日本弓背蚁的趋光性、趋色性和趋化性研究*

高晴晴[1**] 黄欣怡[1] 董鹤洁[1] 于福兰[2] 许学强[2] 陈法军[1***]

（1. 南京农业大学植物保护学院昆虫系，南京 210095；2. 山东省济南市济阳区农业农村局，济阳 251400）

摘 要 【目的】本研究以日常生活中常见的日本弓背蚁 *Camponotus japonicus* 为研究对象，立足绿色生态防控，开展其趋色性、趋光性和趋化性（即“三趋性“）研究，以探究色、光、气味挥发物对其引诱或驱避效果，实现特定场所（如居家环境或休闲绿地等）的蚂蚁预防或驱避。【方法】分别选用红、橙、黄、绿、青、蓝、紫 7 种色板和红、橙、黄、绿、蓝、紫 6 种灯光，开展日本弓背蚁的趋色和趋光行为试验，并选取高挥发性的月桂烯、柠檬烯、芳樟醇、香叶醇 4 种萜类、乙酸肉桂酯和反式肉桂醛 2 种脂类，以及弱挥发性的油酸和亚油酸 2 种不饱和脂肪用于开展日本弓背蚁趋化行为试验。【结果】日本弓背蚁工蚁对不同色板（灯光）的相对选择率之间存在显著差异（$P<0.01$）。与对照相比，日本弓背蚁工蚁对橙色、绿色和红色的选择反应率分别为 69.91%、69.66%和 67.70%（表现为明显的吸引性），而对青色的选择反应率仅为 39.71%（表现为明显的趋避性）；对红、橙、黄、绿和蓝光的选择反应率为 60.10%-67.20%（其中，对红光的吸引性最强），而对紫光的选择反应率仅为 22.13%（表现为明显的趋避性）。此外，日本弓背蚁工蚁对 3 个浓度（即 0.1%、1%和 10%）的 4 种萜烯类和 2 种醛酯类挥发物及 2 种不饱和脂肪酸均表现显著的负趋性（选择反应率≤27.19%；$P<0.001$）；其中，10%芳樟醇的驱避效果最好，0.1%反式肉桂醛的趋避效果次之，其相对选择率分别为 - 78.53%和 - 74.44%。【结论】日常生活中，白天可使用红、橙和绿色色板（色带）诱集或使用青色色板（色带）驱避日本弓背蚁，夜晚可使用红光、橙光、黄光、绿光和蓝光进行诱集或使用紫光驱避日本弓背蚁；此外，还可使用 10%芳樟醇和 0.1%反式肉桂醛驱避日本弓背蚁。最终，利用蚂蚁“三趋性”可实现对日本弓背蚁的绿色防控。

关键词 日本弓背蚁；趋光性；趋色性；趋化性；引诱与趋避；绿色防控

Phototaxis, chromotaxis and chemotaxis of *Camponotus japonicus*

GAO Qing-Qing[1**] HUANG Xin-Yi[1] DONG He-Jie[1] YU Fu-Lan[2]
XU Xue-Qiang[2] CHEN Fa-Jun[1***]

(1. Department of Entomology, College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;
2. Jiyang District Bureau of Agriculture and Rural Affairs of Jinan City, Shandong Province, Jiyang 251400, China)

Abstract **[Aim]** To investigate the phototaxis, chromotaxis and chemotaxis in the ant *Camponotus japonicus* to determine if it is possible to use color, light and odor to repel or exclude this insect pest from some specific places (e.g. the home environment and parks). **[Methods]** The chromotaxis and phototaxis of *C. japonicus* were evaluated in response to seven color plates (red, orange, yellow, green, cyan, blue and purple) and six colored lights (red, orange, yellow, green, blue and purple). And the chemotaxis of *C. japonicus* was also tested in response to eight volatile substances, including four types of highly volatile terpenoids (laurel, limonene, linalool and geranyllol), two types of volatile lipids (cinnamyl acetate and *trans*-Cinnamaldehyde). and two types of weakly volatile unsaturated fatty acids (i.e., oleic acid and linoleic acid). **[Results]** There were significant differences in the phototaxis of *C. japonicus* toward different color plates or lights ($P<0.01$). The preference of *C. japonicus* for orange, green and red was 69.91%, 69.66% and 67.70%, respectively (indicating obvious attraction), whereas that for cyan was just 39.71% (indicating obvious repellent). Moreover, the chromotaxis of *C. japonicus*

*资助项目 Supported project：国家级大学生创新训练项目计划（202310307014Z）

**第一作者 First author，E-mail：12121225@stu.njau.edu.cn

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：fajunchen@njau.edu.cn

收稿日期 Received：2024-08-26；接受日期 Accepted：2025-01-02

toward red, orange, yellow, green and blue was 60.10%-67.20% (the strongest attraction to red light.), whereas its chromotaxis toward purple was just 22.13% (indicating obvious repellent). Furthermore, there was significant negative chemotaxis for *C. japonicus* to four terpenes, two lipids and two acids at three concentrations (0.1%, 1% and 10%) with the chemotaxis rates ≤27.19% (P<0.001). And the most repellent was 10% linalool, followed by 0.1% *trans*-Cinnamaldehyde, with the chemotaxis rates of -78.53% and -74.44%, respectively. **[Conclusion]** During the hours of daylight, color plates (or belts) of red, orange and green can attract *C. japonicus,* whereas cyan plates (or belts) can repel this species of insect pest. After dark, red, orange, yellow, green and blue lights are attractive to *C. japonicus,* whereas purple light is repellent. Solutions of 10% linalool and 0.1% *trans*-Cinnamaldehyde can also be used to repel *C. japonicus* during both day and night.

Key words *Camponotus japonicus*; phototaxis; chromotaxis; chemotaxis; attraction and repellence; green control

居家生活设施（如衣橱、衣柜、饭橱、餐桌等），以及室外社区休闲绿地、公园、园林和旅游景区等休憩或游玩场所设施（如休憩用桌椅板凳等），常常有蚂蚁频繁出现，严重干扰大众（尤其是儿童）的休闲生活和娱乐活动。但蚂蚁类群具有重要的生态功能，既是食物链的重要一环，也是地球上主要的分解者之一，还能起到改良土壤、提高肥力的作用。因此，对于上述场景中碰到的蚂蚁绝不能一杀了之，而应采取绿色无害化治理技术（如驱避技术）开展蚂蚁类群的综合防控（Dong *et al*., 2023）。

利用昆虫趋性进行害虫生态治理被认为是害虫绿色生态防控的有效途径。昆虫对外界刺激产生的定向行为反应称为趋性，趋性是昆虫主要的习性之一。其中，凡是向着刺激来源方向运动的反应称为正趋性（即引诱或诱集作用），背离刺激方向运动的反应称为负趋性（即趋避作用）；按照刺激来源性质划分，昆虫趋性主要有趋光性、趋化性、趋色性、趋温性和趋湿性等，其中的趋光性、趋化性和趋色性（即“三趋性”）在害虫防治及其监测预警等方面应用广泛（靖湘峰和雷朝亮, 2004; 张纯胄, 2007; 沈颖等, 2012; 郭祖国等, 2019; 杨现明等, 2020; 张锦芳等, 2020）。

基于前期南京农业大学卫岗校园内“武林”休闲林地区域及校园北门外“下马坊遗址公园”休闲绿地区域蚂蚁种类多样性调查，隶属蚁亚科 Formicinae 弓背蚁属 *Camponotus* 的日本弓背蚁 *Camponotus japonicus* 的种群数量最多且分布范围最广。同时，日本弓背蚁体型较大、活动能力强，且上颚粗壮具有较强的咬合力，受到威胁时喷射的蚁酸会使过敏体质人群长出红斑（唐觉等, 1985; 尚玉昌, 2006; 李长有, 2016）。因此，本试验开展的蚂蚁“三趋性”研究选取日本弓背蚁为研究对象，研究结果可为通过趋光性、趋化性和趋色性开展蚂蚁绿色防控提供技术支撑，并服务于人们日常家居生活或旅游休憩活动免受蚂蚁滋扰。

1　材料与方法

1.1　供试蚂蚁

供试蚂蚁为日本弓背蚁，于 2023 年 4-6 月份采自于南京农业大学卫岗校园内武林休闲林地，在南京农业大学理科楼负一楼的植物保护学院温室内人工饲养，人工饲料为 10%浓度的蜂蜜水掺杂少量面包屑。温室的环境控制为：温度（25±2.0）℃，相对湿度 70%-80%，光周期 14L∶10D。

1.2 “三趋性”试验用色板、灯源和气味挥发物

本研究分别选用 7 种颜色（即红、橙、黄、绿、青、蓝、紫）的色板和 6 种光源（红、橙、黄、绿、蓝、紫；未找到青色光源）的灯泡开展日本弓背蚁的趋色试验和趋光试验，色板和光源见表 1。此外，基于国内外蚂蚁趋化性相关研究报道（Dong *et al*., 2023），本试验共选取高挥发性的 4 种萜类（即月桂烯、柠檬烯、芳樟醇、香叶醇）和 2 种脂类（乙酸肉桂酯、反式肉桂醛），以及 2 种弱挥发性的不饱和脂肪酸（油酸、亚油酸）（表 2）用于开展日本弓背蚁趋化性试验。

1.3　趋色性试验和趋光性试验

趋色性、趋光性试验装置主体为透明亚克力板制成的一个长 20 cm、宽 8 cm、高 8 cm 的中

表 1 趋色试验色板及趋光试验光源

Table 1 Color plates for color-taxis test and light sources for photo-taxis test

趋色试验 Color-taxis test		趋光试验 Photo-taxis test			
颜色 Color	色板 Color plate	光源 Light source	灯泡 Lamp	功率（W） Power (W)	波长（nm） Wavelength (nm)
红 Red		红光 Red light		10	625-740
橙 Orange		橙光 Orange light		10	590-610
黄 Yellow		黄光 Yellow light		10	570-585
绿 Green		绿光 Green light		10	492-577
青 Cyan		/	/	/	/
蓝 Blue		蓝光 Blue light		10	440-475
紫 Purple		紫光 Purple light		10	380-420

/：未开展。/: No studying.

表 2 趋化性试验所选用的气味挥发物（Dong *et al*., 2023）

Table 2 Odor volatiles selected for the chemotaxis test (Dong *et al*., 2023)

气味挥发物 Odor volatiles		CAS	浓度（%） Concentration (%)	供试公司 Production company
萜烯类 Terpenes	月桂烯 Myrcene (MY)	123-35-3	90	上海阿拉丁生化科技股份有限公司 Shanghai Aladdin Biochemical Technology Co., Ltd.
	柠檬烯 Cinene (CI)	138-86-3	95	上海吉至生化科技有限公司 Shanghai Acmec Biochemical Technology Co., Ltd.
	芳樟醇 Linalool (LI)	78-70-6	98	上海麦克林生化科技股份有限公司 Shanghai Macklin Biochemical Co., Ltd.
	香叶醇 Geraniol (GE)	106-24-1	97	上海笛柏生物科技有限公司 Shanghai Dibo Biotechnology Co., Ltd..
醛酯类 Aldehydes	乙酸肉桂酯 Cinnamyl acetate (CA)	103-54-8	97	天津希恩思生化科技有限公司 Heowns Biochem Technologies, LLC.
	反式肉桂醛 *trans*-Cinnamaldehyde (TC)	14371-10-9	98	上海泰坦科技股份有限公司 Shanghai Titan Scientific Co., Ltd
脂肪酸类 Fatty acids	油酸 Oleic acid (OA)	112-80-1	99	大连美仑生物技术有限公司 Dalian Meilun Biotechnology Co., Ltd.
	亚油酸 Linoleic acid (IA)	60-33-3	94	上海吉至生化科技有限公司 Shanghai Acmec Biochemical Technology Co., Ltd.

空长方体装置，两侧各设置一块边长 8 cm 可拆卸的透明无色亚克力方板（图 1）。装置上方正中位置开一边长为 4 cm 正方形孔（即释放孔）用于释放供试蚂蚁，距释放孔左右各 6 cm 的装置底部画出标记线，同时在释放孔左右两侧各安插一个透明亚克力隔板（图 1）。趋色性试验一边贴有 PVC 色板（7 种颜色），一侧贴透明 PVC 板作空白对照；趋光性试验使用提供 6 种光源的手电筒（10 W 灯泡），黑暗条件作为对照进行试验。

趋色试验在白天自然光线良好的实验室内开展，趋光试验在夜间于实验室昏暗条件下开

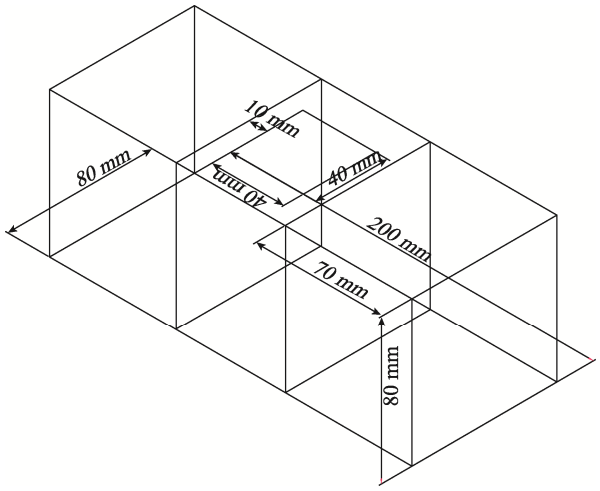

图 1　趋色性、趋光性试验装置模拟图
Fig. 1　Phototaxis and chromotaxis experimental device simulation diagram

展，室温保持在 28-30 ℃，空气相对湿度为 75%左右。将试验装置置于水平桌面上，随机选取 20 只日本弓背蚁工蚁通过释放孔放入试验装置内，放置 2 min 后同时抽出左右隔板以释放蚂蚁，反应时间为 5 min，通过两侧标记线且停留 5 s 以上的日本弓背蚁则判定已选择。每重复一组试验后调换装置位置，以排除方位的干扰。日本弓背蚁对不同色板或光源的选择反应率、相对选择率计算公式如下：

$$选择反应率=\frac{趋向处理的虫数}{(趋向处理的虫数+趋向对照的虫数)}\times 100\%,$$

$$相对选择率=\frac{(趋向处理的虫数-趋向对照的虫数)}{(趋向处理的虫数+趋向对照的虫数)}\times 100\%。$$

1.4　趋化性试验

本试验选取 8 种气味挥发物（表 2）开展趋化性试验，正己烷作为稀释剂和对照处理，浓度配置为 0.1%、1%和 10%。参照郑卫青等（2008）蚂蚁驱避活性实验方法，使用底部带有网格的塑料收纳筐（长 30 cm×宽 20 cm×高 20 cm）替代培养皿，将分别浸泡于气味挥发物溶剂和正己烷中 5 min 的绿豆放置于以上的塑料收纳筐内，参照底部网格随机放置绿豆，并保证绿豆间距相同。趋化性试验在白天自然光线良好的实验室内开展，实验室温湿度同 1.3 节。每次试验随机选取 30 只日本弓背蚁工蚁并进行饥饿处理 4 h，在塑料收纳筐内随机放置气味挥发物溶剂处理的 6 粒绿豆，以及对照组正己烷溶剂处理的 6 粒绿豆（共 12 粒绿豆），放置妥当后静置 3 min 使驱避剂扩散，从塑料收纳筐中部释放日本弓背蚁，记录 5 min 内日本弓背蚁经过实验组和对照组绿豆的次数，每组试验 10 只，各重复 3 次。数据处理同趋色、趋光试验。

1.5　数据分析

采用 SPSS 20.0 软件进行试验数据统计分析，利用卡方检验（χ^2 test）进行日本弓背蚁对不同颜色、不同光源和不同气味挥发物处理及其与各自对照处理之间选择反应率的差异显著性分析。采用单因子方差分析（One-way ANOVA）分析不同颜色、不同光源对日本弓背蚁相对选择率的影响，采用两因子方差分析（Two-way ANOVA）分析不同挥发物、不同浓度及其交互作用对日本弓背蚁相对选择率的影响；并进一步采用 LSD 检验不同颜色、不同光源和不同气味挥发物处理之间的差异显著性（$P<0.05$）。

2　结果与分析

2.1　日本弓背蚁对不同颜色的选择行为反应

由图 2 可知，日本弓背蚁对色彩比较敏感。与透明板对照相比，日本弓背蚁对橙色（$\chi^2=15.86$, $P<0.01$）、绿色（$\chi^2=15.46$, $P<0.01$）和红色（$\chi^2=12.53$, $P<0.01$）色板的选择反应率分别为 69.91%、69.66%和 67.70%，均表现极为显著的正趋性反应；对青色色板的选择反应率为 39.71%，表现为显著的负趋性反应（$\chi^2=4.24$, $P<0.05$）；此外，对黄色（$\chi^2=3.10$, $P>0.05$）、紫色（$\chi^2=1.60$, $P>0.05$）和蓝色（$\chi^2=2.49$, $P>0.05$）色板的选择反应率分别为 58.81%、56.32%和 42.11%，趋性均不显著。

基于日本弓背蚁对不同色板的选择反应率，与透明板对照相比计算得到其对各种色板的相对选择率。单因子方差分析表明，日本弓背蚁对不同色板的相对选择率之间存在极显著差异

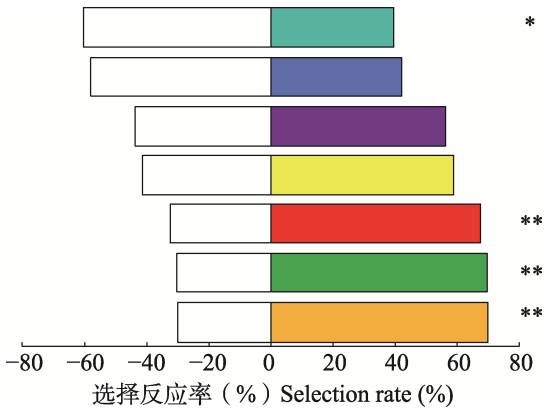

图 2　日本弓背蚁对不同颜色色板的选择反应率

Fig. 2　Selection rate of *Camponotus japonicus* in response to different color plates

星号表示经卡方检验，日本弓背蚁对处理色板与对照透明板的选择反应率之间差异显著(* P<0.05, ** P<0.01)。图 4 和图 6 同。

Asterisk indicates significant difference in the selection rate of *C. japonicus* in response to the treated color plate compared to the control of transparency plate by the χ^2 test (* P<0.05, ** P<0.01). The same for Fig. 4 and Fig. 6.

（F=4.80, P=0.0018 < 0.01）（表 3）。由图 3 可知，日本弓背蚁对不同色板的相对选择率大小依次为：橙色>绿色>红色>黄色>紫色>蓝色>青色；其中，对橙色、绿色、红色、黄色和紫色色板表现为正趋性（且对橙色、绿色和红色的正趋性最强），而对蓝色和青色色板表现为负趋性（且对青色色板的负趋性最强）。

2.2　日本弓背蚁对不同光源的选择行为反应

由图 4 可知，日本弓背蚁对不同光源比较敏感。与空白对照相比，日本弓背蚁对红光（χ^2=11.83, P<0.01）、绿光（χ^2=8.21, P<0.01）、橙光（χ^2=7.55, P<0.01）、黄光（χ^2=7.06, P<0.01）和蓝光（χ^2=4.08, P<0.05）的选择反应率分别为 67.20%、64.33%、63.74%、63.29%，和 60.10%，均表现为显著或极显著的正趋性反应；而对紫光的选择反应率为 22.13%，表现为极显著的负趋性反应（χ^2=31.07, P<0.01）。

表 3　不同颜色、不同色板对日本弓背蚁的相对选择率影响的单因子方差分析以及不同气味挥发物、不同浓度及其交互作用对相对选择率影响的双因子方差分析

Table 3　One-way ANOVA for the effects of different colors and different light sources on the relative selection rate of *Camponotus japonicus*, and two-way ANOVA for the impacts of different odor volatiles, different concentrations and their interaction on the relative selection rate of *C. japonicus*

三趋性试验 Three-taxis test		F 值 F-value	P 值 P-value
趋色性 Chemotaxis	色板 Color plates	4.80	0.001 8**
趋光性 Phototaxis	光源 Light sources	22.38	<0.001***
	气味挥发物 Odor volatiles	6.76	<0.001***
趋化性 Chemotaxis	浓度 Concentration	2.34	0.110 0
	气味挥发物×浓度 Odor volatiles × Concentration	3.43	0.001 2**

星号表示经卡方检验，日本弓背蚁对三趋性试验各变量的选择反应率间存在显著差异（**P<0.01，***P<0.001）。

Asterisk indicates significant difference in the selection response rates of *C. japonicus* to each variable in the three tropism tests by the χ^2 test (** P<0.01, *** P<0.001).

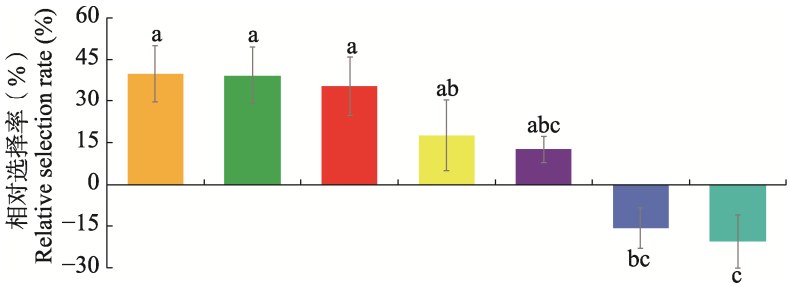

图 3　日本弓背蚁对不同颜色色板的相对选择率

Fig. 3　Relative selection rate of *Camponotus japonicus* in response to different colors

图中数据为平均值±标准误，不同小写字母表示处理间经 LSD 检验差异显著（P<0.05）。图 5 和图 7 同。

Data in the figure are mena±SE. Different lowercase letters indicate significant difference among treatments by the LSD test (P<0.05). The same for Fig. 5 and Fig. 7.

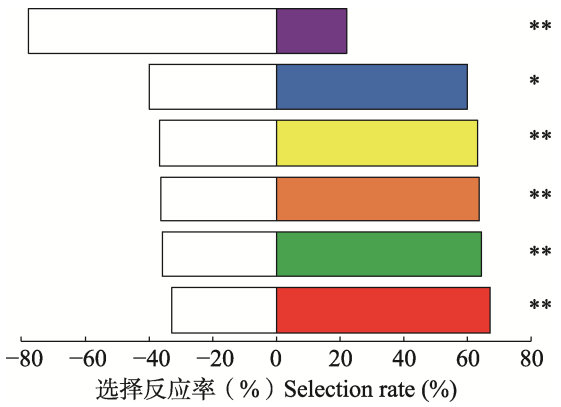

图 4　日本弓背蚁对不同光源的选择反应率

Fig. 4　Selection rate of *Camponotus japonicus* in response to different light sources

基于日本弓背蚁对不同光源的选择反应率，与空白对照相比计算得到其对各种光源的相对选择率。单因子方差分析表明，日本弓背蚁对不同光源的相对选择率之间存在极显著差异（F=22.38, P<0.001）（表 3）。由图 5 可知，日本弓背蚁对不同颜色光源的相对选择率大小依次为

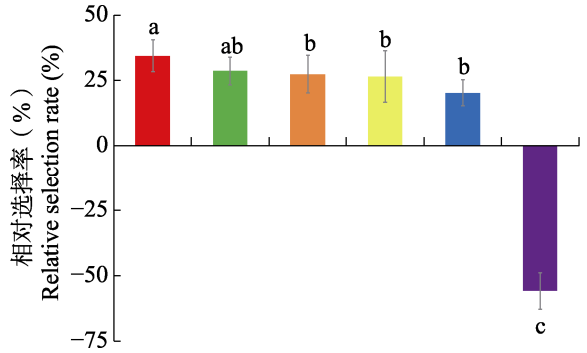

图 5　日本弓背蚁对不同光源的相对选择率

Fig. 5　Relative selection rate of *Camponotus japonicus* in response to different light sources

红光>绿光 > 橙光 > 黄光>蓝光>紫光；其中，对红光、橙光、黄光、绿光、蓝光表现为正趋性（其中对红光的正趋性最强），对紫光表现为强烈的负趋性反应。

2.3　日本弓背蚁对不同气味挥发物的选择行为反应

2.3.1　萜烯类气味挥发物　与对照相比，日本弓背蚁对 3 个浓度（即 0.1%、1%和 10%）的 4 种萜烯类气味挥发物（即月桂烯、柠檬烯、芳樟醇和香叶醇）的选择反应率均极显著降低（χ^2≥9.61, P<0.01）（图 6: A-D）。可见，这 4 种萜烯类气味挥发物对日本弓背蚁均表现出极显著的驱避效应；其中，驱避效果最高的是 0.1%的月桂烯和柠檬烯，以及 10%的香叶醇和芳樟醇，选择反应率分别为 17.57%和 23.88%，以及 19.70%和 13.82%（图 6: A-D）。

2.3.2　酸类气味挥发物　与对照相比，日本弓背蚁对 3 个浓度（即 0.1%、1%和 10%）的 2 种弱挥发性不饱和脂肪酸（即油酸和亚油酸）的选择反应率均极显著降低（χ^2≥8.55, P<0.01）（图 6: E, F）。可见，这 2 种不饱和脂肪酸对日本弓背蚁均表现为极显著的驱避效应；其中，驱避效果最高的是 10%的油酸和亚油酸，选择反应率分别为 21.53%和 27.19%（图 6: E, F）。

2.3.3　醛酯类气味挥发物　与对照相比，日本弓背蚁对 3 个浓度（即 0.1%、1%和 10%）的 2 种醛酯类气味挥发物（即乙酸肉桂酯和反式肉桂醛）的选择反应率均极显著降低（χ^2≥28.31, P<0.01）（图 6: G, H）。可见，这 2 种醛酯类气味挥发物对日本弓背蚁均表现为极显著的驱避效应；其中，驱避效果最高的是 0.1%的乙酸肉桂酯和反式肉桂醛，选择反应率分别为 20.75%和 12.78%（图 6: G, H）。

2.3.4　日本弓背蚁对不同气味挥发物的相对选择率　基于日本弓背蚁对不同气味挥发物的选择反应率，与对照正己烷相比计算得到其对各种气味挥发物的相对选择率。双因子方差分析表明不同气味挥发物（F=6.76, P<0.001）及其与浓度之间的交互作用（F=3.43, P=0.001 2<0.01）均极显著影响了日本弓背蚁的相对选择率，但气味挥发物的不同浓度处理对日本弓背蚁的相对选择率影响不显著（F=2.34, P=0.11）（表 3）。

对 4 种萜烯类气味挥发物而言，日本弓背蚁对 0.1%月桂烯的相对选择率（ - 64.85%）显著低于 1%和 10%的月桂烯（P<0.05），对 0.1%柠檬烯的相对选择率（ - 54.39%）显著低于 10%的柠檬烯（P<0.05），对 10%芳樟醇的相对选择率（ - 78.53%）显著低于 0.10%的芳樟醇（P<0.05），而对不同浓度的香叶醇的相对选择

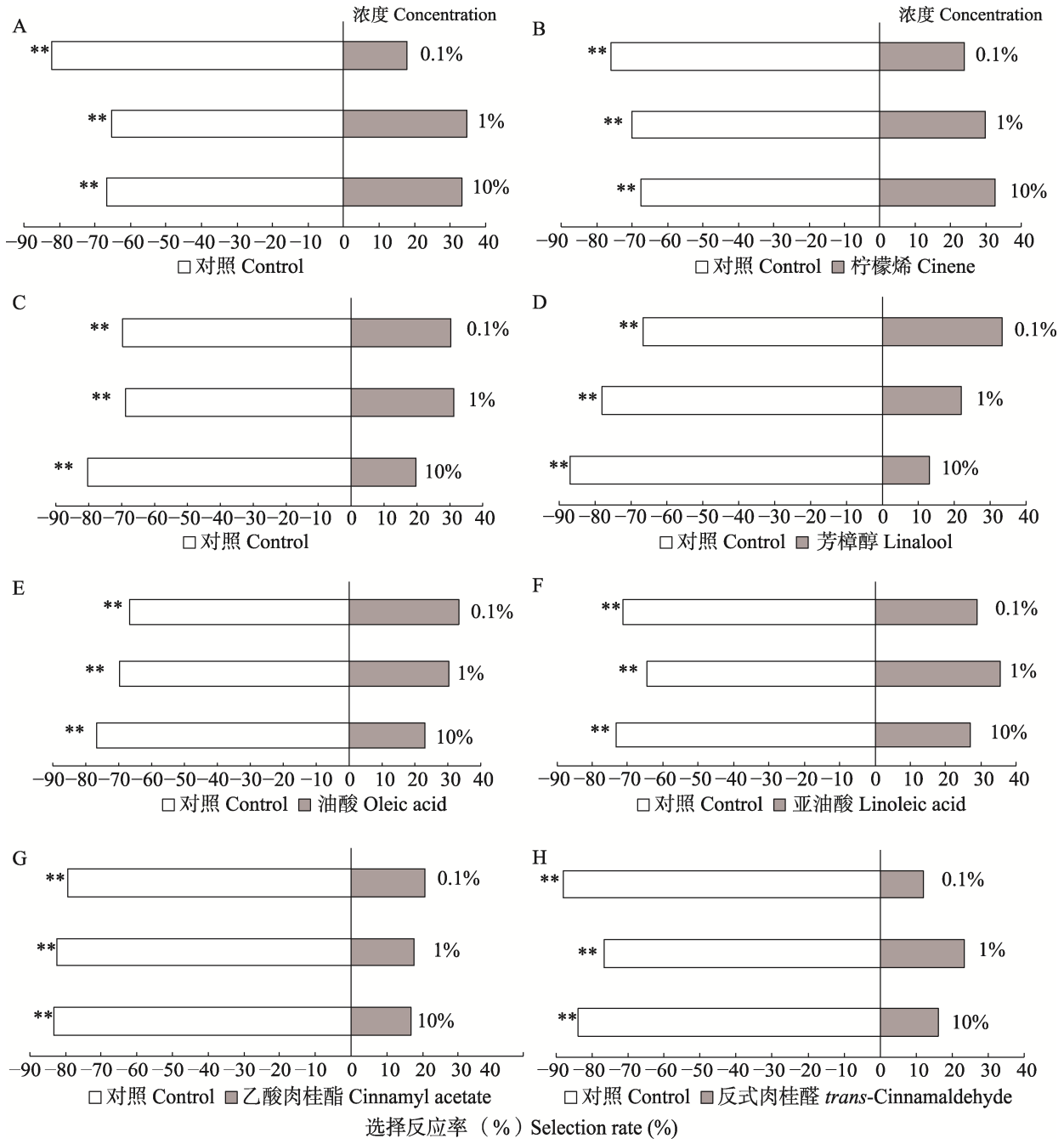

图 6 日本弓背蚁对不同气味挥发物的选择反应率

Fig. 6 Selection rate of *Camponotus japonicus* in response to different odor volatiles

A. 月桂烯；B. 柠檬烯；C. 香叶醇；D. 芳樟醇；E. 油酸；F. 亚油酸；
G. 乙酸肉桂酯；H. 反式肉桂醛。对照为正己烷。
A. Myrcene; B. Cinene; C. Geraniol; D. Linalool; E. Oleic acid; F. Linoleic acid; G. Cinnamyl acetate;
H. *trans*-cinnamaldehyde. n-Hexane was used as the control.

率差异不显著（P>0.05）（图 7: A, B, E, F）。

对 2 种醛酯类气味挥发物而言，日本弓背蚁对 0.1%反式肉桂醛的相对选择率（ - 76.39%）显著低于 1%的反式肉桂醛（P<0.05），而对不同浓度乙酸肉桂酯的相对选择率差异不显著（P>0.05）（图 7: C, D）。

对 2 种不饱和脂肪酸而言，日本弓背蚁对 0.1%和 10%的亚油酸的相对选择率（ - 43.82%和 - 41.23%）显著低于 1%的亚油酸（$P<0.05$），但对不同浓度的油酸的相对选择率差异不显著（$P>0.05$）（图 7: G, H）。

从总体来看，浓度为 0.1%的反式肉桂醛和 10%的芳樟醇对日本弓背蚁的驱避效果最高，其次为 0.1%柠檬烯和 10%反式肉桂醛，而 2 种弱挥发性的不饱和脂肪酸（油酸和亚油酸）的趋避效果较低（图 7: B, D, E, G, H）。

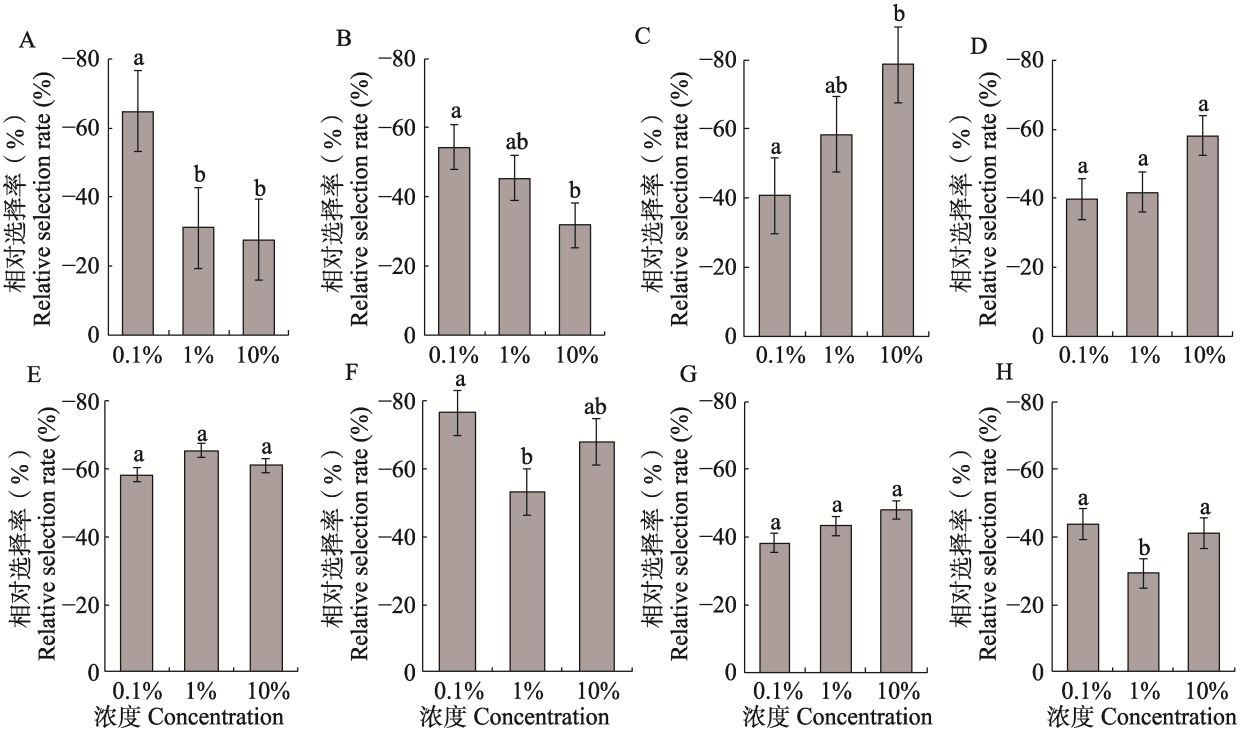

图 7　日本弓背蚁对不同气味挥发物的相对选择率

Fig. 7　Relative selection rate of *Camponotus japonicus* to different odor volatiles

A. 月桂烯；B. 柠檬烯；C. 芳樟醇；D. 香叶醇；E. 乙酸肉桂酯；F. 反式肉桂醛；G. 油酸；H. 亚油酸。
A. Myrcene; B. Cinene; C. Linalool; D. Geraniol; E. Cinnamyl acetate;
F. *trans*-Cinnamaldehyde; G. Oleic acid; H. Linoleic acid.

3　讨论

开展蚂蚁“三趋性”（即趋光性、趋色性和趋化性）研究具有广泛的意义和价值。一是有助于深入揭示蚂蚁的行为习性及其生存策略，尤其对于有害蚂蚁，研究其趋光、趋色和趋化行为可以指导开发针对性的蚂蚁预防或防治技术（Dong *et al*., 2023）。介于蚂蚁重要的生态功能,二是了解蚂蚁趋性行为有助于制定更科学的生态保护措施，保护蚂蚁及生态系统的平衡（Dong *et al*., 2023）。三是蚂蚁的趋性行为还能为仿生学提供借鉴，如开发基于蚂蚁趋光、趋色、趋化原理的导航、识别或传感技术等。

色觉在昆虫中广泛存在，且在种类、性别、发育阶段等方面存在差异（张纯胄, 2007; 郭祖国等, 2019）。现代视觉生态学技术揭示了昆虫对色彩的趋性是通过其视觉器官对光波、色彩反射波等产生感应而做出的趋向反应，表现为对光源的正向吸引和负向驱避。因此从本质上来看，昆虫趋色性就是一种趋光性。一般情况下昆虫的光谱反应敏感区主要集中在紫外光区、蓝光区和黄绿光区。有研究表明蚂蚁可能保留了类似黄蜂祖先的“三色性”，而更多的蚁属昆虫可能在进化过程中失去了蓝光受体（Ogawa *et al*., 2015）。此外，有研究显示，蚂蚁更喜欢透光更少的珠子和绿色珠子（Carbaugh *et al*., 2020），蚂蚁类群

可能对紫色和绿色更为敏感（Menzel and Blakers, 1975; 沈颖等, 2012; 刘军和和赵紫华, 2017）。本次试验结果显示，日本弓背蚁对颜色和光源都较为敏感，且存在差异。其中，日本弓背蚁对橙色、绿色和红色色板表现为极显著的正趋性，对青色色板表现为显著的负趋性，而对黄色、紫色和蓝色色板的趋性均不显著；此外，日本弓背蚁对红光、绿光、橙光、黄光表现为极显著的正趋性，对紫光表现为极显著的负趋性。趋色试验中，日本弓背蚁对紫色色板的选择反应率为56.32%，表现为微弱的正趋性；趋光试验中，日本弓背蚁对紫光的选择反应率为 22.13%，表现为极显著的负趋性反应。虽然昆虫趋色与趋光本质上相同，但白天紫色（板）和夜间紫光对日本弓背蚁视觉感受而言是不同的，这种差异导致日本弓背蚁日间对紫色板无明显趋性，而对夜间紫光表现显著的负趋性。此外，日本弓背蚁对蓝色（色板）和蓝光趋性不显著，与有关蚁属昆虫进化过程中失去了蓝光受体的假设（Ogawa *et al*., 2015）相一致，但针对日本弓背蚁的蓝光受体鉴定及其相关功能还需进一步实验验证。

昆虫趋化性是指其通过嗅觉器官对周围生物和非生物环境中的化学物质刺激所做出的行为反应，主要依靠嗅觉感受器感受易挥发的化学物质，在比较远的距离感受刺激、作出反应。目前广泛应用的避蚊胺、埃卡瑞丁、伊默宁等物质都需要在安全浓度范围内使用，且具有一定的安全隐患风险。本研究得出日本弓背蚁工蚁对 3 个浓度（即 0.1%、1%和 10%）的高挥发性的 4 种萜烯类（月桂烯、柠檬烯、芳樟醇和香叶醇）和 2 种醛酯类（乙酸肉桂酯和反式肉桂醛）挥发物，以及 2 种弱挥发性的不饱和脂肪酸（油酸和亚油酸）均表现显著的负趋性（选择反应率≤27.19%）；其中，10%芳樟醇的驱避效果最好，0.1%反式肉桂醛的趋避效果次之，其相对选择率分别为 - 78.53%和 - 74.44%。已有研究发现肉桂叶在精油研发新型环保性红火蚁 *Solenopsis invicta* 杀虫剂上具有巨大潜力（Xing *et al*., 2023）。反式肉桂醛还可起到缩短家蝇和果蝇寿命、降低其繁殖力和生育能力，抑制一些蚊类产卵的作用（尹奇三, 2018）。芳樟醇本身具有类似铃兰香气，具有抗菌、抗病毒作用，可制作成香囊随身携带，起到驱避效果和保健功效（史光耀, 2022）。此外，还有很多利用化学物质对蚂蚁类群进行诱集和趋避管理等（Dani *et al*., 1996; 韩招久等, 2008; Ballantyne and Willmer, 2012; Buehlmann *et al*., 2014; Pattrick *et al*., 2017; Buteler *et al*., 2021; 辛正等, 2021）。

综上，日常生活中，白天可使用红、橙和绿色色板（色带）诱集或使用青色色板（色带）驱避日本弓背蚁，夜晚可使用红光、橙光、黄光、绿光和蓝光进行诱集或使用紫光驱避日本弓背蚁；此外，还可使用 10%芳樟醇和 0.1%反式肉桂醛驱避日本弓背蚁。最终，利用蚂蚁“三趋性”实现对日本弓背蚁的绿色防控。未来，蚂蚁“三趋性”的分子机理，合理组合驱避效果良好的色、光、气味挥发物也需被进一步研究。

参考文献 (References)

Ballantyne G, Willmer P, 2012. Nectar theft and floral ant-repellence: A link between nectar volume and ant-repellent traits? *PLoS ONE*, 7(8): e43869.

Buehlmann C, Graham P, Hansson BS, Knaden M, 2014. Desert ants locate food by combining high sensitivity to food odors with extensive crosswind runs. *Current Biology*, 24(9): 960–964.

Buteler M, Alma AM, Herrera ML, Gorosito NB, Fernández PC, 2021. Novel organic repellent for leaf-cutting ants: Tea tree oil and its potential use as a management tool. *International Journal of Pest Management*, 67(1): 1–9.

Carbaugh JR, Renthal RD, Vinson SB, Medina RF, 2020. Color discrimination and preference in the fire ant *Solenopsis invicta* Buren. *Insectes Sociaux*, 67(1): 167–178.

Dani FR, Cannoni S, Turillazzi S, David Morgan E, 1996. Ant repellent effect of the sternal gland secretion of *Polistes dominulus* (Christ) and *P. sulcifer* (Zimmermann) (Hymenoptera: Vespidae). *Journal of Chemical Ecology*, 22(1): 37–48.

Dong HJ, Huang XY, Gao QQ, Li SH, Yang SL, Chen FJ, 2023. Research progress on the species and diversity of ants and their three tropisms. *Insects*, 14 (11): 892.

Guo ZG, Wang MX, Cui L, Han BY, 2019. Advance in insect phototaxis and the development and application of colored sticky boards. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 30(10): 3615–3626. [郭祖国, 王梦馨, 崔林, 韩宝瑜, 2019. 昆虫趋色性及诱虫色

板的研究和应用进展. 应用生态学报, 30(10): 3615–3626.]

Han ZJ, Wang ZD, Jiang ZK, Zheng WQ, Qian WH, Chen JZ, Chen C, 2008. The synthesis of bridge-ring terpenoids and their repellent activities against house ants (*Monomorium pharaonis*). *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 30(4): 586–591. [韩招久, 王宗德, 姜志宽, 郑卫青, 钱万红, 陈金珠, 陈超, 2008. 桥环萜类化合物的合成及其对蚂蚁驱避活性的研究. 江西农业大学学报, 30(4): 586–591.]

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.]

Li CY, 2016. Morphological structure and chemical constituents of Duchenne gland and venom gland of *Toxocara japonicus*. Master dissertation. Yangling: Northwest A & F University. [李长有, 2016. 日本弓背蚁杜氏腺和毒腺的形态结构及化学成分研究. 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学.]

Liu JH, Zhao ZH, 2017. Roles of insect vision in host plant finding and locating. *Journal of Plant Propection*, 44(3): 353–362. [刘军和, 赵紫华, 2017. 昆虫视觉在寄主寻找及定位过程中的作用. 植物保护学报, 44(3): 353–362.]

Menzel R, Blakers M, 1975. Functional organization of an insect ommatidium with a fused rhabdom. *Cytobiology*, 11: 279–298.

Ogawa Y, Falkowski M, Narendra A, Zeil J, Hemmi JM, 2015. Three spectrally distinct photoreceptors in diurnal and nocturnal Australian ants. *Proceeding of the Royal Society B*: *Biological Sciences*, 282(1808): 20150673.

Pattrick JG, Shepherd T, Hoppitt W, Plowman NS, Willmer P, 2017. A dual function for 4-methoxybenzaldehyde in *Petasites* fragrans? Pollinator-attractant and ant-repellent. *Arthropod-Plant Interactions*, 11(5): 623–627.

Shi GY, 2022. Inhibitory effect of linalool on the growth and proliferation of human colorectal cancer SW480 cells. Master dissertation. Xi'an: Northwest University. [史光耀, 2022. 芳樟醇抑制人结直肠癌 SW480 细胞生长增殖作用的研究. 硕士学位论文. 西安: 西北大学.]

Shen Y, Yu JQ, Mo JC, Wang DZ, Zhang LL, 2012. Advance on study of insect phototactic behavior. *Journal of Henan Institute of Science and Technology* (*Natural Science Edition*), 40(5): 19–23. [沈颖, 尉吉乾, 莫建初, 王道泽, 张莉丽, 2012. 昆虫趋光行为研究进展. 河南科技学院学报(自然科学版), 40(5): 19–23.]

Shang YC, 2006. The social life of ants. *Bulletin of Biology*, 41(4): 5–7. [尚玉昌, 2006. 蚂蚁的社会生活. 生物学通报, 41(4): 5–7.]

Tang J, Li S, Huang EY, Zhang BY, 1985. Indoor ants and their control. *Entomological Knowledge*, 22(6): 277–278. [唐觉, 李参, 黄恩友, 张本悦, 1985. 室内蚂蚁及其防治. 昆虫知识, 22(6): 277–278.]

Xing HL, Hu YQ, Yang LP, Lin JH, Bai HY, Li YQ, Tanvir R, Li L, Bai M, Zhang ZX, Xu HH, Wu H, 2023. Fumigation activity of essential oils of *Cinnamomum loureirii* toward red imported fire ant workers. *Journal of Pest Science*, 96(2): 647–662.

Xin Z, Ma HW, Wang D, Zhang X, 2021. Advances in the research and application of disease vector tropism. *Chinese Journal of Vector Biology and Control*, 32(2): 121–126. [辛正, 马红薇, 王东, 张晓, 2021. 病媒生物的趋性研究与应用进展. 中国媒介生物学及控制杂志, 32(2): 121–126.]

Yin QS, 2018. Study on blood-sucking behavior of *Culex pipiens quinquefasciatus* caused by eugenol and *trans*-Cinnamaldehyde interference. Master dissertation. Guangzhou: South China Agricultural University. [尹奇三, 2018. 丁香酚和反式肉桂醛干扰致倦库蚊的吸血行为研究. 硕士学位论文. 广州: 华南农业大学.]

Yang XM, Lu YH, Liang GM, 2020. Insect phototaxis behavior and light trapping technology. *China Illuminating Engineering Journal*, 31(5): 22–31. [杨现明, 陆宴辉, 梁革梅, 2020. 昆虫趋光行为及灯光诱杀技术. 照明工程学报, 31(5): 22–31.]

Zhang CZ, 2007. Pest trend to color and its application technology development. *Wenzhou Agricultural Science and Technology*, 2007(2): 1–4. [张纯胄, 2007. 害虫对色彩的趋性及其应用技术发展. 温州农业科技, 2007(2): 1–4.]

Zhang JF, Zhang Y, Xu WP, Tao LM, 2020. The phototaxis of insects and its research progress in the application to pest management. *World Pesticide*, 42(11): 26–35. [张锦芳, 张阳, 徐文平, 陶黎明, 2020. 昆虫的趋光性及其应用于害虫治理的研究进展. 世界农药, 42(11): 26–35.]

Zheng WQ, Jiang ZK, Han ZJ, Wang ZD, Chen C, Jin XY, Chen JZ, 2008. Comparison between dipped seeds and dipped filter paper in ant repellent bioassay. *Chinese Journal of Hygienic Insecticides & Equipments*, 14(1): 27–29. [郑卫青, 姜志宽, 韩招久, 王宗德, 陈超, 金宪杨, 陈金珠, 2008. 两种测定蚂蚁驱避活性实验方法的比较分析. 中华卫生杀虫药械, 14(1): 27–29.]