



赵晓东, 崔晓宁*, 胡桂馨, 刘艳君, 温雅洁. 牛角花齿蓟马成虫触角传感器的扫描电镜观察 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (2): 499–508.

牛角花齿蓟马成虫触角传感器的扫描电镜观察

赵晓东, 崔晓宁*, 胡桂馨, 刘艳君, 温雅洁

(甘肃农业大学草业学院, 草业生态系统教育部重点实验室, 甘肃省草业工程实验室,
中-美草地畜牧业可持续发展研究中心, 兰州 730070)

摘要: 本研究旨在明确我国北方苜蓿重要害虫——牛角花齿蓟马 *Odontothrips loti* 触角传感器类型、形态特征及分布特点。利用扫描电镜观察牛角花齿蓟马雌、雄成虫触角的超微结构, 比较雌、雄虫之间的差异。结果表明: 牛角花齿蓟马雌虫触角长度 ($314.42 \pm 7.21 \mu\text{m}$) 明显较雄虫 ($260.58 \pm 5.69 \mu\text{m}$) 长, 除柄节和第 I 鞭节外, 其他各节雌虫均较雄虫粗大。牛角花齿蓟马成虫触角传感器类型共有 7 种, 即 Böhm 氏鬃毛 (BB)、刺形感器 (SchI, SchII)、锥形感器 (SBI, SBII, SBIII)、钟形感器 (SCa)、腔锥形感器 (SCo)、腔形感器 (SCav) 和毛形感器 (ST), 雌虫触角上述 7 种类型感器均有分布, 而雄虫触角上未发现腔形感器。牛角花齿蓟马成虫触角感器在类型、形态特征及分布方面表现雌、雄个体差异。本研究为深入探究牛角花齿蓟马触角感器的嗅觉通讯机制提供形态学基础。

关键词: 牛角花齿蓟马; 触角; 感器; 扫描电镜; 超微结构

中图分类号: Q964; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2022) 02-0499-10

Scanning electron microscopic observations of antennal sensilla in *Odontothrips loti* adults

ZHAO Xiao-Dong, CUI Xiao-Ning*, HU Gui-Xin, LIU Yan-Jun, WEN Ya-Jie (College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory for Grassland Ecosystem of Education Ministry, Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-U. S. Centers for Grazingland Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The purpose of this study was to clarify the types, morphological characteristics and distribution of antennal sensilla in female and male *Odontothrips loti* adults, one of the most serious pest on alfalfa in northern of China. The antennae ultrastructure were observed using scanning electron microscope (SEM), and their differences between female and male adults were also compared. The results showed that the average length of antennae in female adults were significantly longer than male adults, with their length were $314.42 \pm 7.21 \mu\text{m}$ and $260.58 \pm 5.69 \mu\text{m}$, respectively. Besides, there were significant difference of length or width during all segments in females than males, except scape and flagellomere I. In total, we identified seven types of antennal sensilla in female and male adults, including Böhm bristles (BB), sensilla chaetica (SchI, SchII), sensilla basiconica (SBI, SBII, SBIII), sensilla campaniformia (SCa), sensilla coeloconica (SCo), sensilla cavity (SCav), and sensilla trichodea (ST). These antennal

基金项目: 国家自然科学基金 (32060397); 甘肃农业大学科技创新基金 (GAU-KYQD-2018-24)

作者简介: 赵晓东, 男, 1997 年生, 甘肃清水人, 在读硕士生, 研究方向为草地昆虫学, E-mail: 1248005547@qq.com

* 通讯作者 Author for correspondence: 崔晓宁, 男, 博士, 副教授, 研究方向为昆虫化学生态学, E-mail: cxn213@qq.com

收稿日期 Received: 2020-12-02; 接受日期 Accepted: 2021-04-09

sensillas were all existed in female adults, while male adults were absence of sensilla cavity (SCav). In some extent, there are difference of antennal sensilla types, morphological characteristics and distribution between female and male adults. The results provided a morphological foundation for deeply exploring mechanism of olfactory communication of these antennal sensillas in *O. loti* adults.

Key words: *Odontothrips loti*; antennae; sensilla; scanning electron microscope (SEM); ultrastructure

牛角花齿蓟马 *Odontothrips loti* 属缨翅目 Thysanoptera 蓟马科 Thripidae 齿蓟马属 *Odontothrips*, 是我国北方苜蓿田蓟马类优势害虫 (吴永敷等, 1990; 张奔等, 2016)。该害虫主要行孤雌生殖, 在苜蓿营养生长期偏好取食植株的心叶, 导致苜蓿叶片缩小、光合效率降低、生长受阻, 待苜蓿开花后则转移到花器中为害, 严重影响苜蓿的产量与品质 (张蓉等, 2003; 贺春贵等, 2007)。由于牛角花齿蓟马体小, 取食方式隐蔽, 繁殖力强, 世代重叠严重, 极易产生抗药性, 加之苜蓿作为饲草产品的特殊功能, 使用化学防治具有局限性 (侯军和贺春贵, 2006; 花蕾等, 2007)。因此, 发展和利用植物源诱剂或昆虫信息素的绿色监测和防控技术, 对控制此虫危害, 保障苜蓿产业健康发展具有重要意义。

触角是昆虫最主要的嗅觉和触觉器官, 分布有丰富的触角感受器, 不同类型的感器其规律分布、类型和数量在雌、雄虫之间往往具有差异 (Schneider, 1964; Zacharuk, 1980)。昆虫通过触角各种感器的综合作用感知环境中化学、物理等刺激因子, 从而调节其行为反应 (那杰等, 2008; Mithofer *et al.*, 2018)。如入侵害虫西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* 可以利用其灵敏的嗅觉系统感受寄主植物释放的挥发物组分或信息素类化合物变化, 指导其寄主定位、取食、栖息、选择配偶和生殖场所、防御和迁移等行为 (Cao *et al.*, 2014; Teulon *et al.*, 2017; Cao *et al.*, 2019)。因此, 明确触角嗅觉感器的形态结构有利于探究蓟马嗅觉识别的生理和分子机制。

目前, 已报道的蓟马类害虫触角感器方面的研究有西花蓟马 (丁艳红等, 2010; 李维娜和冯纪年, 2013)、塔六点蓟马 *Scolothrips takahashii* (徐洪涛等, 2011)、花蓟马 *Frankliniella intonsa*、禾花蓟马 *Frankliniella tenuicornis* (李维娜和冯纪年, 2013)、茶棍蓟马 *Dendrothrips minowai* (吕召云等, 2015)、茶黄蓟马 *Scirtothrips dorsalis* (黄丽莉等,

2016; Zhu *et al.*, 2017)、豆花蓟马 *Megalurothrips usitatus*、棕榈蓟马 *Thrips palmi* (Wang *et al.*, 2019)、以及美洲棘蓟马 *Echinothrips americanus* (Hu *et al.*, 2020)。综合以上研究, 发现蓟马触角感器主要有 7 种类型, 即 Böhm 氏鬃毛 (Böhm bristles, BB)、刺形感器 (sensilla chaetica, SCh)、锥形感器 (sensilla basiconica, SB)、钟形感器 (sensilla campaniformia, SCa)、腔锥形感器 (sensilla coeloconica, SCo)、腔形感器 (sensilla cavity, SCav) 和毛形感器 (sensilla trichodea, ST), 以及一类表皮衍生物——微毛 (microtrichia, Mt)。目前, 对牛角花齿蓟马的触角感器形态结构尚不清楚, 其识别寄主挥发物或信息素的嗅觉感受机制有待探索。因此, 本研究通过扫描电子显微镜观测牛角花齿蓟马的触角超微结构, 以期对深入研究其与植物互作的化学生态机制提供基础。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

2020 年 7–8 月, 在甘肃农业大学校内牧草地紫花苜蓿 *Medicago sativa* L. 试验田采集牛角花齿蓟马成虫。选取雌、雄虫各 15 头, 在体视解剖镜下用刀片切取成虫头部, 置于装有 75% 乙醇的 1.5 mL 离心管中, 4℃ 保存备用。

1.2 样品制备与观察

样品固定: 将蓟马头部先用去离子水、生理盐水和 75% 乙醇依次清洗两次, 再用超声波清洗仪洗涤 2 次, 每次 15 s, 结束后在样品管中加入 2.5% 戊二醛溶液, 4℃ 固定 10 h。

固定后处理: 将固定后的样品用 75% 乙醇洗涤 2 次, 再加入磷酸缓冲液 (0.2 M, pH 7.2) 洗涤 3 次。洗涤后的样品中依次加入 30%、50%、70%、90% 和 100% 乙醇溶液, 进行浓度梯度脱水, 每次 15 min。然后用无水乙醇稀释叔丁醇, 分别配置成 25%、50%、75% 叔丁醇乙醇溶液,

将样品进行逐级置换, 每次 15 min。最后将样品利用冷冻干燥机 (VFD-21St-BUOH) 干燥处理, 将样品用双面导电胶粘到样品台上, 置于日立 MC-100 型离子溅射仪内喷金, 最后在扫描电子显微镜 (Hitachi-S 3400N) 下观察拍照。

1.3 图像处理及数据分析

牛角花齿蓟马触角传感器类型鉴定参考 Schneider (1964) 和 Shields (2008) 的方法。利用 Photoshop CS 5.0 软件对触角长度和宽度 (中部), 以及传感器的长度和基部直径进行测量, 用平均值 $\pm$ 标准误 (Mean $\pm$ SE) 表示。测量具体步骤: 选择 Photoshop CS 5.0 “分析” 选项中的 “设置测定比例”, 标定 10 μm 长度代表的像素值, 以此为标准; 将实际测到的触角或传感器的长度或宽度的像素值, 换算成实际测量长度值 (μm)。所有数据采用 SPSS 19.0 软件分析, 同一性别成虫的不同触角节间的长度或宽度显著性差异采用单因素方差分析 (one way ANOVA, Tukey HSD, $\alpha = 0.05$), 比较雌、雄虫之间的同一触角亚节的长度或宽度的显著性差异采用独立样本 t 检验 (Student's t test, $\alpha = 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 触角形态结构

牛角花齿蓟马触角着生在头顶两复眼中间, 雌、雄虫形态相似, 呈丝状, 共 8 节, 从基部起

依次为柄节 Scape、梗节 Pedicel、鞭节 Flagellum, 雌虫触角 $314.22 \pm 7.21 \mu\text{m}$ 明显长于雄虫 $260.58 \pm 5.69 \mu\text{m}$ ($t = 7.014$, $P < 0.001$), 且每亚节间的长度存在显著差异 (雌 $F = 183.66$, $P < 0.001$; 雄 $F = 239.72$, $P < 0.001$)。柄节粗圆, 表面较光滑, 感器分布极少, 雌虫比雄虫明显粗壮, 长度雌虫为 $28.00 \pm 0.81 \mu\text{m}$, 雄虫为 $21.60 \pm 0.89 \mu\text{m}$ ($t = 5.326$, $P < 0.001$); 宽度雌虫为 $37.00 \pm 1.19 \mu\text{m}$, 雄虫为 $29.82 \pm 1.17 \mu\text{m}$ ($t = 4.304$, $P = 0.003$)。梗节较柄节细长, 感器分布也较柄节多, 长度和宽度雌、雄虫之间均无显著差异。鞭节最为细长, 每鞭小节呈梭形, 具有丰富的感器类型和数量, 分为 6 个小节 (FI ~ FVI 节), 其中 FI、FII 和 FII、FIII 的节间明显缢缩, 便于活动 (图 1-A, B)。雌虫的 FII ~ FVI 均较雄虫的粗长, 就长度而言, 其中 FII (雌 $64.22 \pm 1.88 \mu\text{m}$, 雄 $53.02 \pm 1.37 \mu\text{m}$, $t = 4.826$, $P < 0.001$)、FIV (雌 $63.36 \pm 1.71 \mu\text{m}$, 雄 $45.58 \pm 1.75 \mu\text{m}$, $t = 7.270$, $P < 0.001$) 节最长, 其次是 FI (雌 $50.74 \pm 1.50 \mu\text{m}$, 雄 $52.26 \pm 1.27 \mu\text{m}$, $t = 0.787$, $P = 0.454$)、FIII (雌 $43.70 \pm 1.66 \mu\text{m}$, 雄 $32.66 \pm 0.99 \mu\text{m}$, $t = 5.714$, $P < 0.001$) 节, 第 FV (雌 $12.12 \pm 0.83 \mu\text{m}$, 雄 $8.48 \pm 0.37 \mu\text{m}$, $t = 3.993$, $P = 0.004$) 和 FVI (雌 $17.16 \pm 1.12 \mu\text{m}$, 雄 $12.90 \pm 0.52 \mu\text{m}$, $t = 3.441$, $P = 0.009$) 节最短小 (表 1)。

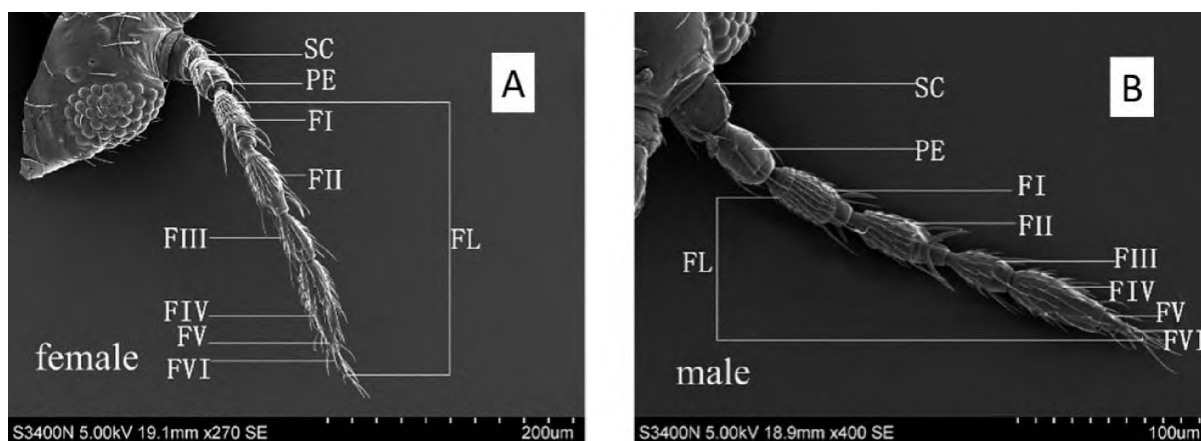


图 1 牛角花齿蓟马雌虫与雄虫触角形态

Fig. 1 Morphosis of the female and male *Odontothrips loti* adult antennae

注: A, 雌虫触角; B, 雄虫触角; SC, 柄节; PE, 梗节; FL, 鞭小节; FI-F6, 鞭小节 I-VI。Note: A, Female antennae; B, Male antennae; SC, Scape; PE, Pedicel; FL, Flagellum; FI-FVI, Flagellomere I-VI.

表 1 牛角花齿蓟马触角各节长度和宽度

Table 1 Length and width of each antennal segment in female and male *Odontothrips loti* adults

触角节 Antennomere	长度 Length (μm , $N = 10$)		宽度 Width (μm , $N = 10$)	
	雌 Female	雄 Male	雌 Female	雄 Male
柄节 Scape	28.00 $\pm$ 0.81 e***	21.6 $\pm$ 0.89 d	37.00 $\pm$ 1.19 a**	29.82 $\pm$ 1.17 a
梗节 Pedicel	34.92 $\pm$ 1.75 d	34.08 $\pm$ 1.06 c	26.66 $\pm$ 1.32 b	25.02 $\pm$ 1.09 b
鞭小节 I Flagellomere I	50.74 $\pm$ 1.50 b	52.26 $\pm$ 1.27 a	24.24 $\pm$ 1.41 bc	22.2 $\pm$ 0.96 bcd
鞭小节 II Flagellomere II	64.22 $\pm$ 1.88 a***	53.02 $\pm$ 1.37 a	27.12 $\pm$ 1.62 b	23.02 $\pm$ 1.42 bc
鞭小节 III Flagellomere III	43.70 $\pm$ 1.66 c***	32.66 $\pm$ 0.99 c	23.18 $\pm$ 0.94 bc*	20.24 $\pm$ 0.66 cd
鞭小节 IV Flagellomere IV	63.36 $\pm$ 1.71 a***	45.58 $\pm$ 1.75 b	21.42 $\pm$ 0.90 c*	18.36 $\pm$ 0.61 d
鞭小节 V Flagellomere V	12.12 $\pm$ 0.83 f**	8.48 $\pm$ 0.37 e	9.50 $\pm$ 0.33 d**	7.44 $\pm$ 0.43 e
鞭小节 VI Flagellomere VI	17.16 $\pm$ 1.12 f**	12.90 $\pm$ 0.52 e	7.80 $\pm$ 0.15 d***	6.36 $\pm$ 0.25 e
总长 Total	314.22 $\pm$ 7.21 ***	260.58 $\pm$ 5.69	—	—

注 “—” 表示没有数据; N 表示触角的样本数量 (根); 雌虫或雄虫触角不同节间的长度或宽度的显著性差异用小写字母表示; 同一触角节的长度或宽度在雌、雄虫之间的显著性差异用* 表示, * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$ 。Note “—” indicated no data; N indicated the number of antenna samples; different lowers indicated significant differences of length or width among each antennomere in the same sex adults; * indicated significant difference of one antennomere length or width between female and male adults. * indicated $P < 0.05$, ** indicated $P < 0.01$, *** indicated $P < 0.001$.

2.2 触角感器类型

牛角花齿蓟马雌、雄虫触角各节着生感器类型和数量存在差异, 柄节感器数量最少且类型单一, 其次是梗节, 鞭节感器数量分布最多, 类型多样 (图 1)。牛角花齿蓟马雌、雄虫触角表面共观察到 7 种感器, 分别是 Böhm 氏鬃毛、刺形感器、锥形感器、钟形感器、腔锥形感器、腔形感器和毛形感器, 以及微毛 (图 2, 图 3)。雌虫触角具有以上所述的 7 种类型感器, 而雄虫触角没有发现腔形感器。

2.2.1 Böhm 氏鬃毛

Böhm 氏鬃毛存在于雌、雄虫触角柄节基部、以及梗节与柄节的节间, 基部表面稍凹陷, 毛体短小, 端部圆钝, 表面光滑、无孔, 与触角表面角度呈近 90° 夹角。雌虫鬃毛长 $4.44 \pm 0.08 \mu\text{m}$, 直径 $0.89 \pm 0.03 \mu\text{m}$; 雄虫长 $2.71 \pm 0.71 \mu\text{m}$, 直径 $0.78 \pm 0.01 \mu\text{m}$ (图 2-A; 图 3-A, B; 表 2)。

2.2.2 刺形感器

刺形感器形如带刺植物表皮坚刺, 基部较端部粗, 生于表皮略突起的基节窝中, 在雌、雄虫触角柄节、梗节和鞭节均有分布, 根据形态特点分为两个亚型 SChI 和 SChII。

SChI 基部着生于丘状基座中, 端部尖细, 体壁具有明显的棱形纵脊。零散分布, 主要分布在

第 I ~ V 鞭小节, 其次是梗节, 柄节数量最少, 且鞭节 SChI 毛体最粗大, 柄节最小。雌虫较雄虫稍长, 雌虫长度为 $19.38 \pm 1.82 \mu\text{m}$, 直径 $1.58 \pm 0.05 \mu\text{m}$; 雄虫长度为 $13.93 \pm 1.66 \mu\text{m}$, 直径 $1.27 \pm 0.14 \mu\text{m}$ (图 2-A, C, E, F; 图 3-C, D, E; 表 2)。

SChII 仅分布在雌、雄虫的第 V、VI 鞭小节, 形体较 SChI 更粗大, 从基部到端部逐渐变细, 端部钝圆, 尾部略弯曲。雌虫感器也较雄虫稍长, 雌虫长度为 $30.62 \pm 1.46 \mu\text{m}$, 直径 $1.88 \pm 0.09 \mu\text{m}$; 雄虫长 $24.33 \pm 1.66 \mu\text{m}$, 直径 $1.32 \pm 0.04 \mu\text{m}$ (图 2-I; 图 3-I; 表 2)。

2.2.3 锥形感器

锥形感器体中空, 表面多孔、布有纵纹。根据形态特征及分布部位分为 3 种亚型, 即 SBI、SBII 和 SBIII。

SBI 感器形似角形或叉状, 是感器中最粗大的一类, 分布在雌、雄虫第 I、II 鞭小节端部的节间位置, 每根触角 2 根感器。感器基部粗壮, 着生在凹陷的基节窝中, 向臂端部逐渐变细。雌虫单臂长 $51.9 \pm 1.24 \mu\text{m}$, 直径 $7.9 \pm 0.07 \mu\text{m}$; 雄虫单臂长 $34.63 \pm 1.58 \mu\text{m}$, 直径 $4.81 \pm 0.17 \mu\text{m}$ (图 2-B, D; 图 3-D; 表 2)。

SBII 主要分布在第 I、II 鞭小节侧面, 基底部

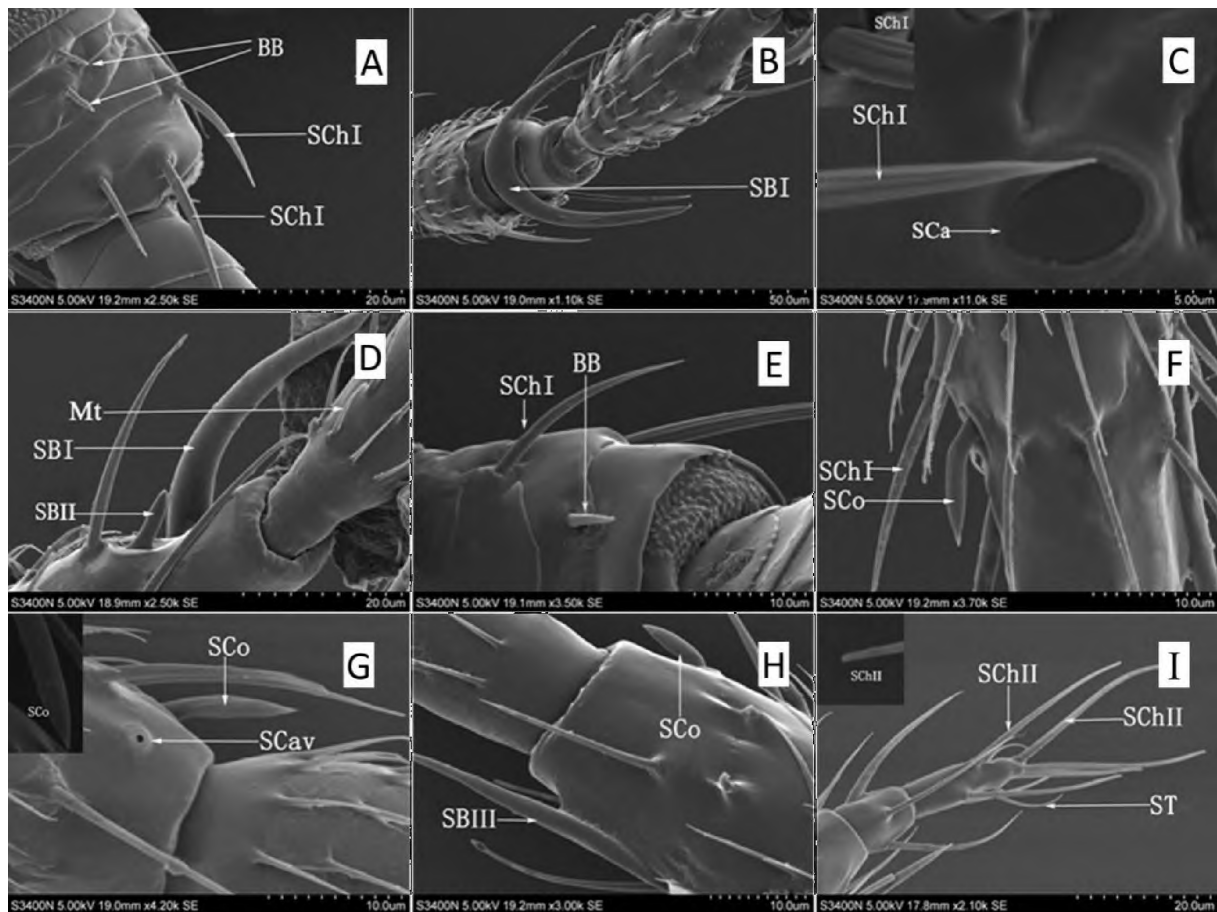


图2 牛角花齿蓟马雌虫触角传感器的超微结构

Fig. 2 Ultrastructures of antennal sensilla in female *Odontothrips loti* adults

注: A, 柄节, Böhm 氏鬃毛 (BB), 刺形感器 I (SchI); B, 第 I 鞭小节, 锥形感器 I (SBI); C, 梗节, 钟形感器 (SCa), 刺形感器 I (SchI); D, 第 II 鞭小节, 微毛 (Mt), 锥形感器 I (SBI), 锥形感器 II (SBII); E, 柄节, Böhm 氏鬃毛 (BB), 刺形感器 I (SchI); F, 第 III 鞭小节, 腔锥形感器 (SCo); G, 第 III 鞭小节, 腔形感器 (SCav); H, 第 IV 鞭小节, 锥形感器 III (SBIII); I, 第 VI 鞭小节, 刺形感器 II (SchII), 毛形感器 (ST)。
 Note: A, scape, Böhm bristles (BB), sensilla chaetica I (SchI); B, flagellomere I, sensilla basiconca I (SBI); C, pedicel, sensilla campaniformia (SCa), sensilla chaetica I (SchI); D, flagellomere I, microtrichia (Mt), sensilla basiconca I (SBI), sensilla basiconca II (SBII); E, scape, Böhm bristles (BB), sensilla chaetica I (SchI); F, flagellomere III, sensilla coeloconica (SCo); G, flagellomere III, sensilla cavity (SCav); H, flagellomere IV, sensilla basiconca III (SBIII); I, flagellomere VI, sensilla chaetica II (SchII), sensilla trichodea (ST).

座较宽大, 中出感器形似手指, 体壁被纵纹, 端部圆钝, 雌虫长 $10.65 \pm 0.69 \mu\text{m}$, 直径 $2.2 \pm 0.17 \mu\text{m}$; 雄虫长 $8.41 \pm 0.35 \mu\text{m}$, 直径 $1.77 \pm 0.05 \mu\text{m}$ (图 2-D; 图 3-D, F)。

SBIII 分布在第 III ~ V 鞭小节侧面, 是最长的锥形感器, 毛体基部较粗, 从触角表面直接长出, 体壁布有纵纹, 端部钝圆。雌虫长 $45.02 \pm 0.96 \mu\text{m}$, 直径 $5.11 \pm 0.06 \mu\text{m}$; 雄虫长 $32.01 \pm 1.33 \mu\text{m}$, 直径 $3.99 \pm 0.04 \mu\text{m}$ (图 2-H; 图 3-G, H; 表 2)。

2.2.4 钟形感器

钟形感器仅在触角梗节端部背面分布, 触角表皮隆起形成不规则环状结构, 环体厚实, 内部表皮光滑略凹陷。雌虫感器内直径 $4.15 \pm 0.09 \mu\text{m}$, 雄虫 $3.95 \pm 0.06 \mu\text{m}$ (图 2-C; 图 3-C; 表 2)。

2.2.5 腔锥形感器

腔锥形感器分布在雌、雄虫第 III、IV 鞭小节侧面, 数量少, 形如萌发的嫩芽。基部着生在较大基节窝中, 基部略细, 表面光滑, 从基部 1/3

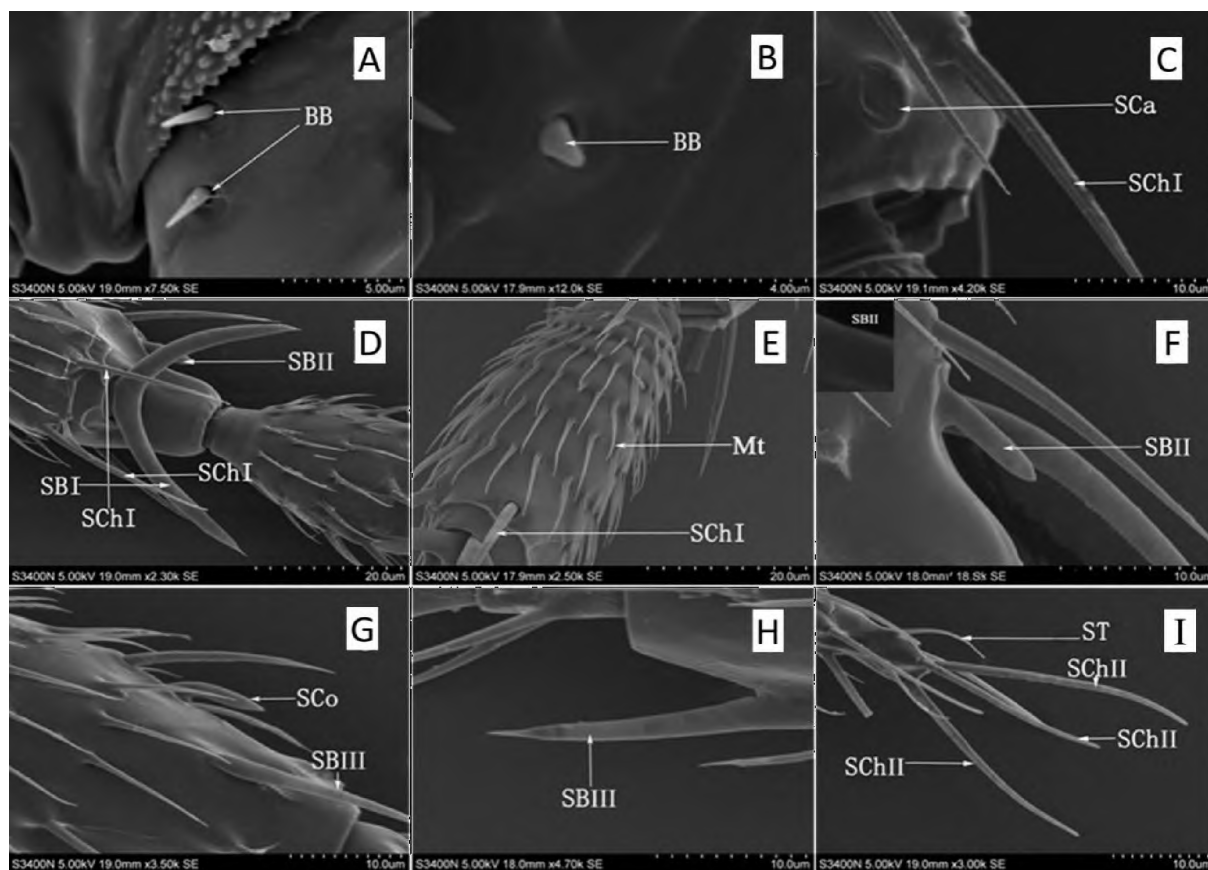


图3 牛角花齿蓟马雄虫触角感器的超微结构

Fig. 3 Ultrastructures of antennal sensilla in male *Odontothrips loti* adults

注: A, 柄节, Böhm 氏鬃毛 (BB); B, 梗节, Böhm 氏鬃毛 (BB); C, 梗节, 刺形感器 I (SchI), 钟形感器 (SCa); D, 第 II 鞭小节, 锥形感器 I (SBI), 刺形感器 I (SchI), 锥形感器 II (SBII); E, 第 III 鞭小节, 微毛 (Mt), 刺形感器 I (SchI); F, 第 II 鞭小节, 锥形感器 II (SBII); G, 第 IV 鞭小节, 腔锥形感器 (SCo), 锥形感器 III (SBIII); H, 第 V 鞭小节, 锥形感器 III (SBIII); I, 第 VI 鞭小节, 毛形感器 (ST), 刺形感器 II (SchII)。Note: A, scape, Böhm bristles (BB); B, pedicel, Böhm bristles (BB); C, pedicel, sensilla chaetica I (SchI), sensilla campaniformia (SCa); D, flagellomere II, sensilla basiconca I (SBI), sensilla chaetica I (SchI), sensilla basiconca II (SBII); E, flagellomere III, microtrichia (Mt), sensilla chaetica I (SchI); F, flagellomere II, sensilla basiconca II (SBII); G, flagellomere IV, sensilla coeloconica (SCo), sensilla basiconca III (SBIII); H, flagellomere V, sensilla basiconca III (SBIII); I, flagellomere VI, sensilla trichodea (ST), sensilla chaetica II (SchII)。

处开始逐渐变粗, 锥体具纵纹, 直至距端部 1/5 处槽纹消失, 端部收敛呈锥状。雌虫长 $8.32 \pm 0.19 \mu\text{m}$, 基部直径 $2.06 \pm 0.16 \mu\text{m}$; 雄虫长 $6.72 \pm 0.09 \mu\text{m}$, 基部直径 $1.93 \pm 0.03 \mu\text{m}$ (图 2-F, G, H; 图 3-G; 表 2)。

2.2.6 腔形感器

腔形感器仅分布在雌虫第 I、III 鞭小节腹面, 基部呈丘状, 中间表皮光滑, 凹陷形成空腔, 周围伴生刺形感器。感器底座直径 $2.03 \pm 0.03 \mu\text{m}$, 空腔直径 $0.75 \pm 0.02 \mu\text{m}$ (图 2-G; 表 2)。

2.2.7 毛形感器

毛形感器仅分布在第 VI 鞭小节上, 毛体较

长, 表面光滑, 末端较细。雌虫长 $19.94 \pm 0.73 \mu\text{m}$, 直径 $1.68 \pm 0.04 \mu\text{m}$; 雄虫长 $18.5 \pm 0.54 \mu\text{m}$, 直径 $1.24 \pm 0.03 \mu\text{m}$ (图 2-I; 图 3-I; 表 2)。

2.2.8 微毛

微毛是触角表皮的衍生物, 毛体光滑, 基部无基窝, 毛体从触角表面长出, 呈 45° 夹角, 端部尖锐, 略弯曲。主要分布在第 I~IV 鞭小节上, 梗节也有少量分布, 尤其是第 I 鞭小节分布最密集, 6 圈微毛环绕而生。雌虫长 $4.31 \pm 0.24 \mu\text{m}$, 直径 $0.59 \pm 0.05 \mu\text{m}$; 雄虫长 $7.98 \pm 1.34 \mu\text{m}$, 直径 $0.60 \pm 0.03 \mu\text{m}$ (图 2-D; 图 3-E; 表 2)。

表 2 牛角花齿蓟马成虫触角传感器的形态特征
Table 2 Morphological characteristics of antennal sensilla in male and female of *Odontothrips loti*

类型 Type	性别 Gender	样本数 N	长度 (μm) Length	直径 (μm) Diameter	外壁 Wall	顶部 Tip	基座 Socket	分布位置 Position
氏鬃毛	雌 Female	7	4.44 ± 0.08	0.89 ± 0.03	光滑 Smooth	钝 Blunt	宽 Wide	柄节、梗节 Scape, Pedicel
BB, Böhm bristles	雄 Male	7	2.71 ± 0.71	0.78 ± 0.01	光滑 Smooth	钝 Blunt	宽 Wide	柄节、梗节 Scape, Pedicel
刺形感器 I	雌 Female	10	19.38 ± 1.82	1.58 ± 0.05	槽纹 Grooved	尖锐 Sharp	紧凑 Tight	除鞭小节 VI 外均有分布 Distributed in all segments except flagellomere VI
SChI, Sensilla chaetica I	雄 Male	10	13.93 ± 1.66	1.27 ± 0.14	槽纹 Grooved	尖锐 Sharp	紧凑 Tight	除鞭小节 VI 外均有分布 Distributed in all segments except flagellomere VI
刺形感器 II	雌 Female	10	30.62 ± 1.46	1.88 ± 0.09	槽纹 Grooved	钝 Blunt	紧凑 Tight	鞭小节 V、VI Flagellomere V, VI
SChII, Sensilla chaetica II	雄 Male	10	24.33 ± 1.66	1.32 ± 0.04	槽纹 Grooved	钝 Blunt	紧凑 Tight	鞭小节 V、VI Flagellomere V, VI
锥形感器 I	雌 Female	5	51.90 ± 1.24	7.90 ± 0.07	槽纹 Grooved	尖锐 Sharp	宽 Wide	鞭小节 I、II Flagellomere I, II
SBI, Sensilla basiconica I	雄 Male	5	34.63 ± 1.58	4.81 ± 0.17	槽纹 Grooved	尖锐 Sharp	宽 Wide	鞭小节 I、II Flagellomere I, II
锥形感器 II	雌 Female	5	10.65 ± 0.69	2.20 ± 0.17	槽纹 Grooved	钝 Blunt	宽 Wide	鞭小节 I、II Flagellomere I, II
SBI, Sensilla basiconica II	雄 Male	5	8.41 ± 0.35	1.77 ± 0.05	槽纹 Grooved	钝 Blunt	宽 Wide	鞭小节 I、II Flagellomere I, II
锥形感器 III	雌 Female	5	45.02 ± 0.96	5.11 ± 0.06	槽纹 Grooved	钝 Blunt	宽 Wide	鞭小节 III – V Flagellomere III – V
SBI, Sensilla basiconica III	雄 Male	5	32.01 ± 1.33	3.99 ± 0.04	槽纹 Grooved	钝 Blunt	宽 Wide	鞭小节 III – V Flagellomere III – V
钟形感器	雌 Female	5	–	4.15 ± 0.09	光滑 Smooth	–	宽 Wide	梗节 Pedicel
SCa, Sensilla campaniformia	雄 Male	5	–	3.95 ± 0.06	光滑 Smooth	–	宽 Wide	梗节 Pedicel
腔锥形感器	雌 Female	7	8.32 ± 0.19	2.06 ± 0.16	槽纹 Grooved	钝 Blunt	宽 Wide	鞭小节 III、IV Flagellomere III, IV
SCo, Sensilla coeloconica	雄 Male	7	6.72 ± 0.09	1.93 ± 0.03	槽纹 Grooved	钝 Blunt	宽 Wide	鞭小节 III、IV Flagellomere III, IV
腔形感器	雌 Female	5	–	2.03 ± 0.03	光滑 Smooth	–	宽 Wide	鞭小节 I、III Flagellomere I, III
SCav, Sensilla cavity	雄 Male	–	–	–	–	–	–	鞭小节 I、III Flagellomere I, III
毛形感器	雌 Female	5	19.94 ± 0.73	1.68 ± 0.04	光滑 Smooth	尖锐 Sharp	紧凑 Tight	鞭小节 VI Flagellomere VI
ST, Sensilla trichodea	雄 Male	5	18.5 ± 0.54	1.24 ± 0.03	光滑 Smooth	尖锐 Sharp	紧凑 Tight	鞭小节 VI Flagellomere VI
微毛	雌 Female	10	4.31 ± 0.24	0.59 ± 0.05	光滑 Smooth	尖锐 Sharp	紧凑 Tight	梗节、鞭小节 I-IV Pedicel, Flagellomere I-IV
Mt, Microtrichia	雄 Male	10	7.98 ± 1.34	0.60 ± 0.03	光滑 Smooth	尖锐 Sharp	紧凑 Tight	梗节、鞭小节 I- IV Pedicel, Flagellomere I-IV

注：“–”表示没有数据；N 表示触角的样本数量(根)。Note: “–” indicated no data; N indicated the number of antenna samples.

3 结论与讨论

通过扫描电镜观察,发现牛角花齿蓟马雌、雄成虫触角形态相似,但雌虫触角比雄虫略长,除梗节无明显差异外,其它各亚节雌虫均较雄虫粗长。雌、雄虫触角共观察鉴定到7种类型感器,即 Böhm 氏鬃毛、刺形感器、锥形感器、钟形感器、腔锥形感器、腔形感器、毛形感器,以及一类表皮衍生物——微毛。其中刺形感器和锥形感器数量较多,其它几种感器数量较少,表明牛角花齿蓟马感器类型多样。

Böhm 氏鬃毛体小,在昆虫触角上数量较少,主要是单个或成对分布在柄节基部和梗节与柄节相接的节间,在鞘翅目(徐伟等,2019)、鳞翅目(狄贵秋等,2020)、双翅目(袁珂等,2020)和缨翅目(Zhu *et al.*, 2017)等昆虫中,表现出分布的保守性。丁艳红等(2010)将西花蓟马的 Böhm 氏鬃毛定义成角锥形感器,但多数学者根据 Schneider (1964)的方法将其划分成独立的感器类型之一,如美洲棘蓟马(Hu *et al.*, 2020)、茶黄蓟马(Zhu *et al.*, 2017)和茶棍蓟马(吕召云等,2015)。研究表明 Böhm 氏鬃毛可通过本体感受机械刺激,减缓触角下沉的重力作用,调节触角的运动状态和位置(Schneider, 1964; Krishnan *et al.*, 2012)。牛角花齿蓟马触角 Böhm 氏鬃毛的形态和分布特点与以上昆虫描述类似,可能具有感受机械刺激的功能。

牛角花齿蓟马触角刺形感器有 SchI 和 SChII 两种类型, SchI 稍短,略弯曲,末端尖锐,除在柄节和梗节零星分布外,主要分布于鞭节 I~V 侧面。SChII 较 SchI 长,直立,末端圆钝,仅分布于第 VI 鞭小节。这两种类型感器与西花蓟马、花蓟马、禾花蓟马、美洲棘蓟马、茶黄蓟马和茶棍蓟马的刺形感器形态特征和分布特点基本相同。另外,除丁艳红等(2010)将西花蓟马的 SchI 和 SChII 分别定义成剑状刺形感器和长锥形感器外,以上6种蓟马均鉴定为刺形感器 SchI 和 SChII。Slifer 和 Sekhon (1974)曾将刺形感器定义为“触毛”(tactile hair),推测其具有感受机械刺激的作用。透射电镜发现造瘿蓟马 *Kladothrips intermedius* (de Facci *et al.*, 2011)和茶黄蓟马(Hu *et al.*, 2020)的刺形感器 SchI 末端均无端孔,内部也无神经元树突,但 SChII 末端均有一端孔,并且内部

含有神经元树突结构。同样,Isidoro 等(1998)发现油菜蓝跳甲 *Psylliodes chrysocephala* 长刺形感器内有5~6个神经元,其中一个神经元树突与端孔相连,电生理试验也证实化学感受细胞对油菜挥发物反应敏感。这表明鞭节侧面的刺形感器 SchI,特别是柄节和梗节上的 SchI 可能与感知机械刺激有关,而鞭节末端的较长 SChII 能更易感受环境刺激,具有感知机械和化学刺激的双重作用。虽然本次试验未对牛角花齿蓟马触角感器进行透射电镜解剖观察,但该蓟马刺形感器 SchI 和 SChII 也很可能分别具有感知外界机械刺激和感受化学刺激的功能。

锥形感器的表面多孔、具槽纹的结构是薄壁嗅觉感器的典型特征,通常被认为可以感受寄主释放的挥发物(Lopes *et al.*, 2002)。牛角花齿蓟马的 SBI 感器锥体粗大,在第 I、II 鞭小节各分布一个,这类感器在蓟马触角上的分布数量和位置较保守(涂洪涛等,2011;李维娜和冯纪年,2013;Zhu *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2019)。透射电镜发现茶黄蓟马的3种锥形感器 SBI、SBII 和 SBIII 的锥腔内均含有数量较多的神经元树突,这是感器执行嗅觉功能的重要依据(Zhu *et al.*, 2017)。因此,推测分布于牛角花齿蓟马雌、雄虫触角鞭节的锥形感器也可能参与到感知植物挥发物的嗅觉过程中。

钟形感器在不同昆虫触角中的分布位置和功能存在差异,通常认为着生于梗节上的属于本体机械类感受器,可感知环境温度变化(Mclver, 1975; Skordos *et al.*, 2002),而分布在鞭节上的是味觉感受器(Must, 2006; Ahmed *et al.*, 2013)。缨翅目昆虫钟形感器 Sca 的分布较保守,在茶棍蓟马(吕召云等,2015)、花蓟马(李维娜和冯纪年,2013)和茶黄蓟马(Zhu *et al.*, 2017)中,此类感器均着生在梗节上,鞭节上未发现。因此,分布在牛角花齿蓟马触角梗节上的钟形感器很可能具有感知应力机械变化和环境温度变化的双重功能。

许多昆虫的腔锥形感器表面具纵纹,有微孔,内部有双层膜结构的典型特征(Altner and Loftus, 1985; Hunger and Steinbrecht, 1998; Zhu *et al.*, 2017),这类感器在缨翅目昆虫触角上的分布位置是一致的,均在第 III、IV 鞭节上(de Facci *et al.*, 2011; Zhu *et al.*, 2017; Hu *et al.*, 2020)。透射电镜发现茶黄蓟马的腔锥形感器内部有多个不分枝

的神经元树突, 每个树突周围淋巴液中含有较多嗅觉受体蛋白, 类似的结构在其它昆虫触角中也被发现 (MacKay *et al.*, 2014; Zhu *et al.*, 2017), 而且这类传感器可以感知寄主植物释放的挥发物组分 (Pophof *et al.*, 2005), 所以牛角花齿蓟马的腔锥形传感器也可能执行识别寄主挥发物的功能。

牛角花齿蓟马雌虫触角发现腔形传感器, 但雄虫触角未观察到, 这与茶棍蓟马的此类传感器在雌虫触角特异性分布类似 (吕召云等, 2015)。牛角花齿蓟马腔形传感器分布于触角第 I、III 鞭小节, 周围伴生刺形传感器, 与锥形传感器 SBIII 和腔锥形传感器相近, 这符合温湿度传感器和嗅觉传感器共分布的特点 (Alter and Prillinger, 1980), 推测此类传感器的作用与感受环境温度变化相关。

毛形传感器在牛角花齿蓟马触角上分布数量极少, 仅分布在 VI 鞭小节。茶黄蓟马触角上的此类传感器表面光滑、无孔, 推测是一类机械性刺激感受器 (Zhu *et al.*, 2017)。

微毛在牛角花齿蓟马触角上分布数量较多, 环状分布于第 I~IV 鞭节上。透射电镜发现微毛内部并无神经元树突结构, 表明其不参与嗅觉过程 (Zhu *et al.*, 2017)。

本研究利用扫描电镜对苜蓿重要害虫——牛角花齿蓟马雌、雄虫触角传感器进行了超微形态观察, 比较了触角结构、传感器类型以及分布特点在雌、雄种间的差异, 并分析了不同传感器可能具有的功能。研究结果为进一步研究此虫的化学生态学提供基础资料, 但本研究仅明确了蓟马触角扫描电镜的形态特征, 在后续工作中需结合透射电镜、单细胞记录仪等技术深入探究触角传感器的功能。

参考文献 (References)

- Ahmed T, Zhang TT, Wang ZY, *et al.* Morphology and ultrastructure of antennal sensilla of *Macrocentrus cingulum* Brischke (Hymenoptera: Braconidae) and their probable functions [J]. *Micron*, 2013, 50: 35–43.
- Altner H, Loftus R. Ultrastructure and function of insect thermo- and hygroreceptors [J]. *Annual Review of Entomology*, 1985, 30: 273–295.
- Altner H, Prillinger L. Ultrastructure of invertebrate chemo-, thermo-, and hygroreceptors and its functional significance [J]. *International Review of Cytology*, 1980, 67: 69–139.
- Cao Y, Zhi JR, Cong CL, *et al.* Olfactory cues used in host selection by *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) in relation to host suitability [J]. *Journal of Insect Behavior*, 2014, 27: 41–56.
- Cao Y, Li C, Yang H, *et al.* Laboratory and field investigation on the orientation of *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) to more suitable host plants driven by volatiles and component analysis of volatiles [J]. *Pest Management Science*, 2019, 75 (3): 598–606.
- Ding YH, Zhuge PP, Wang MJ, *et al.* Scanning electron microscopic observations of antennal sensilla of *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) [J]. *Chinese Bulletin of Entomology*, 2010, 47 (1): 165–171. [丁艳红, 诸葛飘飘, 王满囤, 等. 西花蓟马触角传感器的扫描电镜观察 [J]. 昆虫知识, 2010, 47 (1): 165–171]
- Di GQ, Ma QH, Ma WC, *et al.* Ultrastructure of the antennal sensilla of the fall webworm, *Hyphantria cunea* (Drury) (Lepidoptera: Erebidæ) [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2020, 48 (3): 95–99. [狄贵秋, 马庆辉, 马维超, 等. 美国白蛾触角传感器超微结构 [J]. 东北林业大学学报, 2020, 48 (3): 95–99]
- de Facci M, Wallen R, Hallberg E, *et al.* Flagellar sensilla of the eusocial gall-inducing thrips *Kladothrips intermedius* and its kleptoparasite, *Koptothrips dyskritus* (Thysanoptera: Phlaeothripinae) [J]. *Arthropod Structure & Development*, 2011, 40 (6): 495–508.
- He CG, Wang SS, Cao ZZ, *et al.* Field evaluation on resistance of 40 *Medicago* cultivars (Lines) to thrips [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2007, 16 (5): 79–83. [贺春贵, 王森山, 曹致中, 等. 40 个苜蓿品种 (系) 对蓟马田间抗性评价 [J]. 草业学报, 2007, 16 (5): 79–83]
- Hou J, He CG. Determination of bioactivity of six insecticides against common pests on alfalfa [J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2006, 26 (1): 5–6. [侯军, 贺春贵. 6 种杀虫剂对苜蓿常见害虫的生物活性测定 [J]. 陕西农业科学, 2006, 26 (1): 5–6]
- Hua L, Tao ZJ, Jia ZK, *et al.* Studies on the biology characteristics of *Odontothrips loti* [J]. *Journal of Northwest A & F University* (Natural Science Edition), 2007, 35 (9): 110–116. [花蕾, 陶志杰, 贾志宽, 等. 牛角花齿蓟马 *Odontothrips loti* 的生物学特性 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2007, 35 (9): 110–116]
- Huang LL, Luo TP, Zhu JX, *et al.* Scanning electro micrographs of sensilla on the antenna of *Scirtothrips dorsalis* Hood [J]. *Plant Quarantine*, 2016, 30 (5): 44–48. [黄丽莉, 罗涛朋, 祝建新, 等. 茶黄蓟马触角的扫描电镜观察 [J]. 植物检疫, 2016, 30 (5): 44–48]
- Hu QL, Li WN, Feng JN. Morphology, distribution, ultrastructure, and possible function of the external sensilla on antennae and mouthparts of *Echinothrips americanus* Morgan (Thysanoptera: Thripidae) [J]. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2020, 23: 599–605.
- Hunger T, Steinbrecht RA. Functional morphology of a double-walled multiporous olfactory sensillum: The sensillum coeloconicum of *Bombyx mori* (Insecta, Lepidoptera) [J]. *Tissue & Cell*, 1998, 30: 14–29.

- Isidoro N, Bartlett E, Ziesmann J, *et al.* Antennal contact chemosensilla in *Psylliodes chrysocephala* responding of cruciferous allelochemicals [J]. *Physiological Entomology*, 1998, 23 (2): 131–138.
- Krishnan A, Prabhakar S, Sudarsan S, *et al.* The neural mechanisms of antennal positioning in flying moths [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2012, 215: 3096–3105.
- Li WN, Feng JN. Ultrastructure of antennal sensilla in three species of *Frankliniella occidentalis* Karny (Thysanoptera: Thripidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2013, 56 (9): 1088–1100. [李维娜, 冯纪年. 三种花蓟马触角感器的超微结构 [J]. 昆虫学报, 2013, 56 (9): 1088–1100]
- Lv ZY, Zhi JR, Zhou YF, *et al.* Scanning electron microscopic observations of antennal sensilla of tea stick thrips (*Dendrothrips minowai* Priesner) [J]. *Journal of Tea Science*, 2015, 35 (2): 185–195. [吕召云, 鄧军锐, 周玉锋, 等. 茶棍蓟马 (*Dendrothrips minowai* Priesner) 触角感器的扫描电镜观察 [J]. 茶叶科学, 2015, 35 (2): 185–195]
- Lopes O, Barata EN, Mustaparta H, *et al.* Fine structure of antennal sensilla basiconica and their detection of plant volatiles in the eucalyptus woodborer, *Phoracantha semipunctata* Fabricius (Coleoptera: Cerambycidae) [J]. *Arthropod Structure & Development*, 2002, 31 (1): 1–13.
- Mithofer A, Boland W, Maffei ME. Chemical ecology of plant–insect interactions [J]. *Annual Plant Reviews*, 2018, 34: 261–291.
- Mclver SB. Structure of cuticular mechanoreceptors of arthropods [J]. *Annual Review of Entomology*, 1975, 20: 381–397.
- Must A. Electrophysiological responses of the antennal campaniform sensilla to rapid changes of temperature in the ground beetles *Pterostichus oblongopunctatus* and *Poecilus cupreus* (Tribe Pterostichini) with different ecological preferences [J]. *Physiological Entomology*, 2006, 31: 278–285.
- MacKay CA, Sweeney JD, Hillier NK. Morphology of antennal sensilla of the brown spruce longhorn beetle, *Tetropium fuscum* (Fabr.) (Coleoptera: Cerambycidae) [J]. *Arthropod Structure & Development*, 2014, 43 (5): 469–475.
- Na J, Yu WX, Li YP, *et al.* Types and physiological ecology significance of insect antenna sensilla [J]. *Journal of Shenyang Normal University* (Natural Science), 2008, 26 (2): 213–216. [那杰, 于维熙, 李玉萍, 等. 昆虫触角感器的种类及其生理生态学意义 [J]. 沈阳师范大学学报 (自然科学版), 2008, 26 (2): 213–216]
- Pophof B, Stange G, Abrell L. Volatile organic compounds as signals in a plant–herbivore system: Electrophysiological responses in olfactory sensilla of the moth *Cactoblastis cactorum* [J]. *Chemical Senses*, 2005, 30: 51–68.
- Schneider D. Insect antennae [J]. *Annual Review of Entomology*, 1964, 9 (1): 103–122.
- Shields VDC. Ultrastructure of Insect Sensilla. In Capinera JL, ed, *Encyclopedia of Entomology*, Second Ed [M]. New York: Springer-Verlag press, 2008: 4009–4023.
- Slifer EH, Sekhon SS. Sense organs on the antennae of two species of thrips (Thysanoptera, Insecta) [J]. *Journal of Morphology*, 1974, 143 (4): 445–450.
- Skordos A, Chan PH, Vincent JF, *et al.* A novel strain sensor based on the campaniform sensillum of insects [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A, Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 2002, 360: 239–253.
- Teulon DAJ, Davidson MM, Perry NB, *et al.* Methyl isonicotinate–a non-pheromone thrips semiochemical and its potential for pest management [J]. *International Journal of Tropical Insect Science*, 2017, 37 (2): 50–56.
- Tu HT, Zhang JY, Chen HJ, *et al.* Scanning electron microscopic observation of sensilla on the antenna of *Scolothrips takahashii* [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27 (1): 162–165. [涂洪涛, 张金勇, 陈汉杰, 郭小辉, 等. 塔六点蓟马触角感受器的扫描电镜观 [J]. 中国农学通报, 2011, 27 (1): 162–165]
- Wu YF, Zhao XH, Temuerbuhe. The thrips are main injurious insects of alfalfa production in China [J]. *Grassland of China*, 1990, 3: 65–66. [吴永敷, 赵秀华, 特木尔布和. 蓟马是我国苜蓿生产的主要害虫 [J]. 中国草地, 1990, 3: 65–66]
- Wang XS, Shaukat A, Han Y, *et al.* Morphology and distribution of the antennal sensilla of two species, *Megalurothrips usitatus* and *Thrips palmi* (Thysanoptera: Thripidae) [J]. *Insects*, 2019, 10 (8): 251. doi.org/10.3390/insects10080251.
- Xu W, Fan RD, Wu MY, *et al.* Ultrastructure of the sensilla on the antennae of *Colposcelis signata* [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2019, 42 (1): 227–236. [徐伟, 樊瑞冬, 伍名渊, 等. 斑鞘豆叶甲触角感器的超微结构 [J]. 环境昆虫学报, 2019, 42 (1): 227–236].
- Yuan K, Zhu H, Qu YK, *et al.* Observation of antennal sensilla of flower–visiting insect *Bibio rufiventris* (Diptera: Bibionidae) with scanning electron microscope [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2020, 63 (4): 439–449. [袁珂, 朱慧, 曲业宽, 等. 访花昆虫红腹毛蚊触角感器扫描电镜观察 [J]. 昆虫学报, 2020, 63 (4): 439–449]
- Zhang B, Zhou MQ, Wang J, *et al.* Species checklist and research status of alfalfa insect pests reported in China [J]. *Pratacultural Science*, 2016, 33 (4): 785–812. [张奔, 周敏强, 王娟, 等. 我国苜蓿害虫种类及研究现状 [J]. 草业科学, 2016, 33 (4): 785–812]
- Zhang R, Ma JH, Wang JH, *et al.* The occurrence and control strategy of alfalfa disease and insects in Ningxia [J]. *Pratacultural Science*, 2003, 20 (6): 40–44. [张蓉, 马建华, 王进华, 等. 宁夏苜蓿病虫害发生现状及防治对策 [J]. 草业科学, 2003, 20 (6): 40–44]
- Zacharuk RY. Ultrastructure and function of insect chemosensillar [J]. *Annual Review of Entomology*, 1980, 25: 27–47.
- Zhu WJ, Zhou SH, Wang SJ, *et al.* Ultrastructure and distribution of antennal sensilla of the chilli thrips *Scirtothrips dorsalis* hood (Thysanoptera: Thripidae) [J]. *Microscopy Research & Technique*, 2017, 80 (12): 1283–1296.