

# 视觉和嗅觉在桃红颈天牛成虫近距离 搜寻和识别配偶过程中的作用\*

彭欣怡<sup>1,2\*\*</sup> 杨学瑾<sup>1,2</sup> 周媛媛<sup>1,2</sup> 李爽<sup>1</sup>  
孙佐翔<sup>1</sup> 魏建荣<sup>1</sup> 曹丹丹<sup>1,2\*\*\*</sup>

(1. 河北大学生命科学学院, 生命科学与绿色发展研究院, 保定 071002; 2. 河北省生物工程技术创新中心, 保定 071002)

**摘要** 【目的】明确视觉和嗅觉在桃红颈天牛 *Aromia bungii* 成虫近距离搜寻和识别配偶过程中的作用。【方法】采用半野外行为观测笼的方法, 分别设置不同的处理, 观察视觉和嗅觉对桃红颈天牛成虫搜寻配偶行为的影响。【结果】桃红颈天牛雌、雄成虫均不能成功定位被蜡封处理的异性; 致盲后的成虫识别异性的时间较对照显著增加, 但均能和正常异性成功交配; 剪除触角的雄虫无法成功定位雌虫, 剪除触角的雌虫可与正常雄虫成功交配但交配次数显著降低, 近距离识别异性的时间显著增加; 雌雄成虫剪除下颚须后对异性搜索时间以及交配次数影响不明显; 剪除下唇须后显著影响成虫对异性的搜寻时间以及交配次数。【结论】桃红颈天牛成虫近距离搜寻和识别配偶过程中, 雄虫依靠触角摆动主动搜索雌虫; 雌雄成虫相遇后主要靠体表信息化学物质互相识别, 主要功能器官为触角和下唇须。在此过程中视觉发挥一定作用, 但嗅觉起主导作用。

**关键词** 桃红颈天牛; 搜寻配偶; 视觉; 嗅觉; 识别配偶

## Role of vision and olfaction in short-distance mate location and recognition in *Aromia bungii* (Coleoptera: Cerambycidae)

PENG Xin-Yi<sup>1,2\*\*</sup> YANG Xue-Jin<sup>1,2</sup> ZHOU Yuan-Yuan<sup>1,2</sup> LI Shuang<sup>1</sup>  
SUN Zuo-Xiang<sup>1</sup> WEI Jian-Rong<sup>1</sup> CAO Dan-Dan<sup>1,2\*\*\*</sup>

(1. School of Life Science, Hebei University, Institute of Life Science and Green Development, Baoding 071002, China;  
2. Hebei Innovation Center for Bioengineering and Biotechnology, Hebei University, Baoding 071002, China)

**Abstract** [Objectives] To clarify the role of vision and olfaction in short-distance mate location and recognition in *Aromia bungii*. [Methods] The influence of vision and olfaction on the mate-searching behavior of *A. bungii* was observed in captive *A. bungii*. [Results] Neither adult females nor males could successfully locate wax-sealed mates. Blind adults could successfully mate with normal mates, but the time spent on mate recognition was significantly longer than that required by normal beetles. Males without antennae could not successfully locate females. Females without antennae could successfully mate with normal males, but the number of copulations decreased significantly, whereas the time used to recognize mates over a short-distance increased significantly. Removal of the maxillary palpus had no significant effect on mate-searching time or number of copulations in both sexes. However, removal of the labial palpus significantly affected mate-searching time and mating time. [Conclusion] The wiggling of antennae by male *A. bungii* plays a key role in short-range searching for females. Male and female adults recognize each other mainly by contacting and sensing body surface chemicals, primarily with the antennae and labial palpus. Overall, olfaction plays the dominant role, and vision the secondary role, in short-range mate location and recognition in *A. bungii*.

**Key words** *Aromia bungii*; mate location; vision; olfaction; mate recognition

\*资助项目 Supported projects: 河北省自然科学基金项目 (C2020201021); 河北省重点研发计划项目 (20326511D)

\*\*第一作者 First author, E-mail: 469045814@qq.com

\*\*\*通讯作者 Corresponding author, E-mail: caodandan666@163.com

收稿日期 Received: 2023-02-13; 接受日期 Accepted: 2023-08-15

桃红颈天牛 *Aromia bungii* (Faldermann) 属鞘翅目 Coleoptera 天牛科 Cerambycidae (萧刚柔, 1992), 危害桃、杏、李、梅等蔷薇科果树以及杨柳等观赏型乔木, 是一种重要的蛀干害虫 (陈俊蓉等, 2020)。桃红颈天牛通常将卵产在树干表皮缝隙中, 以幼虫蛀食韧皮部和木质部, 形成不规则孔道, 造成树干中空衰弱, 引起树木死亡 (陈俊蓉等, 2020; 王姣雪等, 2021), 对林果业以及园林绿化造成巨大的经济损失和生态灾害。据调查, 3 年生以上挂果后的桃树开始受到侵害, 6-7 年生桃树年均死亡株率 6.5%, 12 年生桃树被害株率 88.9%, 19-20 年生桃树受害率达 90% 以上 (李密等, 2018)。北京地区桃、杏的种植面积达 4 万  $\text{hm}^2$  以上, 平均受害率 30% 以上, 严重的可达 90% 以上 (刘奇志等, 2003)。河北顺平地区的桃树, 树龄 6 年时开始受害, 个别果园受害率高达 90%, 管理差的果园受害重 (王姣雪等, 2021)。桃红颈天牛幼虫生活隐蔽, 成虫是唯一裸露、自由活动并进行交配繁殖的虫态 (Wang *et al.*, 2018)。由于成虫具有补充营养、聚集、交配等一系列行为习性, 搞清楚上述行为的主要影响因素, 对有效调控桃红颈天牛种群数量意义重大 (Wang *et al.*, 2018; 廖晨延等, 2021)。

天牛成虫对配偶的近距离搜寻及识别机制是一系列复杂的行为反应, 涉及视觉、嗅觉和触觉等多个方面 (Meier *et al.*, 2020)。视觉在一些天牛种群近距离寻找配偶时发挥较大作用, 如云斑天牛 *Batocera lineolata* (杨桦等, 2014)、光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis* (李德家等, 1999) 和松墨天牛 *Monochamus alternatus* (刘博等, 2012)。视觉信号在天牛选择寄主过程中的重要性在很多研究中得以证实 (de Groot and Noot, 2001; McIntosh *et al.*, 2001), 但也有研究表明视觉在天牛配偶定位过程的作用极为有限, 如栗山天牛 *Massicus raddei* 成虫在致盲后仍可以进行正常的配偶搜寻和交尾行为, 说明视觉在栗山天牛配偶定位和识别行为中作用不大 (魏建荣等, 2013)。而在星天牛 *Anoplophora chinensis* 雄虫近距离定位搜寻配偶过程中, 视觉与嗅觉信号起协同作用 (Yasui, 2009)。目前, 未见视觉

和嗅觉因素在桃红颈天牛成虫近距离搜寻配偶行为过程中作用的相关报道。

本研究采用半野外试验, 观察经不同处理后的成虫搜索配偶行为, 记录搜索历期及交配次数, 以阐明视觉和嗅觉对桃红颈天牛成虫搜索配偶行为的影响。研究结果可为桃红颈天牛林间防控提供参考, 同时有助于丰富和完善对天牛类昆虫配偶搜寻行为机制的理解。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试虫源

由于河北省桃红颈天牛幼虫发育历期为 2 年, 且室内饲养成本高、难度大, 较难获得大量生理状态相同的桃红颈天牛成虫, 故本研究所用成虫均于羽化高峰期在野外捉捕。2021 年 7 月, 在河北省顺平县南台鱼村 (115°7'18.1"E, 38°58'49.7"N) 桃园人工捕捉成虫, 带回室内单只放入饲养盒 (聚乙烯, 22 cm × 17.5 cm × 12.5 cm) 中待用。实验当天所用成虫均为前 1 d 捕捉所得, 试虫活泼且活力水平一致。

### 1.2 行为观测笼

参考 Fukaya 等 (2004) 方法, 略作改进, 设计制作桃红颈天牛行为观测笼 (120 cm × 60 cm × 60 cm)。笼架以不锈钢制作, 用白色透明网 (20 × 20 目) 围罩, 长边留拉链开口 100 cm, 便于操作。

### 1.3 试验条件

观测笼水平放置于室外遮荫处, 根据桃红颈天牛的活动习性, 试验在每天上午 8:00-11:00 进行。室外平均温度 26 °C 左右, 相对湿度 77%-80%, 平均风速 2.1 m/s, 室外平均光照强度约 10 000 lx。

### 1.4 试虫的不同处理及观测

#### 1.4.1 正常雌、雄成虫对蜡封异性成虫的行为反应

本研究采用蜡封虫体的方法 (魏建荣等, 2008), 隔绝昆虫体表及虫体挥发性化学物质。首先将活体成虫置于 -20 °C 条件下 2 h 以上冷

冻致死, 取出置于常温下, 调整虫体形态为正常爬行姿势后, 迅速投入熔化的液体石蜡中, 虫体全身封蜡后取出备用。

由于成虫习惯向上爬行, 因此将行为观测笼的一端垫高 15 cm (图 1), 将 1 只蜡封好的雌虫置于垫高一侧的网壁上, 头向上, 用细铁丝固定成正常爬行状态。取单只正常活力的雄虫置于观测笼底部低处一侧进行释放, 观察其从不同距离远处 (120 cm 和 60 cm) 对蜡封雌虫的搜索能力, 每只试虫观察 0.5-1 h。更换试虫, 将观测笼另一侧抬高, 同时将蜡封成虫调换位置, 以避免方向带来的影响。以相同处理方法观察正常活力雌虫对蜡封雄虫的搜索行为。同时以正常雌、雄虫为对照。每天同时设 3 个观测笼分别观察: 正常雄虫+蜡封雌虫、正常雌虫+蜡封雄虫、正常雄虫+正常雌虫; 分别从两处距离远处释放; 1 d 内每个处理重复 2 次。试验共计 3 d, 即每个处理 6 个重复, 除蜡封成虫外, 活体成虫不重复使用。观察、统计试虫的行动方向和轨迹, 并记录试虫是否有试图与蜡封异性交尾的行为。

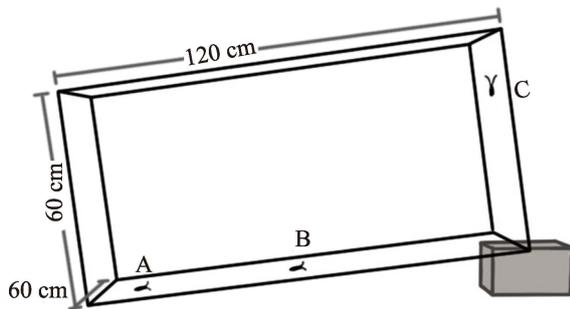


图 1 行为观测笼示意图

Fig. 1 Schematic diagram of behavioral observation cages

A: 120 cm 释放位置; B: 120 cm 释放位置;  
C: 蜡封成虫悬挂位置。

A: 120 cm release position; B: 120 cm release position;  
C: Wax sealing adult hanging position.

**1.4.2 致盲雌、雄成虫对异性的搜寻行为** 用白色漆笔涂抹成虫复眼使成虫致盲, 然后引入行为观测笼中 (图 1)。观测笼分别设置以下处理: 正常雄虫+致盲雌虫; 正常雌虫+致盲雄虫; 正常雄虫+正常雌虫。每个观测笼各放置 3 只雌虫和 3 只雄虫。为了在观察中能够有效辨识每只成虫,

在每组雌雄成虫的鞘翅上用白色漆笔分别画不同数量的圆点进行辨别标记。每个处理观察 2-2.5 h, 记录每只雌雄虫的交尾次数和搜索时间 (放入观测笼后至第一次交配的时间), 每个处理设置 3 个实验笼, 共计 9 个重复。

**1.4.3 雌、雄成虫分别剪除触角后对异性的搜寻行为** 用消毒剪刀将健康成虫的触角从基部剪掉, 然后引入行为观测笼中进行观察。不同观测笼设置以下处理: 正常雄虫+无触角雌虫; 正常雌虫+无触角雄虫; 正常雄虫+正常雌虫, 试验方法和重复次数同 1.4.2。

**1.4.4 雌、雄成虫分别剪除下颚须和下唇须后对异性的搜寻行为** 前述试验中观察到雌雄成虫相遇后及交配前雄虫会用口器轻咬或者舔舐雌虫的鞘翅, 因此设置分别剪除下颚须和下唇须的处理, 实验方法和重复次数同 1.4.2。

## 1.5 数据统计分析

采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 中的 LSD 法对不同处理中成虫搜寻配偶的时间 (释放成虫至第一次交配所用的时间) 以及交配次数分别进行比较 ( $\alpha=0.05$ ), 原始数据在分析前使用去尾平均数 (Trim mean) 进行非线性归一化处理。采用统计软件 IBM SPSS Statistics (25) 分析, Origin 2018 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 正常雌、雄成虫对蜡封异性成虫的行为反应

相较于对照, 桃红颈天牛成虫对蜡封的异性成虫没有明显的趋向、搜索和识别反应。若爬行过程中触角偶然碰触到蜡封的异性虫体, 试虫会躲避并迅速爬离。在不同释放距离下, 试虫反应没有差异。该结果表明, 去除异性化学信号后, 成虫只靠视觉不能有效搜寻和识别配偶。

### 2.2 致盲雌、雄成虫对异性成虫的搜索行为反应

致盲雄虫+正常雌虫: 致盲雄虫触角向两侧摆动前进, 前足探索频繁, 有追击雌虫的行为, 可以搜寻雌虫并成功交配。交配次数显著低于对照 ( $F=5.395$ ;  $df=7$ ;  $P=0.031 < 0.05$ ) (图 2), 搜

索时间[ ( 74.20 ± 5.56 ) min]显著高于对照组 [ ( 33.44 ± 3.53 ) min] (  $F=16.091$ ;  $df=20$ ;  $P=0.068 < 0.05$  ) ( 图 2 )。

正常雄虫+致盲雌虫：致盲雌虫在爬行过程中有少量触角试探行为，但对外界反应比正常雌虫稍显迟钝；正常雄虫通过触角摆动积极搜寻雌性，当触角触碰到致盲雌虫时，雌虫有明显的躲闪现象。交配次数低于正常组，但差异不显著 (  $F=5.395$ ;  $df=7$ ;  $P=0.552 > 0.05$  ) ( 图 2 )，搜索时间[ ( 102.43 ± 6.04 ) min]显著高于对照组 [ ( 33.44 ± 3.53 ) min] (  $F=16.091$ ;  $df=20$ ;  $P=0.00023 < 0.05$  ) ( 图 2 )。

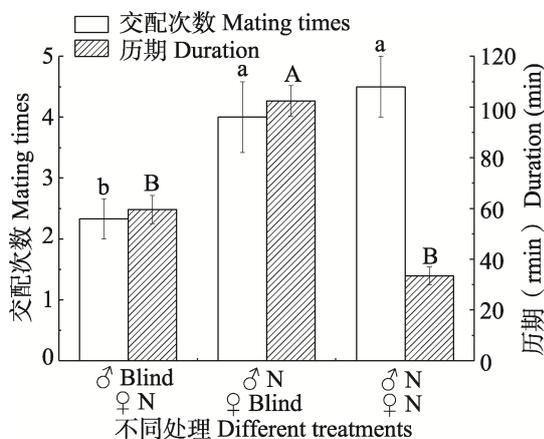


图 2 桃红颈天牛雌雄成虫致盲后的交配次数和搜索时间

Fig.2 The mating times and the mate searching duration of blind *Aromia bungii* adults

N: 正常成虫; Blind: 经致盲处理的成虫。图中数据为均值±标准误; 柱上标有不同小写字母表示不同处理组间的交配次数差异显著 (  $P < 0.05$  )。柱上标有不同字母表示不同处理组的搜索时间有显著差异 (  $P < 0.05$ , One-way ANOVA )。下图同。

N: Normal adult; Blind: Adult treated with blinding. Data are mean±SE. Different lowercase letters above bars indicate significant differences in mating times between the adults with different treatments (  $P < 0.05$ , One-way ANOVA ), while different uppercase letters indicate that the mate searching durations between the adults with different treatments were significantly different (  $P < 0.05$ , One-way ANOVA ). The same below.

### 2.3 雌、雄虫剪除触角后对异性的搜寻行为

无触角雄虫+正常雌虫：雄虫活性变差，基本不爬动，出现原地打转行为，当雌虫触角触碰

到雄虫虫体时，雄虫躲避，且不能成功控制雌虫完成交配，交配次数为 0 次 ( 表 1 )。

正常雄虫+无触角雌虫：雌虫爬行迟缓，对外界反应迟钝，大多待在角落处很少活动，雄虫会有探寻和求偶行为，但雌虫躲避。交配次数显著低于正常对照组 (  $F=25$ ;  $df=3$ ;  $P=0.038 < 0.05$  ) ( 表 1 )，搜索时间[ ( 59.00 ± 4.45 ) min]也显著高于对照组[ ( 33.44 ± 3.53 ) min] (  $F=5.885$ ;  $df=10$ ;  $P=0.038 < 0.05$  )。

表 1 桃红颈天牛成虫剪触除角后的交配次数  
Table 1 The mating times of *Aromia bungii* adults without antennae

不同处理 Different treatments	交配次数 Mating times	差异显著性 Significant difference
		P < 0.05
无触角♂+正常♀ No antennae ♂+ Normal ♀	0.00	b
无触角♀+正常♂ No antennae ♀+ Normal ♂	0.67 ± 0.24	b
正常♂+正常♀ Normal ♂+ Normal ♀	3.50 ± 0.15	a

图中数据为均值±标准误; 同列标有不同小写字母表示不同处理间差异显著 (  $P < 0.05$ , One-way ANOVA )。

Data are mean±SE, and followed by the different lowercase letters in the same column indicate significant differences in mating times between the adults with different treatments (  $P < 0.05$ , One-way ANOVA ).

### 2.4 雌、雄虫分别剪除下颚须后对异性的搜索行为

无下颚须雄虫+正常雌虫：雄虫行动稍迟缓，会追击雌虫但搜索范围较正常组小。雌雄虫相遇时相互试探，雄虫控制住雌虫后并未立刻交配，性器官会试探对方，1-2 min 后进行正常交配。交配次数低于对照组，差异显著 (  $F=3.800$ ;  $df=8$ ;  $P=0.038 < 0.05$  ) ( 图 3 )。搜索时间[ ( 53.25 ± 3.95 min ) ]高于对照组[ ( 33.44 ± 3.53 min ) ]，差异较显著 (  $F=2.641$ ;  $df=17$ ;  $P=0.045 < 0.05$  ) ( 图 3 )。

正常雄虫+无下颚须雌虫：无下颚须的雌虫爬行活动基本不受影响，触角试探行为正常。但正常雄虫欲与其交配时，无下颚须的雌虫较正常

雌虫会有明显的挣扎现象, 雄虫需花费更多的时间和精力控制雌虫。因此交配次数略低于正常组, 但差异不显著 ( $F=3.800$ ;  $df=8$ ;  $P=0.151 > 0.05$ ) (图 3), 搜索时间 [ $(34.40 \pm 4.32)$  min] 高于对照组 [ $(33.44 \pm 3.53)$  min], 但差异也不显著 ( $F=2.614$ ;  $df=17$ ;  $P=0.911 > 0.05$ ) (图 3)。

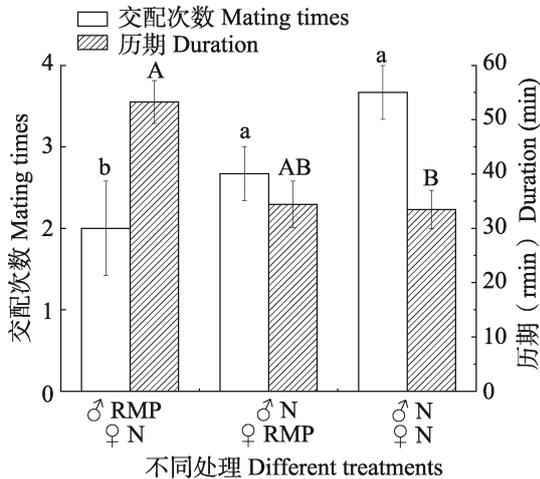


图 3 桃红颈天牛成虫剪除下颚须后的交配次数和搜索时间

Fig. 3 The mating times and the mate searching duration of *Aromia bungii* adults without maxillary palpus

RMP: 剪除下颚须成虫 Adults remove maxillary palpus.

## 2.5 雌、雄虫分别剪除下唇须后对异性的搜索行为

无下唇须雄虫+正常雌虫: 雄虫有追击雌虫、啃咬雌虫的行为, 但追击速度较缓慢、反应较迟钝, 当雄虫控制住雌虫时, 性器官探出较正常雄虫慢, 但仍然可以交配, 交配次数显著低于对照组 ( $F=6.200$ ;  $df=8$ ;  $P=0.17 < 0.05$ ) (图 4), 搜索时间 [ $(72.25 \pm 4.53)$  min] 显著高于对照组 [ $(33.44 \pm 3.53)$  min] ( $F=13.911$ ;  $df=17$ ;  $P=0.001 < 0.05$ ) (图 4)。

正常雄虫+无下唇须雌虫: 雌虫爬行时稍显缓慢, 但触角摆动等行为不受影响。交配过程中, 雌虫被雄虫控制后会有挣扎现象, 当雄性性器官正常探出时, 雌虫性器官探出缓慢, 不会立刻交配。交配次数显著低于对照组 ( $F=6.200$ ;  $df=8$ ;  $P=0.034 < 0.05$ ) (图 4), 搜索时间 [ $(68.20 \pm$

$3.70)$  min] 也显著高于对照组 [ $(33.44 \pm 3.53)$  min] ( $F=13.911$ ;  $df=17$ ;  $P=0.001 < 0.05$ ) (图 4)。

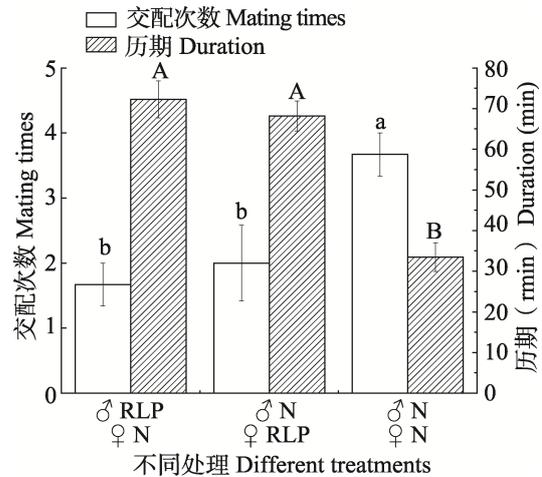


图 4 桃红颈天牛成虫剪除下唇须后的交配次数和搜索时间

Fig. 4 The mating times and the duration from the release to the first mating of *Aromia bungii* adults without labial palpus

RLP: 剪除下唇须成虫 Adults labial maxillary palpus.

## 3 讨论

本研究通过蜡封虫体的方法来观察视觉在成虫近距离搜索配偶活动中的作用。结果表明正常成虫均未表现出明显的趋向行为, 无法成功搜寻被蜡封的异性成虫, 说明视觉信号不起作用, 化学信号及嗅觉感受在桃红颈天牛成虫搜寻异性的过程中发挥主导作用。为进一步验证视觉因素的作用, 开展了成虫致盲实验, 结果表明虽然致盲处理显著延长了雌虫对异性的搜索时间, 同时也减少了成虫的交配次数, 但是致盲成虫可以成功搜寻并识别异性, 说明视觉会影响桃红颈天牛成虫近距离搜寻配偶, 但不是主导因素。

本研究的半野外观察结果表明, 在近距离搜索配偶过程中, 桃红颈天牛雄性成虫起主导作用, 活动积极并通过触角摆动搜索完成交配前的识别。剪去触角的雄虫, 活动性极差, 虽然可以随机遇到雌虫, 但并不能完全控制雌虫, 不能完成交配。这些短促互动反应, 可能与触角外其他部位的感受器有关。当雌虫剪去触角, 虽反应迟缓, 但在正常雄性成虫探寻和求偶行为下, 会进

行正常交配,说明雌虫的触角在两性交尾中可能起次要作用,也间接说明雄虫触角在两性成虫互相搜寻和识别过程中发挥主导作用(魏建荣等, 2013)。综上,触角在桃红颈天牛近距离搜寻异性以及后续的交配行为中发挥关键作用,该结果与眉斑并脊天牛 *Glenea cantor* 雄性触角端部 5 节所具有的不可替代的功能相似(Lu *et al.*, 2007),但与松墨天牛 *M. alternatus* 的嗅觉识别存在差异,松褐天牛雄虫在失去整个触角的情况下仍然可以找到雌虫,发生交尾行为(刘博等, 2012)。桃红颈天牛触角感器分布已有报道(Di Palma *et al.*, 2019),但各种感器的功能及其在近距离搜寻异性过程中的作用有待进一步研究。

本课题组前期研究发现桃红颈天牛雄虫在配偶搜寻和识别过程中,除触角摆动搜索异性外,还会用前足控制住雌虫,迅速爬至雌虫身体上,有雄虫会用口器轻咬或者舔舐雌虫鞘翅基部或者前胸背板的行为(陈俊蓉等, 2020),这种舔舐行为在云斑天牛中也存在,一般认为是天牛雌虫体表存在接触性信息素,其在雄虫识别雌虫和启动交配中起着重要作用(Hanks *et al.*, 1996; Fonseca and Zarbin, 2009; Luo *et al.*, 2011)。口器中的下颚须和下唇须等为主要嗅觉感受器,Lu 等(2007)研究发现,眉斑并脊天牛的下颚须对雄虫的配偶搜索和交尾行为影响较小。但本研究结果显示,无下颚须组与正常对照组相比,雄虫的交配次数和搜索时间均达到显著差异,而雌虫没有;而无下唇须组雌雄成虫的交配次数和搜索时间与正常对照组相比均达到显著差异,对桃红颈天牛成虫近距离搜寻配偶和交配次数都有影响,且在试探过程中观察到,雌虫触角摆动时,下唇须也会随之摆动,说明在雌虫识别行为过程中,下唇须与触角协同作用,其中触角发挥主要作用。

天牛雌、雄成虫均可释放性信息素,迄今已有多种天牛的性信息素得到了研究。部分种类天牛的性信息素作用距离较短或只具备接触性信息素,大多由雌虫释放(Allison *et al.*, 2004; 王广利和迟德富, 2007)。对于桃红颈天牛来说,雄性成虫会释放聚集性信息素吸引两性成虫

(Fukaya *et al.*, 2017; Xu *et al.*, 2017; Yasui *et al.*, 2019)。在近距离识别配偶过程中,雄虫通过触角直接接触雌虫,在抱握和爬上雌虫背部过程中用触角和下唇须或下颚须不断接触雌虫鞘翅和前胸背板,并伴有曲腹行为,最终发生交配(陈俊蓉等, 2020),这可能是雌虫体表的接触性信息素或性信息素前体发生氧化等化学反应后的产物在起作用(Wickham *et al.*, 2012)。本研究结果分析了视觉和嗅觉在桃红颈天牛成虫近距离搜寻配偶过程中起到的作用,进一步丰富和完善了天牛类蛀干害虫行为及化学生态学相关知识,为桃红颈天牛的有效防控提供了理论参考。

## 4 结论

桃红颈天牛近距离搜索定位配偶过程中,雄性起主导作用,主动搜索雌虫,化学刺激和嗅觉感受在此过程中发挥主要作用,且触角和下唇须是化学识别和感受的主要功能器官。视觉会影响桃红颈天牛成虫对异性的搜索时间和交配次数,但不是主导因素。

## 参考文献 (References)

- Allison JD, Borden JH, Seybeold SJ, 2004. A review of the chemical ecology of the Cerambycidae (Coleoptera). *Chemoecology*, 14(3/4): 123–150.
- Chen JR, Yan SY, Cao DD, Jing JR, Zhang K, Jian KM, Ma HF, Wei JR, 2020. Mating behavior of *Aromia bungii* (Coleoptera: Cerambycidae) adults and their perching and oviposition preference on different host plants. *Acta Entomologica Sinica*, 63(7): 851–860. [陈俊蓉, 闫诗谣, 曹丹丹, 靖金蕊, 张阔, 菅凯敏, 马海峰, 魏建荣, 2020. 桃红颈天牛成虫的交配行为及对不同寄主植物的栖落和产卵选择性. *昆虫学报*, 63(7): 851–860.]
- de Groot P, Nott R, 2001. Evaluation of traps of six different designs to capture pine sawyer beetles (Coleoptera: Cerambycidae). *Agricultural and Forest Entomology*, 3: 107–111.
- Di Palma A, Pistillo M, Griffio R, Garonna AP, Germinara GS, 2019. Scanning electron microscopy of the antennal sensilla and their secretion analysis in adults of *Aromia bungii* (Faldermann, 1835) (Coleoptera, Cerambycidae). *Insects*, 10(4): 88–109.
- Fonseca MG, Zarbin PHG, 2009. Mating behaviour and evidence for sex-specific pheromones in *Hedypathes betulinus* (Coleoptera: Cerambycidae: Lamiinae). *Journal of Applied Entomology*, 133(9/10): 695–701.
- Fukaya M, Akino T, Yasuda T, Yasui H, Wakamura S, 2004. Visual and olfactory cues for mate orientation behaviour in male

- white-spotted longicorn beetle, *Anoplophora malasiaca*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 111(2): 111–115.
- Fukaya M, Kiriyama S, Yasui H, 2017. Mate-location flight of the red-necked longicorn beetle, *Aromia bungii* (Coleoptera: Cerambycidae): An invasive pest lethal to Rosaceae trees. *Applied Entomology and Zoology*, 52(4): 559–565.
- Hanks LM, Millar JG, Paine TD, 1996. Mating behavior of the eucalyptus longhorned borer (Coleoptera: Cerambycidae) and the adaptive significance of long “horns”. *Journal of Insect Behavior*, 9(3): 383–393.
- Li DJ, Tokoro M, Nacashima T, 1999. Mechanism of mating action of *Anoplophora glabripennis* (Motsch.) *Journal of Beijing Forestry University*, 21(4): 33–36. [李德家, 所雅彦, 中岛忠一, 1999. 光肩星天牛成虫交配行为机制研究. 北京林业大学学报, 21(4): 33–36.]
- Li M, Huang KB, He Z, Zhong WH, Wu N, Liu Q, 2018. Spatial distribution patterns of *Aromia bungii* larvae in peach orchards with different tree ages. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 44(4): 388–394. [李密, 黄凯波, 何振, 钟武红, 伍南, 刘清, 2018. 不同树龄桃园桃红颈天牛幼虫空间分布型研究. 湖南农业大学学报(自然科学版), 44(4): 388–394.]
- Liao CY, Wei JR, Su Z, 2021. Review on mating behavior of longhorn beetle. *Forest Pest and Disease*, 40(2): 27–33. [廖晨延, 魏建荣, 苏智, 2021. 天牛类昆虫交配行为研究进展. 中国森林病虫, 40(2): 27–33.]
- Liu B, Xu HC, Meng JG, Sun JH, Fan JT, 2012. Visual cues for the host-finding and mating locations of *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae). *Journal of Zhejiang A&F University*, 29(4): 617–620. [刘博, 徐华潮, 孟俊国, 孙江华, 樊建庭, 2012. 视觉因素在松墨天牛定位寄主和交配中的作用. 浙江农林大学学报, 29(4): 617–620.]
- Liu QZ, Yan YH, Song YL, 2003. Comparison of several control methods of *Aromia bungii*. *Plant Protection*, 29(3): 57–58. [刘奇志, 严毓骅, 宋艳丽, 2003. 几种桃红颈天牛防治方法的比较. 植物保护, 29(3): 57–58.]
- Lu W, Wang Q, Tian MY, He XZ, Zeng XL, Zhong YX, 2007. Mate location and recognition in *Glenea cantor* (Fabr.) (Coleoptera: Cerambycidae: Lamiinae): Roles of host plant health, female sex pheromone, and vision. *Environmental Entomology*, 36(4): 864–870.
- Luo SL, Zhuge PP, Wang MQ, 2011. Mating behavior and contact pheromones of *Batocera horsfieldi* (Hope) (Coleoptera: Cerambycidae). *Entomological Science*, 14(3): 359–363.
- McIntosh RL, Katinic PJ, Allison JD, Borden JH, Downey DL, 2001. Comparative efficacy of five types of trap for woodborers in the Cerambycidae, Buprestidae and Siricidae. *Agricultural and Forest Entomology*, 3: 113–120.
- Meier LR, Zou YF, Mongold-Dier JA, Millar JG, Hanks LM, 2020. Pheromone composition and chemical ecology of six species of Cerambycid beetles in the subfamily Lamiinae. *Journal of Chemical Ecology*, 46(1): 30–39.
- Wang GL, Chi DF, 2007. The chemical communication and their application in integrated pest management in the Cerambycidae (Coleoptera). *Scientia Silvae Sinicae*, 43(9): 88–95. [王广利, 迟德富, 2007. 天牛化学通讯及其在害虫综合治理中的应用. 林业科学, 43(9): 88–95.]
- Wang JX, Yan XW, Cao DD, Yang BJ, Zhao ZP, Wei JR, 2021. Study on biological control of *Aromia bungii* in the peach orchard by *Dastarcus helophoroides*. *Forest Pest and Disease*, 40(5): 16–20. [王姣雪, 颜学武, 曹丹丹, 杨兵军, 赵正萍, 魏建荣, 2021. 花绒寄甲控制果园桃红颈天牛的研究. 中国森林病虫, 40(5): 16–20.]
- Wang WC, Cao DD, Men J, Wei JR, 2018. (R)-(+)-citronellal identified as a female-produced sex pheromone of *Aromia bungii* Faldermann (Coleoptera: Cerambycidae). *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 28: 77.
- Wei JR, Gao C, Gao JC, Dong LJ, 2013. Roles of vision and antennae in the short-distance mate searching behavior of male adults of *Massicus raddei* (Coleoptera: Cerambycidae). *Acta Entomologica Sinica*, 56(7): 824–830. [魏建荣, 高纯, 高俊崇, 董丽君, 2013. 视觉和触角在栗山天牛雄虫近距离搜寻配偶行为中的作用. 昆虫学报, 56(7): 824–830.]
- Wei JR, Yang ZQ, Tang H, Ma JH, Du JW, 2008. Behavior of a cerambycid parasitoid beetle (*Dastarcus helophoroides*). *Scientia Silvae Sinicae*, 44(7): 50–55. [魏建荣, 杨忠岐, 唐桦, 马建海, 杜家纬, 2008. 花绒寄甲成虫的行为观察. 林业科学, 44(7): 50–55.]
- Wickham JD, Xu ZC, Teale SA, 2012. Evidence for a female-produced, long range pheromone of *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae). *Insect Science*, 19(3): 355–371.
- Xiao GR, 1992. Chinese Forest Insects (Revised Edition). Beijing: China Forestry Press. 500–501. [萧刚柔, 1992. 中国森林昆虫(修订版). 北京: 中国林业出版社. 500–501.]
- Xu T, Yasui H, Teale SA, Fujiwara-Tsujii N, Wickham JD, Fukaya M, Hansen L, Kiriyama S, Hao DJ, Nakano A, Zhang LW, Watanabe T, Tokoro M, Millar JG, 2017. Identification of a male-produced sex-aggregation pheromone for a highly invasive cerambycid beetle, *Aromia bungii*. *Scientific Reports*, 7(1): 7330.
- Yang H, Wang BX, Yang W, Yang CP, Cai Y, He XH, 2014. Roles of visual in host selection and mate finding of *Batocera lineolata* (Coleoptera: Cerambycidae) adults. *Plant Protection*, 40(5): 22–26. [杨桦, 王保新, 杨伟, 杨春平, 蔡艳, 何晓华, 2014. 视觉在云斑天牛成虫选择寄主和寻找配偶中的作用. 植物保护, 40(5): 22–26.]
- Yasui H, 2009. Chemical communication in mate location and recognition in the white-spotted longicorn beetle, *Anoplophora malasiaca* (Coleoptera: Cerambycidae). *Applied Entomology and Zoology*, 44(2): 183–194.
- Yasui H, Fujiwara-Tsujii N, Yasuda T, Fukaya M, Kiriyama S, Nakano A, Watanabe T, Mori K, 2019. Electroantennographic responses and field attraction of an emerging invader, the red-necked longicorn beetle *Aromia bungii* (Coleoptera: Cerambycidae), to the chiral and racemic forms of its male-produced aggregation-sex pheromone. *Applied Entomology and Zoology*, 54(1): 109–114.