锈赤扁谷盗成虫趋光行为研究*

王争艳** 苗世远 鲁玉杰

（河南工业大学粮油食品学院，河南粮食作物协同创新中心，
粮食储藏安全河南省协同创新中心，郑州 450001）

摘 要 **【目的】** 研究灯光诱捕技术防治锈赤扁谷盗 *Cryptolestes ferrugineus*（Stephens）的可行性。**【方法】** 在实验室条件下测定了锈赤扁谷盗成虫对不同光源的趋光反应。**【结果】** 锈赤扁谷盗成虫对实验所选取的光源都有一定的趋性。在可见光中，对主波长为 575 nm 的光源的趋性最强，对 430、495、620、530 和 450 nm 光源的趋性依次降低。在紫外光中，对主波长为 385 nm 的光源的趋性显著高于对主波长为 365、375 和 395 nm 的光源；1~10 日龄的锈赤扁谷盗成虫，随日龄的增加，成虫趋光性先增强后有所减弱；雌虫的趋光性高于雄虫，且交配状态会影响雌虫和雄虫的趋光性。交配会抑制雄虫的趋光性，但是交配后的雌虫的趋光性增强；短期饥饿处理和灯光经历对害虫趋光性无显著影响。**【结论】** 锈赤扁谷盗成虫对光波长的选择偏好性证实了其灯光诱捕技术的可行性。

关键词 锈赤扁谷盗，趋光性，光源波长，日龄，交配状态

Phototaxis of adult *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens)

WANG Zheng-Yan** MIAO Shi-Yuan LU Yu-Jie

(School of Food Science and Technology, Collaborative Innovation Centre of Henan Grain Crops, Henan Collaborative Innovation Centre of Grain Storage and Security, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract **[Objectives]** To verify the feasibility of light trapping as a means of controlling *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens). **[Methods]** The phototaxis of *C. ferrugineus* adults was tested with different lights under laboratory conditions. **[Results]** *C. ferrugineus* adults showed positive phototaxis to all lights tested. Among the visible lights tested, that with a main wavelength of 575 nm elicited the highest phototaxic response, followed by those with main wavelengths of 430, 495, 620, 530 and 450 nm. Among the ultraviolet lights tested, that with a main wavelength of 385 nm elicited the highest phototaxic response, followed by those with main wavelengths of 365, 375 and 395 nm. Phototaxis in one to 10 day old beetles initially increased, stabilized, and then declined to some extent with age. Females exhibited stronger phototaxis than males. In addition, mating status had a significant effect on the phototaxis of both males and females; phototaxis in males was significantly inhibited by mating but mated females showed stronger phototaxis than virgin females. Short-term starvation and prior experience of the same light source did not influence phototaxis. **[Conclusion]** Preference of adult *C. ferrugineus* for specific light wavelengths confirms the feasibility of light trapping as a means of controlling this pest.

Key words *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens), phototaxis, wavelength, age, mating status

锈赤扁谷盗 *Cryptolestes ferrugineus*（Stephens）属鞘翅目扁谷盗科，为粉食性储粮害虫，其成虫和幼虫均可危害原粮和成品粮。锈赤扁谷盗繁殖能力强，很容易在粮仓内迅速大量繁殖，并诱发赤拟谷盗 *Tribolium castaneum*（Herbst）和书虱 *Liposcelis* spp.等大量增殖，引起粮堆的局部发热和霉变，严重危害储粮安全。由于长期单一使用磷化氢熏蒸，导致锈赤扁谷盗产生抗药性猖獗为害，已成为当前国内粮食储藏最棘手的难题（朱邦雄等，2005），因此，开发新的防治方法势在必行。

*资助项目 Supported projects：河南工业大学人才基金（150434）；国家自然科学基金项目（31272360）

**通讯作者 Corresponding author，E-mail：zywangedu@163.com

收稿日期 Received：2015-09-22，接受日期 Accepted：2016-01-25

利用昆虫趋光性诱集害虫，可以用来监测害虫种类和数量，也可以结合信息素等引诱剂对害虫进行诱杀。相比于其它防治方法，灯光诱捕防治无污染，无残留，不会对环境和农产品等造成危害，有利于延缓害虫抗药性、降低防治成本，减轻环境污染（靖湘峰和雷朝亮，2004；程文杰等，2011），符合生态治理的发展方向。目前，诱虫灯已成为监测和诱杀害虫的重要工具，在农林害虫的防治中起重要作用(Katsuki *et al.*，2012)。但是，在储粮害虫防治方面，仅有少数文章涉及节能灯、黑光灯、紫外高压灯的实仓害虫诱捕效果的评价（李智深等，2013)。这些诱虫灯大多是混合连续光源，诱虫谱广，对天敌和有益昆虫同样具有引诱作用，防治的靶标性不强。实际上，各类昆虫的趋光性存在着差异。除光源的波长外，害虫自身生理状态也会影响昆虫的趋光行为（程文杰等，2011；边磊等，2012)。

基于此，本实验评价光源波长和昆虫自身生理因素，如对性别、日龄、交配状态、饥饿状态和先前经历对锈赤扁谷盗趋光行为的影响，以期筛选具有特异性的引诱光源，为灯光诱捕技术在储粮害虫综合治理中的应用提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试虫

试虫锈赤扁谷盗来自河南工业大学昆虫生态研究室，该品系于 2013 年 8 月采自山西省吕梁市，实验室内用全麦粉、燕麦片，碎麦粒和酵母粉按质量比 5∶4∶1∶1 配制饲料连续培养多代。饲养条件为（32.0±1）℃，(75±5）% RH 的全暗环境。在体视显微镜下通过检查成虫的触角和前胸背板辨别雌、雄虫。雄虫的串珠状触角较长，前胸背板后端收缩明显(唐培安等，2015)。

1.2　趋光行为测定装置

将玻璃板严密粘合而成的长方体（56 cm×8 cm×8 cm）用作锈赤扁谷盗趋光行为的测定装置。整个装置用黑色不透光的胶带粘贴严密，并设置可移开的上盖用来观察通道内试虫的分布情况。装置底部贴有整张白色滤纸便于昆虫爬行和计数并避免昆虫钻入缝隙躲藏。装置一端外部放置光源。自光源入射端至另一端将装置分为趋光通道，感光区和释放区 3 部分，各区长度分别为 40、8 和 8 cm。各区之间用不透光的玻璃板隔开，玻璃板与装置底部留有 0.5 cm 的间隙，作为昆虫爬行的通道。将趋光通道底部的滤纸每间隔 8 cm 做一标记线，依次将趋光通道分为 5 个区域，离光源最近处为 5 级区，最远处为 1 级区。利用 WGD-8A 组合式多功能光栅光谱分析仪确定实验所选用光源的主波长和半波带宽。实验共选取 10 个光源，分别为紫外光（4 种）、紫光、蓝光、翠绿光、绿光、黄光和红光光源，主波长分别为 365、375、385、395、430、450、495、530、575 和 620 nm，半波带宽均为 5 nm。光源通过装置前端的中心孔（d=3 cm）射入趋光通道。进行趋光行为观察之前，首先通过调整光源与观察装置的相对距离，保证昆虫释放处的光强一致。由于可见光与紫外光光强测定方法无法统一，因此将光强按照两个标准进行统一，即可见光强度为 1 500 lx，紫外光强度为 0.1 mW/cm^2。

1.3　锈赤扁谷盗趋光行为观察

从培养瓶中随机挑选特定生理状态的活跃成虫（5~10 日龄）放入培养皿中备用。仅在测定性别对趋光行为的影响时，对试虫进行性别区分，其它实验均选择雌雄混合种群。为消除实验准备过程中光经历对试虫趋光行为的影响，实验前将试虫放在全暗环境下适应 1 h 以上（魏国树等，2002；Shimoda and Honda，2013），然后将其转入观察装置的释放区域，5 min 后记录试虫在趋光通道内各区域的分布情况。每个处理中一次性释放 30 头试虫。每次测定的试虫均只使用一次。每个处理重复 6 次。所有实验均在自制的暗室内进行，测试的环境条件为(32.0±1)℃，(75±5）% RH。

观察锈赤扁谷盗的性别和生理状态对其趋光行为影响时，选用的试虫如下：研究性别对趋光行为的影响时，选取混合种群中的成虫（5~10 日龄），在显微镜下区分雌雄后观察某性别的趋光行为；研究成虫交配状态对趋光行为的影响

时，首先将羽化当日的成虫在显微镜下区分雌雄后分开饲养 4 d 后观察未交配雌虫和雄虫的趋光行为。另外选择一批羽化当日的成虫，区分雌雄后放于小玻璃管中进行单对培养，使其交配 4 d 后，将已交配的雌雄分开测定已交配雌虫或雄虫的趋光行为；观察日龄的影响时，分别选取羽化后 1、4、7、10 日龄的试虫分别进行测定；观察饥饿处理的影响时，将试虫从培养瓶中挑出后放入空培养瓶中对其饥饿处理 3 d 后测定，以同日龄的正常取食的试虫为对照；观察光照经历的影响时，使试虫与某光源接触 3 h 后，在全暗的环境中继续培养 3 d 后，观察其对同种光源的趋光行为，以同日龄的未经光照处理的作为对照。

1.4 数据处理

记录趋光通道内各分布区的试虫数和总试虫数后，计算趋光指数（姚渭等，2005）。试虫对某种光源的趋光指数越大，表明试虫对其趋光性越强。

$$\text{趋光指数}(\%) = \frac{\sum(\text{分布级直} \times \text{该级分布虫数量})}{\text{总试虫数} \times \text{最高级数}} \times 100$$

利用方差分析和 Tukey 多重比较，评价光源种类和日龄对试虫趋光行为的影响。利用 Student's *t*-检验评价性别、交配状态、饥饿处理和光经历对试虫趋光行为的影响。利用 SPSS 16.0 软件进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 光源波长对锈赤扁谷盗趋光行为的影响

锈赤扁谷盗成虫对 10 种光源均有一定的趋性（趋光指数>0）。在可见光区，试虫对主波长为 575 nm 的光源的趋光指数最高，说明试虫对该光源的趋性最强，其次为对主波长为 430 nm 的光源，而对主波长 450、495、530 和 620 nm 光源的趋性较弱。在紫外光区，试虫对主波长为 385 nm 的光源的趋性显著高于对主波长为 365、375 和 395 nm 的光源（$P<0.05$）（图 1）。

2.2 锈赤扁谷盗趋光行为的性别差异

在 10 种光源下，锈赤扁谷盗雌虫的趋光指数均高于雄虫。特别是当光源的主波长为 365、430、450、530、575 和 620 nm 时，雌虫的趋光指数显著高于雄虫（$P<0.05$）（图 2）。

2.3 日龄对锈赤扁谷盗趋光行为的影响

双因素方差分析结果表明，日龄对锈赤扁谷

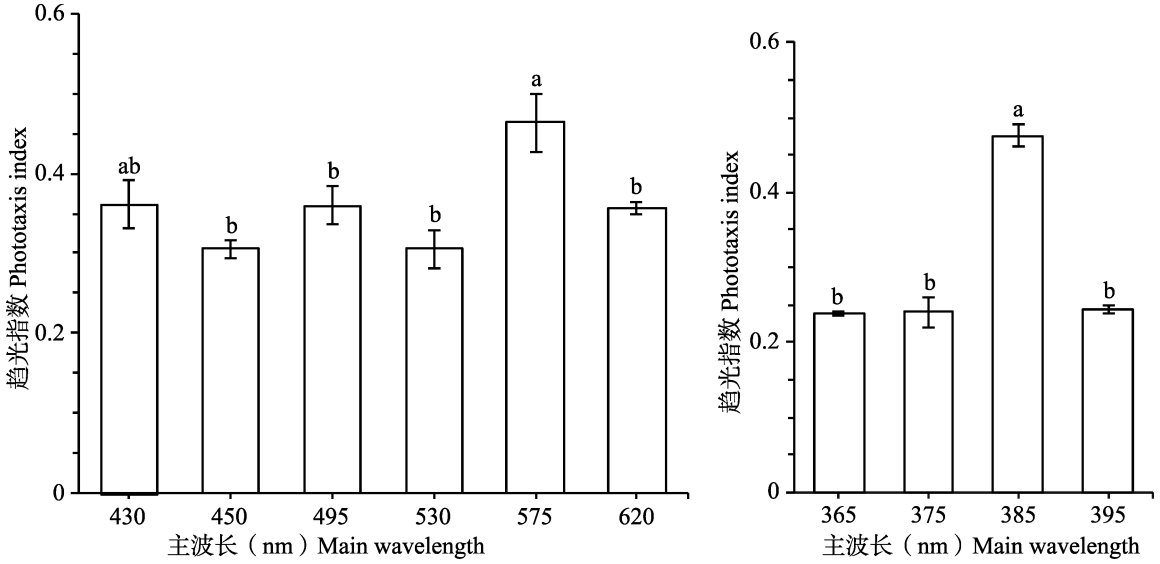

图 1 不同光源下锈赤扁谷盗成虫的趋光指数

Fig. 1 Phototaxis indexes of *Cryptolestes ferrugineus* adults under different lights

柱上标有相同字母的表示差异不显著（单因素方差分析，Tukey 检验，$P>0.05$）。

Histograms marked with the same letters are not significantly different by Tukey test ($P>0.05$).

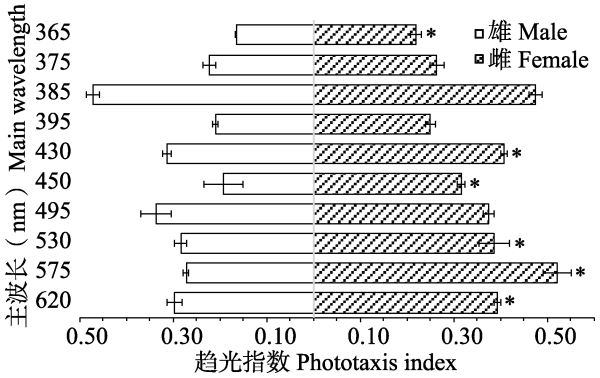

图 2　不同光源下锈赤扁谷盗成虫雌雄虫的趋光指数

Fig. 2　Phototaxis indexes of male and female adults of *Cryptolestes ferrugineus* under different lights

柱上同种光源下标*的数据差异显著（Student's *t*-检验，$P<0.05$）。下图同。

Histograms marked with a star with the same light are significantly different by Student's *t*-test ($P<0.05$). The same below.

盗成虫趋光性的影响显著（$df=3$，$F=936.1$，$P<0.05$）。其中，4 日龄和 7 日龄试虫的趋光性最强，10 日龄试虫的趋光性次之，1 日龄试虫的趋光性最弱。另外，在不同的波长光源下，1 日龄试虫的趋光指数差异不显著，而 4~10 日龄试虫的趋光指数差异显著（$P<0.05$）（表 1）。

2.4　交配状态对锈赤扁谷盗趋光行为的影响

双因素方差分析结果表明，交配状态对锈赤扁谷盗雄成虫的趋光指数有显著影响（$df=1$，$F=106.9$，$P<0.05$），表现为交配前的雄虫趋光指数显著高于交配后。交配状态对雌虫的趋光性指数也有显著影响（$df=1$，$F=85.1$，$P<0.05$），表现为交配后的趋光指数高于交配前。特别是在主波长为 385 nm 和 575 nm 的光源下，交配后的雌虫趋光性显著增加（$P<0.05$）（表 2）。

2.5　饥饿处理和光经历对锈赤扁谷盗趋光行为的影响

经饥饿处理 3 d 的锈赤扁谷盗成虫在灯光下爬行速度稍有减缓，但是向光源方向爬行的试虫数量有所增加，总体表现为饥饿处理组与对照组的趋光指数差异不显著（图 3）。具有同种光源光照经历的试虫与没有经历的试虫的趋光指数差异不明显（图 4）。

3　讨论

光源波长是影响昆虫趋光性的最主要的因素。尽管昆虫的敏感波长多集中在 365 nm 左右，但不同种间仍会有细微差别（程文杰等，2011）。如烟草甲 *Lasioderma serricorne*（Fabricius）最敏感的光波长为 530 nm，其次为 360 nm 的紫外光（Katsuki *et al.*，2013）；赤拟谷盗最敏感波长为 390 nm（Jackowska *et al.*，2007；Duehl *et al.*，2011）。在本实验中，锈赤扁谷盗成虫对主波长为 575 nm（黄光）和 385 nm（紫外）光源的趋性最强。利用昆虫光波长选择行为的差异，可以筛选特异性的诱捕波长，避免对天敌的大量诱杀。因此，进一步评价两种光波的混合增效作用及其对天敌的引诱作用，有助于明确灯光诱捕在锈赤扁谷盗种群治理中的可行性。

表 1　不同光源下不同日龄的锈赤扁谷盗成虫的趋光指数

Table 1　Phototaxis indexes of 1-10-day-old adults of *Cryptolestes ferrugineus* under different lights

日龄 Ages（d）	光源的主波长（nm）Main wavelength of the light					
	385	395	430	495	575	620
1	0.109±0.010cA	0.109±0.010dA	0.114±0.010cA	0.106±0.006cA	0.121±0.008cA	0.096±0.016cA
4	0.614±0.011aA	0.422±0.018aD	0.409±0.009aD	0.437±0.018aD	0.561±0.014aB	0.495±0.0.10aC
7	0.590±0.006aA	0.358±0.015bC	0.400±0.011aC	0.413±0.012bC	0.560±0.007aA	0.471±0.012abB
10	0.506±0.032bA	0.304±0.020cC	0.397±0.010bB	0.382±0.003bB	0.467±0.017bA	0.454±0.015bA

表中数据为平均值±标准误，同一列数据后标有相同小写字母或同一行数据后标有相同大写字母表示差异不显著（双因素方差分析，Tukey 检验，$P>0.05$）。

Data in the table are mean±SE, and followed by the same lowercase letters in the same column or followed by the same capital letters in the same row are not significantly different by Tukey test for multiple comparisons and two-way analysis of variance ($P>0.05$).

表 2 不同光源下交配状态不同的锈赤扁谷盗成虫的趋光指数

Table 2 Phototaxis indexes of *Cryptolestes ferrugineus* adults in different mating statuses under different lights

性别 Sex	交配状态 Mating status	光源的主波长（nm）Main wavelength of the light					
		385	395	430	495	575	620
雌 Female	交配前 Virgin	0.470±0.021b	0.413±0.012a	0.417±0.009a	0.407±0.009a	0.500±0.021b	0.467±0.020b
	交配后 Mated	0.573±0.022a	0.433±0.009a	0.427±0.015a	0.467±0.017a	0.587±0.023a	0.540±0.021a
雄 Male	交配前 Virgin	0.623±0.026a	0.363±0.012a	0.453±0.012a	0.497±0.015a	0.540±0.015a	0.490±0.021a
	交配后 Mated	0.443±0.019b	0.333±0.009a	0.397±0.012a	0.410±0.015b	0.480±0.012a	0.433±0.009a

表中数据为平均值±标准误，同一列同一性别数据后标有不同字母表示差异显著（Student's *t* 检验，$P<0.05$）。

Data in the table are mean±SE, and followed by different letters in the same column for the same gender are significantly different by Student's *t* test ($P<0.05$).

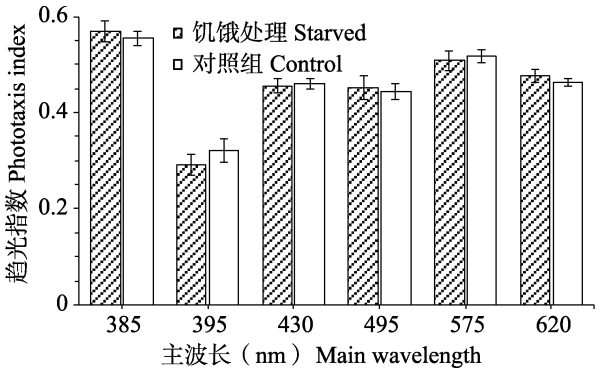

图 3 不同光源下经饥饿处理 3 d 的锈赤扁谷盗成虫的趋光指数

Fig. 3 Phototaxis indexes of *Cryptolestes ferrugineus* adults starved 3 d under different lights

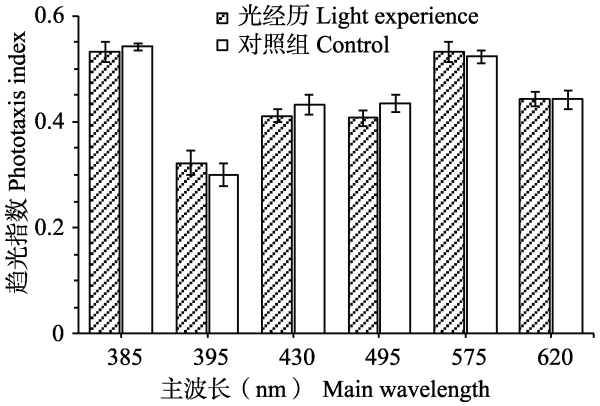

图 4 不同光源下具有光经历的锈赤扁谷盗成虫的趋光指数

Fig. 4 Phototaxis indexes of *Cryptolestes ferrugineus* adults with light experiences under different lights

锈赤扁谷盗成虫的趋光性是伴随其生长发育的一种重要机能，随着其求偶、交配和产卵等行为的发生，趋光行为的意义也有所转变。刚羽化的成虫还未发育完全，如体壁未全部角质化，行动较慢，不会飞行和交尾，趋光行为较弱，同时缺乏对光源波长的选择性。随着日龄的增加，成虫逐渐发育完全，4 日龄时成虫开始交配，此时成虫的趋光性达到峰值，这可能与复眼结构发育完全有关（魏国树等，2002；靖湘峰和雷朝亮，2004；边磊等，2012）。交配前雄虫的趋光性较强，而已交配雄虫的趋光性显著降低，说明雄虫的趋光行为受交配驱动。交配后雌虫即可产卵，在 7 日龄左右时达到产卵高峰期。与未交配的雌虫相比，已交配雌虫的趋光性显著增加，对于能在仓内和仓外环境中交互感染发生的锈赤扁谷盗而言，趋光行为可能在受孕雌虫的产卵地选择中起着一定的定向作用。

从防治角度来讲，锈赤扁谷盗雄虫在交配前的趋光行为较强，雌虫的趋光性高于雄虫，并且在交配前后都保持较高水平，这都有利于利用灯光诱捕来控制锈赤扁谷盗种群的数量。而先前的光经历不会影响锈赤扁谷盗的趋光行为，这将保证光源将先前从光源处逃逸的成虫重新引诱过来，提高灯光诱捕的效率。此外，短时间的饥饿处理对锈赤扁谷盗的趋光行为没有影响，意味着除了可以利用灯光进行实仓储粮害虫诱捕外，还可利用灯光诱捕藏匿于空仓缝隙中的锈赤扁谷盗。

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.]

Cheng WJ, Zheng XL, Wang P, Lei CL, Wang XP, 2011. Sexual difference of insect phototaxis behavior and related affecting 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.]

Duehl AJ, Cohnstaedt LW, Arbogast RT, Teal PEA, 2011. Evaluating light attraction to increase trap efficiency for *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of Economic Entomology*, 104(4): 1430-1435.

Jackowska M, Bao R, Liu Z, McDonald EC, Cook TA, Friedrich M, 2007. Genomic and gene regulatory signatures of cryptozoic adaptation: Loss of blue sensitive photoreceptors through expansion of long wavelength-opsin expression in the red flour beetle *Tribolium castaneum*. *Frontiers in Zoology*, 4(1): 24.

Jing XF, Lei CL, 2004. Advances in research on phototaxis of insects and the mechanism. *Entomological Knowledge*, 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.]

Katsuki M, Arikawa K, Wakakuwa M, Omae Y, Okada K, Sasaki R, Shinoda K, Miyatake T, 2013. Which wavelength does the cigarette beetle, *Lasioderma serricorne* (Coleoptera: Anobiidae), prefer? Electrophysiological and behavioral studies using light-emitting diodes (LEDs). *Applied Entomology and Zoology*, 48(4): 547-551.

Katsuki M, Omae Y, Okada K, Kamura T, Matsuyama T, Haraguchi D, Kohama T, Miyatake T, 2012. Ultraviolet light-emitting diode (UV LED) trap the West Indian sweet potato weevil, *Euscepes postfasciatus* (Coleoptera: Curculionidae). *Applied Entomology and Zoology*, 47(3): 285-290.

Li ZS, Liu FJ, Lu YJ, Wang ZY, 2013. Advances of prediction and control of pests by the insect electrocutor-light traps. *Grain Storage*, 42(6): 6-9. [李智深, 刘凤杰, 鲁玉杰, 王争艳, 2013. 利用光波测控储粮害虫研究进展. 粮食储藏, 42(6): 6-9.]

Shimoda M, Honda K, 2013. Insect reactions to light and its applications to pest management. *Applied Entomology and Zoology*, 48(4): 413-421.

Tang PA, Xue H, Kong DY, Song W, Wu HJ, 2015. Scanning electron microscopy observation on the antennal sensilla of *Cryptolestes ferrugineus*. *Plant Protection*, 41(1): 74-77. [唐培安, 薛昊, 孔德英, 宋伟, 吴海晶, 2015. 锈赤扁谷盗触角感器的扫描电镜观察. 植物保护, 41(1): 74-77.]

Wei GS, Zhang QW, Zhou MZ, Wu WG, 2002. Characteristic response of the compound eyes of *Helicoverpa armigera* to light. *Acta Entomologica Sinica*, 45(3): 323-328. [魏国树, 张青文, 周明牂, 吴卫国, 2002. 棉铃虫蛾复眼光反应特性. 昆虫学报, 45(3): 323-328.]

Yao W, Xue MZ, Du YP, 2005. The detection of phototaxis of the 8 species stored-product insects Studies on the phototaxis of *Helicoverpa armigera* (hübner). *Grain Storage*, 34(2): 3-5. [姚渭, 薛美洲, 杜燕萍, 2005. 八种储粮害虫趋光性的测定. 粮食储藏, 34(2): 3-5.]

Zhu BX, Liu GS, Liu R, Yuan AZ, Zhou JY, Yang CY, Deng SH, Zeng YA, 2005. Applying ultraviolet and high-tension light to control stored-grain insects. *Grain Storage*, 34(3): 7-13. [朱邦雄, 刘国述, 刘荣, 袁爱忠, 周剑宇, 阳昌义, 邓树华, 曾援埃, 2005. 应用紫外高压诱杀灯防治储粮害虫. 粮食储藏, 34(3): 7-13.]