

微光环境下草地贪夜蛾的颜色视觉行为反应

蒋月丽¹, 杨小凡², 黄求应³, 李彤¹, 梅诗琼¹, 鲁传涛^{1*}, 武予清^{1*}

(1. 河南省农业科学院植物保护研究所, 河南省农作物病虫害防治重点实验室, 农业农村部华北南部有害生物治理重点实验室, 郑州 450002; 2. 河北省农林科学院植物保护研究所, 保定 071000; 3. 华中农业大学植物科学技术学院, 武汉 430070)

摘要 夜出型昆虫与日出型昆虫一样, 具有强大的颜色视觉能力。为明确微光环境下草地贪夜蛾的颜色视觉行为反应, 本研究利用颜色卡纸测试了草地贪夜蛾对紫色、蓝色、绿色、黄色和红色等 5 种颜色的趋向、取食和产卵选择的偏好性。结果表明, 趋向测试中, 草地贪夜蛾雌雄成虫对蓝色(21.43%和 18.57%)和紫色(17.13%和 15.70%)表现出明显的趋性, 显著高于绿色、黄色和红色; 取食测试中, 其成虫对不同颜色的选择率无明显差异; 产卵选择则明显偏好黄色(40.27%)和绿色(40.17%)。本研究在理论上丰富了昆虫微光视觉生态学理论, 也为深入研究草地贪夜蛾颜色视觉行为机理提供了基础, 应用上为利用颜色视觉研发草地贪夜蛾物理防控措施提供了科学依据。

关键词 草地贪夜蛾; 微光颜色视觉; 趋向; 取食; 产卵选择

中图分类号: S 433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2022404

Color visual behavior response of *Spodoptera frugiperda* under dim-light context

JIANG Yueli¹, YANG Xiaofan², HUANG Qiuying³, LI Tong¹, MEI Shiqiong¹, LU Chuantao^{1*}, WU Yuqing^{1*}

(1. Institute of Plant Protection, Henan Academy of Agricultural Sciences, Henan Key Laboratory of Crop Pests Control, Key Laboratory of Integrated Pest Management on Crops in Southern Region of North China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhengzhou 450002, China; 2. Institute of Plant Protection, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Baoding 071000, China; 3. College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract Nocturnal insects have the same strong color visual discrimination ability as diurnal insects. In order to clarify the dim-light color visual behavior response of *Spodoptera frugiperda*, the preference of *S. frugiperda* adults to purple, blue, green, yellow and red in taxis, feeding and oviposition selection was tested in the laboratory with five kinds of colored cardboard. The results showed that the male and female adults of *S. frugiperda* showed obvious taxis to blue (21.43% and 18.57%) and purple (17.13% and 15.70%), which was significantly higher than that of green, yellow and red. In the feeding test, it was found that the adults had no obvious preference. The female adults obviously preferred yellow (40.27%) and green (40.17%) to lay their eggs. The above results not only enrich the theory of insect dim-light vision ecology in theory, but also provide a certain behavioral basis for further study on the color vision mechanism of *S. frugiperda* and scientific basis for the physical prevention and control of *S. frugiperda* using insect color vision in application.

Key words *Spodoptera frugiperda*; dim-light color vision; taxis; feeding; oviposition selection

昆虫在寻找寄主、定位、取食、求偶及产卵等行为过程中, 视觉发挥着巨大作用^[1-6]。大多数昆虫种类尤其日出型昆虫具有良好的颜色视觉辨别能力。比如, 蜜蜂、蝴蝶等能够利用颜色信号快速、准确地定位到不同颜色的花朵, 取食、采集花粉和花蜜^[7-8]; 一些日出型昆虫种类对不同颜色粘虫板的趋性存在

差异, 且对不同颜色表现出不同程度偏好性的行为反应^[9-14]。Bullas-Appleton 等^[15]发现马铃薯小绿叶蝉 *Empoasca fabae* 对化学气味的刺激反应不明显, 在寄主寻找过程中视觉作用远大于嗅觉, 对光谱上绿光波段刺激有明显的偏好, 对蓝色和黄色波谱刺激有避光反应。

收稿日期: 2022-07-07

修订日期: 2022-09-14

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(212102110460); 河南省重大公益专项(201300111500); 国家自然科学基金青年基金(32001902); 国家小麦产业体系地下害虫岗位(CARS-03); 河南省农业科学院基本科研业务费(2021ZC42)

* 通信作者 E-mail: 鲁传涛 luchuantao@yeah.net; 武予清 yuqingwu36@hotmail.com

一般认为,由于夜间微光环境的限制,多数夜出型昆虫与人类一样只能看到目标物的灰色影子,无法识别颜色。事实上,夜间自然环境中的颜色信息和白天一样丰富多彩,差异明显,可以强烈刺激某些夜出型昆虫的颜色视觉^[16]。比如,夜出型蛾类昆虫可以感知特定光谱范围的光刺激,表现出不同程度的趋性^[17-18];在产卵过程中其对特定颜色表现出强烈偏好性^[19-21],但是夜出型昆虫微光视觉的概念并未明确定义。Kelber 等^[22]首次提出夜出型昆虫和日出型昆虫一样具有强大的颜色视觉能力,在其取食、产卵等行为活动中起着至关重要的作用。研究发现红天蛾 *Deilephila elpenor* 能在昏暗的夜晚准确分辨花朵颜色,经过训练、学习,即使星光条件下(0.000 1 cd/m²)仍能在一系列灰色中识别出蓝色和黄色,进而觅食,其选择准确率高达 80% 以上。同等条件下,人类则无微光识别颜色能力。目前,利用昆虫颜色视觉的光反应特性,研发的灯光和色板诱驱技术,已成为农林害虫绿色防控的重要措施之一,深入研究昆虫光色视觉及其行为特别是夜间微光环境下的颜色视觉反应具有重要的理论意义和应用价值。

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 隶属鳞翅目 Lepidoptera 夜蛾科 Noctuidae 灰翅夜蛾属 *Spodoptera*,是联合国粮农组织全球预警的重大迁飞性农业害虫之一,尤其近几年来在全球各国迅速蔓延,已成为热点害虫之一。目前,对草地贪夜蛾的研究,主要涉及生物学习性、预警技术、迁飞规律、化学生态学及分子生物学等方面,而关于颜色视觉的研究甚少,草地贪夜蛾属夜出型昆虫,是否与大多数夜出型蛾类昆虫一样,能够在微光环境下识别颜色、定位寄主、取食、交配和产卵等生物学活动,这些尚不清楚。因此,本研究通过室内行为学测试,研究了微光环境下(光亮度为 0.004 3 cd/m²)草地贪夜蛾对 5 种颜色卡纸的行为响应,试图为进一步揭示草地贪夜蛾微光视觉的行为机理提供理论基础,也为利用其颜色视觉进行物理防控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

草地贪夜蛾虫源采自河南省信阳市(114.09°E,

32.15°N)玉米田(品种为‘郑单 958’,常规管理),在温度(25±1)℃、相对湿度(70±10)%,光周期 L//D=14 h//10 h 条件下饲养至第 5 代。幼虫用玉米叶在养虫笼(长×宽×高=30 cm×30 cm×30 cm)内饲养至老熟幼虫,将老熟幼虫放入装有蛭石的保鲜盒(20 cm×10 cm×10 cm)内。蛹期鉴定雌雄后,分别于养虫笼内羽化(产卵试验的雌雄试虫混养),成虫每天饲喂 10%蔗糖水。选择健壮活泼的 3~5 日龄雌雄成虫供试。

1.2 主要试验器材

光照培养箱(RXM-358B),宁波江南仪器厂;光纤光谱仪(Avantes AvaSpec-ULS3648),购于北京爱万提斯科技有限公司;监控摄像设备(萤石 EZ-VIZ),购于杭州海康威视数字技术股份有限公司;辐照计(FZ-A),北京师范大学光电仪器厂生产;5 种颜色的彩色卡纸:紫色、蓝色、绿色、黄色和红色(包括了长波和短波的常规颜色,光谱值如表 1 所示),得力集团有限公司生产;养虫笼(100 目塑料网纱,长×宽×高=90 cm×90 cm×90 cm),塑料杯(直径 10 cm,高 6 cm),亚克力长方形透明盒(长×宽×高=30 cm×30 cm×40 cm),亚克力圆管(直径 20 cm,长度 20 cm,两端未封口),一次性培养皿(直径 6 cm)。

表 1 不同颜色卡纸的波长峰值
Table 1 The wavelength peak of paper cards with different colors

颜色 Color	波长峰值/nm Wavelength peak
紫色 Purple	381
蓝色 Blue	476
绿色 Green	517
黄色 Yellow	589
红色 Red	658

1.3 试验方法

1.3.1 不同颜色卡纸对草地贪夜蛾成虫的引诱效果

试验在暗室中进行,温度(25±1)℃,相对湿度(70±10)%,光亮度为 0.004 3 cd/m²。养虫笼放入暗室内,塑料杯分别用 5 种颜色卡纸包裹严实,杯内装入半杯水(用于捕捉趋色落入杯中的试虫),随机放入养虫笼的 4 个角和中间,每日随机调换位置。每日 18:00 将 3~5 日龄草地贪夜蛾雌雄成虫各 30 头放入养虫笼,次日早上 8:00 统计每个杯中的草地

贪夜蛾雌雄成虫数量。连续测试 7 d,用过的试虫不重复使用。

诱集率 = 某种颜色杯子中的成虫数量/试虫总数 $\times 100\%$ 。

1.3.2 颜色对草地贪夜蛾成虫取食行为的影响

试验条件同上。5 个培养皿(直径 6 cm)均充满琼脂,上面分别覆盖等径的 5 种颜色圆形卡纸,将盛有 10%蔗糖水的离心管插入皿中央。此后,将 5 个培养皿同样放入亚克力透明盒中的 4 个角和正中心位置,每日随机调换位置。每日 18:00 将 3~5 日龄草地贪夜蛾雌雄成虫各 5 头放入盒中,用监控录像设备记录草地贪夜蛾成虫取食蔗糖水的情况(1 头成虫每取食 1 次记为 1 虫次),至次日 6:00 止。连续测试 7 d,统计其在不同颜色卡纸中取食蔗糖水的虫次。

1.3.3 颜色对草地贪夜蛾成虫产卵选择性的影响

试验条件同上。以白色卡纸为参比色,将 1 种彩色卡纸和白色卡纸(长 $\times$ 宽=20 cm $\times$ 10.47 cm)各 3 块等面积间隔贴在亚克力圆管(直径 20 cm,长 20 cm)内壁上,管内放入健壮 3 日龄成虫 10 对,饲以浸透 10%蔗糖水的脱脂棉,圆管两开口端内用塑

料膜(塑料膜上扎数个小孔以透气)外用纱网罩封。每处理各 4 次重复,每天调查产卵情况,直到产卵结束。产卵选择率 = 某种颜色卡纸上的落卵量/总落卵量 $\times 100\%$ 。

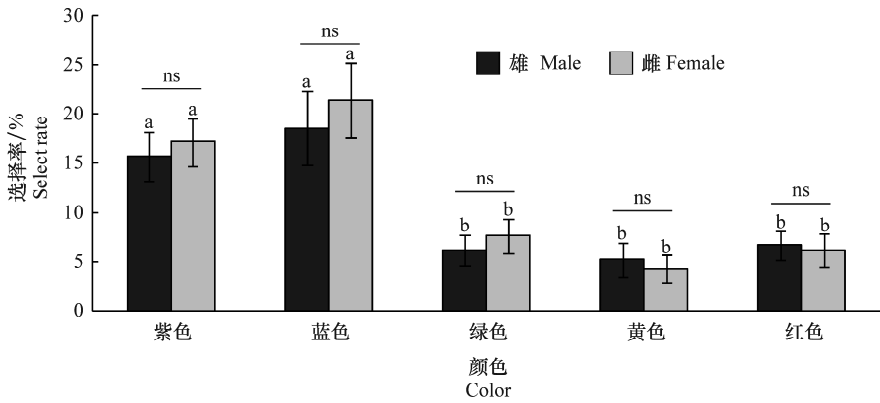
1.4 数据统计与分析

利用 Excel 进行数据整理分析,作图。百分比数据经反正弦转换,用 SPSS 19.0 软件进行统计分析。不同颜色处理间进行单因素方差分析(one-way ANOVA),并采用 Tukey 法检验处理间差异显著性;雌雄成虫之间的差异显著性采用 t 测验。

2 结果与分析

2.1 5 种颜色卡纸对草地贪夜蛾成虫的引诱效果

不同颜色卡纸对草地贪夜蛾成虫的诱集效果存在差异(雌: $df=4$, $F=10.028$, $P<0.001$;雄: $df=4$, $F=6.851$, $P<0.001$)其中,蓝色和紫色对草地贪夜蛾雌雄成虫诱集效果最佳,雌雄虫对不同颜色的选择率分别为:蓝色 21.43%和 18.57%,紫色 17.13%和 15.70%,显著高于绿色、黄色和红色($P<0.05$),而蓝色和紫色之间差异不显著。每种颜色对雌雄成虫的诱集量无显著差异($P>0.05$)。



同一性别的柱上不同字母表示经Tukey法检验差异显著($P<0.05$)。ns表示雌雄间经 t 测验差异不显著
The different letters on the bar for the same sex moth indicate significant difference at 0.05 by Tukey's test. ns indicated insignificant difference between male and female by t -test

图 1 5 种颜色卡纸对草地贪夜蛾成虫的诱集效果

Fig. 1 Trapping effect of five colors on *Spodoptera frugiperda* adults

2.2 5 种颜色卡纸对草地贪夜蛾成虫取食偏好性的影响

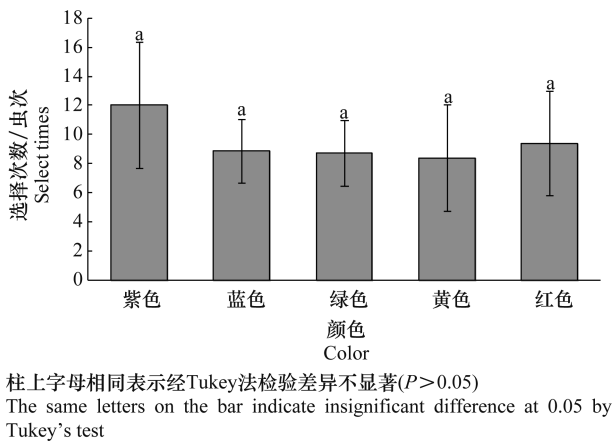
紫色、红色、蓝色、绿色、黄色处理组草地贪夜蛾取食选择虫次依次为 12、9.4、8.87、8.73 虫次和 8.4 虫次(图 2)。5 种颜色处理之间无显著差异($P>0.05$),表明 5 种颜色对草地贪夜蛾雌雄成虫取食无显著影响。

2.3 5 种颜色卡纸对草地贪夜蛾产卵选择性的影响

2.3.1 草地贪夜蛾对 5 种颜色卡纸的产卵选择率

5 种颜色对草地贪夜蛾产卵选择性存在显著影响($df=4$, $F=4.844$, $P<0.05$),以白色作为参比色,各颜色卡纸的产卵选择率依次为黄色(40.27%)>绿色(40.17%)>紫色(26.10%)>蓝色(24.51%)>红色(17.38%),其中对黄色和绿色卡

纸的选择率显著高于紫色、蓝色和红色,而黄色和绿色之间差异不显著($P>0.05$)。表明草地贪夜蛾产卵偏嗜黄色和绿色。

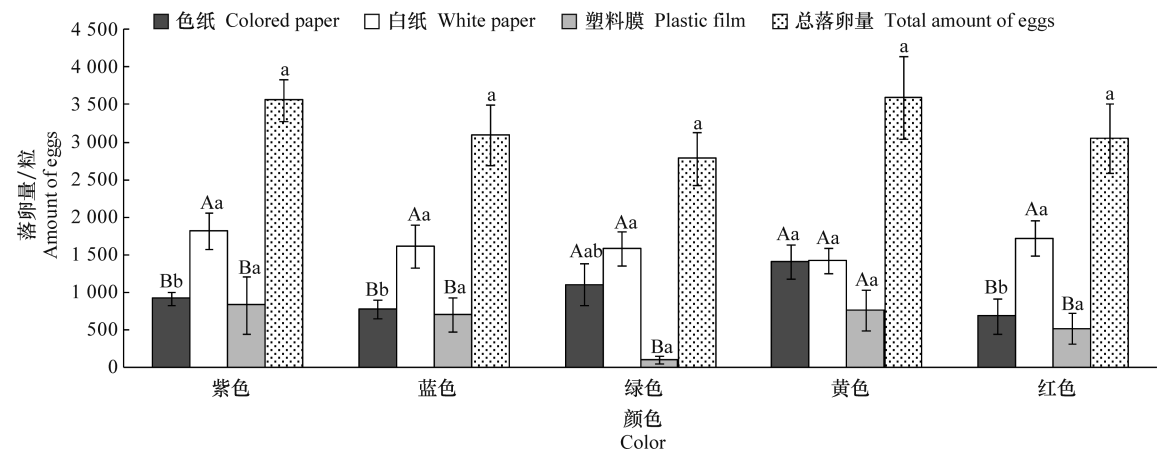


柱上字母相同表示经Tukey法检验差异不显著($P>0.05$)
The same letters on the bar indicate insignificant difference at 0.05 by Tukey's test

图2 5种颜色处理下草地贪夜蛾成虫取食选择虫次
Fig. 2 Number of feeding selection of *Spodoptera frugiperda* in five color treatments

2.3.2 5种颜色环境下各介质的落卵量及卵总量差异性分析

不同颜色处理组,各介质上的草地贪夜蛾落卵量及总落卵量结果(图4)显示,以白色作为参比时,

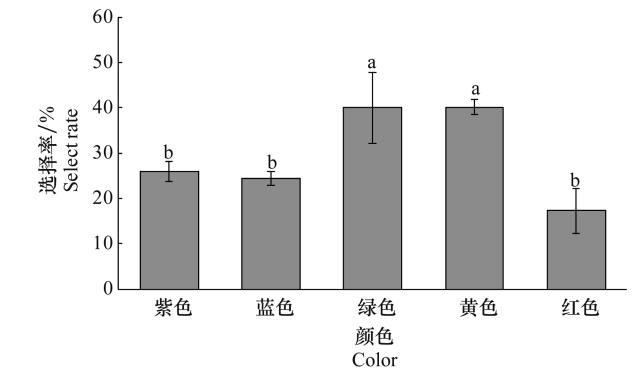


同种介质的柱子上不同小写字母表示不同处理间卵量差异显著($P<0.05$); 同种颜色处理组中相同大写字母表示不同介质之间差异不显著($P>0.05$)
The different lowercase letter on the bar for the same medium indicate significant difference among different treatments at 0.05 level, and the same uppercase letter in same treatment group indicate insignificant difference among different media

图4 5种颜色处理中草地贪夜蛾在各介质上的落卵量及卵总量
Fig. 4 Egg amount on different media and total egg amount laid by *Spodoptera frugiperda* on each substrate under five color treatments

对同种颜色处理组中不同介质上的落卵量进行的差异显著性分析,结果发现,除黄色处理中黄色卡纸、白纸和塑料膜3种介质之间的落卵量无显著差异外,其他4种颜色处理组中不同介质上的落卵量均存在显著差异(紫色: $df=2$, $F=4.224$, $P<$

5种颜色卡纸上的落卵量存在显著差异($df=4$, $F=4.017$, $P<0.05$);各颜色卡纸的落卵量依次为:黄色(1411.33粒) $>$ 绿色(1101.33粒) $>$ 紫色(917.67粒) $>$ 蓝色(780.83粒) $>$ 红色(681粒),在黄色卡纸上的落卵总量显著高于紫色、红色和蓝色($P<0.05$),红色纸上落卵量最少。白纸、塑料膜上的落卵量以及落卵总量在不同处理间无显著差异($P>0.05$)。



柱上字母不同表示经Tukey法检验差异显著($P<0.05$)
The different letters on the bar indicate significant difference at 0.05 by Tukey's test

图3 草地贪夜蛾对5种颜色卡纸的产卵选择率
Fig. 3 Oviposition selection rate of *Spodoptera frugiperda* on five colored cardboards

0.05;蓝色: $df=2$, $F=5.006$, $P<0.05$;绿色: $df=2$, $F=13.203$, $P<0.05$;红色: $df=2$, $F=13.203$, $P<0.05$);其中,绿色处理组中绿色卡纸和白纸上的落卵量显著高于塑料膜的,但绿色卡纸和白纸二者之间无显著差异($P>0.05$);在紫色、蓝色

和红色处理组,白纸上的落卵量显著高于色卡纸和塑料膜上的,而色卡纸与塑料膜上落卵量之间无显著差异。

3 结论与讨论

众所周知,夜晚微弱光线下人类不能识别颜色,但是昆虫有着强大的微光视觉(dim-light vision)能力^[22]。研究发现,蛾类和蜉蝣等夜出型昆虫的微光视觉能力卓越,能在夜间或低光照强度下清晰、准确地获取颜色、大小、偏振光和运动状态等有效的视觉信息,呈现和日出型昆虫相似的视觉行为活动^[9, 22-25]。杨小凡等^[19]认为,微光视觉是指光照强度低于 0.3 lx (0.0207 cd/m^2) 的微光条件下能够保持良好或较好视觉的能力。本研究测试了光照强度 0.0043 cd/m^2 的条件下,草地贪夜蛾对不同颜色刺激的行为响应,结果表明,与大多数夜行性动物一样,草地贪夜蛾具有较强的微光颜色视觉能力。

本研究显示,微光环境下草地贪夜蛾成虫能够辨别不同的颜色,对紫色和蓝色表现出明显的趋向性,其对紫色的偏好特性与 Mitchell 等^[26]的研究结论一致。目前,利用颜色诱捕日出型昆虫的研究报道较多,但微光环境下利用颜色诱捕夜出型蛾类害虫的研究甚少(或未见报道)。蒋月丽^[13]研究发现,蓝色诱盆与性信息素结合对梨小食心虫 *Grapholita molesta* 引诱作用略高于其他颜色;李传仁等^[27]研究了无化学诱剂的条件下,粉红、蓝和绿色 3 种诱盆对棉田昆虫的诱集效果,结果发现蓝色诱盆对棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 和银纹夜蛾 *Plusia agnata staudinger* 具有较好的诱集效果,与本研究草地贪夜蛾对蓝色趋性明显的结论类似。这些结论至少部分说明夜蛾类害虫在夜间微光活动过程中对蓝色刺激较敏感,由此可利用此特性提高蛾类害虫的监测和防控效率,亦可将自发光的灯具和信息素结合,最大程度地提升诱集效果。

胡璞^[28]研究发现棉铃虫夜间访花时明显偏好蓝色和黄色的花;烟草天蛾 *Manduca sexta* 在夜间访花过程中也先天偏好蓝色,但是训练后其偏好颜色会改变^[29]。本研究发现,在 5 种颜色的趋向试验中,草地贪夜蛾明显偏好蓝色和紫色,但在取食测试中却无明显的颜色偏好,表明在该蛾取食过程中嗅觉信号可能占主导地位,具体原因有待进一步深入

研究。

视觉线索在昆虫寻找产卵场所的过程中起着重要的作用^[30]。夜蛾类昆虫在产卵过程中对不同颜色的基质表现出不同程度的偏好性,如黏虫 *Mythimna separata* 雌蛾偏好在黄褐色纸张上产卵,其产卵量和产卵次数明显高于绿色纸张上^[20];梨小食心虫在产卵过程中明显偏好黄色和绿色基质^[32];苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* 明显偏嗜粉红色,其产卵选择率和产卵量明显高于其他颜色^[21]。本研究发现,以白色作为参比色,在 5 种颜色中,草地贪夜蛾成虫在产卵过程中明显偏好黄色和绿色,其产卵选择率显著高于紫色、蓝色和红色,该结论与杨小凡等^[19]对梨小食心虫的研究结论一致。颜色对不同介(基)质落卵量和落卵总量的影响分析发现,5 种不同颜色环境下的白纸、塑料膜上的产卵量及产卵总量之间无显著性差异,说明不同颜色的刺激不会引起该环境下某种介质上产卵量和产卵总量的变化。但在同种颜色不同介质之间的落卵量不尽相同,黄色组,3 种介质之间落卵量无显著差异;绿色处理组,绿色卡纸和白纸上的落卵量明显高于塑料膜上的;在紫色、蓝色和红色处理组,均是白纸上落卵量显著高于色卡纸和塑料膜上的,色卡纸和塑料膜之间无显著差异。这些结果进一步说明,草地贪夜蛾成虫产卵偏嗜黄色和绿色。关于参比色(白纸)介入上述 5 种颜色环境后草地贪夜蛾产卵介质选择性发生变化的影响因素,还有待更深入的研究。

综上所述,微光环境下,5 种不同颜色的卡纸对草地贪夜蛾成虫趋向、取食及产卵活动各有不同的影响,在趋向过程中明显趋向蓝色和紫色,在产卵过程中明显偏好黄色和绿色,而在取食过程中没有明显的颜色偏好,这些不同的影响特性,说明草地贪夜蛾成虫的微光视觉行为响应可能存在复杂的环境诱因及内在的行为动机,甚至两者兼而有之,具体原因有待于更深层次的系统研究。该研究在理论上丰富了昆虫微光视觉生态学理论,也为深入研究草地贪夜蛾颜色视觉行为机理提供了基础,应用上为利用昆虫颜色视觉研发草地贪夜蛾物理防控措施提供了科学依据。

参考文献

[1] CRONIN T W, JOHNSEN S, MARSHALL N J, et al. Visual

- ecology [M]. Princeton: Princeton University Press, 2014: 1 - 178.
- [2] REEVES J L. Vision should not be overlooked as an important sensory modality for finding host plants [J]. Environmental Entomology, 2011, 40(4): 855 - 863.
- [3] REEVES J L, LORCH P D. Visual plant differentiation by the milfoil weevil, *Euhrychiopsis lecontei* Dietz (Coleoptera: Curculionidae) [J]. Journal of Insect Behavior, 2009, 22(6): 473 - 476.
- [4] REEVES J L, LORCH P D, KERSHNER M W. Vision is important for plant location by the phytophagous aquatic specialist *Euhrychiopsis lecontei* Dietz (Coleoptera: Curculionidae) [J]. Journal of Insect Behavior, 2009, 22(1): 54 - 64.
- [5] KIM K N, JO Y C, HUANG Z J, et al. Influence of green light illumination at night on biological characteristics of the oriental armyworm, *Mythimna separata* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. Bulletin of Entomological Research, 2020, 110: 136 - 143.
- [6] KIM K N, HUANG Q Y, LEI C L, et al. Advances in insect phototaxis and application to pest management: a review [J]. Pest Management Science, 2019, 75: 3135 - 3143.
- [7] KINOSHITA M, SHIMADA N, ARIKAWA K. Colour vision of the foraging swallowtail butterfly *Papilio xuthus* [J]. Journal of Experimental Biology, 1999, 202(2): 95 - 102.
- [8] BLACKISTON D, BRISCOE A D, WEISS M R. Color vision and learning in the monarch butterfly, *Danaus plexippus* (Nymphalidae) [J]. Journal of Experimental Biology, 2011, 214(3): 509 - 520.
- [9] DACKÉ M, NILSSON D E, SCHOLTZ C H, et al. Animal behaviour: Insect orientation to polarized moonlight [J/OL]. Nature, 2003, 424(6944): 33. DOI: 10.1038/424033a.
- [10] DÖRING T F, CHITTKA L. Visual ecology of aphids: a critical review on the role of colours in host finding [J]. Arthropod-Plant Interactions, 2007, 1(1): 3 - 16.
- [11] BORST A. Drosophila's view on insect vision [J]. Current Biology, 2009, 19(1): 36 - 47.
- [12] 蒋月丽, 魏永平, 汪晓光. 系列粘虫板对美洲斑潜蝇和温室白粉虱诱捕效果研究[J]. 西北农业学报, 2007, 16(2): 237 - 240.
- [13] 蒋月丽. 不同颜色诱捕器诱集昆虫多样性及诱捕效果研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [14] 蒋月丽, 武予清, 段云, 等. 不同颜色诱捕器对直纹稻弄蝶的诱集效果[J]. 河南农业科学, 2009(12): 86 - 91.
- [15] BULLAS-APPLETON E S, OTIS G, GILLARD C, et al. Potato leafhopper (Homoptera: Cicadellidae) varietals preferences in edible beans in relation to visual and olfactory cues [J]. Environmental Entomology, 2004, 33(5): 1381 - 1388.
- [16] 杨小凡, 路子云, 苑士涛, 等. 夜行性昆虫微光视觉行为及其视觉适应机制[J]. 昆虫学报, 2021, 64(12): 1455 - 1464.
- [17] AGEE H R. Histology of the compound eye of *Heliothis zea* [J]. Annals of the Entomological Society of America, 1971, 64(1): 85 - 88.
- [18] 杨智勇, 吴卫国, 冯汉平, 等. 棉铃虫和玉米螟成虫复眼光反应特性的比较研究[J]. 生物物理学报, 1998, 14(4): 713 - 718.
- [19] 杨小凡, 马春森, 范凡, 等. 颜色对梨小食心虫产卵选择性的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(11): 2971 - 2977.
- [20] 尹姣, 薛银根, 乔红波, 等. 粘虫选择产卵场所的意义及颜色在定位中的作用[J]. 生态学报, 2007, 27(6): 2483 - 2489.
- [21] 秦欢, 林克剑, 王少山, 等. 颜色对苹果蠹蛾产卵选择性的影响[J]. 环境昆虫学报, 2022, 44(1): 250 - 256.
- [22] KELBER A, BALKENIUS A, WARRANT E J. Scotopic colour vision in nocturnal hawkmoths [J]. Nature, 2002, 419(6910): 922 - 925.
- [23] SOMANATHAN H, KELBER A, BORGES R M, et al. Visual ecology of Indian carpenter bees II: adaptations of eyes and ocelli to nocturnal and diurnal lifestyles [J]. Journal of Comparative Physiology, 2009, 195(6): 571 - 583.
- [24] SPONBERG S, DYHR J P, HALL R W, et al. Luminance-dependent visual processing enables moth flight in low light [J]. Science, 2015, 348(6240): 1245 - 1248.
- [25] DREYER D, FROST B, MOURITSEN H, et al. The earth's magnetic field and visual landmarks steer migratory flight behavior in the nocturnal Australian bogong moth [J]. Current Biology, 2018, 28(13): 2160 - 2166.
- [26] MITCHELL E R, AGEE H R. Response of beet and fall armyworm moths to different colored lamps in the laboratory and field [J]. Journal of Environmental Science & Health Part A Environmental Science & Engineering, 1981, 16(4): 387 - 396.
- [27] 李传仁, 齐力. 三种颜色诱盆在棉田的诱虫效果初步观察[J]. 昆虫知识, 2005, 42(2): 190 - 192.
- [28] 胡璞. 棉铃虫成虫访花信息的研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2018.
- [29] GOYRET J, PFAFF M, RAGUSO R A, et al. Why do *Manduca sexta* feed from white flowers? Innate and learnt colour preference in a hawkmoth [J]. Naturwissenschaften, 2008, 95: 569 - 576.
- [30] EGELHAF M, KERN R. Vision in flying insect [J]. Current Opinion in Neurobiology, 2002, 12(6): 699 - 706.
- [31] 魏国树, 张青文, 周明群, 等. 不同光波及光强度下棉铃虫 (*Helicoverpa armigera*) 成虫的行为反应[J]. 生物物理学报, 2000, 16(1): 89 - 95.
- [32] 于海利. 梨小食心虫 *Grapholitha molesta* Busck 的趋光性及绿光对其生物学特性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.

(责任编辑: 田 喆)