的圆柱体接虫室, 接虫室正中为正方形接虫口, 周围呈放射状均匀连接 16 个圆柱形选择臂, 在每个选择臂的末端设有趋光收集室和光源发射室, 趋光收集室上带有 1 个风机。装置工作原理: 供试成虫通过接虫口进入, 随后被光源发射室发出光源的吸引, 飞入 1 个选择臂, 在向光源飞行的过程中, 成虫受到来自趋光收集室上方风机所吹气流的作用, 掉落进收集室。

供试光源为定制的 16 种光波波段的 LED 灯: 365-370 nm (绿光)、380-385 nm (紫光)、390-395 nm (黄光)、400-405 nm (紫光)、410-420 nm (紫光)、420-425 nm (紫光)、430-435 nm (紫光)、460-465 nm (蓝光)、475-480 nm (青光)、500-505 nm (绿光)、515-520 nm (绿光)、590-595 nm (黄光)、600-605 nm (橙光)、620-625 nm (红光)、660 nm (红光) 和 735-740 nm (红光), 额定电压 220 V, 功率 13 W。

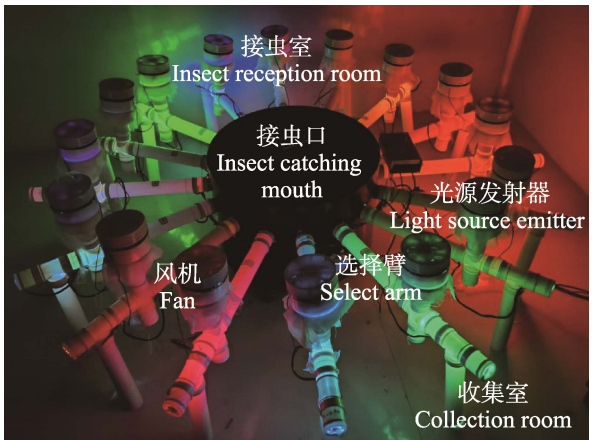


图 1 昆虫趋光行为测定装置
Fig. 1 Insect phototaxis behavior measurement device

1.1.3 灯光诱捕器 灯光诱捕器如图 2, 由山东德瑞农业科技有限公司协助制作。该诱捕器包括 LED 灯 (长 8 cm)、防水罩 (直径约 20 cm)、有机玻璃材质的挡虫板 (3 片, 高 24 cm, 宽 8 cm) 和集虫水盘 (直径 20 cm, 深 4 cm, 盛装含 0.2% 洗涤灵的自来水)。



图 2 灯光诱捕器
Fig. 2 Light trap

1.2 试验方法

1.2.1 番茄潜叶蛾成虫趋光行为测定 试验在山东省农业科学院植物保护研究所的昆虫行为学实验室进行, 试验期间实验室封闭不透光。将 3 日龄番茄潜叶成虫从昆虫趋光行为测定装置的接虫口放入, 打开光源, 光源刺激时间为 60 min, 然后记录趋光收集室内的番茄潜叶蛾数量。分别测试了雌雄虫混合 (雌虫 : 雄虫为 1 : 1)、单独雌虫和单独雄虫对不同光波的趋性。每个处理重复 5 次, 每次重复包括 50 头成虫。

1.2.2 室内灯光诱捕器的诱蛾效果 根据番茄潜叶蛾成虫趋光行为筛选出其趋光率较高的 (385、420 和 435 nm) 3 种光波, 制作了以上 3 种光波的 LED 灯, 每种光波 3 种功率 (12、16 和 20 W), 由于 3 种功率全光 LED 灯对番茄潜叶蛾成虫趋光行为影响差异不显著, 所以随机选择 20 W 的全光 LED 灯为对照, 共 10 个处理。在昆虫行为学实验室中, 灯光诱捕器垂直放置在

距地面 1 m 的位置,所有诱捕器按照环形随机排列,间距约 50 cm。将番茄潜叶蛾成虫放置在环形中间,手动打开光源,光源刺激时间为 60 min,随后记录诱捕器中的番茄潜叶蛾数量。每次试验放 100 头番茄潜叶蛾成虫,雌雄虫混合(雌虫:雄虫为 1:1),重复 3 次。

1.2.3 温室大棚中灯光诱捕器的诱蛾效果 试验在山东省农业科学院科学试验基地的番茄日光温室内进行。10 种诱捕器(同 1.2.2 节)按随机顺序依次悬挂在温室中间位置,诱捕器节水盆距地面约 1 m,各诱捕器间距 15 m。诱捕器的灯光为自动开关,每天下午 18:00 开灯,次日早上 8:00 关灯。每天早晨关灯后记录诱捕到的番茄潜叶蛾数量,连续观察 6 d。

1.3 数据分析

番茄潜叶蛾雌虫和雄虫对不同光波趋光行为反应及不同光波诱捕器的诱蛾效果数据采用 Excel 2021 进行统计分析,利用 SPSS 21.0 进行单因素方差分析和和双因素方差分析,不同处理间采用 LSD 法检验处理间差异显著性($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 番茄潜叶蛾成虫对不同波长光源的的趋光行为反应

番茄潜叶蛾成虫对 16 种光波波长的趋性存

在极显著性差异($F = 31.656, P < 0.001$)(图 3)。其中,对 380-385 nm 波长的趋光率最高($18.80\% \pm 1.20\%$),其次是 410-420 nm($14.40\% \pm 1.16\%$)和 390-395 nm($8.80\% \pm 1.50\%$);对 365-370、420-425 和 430-435 nm 波长的趋光率分别为 7.60%、7.60%和 8.00%,三者之间差异性不显著($P > 0.05$);对其他波长的趋光率均较低。

2.2 番茄潜叶蛾雌虫和雄虫对不同波长光源的趋光行为反应

番茄潜叶蛾雌虫和雄虫对不同波长光源的趋光行为反应差异显著($F = 13.364, P < 0.001$)(表 2)。番茄潜叶蛾雌虫对 410-420 nm 的趋光率最高($20.80\% \pm 1.36\%$),其次是 380-385、420-425、430-435 和 365-370 nm 的 1.40、3.06、4.00 和 4.72 倍;雌虫对 380-385 nm 的趋光率显著($P < 0.05$)高于 365-370、420-425 和 430-435 nm,而 365-370、420-425 和 430-435 nm 之间的趋光率无显著差异($P > 0.05$)。番茄潜叶蛾雄虫对 380-385 nm 的趋光率($14.40\% \pm 1.20\%$)最高,是 420-425 nm 下趋光率的 3 倍,及 365-370 和 430-435 nm 的 4 倍,但与波长 410-420 nm($13.20\% \pm 1.31\%$)的趋光率无显著差异($P > 0.05$)。

番茄潜叶蛾雌虫和雄虫的趋光行为反应具有显著性差异($F = 83.941, P < 0.001$)(表 1)。相同波长下,雌虫的趋光率均显著高于雄性。在

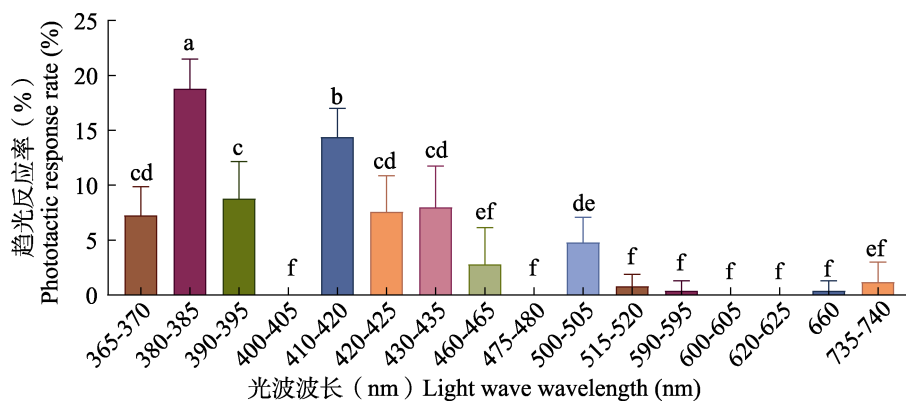


图 3 番茄潜叶蛾成虫对 16 种波长光源的趋光行为反应

Fig. 3 Phototaxis behavior response of *Tuta absoluta* adults to 16 different wavelength light traps

柱上不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$, 单因素方差分析)。

Histograms with different letters indicate significant difference ($P < 0.05$, one-way ANOVA test).

表 1 不同波长光源对番茄潜叶蛾成虫趋光行为反应的双因素方差分析

Table 1 Two factor analysis of variance on the phototaxis behavior response of *Tuta absoluta* adults at different wavelengths

因素 Factor	F	P
性别 Gender	83.941	< 0.001
波长 Wavelength	13.364	< 0.001
性别×波长 Gender × wavelength	2.859	0.001

波长 365-370、420-425、430-435 和 460-465 nm 下, 雌虫的趋光率分别为雄虫的 1.22、1.41、1.44 和 2.50 倍 (表 2)。

2.3 室内不同功率和不同波长灯光诱捕器的诱蛾效果

不同功率的灯光诱捕器对番茄潜叶蛾的诱

捕率差异显著 ($F = 12.85, P < 0.001$) (表 3)。在相同功率下, 385 nm 灯光诱捕器的诱捕率显著高于其他波长。其中, 16 W 385 nm 的诱捕器诱捕率最高 ($29.33\% \pm 1.22\%$), 20 W 385 nm 和 12 W 385 nm 的诱捕率分别为 $14.67\% \pm 1.20\%$ 和 $11.00\% \pm 3.21\%$, 两者没有显著性差异 ($P > 0.05$); 不同功率下 435 nm, 诱捕器的诱捕率有显著差异 ($P < 0.05$) (图 4)。

2.4 温室中灯光诱捕器的诱蛾效果

温室内连续 6 d 诱蛾结果显示, 各诱捕器的诱蛾数量逐日减少 (图 5)。不同灯光诱捕器的累计诱捕数量间存在显著性差异 ($F = 6.174, P < 0.001$)。在相同功率下, 波长 385 nm 灯光诱捕器的诱蛾量均显著高于 420 和 435 nm, 仅 20 W

表 2 番茄潜叶蛾雄虫和雌虫对 16 种不同波长光源的的趋光行为反应

Table 2 Phototaxis behaviors response of male and female *Tuta absoluta* to 16 different wavelength light traps

编号 No.	光源波长 (nm) Wavelength (nm)	趋光率 (%) Phototaxis (%)	
		雌虫 Female	雄虫 Male
1	365-370	4.40±1.60 cde A	3.60±1.17 def A
2	380-385	14.80±1.10 b A	14.40±2.12 b A
3	390-395	0.00±0.00 g A	0.00±0.00 g A
4	400-405	0.00±0.00 g A	0.00±0.00 g A
5	410-420	20.80±1.36 a B	13.20±1.62 b A
6	420-425	6.80±0.80 c A	4.80±0.80 cde A
7	430-435	5.20±0.49 cd A	3.60±0.98 def A
8	460-465	2.00±0.89 efg A	0.80±0.80 fg A
9	475-480	0.00±0.00 gB	0.40±0.40 g A
10	500-505	2.00±0.89 efg A	0.40±0.40 g A
11	515-520	2.40±1.17 defg A	0.40±0.40 g A
12	590-595	0.00±0.00 g B	0.80±0.49 fg A
13	600-605	0.00±0.00 g A	0.00±0.00 g A
14	620-625	0.40±0.40 g A	0.00±0.00 g B
15	660	0.40±0.40 g A	0.00±0.00 g B
16	735-740	0.00±0.0 0g A	0.00±0.00 g A

表中数据为平均值±标准误, 同一列数据后标有不同小写字母表示相同性别番茄潜叶蛾对不同波长光源的趋光行为反应差异显著 ($P < 0.05$, 单因素方差分析); 同一行数据后标不同大写字母表示不同性别番茄潜叶蛾对相同波长光源的趋光行为反应差异显著 ($P < 0.05$, 单因素方差分析)。

The data in the table are mean±SE. Data followed by the different lowercase letters in the same column indicate significant difference in the phototactic behavior of tomato leaf moths of the same gender towards different wavelengths of light sources ($P < 0.05$, one-way ANOVA test), while data followed by different capital letters in the same row indicate significant difference in the phototactic behavior of tomato leaf moths of different genders towards the same wavelength light source ($P < 0.05$, one-way ANOVA test).

表 3 不同功率灯光诱捕器对番茄潜叶蛾诱捕率的双因素方差分析

因素 Factor	F	P
功率 Power	12.85	< 0.001
波长 Wavelength	51.07	< 0.001
功率×波长 Power × wavelength	8.94	< 0.001

功率时, 385 和 420 nm 灯光诱捕器的诱蛾量均显著高于全光灯。12、16 和 20 W 功率下, 385 nm 灯光诱捕器的诱蛾数量均最多, 三者之间没有显著性差异 ($P > 0.05$)。

3 讨论

昆虫的趋光行为既取决于光源属性(例如波长和光强), 也受其他条件影响(如昆虫自身特点、天气和周围环境等)。靶标昆虫对波长和光强的趋性反应是筛选高效诱捕光源的重要依据。大多数趋光昆虫对单色光具有较强烈反应, 昆虫成虫的复眼主要有 3 种类型光感受器: 紫外光敏感型、绿光敏感型和蓝光敏感型(靖湘峰和雷朝亮, 2004)。番茄潜叶蛾是我国一种新近入侵害虫, 对其敏感光波的筛选研究较少。本研究系统测定了番茄潜叶蛾对 16 种不同波长光源的趋光行为反应, 发现番茄潜叶蛾成虫有明显的趋

光行为, 其对紫光(380-385、410-420、390-395、430-435 和 420-425 nm)的趋性要高于黄光、绿

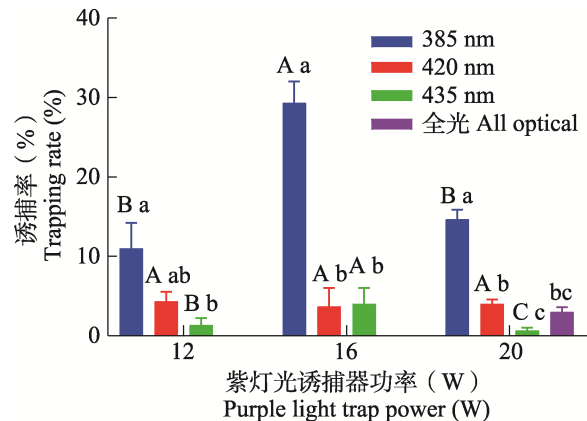


图 4 室内不同功率和波长灯光诱捕器对番茄潜叶蛾成虫的诱捕率

Fig. 4 Adult *Tuta absoluta* trapping rate of light traps with different powers and wavelengths indoors

柱上不同大写字母代表同一波长不同功率紫光灯诱捕器对成虫的诱捕率差异显著 ($P < 0.05$, 单因素方差分析), 不同小写字母代表同一功率不同波长紫光灯诱捕器对成虫的诱捕率差异显著 ($P < 0.05$, 单因素方差分析)。

The different uppercase letters on the column represent significant difference in the trapping rate of adult insects using purple light traps of the same wavelength but different powers ($P < 0.05$, one-way ANOVA test), while the different lowercase letters represent significant difference in the trapping rate of adult insects using purple light traps of the same power but different wavelengths ($P < 0.05$, one-way ANOVA test).

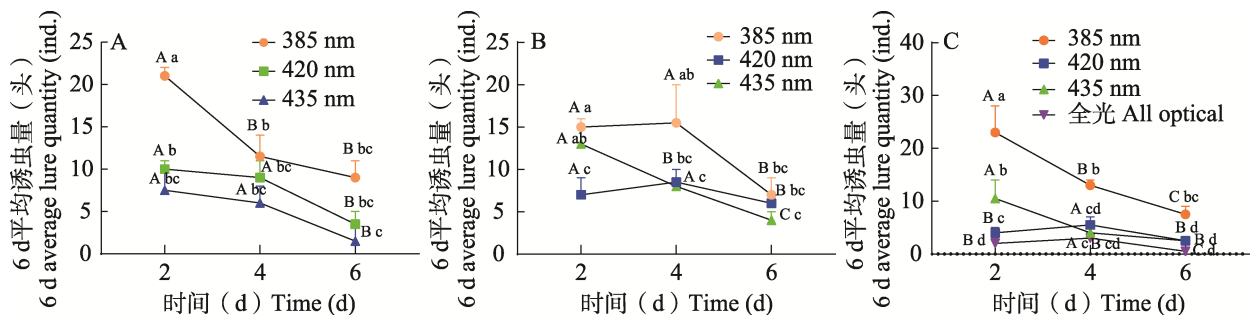


图 5 温室内 12 W (A)、16 W (B) 和 20 W (C) 不同波长紫光灯诱捕器的诱蛾数量

Fig. 5 The number of moths attracted by 12 W (A), 16 W (B), and 20 W (C) purple light traps with different wavelengths in the greenhouse

不同大写字母代表同一光波长刺激下番茄潜叶蛾的趋光

率在 $P < 0.05$ 水平差异显著(单因素方差分析); 不同小写字母代表不同光波长刺激下

番茄潜叶蛾的趋光率在 $P < 0.05$ 水平差异显著(单因素方差分析)。

Different capital letters represent significant difference in phototaxis of tomato leaf miner under the same light wavelength stimulation at the $P < 0.05$ level (one-way ANOVA test); Different lowercase letters represent significant difference in phototaxis of tomato leaf miner under different light wavelengths stimuli at the $P < 0.05$ level (one-way ANOVA test).

光、蓝光、红光、青光和橙光, 其中对 380-385 nm 趋光性最高, 趋光率达到 $18.00\% \pm 1.20\%$, 表明番茄潜叶蛾对紫光灯有明显趋光性。杨心月等 (2015) 发现二点委夜蛾成虫对 380 nm 波长紫外光有较强的趋性为 67%-77%; 江幸福等 (2010) 报道草地螟雌成虫的敏感波长在 360 nm 紫外区及 400 nm 近紫外区, 趋光率在 15%-25% 之间。以上均和番茄潜叶蛾存在相似的诱捕波长, 能够更广泛的应用与推广。Tang 等 (2024) 研究表明, 番茄潜叶蛾对短波紫外光的趋性明显高于长波, LW2 和 BL 视蛋白突变后, 番茄潜叶蛾更趋向于长波, 表明视蛋白在番茄潜叶蛾响应光波行为调节中起到了重要作用。

昆虫的趋光行为存在雌雄差异 (Williams, 1939), 这种差异可能与雌雄成虫的飞行能力、复眼结构、生理状态、日龄、交配与否及所用的光源等有关 (程文杰等, 2011)。若雌虫趋光性更强, 利用灯光诱捕技术将能够有效诱杀更多的雌虫, 从而大量减少田间卵量和幼虫数量, 降低虫源基数。本研究发现番茄潜叶蛾的雌雄成虫均趋向紫光, 但两者的最偏好波长不同, 雌虫对 410-420 nm 紫光趋光率最高, 雄虫对波长 380-385 nm 紫光的趋光率最高。在相同波长光源下, 雌虫的趋光率普遍高于雄虫。张桂芬等 (2022) 研究发现, 利用不同波长的蓝紫光灯诱捕器可诱集到更多数量的番茄潜叶蛾雌成虫, 且多为抱卵雌虫。

光照强度对昆虫的趋光行为有较大影响, 通常昆虫的趋光行为随着光强的增加逐渐增强, 如斜纹夜蛾 *Prodenia litura* 和鳃金龟 *Holotrichia lata* 的趋光率均随着光照强度的增强而增加 (杨洪璋等, 2014)。但当光照强度过高时, 也会降低昆虫的趋光性, 例如, 草地螟和二点委夜蛾 *Athetis lepigone* 的在光照强度增加时, 其趋光性先增大后降低 (江幸福等, 2010; 杨心月, 2015)。本研究中, 在行为实验室排除外界光线干扰的条件下, 发现番茄潜叶蛾的趋光性随着光照强度增强先增大后降低, 385 nm 波长下, 16W 诱捕器的诱捕效果最好, 分别为 12 和 20 W 的 2.64 和 2 倍。在温室大棚条件下, 385 nm 波长下 12、16 和 20 W 诱捕器的诱捕数量没有显著差异, 这

与室内的研究结果不同, 可能是由于温室内光线和温度等环境条件减弱了诱捕器光强的作用。

光源类型也会对灯光诱捕器的诱捕效果产生显著影响。Sridhar 和 Senthil (2018) 对不同颜色光源吸引番茄潜叶蛾的效果进行了评价, 发现温室内 60 W 的黄色白炽灯诱捕效果最好。Ardeh 等 (2021) 比较了不同波长荧光灯和黑光灯对番茄潜叶蛾的田间诱捕效果, 发现黑光灯优于荧光灯。LED 灯具有波长范围窄、光色单一、亮度高、能耗低和寿命长等优点, 国内外陆续开展了研制 LED 灯诱捕器防治番茄潜叶蛾的研究。Mangrio 等 (2023) 报道, 12 W 金色 (570-590 nm) LED 诱捕器在番茄温室中诱捕到的番茄潜叶蛾数量优于蓝色 (450-495 nm) 诱捕器, 能够有效减少番茄潜叶蛾的为害。张桂芬等 (2022) 比较了番茄潜叶蛾对 5 种蓝紫光的趋性, 发现紫光 LED 灯的田间诱捕效果优于蓝光。本研究中, 16 W 385 nm LED 诱捕器在行为实验室排除外界光线干扰的条件下, 60 min 诱捕率达 29.33%, 表现出优异的诱虫效果; 温室内 385 nm 诱捕器连续 6 d 的诱蛾数量逐日减少, 表明灯光诱捕能够有效减少温室内番茄潜叶蛾的种群数量。

本研究探明了番茄潜叶蛾成虫对 380-385 nm 紫光的趋性最高, 且雌虫的趋光性高于雄虫; 番茄潜叶蛾的趋光性随光照强度的增强先增大后降低。本研究研制的紫光 LED 灯诱捕器能够快速减少温室内番茄潜叶蛾的种群数量。

参考文献 (References)

- Ardeh MJ, Kheirkhah T, Seyahooei MA, 2021. Performance of light traps in the capture of tomato leafminer, *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae). *Journal of Crop Protection*, 10(4): 701-710.
- Campos MR, Biondi A, Adiga A, Guedes RNC, Desneux D, 2017. From the Western Palaearctic region to beyond: *Tuta absoluta* 10 years after invading Europe. *Journal of Pest Science*, 90(3): 787-796.
- Campos MR, Rodrigues ARS, Silva WM, Silva TBM, Silva VRF, Guedes RNC, Siqueira HAA, 2014. Spinosad and the tomato borer *Tuta absoluta*: A bioinsecticide, an invasive pest threat, and high insecticide resistance. *PLoS ONE*, 9(8): e103235.

- Campan R, 1997. Tactic Components in Orientation. Orientation and Communication in Arthropods. Basel: Birkhäuser. 1–40.
- Cai X, 2015. Study on the phototaxis of several tea tree pests. Master dissertation. Hangzhou: China Institute of Metrology. [蔡侠, 2015. 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.]
- Chen Y, Luo CW, 2015. Phototactic behavior of parasitic wasp *Dinotiscus armandi* to different light intensities. *Henan Agricultural Science*, 44(7): 99–102. [陈友, 罗长维, 2015. 光强对松蠹狄金小蜂趋光行为的影响. 河南农业科学, 44(7): 99–102.]
- 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.]
- Desneux N, Wajnberg E, Wyckhuys KAG, Burgio G, Arpaia S, Narváez-Vasque CA, Cabrera GJ, Ruescas DC, Tabone E, Frandon J, Pizzol J, Poncet C, Cabello T, 2010. Biological invasion of European tomato crops by *Tuta absoluta*: Ecology, geographic expansion and prospects for biological control. *Journal of Pest Science*, 83(3): 197–215.
- Dong S, Lu ZB, Li LL, Li WQ, Yu Y, Men XY, Yin SY, 2017. Behavior response of *Apolygus lucorum* 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.]
- Lu F, Hai XX, Fan F, Zhou X, Liu S, 2016. The phototactic behavior of adult black velvet gill beetle towards different monochromatic lights and light intensities. *Journal of Plant Protection*, 43(4): 656–661. [吕飞, 海小霞, 范凡, 周鑫, 刘顺, 2016. 黑绒鳃金龟甲成虫对不同单色光和光强的趋光行为. 植物保护学报, 43(4): 656–661.]
- Guedes RNC, Picanço MC, 2012. The tomato borer *Tuta absoluta* in South America: Pest status, management and insecticide resistance. *Bulletin OEPP: EPPO Bulletin*, 42(2): 211–216.
- Gontijo PC, Picanço MC, Pereira EJG, Martins JC, Chediak M, Guedes RNC, 2013. Spatial and temporal variation in the control failure likelihood of the tomato leaf miner, *Tuta absoluta*. *Annals of Applied Biology*, 162: 50–59.
- Guo BQ, Li SW, 1997. A study on the rhythmic changes of phototactic behaviour and compound eye structure of adult corn borer. *Acta Entomologica Sinica*, 40(1): 58–61. [郭炳群, 李世文, 1997. 亚洲玉米螟蛾趋光行为及复眼结构节律性研究. 昆虫学报, 40(1): 58–61.]
- Gu JX, 2021. Research on the activity rhythm and key determinants of phototaxis of *Trichogramma matsudana*. Master dissertation. Baoding: Agricultural University of Hebei. [谷静秀, 2021. 松毛虫赤眼蜂活动节律及其趋光性的关键决定因子研究. 硕士学位论文. 保定: 河北农业大学.]
- Guo WX, Li LL, Jiang WF, Cheng YZ, Song YY, Cui HY, Lu SH, Yu Y, Men XY, 2023. Research progress on the harm, risk, monitoring, and prevention of tomato leaf miner to the tomato industry in Shandong Province. *Shandong Agricultural Sciences*, 55(11): 1–11. [郭文秀, 李丽莉, 姜文凤, 程亚增, 宋莹莹, 崔洪莹, 吕素洪, 于毅, 门兴元, 2023. 番茄潜叶蛾对山东省番茄产业的危害风险及其监测、防控研究进展. 山东农业科学, 55(11): 1–11.]
- Jiang J, Lou DJ, Chen Z, Li HM, 2021. Preliminary study on phototaxis characteristics of citrus psyllid and pomelo psyllid. *Journal of Yuxi Normal University*, 37(3): 43–46. [姜静, 娄灯吉, 陈祯, 李红梅, 2021. 柑橘木虱和柚喀木虱的趋光特性初步研究. 玉溪师范学院学报, 37(3): 43–46.]
- Jing XF, Lei CL, 2004. Research progress on insect phototaxis and its 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.]
- Jiang XF, Zhang ZZ, Luo JZ, 2010. The phototaxis of adult grassland moths to different light waves and 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.]
- 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.
- Liu SM, Wang YQ, Tang JR, Zhang YJ, Fu XW, Liang GM, 2023. The effects of different wavelengths of light on the phototaxis behavior and visual protein expression levels of adult fall armyworms in grasslands. *Plant Protection*, 49(2): 176–183. [刘思敏, 汪永乾, 汤金荣, 张永军, 付晓伟, 梁革梅, 2023. 不同波长光照对草地贪夜蛾成虫趋光行为及视蛋白表达量的影响. 植物保护, 49(2): 176–183.]
- Liu YF, Yu HL, Wu JX, 2013. Study on the tendency and influencing factors of pear heart worms towards LED Light. *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, Hai XX, Fan F, Zhou X, Liu S, 2016. The phototactic behavior of adult black velvet gill beetle towards different monochromatic lights and light intensities. *Journal of Plant Protection*, 43(4): 656–661. [吕飞, 海小霞, 范凡, 周鑫, 刘顺, 2016. 黑绒鳃金

- 龟甲成虫对不同单色光和光强的趋光行为. 植物保护学报, 43(4): 656–661.]
- Ma F, Zhang JH, Yu YX, Cao YX, Duan SN, 2011. Tomato wheat moth. *Plant Quarantine*, 25(5): 55–58. [马菲, 张俊华, 于艳雪, 曹逸霞, 段胜男, 2011. 番茄麦蛾. 植物检疫, 25(5): 55–58.]
- Mi N, Zhang QK, Wang HH, Wu SY, Lei ZR, 2019. The phototaxis pattern of tobacco thrips and the field trapping effect of different wavelength color palettes. *Agricultural Sciences in China*, 52(10): 1721–1732. [米娜, 张起恺, 王海鸿, 吴圣勇, 雷仲仁, 2019. 烟蓟马趋光规律及不同波长色板田间诱捕效果. 中国农业科学, 52(10): 1721–1732.]
- Mangrio GQ, Gilal AA, Rajput LB, Hajano JUD, Gabol AH, 2023. Performance of pheromone and light traps in monitoring and management of tomato leafminer, *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 22(5): 288–297.
- Oprian DD, 2003. Phototaxis chemotaxis and the missing link. *Trends in Biochemical Sciences*, 28(4): 167–169.
- Potting RPI, van der Gaag DJ, Loomans A, van der Straten M, Anderson H, MacLeod A, Castrillón JMG, Cambra GV, 2013. *Tuta absoluta*, tomato leaf miner moth or South American tomato moth. Utrecht, The Netherlands: Ministry of Agriculture, Nature and Food Quality, Plant Protection Service of the Netherlands. 30.
- Park JH, Lee SM, Lee HS, 2014. Attractive effects efficiency of LED trap on controlling *Plutella xylostella* adults in greenhouse. *Journal of Applied Biological Chemistry*, 57(3): 255–257.
- Roditakis E, Vasakis E, Grispou M, Stavrakaki M, Nauen R, Gravouil M, 2015. First report of *Tuta absoluta* resistance to diamide insecticides. *Journal of Pest Science*, 88(1): 9–16.
- Sang W, Huang QY, Wang XP, Guo YH, Lei CL, 2019. The development, achievements, and prospects of phototaxis and light induced insect trapping technology in Chinese insects. *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.]
- Sridhar V, Kumaran, GS, 2018. Light trap, an effective component of integrated management of *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) on tomato. *Journal of Horticultural Sciences*, 13(1): 126–128.
- Tang YH, Bi SY, Wang XD, Ji SX, Huang S, Zhang GF, Guo JY, Yang NW, Ma DF, Wan FH, Lu ZC, Liu WX, 2024. Opsin mutants alter host plant selection by color vision in the nocturnal invasive pest *Tuta absoluta*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 265(1): 130–141.
- Williams CB, 1939. An analysis of four years captures of insects in a light-trap. Part I. General survey: Sex proportion, phenology and time of flight. *Transactions of the Royal Entomological Society of London*, 89(6): 79–131.
- Yuan K, Chen Z, Yang TT, Jiang J, Zhou WJ, 2020. Spectral sensitivity and response to light intensity of *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Psyllidae). *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Sciences)*, 35(5): 750–755, 884. [袁楷, 陈祯, 杨婷婷, 姜静, 周文健, 2020. 光谱和光强度对柑橘木虱成虫趋光行为的影响. 云南农业大学学报(自然科学), 35(5): 750–755, 884.]
- Yang XY, 2015. Study on microstructure of the compound eye and phototactic behavior of *Athetis lepigone*. Master dissertation. 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.]
- Yang HZ, Wen LZ, Yi Q, Xu H, 2014. The effects of light waves and intensity on phototaxis of several important agricultural pests. *Chinese Agricultural 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 XY, Fan F, Chen J, Liu TH, He YZ, 2015. The effect of spectra on phototaxis behavior of adult two spot armyworms. *Journal of Plant Protection*, 42(6): 1009–1013. [杨心月, 范凡, 陈洁, 刘廷辉, 何运转, 2015. 光谱对二点委夜蛾成虫趋光行为的影响. 植物保护学报, 42(6): 1009–1013.]
- Zhang GF, Zhang YB, Zhao JN, Xian XS, Wang YS, Liu WX, Wan FH, Zhang XM, Li P, Liu H, Liu WC, Li YH, Wang SM, Zhao YM, 2022. Study on the tendency of tomato leaf miner, a major fruit and vegetable pest, towards blue purple light. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 59(6): 1394–1403. [张桂芬, 张毅波, 赵静娜, 洗晓青, 王玉生, 刘万学, 万方浩, 张晓明, 李萍, 刘慧, 刘万才, 李亚红, 王树明, 赵艳梅, 2022. 重大果蔬害虫番茄潜叶蛾对蓝紫光的趋向性研究. 应用昆虫学报, 59(6): 1394–1403.]
- Zhang GF, Zhang YB, Liu WX, Zhang F, Xian XS, Wan FH, Feng XD, Zhao JN, Liu H, Liu WC, Zhang XM, Li QH, Wang SM, 2021. The influence of trap color and hanging height on the trapping effect of tomato leaf miner. *Agricultural Sciences in China*, 54(11): 2343–2354. [张桂芬, 张毅波, 刘万学, 张帆, 洗晓生, 万方浩, 冯晓东, 赵静娜, 刘慧, 刘万才, 张晓明, 李庆红, 王树明, 2021. 诱捕器颜色和悬挂高度对番茄潜叶蛾诱捕效果的影响. 中国农业科学, 54(11): 2343–2354.]
- Zhang JF, Zhang Y, Xu WP, Tao LM, 2020. Research progress on phototaxis of insects and its application in pest management. *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.]