

铜绿丽金龟对圆偏振光的行为和视网膜电位反应

蒋月丽^{1,2}, 郭予元^{1,3,*}, 武予清^{2,*}, 苗进²,
巩中军², 段云², 李彤²

(1. 西北农林科技大学植物保护学院, 陕西杨陵 712100; 2. 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, 农业部华北南部有害生物治理重点实验室, 郑州 450002;
3. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193)

摘要: 圆偏振光在地球环境中是很少见的, 来自珠宝金龟甲体壁反射圆偏振光是稀有的自然资源之一。铜绿丽金龟 *Anomala corpulenta* Motschulsky 与其他珠宝金龟甲一样其体壁能够反射左旋圆偏振光。为了解铜绿丽金龟对圆偏振光的感知能力, 本研究利用室内行为、田间诱集与视网膜电位 (electroretinogram, ERG) 等方法研究了铜绿丽金龟对圆偏振光的响应。室内行为研究结果表明, 铜绿丽金龟对左旋圆偏振光与右旋圆偏振光的趋光反应明显低于非偏振光, 避光反应明显大于非偏振光, 且对左旋圆偏振光的趋、避光反应均大于右旋圆偏振光。田间选择试验结果显示, 铜绿丽金龟对左旋和右旋圆偏振光的选择明显低于非偏振光, 且右旋大于左旋圆偏振光。电生理学研究表明, 左旋和右旋圆偏振光与非偏振光一样, 均能引发铜绿丽金龟的 ERG 反应, 且无明显差异。这些研究结果表明铜绿丽金龟体壁能够反射产生左旋圆偏振光, 且能够感知和区分左旋和右旋圆偏振光, 说明铜绿丽金龟存在偏振视觉, 具有圆偏振光敏感性。

关键词: 铜绿丽金龟; 圆偏振光; 偏振视觉; 趋光行为; 视网膜电位

中图分类号: Q968 **文献标识码:** A **文章编号:** 0454-6296(2013)12-1397-07

Behavioral and electroretinogram (ERG) responses of *Anomala corpulenta* (Coleoptera: Rutelidae) to circularly polarized light

JIANG Yue-Li^{1,2}, GUO Yu-Yuan^{1,3,*}, WU Yu-Qing^{2,*}, MIAO Jin², GONG Zhong-Jun², DUAN Yun², LI Tong² (1. College of Plant Protection, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Henan Key Laboratory of Crop Pests Control of Henan Province, IPM Key Laboratory in South of North-China, Ministry of Agriculture, Institute of Plant Protection, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 3. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: Circularly polarized light is rare in the terrestrial environment, and cuticular reflection from scarab beetles is one of the few natural sources. The scarab beetle *Anomala corpulenta* Motschulsky possesses a brilliant metallic appearance, and selectively reflects left circularly polarized light as other jewel beetles. To clarify the capacity of responses of *A. corpulenta* to circularly polarized light, indoor behavior, field selection and electroretinogram (ERG) responses of *A. corpulenta* to circularly polarized light were studied in this experiment. The indoor behavior research showed that the phototaxis responses of *A. corpulenta* to left and right circularly polarized light were significantly lower than those to unpolarized light, while the photophobism responses were significantly greater than the phototaxis responses to unpolarized light, and both the phototaxis and photophobism responses of *A. corpulenta* to left circularly polarized were greater than those to right circularly polarized light. The field selection test results showed that the selection of *A. corpulenta* to left and right circularly polarized light was obviously lower than that to unpolarized light, and the responses selecting to right circularly polarized light were stronger than that to left circularly polarized light. Electrophysiological studies showed that left and right circularly polarized could trigger ERG responses of *A. corpulenta* compound eyes as unpolarized light, and had no obvious difference among them. These results indicate that *A. corpulenta* is a metallic

基金项目: 国家公益性行业专项(201003025); 河南省农业科学院发展专项资金

作者简介: 蒋月丽, 女, 1982 年生, 河南杞县人, 博士研究生, 助理研究员, 研究方向为昆虫生态学, E-mail: yueli006@gmail.com

* 通讯作者 Corresponding authors, E-mail: yuyanguo@hotmail.com; yuqingwu36@hotmail.com

收稿日期 Received: 2013-07-19; 接受日期 Accepted: 2013-11-05

iridescent species that selectively reflects left circularly polarized light and possesses a brilliant metallic appearance. It can perceive and distinguish left and right circularly polarized light, and circularly polarized light can trigger ERG responses of *A. corpulenta* compound eyes as unpolarized light. These results support the hypothesis that *A. corpulenta* has polarization vision and sensitivity to circularly polarized light.

Key words: *Anomala corpulenta*; circularly polarization light; polarization vision; phototactic behavior; electroretinogram (ERG)

偏振光是指光矢量的方向和大小有规则变化的光。按其性质,可分为线性偏振光、圆偏振光和椭圆偏振光。在自然界中,偏振光的产生是普遍的,但是圆偏振光的产生却是很罕见的。圆偏振光是偏振光相当稀少的形式,在电场或 E -矢量的传播过程中区别于线性偏振光和椭圆偏振光 (Hannemann and Raschke, 1974)。早在 1854 年, LeConte 在美国西南部和墨西哥西部的山地松林中发现了珠宝金龟子 *Chrysina gloriosa* 用圆偏振光观察的时候能展现出黑色。根据偏振光照射时, *C. gloriosa* 外观的表现,研究者推测 *C. gloriosa* 能够感受到圆偏振光 (Brady and Cummings, 2010)。Michelson (1911) 研究发现珠宝金龟甲的反射光能够呈现黄铜和金色的是圆偏振光。后来的研究者也证实了这个结论 (Gaubert, 1924; Mathieu and Faraggi, 1937; Robinson, 1966; Neville and Caveney, 1969; Können *et al.*, 1985; Kattawar *et al.*, 1994; Srinivasarao, 1999; Horváth and Varjú, 2004), 且发现这种圆偏振光是左旋圆偏振光。大多数丽金龟科和花金龟科昆虫都具有产生这种圆偏振光的能力 (Pye, 2010)。Pye (2010) 推测这个特性也可能成为金龟科高级阶元的分类依据。许多金龟甲能够选择性反射左旋圆偏振光是由金龟甲鞘翅壳细胞的特殊结构决定的, 这个模式在结构和光学上类似于胆甾相液晶 (Robinson, 1966; Neville and Caveney, 1969; Caveney, 1971; Können *et al.*, 1985; Wolken, 1995; Hegedüs *et al.*, 2006; Jewell *et al.*, 2007; Sharma *et al.*, 2009)。Goldstein (2006) 报道了珠宝金龟甲的偏振特性, 并讨论了其研究历史。昆虫反射圆偏振光是以光谱为基础的, Lowrey 等 (2007) 发现有些金龟甲能够反射较窄波段的左旋偏振光, 有些能够反射较宽波段的左旋偏振光, 还有些昆虫可以反射椭圆偏振光 (如 *Chrysina woodi*)。另外, 一些口足类的动物也能够反射产生圆偏振光, 在它们的尾巴上有一个能够反射圆偏振光的斑块 (Chiou *et al.*, 2008)。

铜绿丽金龟 *Anomala corpulenta* Motschulsky 属鞘翅目 (Coleoptera) 丽金龟科 (Rutelidae)。全国各地均有发生, 是北方农产区的重要害虫之一。主要为害茄科、豆科、十字花科和葫芦科蔬菜及其他作物。成虫取食果树、林木及作物叶片; 幼虫为害作物幼苗根颈部分, 使苗枯死, 以对花生、大豆等农作物的危害较重 (李为争等, 2009)。铜绿丽金龟也是能够产生圆偏振光的类群, 和其他已报道的珠宝金龟甲一样 (Michelson, 1911; Sharma *et al.*, 2009; Miklós *et al.*, 2012), 当用左旋偏振片过滤其体壁的颜色时, 其体壁的绿色会加重, 当用右旋偏振片过滤时, 其体壁会改变颜色, 变成棕色。这些能够产生圆偏振光的珠宝金龟甲是否存在偏振视觉? 或者仅仅是体壁能够反射左旋圆偏振光, 近年来, 这些问题引起了研究者的兴趣。Brady 和 Cummings (2010) 研究发现珠宝金龟甲 *C. gloriosa* 能够区分圆偏振光与非偏振光以及线性偏振光, 存在偏振视觉, 并且推测珠宝金龟甲对圆偏振光的反射可能是一种生物信号, 可以在同种之间感知和交流以躲避天敌或者寻找同伴, 并在传递过程中可以保持信息的完整性。Warrant (2010) 也支持同样的结论。但是, Blahó 等 (2012) 报道了左旋圆偏振光对 *Anomala dubia*, *Anomala vitis*, *Cetonia aurata* 和 *Potosia cuprea* 这 4 种珠宝金龟没有“吸引”作用, 它们仅仅拥有能够反射左旋圆偏振光的体壁, 在觅食、交尾和同种交流的过程中并不能作为其交流的信号, 但“选择性试验”并没有试图去寻找金龟子对左旋圆偏振光的“感知”。目前, 仅仅有口足类动物螳螂虾 *Odontodactylus* 被证实存在辨别左旋和右旋圆偏振光的能力。Chiou 等 (2008) 以及 Kleinlogel 和 White (2008) 运用行为学、光学解剖、电生理学和生物信号研究等方法研究了口足类动物螳螂虾的圆偏振视觉敏感性和机制。而证实珠宝金龟甲存在偏振视觉的研究还鲜有报道, 鉴于此, 继续开展珠宝金龟甲对圆偏振光的响应研究仍然是非常必要的。

为了了解铜绿丽金龟是否具有感知圆偏振光的能力,我们从室内趋光行为、田间选择以及电生理学等方法上对其进行了研究。本研究的开展为昆虫对圆偏振光资源的利用和铜绿丽金龟的光物理综合治理提供重要的理论基础。

1 材料与方法

1.1 铜绿丽金龟体壁反射偏振光的测定

铜绿丽金龟采自河南省农业科学院原阳实验基地,选择健壮个体,运用尼康相机(D90)与偏振片组合拍摄铜绿丽金龟。

1.2 铜绿丽金龟对圆偏振光的行为反应测定

1.2.1 试验装置:根据铜绿丽金龟的习性,并参照吕飞(2012)的研究,设计并制作了如下的光行为反应装置。铜绿丽金龟对不同光刺激具有选择性,故其主体分为两部分,即趋光反应室和避光反应室(35 cm × 30 cm × 20 cm),中间为空间相对较大的栖息活动室(40 cm × 30 cm × 30 cm)。活动室中心位置设置了一块阻止入射光进入避光反应室的挡光板,该挡光板可以移动,从而将趋光反应室和避光反应室在光路上分隔开来(图1)。光源采用50 W的溴钨灯(OSRAM,德国西门子集团),在市场上购得圆偏振片,其透光率38%,偏光率99.98%。用

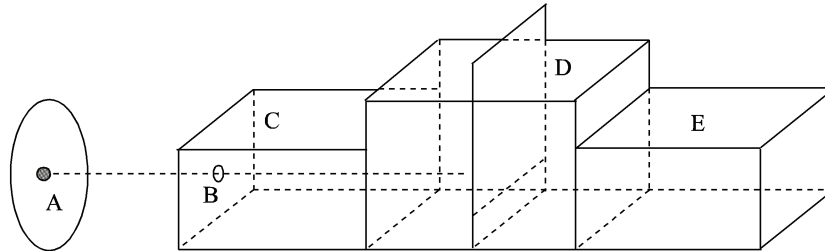


图1 铜绿丽金龟光行为反应装置示意图

Fig. 1 Sketch map of device for testing phototaxis behavior of *Anomala corpulenta*

A: 光源 Light source; B: 圆偏振片透光孔 The hole of circular polarizer light; C: 趋光反应室 Phototactic response chamber; D: 避光反应室 Photophobic response chamber; E: 非偏振光室 Unpolarized light chamber.

变阻器调节使各处理之间光强保持一致。

1.2.2 试虫处理:铜绿丽金龟采自河南省农业科学院原阳实验基地,在室内的玻璃缸中饲养(温度控制在25~28℃,相对湿度为70%~75%)。选择健壮雌雄个体作为试虫,为使其复眼适应状态保持一致,每次试验前,把试虫置于室内日光灯下光适应1 h,再置于暗室中暗适应2 h。

1.2.3 试验方法:试验在暗室中进行,温度保持于23~25℃,相对湿度75%~80%。每次光照时间为20 min,各处理间隔10 min。光照处理后,在红光灯下分别统计不同类型光条件下趋光反应室和避光反应室内的虫体数,计算其各自的趋光、避光行为反应率。趋光反应率(%)=(趋光反应室的虫数/试虫数)×100;避光反应率(%)=(避光反应室的虫数/试虫数)×100。每处理30头左右试虫,重复6次。

1.3 铜绿丽金龟对圆偏振光的田间选择

试验于2012年6~7月间在河南省农业科学院原阳基地进行,试验田主要作物为花生,周围作物有玉米、金银花等。诱虫灯采用河南省天意公司提

供的太阳能诱虫灯,灯的高度可以调节,本试验设置灯高约160 cm。灯管为15 W的近紫外蓝光灯,在灯管下的50 cm处固定一个盆架,放上黄色塑料盆,盆里放半盆清水。试验设置3个处理,左旋圆偏振光、右旋圆偏振光和非偏振光,用偏振片包在灯管的外面,制作成偏振光诱虫灯,用变阻器调节非偏振灯的光强,使其3个灯的光强度保持一致。3个灯成三角形排列,相距约15 m。每天早上收集盆中的铜绿丽金龟,并计数,然后更换3个灯的位置,按顺时针调换,每天更换1次,共诱集31 d。

1.4 铜绿丽金龟复眼对圆偏振光的视网膜电位反应

1.4.1 供试昆虫:铜绿丽金龟采自河南省农业科学院原阳实验基地,在室内的玻璃缸中饲养(温度控制在25~28℃,相对湿度为70%~75%之间)。饲料主要是新鲜的女贞叶和西红柿。

1.4.2 试虫处理:挑选健壮的铜绿丽金龟成虫,用CO₂轻微麻醉0.5~1 min使其昏迷。剪掉其附肢后用蜂蜡将其腹部朝下固定于一多维可调的球关节蜡台上,解剖镜下用特制微型手术刀于其右侧复

眼背部近边缘的角膜位置打一三角形小孔,待插入记录电极。另外,在其中胸背部中央打一小孔,以插入铂金丝作为参考电极。

1.4.3 试验装置及方法: 试验在暗室中于夜间 20:00–24:00 进行,实验室温度保持 23~25℃。试验方法参考魏国树等(2002)。

(1)光源及光刺激: 静止的白光和点单色光,均由 150 W 高压汞灯获得。光首先经石英隔热玻璃滤去红外,再由干涉滤光片获得单色光,单色光刺激的波长为 340, 360, 380, 400, 420, 440, 460, 483, 498, 524, 538, 562, 582 和 605 nm,继而通过一组调节光强度的中性滤光片或中性楔形滤光片,然后经过用石英聚光镜将平行光会聚于内径为 3 mm 的石英光导入光端的焦平面上,得到刺激光。由计算机控制的电磁快门驱动器,用于适时触发快门及控制光刺激的时程。每次刺激时长为 3 000 ms,刺激间隔为 10 s。通过光谱选择试验后,筛选出较为敏感的 400 和 524 nm 以及白光与偏振片组合成偏振光源,处理分左旋圆偏振光、右旋圆偏振光和 CK(非偏振光)。各处理的偏振片放置的位置保持一致。刺激时长 3 000 ms,刺激间隔为 40 s。

(2)光强度测量: 光谱试验时,为消除不同干涉滤光片对单色光光强度衰减的差异,依热敏光电耦合照度计和检流计(street lighting photometer)(EVANS Electroselenium LTD, HALSTEAD ESSEX ENGLAND)读数,用中性滤光片、中性楔形滤光片调节不同波长单色光的光强度一致。偏振光试验

时,非偏振光用偏振片的反面与其组合,以保持其与偏振光的光强度一致。

(3)记录: 玻璃微电极由武汉微探科学仪器有限公司提供的高硼硅双层玻璃微管(外径 1.2 mm,内径 0.71 mm,长度 90 mm)在电极拉制仪(P-97, Sutter, USA)上拉制而成,其尖端直径约为 2 μm ,灌注液为 3 mol/L 醋酸钾溶液。样品台置于微电极推进仪上,调节推进仪使记录电极插入复眼小孔内,下插至视网膜细胞层。电极插入复眼视网膜细胞时,测得电极的尖端阻抗为 60 M Ω 。采得的电位信号输入前置放大器(Electrode Amplifier L/M-1, UST-MEDICAL-ELECTRONIC, 德国)后,一方面经隔离放大器输入计算机进行记录,另一方面直接输入示波器(PM3234 0-10, Philips)进行实时监测。

1.5 数据分析

试验数据采用 Excel 软件和 SPSS 16.0 数据处理系统进行数据统计,不同处理间差异显著性分析采用 *F* 检验。

2 结果与分析

2.1 铜绿丽金龟翅膀对圆偏振光的反射

铜绿丽金龟的照片见图 2,从图上可以看出,铜绿丽金龟经过圆偏振片过滤以后体色会发生改变。当用左旋偏振片过滤其体壁的颜色时,绿色会加重,而当用右旋偏振片过滤时,其体壁会变成棕色,不用偏振片过滤时其体色保持不变。

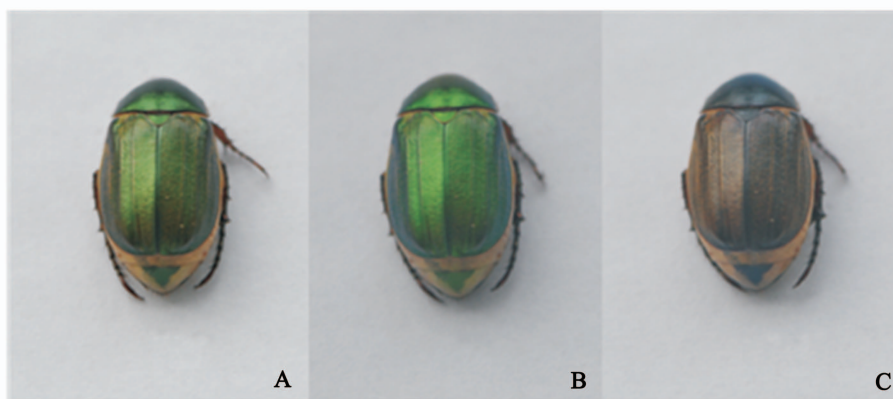


图 2 铜绿丽金龟的照片(背景白色)

Fig. 2 Photographs of *Anomala corpulenta* (background white)

A: 没有用偏振片过滤 No filter; B: 左旋圆偏振片过滤 Left circularly polarized; C: 右旋圆偏振片过滤 Right circularly polarized.

2.2 铜绿丽金龟对圆偏振光的行为反应

从表 1 可以看出, 3 种类型的光均能引发铜绿丽金龟的趋光、避光反应。非偏振光的趋光反应率(30.75%)明显大于右旋圆偏振光(11.52%) ($P < 0.05$)和大于左旋(19.92%)圆偏振光处理, 但是左旋(24.88%)与右旋圆偏振光(21.03%)的避光反应率明显大于非偏振光(2.22%) ($P < 0.05$), 左旋

圆偏振光的趋、避光反应率均大于右旋圆偏振光($P \geq 0.05$)。由此说明, 铜绿丽金龟对左旋和右旋圆偏振光有很好的避光行为, 左旋圆偏振光总的光反应率(44.80%)明显大于右旋圆偏振光(32.55%) ($P < 0.05$), 即铜绿丽金龟对左旋圆偏振的敏感度大于右旋圆偏振光。这些结果表明铜绿丽金龟能够感知圆偏振光, 且对左旋圆偏振光较为敏感。

表 1 铜绿丽金龟对圆偏振光的趋、避光行为反应
Table 1 Phototaxis and photophobism responses of *Anomala corpulenta* to circularly polarized light

光源 Light source	样本数 N	趋光率 Phototaxis rate (%)		避光率 Photophobism rate (%)	
		平均值 ± 标准误	变异系数 CV	平均值 ± 标准误	变异系数 CV
		Mean ± SE	Coefficient of variation	Mean ± SE	Coefficient of variation
LCP	6	0.1992 ± 0.0308 ab	0.3791	0.2488 ± 0.0353 a	0.3473
RCP	6	0.1152 ± 0.0117 b	0.2484	0.2103 ± 0.0296 a	0.3448
UP	6	0.3075 ± 0.0907 a	0.7222	0.0222 ± 0.0222 b	2.4480

LCP: 左旋圆偏振光 Left circularly polarized light; RCP: 右旋圆偏振光 Right circularly polarized light; UP: 非偏振光 Unpolarized light. 同一列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) (F 检验)。Data in the figure are mean ± SE. Different letters following the data in a column indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$) (F test) .

2.3 铜绿丽金龟对圆偏振光的田间选择

铜绿丽金龟对圆偏振光的田间选择结果见图 3。由图 3 可以看出, 铜绿丽金龟对左旋和右旋圆偏振光的趋性明显低于非偏振光。选择性试验共 31 d, 非偏振光对铜绿丽金龟的诱集量为 12.16 头/日, 而左旋圆偏振光与右旋圆偏振光对其的诱集量仅为 1.16 头/日和 2.06 头/日, 且差异不显著。在非偏振光与偏振光的波长和光强均一致的情况下, 诱集率差异明显, 充分说明铜绿丽金龟对圆偏振光具有一定的避光效果, 也说明铜绿丽金龟能够区分偏振光与非偏振光, 即铜绿丽金龟能够感知左旋和右旋圆偏振光, 且对左旋圆偏振光较为敏感。

2.4 铜绿丽金龟对圆偏振光的视网膜电位反应

经过光谱敏感度筛选, 获得铜绿丽金龟较为敏感的单色光 400 nm、524 nm 以及白光与圆偏振片组合获得左旋圆偏振光源和右旋圆偏振光源。ERG 测试结果见图 4。由图 4 可以看出: 不同类型的光均能激发铜绿丽金龟雌雄成虫的 ERG 反应, 左旋圆偏振光(LCP)与右旋圆偏振光(RCP)以及对照(UP)之间差异不明显。但从雌雄混合群体来看, 白光圆偏振光的 ERG 值大小依次是 LCP > RCP > UP; 400 nm 圆偏振光依次是 LCP > RCP > UP; 524 nm 圆偏振光依次是 RCP > LCP > UP, 白光与 400 nm 的 ERG 值均是左旋圆偏振光较大, 以 400 nm

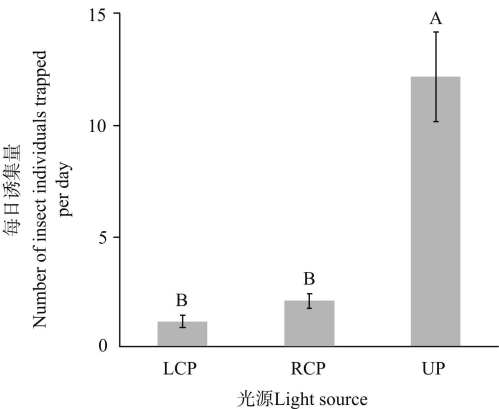


图 3 铜绿丽金龟对圆偏振光的田间选择

Fig. 3 Field selection of *Anomala corpulenta* to circularly polarized light

LCP: 左旋圆偏振光 Left circularly polarized light; RCP: 右旋圆偏振光 Right circularly polarized light; UP: 非偏振光 Unpolarized light. 图中数据为平均数 ± 标准误; 柱上不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) (F 检验)。Data in the figure are mean ± SE. Different letters above bars indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$) (F test) .

圆偏振光较为明显, 说明铜绿丽金龟复眼可能对左旋圆偏振光较为敏感。另外, 从图上还可以看出, 铜绿丽金龟雌性比雄性对圆偏振光的 ERG 反应较为敏感。

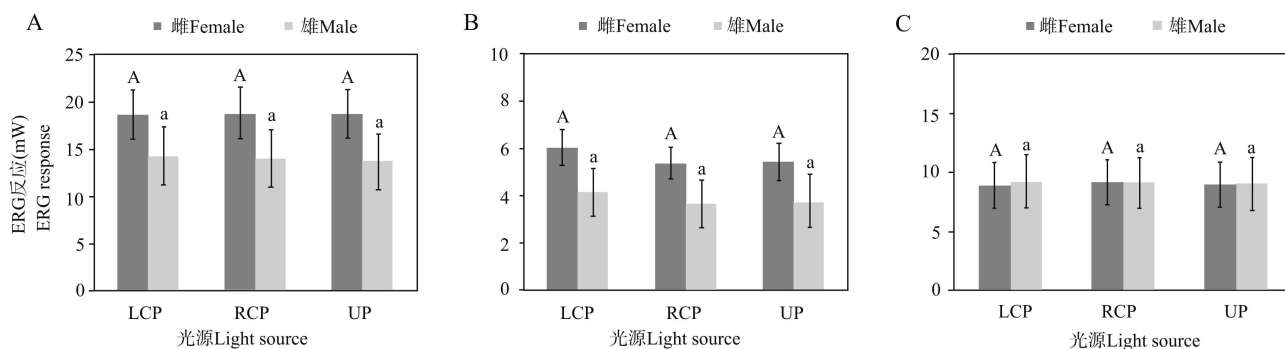


图4 铜绿丽金龟对圆偏振光的视网膜电位反应

Fig. 4 ERG responses of *Anomala corpulenta* to circularly polarized light

A: 白光 White light, 雄虫 Male, $n=8$; 雌虫 Female, $n=9$. B: 400 nm, 雄虫 Male, $n=4$; 雌虫 Female, $n=8$. C: 524 nm, 雄虫 Male, $n=4$; 雌虫 Female, $n=8$. LCP: 左旋圆偏振光 Left circularly polarized light; RCP: 右旋圆偏振光 Right circularly polarized light; UP: 非偏振光 Unpolarized light. 表中数据为平均数 $\pm$ 标准误; 柱上不同大小写字母分别表示处理间雌虫、雄虫差异显著 ($P < 0.05$) (F 检验)。Data in the figure are mean $\pm$ SE. Different capital and lowercase letters above bars indicate significant differences among females and males in different treatments, respectively ($P < 0.05$) (F test).

3 结论与讨论

研究表明, 与其他珠宝金龟甲 *C. gloriosa* (Brady and Cummings, 2010), *A. dubia*, *A. vitis*, *C. aurata* 和 *P. cuprea* (Blahó et al., 2012) 一样, 铜绿丽金龟也能够反射左旋圆偏振光。室内的偏振光行为反应测定结果显示非偏振光的趋光反应率明显大于左旋和右旋圆偏振光, 左旋与右旋圆偏振光的避光反应率明显大于非偏振光, 左旋圆偏振光的趋避光反应率均大于右旋圆偏振光, 由此说明, 铜绿丽金龟对左旋和右旋圆偏振光有很好的避光行为。朱智慧和雷朝亮(2011)认为昆虫的趋光和避光均为光胁迫下的行为反应, 昆虫的趋光性分为正趋光性和负趋光性。正趋光性是昆虫趋向光源的活动, 而负趋光性是昆虫背向光源的活动。因此, 避光行为也是趋光行为的一种。而铜绿丽金龟左旋圆偏振光总的光反应率大于右旋圆偏振光和非偏振光, 因此, 铜绿丽金龟对左旋圆偏振的光敏感性大于右旋圆偏振光和非偏振光。

铜绿丽金龟圆偏振光的田间选择试验结果显示, 非偏振光的日诱集量明显大于左旋和右旋圆偏振光, 左旋圆偏振光大于右旋圆偏振光, 但差异不显著。与以上的室内光行为结论也是一致的。这些结果表明, 铜绿丽金龟能够区分圆偏振光与非偏振光, 以及左旋圆偏振和右旋圆偏振, 存在偏振视觉。这与 Brady 和 Cummings (2010) 的研究结论一致, 也支持了他们的假设: 能够反射左旋圆偏振光

的金龟甲存在偏振视觉。Warrant (2010) 等也认为珠宝金龟甲能够看到偏振光, 并且很可能成为生物交流的视觉信号, 用于同种交流和躲避天敌。

铜绿丽金龟对圆偏振光的视网膜电位反应研究显示, 左旋圆偏振光、右旋圆偏振光、非偏振光之间无明显差异。这似乎与行为反应结论不一致, 但是, 胞外电位 ERG 则是复眼感受外界光刺激将光学能量转化为神经冲动电位的起点, 因此无论昆虫趋光或者避光都是对外界刺激的反应, ERG 值是对外界刺激的反应总和, 所以, 铜绿丽金龟对 3 种光的 ERG 值无明显差异, 并不能说明该昆虫不能区分这 3 种光。另外, 从铜绿丽金龟对这 3 种光的 ERG 值可以看出, 铜绿丽金龟对圆偏振光的反应敏感度与非偏振光的敏感度相似。本研究是首次将 ERG 技术用于金龟甲对圆偏振光的反应, 从行为和生理研究的结果对比显示, 胞外电位只能说明铜绿丽金龟像感受非偏振光一样, 能够对圆偏振光产生电位反应。而 Chiou 等(2008)等对口足类动物螳螂虾的电生理研究运用了胞内电位技术, 充分证明了其对圆偏振光的反应, 且找到了感受偏振光的光感受器位置。本研究是通过胞外电位技术粗略的证实了铜绿丽金龟对圆偏振光的反应, 至于铜绿丽金龟的感受偏振光的感光器的位置以及有多少感受偏振光的感光器, 都有待研究。因此, 铜绿丽金龟对圆偏振光的感受, 需要更深入的进行胞内电位和其复眼的微观结构的研究, 以及其偏振光光受体的分子生物学研究去证实。

近年来, 珠宝金龟甲与圆偏振光的关系是国际

昆虫学家研究的热点。关于珠宝金龟甲对圆偏振光的感受机制, 以及对圆偏振光的有效利用问题, 都需要更进一步地去研究和探索。希望本研究能为该领域的更深入研究提供一定的理论依据, 也期望该研究为推动国内该领域的研究提供参考。

致谢 视网膜电位试验是在河北农业大学魏国树教授实验室完成的, 感谢魏国树教授的指导和支持! 在实验过程中河南农业大学的研究生张元臣、本科实习生黄志娟提供了很大的帮助, 在此表示衷心的感谢!

参考文献 (References)

- Blahó M, Egria Á, Hegedűs R, Jósvali J, Tóth M, Kertész K, Biró LP, Kriska G, Horváth G, 2012. No evidence for behavioral responses to circularly polarized light in four scarab beetle species with circularly polarizing exocuticle. *Physiology & Behavior*, 105: 1067–1075.
- Brady P, Cummings M, 2010. Differential response to circularly polarized light by the jewel scarab beetle *Chrysina gloriosa*. *American Naturalist*, 175(5): 614–620.
- Caveney S, 1971. Cuticle reflectivity and optical activity in scarab beetles: the role of uric acid. *Proc. R. Soc. Lond. B*, 178: 205–225.
- Chiou TH, Kleinlogel S, Cronin T, Caldwell R, Loeffler B, Siddiqi A, Goldizen A, Marshall J, 2008. Circular polarization vision in a stomatopod crustacean. *Curr. Biol.*, 18: 429–434.
- Gaubert P, 1924. Sur la polarisation circulaire de la lumière réfléchie par les insectes. *Comptes Rendus*, 179: 1148–1150.
- Goldstein DH, 2006. Polarization properties of Scarabaeidae. *Appl. Opt.*, 45: 7944–7950.
- Hannemann D, Raschke E, 1974. Measurements of the elliptical polarization of sky radiation: preliminary results. In: Gehrels T ed. *Planets, Stars and Nebulae Studied with Photopolarimetry*. University of Arizona Press, Tucson. 510–513.
- Hegedűs R, Szél G, Horváth G, 2006. Imaging polarimetry of the circularly polarizing cuticle of scarab beetles (Coleoptera: Rutelidae, Cetoniidae). *Vision Res.*, 46: 2786–2797.
- Horváth G, Varjú D, 2004. *Polarized Light in Animal Vision*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Jewell SA, Vukusic P, Roberts NW, 2007. Circularly polarized colour reflection from helicoidal structures in the beetle *Plusiotis boucardi*. *New J. Phys.*, 9(99): 1–10.
- Kattawar GW, 1994. A search for circular polarization in nature. *Optics & Photonics News*, 5(9): 42–43.
- Kleinlogel S, White AG, 2008. The secret world of shrimps: polarization vision at its best. *PLoS ONE*, 3: e2190.
- Können GP, 1985. *Polarized Light in Nature*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Li WZ, Yuan YH, Yuan GH, Luo MH, Guo XR, 2009. Selection and feeding responses of *Anomala corpulenta* adults to different plant leaves. *Chinese Journal of Ecology*, 28: 1905–1908. [李为争, 袁莹华, 原国辉, 罗梅浩, 郭线茹, 2009. 铜绿丽金龟对不同植物叶片的选择和取食反应. 生态学杂志, 28: 1905–1908]
- Lowrey S, De Silva L, Hodgkinson I, Leader J, 2007. Observation and modeling of polarized light from scarab beetles. *Optical Society of America*, 24(8): 2418–2425.
- Lv F, 2012. Study on Microstructure of the Compound Eye and Phototactic and Colour Behavior of *Maladera orientalis* Motsch. (Coleoptera: Scarabaeidae). MSc Thesis, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei. [吕飞, 2012. 黑绒鳃金龟成虫复眼显微结构及其趋光、趋色行为学研究. 河北保定: 河北农业大学硕士学位论文]
- Mathieu JP, Faraggi N, 1937. Étude de la lumière polarisée circulairement réfléchie par certains Coleopteres. *Comptes Rendus*, 205: 1378–1380.
- Michelson AA, 1911. On metallic colouring of birds and insects. *Philos. Mag.*, 21: 554–567.
- Neville AC, Caveney S, 1969. Scarabaeid beetle exocuticle as an optical analogue of cholesteric liquid crystals. *Biol. Rev.*, 44: 531–562.
- Pye JD, 2010. The distribution of circularly polarized light reflection in the Scarabaeoidea (Coleoptera). *Biol. J. Linn. Soc.*, 100: 585–596.
- Robinson C, 1966. The cholesteric phase in polypeptide solutions and biological structures. *Mol. Cryst.*, 1: 467–494.
- Sharma V, Crne M, Park JO, Srinivasarao M, 2009. Structural origin of circularly polarized iridescence in Jewel beetles. *Science*, 325(24): 449–451.
- Srinivasarao M, 1999. Nano-optics in the biological world: beetles, butterflies, birds, and moths. *Chem. Rev.*, 99: 1935–1961.
- Warrant EJ, 2010. Polarisation vision: beetles see circularly polarised light. *Curr. Biol.*, 20(14): 611–612.
- 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, 周明群, 吴卫国, 2002. 棉铃虫蛾复眼光反应特性. 昆虫学报, 45(3): 323–328]
- Wolken JJ, 1995. *Light Detectors, Photoreceptors, and Imaging Systems in Nature*. Oxford University Press, New York. 229–251.
- Zhu ZH, Lei CL, 2011. Progress on insect phototaxis and light stress research. In: Lei CL, Wu KM, Zhao SY eds. *Research on Physical Monitoring and Control Technology of Pests in China*. Hubei Science and Technology Press, Wuhan. 1–11. [朱智慧, 雷朝亮, 2011. 昆虫趋光性与光胁迫研究进展. 见: 雷朝亮, 吴孔明, 赵树英主编. 中国害虫物理监测与控制技术研究. 武汉: 湖北科学技术出版社. 1–11]

(责任编辑: 袁德成)