

DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).202007042

草地贪夜蛾寄生蜂甲腹茧蜂雄成虫触角及 胸足化学感器的超微结构特征*

王文倩^{1#}, 葛文超^{1#}, 杜广祖¹, 和淑琪¹, 桂富荣^{1,2}, 陈 斌^{1**}

(1. 云南农业大学 植物保护学院, 云南生物资源保护与利用国家重点实验室, 云南 昆明 650201;

2. 云南省高原特色农业产业研究院, 云南 昆明 650201)

摘要:【目的】明确寄生草地贪夜蛾(*Spodoptera frugiperda*)的甲腹茧蜂(*Chelonus* sp.)雄成虫触角和胸足感器的种类、形态和分布。【方法】利用扫描电镜技术系统观察寄生草地贪夜蛾的甲腹茧蜂雄成虫触角和胸足(前、中、后足)感器的超微结构。【结果】甲腹茧蜂雄成虫触角和胸足共分布有5种感器,分别为毛形感器(3种亚型I~III)、板形感器、刺形感器、锥形感器(4种亚型I~IV)和钟形感器。寄生草地贪夜蛾的甲腹茧蜂雄成虫触角和胸足上均有毛形感器和锥形感器分布,毛形感器数量最多且分布最广,板形感器仅分布于触角鞭节,钟形感器仅分布于中足腿节。【结论】寄生草地贪夜蛾的甲腹茧蜂雄成虫触角和胸足感器类型丰富,但不同类型感器的分布部位不同,可为探讨草地贪夜蛾寄生蜂的行为机制提供理论依据。

关键词: 草地贪夜蛾寄生蜂; 甲腹茧蜂; 触角; 胸足; 感器

中图分类号: S 476.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X(2021)06-0949-07

Ultrastructure of Sensilla on Antenna and Thoracic Leg on the Male Adult of *Chelonus* sp. of *Spodoptera frugiperda*

WANG Wenqian¹, GE Wenchao¹, DU Guangzu¹, HE Shuqi¹, GUI Furong^{1,2}, CHEN Bin¹

(1. College of Plant Protection, Yunnan Agricultural University, State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Bio-Resources in Yunnan, Kunming 650201, China;

2. Yunnan Plateau Characteristic Agriculture Industry Research Institute, Kunming 650201, China)

Abstract: [Purpose] To observe the types, morphology and distribution of sensilla on antenna and thoracic leg on male adult of parasitoid of *Chelonus* sp. of *Spodoptera frugiperda*. [Methods] The ultrastructure of sensilla on antenna and thoracic leg (propodeum, mesopodium and metapodium) was observed with scanning electron microscopy. [Results] Five kinds of sensilla on male adult of parasitoid of *Chelonus* sp. of *S. frugiperda*, including sensilla trichodea (three subtype I-III), sensilla placodea, sensilla chaetica, sensilla basiconica (four subtype I-IV) and sensillum campaniform were observed. Sensilla trichode and sensilla basiconica were observed both antenna and thoracic leg. Most of sensilla trichodea were most widely distributed on parasitoid of *Chelonus* sp. of *S. frugiperda*.

收稿日期: 2020-07-16

修回日期: 2021-06-21

网络首发时间: 2021-11-20 09:43:31

*基金项目: 中国烟草总公司科技重大专项(110201901038[LS-01]); 国家重点研发计划项目(2019YFD0300105, 2018YFD0200703); 国家自然科学基金项目(31660537, 31760519)。

作者简介: #对本文贡献等同, 为并列第一作者。王文倩(1995—), 女, 甘肃庆阳人, 在读博士研究生, 主要从事昆虫生理生化研究。E-mail: wqwangts@163.com; 葛文超(1995—), 男, 河南焦作人, 在读博士研究生, 主要从事入侵害虫绿色防控研究。E-mail: 1130467864@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 陈斌(1970—), 男, 甘肃礼县人, 博士, 教授, 主要从事害虫综合防治研究。E-mail: chbins@163.com

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20211118.1729.005.html>



Sensilla placodea was only found on flagellum of antenna. Sensillum campaniform was only found on femur of mesopodium. [Conclusion] There are various sensilla types of antennae and thoracic leg on male adult of *Chelonus* sp., but the distribution of different sensillaries is different, which provides a theoretical basis for the study of the behavior mechanism of the parasitoid wasp of *S. frugiperda*.

Keywords: parasitoid of *Spodoptera frugiperda*; *Chelonus* sp.; antenna; thoracic leg; sensilla

草地贪夜蛾 (*Spodoptera frugiperda*) 隶属于鳞翅目 (Lepidoptera) 夜蛾科 (Noctuidae) 灰翅夜蛾属 (*Spodoptera*), 也称秋黏虫、草地夜蛾, 原产于美洲热带和亚热带地区, 是广泛分布在美洲大陆的多食性迁飞性农业害虫^[1]。草地贪夜蛾自 2019 年 1 月在云南为害冬玉米以来, 在中国西南地区定殖、繁衍并不断蔓延^[2-3], 截至 2019 年 10 月, 中国共有 26 个省发生草地贪夜蛾为害, 整体见虫面积超过 100 万 hm^2 ^[4-5]。根据不同地区气象数据推测: 草地贪夜蛾在中国的理论年平均发生世代数在 0~7.41 代之间^[6], 对中国玉米生产造成极大威胁。目前, 对草地贪夜蛾常用的防控方法主要包括农业防治、生物防治和化学防治等, 国内外对草地贪夜蛾的生物防治技术研究较多, 大部分集中在寄生性天敌方面^[7]。其中, 可寄生草地贪夜蛾的寄生蜂有 10 科 121 种, 其中茧蜂科 (Braconidae) 有 39 种^[8]。

寄生蜂是种类最为丰富的膜翅目昆虫类群之一, 在害虫的生物防治和自然调控方面起着非常关键的作用^[9]。寄生蜂与农林害虫间存在着寄生与被寄生的关系, 且涉及到种间的防御和适应^[10]。在相互适应的过程中, 分布于寄生蜂表面的多种传感器在其寄主定位、觅食、寻偶、交配、产卵、繁殖、迁飞和避敌等行为过程中发挥着重要作用^[11-13], 而且不同部位的传感器在种类及功能方面均有差异。目前, 国内外对寄生蜂传感器的研究已有很多, 如在小菜蛾绒茧蜂 (*Cotesia plutellae*)、中红侧沟茧蜂 (*Microplitis mediator*)、烟蚜茧蜂 (*Aphidius gifuensis*)、斜纹夜蛾侧沟茧蜂 (*Microplitis prodeniae*) 和二化螟盘绒茧蜂 (*Cotesia chilonis*) 等寄生蜂触角上常见的传感器类型有毛形、板形、刺形、钟形、锥形、腔锥形和 Böhm 氏鬃毛, 胸足上常见的传感器类型有毛形、刺形、Böhm 氏鬃毛和膜状中垫等; 烟蚜茧蜂的复眼上还有一种锥形感器, 口器上有毛形传感器和

刺形感器^[14-19]。不同寄生蜂种类雌雄蜂的触角感器差异不同, 如二化螟盘绒茧蜂的雌雄蜂触角感器差异不明显^[19], 而斜纹夜蛾侧沟茧蜂雌雄蜂触角感器差异明显, 钟形感器仅出现在雄蜂鞭节^[18]。据报道, 甲腹茧蜂属昆虫的幼虫头部具有 2 种感器 (S1 和 S2), 推测其可能用于定位寄主, 找出寄主的背侧开口是否存在或是否需要钻孔^[20]。

甲腹茧蜂 (*Chelonus* sp.) 是在云南省昆明市 (嵩明县)、玉溪市和曲靖市 (陆良县) 等地的玉米田中发现的寄生草地贪夜蛾的一种寄生蜂。据报道, 该属寄生蜂是一类很重要的鳞翅目昆虫幼虫内寄生性天敌昆虫, 对卷蛾科 (Tortricidae)、小卷蛾科 (Olethreutidae)、夜蛾科 (Noctuidae) 和螟蛾科 (Pyralidae) 昆虫具有重要的自然控制和调节作用^[21-22]。李芬等^[23]研究发现螟甲腹茧蜂 (*Chelonus munakatae*) 可寄生草地贪夜蛾幼虫。目前对草地贪夜蛾寄生蜂甲腹茧蜂 (*Chelonus* sp.) 触角和胸足的传感器研究还未见报道。本研究采用扫描电镜观察草地贪夜蛾寄生蜂甲腹茧蜂雄成虫的触角及胸足上的感器类型及其特征, 以期为进一步揭示该寄生蜂的寄生机制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

甲腹茧蜂 (*Chelonus* sp.) 于 2019 年 3 月采自云南省曲靖市陆良县玉米田内, 在人工气候箱 (RG-300 型, 广州康恒仪器有限公司) 中用草地贪夜蛾为寄主饲养, 人工气候箱环境条件为: 温度 $(25\pm 1)^{\circ}\text{C}$, 湿度 $(75\pm 5)\%$, $L:D=16:8$ 。待草地贪夜蛾寄生蜂甲腹茧蜂羽化后, 选择 24 h 内羽化触角完整的健壮、活跃雄成虫进行电镜扫描观察。

1.2 方法

1.2.1 样品的制备与观察

取新羽化的草地贪夜蛾寄生蜂甲腹茧蜂雄成虫 3 头, 在解剖镜下用镊子和手术刀将触角与头

部分开,并剪下其前、中、后足跗节;再将取下的触角及各单跗节浸入 0.1 mol/L、pH 7.2 的磷酸缓冲液中,用超声波清洗器(KS-5200DE 型,昆山洁丽美超声仪器有限公司)清洗 3 次,每次 5 s,除去表面粘附的杂质。用 4% 戊二醛固定 24 h 后,依次用 80%、90%、95% 和 100% 的乙醇溶液梯度脱水,取出后在室内自然干燥;将干燥好的样品分别按不同观察角度用导电胶粘于样品台上,在离子溅射仪(E-1010 型,日本东京 HITACHI 公司)内对样品进行喷金。每个样品喷金 15 s,然后用扫描电子显微镜(FlexSEM-1000 型,日本东京 HITACHI 公司)在不同放大倍数下观察并拍照,电镜工作电压为 12 kV。

1.2.2 传感器的鉴定与命名

传感器的形态学术语主要参照 SCHNEIDER^[24]、CHINTA 等^[25]和 KEIL^[26];感受器的超微结构命名参照 NAVASERO 等^[27]和 OCHIENG 等^[28]。在扫描电镜图片上使用 Image J 软件测量触角及传感器的长度和直径,使用 Adobe Photoshop CS4 软件标注图像中的传感器名称。

2 结果与分析

2.1 草地贪夜蛾寄生蜂甲腹茧蜂触角形态及感器种类

2.1.1 触角形态

草地贪夜蛾寄生蜂甲腹茧蜂的触角为丝状,主要分为 3 节,从基部到端部依次为柄节、梗节和鞭节。梗节较短,柄节长度约为梗节的 5 倍;鞭节较长,由多个鞭小节组成(图 1a)。在扫描电镜下从触角上共观察到 3 种感器,分别为毛形感器(sensilla trichodea, ST)、锥形感器(sensilla basiconica, SB)和板形感器(sensilla placodea, SP),其中毛形感器和锥形感器均有 3 种亚型(I~III)。

2.1.2 感器类型

毛形感器(ST)在草地贪夜蛾寄生蜂甲腹茧蜂的整个触角表面均有分布,也是数量最多的感器。呈毛形,直立或弯曲,与触角表面夹角为 20°~70°,表皮光滑或具纵纹,端部尖细或较尖,基窝微陷或突出。根据长度、弯曲程度和是否具有纵纹等分为 3 种亚型,分别为 ST I、ST II 和 ST III。ST I 顶端尖细,朝向触角端部,略微向外弯曲,基窝突出,表面光滑,长 6.7~18.3 μm,

基部直径 1.1~1.7 μm(图 1b);ST II 着生于触角鞭节表面的纵向凹槽内,顶端略微弯曲,基窝内陷,表面具纵纹,长 3.7~16 μm,较 ST I 短,基部直径 1.3~1.6 μm(图 1c);ST III 端部不弯曲,从基部到端部渐细,着生于触角的柄节表面,基窝微突,表面光滑,长 6.8~44 μm,基部直径 1.3~3.5 μm,数量最多(图 1d)。

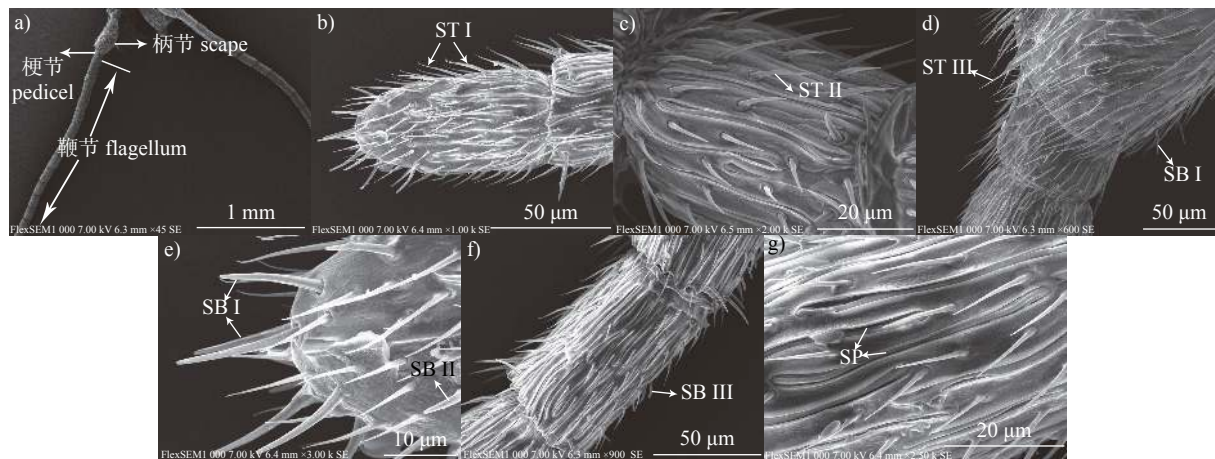
锥形感器(SB)主要分布于草地贪夜蛾寄生蜂甲腹茧蜂触角的鞭节,在每个鞭小节的侧面和背面均有分布,鞭节末端最多,但总体数量少于毛形感器。直立或弯曲,与触角表面夹角成 40°~90°,高于其他感器,基窝内陷或微突,端部钝圆,表面光滑或具纵纹。根据长度、基窝形态和表面是否具有纵纹等分为 3 种亚型,分别为 SB I、SB II 和 SB III。SB I 顶端较细,朝向触角端部,基窝内陷较深,具纵纹,长 9.7~17.6 μm,基部直径 1.7~2.4 μm,分布于触角侧面及鞭节端部(图 1d、1e);SB II 表面光滑,基窝微突,长 6.5~17.2 μm,微短于 SB I,基部直径 1.3~4.6 μm,较 SB I 粗,分布于触角鞭节背面(图 1e);SB III 分布于触角鞭节侧面,端部略粗于 SB I 和 SB II,表面光滑,长 7.2~7.6 μm,长度介于 SB I 和 SB II 之间,基部直径 1.6~1.8 μm(图 1f)。

板形感器(SP)呈脊状隆起,略高于触角表面,两端稍宽略圆,中间略弯曲且窄,与触角的中轴线平行,基部插入隆起的纵长形槽中,长约 48.8 μm,宽约 1.3 μm,槽状间距为 1.6 μm(图 1g)。分布于触角整个鞭节,在柄节和梗节中未发现,毛形感器和锥形感器着生在板形感器之间。

2.2 草地贪夜蛾寄生蜂甲腹茧蜂胸足的形态及感器类型

2.2.1 胸足的形态

草地贪夜蛾寄生蜂甲腹茧蜂的胸足是寄生蜂的运动附肢,主要用于爬行、跳跃、清扫梳理和支撑身体。胸足分为前足、中足和后足,每个胸足由 6 个部分组成,从基部到端部依次为基节、转节、腿节、胫节、跗节和前跗节(图 2a、3a、4a)。通常寄生蜂胸足的基节较粗短,近似圆锥形;前足和中足的转节较长,分第 1 转节和第 2 转节,第 2 转节较短,后足转节仅有 1 节;腿节较发达,胫节次之,内侧末端有 1 个大距;跗节分为 5 节,第 1 节较长;前跗节较短,有两侧爪。



注: a) 触角; b) ST I. 毛形感器 I (鞭节); c) ST II. 毛形感器 II (鞭节); d) ST III. 毛形感器 III (柄节和梗节), SB I. 锥形感器 I (柄节); e) SB I. 锥形感器 I (鞭节), SB II. 锥形感器 II (鞭节); f) SB III. 锥形感器 III (鞭节); g) SP. 板形感器 (鞭节)。

Note: a) antennae; b) ST I. sensilla trichodea I (flagellum); c) ST II. sensilla trichodea II (flagellum); d) ST III. sensilla trichodea III (scape and pedicel), SB I. sensilla basiconica I (scape); e) SB I. sensilla basiconica I (flagellum); f) SB II. sensilla basiconica II (flagellum); g) SP. sensilla placodea (flagellum).

图 1 草地贪夜蛾寄生蜂甲腹茧蜂触角感器超显微结构

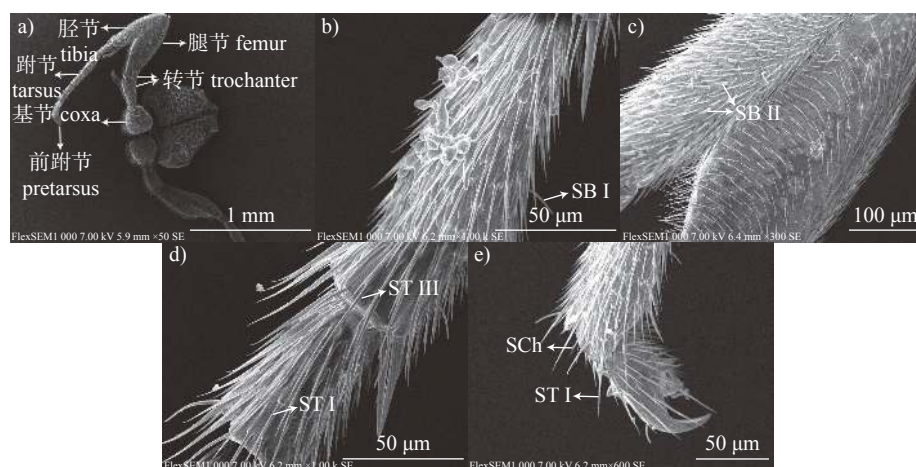
Fig. 1 Ultrastructure of the antennae sensilla on the parasitoid of *Chelonus* sp. of *Spodoptera frugiperda*

在草地贪夜蛾寄生蜂甲腹茧蜂的胸足上共观察到 4 种感器, 分别为毛形感器 (ST)、锥形感器 (SB)、刺形感器 (sensilla chaetica, SCh) 和钟形感器 (sensillum campaniform, SCa)。

2.2.2 前足感器

前足上的毛形感器 (ST) 有 ST I 和 ST III 2 个亚型, 在整个前足表面均有分布 (图 2d、2e)。与触角上的形态相似, ST I 和 ST III 分别长 13.4~50.9 μm 和 16.5~46.4 μm , 均长于触角上的毛形

感器; 基部直径分别为 1.5~2 μm 和 1.7~3.5 μm , 宽于触角上的毛形感器基部直径。在基窝形态上, 前足的 ST III 基窝更加突出。前足上的锥形感器 (SB) 有 SB I 和 SB II 2 个亚型, 同触角上的锥形感器形态相同。SB I 主要分布在第 3 跗节, SB II 主要分布在胫节侧面, 与毛形感器相间分布 (图 2b、2c)。前足上的刺形感器 (SCh) 与足表面夹角均大于 45°, 外形与毛形感器相近, 基部插入触角表皮凹陷处, 端部尖细如刺, 长 5.2~



注: a) 前足; b) SB I. 锥形感器 I (第 3 跗节); c) SB II. 锥形感器 II (胫节外侧); d) ST I. 毛形感器 I (第 4 跗节), ST III. 毛形感器 III (第 5 跗节); e) ST I. 毛形感器 I (第 5 跗节和前跗节), SCh. 刺形感器 (第 5 跗节)。

Note: a) propodeum; b) SB I. sensilla basiconica I (the 3rd tarsus); c) SB II. sensilla basiconica II (the outside of the tibia); d) ST I. sensilla trichodea I (the 4th tarsus), ST III. sensilla trichodea III (the 5th tarsus); e) ST I. sensilla trichodea I (the 5th tarsus and pretarsus), SCh. sensilla chaetica (the 5th tarsus).

图 2 草地贪夜蛾寄生蜂甲腹茧蜂前足感器超显微结构

Fig. 2 Ultrastructure of the propodeum sensilla on the parasitoid of *Chelonus* sp. of *S. frugiperda*

12.7 μm , 基部直径 1.5~2.0 μm (图 2e), 分布于第 5 跗节, 数量较少。

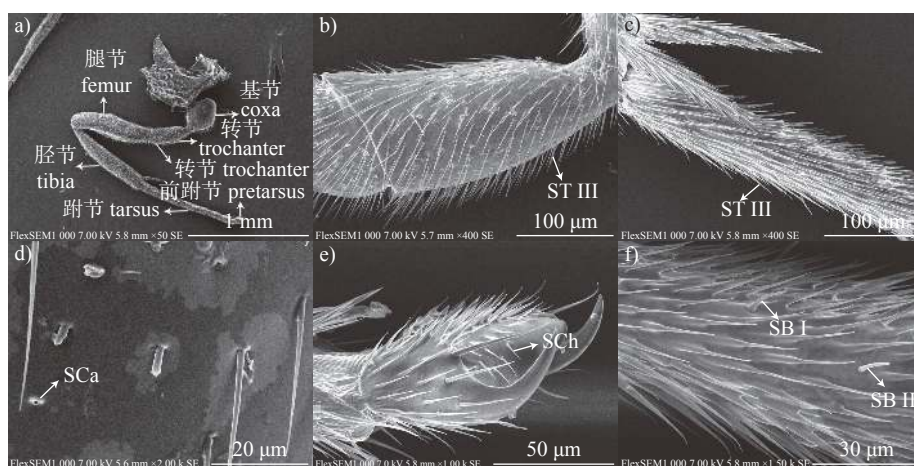
2.2.3 中足感器

中足上的毛形感器 (ST) 只有 1 种亚型, 即 ST III, 分布于整个中足表面, 长度和基部直径与前足基本相同 (图 3b、3c); 钟形感器 (SCa) 呈乳头状, 着生在直径约 2.9 μm 的锥形盘中央, 中心处有一突起, 周围表皮光滑且隆起, 仅在中足的腿节内侧发现 (图 3d); 锥形感器 (SB) 与前足

相同 (图 3f); 刺形感器 (SCh) 形态与前足相同, 排列于前跗节的爪状中垫上 (图 3e)。

2.2.4 后足感器

后足上的毛形感器 (ST) 形态与前足和中足相同 (图 4d、4e、4f)。锥形感器 (SB) 有 SB I 和 SB IV 2 个亚型。其中 SB I 与触角、前足和中足上的锥形感器形态相同 (图 4b); SB IV 为柱状, 基窝内陷, 端部分叉, 长约 7.2 μm , 基部直径约 1.5 μm , 仅在后足跗节外侧发现, 数量极少 (图 4c)。刺形

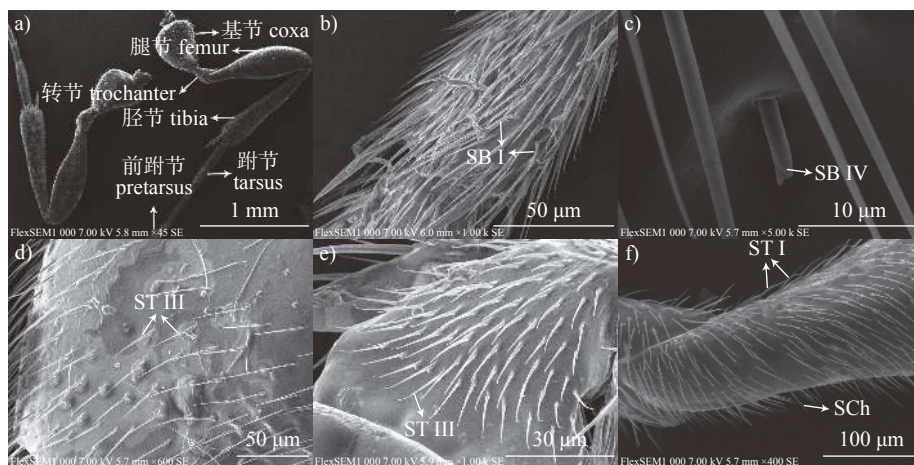


注: a) 中足; b) ST III. 毛形感器 III (转节外侧); c) ST III. 毛形感器 III (第 1 跗节); d) SCa. 钟形感器 (腿节内侧); e) SCh. 刺形感器 (前跗节); f) SB I. 锥形感器 I (第 3 跗节), SB II. 锥形感器 II (第 3 跗节)。

Note: a) mesopodium; b) ST III. sensilla trichodea III (the outside trochanter); c) ST III. sensilla trichodea III (the 1st tarsus); d) SCa. sensillum campaniform (the inside femur); e) SCh. sensilla chaetica (pretarsus); f) SB I. sensilla basiconica I (the 3rd tarsus), SB II. sensilla basiconica II (the 3rd tarsus).

图 3 草地贪夜蛾寄生蜂甲腹茧蜂中足感器超显微结构

Fig. 3 Ultrastructure of the mesopodium sensilla on the parasitoid of *Chelonus* sp. of *S. frugiperda*



注: a) 后足; b) SB I. 锥形感器 I (第 3 跗节); c) SB IV. 锥形感器 IV (胫节外侧); d) ST III. 毛形感器 III (腿节侧面); e) ST III. 毛形感器 III (前跗节); f) SCh. 刺形感器 (腿节内侧), ST I. 毛形感器 I (腿节外侧)。

Note: a) metapodium; b) SB I. sensilla basiconica I (the 3rd tarsus); c) SB IV. sensilla basiconica IV (the outside tibia); d) ST III. sensilla trichodea III (the side femur); e) ST III. sensilla trichodea III (pretarsus); f) SCh. sensilla chaetica (the inside femur), ST I. sensilla trichodea I (the outside femur).

图 4 草地贪夜蛾寄生蜂甲腹茧蜂后足感器超显微结构

Fig. 4 Ultrastructure of the metapodium sensilla on the parasitoid of *Chelonus* sp. of *S. frugiperda*

感器 (SCh) 形态与中足相同, 分布在后足腿节内侧及前跗节 (图 4f)。

3 讨论

本研究通过扫描电镜在寄生草地贪夜蛾的甲腹茧蜂雄成虫触角和胸足共观察到 5 种感器, 分别为毛形感器 (3 种亚型 I~III)、板形感器、刺形感器、锥形感器 (4 种亚型 I~IV) 和钟形感器, 这些感器可以识别植物的气味、信息素和其他化学刺激, 同时还具有机械感觉以及味觉功能^[29]。田盼盼等^[17]发现: 烟蚜茧蜂主要有板形感器、刺形感器、毛形感器、锥形感器、Böhm 氏鬃毛和膜状中垫等 6 种类型感器, 未观察到钟形感器。据报道, 钟形感器具有机械感觉功能, 可以感受空气压力和位置^[18], 在甲腹茧蜂中足腿节上发现钟形感器说明其可能在甲腹茧蜂飞行过程中起平衡和定位的作用。

本研究在寄生草地贪夜蛾的甲腹茧蜂触角上共观察到 3 种感器, 分别为毛形感器 (3 种亚型 I~III)、板形感器和锥形感器 (3 种亚型 I~III)。刘槲等^[19]在二化螟盘绒茧蜂触角上观察到毛形 (2 种亚型)、板形、腔锥形、锥形 (3 种亚型)、刺形、柱形、钟形和及 Böhm 氏鬃毛等感器, 而本研究在草地贪夜蛾寄生蜂甲腹茧蜂触角上发现毛形感器还存在 1 种不同的亚型, 但是未发现腔锥形、柱形、钟形感器和 Böhm 氏鬃毛。这可能是由于不同寄生蜂分类地位不同和寄主差异造成, 且可能与标本的放置角度有关^[10]。

寄生蜂的不同部位所具有的感器类型不同, 而不同类型的感器在寄生蜂的行为中也发挥着不同的作用。本研究在寄生草地贪夜蛾的甲腹茧蜂上观察到的毛形感器和锥形感器为其触角和胸足所共有。已有研究发现: 这 2 种感器均具有感受机械刺激和嗅觉感受的功能^[30], 可能在甲腹茧蜂对寄主的定位、识别和接受以及行为环境的选择等方面起重要作用^[31-33]。某些毛形感器还能够感受性信息素, 以实现两性交配求偶中的信息识别^[34]。另外, 板形感器是甲腹茧蜂触角鞭节特有的一种感器, 其具有多个神经元细胞, 具有嗅觉功能, 是化学气体分子的通道^[35], 可能还有感受红外辐射的功能^[36], 其存在于触角鞭节可能是为了更快速准确地搜寻寄主。

本研究仅对寄生草地贪夜蛾的甲腹茧蜂触角

和胸足感器的超微结构进行扫描电镜观察, 有关产卵器感器的观察及各类型感器的功能还有待于通过透射电镜、电生理和分子生物学等技术进行进一步的研究和分析, 以揭示寄生草地贪夜蛾的甲腹茧蜂定位寄主的行为机制, 为进一步通过生物防控的方法来防治草地贪夜蛾提供一定的理论依据。

4 结论

本研究通过扫描电镜观察明确了寄生草地贪夜蛾的甲腹茧蜂 (*Chelonus* sp.) 雄成虫触角和胸足 (前、中、后足) 上有 5 种感器, 分别为毛形感器 (3 种亚型 I~III)、板形感器、刺形感器、锥形感器 (4 种亚型 I~IV) 和钟形感器, 且不同类型感器在触角和胸足的分布及特征不同。研究结果可为进一步探讨草地贪夜蛾寄生蜂的寄生行为机制提供一定的理论依据。

[参考文献]

- [1] TODD E L, POOLE R W. Keys and illustrations for the armyworm moths of the noctuid genus *Spodoptera* guenee from the Western Hemisphere[J]. Annals of the Entomological Society of America, 1980, 73(6): 722. DOI: 10.1093/aesa/73.6.722.
- [2] 卢辉, 唐继洪, 吕宝乾, 等. 草地贪夜蛾的生物防治及潜在入侵风险[J]. 热带作物学报, 2019, 40(6): 1237. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2019.06.028.
- [3] 吴秋琳, 姜玉英, 胡高, 等. 中国热带和南亚热带地区草地贪夜蛾春夏两季迁飞轨迹的分析[J]. 植物保护, 2019, 45(3): 1. DOI: 10.16688/j.zwbh.2019207.
- [4] 陈壮美, 赵琳超, 刘航, 等. 斯氏侧沟茧蜂对草地贪夜蛾幼虫的寄生行为及寄生效应[J]. 植物保护, 2019, 45(5): 71. DOI: 10.16688/j.zwbh.2019341.
- [5] 杨普云, 朱晓明, 郭井菲, 等. 我国草地贪夜蛾的防控对策与建议[J]. 植物保护, 2019, 45(4): 1. DOI: 10.16688/j.zwbh.2019260.
- [6] 谢殿杰, 唐继洪, 张蕾, 等. 我国草地贪夜蛾年发生世代区划分[J]. 植物保护, 2021, 47(1): 61. DOI: 10.16688/j.zwbh.2020213.
- [7] 陈万斌, 李玉艳, 王孟卿, 等. 草地贪夜蛾的天敌昆虫资源、应用现状及存在的问题与建议[J]. 中国生物防治学报, 2019, 35(5): 658. DOI: 10.16409/j.cnki.2095-039x.2019.05.013.
- [8] 唐璞, 王知知, 吴琼, 等. 草地贪夜蛾的天敌资源及其生物防治中的应用[J]. 应用昆虫学报, 2019, 56(3): 370. DOI: 10.7679/j.issn.2095-1353.2019.046.
- [9] 叶恭银, 胡建, 朱家颖, 等. 寄生蜂调控寄主害虫免疫与发育机理的研究新进展[J]. 应用昆虫学报, 2019, 56(3): 382. DOI: 10.7679/j.issn.2095-1353.2019.047.

- [10] 尹新明, 高艳, 王高平, 等. 寄生蜂感受器的形态与功能[J]. 河南农业大学学报, 2003, 37(2): 129. DOI: 10.16445/j.cnki.1000-2340.2003.02.007.
- [11] PALMA R, MUTIS A, ISAACS R, et al. Type and distribution of sensilla in the antennae of the red clover root borer *Hylastinus obscurus*[J]. Journal of Insect Science, 2013, 13(133): 1. DOI: 10.1673/031.013.13301.
- [12] YU Q Q, LIU Z K, CHEN C, et al. Antennal sensilla of *Eucryptorrhynchus chinensis* (Olivier) and *Eucryptorrhynchus brandti* (Harold) (Coleoptera: Curculionidae)[J]. Microscopy Research and Technique, 2013, 76(9): 968. DOI: 10.1002/jemt.22256.
- [13] 张方梅, 扶胜兰, 乔利, 等. 钩臀蚁蛉头部附器传感器的超微结构观察[J]. 植物保护, 2018, 44(6): 91. DOI: 10.16688/j.zwbh.2018020.
- [14] 杨广, 魏辉, 尤民生. 小菜蛾绒茧蜂触角的超微结构[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2003, 32(1): 32. DOI: 10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.).2003.01.008.
- [15] 董文霞, 张钟宁. 中红侧沟茧蜂触角感受器的扫描电镜观察[J]. 昆虫学报, 2006, 49(6): 1054. DOI: 10.16380/j.kcxb.2006.06.025.
- [16] 李科明, 张永军, 吴孔明, 等. 中红侧沟茧蜂触角超微结构[J]. 中国农业科学, 2012, 45(17): 3522. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2012.17.008.
- [17] 田盼盼, 张立猛, 谷慧慧, 等. 烟蚜茧蜂传感器的扫描电镜观察[J]. 中国烟草学报, 2015, 21(5): 68. DOI: 10.16472/j.chinatobacco.2014.506.
- [18] 严珍, 岳建军, 谢艳丽, 等. 斜纹夜蛾侧沟茧蜂触角感受器的扫描电镜观察[J]. 热带作物学报, 2016, 37(2): 384. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2016.02.027.
- [19] 刘樾, 王永模. 二化螟盘绒茧蜂触角传感器的扫描电镜观察[J]. 南方农业, 2018, 12(33): 137. DOI: 10.19415/j.cnki.1673-890x.2018.33.072.
- [20] KAESLIN M, WEHRLE I, CHRISTA G B, et al. Stage-dependent strategies of host invasion in the egg-larval-parasitoid *Chelonus inanitus*[J]. Journal of Insect Physiology, 2005, 51(3): 287. DOI: 10.1016/j.jinsphys.2004.11.015.
- [21] 季青娥. 中国甲腹茧蜂亚科分类(膜翅目: 茧蜂科)[D]. 福州: 福建农林大学, 2001.
- [22] 张红英. 中国甲腹茧蜂属分类研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [23] 李芬, 王力奎, 吕宝乾, 等. 中国海南省田间发现螟甲腹茧蜂寄生草地贪夜蛾[J]. 中国生物防治学报, 2019, 35(6): 992. DOI: 10.16409/j.cnki.2095-039x.2019.06.003.
- [24] SCHNEIDER D. Insect antennae[J]. Annual Review of Entomology, 1964, 9: 103. DOI: 10.1146/annurev.en.09.010164.000535.
- [25] CHINTA S, DICKENS J C, BAKER G T. Morphology and distribution of antennal sensilla of the tarnished plant bug, *Lygus lineolaris* (Palisot de Beauvois)(Hemiptera: Miridae)[J]. International Journal of Insect Morphology and Embryology, 1997, 26(1): 21. DOI: 10.1016/S0020-7322(96)00022-0.
- [26] KEIL T A. Morphology and development of the peripheral olfactory organs[M]//HANSSON B S. Insect olfaction. Heidelberg: Springer, 1999.
- [27] NAVASERO R C, ELZEN G W. Sensilla on the antennae, fortarsi and palpi of *Microplitis croceipes* (Cresson) (Hymenoptera: Braconidae)[J]. Proceedings of the Entomological Society of Washington, 1991, 93: 737.
- [28] OCHIENG S A, PARK K C, ZHU J W, et al. Functional morphology of antennal chemoreceptors of the parasitoid *Microplitis croceipes* (Hymenoptera: Braconidae)[J]. Arthropod Structure & Development, 2000, 29(3): 231. DOI: 10.1016/S1467-8039(01)00008-1.
- [29] BINYAMEEN M, ANDERSON P, IGNEEL R, et al. Spatial organization of antennal olfactory sensory neurons in the female *Spodoptera littoralis* moth: differences in sensitivity and temporal characteristics[J]. Chemistry Senses, 2012, 37(7): 613. DOI: 10.1093/chemse/bjs043.
- [30] 向玉勇, 孔丹丹, 刘同先, 等. 小地老虎雌蛾触角及幼虫头部感受器扫描电镜观察[J]. 昆虫学报, 2016, 59(12): 1340. DOI: 10.16380/j.kcxb.2016.12.007.
- [31] 范一霖, 郑苑, 章玉苹, 等. 桔小实蝇本地寄生蜂长尾全裂茧蜂成虫触角传感器的扫描电镜观察[J]. 环境昆虫学报, 2013, 35(5): 635. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0858.2013.05.13.
- [32] ROH H S, PARK K C, OH H W, et al. Morphology and distribution of antennal sensilla of two tortricid moths, *Cydia pomonella* and *C. succedana* (Lepidoptera)[J]. Microscopy Research and Technique, 2016, 79(11): 1069. DOI: 10.1002/jemt.22747.
- [33] VERA W, BERGMANN J. Distribution and ultrastructure of the antennal sensilla of the grape weevil *Naupactus xanthographus* (Coleoptera: Curculionidae)[J]. Microscopy Research and Technique, 2018, 81(6): 590. DOI: 10.1002/jemt.23014.
- [34] WU H, XU M, HOU C, et al. Specific olfactory neurons and glomeruli are associated differences in behavioral responses to pheromone components between two *Helicoverpa* species[J]. Frontiers in Behavioral Neuroscience, 2015, 9: 206. DOI: 10.3389/fnbeh.2015.00206.
- [35] BOURDAIS D, VEMON P, KRESPI L, et al. Antennal structure of male and female *Aphidius rhopalosiphii* DeStefani-Peres (Hymenoptera: Braconidae): description and morphological alterations after cold storage or heat exposure[J]. Microscopy Research & Technique, 2010, 69(12): 1005. DOI: 10.1002/jemt.20378.
- [36] 毕康, 陈家骅, 李清娥. 阿里山潜蝇茧蜂触角传感器扫描电镜观察[J]. 武夷科学, 2011, 27: 114. DOI: 10.15914/j.cnki.wywx.2011.00.013.

责任编辑: 何承刚