

咖啡灭字虎天牛触角和足感器的形态与分布观察

王 政, 孙世伟, 孟倩倩, 刘爱勤*, 桑利伟, 苟亚峰, 高圣凤

(中国热带农业科学院香料饮料研究所, 海南省热带香辛饮料作物遗传改良与品质调控重点实验室, 万宁 571533)

摘要 咖啡灭字虎天牛 *Xylotrechus quadripes* Chevrolat 是咖啡树的重要害虫, 其以幼虫钻蛀为害木质部的特点造成防治十分困难。本文利用扫描电镜对新羽化的咖啡灭字虎天牛雌、雄成虫触角、前足感器类型及分布进行了观察, 结果表明: 该虫触角呈线状, 共 11 节, 可分为 3 部分: 柄节、梗节和鞭节(9 亚节)。雌、雄成虫触角感器共有 5 类, 分别为刺形感器、锥形感器、凹槽钉形感器、栓锥形感器、Böhm 氏鬃毛, 其中刺形和锥形感器各有 3 个亚型, 不同类型的感器在触角各节上的数量和分布均有差异。雌、雄成虫触角感器存在性二型现象, 栓锥形感器为雄虫所特有。前足为步行足, 感器共有 3 类, 分别为刺形感器、锥形感器和毛形感器, 其中刺形感器有 5 个亚型, 雌、雄成虫足感器无性二型现象。

关键词 咖啡灭字虎天牛; 触角; 前足; 感器; 扫描电镜

中图分类号: S 433.5, Q 964 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2017481

Morphology and distribution of the sensilla on the antenna and propodium of *Xylotrechus quadripes* Chevrolat (Coleoptera: Cerambycidae)

WANG Zheng, SUN Shiwei, MENG Qianqian, LIU Aiqin, SANG Liwei, GOU Yafeng, GAO Shengfeng

(Spice and Beverage Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Hainan Provincial Key Laboratory of Genetic Improvement and Quality Regulation for Tropical Spice and Beverage Crops, Wanning 571533, China)

Abstract *Xylotrechus quadripes* Chevrolat is the foremost pest of arabica coffee. Damage inflicted to coffee stems by wood-boring larvae causes difficulty in chemical control. In this study, the sensilla on the antenna and propodium of male and female adults of *X. quadripes* were observed under scanning electron microscope. The results showed that the linear antenna consisted of scape, pedicel and flagellum (composed of nine subsegments). Five types of sensilla were found on the antenna, including sensilla chaetica (subtype I, II, III), sensilla basiconica (subtype I, II, III), sensilla grooved peg, sensilla styloconica and Böhm bristles. The quantity and distribution of each kind of sensillum differed among segments of the antenna. However, sexual dimorphism in sensillum was apparent; sensilla styloconica was only observed on male antenna. The propodium belongs to walking leg, on which three types of sensilla were found, including sensilla chaetica (subtype I, II, III, IV, V), sensilla basiconica and sensilla trichodea. The types and morphology of sensilla on the propodium were similar between male and female adults.

Key words *Xylotrechus quadripes*; antenna; propodium; sensillum; scanning electron microscope

咖啡灭字虎天牛 *Xylotrechus quadripes* Chevrolat, 又名咖啡灭字脊虎天牛, 属鞘翅目 Coleoptera 天牛科 Cerambycidae 天牛亚科 Cerambycinae, 主要为害小粒种咖啡 *Coffea arabica* L., 是我国咖啡产业的主要害虫之一。该虫以幼虫为害树干, 初期蛀食表皮层, 随后进入木质部, 在咖啡树干中蛀出曲折纵横交错的隧道, 致使树势衰弱, 枝叶枯黄, 严

重时整株死亡^[1]。其幼虫长期隐蔽于树干木质部, 而成虫羽化时间也不一致, 造成化学防治较为困难^[2]。天牛同其他昆虫一样, 触角等头部附器及足等部位分布有大量感器, 能识别外界环境中的各种气味、温湿度等因子, 经神经传导作出各种应答反应, 从而产生相应的行为, 如定位寄主、寻找配偶和选择适当的栖息地等^[3-6], 因此可从害虫行

收稿日期: 2017-12-26

修订日期: 2018-01-16

基金项目: 中国热带农业科学院基本科研业务费专项(1630142017004)

* 通信作者 E-mail: laq3680@163.com

为调控着手寻找防治新方法。目前,已鉴定出咖啡灭字虎天牛雄性信息素的主要组分为(S)-2-羟基-3-癸酮^[7-8],这为性引诱剂的开发利用奠定了基础。然而关于该虫性信息素化学通讯分子机制的研究鲜有报道,其偏好取食小粒种咖啡的原因也未明确,因此本研究通过扫描电镜观察了咖啡灭字虎天牛雌、雄成虫触角和前足的感器类型及分布,以期为进一步研究其取食、求偶等行为提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

咖啡灭字虎天牛采自海南省澄迈县福山镇咖啡种植园,取有钻蛀孔的咖啡枝条带回实验室后置于养虫笼中,在温度(26±1)℃,相对湿度 75%±5%,光周期 L//D=14 h//10 h 条件下待其自然羽化,新羽化的成虫用于试验观察。

1.2 样品制备与观察

取新羽化的雌、雄成虫各 5 头,用镊子和手术刀分别将触角和前足从基部小心分离;将取下的触角和足分别浸入 70%乙醇溶液中,超声波清洗 15 s,除去组织表面黏附物;用 2.5%戊二醛固定 24 h,然后依次用 75%、80%、85%、90%、95%和 100%的乙醇溶液进行梯度脱水,各浓度脱水 5 min;最后用 100%乙酸异戊酯浸泡,4℃保存。

电镜观察前将样品进行二氧化碳临界点干燥,再将干燥好的样品用导电银胶小心粘在样品台上,真空喷涂仪(Quorum k850)喷金。镀金后的样品在热场发射扫描电镜(ZEISS ΣIGMA)下观察、照相,加速电压为 5 kV。

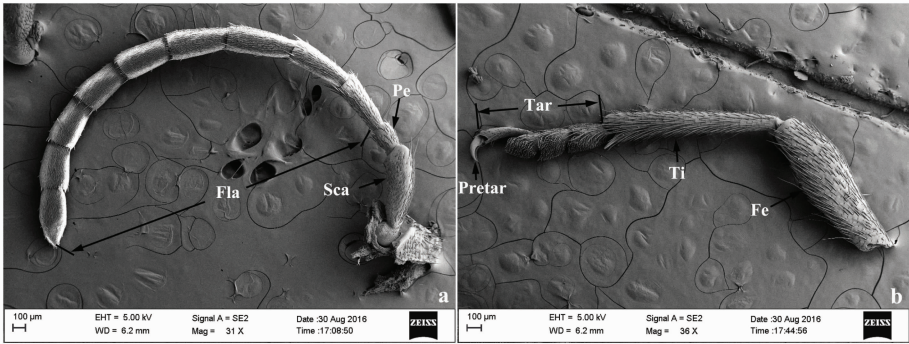
1.3 感器的鉴定与图像处理

感器的鉴定和命名参照 Schneider 和 Chinta 等标准^[9-10];利用 Photoshop CS4 (Adobe System, USA)进行图像的后编辑^[11]。

2 结果与分析

2.1 触角和前足的一般形态

咖啡灭字虎天牛雌、雄成虫触角均为线状(图 1a),呈黑褐色,约为体长的 1/2,雌性触角长度为(5.75±0.86)mm,雄性为(4.10±0.70)mm。触角由柄节、梗节和鞭节 3 部分组成,共 11 个亚节,其中鞭节有 9 个亚节,梗节最短,约为头宽的 1/6,柄节长度约为梗节的 2 倍,鞭节最长,各节表面具有细小的感觉孔(cuticular pores, CP)和隆起的鳞片状花纹(图 2c)。该虫前足为步行足(walking legs),由基节、转节、股节、胫节、跗节和前跗节 6 部分组成,其中:前跗节具 2 个侧爪,构造简单,无附齿;跗节有 4 个亚节,分节明显,第 1~3 跗节腹面有大量弯曲呈棍棒状的感觉毛簇;胫节端部内侧具 2 个齿(图 1b)。前足各节表面也具鳞片状花纹(图 3a)。



a: 触角: 柄节(Sc)、梗节(Pe)和鞭节(Fl); b: 前足: 股节(Fe)、胫节(Ti)、跗节(Ta)和前跗节(Pre)
a: Antenna: scape (Sc), pedicel (Pe) and flagellum (Fl); b: Propodium: femur (Fe), tibia (Ti), tarsus (Ta) and pretarsus (Pre)

图 1 咖啡灭字虎天牛触角和前足的整体形态

Fig. 1 The overall morphology of antenna and propodium of *Xylotrechus quadripes*

2.2 触角感器类型与分布

咖啡灭字虎天牛雌、雄成虫触角共有 5 类 9 种感器,分别为刺形感器(sensilla chaetica, SC)、锥形感器(sensilla basiconica, SB)、凹槽钉形感器(sensilla grooved peg, SGP)、栓锥形感器(sensilla

styloconica, SS)和 Böhm 氏鬃毛(Böhm bristles, BB),其中刺形感器和锥形感器各有 3 个亚型,即刺形感器 I、II、III 型和锥形感器 I、II、III 型。鞭节以刺形感器为主,在刺形感器间隙散生有锥形和凹槽钉形感器;梗节和柄节仅分布刺形感器和 Böhm 氏

鬃毛。成虫触角感器存在性二型现象，栓锥形感器位于雄虫触角鞭节，雌虫未发现。

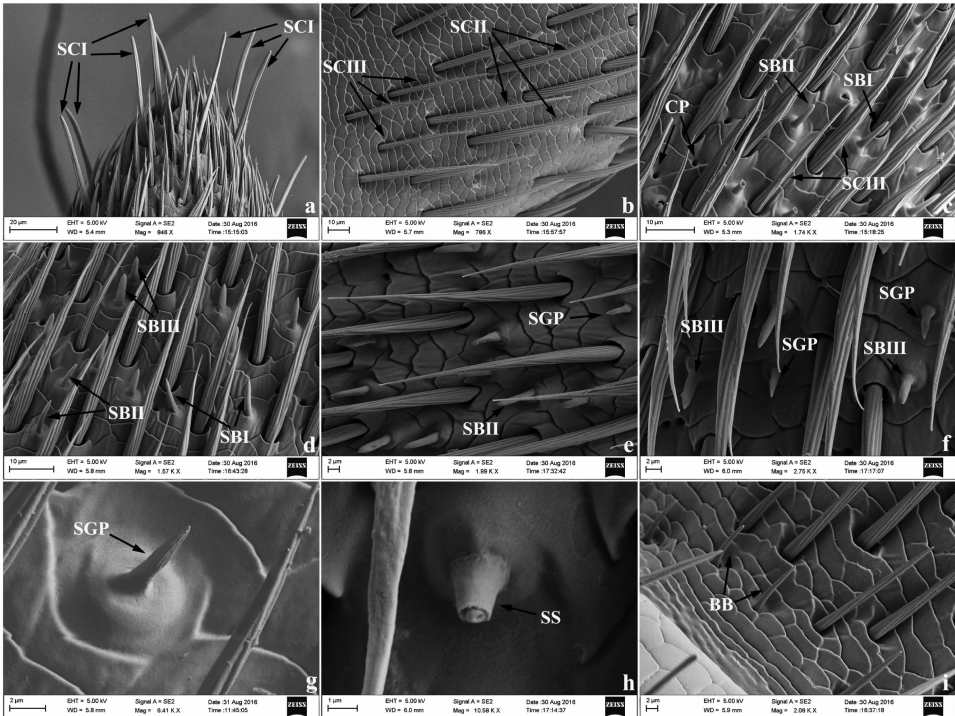
2.2.1 刺形感器(SC)

刺形感器是咖啡灭字虎天牛触角上数量最多、分布最广的感受器，在触角柄节、梗节和鞭节均有分布。该感器外形刚直如刺，其向触角纵轴端部倾斜呈一定夹角，明显高于其他类型感器，表面具较深纵纹，由基部向端部渐细，有臼状窝。根据感器长度和端部形态可分为长钝刺形感器(I型)、长尖刺形感器(II型)和短尖刺形感器(III型)3种：其中长钝刺形感器主要位于鞭节第9亚节末端，数量较少，其端部钝尖，与纵轴夹角较II、III型感器大，表面纵纹由基部向端部均匀延伸(图2a)，雌虫触角上该感器长度为 $(50.40 \pm 3.67) \mu\text{m}$ ，雄性个体为 $(53.72 \pm 2.38) \mu\text{m}$ ；长尖刺形感器数量较多，其端部尖细，表面具倒“V”字形纵脊，与纵轴夹角一般小于 30° (图2b)，雌虫触角上该感器长度为 $(67.53 \pm 1.33) \mu\text{m}$ ，雄性个体为 $(66.06 \pm 2.89) \mu\text{m}$ ；短尖刺形感器数量最多，其形态与II型感器相似，但长度较短(图2b,c)，雌虫

触角上该感器长度为 $(42.37 \pm 4.31) \mu\text{m}$ ，雄性个体为 $(42.39 \pm 1.64) \mu\text{m}$ 。

2.2.2 锥形感器(SB)

锥形感器分布于鞭节第3~9亚节，散生在刺形感器间隙，数量较少。该感器直立于触角表面或指向触角端部生长，较其他感器短小，表面光滑无纵纹，端部较钝，基部有突起的圆台形底座，无臼状窝。根据感器形态和端部尖细程度可分为尖锥形感器(I型)、钝锥形感器(II型)和钝圆锥形感器(III型)3种：其中尖锥形感器外形直立或略弯，由基部向端部渐窄，端部较尖细(图2c,d)，雌虫触角上该感器长度为 $(8.46 \pm 0.22) \mu\text{m}$ ，雄性个体为 $(7.77 \pm 0.84) \mu\text{m}$ ；钝锥形感器外形直立或自然弯曲，整体与I型感器相似，但端部较钝(图2c,d,e)，雌虫触角上该感器长度为 $(6.36 \pm 0.42) \mu\text{m}$ ，雄性个体为 $(6.35 \pm 0.67) \mu\text{m}$ ；钝圆锥形感器外形直立，呈圆柱状，整体较I、II型感器粗壮，端部钝尖(图2d,f)，雌虫触角上该感器长度为 $(6.96 \pm 0.87) \mu\text{m}$ ，雄性个体为 $(5.50 \pm 0.83) \mu\text{m}$ 。



a: 长钝刺形感器(SC I); b: 长尖刺形感器(SC II)、短尖刺形感器(SC III); c: 短尖刺形感器(SC III)、尖锥形感器(SB I)、钝锥形感器(SB II)、感觉孔(CP); d: 尖锥形感器(SB I)、钝锥形感器(SB II)、钝圆锥形感器(SB III); e: 钝锥形感器(SB II)、凹槽钉形感器(SGP); f: 钝圆锥形感器(SB III)、凹槽钉形感器(SGP); g: 凹槽钉形感器(SGP); h: 栓锥形感器(SS); i: Böhm氏鬃毛(BB)
a: Sensilla chaetica I (SC I); b: Sensilla chaetica II (SC II), sensilla chaetica III (SC III); c: Sensilla chaetica III (SC III), sensilla basiconica I (SB I), sensilla basiconica II (SB II), cuticular pores (CP); d: Sensilla basiconica I (SB I), sensilla basiconica II (SB II), sensilla basiconica III (SB III); e: Sensilla basiconica II (SB II), sensilla grooved peg (SGP); f: Sensilla basiconica III (SB III), sensilla grooved peg (SGP); g: Sensilla grooved peg (SGP); h: Sensilla styloconica (SS); i: Böhm bristles (BB)

图2 咖啡灭字虎天牛触角感器的类型及形态

Fig. 2 Types and morphology of sensilla on the antenna of *Xylotrechus quadripes*

2.2.3 凹槽钉形感器(SGP)

凹槽钉形感器零星分布于鞭节,数量极少。该感器外形似螺钉,着生于宽阔的圆台形底座,由基部1/3处至端部有较深刻槽,端部尖细,呈指形聚合状(图2e,f,g)。雌虫触角上该感器长度为 $(5.21 \pm 0.11) \mu\text{m}$,雄性个体为 $(4.53 \pm 0.36) \mu\text{m}$ 。

2.2.4 栓锥形感器(SS)

栓锥形感器仅分布于鞭节,为雄虫所特有,雌虫触角上未发现。该感器由表皮突起形成锥状,基部较宽,着生于圆盘形底座,端部较窄,顶端中心凹陷成一个小窝(图2h)。该感器基部直径为 $(2.04 \pm 0.06) \mu\text{m}$,端部直径为 $(1.06 \pm 0.06) \mu\text{m}$,长度为 $(2.29 \pm 0.10) \mu\text{m}$ 。

2.2.5 Böhm氏鬃毛(BB)

Böhm氏鬃毛主要分布于梗节和柄节基部,成簇排列在节间周围,数量较少。该感器表面光滑,由基部向端部均匀变细,外形呈尖锥状,端部尖如刺,基部有臼状窝(图2i)。雌虫触角上该感器长度为 $(16.68 \pm 4.54) \mu\text{m}$,雄性个体为 $(21.07 \pm 5.08) \mu\text{m}$ 。

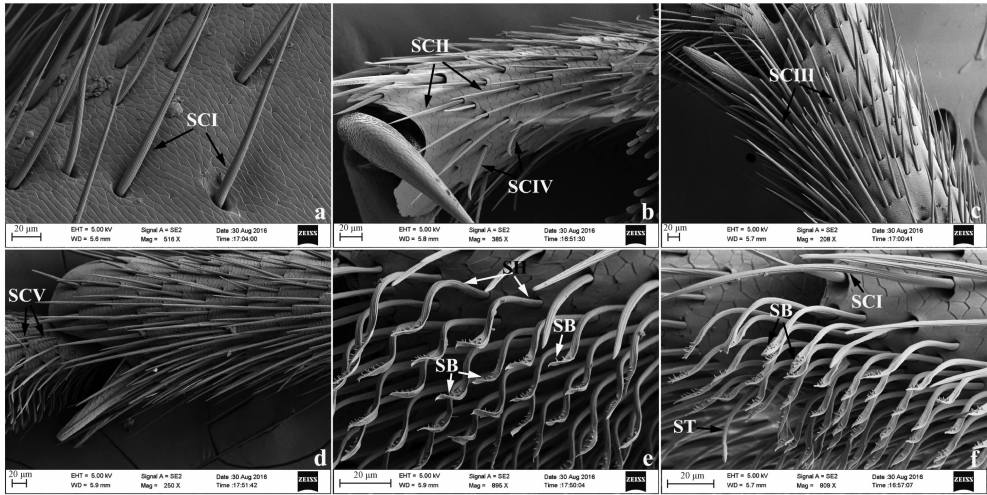
2.3 前足感器类型与分布

咖啡灭字虎天牛雌、雄成虫前足共有3类7种感器,分别为刺形感器(sensilla chaetica, SC)、锥形感器(sensilla basiconica, SB)和毛形感器(sensilla trichodea, ST),其中刺形感器有5个亚型,即刺形感器I、II、III、IV和V型。跗节以刺形感器为主,分布有锥形和毛形感器;胫节和股节仅分布刺形感器。

雌、雄成虫前足感器类型与分布无明显差异。

2.3.1 刺形感器(SC)

刺形感器在前足各节均有分布,数量多。该感器与触角同类感器相似,表面有深纵纹,由基部至端部渐尖细,端部尖如刺,基部有臼状窝。根据感器长度和端部形态可分为长尖刺形感器(I型)、短尖刺形感器(II型)、长钝刺形感器(III型)、短钝刺形感器(IV型)和短毛刺形感器(V型)5种;其中长尖刺形感器外形直立或呈自然弯曲状,表面具倒“V”字形纵脊,数量多,是该虫前足最长的感器类型(图3a,f),雌虫前足上该感器长度为 $(161.34 \pm 30.70) \mu\text{m}$,雄性个体为 $(167.44 \pm 13.81) \mu\text{m}$;短尖刺形感器与I型感器类似,仅长度略短,数量较多(图3b),雌虫前足上该感器长度为 $(67.26 \pm 11.89) \mu\text{m}$,雄性个体为 $(89.32 \pm 11.00) \mu\text{m}$;长钝刺形感器主要分布于跗节背面和胫节腹面,表面也具倒“V”字形纵脊,端部钝尖,数量较少(图3c),雌虫前足上该感器长度为 $(125.56 \pm 27.76) \mu\text{m}$,雄性个体为 $(109.65 \pm 22.13) \mu\text{m}$;短钝刺形感器散生于I型感器间隙,表面具均匀纵纹,端部钝尖,数量较少(图3b),雌虫前足上该感器长度为 $(41.67 \pm 9.16) \mu\text{m}$,雄性个体为 $(30.75 \pm 2.02) \mu\text{m}$;短毛刺形感器主要分布于跗节和胫节基部,与II型感器相似,但外形纤细似毛状,且长度较短,数量较少(图3d),雌虫前足上该感器长度为 $(35.90 \pm 8.16) \mu\text{m}$,雄性个体为 $(37.02 \pm 6.53) \mu\text{m}$ 。



a: 长尖刺形感器(SC I); b: 短尖刺形感器(SC II)、短钝刺形感器(SC IV); c: 长钝刺形感器(SC III); d: 短毛刺形感器(SC V); e: 锥形感器(SB)、感觉毛(SH); f: 毛形感器(ST)、锥形感器(SB)、长尖刺形感器(SC I)
a: Sensilla chaetica I (SC I); b: Sensilla chaetica II (SC II), sensilla chaetica IV (SC IV); c: Sensilla chaetica III (SC III); d: Sensilla chaetica V (SC V); e: Sensilla basiconica (SB), sensory hair (SH); f: Sensilla trichodea (ST), sensilla basiconica (SB), sensilla chaetica I (SC I)

图 3 咖啡灭字虎天牛前足感器的类型及形态

Fig. 3 Types and morphology of sensilla on the propodium of *Xylotrechus quadripes*

2.3.2 锥形感器(SB)

锥形感器主要分布于跗节第1~3亚节腹面的感觉毛上,感觉毛弯曲呈曲棍状,端部膨大,每根感觉毛端部膨大处着生一至十余个锥形感器不等,数量多。该感器呈三角锥状,表面光滑无纵纹,由基部向端部渐细,端部钝尖,基部无臼状窝(图3e,f),雌虫前足上该感器长度为 $(1.73 \pm 0.66) \mu\text{m}$,雄性个体为 $(1.57 \pm 0.55) \mu\text{m}$ 。

2.3.3 毛形感器(ST)

毛形感器零星分布于跗节第1~3亚节感觉毛簇间隙,数量极少。该感器表面光滑,由基部向端部渐细,略弯曲,端部较钝(图3f),雌虫前足上该感器长度为 $(43.37 \pm 4.08) \mu\text{m}$,雄性个体为 $(38.84 \pm 3.71) \mu\text{m}$ 。

3 讨论

天牛生活在多种信息化合物综合作用的环境中,其中有影响其定位寄主的植物气味,也有联系种内、种间化学通讯的外激素等信息化学物质,它们对天牛的取食、交配和防御等系列行为具有重要的意义^[12-13]。感受器是昆虫体壁表皮特化形成的薄壁结构,由毛原细胞、感觉神经细胞组成,是感受周围环境刺激的重要器官^[3]。本研究对咖啡灭字虎天牛触角和前足感器扫描电镜观察结果表明,该虫触角有5类9种感器,前足有3类7种感器,这些结果可从微观形态方面为该虫化学通讯机制研究提供基础。

目前对昆虫感器类型的鉴别尚无统一标准,不同学者根据直观形态特征或参考近缘种感器特征进行命名,因此对于同类或形态相似的感器命名在不同昆虫中可能存在一定差异,有待制定统一的命名规则。例如,多数学者将触角柄节和梗节基部成簇分布的尖锥状感器命名为Böhm氏鬃毛,而该感器在光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis* (Motschulsky)触角感器的研究中被命名为刺形感器Ⅳ型^[14],魏建荣等认为锥形感器即为Böhm氏鬃毛,并将栗山天牛 *Massicus raddei* (Blessig)触角上该感器分为7个亚型^[4]。Merivee等发现叩甲 *Limoniinus aeruginosus* (Olivier)的锥形感器Ⅳ型端部具纵向凹槽,这与云杉八齿小蠹 *Ips typographus* Linnaeus双壁锥感器、暗锥尾叩甲 *Agriotes obscurus* Linnaeus锥形感器Ⅶ型、烟草甲虫 *Lasioderma serricorne* (Fabricius)栓锥形感器和云杉松齿小蠹 *Ips pini* (Say)槽锥感器等结构相似^[15-19]。本文咖啡灭

字虎天牛触角凹槽钉感器与绿豆象 *Callosobruchus chinensis* (Linnaeus)、四纹豆象 *C. maculatus* (Fabricius)和筛胸梳爪叩甲 *Melanotus cribricollis* (Faldernmann)等grooved pegs(GP)感器的命名一致^[20-21],该感器形态结构与上述4种锥形感器类似,推测应为同一感器不同名称。另外本文描述的该虫触角各节上的感觉孔(图2C)与红缘天牛 *Asias halodendri* (Pallas)触角表面的表皮孔一致^[13],同时两者与栗山天牛触角上的微孔感器(sensillum microporous, SM)十分相似^[4],推测也为同一结构或感器。

一般认为昆虫生活环境越简单,感器类型与数量就较少,反之昆虫的生活环境越复杂,感器的类型和数量就越多,并且有部分感器形状发生变异,这可能是昆虫为适应环境所做出的进化选择^[22]。不同类型的感器可能有着不同的作用,同一感器可能也有不同功能:如刺形感器除具有感受机械刺激的作用外,还对化学刺激、求偶微环境、温湿度等选择行为环境敏感^[10,23],咖啡灭字虎天牛触角Ⅰ、Ⅱ型和前足Ⅰ、Ⅲ型刺形感器均为长刺形感器,明显长于其他感器,能率先接触到环境,推测可感受机械刺激,其余几个亚型均为短刺形感器,推测它们不仅仅是形态上存在差异,可能具有感受化学刺激、温湿度等不同功能;锥形感器是重要的嗅觉感知器官^[24-25],咖啡灭字虎天牛锥形感器分布于触角鞭节第3~9亚节和前足跗节第1~3亚节,表明触角和前足末端可能是感受化学信息的敏感部位,然而该感器在触角上有3个亚型,推测与云斑天牛 *Batocera lineolata* Chevrolat相似,可用于识别不同类别的化学物质^[26];凹槽钉形感器被认为是化学和温度感器^[16,27],在青杨脊虎天牛 *Xylotrechus rusticus* L.等部分天牛科昆虫中也有描述^[28],咖啡灭字虎天牛该感器与它们形状类似,推测也是一种嗅觉感器;栓锥形感器被认为是触角内容物的延伸,具有感受湿度、味觉和嗅觉的功能^[29],该感器仅在咖啡灭字虎天牛雄虫触角上发现,推测可识别性信息素等物质;Böhm氏鬃毛一般具有感受重力的作用^[9],根据其位于柄节和梗节基部的分布特征,推测能接受触角的移动和位置等信息^[25,30];毛形感器具有触觉、嗅觉和机械感受等功能^[25,29],咖啡灭字虎天牛该感器被大量感觉毛簇覆盖,推测不是触觉或机械感受器,可能也具嗅觉感受功能。本研究基于其他昆虫感器研究结果推测分析了咖啡灭字虎天牛各类感器的功

能,但昆虫体表感器是长期进化的结果,要深入了解各感器在该虫适应环境过程中的作用,还需结合电生理和分子生物学等技术进一步研究。

参考文献

- [1] 舒梅,成文章,李忠恒,等. 思茅咖啡灭字脊虎天牛发生与危害调查[J]. 热带农业科学, 2016, 36(5): 81-84.
- [2] 杨文波,吴国星,徐志强,等. 管氏肿腿蜂对咖啡灭字脊虎天牛寄生作用的研究[J]. 环境昆虫学报, 2017, 39(2): 405-410.
- [3] 马瑞燕,杜家纬. 昆虫的触角感器[J]. 昆虫知识, 2000, 37(3): 179-183.
- [4] 魏建荣,丁保福,唐艳龙,等. 栗山天牛成虫触角感器形态与分布观察[J]. 应用昆虫学报, 2013, 50(5): 1289-1294.
- [5] 王政,孟倩倩,钟国华. 植食性昆虫取食行为过程及机制研究[J]. 环境昆虫学报, 2014, 36(4): 605-612.
- [6] 赵红盈,高宇,马晓乾,等. 光肩星天牛足跗节感器超微结构观察[J]. 中国农学通报, 2016, 32(17): 40-43.
- [7] RHAINDS M, LAN C C, KING S, et al. Pheromone communication and mating behaviour of coffee white stem borer, *Xylotrechus quadripes* Chevrolat (Coleoptera: Cerambycidae) [J]. Applied Entomology & Zoology, 2001, 36(3): 299-309.
- [8] HALL D R, CORK A, PHYTHIAN S J, et al. Identification of components of male-produced pheromone of coffee white stem borer, *Xylotrechus quadripes* [J]. Journal of Chemical Ecology, 2006, 32(1): 195-219.
- [9] SCHNEIDER D. Insect antennae [J]. Annual Review of Entomology, 1964, 9: 103-122.
- [10] 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 & Embryology, 1997, 26(1): 21-26.
- [11] 崔俊芝,葛斯琴. 图像处理软件 Adobe Photoshop 和 Adobe Illustrator 在昆虫绘图及图像处理中的应用[J]. 应用昆虫学报, 2012, 49(5): 1406-1411.
- [12] 宁眺,刘拥军,孙江华. 松墨天牛成虫头部感器超微结构的观察[J]. 昆虫知识, 2004, 41(6): 566-571.
- [13] 肖方叔,刘强. 红缘天牛嗅觉感器的类型及特点[J]. 应用昆虫学报, 2011, 48(3): 680-687.
- [14] 闫雄飞,孙月琴,刘永华,等. 光肩星天牛触角感受器的环境扫描电镜观察[J]. 林业科学, 2010, 46(11): 104-113.
- [15] MERIVEE E, RAHI M, BRESCIANI J, et al. Antennal sensilla of the click beetle, *Limoniuss aeruginosus* (Olivier) (Coleoptera: Elateridae) [J]. International Journal of Insect Morphology & Embryology, 1998, 27(4): 311-318.
- [16] HALLBERG E. Sensory organs in *Ips typographus* (Insecta; Coleoptera)-fine structure of antennal sensilla [J]. Protoplasma, 1982, 11(3): 206-214.
- [17] MERIVEE E. Antennal sensilla of the female and male elaterid beetle *Agriotes obscurus* L. (Coleoptera: Elateridae) [J]. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Biology, 1992, 41: 189-215.
- [18] OKADA K, MORI M, SHIMAZAKI K, et al. Morphological studies on the antennal sensilla of the cigarette beetle *Lasioderma serricorne* (F.) (Coleoptera: Anobiidae) [J]. Applied Entomology & Zoology, 1992, 27: 269-276.
- [19] FAUCHEUX M J. Distribution and abundance of antennal sensilla from two populations of the pine engraver beetle *Ips pini* (Say) (Coleoptera: Scolytidae) [J]. Annales des Sciences Naturelles, Zoologie, Paris, 1994, 15(1): 15-31.
- [20] HU F, ZHANG G N, WANG J J. Scanning electron microscopy studies of antennal sensilla of bruchid beetles, *Callosobruchus chinensis* (L.) and *Callosobruchus maculatus* (F.) (Coleoptera: Bruchidae) [J]. Micron, 2009, 40(3): 320-326.
- [21] 彭观地,舒金平,张爱良,等. 筛胸梳爪叩甲触角感器的电镜扫描观察[J]. 林业科学, 2012, 48(8): 106-114.
- [22] 陈湖海,康乐. 蝗虫触角感受器及其生态学意义[J]. 动物学杂志, 1998, 33(3): 46-49.
- [23] ALMAAS T J, MUSTAPARTA H. *Heliothis virescens*: Response characteristics of receptor neurons in sensilla trichodea type 1 and type 2 [J]. Journal of Chemical Ecology, 1991, 17(5): 953-972.
- [24] GIGLIO A, PERROTTA E, TALARICO F, et al. Sensilla on maxillary and labial palps in a helicophagous ground beetle larva (Coleoptera, Carabidae) [J]. Acta Zoologica, 2013, 94(3): 324-330.
- [25] 王涛. 红脂大小蠹成虫触角感器的扫描电镜观察[J]. 植物保护, 2017, 43(2): 112-116.
- [26] 诸葛飘飘,罗森林,王满困,等. 云斑天牛头部附器感器的扫描电镜观察[J]. 林业科学, 2010, 46(5): 116-123.
- [27] ALTNER A H, LOFTUS R. Ultrastructure and function of insect thermo- and hygroreceptors [J]. Annual Review of Entomology, 1985, 30(1): 273-295.
- [28] 程红,严善春,徐波,等. 青杨脊虎天牛触角主要感器的超微结构及其分布[J]. 昆虫知识, 2008, 45(2): 223-232.
- [29] 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.
- [30] BARTLET E, ROMANI R, WILLIAMS I H, et al. Functional anatomy of sensory structures on the antennae of *Psylliodes chrysocephala* L. (Coleoptera: Chrysomelidae) [J]. International Journal of Insect Morphology & Embryology, 1999, 28(4): 291-300.

(责任编辑:田喆)