

诱导光源光照梯度对蝗虫趋光响应的影响*

刘启航 周强

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

【摘要】 为了设计蝗虫 LED 诱导光源以及诱导光场的数字化调控,利用 LED 光源和行为试验装置,采用对比试验法,进行了不同时间段内蝗虫对紫、绿紫蓝光照梯度的趋光选择对比试验,分析了影响蝗虫趋光响应的原因。结果显示:蝗虫的趋光响应与光谱光梯度、蝗虫生物特征及环境因素有关;相同光梯度条件下,蝗虫对紫光的趋光响应优于绿紫蓝;不同光梯度条件下,蝗虫趋向于较强的光梯度,并当绿紫蓝光照度高出紫光的 10 倍以上时,蝗虫对绿紫蓝的选择高于紫光;蝗虫生物特征及环境因素制约了提高光照强度对蝗虫趋光响应在不同时间段内的增效作用;蝗虫对紫、绿紫蓝光谱光照敏感程度不同,蝗虫趋光行为上表现出了在夜间不同时间段内蝗虫对紫、绿紫蓝光的趋光敏感临界点及最适和最佳趋光光照度范围不同。

关键词: 蝗虫 诱导光源 光照梯度 趋光行为

中图分类号: S433.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)10-0105-05

Influence of Trapping Light Source Illuminance Gradient on Locusts' Phototactic Effect

Liu Qihang Zhou Qiang

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract

In order to make the research on the design of locusts' LED trapping light and digital control of induced light field by utilizing LED light source and homemade phototactic behavior trial equipment, the comparative tests of locusts' phototactic behavior for the choice of purple light, purple-blue-green light in different time periods were carried out by adopting contrast experimental method. The reason affecting locusts' phototactic behavior was analyzed. The results suggested that locusts' phototactic choosing behavior was relevant with spectrum, illuminance gradient, internal biological features and environmental factors under the same illuminance gradient. Locusts' phototactic behavior choosing purple light was higher than purple-blue-green, under the different illuminance gradient. Locusts tended to select the stronger illuminance gradient. When the illuminance gradient of purple-blue-green was 10 times higher than purple light, locusts' selective response to purple-blue-green light was superior to purple light. Locusts' internal biological features and environmental factors restricted the increasing effect of locusts' phototactic behavior by improving light intensity in the different time periods. The sensitive degree of locusts' phototactic response to purple light as well as purple-blue-green light at night was different, locusts' phototactic behavior showed that locusts' phototactic sensitive critical point, the optimal and the best range of light illuminance values, locusts responding to purple light as well as purple-blue-green light in the different time periods of night, was different.

Key words Locusts, Trapping light source, Illuminance gradient, Phototactic behavioral response

收稿日期: 2010-12-10 修回日期: 2011-01-20

* 教育部高校博士点基金资助项目(20060019012)

作者简介: 刘启航, 博士生, 主要从事光机电一体化物理捕蝗技术研究, E-mail: bjluiqihang@163.com

通讯作者: 周强, 教授, 主要从事光机电一体化物理捕蝗技术研究, E-mail: zq@cau.edu.cn

引言

为了治理蝗灾,利用蝗虫种群趋光特性的光电效应特征,蝗虫光电诱导捕集治理技术得以开发^[1-2]。然而蝗虫对不同光刺激的光活性、光适应、光定向运动行为反应不同以及蝗虫的昼行夜伏性活动规律,又制约了光场的诱导效果^[3-6]。可见,依据蝗虫视觉系统特征以及活动规律,优化蝗虫诱导光场光照梯度特征,改善诱导光场辐射效应的有效诱导范围,探讨影响蝗虫趋光诱导的因素,对蝗虫的诱导捕集以及蝗虫诱导光源的设计,有着重要的意义。因此,针对蝗虫视觉系统获得外界光全息最优化的视觉特点^[7],筛选出夜间不同时间段内蝗虫的最佳诱导光照梯度分布范围,用以调控蝗虫诱导光源的光照分布,将能获得灾害蝗虫的有效诱导和资源化利用。本文依据蝗虫趋光反应的可调控性和光波传播衰减原理,利用LED光源与自制的试验装置,在不同时间段内通过对比试验,观测蝗虫在不同光梯度下的趋光行为反应,找出蝗虫趋光响应较好的光照梯度,并分析影响蝗虫趋光响应的因素。

1 材料和方法

1.1 试验虫源

试验虫种为北京延庆地区人工饲养的东亚飞蝗。选羽化一周内的健壮成虫作试验材料。

1.2 试验装置及方法

试验在20:00~6:00饲养棚外的野地进行,自然月色光照度为0.1 lx。

1.2.1 试验器材及装置

(1)器材:试验光源采用圆形LED灯板,灯板颜色选为紫、绿紫蓝^[8-9],共4块,12 V开关电源供电。LED灯采用串并方式连接,灯板尺寸 $\phi 8$ cm,单面发光。光照梯度由照度计标定,可变电阻调节光照强度。

(2)装置:试验装置由光照光源、对照光照光源、光源光照梯度蝗虫反应通道(3.1 m \times 0.6 m \times 0.6 m,内壁贴上黑色塑纸,以免反光)、对照光源光照梯度蝗虫反应通道(3.1 m \times 0.6 m \times 0.6 m,内壁贴上黑色塑纸,以免反光)、蝗虫栖息活动室(1 m \times 1 m \times 0.8 m)、开启闸门(试验时开启,试验后关闭)、遮光板等组成(图1)。图中序号3、4、5上方敞开,以利环境因素与光源光照耦合和观察。

1.2.2 试验方法

试验虫种现场随机采自纱窗饲养棚内的蝗虫,于20:00至次日凌晨6:00(天全亮)之间进行试验。

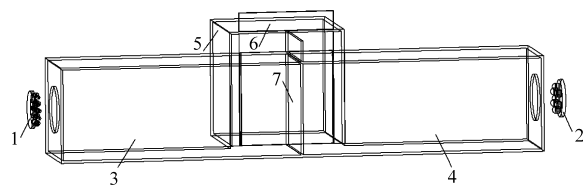


图1 蝗虫趋光行为反应试验装置

Fig. 1 Light-map of locusts' phototactic behavior

1. 光照光源 2. 对照光照光源 3. 光源光照梯度蝗虫反应通道
4. 对照光源光照梯度蝗虫反应通道 5. 蝗虫栖息活动室 6. 闸门 7. 遮光板

为了试验的可对比性,对自然环境因素与诱导光源光照耦合以及试验间隔中蝗虫充足的活性反应,每隔2 h做同一批次的试验。根据蝗虫在一定密度范围内有聚群的现象(15~35头/m²)以及考虑到反应通道内蝗虫趋光响应的群体行为,每批次的试验虫数为40头/次,重复3次,取平均值(3次试验结果平均值的标准误差为 $\pm 2.5\%$),每次光照时间为5 min,每次间隔20 min。光照度计标定光梯度。

试验前,调整光源距离和变阻器,把光梯度光源和对照光梯度光源在其反应通道内的光照度以每一对数单位设定成区,例如,反应通道末端(近光源处)处光照度为10 lx,由于光源光照度空间传播平方反比衰减,至遮光板处光照度衰减为1 lx(光照度计标定),其紫光分为1~10 lx、10~10² lx、10²~10³ lx、10³~10⁴ lx 4个光梯度,绿紫蓝光分为10~10² lx、10²~10³ lx、10³~10⁴ lx。试验时,同时开启光源1、2和闸门(为了避免光适应的影响,同系列试验中光照强度采取由低到高的方式进行调节),每次试验结束后关上闸门统计虫数。

1.2.3 试验数据的处理

利用光梯度选择总反应率 R_T 、光梯度选择率 R_S 来反映蝗虫对不同光照梯度的趋光响应;利用光梯度选择对比率 C_S 反映蝗虫对光梯度趋光响应差别的大小。相应公式为

$$R_T = \frac{m+n}{T} \times 100\%$$

$$R_S = \frac{m}{T} \times 100\% \text{ 或 } R_S = \frac{n}{T} \times 100\%$$

$$C_S = \frac{m-n}{T} \times 100\%$$

式中 m ——光源光照梯度蝗虫反应通道中3次试验反应虫数的平均值

n ——对照光源光照梯度蝗虫反应通道中3次试验反应虫数的平均值

取 $T=40$ 。

采用 t 检验比较紫光和绿紫蓝光在不同光照梯度范围内分布的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 紫光光梯度和对照绿紫蓝光光梯度对蝗虫趋光响应的影响

表 1 为紫光 and 绿紫蓝光对应的光梯度标识号。

表 1 紫光和绿紫蓝光对应的光梯度标识号

Tab. 1 Identification mark of purple's and purple-blue-green's light gradient

绿紫蓝光 光梯度/lx	紫光光梯度/lx			
	1~10	10~10 ²	10 ² ~10 ³	10 ³ ~10 ⁴
10~10 ²	1	4	7	10
10 ² ~10 ³	2	5	8	11
10 ³ ~10 ⁴	3	6	9	12

蝗虫对紫光和对照绿紫蓝光不同光梯度选择总反应结果如图 2 所示,图 2 中横坐标紫光光梯度和对照绿紫蓝光光梯度采用表 1 的标识号表示。

由图 2 可知:蝗虫对光的反应随时间增加而降低,提高光照度可激发蝗虫的趋光反应;20:00~22:00,增强光照度对蝗虫的趋光激发作用最强,而 4:00~6:00 最弱。

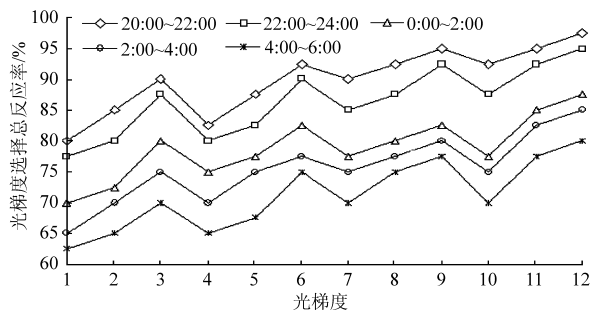


图 2 蝗虫在不同时间段内对紫光光梯度和对照绿紫蓝光光梯度选择总反应率

Fig. 2 Total response rate of locusts on different illuminance gradients in different time periods

在紫光和对照绿紫蓝光相同光梯度条件下(图中标识号 4、8、12), t 检验表明:相邻时间段之间, 22:00~24:00 和 0:00~2:00 之间蝗虫总反应率在 0.01 水平上差异极显著,其余相邻时间段之间蝗虫总反应率在 0.05 水平上差异显著;不相邻时间段之间,蝗虫总反应率在 0.05 水平上差异极度显著。同时,随夜间时间的推后,蝗虫的总反应率和生物行为降低。可见,蝗虫的趋光行为受夜间环境工况和蝗虫生物行为的制约。

同一时间段内,紫光光梯度相同,而绿紫蓝光不同光梯度条件下(标识号 1~3、4~6、7~9、10~12),由图 2 蝗虫对二者总反应率的结果表明:当紫光光梯度相同时,随绿紫蓝光光梯度的增加,蝗虫对

二者的总反应率近似符合 $y = a + bx$ 线性回归模型,由最小二乘法可得此条件下蝗虫光梯度选择总反应率的增长率(表 2)。

表 2 不同时间段内蝗虫的趋光增长率

Tab. 2 Growth rate of locusts' phototactic behavior in different time periods %

时间段	标识号			
	1~3	4~6	7~9	10~12
20:00~22:00	5.00	5.00	2.50	2.50
22:00~24:00	5.00	5.00	3.75	3.75
0:00~2:00	5.00	3.75	2.50	5.00
2:00~4:00	5.00	3.75	2.50	5.00
4:00~6:00	3.75	5.00	3.75	5.00

由表 2 可知:当紫光光梯度较弱时(1~10 lx),提高绿紫蓝光光梯度,蝗虫在 0:00~4:00 的趋光响应增长率大于 4:00~6:00 的增长率;当紫光光梯度较强时(10³~10⁴ lx),提高绿紫蓝光光梯度,蝗虫在 22:00~6:00 的趋光反应增长率大于 20:00~22:00 的增长率;提高绿紫蓝光光梯度,10~10² lx 紫光光梯度蝗虫的趋光增长率大于 10²~10³ lx 紫光光梯度。

由此可见,光照强度对蝗虫的趋光行为具有激发效应,较高当量的光照强度数量级对蝗虫趋光响应的增效作用在 0:00 点以后较 0:00 点以前高,因此,蝗虫生物规律和蝗虫对光照度耐限程度不同导致了不同时间段内蝗虫对光选择反应增长率的不同。

蝗虫对紫光和对照绿紫蓝光光梯度反应选择的对比结果如图 3 所示。

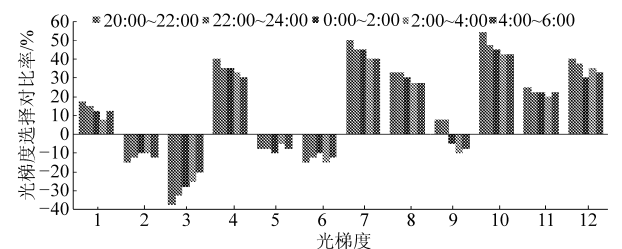


图 3 不同时间段内蝗虫对紫光和绿紫蓝光光梯度选择对比率

Fig. 3 Comparative rate of locusts on purple's and purple-blue-green's illuminance gradient in different time periods

图 3 表明:相同光梯度条件下(图中标识号 4、8、12),蝗虫对紫光光梯度选择高于绿紫蓝光,但对比率的不同可能源于视觉电位阈值开启及耐光阈值差异引起^[6]。从标识号 2、3、5、6、9 光梯度对比结果可知,当绿紫蓝光照度是紫光的 10 倍以上时,蝗虫对绿紫蓝光的选择高于紫光,倍数越高,对比率差异

越大。

但紫光为 $10^2 \sim 10^3$ lx、绿紫蓝光为 $10^3 \sim 10^4$ lx 时,20:00~24:00 蝗虫对紫光的选择高于绿紫蓝光,而0:00点后相反。对此分析可知:在蝗虫敏感光谱光照引起蝗虫趋光神经兴奋冲动的基础上,0:00 点前蝗虫生物活性较高,从而对紫光、绿紫蓝光照强度刺激的耐光阈值较敏感, 10^4 lx 绿紫蓝光照强度对蝗虫视觉系统的刺激超过了蝗虫耐光阈值,蝗虫对敏感光谱光照进行了选择,进而趋向视觉生理上较适应(较弱)的光照环境;0:00 点后环境温度和蝗虫生物活性下降,强光激发蝗虫趋向较强的敏感光谱光照环境。

另外,由标识号7、10、11 光梯度对比结果可知:当绿紫蓝光为 $10 \sim 10^2$ lx,紫光由 $10^2 \sim 10^3$ 提高到 $10^3 \sim 10^4$ lx 时,对比率得到提高;但当紫光光梯度为 $10^3 \sim 10^4$ lx,绿紫蓝光由 $10 \sim 10^2$ 提高到 $10^2 \sim 10^3$ lx 时,对比率下降了15%。由此可见,增强光照度对蝗虫的趋光响应具有激发增效作用,但受蝗虫生物行为制约。

2.2 绿紫蓝光、紫光光梯度对蝗虫趋光响应的影响

2.2.1 绿紫蓝光照光梯度

蝗虫对绿紫蓝光不同光梯度趋光选择结果和对比结果分别如图4和图5所示。

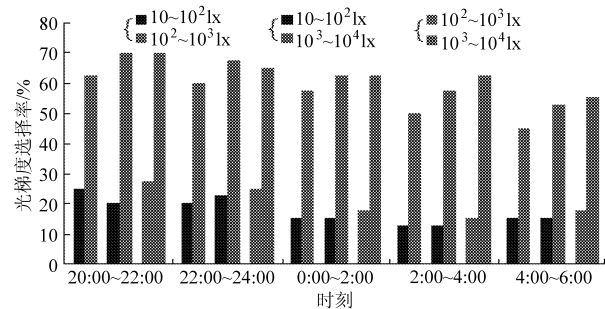


图4 不同时间段蝗虫对绿紫蓝光不同光梯度的选择率

Fig. 4 Selective rate of locusts on different light gradients of purple-blue-green in different time periods

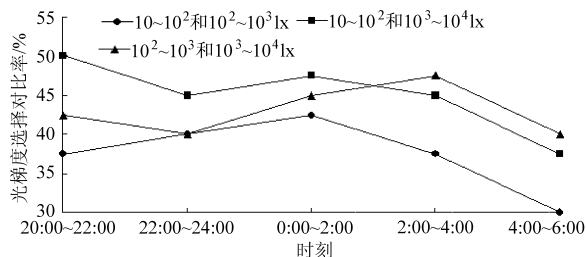


图5 不同时间段蝗虫对绿紫蓝光不同光梯度选择对比率

Fig. 5 Comparative rate of locusts on different light gradients of purple-blue-green in different time periods

由图4和图5可知:不同时间段内,蝗虫均对绿紫蓝光较强的光梯度选择高,并且 $10^2 \sim 10^3$ lx 和 $10^3 \sim 10^4$ lx 的光梯度选择对比率在2:00~4:00最

高;同时,试验中蝗虫对 $10^2 \sim 10^3$ lx 的选择主要分布在 10^3 lx 光照度处,对 $10^3 \sim 10^4$ lx 的选择在20:00~24:00 主要分布在 6.5×10^3 lx 处,而在0:00~6:00 主要分布在 10^4 lx 光照度处的光暗区; $10 \sim 10^2$ lx 和 $10^2 \sim 10^3$ lx 的光梯度选择对比率在0:00~2:00 最高,20:00~2:00 内的对比率高于2:00~6:00,并且蝗虫对二者光照度的选择主要分布在灯源处;蝗虫对 $10 \sim 10^2$ lx 和 $10^3 \sim 10^4$ lx 的选择反应后,蝗虫较多分布于 $10^3 \sim 6.5 \times 10^3$ lx 之间,0:00 点后更多趋向于 $6.5 \times 10^3 \sim 10^4$ lx 范围处,但趋光总体降低。

经分析可知:蝗虫趋光光梯度分布范围内,光照强度增效作用在0:00~2:00 最佳,但在20:00~24:00 趋光行为较强,蝗虫最适趋光光照度范围为 $10^3 \sim 6.5 \times 10^3$ lx,在0:00~6:00 趋光行为较差,蝗虫最佳趋光光照度范围为 $6.5 \times 10^3 \sim 10^4$ lx。

另外,绿紫蓝光照光场($10 \sim 10^2 \sim 10^3 \sim 10^4$ lx)中,蝗虫对梯次光照光场均有反应,但趋光响应选择分布不同,而且,蝗虫对照中较强光诱导光源的反应率均超过了50%。可见,依据所确定夜间不同时间段蝗虫对绿紫蓝光最适、最佳的趋光光照强度,可有效进行蝗虫光电诱导;在利用光照强度光照传播衰减平方反比定律确定诱导理论区域的基础上,可有效进行不同光梯度分布区域内蝗虫趋光响应的评估。

2.2.2 紫光光梯度

蝗虫对紫光不同光梯度趋光选择结果和对比结果分别如图6和图7所示。

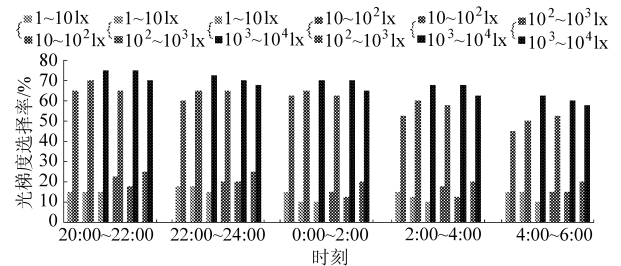


图6 不同时间段蝗虫对紫光不同光梯度的选择率

Fig. 6 Selective rate of locusts of on different illuminance gradients of purple in different time periods

由图6可知:蝗虫对紫光的选择趋向于较强的光梯度;蝗虫对 $10^2 \sim 10^3$ lx 和 $10^3 \sim 10^4$ lx 这二者的选择总反应最高,对 $1 \sim 10$ lx 和 $10 \sim 10^2$ lx 的选择总反应最低,而且,对 $1 \sim 10$ lx 和 $10 \sim 10^2$ lx、 $10 \sim 10^2$ lx 和 $10^2 \sim 10^3$ lx、 $10^2 \sim 10^3$ lx 和 $10^3 \sim 10^4$ lx 的选择总反应表现为随时间推后而下降,而选择对比率在0:00~2:00 最高(图7)。

图6表明:蝗虫对 $1 \sim 10$ lx 和 $10^2 \sim 10^3$ lx、 $1 \sim 10$ lx 和 $10^3 \sim 10^4$ lx 光梯度的趋光选择反应在各时

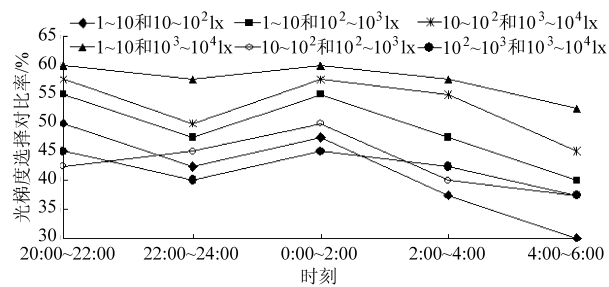


图 7 不同时间段蝗虫对紫光不同光梯度的选择对比率

Fig. 7 Comparative of locusts on different illuminance gradients of purple in different time periods

间段内, 蝗虫对 $1 \sim 10$ lx 的选择相当, 但对 $10^3 \sim 10^4$ lx 的选择较 $10^2 \sim 10^3$ lx 高; 蝗虫对 $1 \sim 10$ lx 和 $10^3 \sim 10^4$ lx、 $10 \sim 10^2$ lx 和 $10^3 \sim 10^4$ lx 的趋光选择反应在各时间段内蝗虫对 $10^3 \sim 10^4$ lx 的选择大致相当, 但对 $10 \sim 10^2$ lx 选择率较 $1 \sim 10$ lx 高。另外, 当 $10^3 \sim 10^4$ lx 光梯度保持不变, 对照光梯度由 $1 \sim 10$ lx 增加到 $10^2 \sim 10^3$ lx, 蝗虫对 $10^3 \sim 10^4$ lx 的选择并未出现显著增长; 当 $1 \sim 10$ lx 光梯度保持不变, 对照光梯度由 $10^2 \sim 10^3$ lx 增加到 $10^3 \sim 10^4$ lx 时, 对 $1 \sim 10$ lx 的选择未出现显著下降。可见, 蝗虫对紫光的趋光响应存在最低、最高趋光光照强度灵敏点, 从而蝗虫趋光行为反应上表现出了蝗虫对一定光照强度的紫光存在反应, 光照强度增强后, 蝗虫趋光反应增强, 但达到一定光照强度后, 蝗虫的趋光反应并不能增强, 即蝗虫存在趋光上下限光照强度阈值。

图 7 表明: 蝗虫对 $1 \sim 10$ lx 和 $10^3 \sim 10^4$ lx 的选择对比率在 20:00 ~ 4:00 各时间段大致相当, 对 $1 \sim 10$ lx 和 $10^2 \sim 10^3$ lx 的选择对比率在 20:00 ~ 22:00、0:00 ~ 2:00 相当, 但较 22:00 ~ 24:00、2:00 ~ 4:00 高, 而 4:00 ~ 6:00 对比率均最低; $10 \sim 10^2$ lx 和 $10^3 \sim 10^4$ lx 光梯度选择对比率在 4:00 ~ 6:00 时间段最低, 22:00 ~ 24:00 次之。对此分析可知: 蝗虫对紫光的趋光选择随光照度的增强而增强, 强光对蝗虫的趋光反应具有激发增效作用, 其增效作用在 0:00 ~ 2:00 最大, 2:00 后开始下降, 在 4:00 ~ 6:00 达到最低。因此, 蝗虫生物规律和环境工况制约了蝗虫的趋光响应, 蝗虫对较强光的总体趋光行为随夜间时间推后而下降。

经测定分析可知: 蝗虫在 20:00 ~ 2:00 的最适趋光光照度范围大致为 $10^3 \sim 6 \times 10^3$ lx, 而在 2:00 ~ 6:00 的最佳趋光光照度范围为 $6 \times 10^3 \sim 10^4$ lx。

同样, 蝗虫对紫光光照光场 ($1 \sim 10 \sim 10^2 \sim 10^3 \sim 10^4$ lx) 存在分布梯次差异, 蝗虫对较强光照趋光反

应率达到了 60% 以上, 因而通过调控紫光光照强度, 可有效进行蝗虫诱导区域内蝗虫趋光效应的评估。

2.3 结果分析

在分析诱导光源光梯度对蝗虫趋光效应影响的基础上, 通过对比试验和 t 检验分析发现: 试验光梯度条件下, 蝗虫对紫光、绿紫蓝光光梯度的选择均趋向于较强的光梯度, 增强光照度能够激发蝗虫的趋光反应, 并当绿紫蓝光的光照度大于紫光光照度 1 个数量级时, 蝗虫对绿紫蓝光的趋光反应高于紫光; 蝗虫的趋光行为在 20:00 ~ 24:00 较 0:00 ~ 6:00 的高, 且以 20:00 ~ 22:00 蝗虫的趋光反应最高, 0:00 点以后增强光照度对蝗虫的趋光增效受蝗虫昼行夜伏行为和环境因素的制约存在局限性, 较强光于蝗虫的趋光反应增效作用在 0:00 ~ 2:00 最高, 蝗虫行为选择上表现出了蝗虫对绿紫蓝光在 20:00 ~ 24:00 的最适趋光光照度范围为 $10^3 \sim 6.5 \times 10^3$ lx, 在 0:00 ~ 6:00 的最佳趋光光照度范围为 $6.5 \times 10^3 \sim 10^4$ lx; 蝗虫对紫光在 20:00 ~ 2:00 的最适趋光光照度范围大致为 $10^3 \sim 6 \times 10^3$ lx, 在 2:00 ~ 6:00 的最佳趋光光照度范围大致为 $6 \times 10^3 \sim 10^4$ lx。由于蝗虫诱导光照度参数存在调控范围, 依据试验测定结果: 蝗虫紫光 LED 诱导光源光照度在 20:00 ~ 22:00 应调控为 5.600×10^3 , 22:00 ~ 2:00 应调控为 6×10^3 lx, 2:00 ~ 6:00 应调控为 10^4 lx; 蝗虫绿紫蓝光 LED 诱导光源光照度在 20:00 ~ 22:00 应调控为 6×10^3 lx, 22:00 ~ 24:00 应调控为 6.5×10^3 lx, 0:00 ~ 6:00 应调控为 10^4 lx, 从而可以满足蝗虫的趋光激发, 这可为蝗虫 LED 诱导光源研制、蝗虫诱导光场实施及诱导效应评估提供技术参考和理论依据。

3 结束语

在蝗虫对紫光和绿紫蓝光不同光梯度选择对比试验和对紫光、绿紫蓝光不同光梯度选择反应试验基础上, 通过试验数据的对比分析, 确定了夜间不同时间段内蝗虫对诱导光场趋光选择的光照梯度, 分析了影响蝗虫趋光反应的原因。试验结果和理论分析表明, 运用 LED 紫光、绿紫蓝光发光光谱和光照梯度参数控制实现的有效组合, 可以满足夜间蝗虫趋光激发诱导的要求。但蝗虫昼行夜伏性规律、环境工况和光谱光照光场传播衰减制约了实用效果, 如需提高诱导范围和使用效果, 尚需激发蝗虫的物理驱动措施。

(下转第 140 页)

- Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1):122~126. (in Chinese)
- 7 Crawford M. Configuration factor between two unequal paralld, coaxial squares[C]. ASME Paper 72-WA/HT-16, 1972.
- 8 刘云宏. 中药材真空红外辐射干燥试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2010.
Liu Yunhong. Experimental study on vacuum infrared radiation drying of Chinese herb[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010. (in Chinese)
- 9 汪喜波. 红外辐射与对流联合干燥的理论分析及试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2003.
Wang Xibo. Theoretical analysis and experimental study on combined convective and infrared radiation drying[D]. Beijing: China Agricultural University, 2003. (in Chinese)
- 10 Lydersen A L. Handbook of chemical property estimation methods[M]. New York: McGraw-Hill Press, 1982.
- 11 高福成. 食品工程原理[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998.
- 12 李庆阳, 莫孜中. 微分方程数值解法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- 13 王相友, 操瑞兵, 孙传祝. 红外加热技术在农业物料加工中的应用[J]. 农业机械学报, 2007, 38(7): 177~182.
Wang Xiangyou, Cao Ruibing, Sun Chuanzhu. Application of infrared radiation technology on processing agriculture biological materials[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(7): 177~182. (in Chinese)
- 14 Wu L, Orikasa T, Ogawa Y, et al. Vacuum drying characteristics of eggplants[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83(3): 422~429.
- 15 Junho L, Huijeong K. Vacuum drying kinetics of Asian white radish(*Raphanus sativus* L.) slices[J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(1): 180~186.
- 16 卢为开. 远红外辐射加热技术[M]. 上海: 上海科技出版社, 1982.

(上接第 109 页)

参 考 文 献

- 1 周强, 徐瑞清, 程小桐. 昆虫的生物光电效应与虫害治理应用[J]. 现代生物医学进展, 2006, 6(4): 70~72.
Zhou Qiang, Xu Ruiqing, Cheng Xiaotong. Bio-photo-electro effect of insects and its application in pest control [J]. Progress in Modern Biomedicine, 2006, 6(4): 70~72. (in Chinese)
- 2 Farrow R A. A modified light-trap for obtaining large samples of night-flying locusts and grasshoppers [J]. Australian Journal of Entomology, 1974, 13(4): 357~360.
- 3 Jander, Barry. The phototactic push-pull-coupling between dorsal ocelli and compound eyes in the phototropotaxis of locusts and crickets [J]. Zeitschrift für Vergleichende Physiologie, 1968, 57(4): 432~458.
- 4 Andreas B, Marcel S, Rowell C. The perception of the visual flow field by flying locusts: a behavioral and neuronal analysis [J]. The Journal of Experimental Biology, 1992, 165(1): 137~160.
- 5 Bailey E V, Harris M O. The visual behavior of adult *Melanoplus sanguinipes* F. [J]. Journal of Insect Behavior, 1991, 4(6): 707~726.
- 6 Claire R F. Non-directional, movement sensitive neurons of the locust optic lobe [J]. Journal of Comparative Physiology A, 1987, 161(3): 477~494.
- 7 王荫长. 昆虫生理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1991: 450~451.
- 8 Vishnevskaya T M, Cherkasov A D. Spectral sensitivity of photoreceptors in the compound eyes of the locust compound eyes [J]. Journal of Comparative Neurology, 1983, 33(2): 9~12.
- 9 Bayramoglu E S. The accelerating effect of mechanical vibrations on the positive phototaxis of *Locusta migratoria* [J]. Zeitschrift für Vergleichende Physiologie, 1969, 64(3): 351~354.
- 10 王立新, 周强. 基于猪笼草叶笼滑移区仿生的蝗虫捕集滑板功效测试[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5): 222~225.
Wang Lixin, Zhou Qiang. Function testing of locust slippery plate manufactured based on waxy zone of *Nepenthes* pitchers [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 222~225. (in Chinese)
- 11 刘晓英, 焦学磊, 郭世荣, 等. 基于 LED 诱虫灯的果蝇趋光性试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 178~180.
Liu Xiaoying, Jiao Xuelei, Guo Shirong, et al. Experiment of light emitting diode catching insect lamp on phototaxis of drosophila [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 178~180. (in Chinese)