

亮腹釉小蜂成虫触角感受器的超微结构



刘燕梅^{1,2} 曾浩源^{2,3} 王姿烨^{1,2} 郭墅濠^{1,2} 卢梓潼^{1,2}
张利荷^{2,3} 邱宝利^{1,2,3,4} 桑文^{1,2,3,4*}

(1. 华南农业大学, 广东省生物农药创制与应用重点实验室, 广州 510640; 2. 华南农业大学, 生物防治教育部工程研究中心, 广州 510640; 3. 华南农业大学, 广东省农业害虫生物防治工程技术研究中心, 广州 510640; 4. 华南农业大学植物保护学院昆虫学系, 广州 510640)

摘要: 为进一步了解柑橘木虱 *Diaphorina citri* 若虫的优势寄生蜂亮腹釉小蜂 *Tamarixia radiata* 的寄生行为, 利用扫描电镜对亮腹釉小蜂雌雄成虫触角感受器的种类、分布和形态进行观察。结果表明, 亮腹釉小蜂雌成虫触角上存在 5 种感受器, 分别是刺形感受器、毛形感受器、乳头状感受器、板形感受器和末端指形感受器; 亮腹釉小蜂雄成虫触角上存在 4 种感受器, 分别为刺形感受器、毛形感受器、乳头状感受器和板形感受器; 其中毛形感受器又可以根据外部形态的差异划分为 4 个亚型, 即毛形感受器类型 1、2、3、4。此外, 板形感受器、毛形感受器类型 2 和毛形感受器类型 3 在亮腹釉小蜂雌成虫触角上的分布数量显著多于雄成虫触角上的分布数量。这些形态学差异有助于深入理解不同性别亮腹釉小蜂的触角感知行为。

关键词: 亮腹釉小蜂; 柑橘木虱; 触角; 感受器; 扫描电镜

Ultrastructure of the antennal sensilla of ectoparasitoid *Tamarixia radiata* adults

Liu Yanmei^{1,2} Zeng Haoyuan^{2,3} Wang Ziye^{1,2} Guo Shuhao^{1,2} Lu Zitong^{1,2}
Zhang Lihe^{2,3} Qiu Baoli^{1,2,3,4} Sang Wen^{1,2,3,4*}

(1. Key Laboratory of Bio-Pesticide Innovation and Application, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China; 2. Engineering Research Center of Biological Control, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China; 3. Guangdong Agricultural Pest Biocontrol Engineering Research Center, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China; 4. Department of Entomology, College of Plant Protection, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China)

Abstract: To further understand the parasitic behavior of the parasitoid *Tamarixia radiata* (Hymenoptera: Eulophidae), a dominant parasitic wasp of Asian citrus psyllid *Diaphorina citri* nymphs, the distribution and morphology of the antennal sensilla of *T. radiata* were observed with scanning electron microscopy. The results showed that there were five types of sensilla on the antennae of *T. radiata* female adults, including sensilla chaetica, sensilla trichodea, sensilla mammilliformia, sensilla plate and terminal finger-like sensilla. Moreover, there were four types of sensilla on the antennae of *T. radiata* male adults, including sensilla chaetica, sensilla trichodea, sensilla mammilliformia and sensilla plate. In addition, sensilla trichodea were further divided into four subtypes based on their differences in external shape, including sensilla trichodea type 1, 2, 3, 4. The numbers of sensilla plate, sensilla trichodea sub-

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0201500), 广东省现代农业产业技术体系创新团队建设专项(2019KJ108), 广州市科技计划项目(201807010019, 201804020070)

* 通信作者 (Author for correspondence), E-mail: sangwen@scau.edu.cn

收稿日期: 2020-06-23

types 2 and 3 were significantly higher on the antennae of *T. radiata* female adults than on those of male adults. These differences can provide a morphological basis for understanding the antennal perception by different genders of *T. radiata*.

Key words: *Tamarixia radiata*; *Diaphorina citri*; antennae; sensilla; scanning electron microscope

柑橘木虱 *Diaphorina citri* 属半翅目扁木虱科, 其寄主植物包含多种芸香科植物, 如柑橘、九里香、黄皮和橙等(何天富, 1999; 陈丽芬等, 2016; Chu et al., 2019)。柑橘木虱若虫和成虫可以直接刺吸寄主植物, 造成嫩梢、新叶、嫩芽黄化, 叶片枯萎、畸形(桑文等, 2018); 而且若虫在取食过程中分泌的白色蜜露附着于植物叶片表面, 会诱发植物产生煤烟病, 影响光合作用(谢佩华等, 1989)。此外, 柑橘木虱是传播柑橘黄龙病菌 *Candidatus Liberibacter asiaticus* 的主要自然传播媒介(王辉等, 2011; 陈梦瑶等, 2019)。柑橘木虱在刺吸携带黄龙病菌的寄主时, 病菌会随着植物汁液流经柑橘木虱消化道和血淋巴, 最终到达唾液腺并具有传病能力, 再经取食而快速传染至健康的柑橘植株上, 感病植株树势衰退, 寿命缩短, 果实品质下降且产量低, 从而造成巨大的经济损失(Bove, 2006; Bassanezi et al., 2009; 吴丰年, 2016)。因此, 做好柑橘木虱的有效防控是遏制柑橘黄龙病蔓延的重要手段(Hoddle & Pandey, 2014)。

生物防治具有环境友好和绿色持久的特点, 是目前柑橘木虱综合防治措施中最有应用前景的防治手段之一。亮腹釉小蜂 *Tamarixia radiata* 是柑橘木虱若虫的优势寄生蜂, 属膜翅目姬小蜂科, 可体外寄生柑橘木虱 3~5 龄若虫, 取食若虫的血淋巴(周雅婷, 2016)。1 头亮腹釉小蜂一生可以通过取食和寄生等行为杀死 500 头柑橘木虱若虫(Chu et al., 1991)。此外, Liu et al. (2019) 研究发现亮腹釉小蜂雌成虫在 Y 型管嗅觉选择试验中对柑橘木虱 3~5 龄若虫气味源表现出明显的选择偏好; 进一步对柑橘木虱 3~5 龄若虫进行两两组合的嗅觉选择试验, 发现试虫却没有对任一龄期表现出显著的选择偏好; 而在寄生选择试验中, 亮腹釉小蜂对柑橘木虱 5 龄若虫的寄生率显著高于 3 龄和 4 龄若虫。因此对于亮腹釉小蜂嗅觉选择行为和寄生选择行为间的差异, 目前仍有待进一步深入研究。

触角是昆虫重要的感觉器官, 其上分布有多种类型的感受器官, 可以感受外界环境的化学刺激、物理刺激, 从而影响昆虫的栖境选择、寄主定位、寄主识别、配对和产卵等多种行为(Chapman, 1982; Bland, 1989)。近年来, 开展对昆虫触角化学感受器的类

型、分布、功能和机制的鉴别和探索研究已成为昆虫化学生态领域的一个重要方向(娄永根和程家安, 2001)。目前, 对膜翅目姬小蜂科昆虫成虫触角的化学感受器已有一定研究, 包括刺桐姬小蜂 *Quadrastichus erythrinae*(张振飞等, 2007)、桉树枝瘿姬小蜂 *Leptocybe invasa*(黄蓬英等, 2010) 和稻纵卷叶螟姬小蜂 *Stenomomesius maculatus*(张云宣和任立云, 2018) 等, 但关于亮腹釉小蜂触角上化学感受器的研究较少。对亮腹釉小蜂成虫触角上的感受器进行观察, 探究其类型和功能对于理解该寄生蜂的行为具有重要意义。本研究利用扫描电镜对亮腹釉小蜂雌雄成虫触角上的感受器类型、分布和形态进行比较分析, 以期解析该寄生蜂的化学感受机制提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试昆虫: 亮腹釉小蜂采集于华南农业大学广东省生物农药创制与应用重点实验室天敌昆虫繁育中心的九里香植株, 剪取带有亮腹釉小蜂蛹的九里香枝条并放于直径为 12 cm 的培养皿中, 带回室内在温度为 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 $(70 \pm 5)\%$ 、光周期为 14 L:10 D 的条件下继续培育, 待其羽化后每天定时用吸虫管吸取所有羽化的寄生蜂并放置于 5 mL 扎孔离心管中。离心管中放置含有 20% 蜂蜜水的滤纸条供亮腹釉小蜂取食。

试剂和仪器: 本试验所用试剂均为国产分析纯。德国徕卡 AC600 喷金仪, 德国徕卡公司; EV0/MA15 扫描电子显微镜, 德国 Zeiss 公司; Bal-Tec CPD 03 临界点干燥仪, 瑞士 Bal-Tec 公司。

1.2 方法

选择触角完整的亮腹釉小蜂雌雄成虫各 10 头, 放在冰箱中冻晕后, 用刀片将其头部切下并放到 1.5 mL 离心管中, 加入 0.1 mol/L 磷酸缓冲液 1 mL, 超声清洗 30 s, 重复 3 次, 倒掉磷酸缓冲液, 加入 2.5% 戊二醛 1 mL, 避光固定过夜。倒掉戊二醛, 用 0.1 mol/L 磷酸缓冲液冲洗 4 次, 然后在 30%、50%、70%、80%、90%、100% 浓度的酒精中逐级脱水各 10 min。随后, 将触角放置在临界点干燥仪中干燥 2.5 h, 干燥完成后, 将触角放置在喷金仪的金属胶中

进行装台喷金后,在扫描电镜下观察并拍照。统计亮腹釉小蜂雌雄成虫触角的长度及各类型感受器的分布、数量、长度及宽度等,触角和感受器的长度及宽度通过拍摄的照片用Photoshop CS6 portable软件进行测量($n=3$)。感受器种类的鉴定参考Silva et al. (2016)和张云宣(2018)对感受器的形状特征描述和定义进行。

1.3 数据分析

利用SPSS 17.0软件对试验数据进行统计分析,采用独立样本 t 测验法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

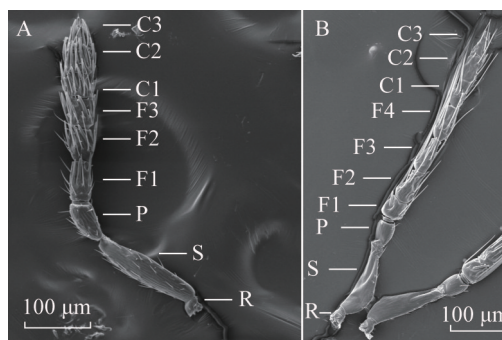
2.1 亮腹釉小蜂成虫触角的基本结构

扫描电镜观察发现,亮腹釉小蜂雌雄成虫的触角呈屈膝状,由基节、柄节、梗节和鞭节组成,雌成虫触角共9节(图1-A),雄成虫触角共10节(图1-B);其中基节的长度较短小;柄节较长,约占触角长度的20%~30%;梗节较短;鞭节包含索节和3个棒节,其中雄成虫的索节有4节,比雌成虫的索节多1节。

2.2 亮腹釉小蜂成虫触角各节长度和宽度

亮腹釉小蜂雄成虫触角的总长度、各棒节长度、

第2索节长度、第3索节长度和总索节长度均显著大于雌成虫,而雌成虫触角的梗节和第1索节长度显著大于雄成虫,雌雄成虫触角其他各节长度无显著差异;雌成虫触角的各棒节宽度要显著大于雄成虫,而雄成虫触角的第1索节宽度显著大于雌成虫(表1)。



R: 基节; S: 柄节; P: 梗节; F1~F4: 分别为第1、2、3、4索节; C1~C3: 分别为第1、2、3棒节。
R: Radicula; S: scape; P: pedicel; F1~F4: funicle 1, 2, 3, 4, respectively; C1~C3: clava 1, 2, 3, respectively.

图1 亮腹釉小蜂雌成虫(A)和雄成虫(B)触角的形态
Fig. 1 Morphology of antennae in female (A) and male (B) adults of *Tamarixia radiata*

表1 亮腹釉小蜂雌雄成虫触角各节的长度与宽度

Table 1 The lengths and widths of *Tamarixia radiata* antennal segments

μm

触角部位 Antennal segment	长度 Length		宽度 Width	
	雌成虫 Female adult	雄成虫 Male adult	雌成虫 Female adult	雄成虫 Male adult
基节 Radicular	24.21±3.94 a	29.95±2.43 a	22.82±4.67 a	28.58±0.83 a
柄节 Scape	160.66±5.72 a	155.68±1.83 a	35.68±6.74 a	41.97±6.66 a
梗节 Pedicel	63.16±2.11 a	55.07±1.36 b	37.19±1.86 a	38.08±0.44 a
第1索节 Funicle 1	61.50±2.08 a	48.58±1.28 b	34.68±0.69 b	47.25±2.84 a
第2索节 Funicle 2	50.11±2.48 b	70.18±0.78 a	41.19±2.25 a	46.99±3.60 a
第3索节 Funicle 3	42.30±4.75 b	78.37±0.85 a	45.12±1.64 a	42.86±3.69 a
第4索节 Funicle 4	—	76.90±3.08	—	33.06±10.26
总索节 Flagellum	153.91±8.47 b	274.04±4.80 a	—	—
第1棒节 Clava 1	39.22±2.22 b	60.03±1.86 a	53.75±3.05 a	38.85±1.18 b
第2棒节 Clava 2	33.60±1.09 b	54.47±2.19 a	53.81±1.65 a	36.28±0.09 b
第3棒节 Clava 3	57.44±4.15 b	79.33±1.03 a	41.21±2.59 a	29.16±2.71 b
总棒节 Clava	130.26±6.87 b	193.83±2.76 a	—	—
触角全长 Whole antennae	532.19±23.29 b	629.24±10.12 a	—	—

表中数据为平均数±标准误。同行不同字母表示经独立样本 t 测验法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。—表示无相关数据。
Data in table are mean±SE. Different letters in the same row indicate significant difference at $P<0.05$ level by t test; — indicates no relevant data.

2.3 亮腹釉小蜂触角感受器的种类、分布和形态

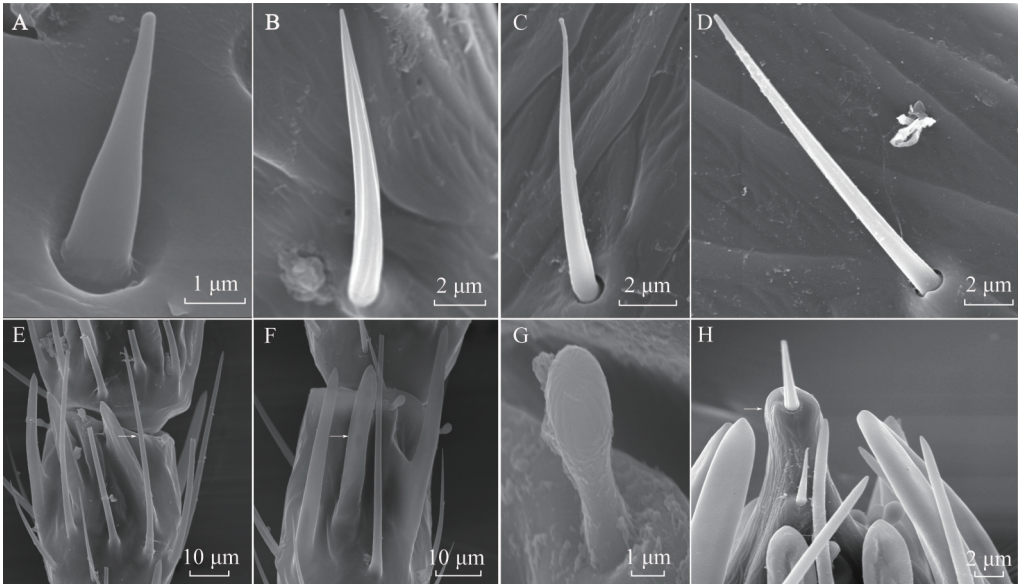
亮腹釉小蜂成虫触角上共存在5种感受器,分别为刺形感受器(图2-A、图3-A)、毛形感受器(图2-B~E、图3-B~E)、板形感受器(图2-F、图3-F)、乳头状感受器(图2-G、图3-G)和末端指形感受器(图2-

H)。其中毛形感受器有4种亚型,即毛形感受器类型1、2、3、4(图2-B~E、图3-B~E),末端指形感受器仅在雌成虫触角顶端观察到。

2.3.1 刺形感受器形态

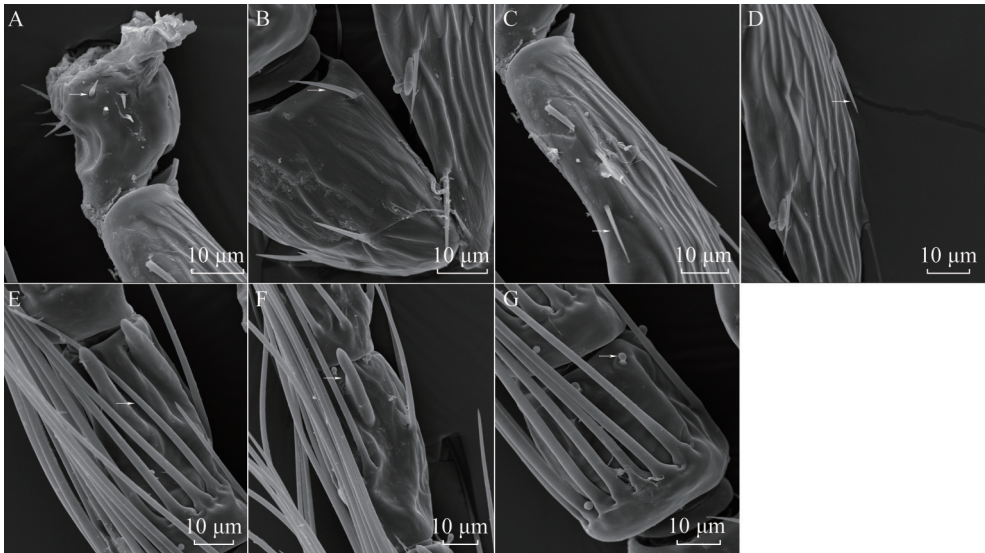
刺形感受器是亮腹釉小蜂成虫触角基节上分布

的唯一感受器,同时分布于基节和梗节。刺形感受器形似短发,笔直,略弯曲,末端锥状,表面光滑,基部着生于较深的凹窝内(图2-A、图3-A)。该类感受器在雌雄成虫触角上的分布数量无显著差异,分别为14.33个和16.67个(表2),其长度、基端宽度、中端宽度和末端宽度在雌雄成虫间均无显著差异(表3)。



A: 刺形感受器; B~E: 分别为毛形感受器类型1、2、3、4; F: 板形感受器; G: 乳头状感受器; H: 末端指形感受器。A: Sensilla chaetica; B~E: sensilla trichodea type 1, 2, 3, 4, respectively; F: sensilla plate; G: sensilla mammilliformia; H: terminal finger-like sensilla.

图2 亮腹釉小蜂雌成虫触角上的感受器类型
Fig. 2 Antennal sensilla types of *Tamarixia radiata* female adults



A: 刺形感受器; B~E: 分别为毛形感受器类型1、2、3、4; F: 板形感受器; G: 乳头状感受器。A: Sensilla chaetica; B~E: sensilla trichodea type 1, 2, 3, 4, respectively; F: sensilla plate; G: sensilla mammilliformia.

图3 亮腹釉小蜂雄成虫触角上的感受器类型
Fig. 3 Antennal sensilla types of *Tamarixia radiata* male adults

2.3.2 毛形感受器

毛形感受器是亮腹釉小蜂成虫触角上所有感受器类型中数量最多的一类感受器,除了未在触角基节上分布外,在触角其余各节均有分布,其中在鞭节

上分布最多。按照外在形状特征的差异可细分为4种类型,即毛形感受器类型1~4。
毛形感受器类型1具浅基窝,中部表面有纵纹,从基部到端部宽度逐渐减小,从基部到端部略弯曲

(图2-B、图3-B)。该类感受器分布于雌雄成虫触角的梗节和雌成虫触角的第1、2索节,该类感受器在雌雄成虫触角上的分布数量无显著差异,分别为32.67个和15.33个(表2),且其长度、基端宽度、中端宽度和末端宽度在雌雄成虫间均无显著差异(表3)。

毛形感受器类型2具较深基窝,表面有纵纹,从基部到端部宽度逐渐减小,从中部到端部逐渐呈弯曲状,末端弯曲明显并呈“帽子”结构(图2-C、图3-C)。该类感受器分布于雌雄成虫触角的柄节和梗节,以及雌成虫触角的第1、2索节。该类感受器在雌雄成虫触角上的分布数量分别为25.00个和7.33个,前者显著高于后者(表2),但其长度、基端宽度、中端宽度和末端宽度在雌雄成虫间均无显著差异(表3)。

毛形感受器类型3具较深基窝,基窝分布在表皮隆起处,表面末端具纵纹,中部弯曲如弧形,末端钝圆(图2-D、图3-D)。该类感受器分布于雌雄成虫触角的柄节和梗节,以及雌成虫触角的第1、2索节,雌成虫触角上该类感受器的数量(13.67个)显著多于雄成虫(4.67个)(表2);但其长度、基端宽度、中端宽度和末端宽度在雌雄成虫间均无显著差异(表3)。

毛形感受器类型4无基窝,基部膨大隆起,表面无纵纹但有孔,末端尖,长度显著较前3种毛形感受器长(图2-E、图3-E)。该类感受器分布于所有的索节和棒节;雄成虫触角上该类感受器的长度和基端宽度显著大于雌成虫触角上的,其他指标在雌雄成虫之间无显著差异(表2~3)。

2.3.3 板形感受器

板形感受器在亮腹釉小蜂成虫触角表皮上明显隆起,呈脊状,似香肠或刀片状,表面无纵纹但有孔,端部逐渐缩小如锥状,纵向分布于各索节和棒节,是触角所有感受器中最大、最突出的一类感受器(图2-F、图3-F)。该类感受器在雌成虫触角上的分布数量显著高于雄成虫触角上的(表2);雌成虫触角上该类感受器的末端宽度显著大于雄成虫触角上的,其他指标在雌雄成虫之间无显著差异(表3)。

2.3.4 乳头状感受器

乳头状感受器在亮腹釉小蜂成虫触角上总体呈棒棒糖状,着生于凹陷基窝内,端部宽度最大,呈圆球膨大状,中部最小,基部居于两者之间,端部表面分布有纵脊且凹凸不平(图2-G、图3-G)。该类感受器在触角上的各个索节和棒节均有分布,其在触角不同部位分布的感受器数量范围为1.67~7.33个,但其在雌雄成虫触角上分布的总体数量无显著差异(表2)。乳头状感受器在雌雄成虫触角上的长度和宽度均差异不显著(表3)。

2.3.5 末端指形感受器

末端指形感受器总体形似手指(图2-H),表面有不规则褶皱状纹路,顶端着生1根毛形感受器类型1,该类感受器数量最少,仅观察到1.00个(表2),只在雌成虫触角末端的中央凸起处发现,长度约为8.35 μm ,基端、中端、末端宽度分别约为5.03、3.21和3.29 μm (表3)。

表2 亮腹釉小蜂雌雄成虫触角上分布的感受器数量

Table 2 Numbers of antennal sensilla of female and male *Tamarixia radiata*

感受器类型 Sensilla type		雌成虫 Female	雄成虫 Male
毛形感受器 Sensilla trichodea	类型1 Type 1	32.67 $\pm$ 9.26 a	15.33 $\pm$ 1.76 a
	类型2 Type 2	25.00 $\pm$ 4.73 a	7.33 $\pm$ 1.76 b
	类型3 Type 3	13.67 $\pm$ 0.63 a	4.67 $\pm$ 0.67 b
	类型4 Type 4	60.67 $\pm$ 5.81 a	82.67 $\pm$ 9.82 a
	类型1+类型2+类型3+类型4 Type 1+Type 2+Type 3+Type 4	132.00 $\pm$ 16.50 a	110.00 $\pm$ 11.01 a
刺形感受器 Sensilla chaetica		14.33 $\pm$ 3.18 a	16.67 $\pm$ 1.76 a
板形感受器 Sensilla plate		47.33 $\pm$ 5.21 a	20.33 $\pm$ 1.76 b
乳头状感受器 Sensilla mammilliformia		28.00 $\pm$ 1.15 a	22.33 $\pm$ 3.53 a
末端指形感受器 Terminal finger-like sensilla		1.00 $\pm$ 0.00	—

表中数据为平均数 $\pm$ 标准误。同行不同字母表示经独立样本 *t* 测验法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著;—表示无相关数据。Data in table are mean $\pm$ SE. Different letters in the same row indicate significant difference at $P<0.05$ level by *t* test; — indicates no relevant data.

3 讨论

昆虫触角感受器在嗅觉功能(寄主定位和信息

素探测)方面发挥着重要作用,部分感受器还可以作为温、湿度的感应受体,也可以对机械刺激做出反应(Zhang et al., 2015)。对感受器类型的研究有助于

了解昆虫的行为。Onagbola et al.(2009)对亮腹釉小蜂的触角感受器进行研究,发现其触角上共分布有5种感受器类型。而本研究对亮腹釉小蜂雌雄成虫的触角进行扫描观察发现了一种未被 Onagbola et al.(2009)报道的感受器,即末端指形感受器。末

端指形感受器分布于多个姬小蜂科物种中,如蛹突额姬小蜂 *Trichospilus pupivorus* (Silva et al., 2016), 此感受器可能能够接收来自寄主昆虫的刺激(Zhou et al., 2011; 2013),但其具体作用仍有待进一步研究验证。

表3 亮腹釉小蜂雌雄成虫触角上各感受器的长度和宽度

Table 3 The lengths and widths of sensilla of female and male *Tamarixia radiata*

μm

感受器类型 Sensilla type		长度 Length		基端宽度 Proximal width		中端宽度 Middle width		末端宽度 Distal width	
		雌成虫 Female	雄成虫 Male	雌成虫 Female	雄成虫 Male	雌成虫 Female	雄成虫 Male	雌成虫 Female	雄成虫 Male
毛形感受器 Sensilla trichodea	类型1	10.88±	13.34±	0.67±	1.27±	0.54±	0.95±	0.06±	0.10±
	Type 1	6.95 a	0.71 a	0.3 9 a	0.11 a	0.28 a	0.12 a	0.03 a	0.01 a
	类型2	16.95±	13.70±	1.16±	1.10±	0.89±	0.83±	0.22±	0.26±
	Type 2	3.15 a	1.28 a	0.17 a	0.05 a	0.03 a	0.11 a	0.02 a	0.07 a
	类型3	14.80±	18.15±	1.25±	1.11±	0.94±	0.71±	0.25±	0.21±
	Type 3	2.17 a	1.52 a	0.22 a	0.01 a	0.20 a	0.08 a	0.04 a	0.01 a
	类型4	61.51±	307.02±	2.77±	5.92±	1.30±	1.55±	0.34±	0.32±
	Type 4	1.32 b	23.54 a	0.17 b	0.06 a	0.08 a	0.01 a	0.04 a	0.03 a
刺形感受器		6.49±	4.55±	1.02±	1.19±	0.47±	0.61±	0.15±	0.20±
Sensilla chaetica		0.63 a	0.88 a	0.10 a	0.10 a	0.03 a	0.07 a	0.00 a	0.01 a
板形感受器		37.23±	33.95±	4.96±	3.58±	4.67±	3.78±	0.45±	0.32±
Sensilla plate		2.41 a	1.04 a	0.34 a	0.82 a	0.20 a	0.55 a	0.01 a	0.04 b
乳头状感受器		3.85±	3.97±	1.56±	1.37±	1.14±	0.91±	2.03±	1.71±
Sensilla mammilliformia		0.48 a	0.30 a	0.11 a	0.21 a	0.07 a	0.09 a	0.11 a	0.19 a
末端指形感受器		8.35±	—	5.03±	—	3.21±	—	3.29±	—
Terminal finger-like sensilla		1.15	—	0.55	—	0.17	—	0.42	—

表中数据为平均数±标准误。同行不同字母表示经独立样本 *t* 测验法检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著; —表示无相关数据。

Data in table are mean±SE. Different letters in the same row indicate significant difference at $P < 0.05$ level by *t* test; — indicates no relevant data.

毛形感受器类型1可能是机械感受器(Olson & Andow, 1993; Pettersson et al., 2001; Onagbola & Fadamiro, 2008),发挥着机械接收作用(Ochieng et al., 2000)。机械感受器可以捕捉寄主在取食时产生的声音或震动(Shade et al., 1990)。毛形感受器类型2的末端呈“帽子”钝状,钝状毛形感受器发挥着化学感受器的作用(Bleeker et al., 2004; Pitts & Zwiebe, 2006)。毛形感受器类型3曾在澳洲赤眼蜂 *Trichogramma australicum* 上被命名为毛形感受器类型4(Amornsak et al., 1998),具有化学感受的功能,且其可能在配对过程中具有捕获线索的能力(Zhou et al., 2013)。此外,本研究结果显示,毛形感受器类型2和类型3在亮腹釉小蜂雌成虫触角上的分布数量较雄成虫触角上的分布数量多,暗示雌雄成虫的行为差异可能与其接收化学刺激的能力有关。毛形感受器类型4在亮腹釉小蜂雄成虫触角上的分布数量较雌成虫触角多,且雄成虫触角上该类感受器的长度和基端宽度显著大于雌成虫上的,表

明毛形感受器类型4在雄成虫触角上分布的面积较雌成虫的大,而较大的面积可能有着更强的收集或捕获挥发物的能力(Onagbola & Fadamiro, 2008),表明亮腹釉小蜂雄成虫触角上该类感受器可能用于检测由雌性寄生蜂释放的性信息素(Onagbola et al., 2009)。综上所述,毛形感受器类型4可能发挥着嗅觉作用(Onagbola et al., 2009)。

乳头状感受器在丝角羽角姬小蜂 *Sympiesis sericeicornis* 中又被称为钉状感受器或腔锥形感受器(Meyhöfer et al., 1997),此感受器可能发挥着温度感受器或湿度感受器的作用(Onagbola & Fadamiro, 2008)。本研究中毛形感受器类型1和乳头状感受器在亮腹釉小蜂雌雄成虫触角上的分布数量无显著差异,暗示其可能与亮腹釉小蜂不同性别间的行为差异无关。刺形感受器分布在亮腹釉小蜂触角的基节和梗节,其在雌雄成虫触角上的分布数量差异不大,暗示其可能与不同性别亮腹釉小蜂的行为差别无关(Onagbola et al., 2009)。而根据刺形感

受器在触角的分布位置推测其可能发挥着机械感觉作用(Ochieng et al., 2000),同时因其凹陷插入触角的表皮,亦可能发挥着自传感器的作用(Zhou et al., 2011; Ahmed et al., 2013)。板形感受器分布于多种膜翅目昆虫物种中,为嗅觉感受器官,如 Galvani et al. (2012) 研究报道黄带毛胸蜜蜂 *Ptilothrix relata* 触角上的板形感受器可能用于检测植物挥发物; Roux et al. (2005) 发现菜蛾绒茧蜂 *Cotesia plutellae* 触角上的板形感受器也是发挥嗅觉功能。本研究结果表明,板形感受器在雌成虫触角上的分布数量较雄成虫多,这可能与寄主定位或交配有关(Zhou et al., 2013)。雌成虫触角棒节上分布的板形感受器数量较雄成虫棒节上的多,可能与其捕捉寄主释放的重要挥发物的嗅觉功能有关,触角顶端分布有高密度的该类感受器,可以加快亮腹釉小蜂捕获外部刺激(Barlin & Vinson, 1981; Gao et al., 2007; Onagbola & Fadamiro, 2008)。

膜翅目寄生蜂触角感受器具有明显的性二型现象。在本研究中,亮腹釉小蜂亦表现出了性二型现象,具体表现为:1)雄成虫触角的总长度、各棒节长度、第2索节长度、第3索节长度和总索节长度均显著大于雌成虫;2)雌成虫触角的梗节和第1索节长度显著大于雄成虫;3)雌成虫触角的各棒节宽度要显著大于雄成虫;4)雄成虫的第1索节宽度显著大于雌成虫;5)雌成虫触角上有5种感受器类型,而雄成虫触角上有4种;6)雌成虫触角上毛形感受器类型3的数量显著多于雄成虫;7)雄成虫触角上毛形感受器类型4的长度和基端宽度显著大于雌成虫。这些性二型现象对于理解不同性别亮腹釉小蜂通过触角感知行为调节提供了基础依据(Silva et al., 2016)。

参 考 文 献 (References)

- Ahmed T, Zhang TT, Wang ZY, He KL, Bai SX. 2013. Morphology and ultrastructure of antennal sensilla of *Macrocentrus cingulum* Brischke (Hymenoptera: Braconidae) and their probable functions. *Micron*, 50: 35–43
- Amornsak W, Cribb B, Gordh G. 1998. External morphology of antennal sensilla of *Trichogramma australicum* Girault (Hymenoptera: Trichogrammatidae). *International Journal of Insect Morphology and Embryology*, 27(2): 67–82
- Barlin MR, Vinson SB. 1981. Multiporous plate sensilla in antennae of the Chalcidoidea (Hymenoptera). *International Journal of Insect Morphology and Embryology*, 10(1): 29–42
- Bassanezi RB, Montesino LH, Stuchi ES. 2009. Effects of huanglongbing on fruit quality of sweet orange cultivars in Brazil. *European Journal of Plant Pathology*, 125(4): 565–572
- Bland RG. 1989. Antennal sensilla of Acrididae (Orthoptera) in relation to subfamily and food preference. *Annals of the Entomological Society of America*, 82(3): 368–384
- Bleeker MAK, Smid HM, van Aelst AC, van Loon JJA, Vet LEM. 2004. Antennal sensilla of two parasitoid wasps: a comparative scanning electron microscopy study. *Microscopy Research and Technique*, 63(5): 266–273
- Bove JM. 2006. Huanglongbing: a destructive, newly-emerging, century-old disease of citrus. *Journal of Plant Pathology*, 88(1): 7–37
- Chapman RF. 1982. Chemoreception: the significance of receptor numbers. *Advance in Insect Physiology*, 16: 247–356
- Chen LF, Xu ZH, Wang JG. 2016. Research progress on *Diaphorina citri*. *Guizhou Agricultural Sciences*, 44(6): 42–47 (in Chinese) [陈丽芬, 徐昭焕, 王建国. 2016. 柑橘木虱的研究进展. *贵州农业科学*, 44(6): 42–47]
- Chen MY, Cao ZH, He K, Mei Y, Wei SF, Xiao HM. 2019. Differential expression analysis and validation of lncRNA between Asian citrus psyllid and *Candidatus Liberibacter asiaticus* interaction. *Journal of Plant Protection*, 46(6): 1252–1261 (in Chinese) [陈梦瑶, 曹征鸿, 贺康, 梅洋, 魏圣飞, 肖花美. 2019. lncRNA在柑橘木虱与黄龙病病原菌互作中的差异表达分析及验证. *植物保护学报*, 46(6): 1252–1261]
- Chu CC, Hoffmann M, Braswell WE, Pelz-Stelinski KS. 2019. Genetic variation and potential coinfection of *Wolbachia* among widespread Asian citrus psyllid (*Diaphorina citri* Kuwayama) populations. *Insect Science*, 26(4): 671–682
- Chu YI, Chien CC, Kiritani K, Su HJ, Chu YI. 1991. Utilization of natural enemies to control psyllid vectors transmitting citrus greening. // Integrated control of plant virus diseases. Taichung, Taiwan, China: Proceeding of the International Workshop TARI, pp. 135–145
- Galvani GL, González A, Roig-Alsina AH, Settembrini BP. 2012. Distribution and morphometric studies of flagellar sensilla in Emphorini bees (Hymenoptera, Apoidea). *Micron*, 43(5): 673–687
- Gao Y, Luo LZ, Hammond A. 2007. Antennal morphology, structure and sensilla distribution in *Microplitis pallidipes* (Hymenoptera: Braconidae). *Micron*, 38(6): 684–693
- He TF. 1999. Citrus. Beijing: China Agriculture Press (in Chinese) [何天富. 1999. 柑橘学. 北京: 中国农业出版社]
- Hoddle MS, Pandey R. 2014. Host range testing of *Tamarixia radiata* (Hymenoptera: Eulophidae) sourced from the Punjab of Pakistan for classical biological control of *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae: Euphyllurinae: Diaphorinini) in California. *Journal of Economic Entomology*, 107(1): 125–136
- Huang PY, Xu M, Lin LL, Liao FR, Wu Y. 2010. Ultrastructure of sensilla of *Leptocybe invasa*. *Chinese Bulletin of Entomology*, 47(4): 752–758 (in Chinese) [黄蓬英, 徐梅, 林玲玲, 廖富荣, 吴媛. 2010. 桉树枝瘿姬小蜂成虫感器超微结构. *昆虫知识*, 47(4): 752–758]
- Liu YM, Guo SH, Wang FF, Zhang LH, Guo CF, Cuthbertson AGS,

- Qiu BL, Sang W. 2019. *Tamarixia radiata* behaviour is influenced by volatiles from both plants and *Diaphorina citri* nymphs. *Insects*, 10(5): 141
- Lou YG, Cheng JA. 2001. Chemical sensory mechanisms of insects. *Chinese Journal of Ecology*, 20(2): 66–69 (in Chinese) [娄永根, 程家安. 2001. 昆虫的化学感觉机理. *生态学杂志*, 20(2): 66–69]
- Meyhöfer R, Casas J, Dorn S. 1997. Mechano- and chemoreceptors and their possible role in host location behavior of *Sympiesis sericeicornis* (Hymenoptera: Eulophidae). *Annals of the Entomological Society of America*, 90(2): 208–219
- Ochieng SA, Park KC, Zhu JW, Baker TC. 2000. Functional morphology of antennal chemoreceptors of the parasitoid *Microplitis croceipes* (Hymenoptera: Braconidae). *Arthropod Structure & Development*, 29(3): 231–240
- Olson DM, Andow DA. 1993. Antennal sensilla of female *Trichogramma nubilale* (Ertle and Davis) (Hymenoptera: Trichogrammatidae) and comparisons with other parasitic Hymenoptera. *International Journal of Insect Morphology and Embryology*, 22(5): 507–520
- Onagbola EO, Boina DR, Hermann SL, Stelinski LL. 2009. Antennal sensilla of *Tamarixia radiata* (Hymenoptera: Eulophidae), a parasitoid of *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae). *Annals of the Entomological Society of America*, 102(3): 523–531
- Onagbola EO, Fadamiro HY. 2008. Scanning electron microscopy studies of antennal sensilla of *Pteromalus cerealellae* (Hymenoptera: Pteromalidae). *Micron*, 39(5): 526–535
- Pettersson EM, Hallberg E, Birgersson G. 2001. Evidence for the importance of odour-perception in the parasitoid *Rhopalicus tutelae* (Walker) (Hym., Pteromalidae). *Journal of Applied Entomology*, 125(6): 293–301
- Pitts RJ, Zwiebel LJ. 2006. Antennal sensilla of two female anopheline sibling species with differing host ranges. *Malaria Journal*, 5: 26
- Roux O, van Baaren J, Gers C, Arvanitakis L, Legal L. 2005. Antennal structure and oviposition behavior of the *Plutella xylostella* specialist parasitoid: *Cotesia plutellae*. *Microscopy Research and Technique*, 68(1): 36–44
- Sang W, Liu YM, Qiu BL. 2018. Advances in the eco-friendly management of *Diaphorina citri*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(4): 557–564 (in Chinese) [桑文, 刘燕梅, 邱宝利. 2018. 柑橘木虱绿色防控技术研究进展. *应用昆虫学报*, 55(4): 557–564]
- Shade RE, Furgason ES, Murdock LL. 1990. Detection of hidden insect infestations by feeding-generated ultrasonic signals. *American Entomologist*, 36(3): 231–235
- Silva IMD, Pereira KDS, Spranghars T, Zanuncio JC, Serrão JE. 2016. Antennal sensilla and sexual dimorphism of the parasitoid *Trichospilus pupivorus* (Hymenoptera: Eulophidae). *Microscopy and Microanalysis*, 22(4): 913–921
- Wang H, Ding F, Zhong Y, Jiang B, Yi GJ, Wang GP. 2011. The selectivity of *Diaphorina citri* to *Carmona microphylla* and Rutaceae hosts, and its tolerance to starvation and thirstiness. *Journal of Plant Protection*, 38(3): 283–284 (in Chinese) [王辉, 丁芳, 钟云, 姜波, 易干军, 王国平. 2011. 柑橘木虱对福建茶和芸香科植物的选择性及其耐饥渴能力. *植物保护学报*, 38(3): 283–284]
- Wu FN. 2016. Analyses of endo-prokaryotic and mitochondrial genomes of two “*Candidatus Liberibacter* spp.” psyllid vectors. Ph. D thesis. Guangzhou: South China Agricultural University (in Chinese) [吴丰年. 2016. 两种韧皮部杆菌媒介木虱内生原核生物和线粒体基因组研究. 博士学位论文. 广州: 华南农业大学]
- Xie PH, Su CA, Lin ZG. 1989. Studies on the biology of the citrus psylla, *Diaphorina citri* Kuwayama (Homoptera: Psyllidae). *Journal of Zhejiang Agricultural University*, 15(2): 198–202 (in Chinese) [谢佩华, 苏朝安, 林自国. 1989. 柑桔木虱生物学研究. *浙江农业大学学报*, 15(2): 198–202]
- Zhang L, Feng YQ, Ren LL, Luo YQ, Wang F, Zong SX. 2015. Sensilla on antenna, ovipositor and leg of *Eriborus applicitus* (Hymenoptera: Ichneumonidae), a parasitoid wasp of *Holcocerus insularis* Staudinger (Lepidoptera: Cossidae). *Acta Zoologica*, 96(2): 253–263
- Zhang YX. 2018. A preliminary study on volatile substance-mediated *Stenomesius maculatus* Liao searching and positioning host behavioral mechanism. Master thesis. Nanning: Guangxi University (in Chinese) [张云宣. 2018. 挥发性物质介导的稻纵卷叶螟姬小蜂搜寻与定位寄主行为机制初步研究. 硕士学位论文. 南宁: 广西大学]
- Zhang YX, Ren LY. 2018. Observation on antennal sensilla of *Stenomesius maculatus* with scanning electron microscope. *Guangxi Plant Protection*, 31(3): 1–7 (in Chinese) [张云宣, 任立云. 2018. 稻纵卷叶螟姬小蜂触角传感器的扫描电镜观察. *广西植保*, 31(3): 1–7]
- Zhang ZF, Liang QC, Wu WJ, Huang J. 2007. Ultrastructural studies on sensilla of *Quadrastichus erythrinae* Kim (Hymenoptera: Eulophidae) adult. *Journal of South China Agricultural University*, 28(2): 52–55 (in Chinese) [张振飞, 梁琼超, 吴伟坚, 黄箭. 2007. 刺桐姬小蜂成虫感器超微结构的研究. *华南农业大学学报*, 28(2): 52–55]
- Zhou H, Wu WJ, Zhang FP, Fu YG. 2013. Scanning electron microscopy studies of the antennal sensilla of *Metaphycus parasaissetiae* Zhang & Huang (Hymenoptera: Encyrtidae). *Neotropical Entomology*, 42(3): 278–287
- Zhou H, Wu WJ, Zhang ZF, Zhang Y. 2011. Antennal sensilla of *Apanteles cypris* Nixon (Hymenoptera: Braconidae), a larval endoparasitoid of *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée (Lepidoptera: Pyralidae). *Microscopy Research and Technique*, 74(12): 1199–1208
- Zhou YT. 2016. Biological characteristics of *Tamarixia radiata* parasitoid of the citrus psyllid. Master thesis. Guangzhou: South China Agricultural University (in Chinese) [周雅婷. 2016. 柑橘木虱寄生天敌亮腹釉小蜂的生物学基础研究. 硕士学位论文. 广州: 华南农业大学]

(责任编辑:李美娟)