

青斑蝶成虫释放诱集研究*

李承哲** 王 华 唐宇翀 陈晓鸣*** 姚 俊 石 雷 周成理

(中国林业科学研究院资源昆虫研究所, 国家林业局资源昆虫培育与利用重点实验室, 昆明 650224)

摘 要 【目的】为营造蝴蝶飞舞的景观, 本研究以青斑蝶 *Tirumala limniace* Cramer 为对象, 探究了颜色和气味对该蝶觅食的引诱作用, 根据引诱结果设计出一种在蝴蝶放飞后引诱蝴蝶的装置。该装置包括合适的假花颜色、引诱剂和彩灯颜色。【方法】分别测定了不同颜色和挥发性信息化合物诱集到青斑蝶的数量。【结果】视觉和嗅觉信号均对青斑蝶的觅食有引诱作用。视觉信号中, 5 种颜色假花引诱效果最好的是白色 (9.0%), 其次是黄色 (3.7%) 和红色 (2.0%), 粉红 (1.7%) 和紫色 (1.0%) 最差。3 种灯光对青斑蝶的引诱效果都好于对照, 其中引诱效果最好的是 7 色彩灯 (9.3%), 其次是粉红色 (8.3%) 和红色灯 (7.0%)。嗅觉信号中, 3 种蜜源信息引诱剂引诱效果最好的是混合物 (1% α -蒎烯+1% 水杨酸甲酯+1% 1-辛醛) 和对照 (蜂蜜水), 其次是 1% 水杨酸甲酯, 1% α -蒎烯最差。喷洒蜜源信息和蜂蜜水的红色、黄色和白色假花对青斑蝶的平均引诱率比不喷时分别提高了 2.38 倍、1.91 倍和 1.97 倍, 说明青斑蝶在觅食时以嗅觉信号为主, 视觉信号为辅。【结论】因此, 该引诱装置选择的假花颜色为白色、黄色和红色; 引诱剂为 1% α -蒎烯+1% 水杨酸甲酯+1% 1-辛醛的混合物; 彩灯为 7 色彩灯; 较好的放飞方式是分多次放飞, 每次放飞蝴蝶数量 200~250 只。该装置制作简便, 造价便宜, 可重复多次使用, 对蝴蝶持续引诱效果较好, 适合在网室内和野外蝴蝶放飞时使用。

关键词 觅食, 引诱, 视觉, 嗅觉, 模拟装置

Methods of attracting adult *Tirumala limniace*

LI Cheng-Zhe** WANG Hua TANG Yu-Chong CHEN Xiao-Ming***
YAO Jun SHI Lei ZHOU Cheng-Li

(Key Laboratory of Cultivating and Utilization of Resources Insects of State Forestry Administration,
Research Institute of Resources Insects, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650224, China)

Abstract 【Objectives】In order to increase the abundance of butterflies at a specific site, we explored the roles of color and odor in attracting foraging adult *Tirumala limniace* Cramer. 【Methods】We designed, and tested the effectiveness of, equipment to attract released adult *T. limniace*. The equipment included appropriate colored artificial flowers, attractants and lights. The numbers of adults attracted by different colors and volatile compounds were compared. 【Results】Both visual and olfactory signals were attractive to foraging *T. limniace*. The most effective of the five different-colored artificial flowers was white (9.0%), followed by yellow (3.7%) red (2.0%), pink (1.7%) and purple (1.0%). All three colors of light were more attractive to *T. limniace* than the control. The most effective light was a combination of seven colors (9.3%), followed by pink (8.3%) and red (7.0%). The best olfactory attractants were a synthetic blend (1% α -pinene + 1% methyl salicylate + 1% 1-octanal) and the control (honey water), followed by 1% methyl salicylate. The worst olfactory attractant was 1% α -pinene. The average attraction rates of spraying attractants and honey water onto red, yellow and white flowers were 2.38, 1.91 and 1.97 times higher, respectively, than no attractants and honey water. These results indicate that foraging *T. limniace* are attracted by a combination of cues, and that olfactory cues are more important than visual cues. 【Conclusion】The most effective lure was comprised of white, yellow and red artificial flowers, a synthetic blend of olfactory attractants (1% α -pinene

*资助项目 Supported projects: 林业公益性行业科研专项项目“开放式蝴蝶景观构建关键技术研究及应用”(201504305)

**第一作者 First author, E-mail: chengzheli@163.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: cafcxm@139.com

收稿日期 Received: 2016-05-09, 接受日期 Accepted: 2016-07-29

+ 1% methyl salicylate + 1% 1-octanal), and a seven-colored lamp. It is best to successively release groups of 200-250 adult butterflies at a time. The equipment is easy to make, inexpensive and reusable. It continuously attracts butterflies and is suitable for use in net houses and outdoor habitats after butterflies have been released.

Key words foraging, lure test, visual, olfactory, analogue equipment

蝶类大多数为访花种类, 主要以花蜜为食, 个别种类取食花粉 (Gilbert, 1972)。蝶类成虫期营养对维持其生命活动、生殖及种群繁衍至关重要 (Tudor *et al.*, 2004)。然而, 不同蝶种访问的花朵种类不同 (Feber *et al.*, 1996; Corbet, 2000; Tudor *et al.*, 2004; Hardy *et al.*, 2007), 这是由于蜜源植物的特征, 如花的颜色、气味、形态, 在很大程度上决定了访花昆虫种类 (Dobson, 1994; Lunau and Maier, 1995)。访花者也对特定蜜源植物表现出偏好 (Kevan and Baker, 1983; Ômura and Honda, 2005)。不同蝶种对颜色的偏好不同, 大多数蝴蝶有 2 个偏好区域, 一个是蓝紫色区, 另一种是长波长区 (Blackiston *et al.*, 2011)。行为研究表明 (Ilse and Vaidya, 1956; Swihart, 1970; Scherer and Kolb, 1987a, 1987b; Ômura and Honda, 2005; Tiple *et al.*, 2006; Tang *et al.*, 2013), 一些凤蝶偏好紫色和蓝色, 部分粉蝶偏好黄色、紫色和蓝色, 有些蛱蝶偏好黄色和蓝色, 部分斑蝶偏好橙色、黄色和红色。现已证实某些蝶类成虫具有严格意义上的色觉 (Kelber and Pfaff, 1999; Kinoshita *et al.*, 1999; Blackiston *et al.*, 2011), 即仅依靠波长就能够区分色彩, 而不依靠光强度 (Goldsmith, 1990), 且在蜜源搜寻中发挥关键作用 (Kinoshita and Arikawa, 2000; Andersson and Dobson, 2003; Borges *et al.*, 2003; Ômura and Honda, 2005)。已在不少蝶类中证实蝶类复眼存在与膜翅目蜂类类似的 3 种基本的视觉色素 (Bernard, 1979; Briscoe and Chittka, 2001; Arikawa *et al.*, 2005; Sauman *et al.*, 2005; Stavenga and Arikawa, 2006), 分别感受紫外、蓝和绿色光。在一些凤蝶、粉蝶及蛱蝶复眼中还发现感觉红光波段的视觉色素存在 (Kelber and Pfaff, 1999; Wakakuwa *et al.*, 2004; Zaccardi *et al.*, 2006; Koshitaka *et al.*, 2008)。在普遍

存在于小眼中的过滤色素的协同作用下, 这些蝶类成虫能够识别从紫外至暗红色的光谱区域, 成为动物界识别光谱范围最宽的类群之一 (Briscoe and Chittka, 2001)。

花的气味通常在吸引虫媒昆虫传粉方面扮演重要角色, 尤其是气味挥发物对传粉昆虫的感官反应、定向和觅食行为是很重要的 (Dobson, 2006)。花的香味促进蜜源植物对传粉者的吸引力 (Raguso, 2008)。特定的花香挥发物促进菜粉蝶 *Pieris rapae* 近距离定位花朵, 也可作为识别食物来源的线索 (Honda *et al.*, 1998)。Andersson (2003) 对孔雀蛱蝶 *Inachis io*、荨麻蛱蝶 *Aglaia urticae* 和钩粉蝶 *Gonepteryx rhamni* 的研究表明, 花的气味对最初识别及随后确认及辨别有报偿的植物是重要的提示信号。虽然蝴蝶对花的偏好不同 (Corbet, 2000), 但有些蝴蝶优先访问同一种花 (Tudor *et al.*, 2004), 还发现有些依赖蝴蝶传粉的花拥有相似的气味成分 (Andersson *et al.*, 2002), 这说明蝴蝶不仅对特异性的挥发物产生偏好, 也对蜜源植物有些相同的挥发物产生偏好。

很多昆虫都具有趋光性 (Phototaxis), 鳞翅目蛾类的趋光性很常见, 但有关蝶类在夜晚的趋光性报道较少。在美国, 灰蝶科 *Lycaenidae* 的 *Hypaurotis corydon* (Hessel, 1965) 和蛱蝶科 *Nymphalidae* 的 *Nymphalis vaualbum j-album* (Anderson, 1960) 有趋光性, 在印度, Chowdhury 和 Soren (2011) 对印度趋光性的蝶类进行总结, 发现主要分布在凤蝶科 *Papilionidae*、粉蝶科 *Pieridae*、蛱蝶科 *Nymphalidae*、眼蝶科 *Satyridae*、灰蝶科 *Lycaenidae*、弄蝶科 *Hesperiidae*, 还发现斑蝶科 *Danaidae* 的金斑蝶 *Danaus chrysippus* 也有趋光性。在白天, 有关蝶类被光源吸引的研究较少 (Kelber and Pfaff, 1999)。

蝴蝶是观赏昆虫中最重要的一个类群, 具有

很高的观赏价值、经济价值和生态价值。蝴蝶生态园的建立及喜庆放飞蝴蝶的出现,不仅满足了人们日益丰富的精神文化需求,同时也开发了蝴蝶的商业价值为人类带来经济收益(唐宇翀等, 2009)。但蝴蝶放飞后一般会四处扩散飞行,观赏时间很短,因此将成虫控制在特定区域内飞行且维持一段时间成为营造蝴蝶飞舞景观要解决的关键问题。在自然界,蝴蝶成虫为了维持生命活动需要经常访花,花的颜色和气味会持续吸引蝴蝶觅食,光也对蝴蝶的活动产生一定的影响。青斑蝶 *Tirumala limniace* Cramer (Lepidoptera: Danaidae) 是一种重要的观赏蝴蝶,是蝴蝶生态园所用的常见蝶种,也是南方地区喜庆放飞的常用蝶种(Li et al., 2015)。本研究以青斑蝶为研究对象,根据唐宇翀(2013)所做的几种斑蝶对 5 种颜色的行为反应及 2 种蜜源植物的花所含的主要挥发物(α -蒎烯、水杨酸甲酯、1-辛醛)对青斑蝶的引诱结果,在此基础上,用假花和蜂蜜水+引诱剂模拟自然界的花朵和蜜源,再结合灯光的引诱作用,旨在设计出一种在蝴蝶放飞后 30 min~1 h 内持续引诱蝴蝶的装置,以营造蝴蝶飞舞的景观。

1 材料与方法

1.1 试验地点

本试验在云南省元江县中国林科院资源昆虫所元江试验站(102°00'E, 23°36'N)进行,海拔 400 m,年平均气温 19~20℃,年平均降雨量 500~600 mm,属于亚热带干热河谷气候。实验观察在一个长、宽和高分别为 8 m × 8 m × 4 m 的网室内进行,网室内透光良好,光照均匀。野外引诱实验在元江试验站开阔空地中进行。

1.2 试验材料

1.2.1 供试昆虫 青斑蝶 *T. limniace* 来自人工饲养种群,寄主植物为南山藤 *Dregea volubilis*, 幼虫在 28℃,光照为 13L:11D 的条件下饲养。羽化条件为 14L:10D,温度 26±2℃,湿度 50%~70%。蝴蝶羽化后,用 10%蜂蜜水饲喂。

1.2.2 供试假花藤 行为测验所用的假花藤长

约 2.5 m,带有绿色塑料叶片及红色、粉红色、黄色、紫色和白色等不同颜色假花(每条假花藤只带有一种颜色),每条花藤上有 9 朵重瓣大花,花冠直径(7.51±0.08)cm,花冠高度(3.53±0.04)cm。

1.2.3 供试 LED 彩灯 选取 3 种彩灯:红色、粉红色和 7 色彩灯(连续发出红、橙、黄、绿、青、蓝、紫 7 种颜色)。

1.3 试验方法

1.3.1 假花颜色选择 首先制作帘状藤架:以红、粉红、黄、紫和白色 5 种颜色的带花藤各 4 根,相同颜色间隔 30 cm 依次挂于一根 6 m 长的铁丝上(铁丝距地面 3 m)。即从左到右依次为 4 根红色、4 根粉红色、4 根黄色、4 根紫色、4 根白色花藤。选择气温在 22℃以上,10:00—16:00 之间放飞雌雄蝴蝶 100 只,观察蝴蝶访问假花情况。结束后调换花藤位置,重复 3 次。记录:从放飞开始后的 20 min 内蝴蝶访问不同颜色假花次数,每次访花开始及结束时间。

1.3.2 合适引诱剂的选择 根据本试验前期结果(见结果部分),选出引诱效果较好的 3 种颜色(红、黄、白色)的假花藤,以这 3 种颜色的带花藤各 1 根为一组,共 4 组,依次间隔 40 cm 绑在一根 6 m 长的铁丝上,从左到右分别命名为组 1~组 4。在组 1~组 3 的每朵花分别喷洒 2 mL 的 1% α -蒎烯+1%水杨酸甲酯+1% 1-辛醛的混合溶液,1% α -蒎烯,1% 水杨酸甲酯;组 4 为对照,每朵花喷洒 10%蜂蜜水 2 mL。用蜂蜜水作为对照,是因为前期实验已证实蜂蜜水对青斑蝶有一定的引诱效果,用蜂蜜水作对照更能体现引诱剂的效果。放飞 1 次后将 4 组花藤位置调换,再放飞 2 次。每次放飞数量 100 只,记录:从放飞开始后的 20 min 内蝴蝶访问 4 组引诱试剂的次数,访问 3 种颜色假花次数。

1.3.3 彩灯颜色的选择 根据本试验前期结果(见结果部分),选用红色和白色的假花藤各 4 根,1 根红色和 1 根白色假花藤组成一组,依次挂于铁丝上,分别命名为组 1~组 4。在组 1~组 3 的花藤上分别悬挂红、粉红和 7 色彩灯 3 种颜色

的灯,组 4 悬挂关闭开关的彩灯为对照。蝴蝶放飞前在每朵假花喷洒 10% 蜂蜜水 2 mL。放飞 1 次后将 4 组花藤位置调换,再放飞 2 次。每次放飞数量 100 只,记录从放飞开始后的 20 min 内蝴蝶访问 4 组彩灯的次数。

1.3.4 野外引诱 根据唐宇翀(2013)在网室内所做的引诱结果,选出引诱效果较好的 4 种假花颜色(红、粉红、黄、白色),引诱剂最好的是 1% α -萘烯+1% 水杨酸甲酯+1% 1-辛醛的混合溶液,彩灯颜色为 7 色彩灯,用于野外引诱实验。 α -萘烯购于阿拉丁试剂(上海)有限公司,含量为 98%;水杨酸甲酯购于国药集团化学试剂有限公司,含量 $\geq 98\%$;1-辛醛购于阿拉丁试剂(上海)有限公司,含量为 99%。

花藤布置:选取红色(2 根)、粉红色、黄色、白色假花藤各 1 根组成一组,共 4 组,两花藤间隔 30 cm,挂于高度约为 3 m 铁丝上。将 7 色彩灯缠绕在每根假花藤上。蝴蝶放飞前在每朵花上均喷洒 10% 蜂蜜水 2 mL,在每组白色花藤的每朵花上再喷洒 1 mL 1% α -萘烯+1% 水杨酸甲酯+1% 1-辛醛混合液。释放青斑蝶数量 900 只(雌雄均有),有 2 种放飞方式,以验证哪一种效果较好。第一次放飞 400 只,一次性全放飞;第二次放飞 500 只,分 2 次放飞,先放飞 250 只,统计数据,紧接着再放飞 250 只。分别统计开始放飞时、放飞后 5、10、20、30 min 时每种颜色假花上的蝴蝶数量。

1.4 数据分析

利用 Microsoft Excel 2007 软件绘图,利用 SPSS 18.0 进行数据统计分析,采用单因素方差分析进行差异性检验,方差齐性时用 LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同假花颜色对青斑蝶的引诱

5 种颜色假花对青斑蝶均有引诱作用,引诱效果:白色假花(平均引诱率 9.0%)>黄色(3.7%)>红色(2.0%)>粉红(1.7%)>紫色(1.0%)(图 1)。5 种颜色假花对青斑蝶的平均引诱率均

不超过 10%,说明仅有颜色对觅食中的蝴蝶吸引作用不强。白色与其余 4 种颜色的引诱率有显著差异($P<0.001$),黄色与紫色的引诱率有显著差异($P=0.041$),红色、粉红色与紫色的引诱率无显著差异($P=0.530$)。

2.2 不同蜜源信息引诱剂对青斑蝶的引诱

3 种引诱剂对青斑蝶均有引诱作用,其中引诱效果最好的是混合物(1% α -萘烯+1% 水杨酸甲酯+1% 1-辛醛)和对照(蜂蜜水),均为 11.3%;其次是水杨酸甲酯,为 9.3%;最差的是 α -萘烯,为 7.3%(图 2)。3 种引诱剂与对照组无显著差异($P=0.417$)。

3 种颜色假花喷上 3 种引诱剂和蜂蜜水后,仍是白色(17.8%)对其引诱效果最好,其次是黄色(7.0%)和红色(4.8%)。喷了引诱剂的红色、黄色和白色假花对青斑蝶的引诱率比不喷时分别提高了 2.38 倍、1.91 倍和 1.97 倍(图 1,图 3),说明蜜源信息在青斑蝶觅食过程中起到非常重要的作用,在青斑蝶觅食时,蜜源信号比颜色信号的作用更大。白色与红色、黄色假花的平均引诱率有极显著差异($P=0.003$),红色与黄色的引诱率无显著差异($P=0.440$)。

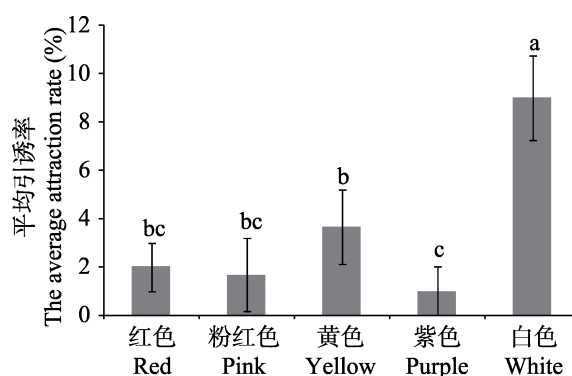


图 1 5 种颜色假花对青斑蝶的引诱

Fig. 1 Attractant of 5 different colors of artificial flowers on *Tirumala limniace*

柱上标有不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著,相同小写字母表示在 0.05 水平差异不显著。下图同。

Histograms with different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level, while with the same lowercase letters indicate no significant difference at 0.05 level. The same below.

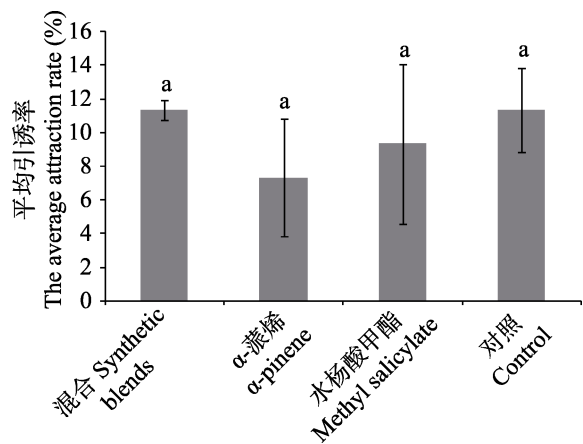


图 2 3 种蜜源信息引诱剂对青斑蝶的引诱
Fig. 2 Attractant of 3 kinds of attractants on *Tirumala limniace*

“混合”代表 1% α-蒎烯+1%水杨酸甲酯+1% 1-辛醛的混合溶液。
Synthetic blends: 1% α-pinene + 1% methyl salicylate + 1% 1-octanal.

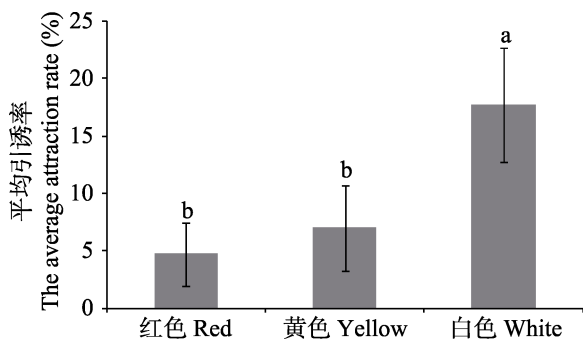


图 3 存在蜜源信息时 3 种颜色假花对青斑蝶的引诱
Fig. 3 Attractant of 3 different colors of artificial flowers on *Tirumala limniace* while having attractants and honey water

2.3 灯光颜色对青斑蝶的引诱

红色、粉红色、7 色彩灯对青斑蝶的引诱效果都要好于对照,说明灯光对青斑蝶的引诱有增效作用。其中平均引诱率最高的是 7 色彩灯 (9.3%),其次是粉红色 (8.3%)和红色灯 (7.0%) (图 4)。3 种颜色彩灯与对照无显著差异 ($P=0.402$)。

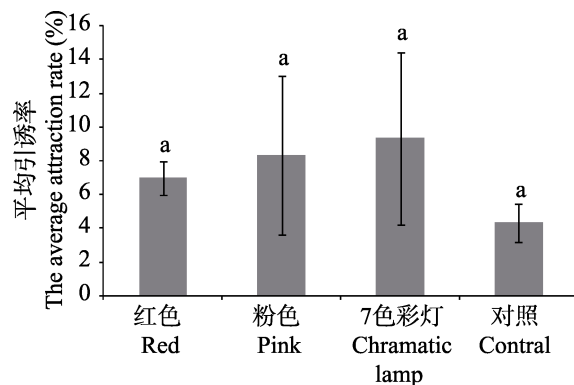


图 4 3 种颜色彩灯对青斑蝶的引诱
Fig. 4 Attractant of 3 kinds of lights on *Tirumala limniace*

2.4 不同放飞方式对青斑蝶的引诱

第一次放飞,放飞蝴蝶数量 400 只,放飞方式是一次性全放飞,结果见表 1;第二次放飞数量 500 只,放飞方式是分 2 次放飞,结果见表 2。

(1) 表 1 和表 2 比较可知,分 2 次放飞 (一次放飞 250 只) 比一次性放飞 400 只效果要好,最高引诱率前者为后者的 1.47 倍;

表 1 第一次放飞后不同时间内引诱青斑蝶的数量
Table 1 The number of attractant on *Tirumala limniace* in different time during the first releasing

花藤颜色 Colors of artificial flowers	开始时花藤上蝴蝶数量 The number of butterflies at the beginning	开始后 5 min In 5 min	开始后 10 min In 10 min	开始后 20 min In 20 min	开始后 30 min In 30 min
红色花藤 Red	18	19	19	18	19
粉红色花藤 Pink	6	5	6	5	5
黄色花藤 Yellow	4	5	5	5	4
白色花藤 White	15	16	18	19	18
总数 Total	43	45	48	47	46
总引诱率 (%) The attraction rate	10.8	11.3	12.0	11.8	11.5

表 2 第二次放飞后不同时间内引诱青斑蝶的数量

Table 2 The number of attractant on *Tirumala limniace* in different time during the second releasing

花藤颜色 Colors of artificial flowers	开始时花藤上蝴蝶数量 The number of butterflies at the beginning	开始后 5 min In 5 min	开始后 10 min In 10 min	开始后 20 min In 20 min	开始后 30 min In 30 min	开始后 1 h In 1 h
红色花藤 Red	19	19	20	22	22	13
粉红色花藤 Pink	8	10	6	9	15	11
黄色花藤 Yellow	15	13	19	22	19	21
白色花藤 White	30	27	30	34	32	34
总数 Total	72	69	75	87	88	79
总引诱率 (%) The attraction rate	14.4	13.8	15.0	17.4	17.6	15.8

(2)第一次放飞在 10~20 min 时引诱数量最多,引诱率为 12%左右,第二次放飞在 20~30 min 时引诱数量最多,引诱率为 18%左右,说明蝴蝶放飞后 20 min 左右为引诱高峰期;

(3)蝴蝶放飞后 30 min 甚至 1 h 内,4 种颜色花藤上蝴蝶的数量及其总数均保持恒定,变化范围不大,说明该装置能够持续的起到引诱蝴蝶的作用,引诱效果较好。

3 讨论

访花的蝶类在成虫阶段需要取食花蜜来补充营养,以完成交配、产卵等生命活动。蝶类在飞行中首先依靠花的颜色来远距离定位蜜源,靠近后再通过花的挥发物近距离确定蜜源位置。蝴蝶在访花过程中,通过学习和经验,偏好访问回报率较高的适合自身的某一类型的花,从而形成对不同颜色的偏好性和对某些挥发物的敏感性。本研究发现青斑蝶对不同的假花颜色偏好不同,最喜欢白色(图 1),这可能是因为元江县冬季,白色花反光能力较强,与绿色叶片背景形成鲜明对比,易被蝴蝶识别(Borges *et al.*, 2003)或者访问白色花回报率较高。人工配制的 3 种引诱剂,混合组分的引诱效果优于单一组分(图 2),说明青斑蝶定位蜜源很可能依靠挥发物的多个组分而不是单一组分。5 种颜色假花及 3 种蜜源信息均对青斑蝶有引诱作用,说明青斑蝶在觅食时会利用多种感官通道,如视觉和嗅觉等来定位和获取蜜源。喷了蜜源信息引诱剂的红色、黄色

和白色假花对青斑蝶的引诱率比不喷时均提高了 2 倍左右,说明青斑蝶在觅食时以嗅觉信号为主,视觉信号为辅。

据报道,青斑蝶在夏季对红、橙、黄色假花较偏爱(Tang *et al.*, 2013),而在秋冬季,对白、黄和红色较偏爱(图 1),这可能与不同季节蜜源植物开花的颜色相关。在云南省元江县夏季,青斑蝶的蜜源植物较多(如马利筋 *Asclepias curassavica*, 马樱丹 *Lantana camara* 等),花的颜色大多是红橙黄色;而在冬季,开花的蜜源植物较少,且多数花为白色,青斑蝶在不同季节偏好不同的颜色,是其对环境高度适应的表现,也是传粉昆虫与蜜源植物协同进化的例证。

光对昆虫的行为有很重要的影响,主要表现在波长和强度 2 个方面。其中,光波长是影响昆虫行为的重要因素,许多昆虫的不同行为都有自身最为敏感的波长。Scherer 和 Kolb (1987a, 1987b)测量了蛱蝶、眼蝶和粉蝶依赖特定波长的产卵和觅食行为,发现产卵行为是由约 550 nm 的窄光谱引起,觅食行为由约 440 nm (蓝色)和 600 nm (黄色)的 2 个光谱区引起。本研究发现对青斑蝶引诱率最高的灯光是 7 色彩灯,原因可能是 7 色彩灯包含了蓝光和黄色光,刺激了青斑蝶的取食。还发现 3 种颜色彩灯与对照无显著差异,可能是在白天 3 种彩灯的灯光亮度较弱,导致对青斑蝶的引诱作用较弱。

Blackiston 等(2011)发现为君主斑蝶 *Danaus plexippus* 提供 6 种颜色(红、橙、黄、绿、蓝、

紫)供其自由选择时,其偏好橙色,而提供3种颜色(红、黄、蓝)时,最偏爱黄色,说明君主斑蝶对长波范围的颜色较偏好,复眼内有一种光谱感受细胞来感受长波长范围的光(Stalleicken *et al.*, 2006),且能明确区分红、橙、黄色光,证明存在促进长波范围颜色区分的过滤色素(Filtering pigments)(Blackiston *et al.*, 2011)。本研究发现青斑蝶对具有长波反射特征的红色(620~700 nm)和黄色(570~600 nm)花较偏爱,说明青斑蝶复眼内可能有一种感知长波范围光的光谱感受细胞,但不能区分红色、粉红和黄色花(图1),说明青斑蝶可能无法区分长波范围的颜色,视觉不太发达,觅食主要靠嗅觉信息(Tang *et al.*, 2013)。

在云南省元江县,蝴蝶访问的蜜源植物中多数均含有 α -蒎烯、水杨酸甲酯和1-辛醛,且这3种物质均对青斑蝶有一定的引诱作用(唐宇翀, 2013),说明这3种物质可能是吸引蝴蝶传粉的嗅觉信号。混合组分的引诱效果优于单一组分(图2),表明这3种物质混合后对蝴蝶的引诱有协同效应(Honda *et al.*, 1998)。我们研究发现,浓度均为1%的 α -蒎烯、水杨酸甲酯和1-辛醛组成的引诱剂除了对青斑蝶有引诱作用外,还对金斑蝶 *Danaus chrysippus* L. 和幻紫斑蝶 *Euploea core* Cramer 有较好的引诱作用(未发表数据),说明这3种混合物适合作为斑蝶类的引诱剂。

本实验设计的蝴蝶引诱装置集假花、蜜源信息引诱剂和灯光于一体。所用假花藤,材料便宜,使用后用清水冲洗晾干即可,可重复多次使用,且加上引诱剂后对蝴蝶引诱效果较好,适合在网室内和野外作为引诱蝴蝶的装置。灯光对青斑蝶的引诱有增效作用,若在晚上营造蝴蝶飞舞的景观,则可利用7色彩灯对蝴蝶的引诱作用。我们研究发现,灯光存在时,夜晚对红锯蛱蝶 *Cethosia biblis* 的引诱效果甚至好于白天(未发表数据)。若无该引诱装置,青斑蝶放飞后不会停留立即飞走,该装置对青斑蝶的最高引诱率可达17.6%,若要进一步提高引诱率,可利用蝶类的学习能力。蝴蝶对气味和颜色等有很强的识别学习能

力,我们用 α -蒎烯每天饲喂青斑蝶3次,连续饲喂3 d,放飞前饥饿蝴蝶1 d,利用该装置进行野外放飞引诱,最高引诱率为59.0%,即使在放飞1 h后的引诱率仍为38.0%(未发表数据),说明蝴蝶引诱时可考虑其学习能力。野外引诱实验发现放飞后30 min比刚开始放飞时引诱的蝴蝶数量稍多(表1,表2),说明最初放飞时有些飞到别处的蝴蝶仍有可能被该装置引诱回来。本研究还观察到部分野外的蝴蝶(青斑蝶 *T. limniace*、金斑蝶 *D. chrysippus*、玉带凤蝶 *Papilio polytes*)会飞落到该装置上取食,表明该模拟装置对人工养殖的和野外的蝴蝶均有较强的吸引力。

致谢:感谢本单位陈航副研究员在英文摘要修改中给予的帮助。

参考文献 (References)

- Anderson WA, 1960. Capture of *Nymphalis j-album* in Maryland at night. *Journal of the Lepidopterists' Society*, 14(1): 62.
- Andersson S, 2003. Foraging responses in the butterflies *Inachis io*, *Aglaia urticae* (Nymphalidae), and *Gonepteryx rhamni* (Pieridae) to floral scents. *Chemoecology*, 13(1): 1–11.
- Andersson S, Dobson HEM, 2003. Behavioral foraging responses by the butterfly *Heliconius melpomene* to *Lantana camara*. *Journal of Chemical Ecology*, 29 (10): 2303–2318.
- Andersson S, Nilsson LA, Groth I, Bergström G, 2002. Floral scents in butterfly-pollinated plants: possible convergence in chemical composition. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 140(2): 129–153.
- Arikawa K, Wakakuwa M, Qiu X, Kurasawa M, Stavenga DG, 2005. Sexual dimorphism of short-wavelength photoreceptors in the small white butterfly, *Pieris rapae crucivora*. *The Journal of Neuroscience*, 25(25): 5935–5942.
- Bernard GD, 1979. Red-absorbing visual pigment of butterflies. *Science*, 203(4385): 1125–1127.
- Blackiston D, Briscoe AD, Weiss MR, 2011. Color vision and learning in the monarch butterfly, *Danaus plexippus* (Nymphalidae). *The Journal of Experimental Biology*, 214(3): 509–520.
- Borges RM, Gowda V, Zacharias M, 2003. Butterfly pollination and high-contrast visual signals in a low-density distylous plant. *Oecologia*, 136(4): 571–573.
- Briscoe AD, Chittka L, 2001. The evolution of color vision in insects. *Annual Review of Entomology*, 46(1): 471–510.
- Chowdhury S, Soren R, 2011. Light attracted butterflies: a review from the Indian sub-region with an inventory from West Bengal, India. *Journal of Threatened Taxa*, 3(6): 1868–1871.

- Corbet SA, 2000. Butterfly nectaring flowers: butterfly morphology and flower form. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 96(3): 289–298.
- Dobson H, 1994. Floral volatiles in insect biology//Bernays E (ed.). *Insect-Plant Interactions*. Vol. 5. Boca Raton: CRC Press. 47–81.
- Dobson HEM, 2006. Relationship between floral fragrance composition and type of pollinator//Dudareva N, Pichersky E (eds.). *Biology of Floral Scent*. Boca Raton: CRC Press. 147–198.
- Feber RE, Smith H, Macdonald DW, 1996. The effects on butterfly abundance of the management of uncropped edges of arable fields. *Journal of Applied Ecology*, 33(5): 1191–1205.
- Gilbert LE, 1972. Pollen feeding and reproductive biology of *Heliconius* butterflies. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 69(6): 1403–1407.
- Goldsmith TH, 1990. Optimization, constraint, and history in the evolution of eyes. *Quarterly Review of Biology*, 65(3): 281–322.
- Hardy PB, Sparks TH, Isaac NJB, Dennis RLH, 2007. Specialism for larval and adult consumer resources among British butterflies: implications for conservation. *Biological Conservation*, 138(3): 440–452.
- Hessel JH, 1965. Multiple capture of *Hypaurotis crysalus* at light. *Journal of the Lepidopterists' Society*, 19(1): 55–56.
- Honda K, Ômura H, Hayashi N, 1998. Identification of floral volatiles from *Ligustrum japonicum* that stimulate flower-visiting by cabbage butterfly, *Pieris rapae*. *Journal of Chemical Ecology*, 24(12): 2167–2180.
- Ilse D, Vaidya VG, 1956. Spontaneous feeding response to colours in *Papilio demoleus* L. *Proceedings: Plant Sciences*, 43(1): 23–31.
- Kelber A, Pfaff M, 1999. True colour vision in the orchard butterfly, *Papilio aegeus*. *Naturwissenschaften*, 86(5): 221–224.
- Kevan PG, Baker HG, 1983. Insects as flower visitors and pollinators. *Annual Review of Entomology*, 28(1): 407–453.
- Kinoshita M, Arikawa K, 2000. Colour constancy in the swallowtail butterfly *Papilio xuthus*. *Journal of Experimental Biology*, 203(23): 3521–3530.
- Kinoshita M, Shimada N, Arikawa K, 1999. Colour vision of the foraging swallowtail butterfly *Papilio xuthus*. *Journal of Experimental Biology*, 202(2): 95–102.
- Koshitaka H, Kinoshita M, Vorobyev M, Arikawa K, 2008. Tetrachromacy in a butterfly that has eight varieties of spectral receptors. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 275(1637): 947–954.
- Li CZ, Wang FY, Chen XM, Zhou CL, Yao J, 2015. Adult Behavior of *Tirumala limniace* (Lepidoptera: Danaidae). *Journal of Insect Science*, 15(1): 1–7.
- Lunau K, Maier EJ, 1995. Innate colour preferences of flower visitors. *Journal of Comparative Physiology A*, 177(1): 1–19.
- Ômura H, Honda K, 2005. Priority of color over scent during flower visitation by adult *Vanessa indica* butterflies. *Oecologia*, 142(4): 588–596.
- Raguso RA, 2008. Wake up and smell the roses: the ecology and evolution of floral scent. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 39(1): 549–569.
- Sauman I, Briscoe AD, Zhu H, Shi D, Froy O, Stalleicken J, Yuan Q, Casselman A, Reppert SM, 2005. Connecting the navigational clock to sun compass input in monarch butterfly brain. *Neuron*, 46(3): 457–467.
- Scherer C, Kolb G, 1987a. Behavioral experiments on the visual processing of color stimuli in *Pieris brassicae* L. (Lepidoptera). *Journal of Comparative Physiology A*, 160(5): 645–656.
- Scherer C, Kolb G, 1987b. The influence of color stimuli on visually controlled behavior in *Aglaia urticae* L. and *Pararge aegeria* L. (Lepidoptera). *Journal of Comparative Physiology A*, 161(6): 891–898.
- Stalleicken J, Labhart T, Mouritsen H, 2006. Physiological characterization of the compound eye in monarch butterflies with focus on the dorsal rim area. *Journal of Comparative Physiology A*, 192(3): 321–331.
- Stavenga DG, Arikawa K, 2006. Evolution of color and vision of butterflies. *Arthropod Structure & Development*, 35(4): 307–318.
- Swihart SL, 1970. The neural basis of colour vision in the butterfly, *Papilio troilus*. *Journal of Insect Physiology*, 16(8): 1623–1636.
- Tang YC, Chen XM, Zhou CL, 2009. The exploitation and utilization of butterfly resources. The Entomological Society of Yunnan. Kunming: 331–333. [唐宇翀, 陈晓鸣, 周成理. 2009. 蝴蝶资源的开发与利用. 云南省昆虫学会. 昆明: 331–333.]
- Tang YC, Zhou CL, Chen XM, Zheng H, 2013. Visual and olfactory responses of seven butterfly species during foraging. *Journal of Insect Behavior*, 26(3): 387–401.
- Tang YC, 2013. The research of olfactory and visual responses during butterflies foraging. Doctoral dissertation. Beijing: Chinese Academy of Forestry. [唐宇翀, 2013. 蝴蝶觅食过程中的嗅觉和视觉行为反应研究. 博士学位论文. 北京: 中国林业科学研究院.]
- Tiple AD, Deshmukh VP, Dennis RLH, 2005. Factors influencing nectar plant resource visits by butterflies on a university campus: implications for conservation. *Nota Lepidopterologica*, 28(3/4): 213–224.
- Tudor O, Dennis RLH, Greatorex-Davies JN, Sparks TH, 2004. Flower preferences of woodland butterflies in the UK: nectaring specialists are species of conservation concern. *Biological Conservation*, 119(3): 397–403.
- Wakakuwa M, Stavenga DG, Kurasawa M, Arikawa K, 2004. A unique visual pigment expressed in green, red and deep-red receptors in the eye of the small white butterfly, *Pieris rapae crucivora*. *Journal of Experimental Biology*, 207(16): 2803–2810.
- Zaccardi G, Kelber A, Sison-Mangus MP, Briscoe AD, 2006. Color discrimination in the red range with only one long-wavelength sensitive opsin. *Journal of Experimental Biology*, 209(10): 1944–1955.