

东亚飞蝗对 LED 光信号视觉响应的波谱视敏效应测定

刘启航¹ 蒋月丽² 周强³

(1. 河南科技学院机电学院, 新乡 453003; 2. 河南省农业科学院植物保护研究所, 郑州 450002;

3. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为了探索东亚飞蝗视觉响应 LED 光信号的视敏反应效应,以明确东亚飞蝗趋光的光敏响应因子和生物光诱参数,利用 LED 光照和 AvaSpec 光纤光谱仪系统,在室内进行了东亚飞蝗视觉响应表征的光谱测定。并在此基础上,利用该波谱光照装置,验证其波谱光照调控东亚飞蝗的趋光反应及响应程度。测定结果显示,东亚飞蝗复眼吸收 365、400、520、610 nm 波长光照射后,其视觉响应波谱表现为 380、402、540、602 nm 的微光特征,当波谱光照强度增加时,东亚飞蝗视觉微光反应随之增强,且呈现时变效应的调控特性。东亚飞蝗视觉光敏调控的时变强度以紫光最优、依次是橙光和绿光最差,而其调控容度以橙光最优、绿光次之和紫光最差,紫外光较快的光敏聚集速度、紫光较强的光敏聚集程度和橙光较好的趋光效果说明,趋光光敏活性、趋光程度和趋光效果分别与视觉激发强度和视觉光敏调控的时变强度以及视觉光敏调控容度呈正相关,且东亚飞蝗视觉反应强度的光敏时效性影响其趋光行为选择和视觉光敏活性。因此,依据紫外光较强的激发效果、橙光较好的光敏时效性和紫光较强的光敏调控强度的特性,进行趋光视敏性光照时间的刺激调控,可以增强东亚飞蝗的趋光效果。该研究结果为蝗虫光诱捕机械装备的研制提供了理论基础和技术指导。

关键词: 东亚飞蝗; 视觉响应; LED 光; 光谱表征; 趋光反应

中图分类号: S763.3; S433.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)04-0233-06

Spectral Vision Acuity Reaction Detection of Phototactic Response of *Locusta migratoria* to LED Light Signal

Liu Qihang¹ Jiang Yueli² Zhou Qiang³

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China

2. Institute of Plant Protection, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China

3. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: To explore the visual acuity reaction effect of *Locusta migratoria* responding to LED light signal, clear the photosensitive response factor and the biological light inducing parameters of *Locusta migratoria* phototaxis regulated by light, the spectral representation of *Locusta migratoria* visual reaction stimulated by LED light source was investigated with AvaSpec fiber-optic spectrometer system. On this basis, the degree of *Locusta migratoria* phototactic response and reaction regulated by spectral light was certificated comparatively through utilizing the investigated device of *Locusta migratoria* phototactic response to spectral illumination. The results showed that the visual reaction was represented to 380 nm, 402 nm, 540 nm and 602 nm glimmer characteristics when *Locusta migratoria* visual system accepted to absorb 365 nm, 400 nm, 520 nm, and 610 nm light photons, and spectral illumination was enhanced, the visual spectral transmission peak amplitude was increased to take on the reaction characteristics of

收稿日期: 2016-01-12 修回日期: 2016-01-31

基金项目: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-03)、国家自然科学基金项目(50775214)和2012年公益性农业科研项目(201203025)

作者简介: 刘启航(1978—),男,讲师,博士,主要从事光机电一体化技术研究,E-mail: bjluiqihang@163.com

通信作者: 周强(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事光机电一体化物理捕蝗技术研究,E-mail: zq@cau.edu.cn

time-varying effect, which originated from the difference of photo-physicochemical reactions and light-sensing deconstruction effect of the visual system absorbing different spectral photons, and the visual sensitivity degree of responding to different spectral light stimulation was manifested by visual spectrum peak misregistration and visual spectrum emission amplitude. Moreover, time-varying intensity of *Locusta migratoria* visual photosensitivity regulation to violet light was the optimal, the following was orange light, and green light was the worst, the visual photosensitivity regulation capacity for orange light was the optimal, the following was green light, and violet light was the worst. Simultaneously, the superior photosensitive aggregating speed for UV light, the better photosensitive aggregating degree for violet light and the better phototactic effect for orange light showed that the phototactic photosensitivity activity, phototactic degree and the phototactic effect were positively correlated with visual stimulation intensity, time-varying intensity of visual photosensitivity regulation and visual photosensitivity regulation capacity, respectively, and the photosensitive time effectiveness of the visual reaction intensity affected the behavioral selection effect and visual photosensitivity activity effect. Then, based on the stronger stimulating effect of UV light, the better time effectiveness sensitivity of orange light and the stronger photosensitive regulation intensity of violet light, *Locusta migratoria* phototactic effect can be improved by stimulating time regulation with the combination of UV, violet and orange light. Research results provided theoretical support for the study of trapping mechanical equipment of *Locusta migratoria* induced by light.

Key words: *Locusta migratoria*; visual response; LED light; visual spectral characterization; phototactic reaction

引言

蝗灾是我国乃至世界上造成损害最大的虫害之一。现有蝗灾防治技术中,化学防治易造成生态环境破坏,微生物、天敌和遗传控制等生物防治措施存在见效慢、成本高、且易受环境影响等不足,草原蝗虫良好的气吸捕集性技术易受地表植被和地貌形态的限制,蝗虫激光杀灭技术中激光靶难以实现自动控制^[1-4]。鉴于此,蝗虫光电诱导捕集技术得到了积极的探索^[5]。在此项技术中,光照调控蝗虫视觉响应敏感的激发机制和视觉直感响应引发的光照诱导特征优化,是蝗虫光诱捕集机械装备得以发展和应用的关键。

文献[6-9]指出蝗虫视觉响应光信号引起视神经兴奋和感应定向差异,源于蝗虫视觉的时空整合性,并表现为区别和定向光栅条纹的程度不同;蝗虫的视觉敏感性取决于光的波谱及强度,其趋光性受趋光生理活性激发程度、视觉空间定位能力和视觉响应光信号调控机制等因素的影响;蝗虫视觉系统对不同光谱的吸收程度,在一定程度上反映了蝗虫视觉生物光电效应的激发程度,且热源、声源和机械振动等刺激因素与诱导光源的合理调配可有效提高蝗虫的生理活性与运动敏感性,从而增强蝗虫对刺激光源的趋向反应。蝗虫视觉响应光刺激特性多侧重于蝗虫趋光行为选择性、偏振光及光谱敏感神经功能、视网膜电图法测定光谱敏感曲线及色素敏

感光谱和蝗虫复眼感光机制等方面的研究^[10-15]。关于蝗虫趋光本质的视觉响应诱因及特征确定的研究很少,限制了蝗虫光电诱导捕集机械装备的应用。

本文利用LED波谱光照刺激东亚飞蝗的复眼,应用AvaSpec光纤光谱仪系统测试其视觉响应的波谱特征,分析其视觉生物光电波谱效应的诱发特征,并针对东亚飞蝗视觉响应特性,确定其视觉光敏响应特性,探讨趋光视觉反应的诱发因子,以期对蝗虫光诱光照参数选取和趋光行为视觉响应机理揭示提供理论支撑和技术指导。

1 材料和方法

1.1 试验材料与试验条件

供试昆虫:东亚飞蝗成虫为河北沧州蝗虫养殖基地提供,其为棚内饲养二代的羽化7d内的健壮成虫。测试前试虫在透明的饲养箱内放置室外进行自然适应,饲喂以野地芦苇叶。

试验于20:00在室内进行,室内温度保持在27~30℃。

1.2 试验方法

试验I:东亚飞蝗视觉反应的波谱效应测定方法见图1,选取健壮的成虫3只,测试前暗适应60min,试虫固定在平台上,依次测试(3次结果差别不大,选用一测试作为结果)。光纤探头置于探头支架上,调整放置角度,以使探头探孔测试复眼系统,并利用AvaSpec光谱仪测定试虫未光照的视状

态,结果存储于光谱测定显示系统,以此校正AvaSpec光谱仪及光照的视觉测试结果。光照系统由12 V直流电源供电、PWM系统调整光照度的LED波谱光源(3颗LED(1 W/颗)焊接在铝基板上制成)发射的光,调整光源与复眼的距离,用光照度计(型号:ST-80,精度:0.1 lx)测定东亚飞蝗复眼接受的光照度,其中紫外(365 nm)和紫(405 nm)光分别为100 lx和500 lx,橙(610 nm)和绿(520 nm)光分别为100 lx和1 000 lx,蓝(450 nm)光为100 lx,以对蝗虫对相同及不同光照度刺激的视觉响应状态。测试时,光照系统照射试虫复眼,光照时间分别为10、20、30、40、50、60 min,时间到达后关闭光源,光谱仪即时测定蝗虫视觉反应的波谱状态,系统计算光照后与未光照的叠差测定结果由光谱测定显示系统实时记录。为避免光照对试虫的影响,测试中2次光照的时间间隔为30 min。

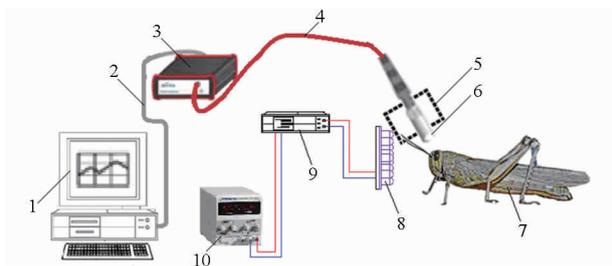


图1 东亚飞蝗视觉响应的波谱测定方法

Fig. 1 Investigation method of visual spectrum effect of locust's phototactic reaction

1. 光谱测定显示系统 2.4. 光纤 3. AvaSpec 光谱仪 5. 探头支架
6. 光纤探头 7. 测试蝗虫 8. LED 光源 9. PWM 调制系统
10. 12 V 直流电源

试验 II:直翅目蝗虫光照环境中避光行为不明显^[16]。为确定蝗虫的趋光反应及趋光响应效应,以对照视觉反应特征与趋光效应的关联,设计了LED波谱光照调控蝗虫视觉导向响应试验装置,见图2,其中,趋光行为通道(尺寸:2.5 m×0.5 m×1.0 m(长×宽×高))与反应室(尺寸:1.0 m×0.5 m×1.0 m(长×宽×高))制成一体并由通道闸门隔断,且二者从左至右按0.5 m间隔分隔成7个区段,以确定蝗虫群体视觉光敏响应程度,装置上方敞空,以



图2 LED波谱光照调控蝗虫视觉导向响应试验装置

Fig. 2 Experiment apparatus of locust's vision responding to LED spectral illumination

利观察。测试前,80头试虫归为1个测试组,共4组,分别对应紫外、紫、橙和绿波谱光照(光照度同试验 I),置于蝗虫趋光反应室适应30 min。测试时,开启LED波谱光源(12 V直流电源供电、PWM调制器实现试验光照度)及通道闸门,光照持续10 min。单波谱光照对应的测试组测3次,其测试间隔为30 min,并记录各区段内蝗虫趋光响应时间。统计0~0.5 m、0~1.0 m、1.0~2.5 m区段内的虫数,以3次试验均值与总虫数(80只)的百分比来反映光照引起的蝗虫光敏响应程度以及蝗虫对不同光照的渐趋反应特征,以2.0~2.5 m区段内东亚飞蝗停滞响应时间反映光照调控蝗虫视敏响应的时效^[16]。

2 结果分析与讨论

2.1 试验结果与分析

2.1.1 光照刺激东亚飞蝗视觉响应的波谱特征

利用无光照下东亚飞蝗复眼自然状态校正的光谱仪系统进行测试记录,获得了其视觉响应波谱图。不同波谱光照在相同光强度下的视觉响应波谱如图3所示,不同波长光照在不同光强度下的视觉响应波谱如图4所示。

东亚飞蝗复眼接受紫外、紫、绿和橙LED光刺激后,其视觉响应波谱波长峰值相对于各光源波谱主峰值呈现了迁移性的视觉微光响应效应显征,视觉波谱响应峰值为380、402、540、602 nm,相对于光源主波长分别迁移了15、2、20、8 nm,而蓝光未引起波长峰值迁移(图3)。由图3可知,东亚飞蝗10~60 min的视觉波谱峰值之间具有显著差异($P < 0.05$),其中,380 nm峰值随光照时间递增,402、540、602 nm峰值随光照时间的增加而减少,均于20 min时增幅达最高,而在60 min时降至最低,在30~50 min时402 nm和540 nm峰值均低于10 min光照时的峰值,10 min时602 nm峰值高于40~50 min光照,而低于30 min,且450 nm峰值在30 min时增至最高而60 min时降至最低,30~50 min光照引起的峰值均低于10 min光照。而且,光源波谱对应的最高视觉波谱响应峰值以380 nm最高、450 nm

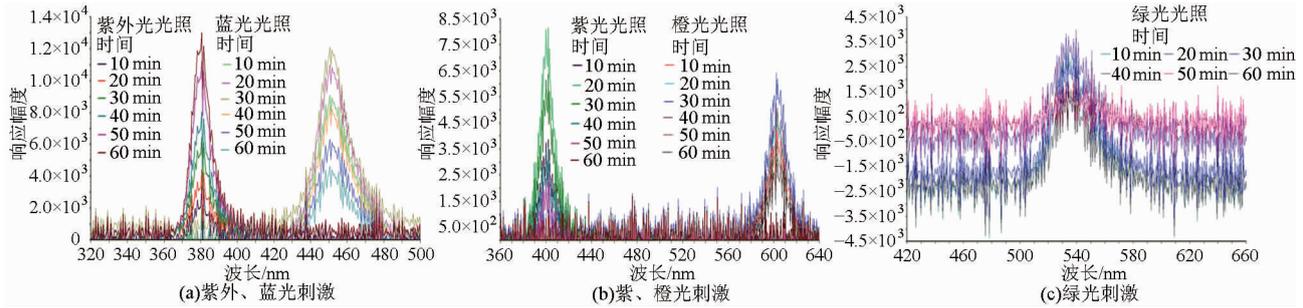


图3 100 lx光照下蝗虫视觉响应波谱

Fig. 3 Spectra of locust's visual response under stimulation of 100 lx light

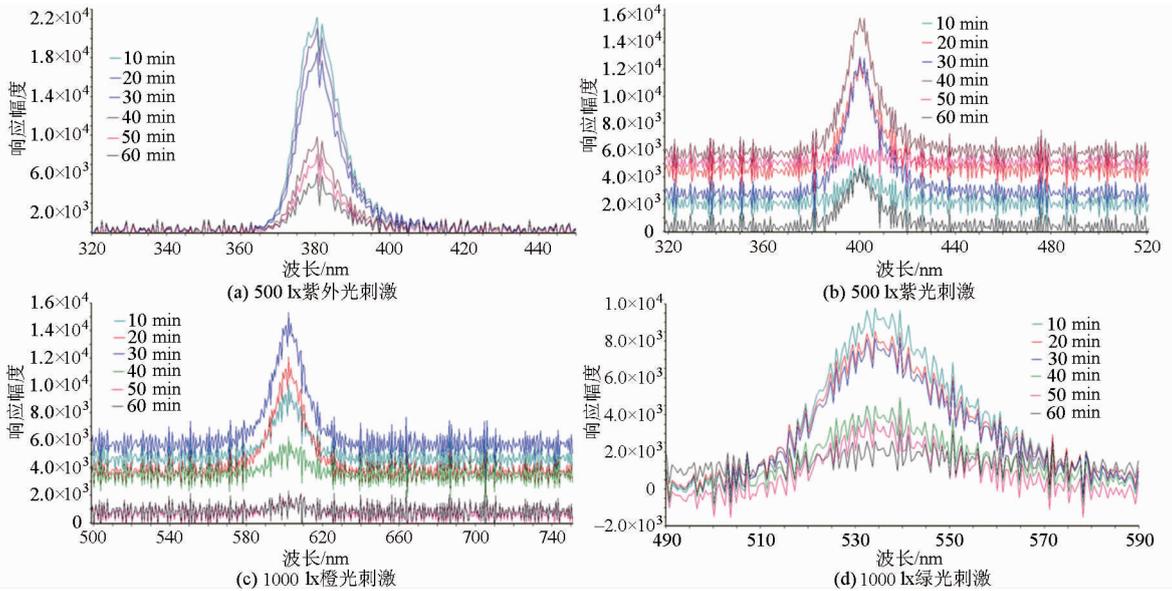


图4 不同光照度下蝗虫视觉反应的波谱特征

Fig. 4 Spectral characterization of locust's visual response under different light illumination intensities

次之和 40 nm 最低。同时,10 min 时 380、402、540、602 nm 峰值幅度之间无差异显著性 ($P = 0.025$),以 450 nm 最高,20 ~ 50 min 时 402 nm、602 nm 峰值均高于 540 nm,60 min 时 402、540、602 nm 之间无显著性差异,其中 380 nm 最高、450 nm 次之。因此,东亚飞蝗视觉响应波谱峰值幅度说明了其视觉对不同波谱光照呈现光敏生理调控效应的差异,并以蓝光的光敏理化反应效果最差。

当利用光强度为 500 lx 的紫外和紫光以及 1 000 lx 的橙光和绿光照射时,东亚飞蝗视觉响应波谱偏移特征与 100 lx 的相同,但二者的视觉响应波谱表征的时变规律不同。由图 4 可知,10 ~ 60 min 紫外光照射时,东亚飞蝗视觉响应的波谱峰值递减,在 60 min 降至最低,且在 30 ~ 40 min 时显著递减,当在紫、橙和绿光照射时间内东亚飞蝗视觉响应的波谱峰值在 10 ~ 30 min 之间递增,并于 30 min 时增至最高,40 ~ 60 min 的峰值逐渐减少,且于 60 min 时降至最低。在相同光照时间的情况下,光强度为 500 lx 的紫外和紫光引起的视觉波谱幅度高于光强度为 1 000 lx 的橙光和绿光,并以紫外光对应的波

谱幅度最高、紫光次之,橙光对应的波谱幅度在 10 ~ 40 min 时高于对应的绿光,而 50 ~ 60 min 橙光对应的波谱幅度降至最低。

由图 3 和图 4 可以看出,随着光照强度的增加,紫外光对应的视觉响应波谱幅度变化的时变规律却相反,紫和橙光的视觉响应时间延长,绿光引起东亚飞蝗视觉响应迅速递减,但在相同的光照时间内,东亚飞蝗视觉响应的波谱幅度增强。同时,不同波谱光照随着光照强度的增加,紫和橙光对东亚飞蝗视觉反应强度的提高具有光照时间刺激的累积叠加效应,并优于紫外和绿光,而在相同光照时间时,500 lx 紫外光引起的视觉响应强度最高,当绿和橙光光照强度增至紫外和紫光的 2 倍时对应的视觉反应强度低于紫光,50 ~ 60 min 时橙光引起的视觉反应强度最低。由此可知,光照强度能够增强东亚飞蝗视觉光敏反应程度,而光照波长则影响光照时间刺激对东亚飞蝗视觉反应强度的调控强化效应。

2.1.2 光照调控蝗虫视觉光敏响应的程度

另外,进行了东亚飞蝗视觉响应 LED 光的趋光测试,其视觉趋光停滞的响应时间如表 1 所示,东亚

飞蝗视觉响应不同光谱光照的趋光程度如图5所示。

表1 2.0~2.5 m 区段内东亚飞蝗停滞时的响应时间

Tab.1 Time of locust stopping to respond at channel of 2.0~2.5 m min

光源类型	光谱光照度/lx	响应时间/min
紫外	100	5.0
	500	4.5
	1000	4.0
紫	100	6.0
	500	5.0
	1000	4.0
橙	100	8.5
	1000	7.0
	10000	6.0
绿	100	6.0
	1000	5.0
	10000	5.0

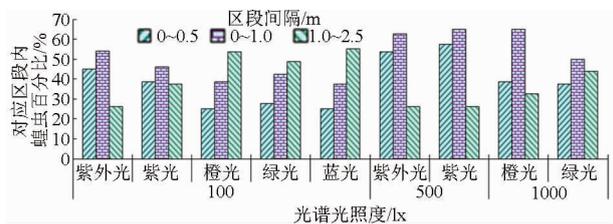


图5 东亚飞蝗视觉响应不同光谱的趋光程度

Fig.5 Phototactic effect of locusts responding to different spectral light intensities

从表1和图5可以看出,LED光照可引起东亚飞蝗视觉趋光响应,波谱光照特性不同,其光敏响应时间和趋光程度不同。在光强度为100 lx时,其群体响应紫外光的光敏时间较短,且响应光照的程度较强(0~1.0 m内分布率为54%仅高于0~0.5 m 9个百分点)、紫光次之和蓝光最差,而1.0~2.5 m内以蓝光最高、橙光次之和紫外光最低,且响应虫数以橙光最高(92.5%)和紫外光最低(80%)。由此说明,弱光照下东亚飞蝗视觉选择紫外光照的直趋性较强,其次是紫光,橙光诱发蝗虫视觉光敏响应的程度较好,且光敏时效性较长,而绿光次之。

随着光照度增加,东亚飞蝗视觉响应的光运动敏锐程度增加,而光照波谱影响其视觉光敏趋光效果(图5)。当光强度由100 lx增至500 lx时,东亚飞蝗响应紫光的光敏趋光效果由低于紫外光变为高于紫外光的效果。当光强度由100 lx增至1000 lx时,东亚飞蝗视觉选择橙和绿光的程度增强,且其响应橙光的光敏时效性优于绿光。其视觉选择500 lx紫外和紫光(0~0.5 m)的趋光程度及光运动强度优于1000 lx的橙和绿光,而东亚飞蝗视觉响应的光敏时效长度以橙光最长,紫光次之。因此,东亚飞

蝗对不同波长光的趋光响应表征的光运动敏锐性和趋光敏感程度差异,可能归因于光的波长和强度特性引起的其视觉生物光电效应的产生及光敏反应的差异。

2.2 讨论

蝗虫复眼夜间对光信号的感受行为,需要满足光子到达蝗虫复眼感杆与视黄醛作用的光子数量级超过最低灵敏阈值,而不同波谱光刺激特性引起复眼屏蔽色素的移动效应差异和蝗虫复眼结构对光照透射折叠效应,以及视色素的光谱敏感差异,影响视色素对光子数量的选择吸收,且视色素对不同光子吸收化解效应的特殊性,造成其视觉响应的差异^[17]。本研究显示,东亚飞蝗复眼光敏理化反应以视觉波谱峰值迁移光照主波长的偏移量表征,反应程度以视觉波谱微光响应效应体现,且光照时间使东亚飞蝗接受光照刺激产生视觉光敏调控效应(图4和图5)。光照特性引起东亚飞蝗视色素光化合反应及视构造调整产生的视敏生理反应,强化视觉系统的感光调控性^[18]。东亚飞蝗对不同波谱光照的视觉波谱迁移效应和视敏反应强化的时效调控效应,反映了其视觉对不同波谱光照的理化反应及视敏调控差异,并体现了视神经光反应敏感时序差别,且影响视觉光敏响应的程度。

同时,东亚飞蝗视觉光反应的优先时序差别,导致其视神经的应激强度不同,并在其背单眼对光照强度的耦合分析及视觉诱导波谱信息调控作用下,其响应不同波谱光照而产生不同的光运动敏感活性及趋光效应^[19-20]。本研究显示:光强度为100 lx时东亚飞蝗视觉反应强度随时间的递增效应以紫外光较强,紫橙绿光引起其视觉光敏的时间调控效应以紫光较强,蓝光仅引起东亚飞蝗视觉的调控响应而无光敏理化反应(图3),其与100 lx时东亚飞蝗视觉光敏趋光效应相对应(图5)。这些结果表明,东亚飞蝗对光照的光敏度取决于视觉光敏理化反应,并随光照时间的变化具有视觉时效反应的光敏调控特征,且光强度的强弱对东亚飞蝗视觉定位的弱光生理选择起决定作用,而视觉时效反应的光敏活性影响其趋光反应。

随着光照度增加,东亚飞蝗的视觉反应强度增加(图4),空间定位能力削弱,光视动生物活性增加,从而趋光反应增强(表1、图5)。但光照特性影响东亚飞蝗视觉光敏时变调控,其中,东亚飞蝗视觉光敏调控的时变强度(递增后递减)以紫光最优、橙光次之、绿光最差,其视觉光敏调控容度(最高幅值与递减时幅值之差)以橙光最优、绿光次之、紫光最差,而紫外光无视觉调控特征显现,但相同光照时间

的视觉响应强度最强。对应的趋光聚集速度以紫外光最高,趋光聚集程度以紫光最优,而趋光效果以橙光最优。因此,东亚飞蝗的趋光光敏生物活性、视觉选择光照和趋光效果分别与光照特性对视觉的激发强度、视觉光敏调控的时变强度和视觉光敏调控容量呈正相关。

研究同样表明,光照使东亚飞蝗复眼产生视觉光敏理化反应,呈现光照时间调节性视觉反应强度及视觉生理调控性生物响应特征,并产生了视觉光敏反应表征的视觉光谱峰值迁移效应和视觉光敏响应的时效调适敏感性,其导致东亚飞蝗产生视觉时滞响应的光照行为选择特征,且东亚飞蝗视觉响应时效的光敏持续性及光敏调控强度,影响其敏感响应波谱光照的诱发程度,而光照能量对其视觉反应强度的激发效果,影响其趋光光敏活性。因此,依据东亚飞蝗对紫外、紫和橙光的视觉响应特性及光照时间的诱发效应,合理调配紫外、紫和橙光的光照组合和刺激时间,可有效提高光诱捕集装备对蝗虫的诱集效果。

3 结束语

该研究结果表明,东亚飞蝗复眼吸收主波长为365、400、520、610 nm的LED光刺激后,呈现了视觉波谱峰值迁移为380、402、540、602 nm的响应特征。而增加光照照度,在提高东亚飞蝗视觉微光反应强度的同时,具有随时间变化的调控效应,其中,东亚飞蝗视觉光敏调控的时变强度以紫光最优、橙光次之和绿光最差,其视觉光敏调控容量以橙光最强,依次是绿光和紫光,而紫外光无视觉调控特征但视觉反应强度较强,蓝光仅引起东亚飞蝗视觉的调控响应而无光敏理化反应。紫外光较优的光敏聚集速度、紫光较优的光敏聚集程度和橙光较优的趋光效果表明,东亚飞蝗光敏响应的时效敏感性和调控强度影响其对光的行为选择,而波谱光照能量对东亚飞蝗趋光光敏强度活性的激发效果,影响其趋光反应,且趋光光敏活性、趋光程度和趋光效果分别与视觉激发强度、视觉光敏调控的时变强度以及视觉光敏调控容量呈正相关。

参 考 文 献

- 1 黄健熙,卓文,杨春喜,等.基于 Landsat8 卫星数据的蝗虫遥感监测方法研究[J].农业机械学报,2015,46(5):258-264.
HUANG Jianxi, ZHUO Wen, YANG Chunxi, et al. Locust remote sensing monitoring methods based on Landsat8 satellite data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5):258-264. (in Chinese)
- 2 张龙.国内外蝗害治理技术现状与展望[J].应用昆虫学报,2013,48(4):804-810.
ZHANG Long. Advances and prospects of strategies and tactics of locust and grasshopper management [J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2013, 48(4): 804-810. (in Chinese)
- 3 马耀,杜文亮,李克夫.草原蝗虫吸捕机:中国,CN2105840U[P].1992-06-03.
- 4 姚明印.激光辐照蝗虫诱变杀灭效应的理论分析与试验研究[D].北京:中国农业大学,2008.
YAO Mingyin. Theoretical analysis and experimental study of the induction and killing effects on locusts [D]. Beijing: China Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- 5 ZHOU Q, XU R Q, CHENG X T. Bio-photo-electro effect of insects and its application in pest control[J]. Progress in Modern Biomedicine, 2006, 6(4): 70-72.
- 6 CHARLES Barry, RUDOLF Jander. Photoinhibitory function of the dorsal ocelli in the phototactic reaction of the migratory locust *Locusta migratoria*[J]. Nature, 1968,217: 675-677.
- 7 王立新,牛虎力,周强.气扰刺激与波谱光源耦合作用下蝗虫的诱导捕集试验[J].农业工程学报,2014,30(5):108-115.
WANG Lixin, NIU Huli, ZHOU Qiang. Locust induced trapping experiment based on coupling effect of air disturbance stimulation and spectrum light source[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5): 108-115. (in Chinese)
- 8 AMIR A, ANGLE B Lange. Rhythmic behaviour and pattern-generating circuits in the locust:key concepts and recent updates[J]. Journal of Insect Physiology, 2010, 56(8):834-843.
- 9 BAILEY E V, HARRIS M O. The visual behavior of adult *Melanoplus sanguinipes* F. [J]. Journal of Insect Behavior, 1991, 4(6):707-726.
- 10 刘启航,周强.光声振耦合对蝗虫趋光响应的激发效应[J].农业机械学报,2012,43(11):197-202.
LIU Qihang, ZHOU Qiang. Effect of locusts phototactic response stimulated by light-sound-vibration coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(11):197-202. (in Chinese)
- 11 MICHIOY K, KERAM P, UWE H. Spectral properties of identified polarized-light sensitive interneurons in the brain of the desert locust *Schistocerca gregaria*[J]. Journal of Experimental Biology, 2007,210(8): 1350-1361.
- 12 BENNETT R R, HORRIDGE G A. Spectral sensitivity of single retinula cells of the locust[J]. Zeitschrift Für Vergleichende Physiologie, 1967, 55(2): 195-206.
- 13 刘启航,周强.蝗虫视觉光谱效应与趋光响应光谱的对比测定[J].光谱学与光谱分析,2014,34(7):1593-1596.
LIU Qihang, ZHOU Qiang. Comparative investigation of locust's phototactic visual spectrum effect and phototactic response to spectral illumination[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014,34(7):1593-1596. (in Chinese)

- 11 李丕茂,张幽彤,谢立哲,等. 共轨系统多次喷射油量波动与轨压的关系[J]. 机械工程学报,2014,50(10):112-120.
LI Pimao, ZHANG Youtong, XIE Lizhe, et al. Relationship between multi-injection oil mass deviation of common rail system and rail pressure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(10):112-120. (in Chinese)
- 12 YAN F, WANG J. Common rail injection system iterative learning control based parameter calibration for accurate fuel injection quantity control[J]. International Journal of Automotive Technology, 2011, 12(2):84-90.
- 13 杜巍,刘福水. 多缸柴油机转速波动与燃烧不均匀性的相关性[J]. 农业机械学报,2010,41(2):17-20.
DU Wei, LIU Fushui. Correlation between fluctuation of speed and combustion non-uniformity in a diesel engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2):17-20. (in Chinese)
- 14 CATANIA A E, FERRARI A, MITTICA A, et al. Common rail without accumulator: Development, theoretical-experimental analysis and performance enhancement at DI-HCCI level of a new generation FIS[C]. SAE Paper 2007-01-1258, 2007.
- 15 苏海峰,张幽彤,郝刚,等. 高压共轨多次喷射油量波动现象分析[J]. 北京理工大学学报,2011,31(7):795-798.
SU Haifeng, ZHANG Youtong, HAO Gang, et al. Analysis on multiple-injection fuel quantity fluctuation for high pressure common rail system[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(7):795-798. (in Chinese)
- 16 田丙奇,马修真,范立云,等. 高压共轨喷油系统循环喷油量波动研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2013,34(5):609-614.
TIAN Bingqi, MA Xiuzhen, FAN Liyun, et al. Investigation on the cycle fuel injection quantity fluctuation of the high pressure common rail system[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(5):609-614. (in Chinese)
- 17 崔慧峰,罗福强,董少锋,等. 柴油机渐缩形喷孔喷嘴流动特性研究[J]. 农业机械学报,2013,44(11):19-25.
CUI Huifeng, LUO Fuqiang, DONG Shaofeng, et al. Flow characteristics in diesel nozzle with convergent conical orifice [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11):19-25. (in Chinese)
- 18 徐洪军,常汉宝,邵利民,等. 重型直喷式柴油机多次喷射燃烧过程研究[J]. 内燃机工程,2009,30(5):54-58,62.
XU Hongjun, CHANG Hanbao, SHAO Limin, et al. Research on combustion process of a heavy duty DI diesel engine with split injection[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2009, 30(5):54-58,62. (in Chinese)
- 19 丁晓亮,张幽彤,熊庆辉,等. 压电式高压共轨喷油系统喷油量波动特性试验[J]. 农业机械学报,2010,41(7):11-14.
DING Xiaoliang, ZHANG Youtong, XIONG Qinghui, et al. Investigations into multiple-injection fuel quantity fluctuation for high pressure common rail system with piezo-actuated injector [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7):11-14. (in Chinese)
- 20 祝轲卿,徐权奎,杨林,等. 高压共轨喷油系统多次喷射油量精确测量与规律分析[J]. 农业工程学报,2007,23(8):117-121.
ZHU Keqing, XU Quankui, YANG Lin, et al. Multiple-injection quantity measurement and analysis in high pressure common rail injection system[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(8):117-121. (in Chinese)
- 21 刘兴华,樊志强,高琢. 高压共轨燃油系统轨压波动特性的实验研究[J]. 汽车工程,2010,32(7):575-578.
LIU Xinghua, FAN Zhiqiang, GAO Zhuo. An experimental study on the rail pressure fluctuation characteristics of high-pressure common rail fuel system [J]. Automotive Engineering, 2010, 32(7):575-578. (in Chinese)
- 22 徐劲松,申立中,王贵勇,等. 高压共轨柴油机轨压复合控制策略研究[J]. 内燃机工程,2012,33(2):54-59.
XU Jinsong, SHEN Lizhong, WANG Guiyong, et al. Study on compound control strategy of rail pressure for high pressure common rail diesel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2012, 33(2):54-59. (in Chinese)

(上接第 238 页)

- 14 江景良. 蝗虫复眼光谱敏感性的比较研究[J]. 生理学报,1983,35(1):5-9.
JIANG Jingliang. Spectralsensitivity of locust compound eyes: a comparative study[J]. Acta Physiologica Sinica, 1983, 35(1):5-9. (in Chinese)
- 15 吴卫国, HORRIDGE C A. 蝗虫复眼小网膜细胞角敏感度的变化规律[J]. 生物物理学报,1987,3(6):178-184.
WU Weiguo, HORRIDGE C A. Regular change of the angular sensitivity of the retinula cells in locust compound eye [J]. Acta Biophysica Sinica, 1987, 3(6):178-184. (in Chinese)
- 16 刘启航,周强. 光谱光照调控组合性光源激发蝗虫趋光效果试验[J]. 农业机械学报,2013,44(9):243-249.
LIU Qihang, ZHOU Qiang. Effect of locusts phototactic response to regulatory illuminance of LED light source [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9):243-249. (in Chinese)
- 17 MOTOHIRO W, FINLAY S, YUKIKO M, et al. Physiological basis of phototaxis to near-infrared light in *Nephotettix cincticeps* [J]. Journal of Comparative Physiology A, 2014, 200(6):527-536.
- 18 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.
- 19 HOMBERG U, AGNES P. Ultrastructure and orientation of ommatidia in the dorsal rim area of the locust compound eye [J]. Arthropod Structure & Development, 2002, 30(4):271-280.
- 20 魏国树,张青文,吴卫国,等. 棉铃虫蛾复眼光反应特性[J]. 昆虫学报,2002,45(3):323-328.
WEI Guoshu, ZHANG Qingwen, WU Weiguo, et al. Characteristic response of the compound eyes of *Helicoverpa armigera* to light [J]. Acta Entomologica Sinica, 2002, 45(3):323-328. (in Chinese)