

梁运, 周友军, 吴红敏, 等. 柳杉毛虫成虫触角的超微形态与性别差异 [J]. 福建农业学报, 2023, 38 (6): 739–745.
LIANG Y, ZHOU Y J, WU H M, et al. Morphological Differentiations on Antennae of Male and Female *Dendrolimus houi* [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 38 (6): 739–745.

柳杉毛虫成虫触角的超微形态与性别差异

梁 运¹, 周友军¹, 吴红敏¹, 陈登建², 吴淑梅³, 张珠河³, 梁光红^{1*}

(1. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002; 2. 宁德市古田县林业局, 福建 宁德 352100;
3. 福州市林业局森防站, 福建 福州 350002)

摘 要:【目的】探究柳杉毛虫成虫雌雄个体触角超微形态及性别差异, 为研究柳杉毛虫不同寄主的搜索、定位能力以及化学感知机制差异奠定基础。【方法】利用扫描电子显微镜对初羽化雌雄成虫的触角普通形态以及超微形态进行观察与比较。【结果】柳杉毛虫雌雄成虫的触角均为黄褐色, 雄蛾羽毛状, 雌蛾短栉齿状; 雌雄成虫共有 6 类 13 种感器, 包括毛形感器 2 种、锥形感器 1 种、刺形感器 3 种、栓锥形感器 3 种、腔锥形感器 2 种、Böhm 氏鬃毛 2 种。成虫触角感器具有性二型现象, 主要表现为锥形感器为雌蛾触角特有, 毛形感器 II 型为雄蛾触角特有; 此外, 雄蛾触角侧枝腹面毛形感器 I 型排列较整齐, 在长度、数量上与雌蛾差异显著 ($P<0.05$), 通常 6~8 根排成一排, 中间间隔处散布 1~2 根毛形感器 II 型, 而雌成虫侧枝腹面毛形感器 I 型排列则无规律。【结论】柳杉毛虫雌雄成虫触角在普通形态上大体相似, 但在侧枝的长度以及宽度上存在显著差异; 二者多数感器在类型、结构与数量上相同, 但锥形感器和毛形感器 II 型分别是雌雄成虫各自特有的感器, 并在感器类型及数量上具有显著差异, 可能在其寄主与配偶定位、产卵等方面发挥重要作用。

关键词: 柳杉毛虫; 触角感器; 超微形态; 性别差异

中图分类号: S763.42+1 文献标志码: A 文章编号: 1008-0384 (2023) 06-0739-07

Morphological Differentiations on Antennae of Male and Female *Dendrolimus houi*

LIANG Yun¹, ZHOU Youjun¹, WU Hongmin¹, CHEN Dengjian², WU Shumei³, ZHANG Zhuhe³, LIANG Guanghong^{1*}

(1. Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2. Gutian County Forestry Bureau, Ningde, Fujian 352100, China; 3. Forest Protection Station, Fuzhou Forestry Bureau, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: 【Objective】Antennae of *Dendrolimus houi* were examined under a scanning electron microscope (SEM) for the morphological differences that might relate to functional differentiations between the male and female moths. 【Methods】SEM images of the antennae of newly emerged male and female *D. houi* were obtained for an ultrastructural comparison. 【Results】The yellowish brown antennae of the male pine moths had a feather-like appearance, while that of the female resembled a short-tooth-comb. They both had 13 distinctive types of sensilla in 6 classifications including 2 sensilla trichodea, 1 sensilla basiconica, 3 sensilla chaetica, 3 sensilla styloconica, 2 sensilla coeloconica, and 2 Böhm bristles. The sexual dimorphism on adult *D. houi* was evident by the sensilla basiconica of the females and the sensilla trichodea II of the males shown on the antenna surface. In addition, there were more numerous and longer 6-8 sensilla trichodea I that were orderly aligned in a row with 1-2 sensilla trichodea II in between on the abdomen of the lateral branches of the male antenna than those of the female organ ($P<0.05$). 【Conclusion】The ultrastructure of the moth antennae revealed by SEM displayed the significant differences between the male and female *D. houi* on the length and quantity of the lateral branch sensilla trichodea I. The fact that sensilla basiconica existed only on the female moths and the sensilla trichodea II exclusively on the male adults might be indicative of distinctive roles of them in host-selection, mating behavior, or other biological functions of the insect species.

收稿日期: 2022-12-01 初稿; 2023-05-24 修改稿

作者简介: 梁运 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 森林昆虫学 (E-mail: 1200429003@fafu.edu.cn)

* 通信作者: 梁光红 (1975—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 森林昆虫学 (E-mail: fjlhg@126.com)

基金项目: 福建省科技计划引导性项目 (2021N0002); 福建省林业科技推广项目 (2023TG16); 福州市林业科学技术研究项目 [榕财农 (指) (2022) 81 号]; 国家自然科学基金项目 (31870641)

Key words: *Dendrolimus houi* (Lajonquiere); antennal sensilla; ultra-morphology; sexual differentiation

0 引言

【研究意义】柳杉毛虫 (*Dendrolimus houi* Lajonquiere) 又名云南松毛虫、大柏毛虫, 属鳞翅目枯叶蛾科松毛虫属, 广泛分布于我国南方地区^[1-2], 主要危害柳杉 (*Cryptomeria fortunei* Hooibrenk ex Otto)、柏木 (*Cupressus funebris* Endl.)、云南松 (*Pinus yunnanensis* Franch.)、湿地松 (*Pinus elliottii* Engelm.)、马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) 等针叶树种, 常造成不同程度的生物灾害^[3-4]。通过对柳杉毛虫触角传感器的观察有助于深入了解柳杉毛虫不同地理种群触角传感器差异, 为解析潜在的种群分化及形成寄主宗提供初步证据。【前人研究进展】柳杉毛虫属于典型的两性生殖方式, 表明雌雄个体对异性具有精准的定位能力; 成虫在选择性与非选择性产卵试验中都优先选择柳杉、柏木产卵^[5]; 野外调查也发现, 柳杉毛虫雌成虫通常将卵粒散产或堆产于寄主植物上, 且在不同寄主植物上产卵频次和产卵量存在差异, 进一步表明它们对嗜食寄主也具有精确的定位能力和不同程度的偏好性^[6-9]。而触角是昆虫的感觉器官, 触角上的传感器是外部环境与昆虫神经系统之间的关键接口, 位于这些传感器中的特异性受体细胞用来探测环境, 并将有关信息传递给中枢神经系统, 再由中枢神经系统引发相应的神经冲动做出各种行为反应^[10]。【本研究切入点】柳杉毛虫雌雄成虫具有不同的生殖性能和种群繁衍职责^[11], 对配偶与寄主植物的专化性极强, 表现出精准的定位能力, 但关于柳杉毛虫触角及传感器形态结构的研究还有待深入探讨。【拟解决的关键问题】探明柳杉毛虫雌、雄成虫的触角普通形态与超微形态差异, 预测上述差异与不同功能之间的关系, 以期为进一步研究柳杉毛虫触角传感器功能和机制奠定基础。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

柳杉毛虫越冬卵块于 2020 年 2 月采自福建省宁德市霞浦县 (26°25′至 27°07′N, 119°46′至 120°26′E)。将采集的卵粒平铺在养虫盒 (长×宽×高=19 cm×9 cm×6 cm) 中, 并将其置于光周期 12:12 (L:D), 温度 (25±1) °C, 相对湿度 70%±10% 的人工气候箱 (上海一恒科学仪器有限公司, MGC-300H, 20L) 待其孵化。孵化后每日定时更换新鲜柳杉枝叶供幼虫取食, 并做好清洁。待其蜕皮、结茧、化蛹。取

15 日龄虫茧置于尼龙纱网养虫笼 (长×宽×高=75 cm×75 cm×75 cm) 待其羽化。羽化后, 选取尚未交配、状态良好、当天羽化的雌雄成虫观察触角。

1.2 制样及观测

取羽化后触角结构完整的柳杉毛虫雌、雄成虫各 5 头, 在体视显微镜 (SZM-41, 奥斯微光学仪器) 下观察普通形态。然后将触角完整切下, 除去表面异物; 采用 45% 乙醇数控超声清洗 15 min, 然后用超纯水清洗; 洗净样品在 4 °C 下以 2.5% 的戊二醛溶液固定 24 h; 固定后的触角样品分别用 50%、60%、70%、80%、90%、无水乙醇逐级脱水, 每级脱水 10 min; 干燥 24 h 后用双面导电胶将其固定在样品台上, 在真空环境下喷金镀膜, 最后将样品置于扫描电子显微镜 (Phenom ProX, 飞纳中国) 下观察、拍照, 记录传感器的长度、基部直径、腔直径等。

1.3 数据处理

利用 ImageJ 1.8.0 统计触角各类传感器的数量、分布, 根据标尺测量各传感器长度、直径等。利用 Excel 2019 和 SPSS 19.0 计算平均值和标准差, 采用 *t* 检验对雌雄成虫触角同类传感器的长度和基部直径等进行显著性分析, 独立性检验的显著性水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 柳杉毛虫成虫触角普通形态

雄蛾触角羽毛状, 雌蛾触角短栉齿状, 均为黄褐色, 由柄节、梗节和鞭节组成, 其中鞭节由 77~78 个鞭亚节组成, 每个鞭亚节上均具有 1 对对生的羽毛状侧枝, 侧枝与鞭节纵轴腹面呈 30°~90°夹角, 夹角开口朝向顶端, 雌雄成虫在侧枝的长度以及宽度上存在显著差异 ($P<0.05$, 表 1)。触角各节上均密被鳞片, 传感器着生在触角鞭节侧枝的腹面, 少数着生在侧枝背面 (图 1)。

2.2 柳杉毛虫触角传感器超微形态

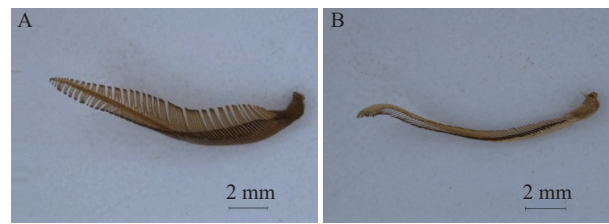
观察发现, 柳杉毛虫雌雄成虫触角传感器主要有毛形传感器 2 种、锥形传感器 1 种、刺形传感器 3 种、栓锥传感器 3 种、腔锥传感器 2 种、Böhm 氏鬃毛 2 种等 6 类 13 种。各传感器形态特征如下。

2.2.1 毛形传感器 (Sensilla trichodea, ST) 毛形传感器集中分布在鞭亚节侧枝腹面, 传感器壁表面光滑无孔, 通体纤细, 着生于鳞状三角形相互交叠形成的凹陷处, 基部无臼状窝, 从基部向端部逐渐变细。根据形状以及长度可分为两种类型: 毛形传感器 I 型 (ST I) 和毛形传感器 II 形 (ST II)。ST I 呈长毛状,

表 1 柳杉毛虫触角结构
Table 1 Structure of *D. houi* antenna

成虫性别 Adult sex	触角长度 Antennal length	鞭亚节 Flagellate nodes		侧枝 Lateral branch	
		长度 length/ μm	数量 number	长度 length/ μm	宽度 width/ μm
雌 Male	14.78 $\pm$ 1.21 a	152.65 $\pm$ 6.48 a	77.00 $\pm$ 2.24 a	821.17 $\pm$ 139.46b	71.83 $\pm$ 4.88 a
雄 Female	15.34 $\pm$ 0.61 a	173.50 $\pm$ 7.19 a	78.71 $\pm$ 2.12 a	1 803.76 $\pm$ 133.12 a	64.27 $\pm$ 4.61 b

表中数据为平均值 $\pm$ 标准差，同列数据后不同小写字母表示同一触角特征数据在雌雄间差异显著 ($P<0.05$, t 检验),下同。
Datas are mean $\pm$ standard deviation; those with different lowercase letters on same column indicate significant difference on traits of male and female antennae ($P<0.05$, t test). Same for below.



A-雄蛾触角；B-雌蛾触角。
A: male antenna; B: female antenna.
图 1 柳杉毛虫成虫触角形态
Fig. 1 Morphology of adult *D. houi* antenna

末端纤细，感器与触角表面呈约 30°夹角，向触角末端前倾，大量分布于触角侧枝腹面凹陷处（图 2-A），但雄蛾数量和长度均远大于雌蛾（表 2）。ST II 相较 ST I 更纤细而短小，顶部稍弯曲（图 2-A），散布于雄成虫侧枝腹面中央，沿雄蛾触角侧枝端部逐渐增多。从排列来看，ST I 在雄蛾触角侧枝腹面排列整齐，常呈 6~8 根排成一排，中间间隔处散布 1~2 根 ST II，雌蛾成虫触角侧枝腹面毛形感器排列杂乱。从形态来看，毛形感器直立形、顶端弯曲、基部弯曲或双弯曲 4 种亚型。

2.2.2 锥形感器（Sensilla basiconica, SB）锥形感器形态特征与毛形感器相似（图 2-B），但端部较钝，数量较少，着生部位也不同。直立于侧枝背面或稍弯曲，基部无臼状窝，通常与侧枝呈 30°~45°夹角，夹角方向朝向侧枝端部。感器表面有较多的孔，壁薄，具纵向纹理，基部较毛形感器略细。在雌蛾触角上，除端部第 3~4 根侧枝无锥形感器分布外，其余侧枝背面均散生 1~3 根，常与刺形感器间隔分布；雄蛾触角侧枝背面则无锥形感器分布。

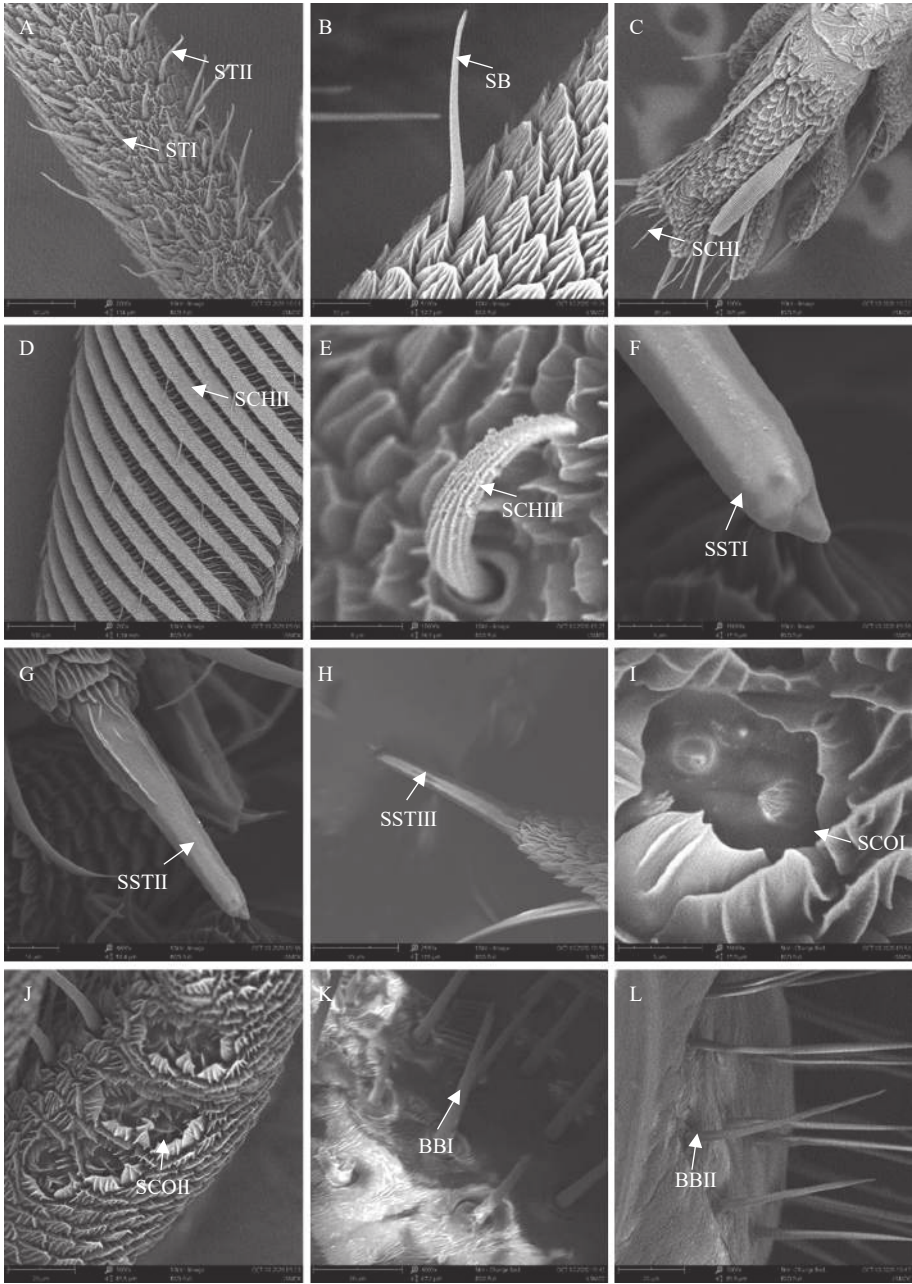
2.2.3 刺形感器（Sensilla chaetica, SCH）刺形感器为长刺状，顶端较尖，基部钝圆具有臼状窝，表面有纵纹，纵纹自基部向端部逐渐消隐；较毛形感器明显更粗、更长，但数量少于毛形感器（表 2），常分布于每个侧枝端部与侧枝背面 1/2~2/3 处，每个侧枝 1~2 个，少数 3 个。柳杉毛虫成虫刺形感器共

有 SCH I 型（图 2-C）、SCH II 型（图 2-D）、SCH III 型（图 2-E）3 种，其中 SCH I 型呈线状，不弯曲，与触角侧枝生长方向一致，末端较尖，分布于侧枝端部；SCH II 型常弯曲如钩，或在 2/3 处弯曲呈近 90°角，端部较 SCH I 型略钝，常分布于侧枝背面；SCH III 型呈弯月形，弧度较大，末端无钩状，较 SCH I 型钝，着生于侧枝背面。

2.2.4 栓锥形感器（Sensilla styloconica, SST）栓锥形感器形似手指，表皮隆起，具棱，较毛形感器、刺形感器粗壮，呈直立状或略扭曲，部分稍弯曲；基部表面有不连续褶皱，由基部到约 1/2 处消失，顶部具表皮凹陷而形成的圆形腔，圆形腔顶部中央有感觉锥突出表面，其数量与分布在雌雄蛾触角上无明显差异，均分布与鞭节上。栓锥形感器有 3 种亚型：SST I 型，呈指状，顶端形成一锥状小突起，顶端凹陷较明显（图 2-F）；SST II 型，末端侧面有一锥状小突起，形似二分叉（图 2-G）；SST III 型短于其他亚型，末端极尖，锥状突起不明显，似短钉，表面棱明显（图 2-H）。常分布于鞭节侧枝末端中央，在鞭节第 9~12 节至倒数第 5~7 节的侧枝末端呈 30°~45°角分布。

2.2.5 腔锥形感器（Sensilla coeloconica, SCO）腔锥形感器周围为 4~6 个瓣状缘锥，中央着生一感觉锥，顶端钝圆，着生于由具脊纹的鳞状三角形包被形成的凹陷腔内。按照感觉锥周围是否具有缘毛可分为 SCO I（图 2-I）和 SCO II（图 2-J）两种类型，其中 SCO I 的鳞状三角形中间直接将中心感觉锥包被，感觉锥基部较 SCO II 膨大，顶端较钝，为雄蛾特有，常在侧枝背面近端部出现；SCO II 感觉锥四周具缘毛，部分缘毛成锥状，少数呈扁平锥状或二分叉状，相互聚拢，向中心弯曲，遮盖感觉锥。主要分布于触角侧枝背侧面 1/2 处，自末端 1/3 处渐密，少数散生或对生；在鞭节中部及远端侧枝上分布较多。

2.2.6 Böhm 氏鬃毛（Böhm bristles, BB）Böhm 氏鬃毛形比刺形感器短且顶端较尖；垂直或倾斜于触



ST:毛形感器; SB:锥形感器; SCH:刺形感器; SST:栓锥形感器; SCO:腔锥形感器; BB: Böhm 氏鬃毛。

ST: Sensilla trichodea; SB: sensilla basiconica; SCH: sensilla chaetica; SST: sensilla styloconica; SCO: sensilla coeloconica; BB: Böhm bristles.

图 2 柳杉毛虫触角感器超微结构

Fig. 2 Ultrastructure of sensilla on antennae of *D. houi*

角柄节表面的关节窝，基部白状窝明显；在柄节基部成簇分布。按长度和形状可分为 BB I（图 2-K）和 BB II（图 2-L）2 个亚型。BB I 细长，分布于柄节基部背面、腹面中间和两侧，端部尖细锐利，少数 BB I 端部会微微弯曲；BB II 短于 BB I，位于柄节关节面边缘，基部稍膨大，端部收缩明显且稍钝。

2.3 雌雄成虫触角主要形态差异

雌雄成虫触角均为黄褐色，全长与鞭亚节长度均无显著性差异，且感器主要分布在鞭亚节的侧枝

上；除锥形感器感器为雌蛾特有外，雌雄成虫其他感器在种类上基本一致。同时，雌雄成虫触角形态也存在明显的差异，表现为：（1）雄蛾触角羽毛状，雌蛾触角短栉齿状；（2）雌蛾触角上感器类型多于雄蛾感器，且侧枝独具锥形感器；（3）雄蛾的长毛形感器 ST I 更长、基部较宽，且显著多于雌蛾 ($P<0.05$)；雌蛾的刺形感器较长，且基部直径明显大于雄蛾 ($P<0.05$)；雄蛾的 BB I 显著长于雌蛾，基部更宽 ($P<0.05$)；此外雄蛾的 BB II 比雌蛾更细更长 ($P<0.05$ ，表 2)。

表 2 柳杉毛虫触角不同类型感器形态
Table 2 Sensilla morphology of *D. houi* antennae

感器类型 Sensilla type	性别 Sensilla type	长度 Length/ μm	基部直径 Base diameter/ μm	腔直径 Cavity diameter/ μm	感器总数 Total number
毛形感器 I 型 (ST I)	♀	42.23±3.28 b	3.74±0.24 b	—	39 278.24±4 266.80 b
	♂	88.64±7.10 a	4.79±0.13 a	—	62 745.91±9 411.59 a
毛形感器 II 型 (ST II)	♀	—	—	—	—
	♂	29.70±3.60	2.83±0.07	—	18 580.36±1 725.42
锥形感器 (SB)	♀	58.02±5.89	3.06±0.24	—	249.14±10.19
	♂	—	—	—	—
刺形感器 (SCH)	♀	75.09±2.60 a	8.40±0.38 a	—	281.57±6.07 a
	♂	72.53±2.23 b	7.40±0.31 b	—	283.00±6.78 a
栓锥形感器 (SST)	♀	66.70±6.25 a	12.94±1.28 a	—	121.29±4.20 a
	♂	64.24±3.19 a	13.44±1.02 a	—	123.17±4.36 a
腔锥形感器 (SCO)	♀	—	—	12.69±1.19 a	1 252.53±201.71 a
	♂	—	—	14.85±0.49 b	1 217.38±210.94 a
Böhmer氏鬃毛 I 型 (BB I)	♀	73.6±4.68 a	3.45±0.18 b	—	—
	♂	71.90±4.24 a	4.17±0.24 a	—	—
Böhmer氏鬃毛 II 型 (BB II)	♀	47.61±3.63 a	4.06±0.13 a	—	—
	♂	52.34±2.27 b	3.95±0.51 a	—	—

3 讨论与结论

触角是昆虫重要的感觉器官，具有感受气流、二氧化碳、温度和湿度的功能，在昆虫寻找寄主食物、躲避危险以及繁殖后代等行为发挥了重要作用，触角上的感器是实现上述行为的基本单位^[12]。触角上感器的类型、结构、数量和着生部位等受多种因素的影响，如性别、触角形态、习性、食性和地理生境等^[13]。柳杉毛虫成虫触角表面观察到 6 类感器，与鳞翅目其他蛾类昆虫的感器类型相似，与舞毒蛾（*Lymantria dispar* L.）^[14]触角上的感器类型相比，柳杉毛虫成虫触角多栓锥形感器和 Böhm 氏鬃毛；相较于美国白蛾（*Hyphantria cunea* Drury）^[15]的 8 类感器，柳杉毛虫成虫触角上缺少鳞形感器和舌型感器；与云南锦斑蛾（*Achalura yunnanensis* Horie & Xue）^[16]的 7 类感器相比，柳杉毛虫成虫触角上缺少鳞形感器和耳形感器而多栓锥形感器。而与同为枯叶蛾科的栎黄枯叶蛾（*Trabala vishnou gigantina* Yang.）^[17]的 5 类感器相比，柳杉毛虫成虫触角上缺少鳞形感器，但比栎黄枯叶蛾多锥形感器和腔锥形感器，且各感器的超微结构和分布又与栎黄枯叶蛾有所不同，表明枯叶蛾科不同种间感器类型存在一定差异，部分反映了不同枯叶蛾科昆虫生

境及寄主植物的差异性。初步观察发现，柳杉毛虫云南种群与福建种群对同一性引诱剂表现出不同的引诱活性，推测该虫存在地理种群的遗传分化现象；比较二者雄蛾触角超微结构^[11]。

毛形感器是昆虫触角上最普遍、最密集、表面布满小孔的感器，常被认为具有感受性信息素和植物挥发性物的作用^[12,18-19]。柳杉毛虫雄蛾的毛形感器数量、长毛形感器 ST I 的长度和宽度均显著大于雌蛾，结合柳杉毛虫雌雄性别职能分析，推测其感受性信息素的受体细胞可能主要位于 ST I 中^[20]。前人研究发现卷叶螟雄蛾触角上的短毛型感器 ST II 可以对雌虫性信息素和植物挥发物发生反应^[21]。而本研究中，在雄蛾触角上也存在较多 ST II，由此推测 ST II 可能有助于雄蛾搜索配偶及生境。锥形感器是蛾类的另外一种常见的嗅觉感器，其表皮多具有孔状结构，含丰富的嗅觉细胞，具有感受植物挥发物等气味分子的功能^[22]。观察发现，锥形感器仅分布于柳杉毛虫雌蛾，主要分布在触角侧枝背面近端部，感器数量不多，表面小孔较密集，雄性触角上未见此类感器，推测可能对于雌蛾对寄主植物的定位与选择有关。

刺形感器、Böhm 氏鬃毛具有感受机械刺激的功能

能。其中, 柳杉毛虫雌雄蛾刺形感器在触角各侧枝分布广泛, 均直立或近直立于触角表面, 通体粗壮, 其中位于侧枝端部的刺形感器首先接触物体或栖境, 因而认为是感受外来机械刺激的感器; 位于触角侧枝背部的刺形感器可见臼状窝且表面有明显小孔, 一般是担负味觉功能的接触性化学感器, 与雌蛾产卵时对寄主的选择性有关^[23]。此外, Böhm 氏鬃毛是蛾类触角上的非多孔感器, 具有控制触角运动、介导昆虫飞行、缓冲重力等作用^[24]; 由于细长的 BB I 型成簇着生在柄节关节窝中, 比 BB II 更快感受到来自外部的刺激并介导神经冲动, 从而控制触角运动^[25]。推测柳杉毛虫成虫具有两种亚型的 Böhm 氏鬃毛, 且成簇交错生长, 可能具有类似的生理功能, 值得今后研究证实。

腔锥形感器主要感受水蒸气、CO₂、冷刺激和植物气味等^[26]。在柳杉毛虫触角上, 不具缘毛的 SCO I 感器仅在雄蛾触角上出现, 而具缘毛 SCO II 在雌雄个体中均大量存在。两种亚型的中央感觉锥均被瓣状缘锥和缘毛遮盖不易观察, 中央锥体中存在大量的孔, 能够感受植物气味, SCO II 周围的缘毛则被认为具有保护中央锥体的作用^[10], 由此推测, 在柳杉毛虫中相对于直立隆起的感觉锥, 有利于适应于多变的环境, 避免外界机械作用对中央感觉锥所产生的物理损伤。栓锥形感器是也是蛾类触角上的常见感器, 在豆卜馍夜蛾 (*Bomolocha tristalis* Lederer)^[25]、杨背麦蛾 (*Anacampsis populella* Clerck)^[27] 等触角鞭亚节前缘均有一栓锥形感器, 但柳杉毛虫成虫具有更长更粗的栓锥形感器, 有利于增加与空气的接触面积, 对环境的温、湿度感受更为敏感; 而且锥状突起更明显, 并在侧枝端部存在二叉形锥状突起, 可能在柳杉毛虫寄主定位中发挥重要作用。鳞形感器具有感受机械刺激的功能^[28], 但在柳杉毛虫成虫触角上未发现鳞形感器, 推测它们对感受机械刺激的功能较弱。

近年来随着新技术应用与设备的更新迭代, 新的感器不断被发现, 但是各种感器的功能是否具有多样性、不同部位的同种感器的功能差异尚未完全明确, 今后可通过单细胞技术 (SSR) 与嗅觉蛋白的免疫定位试验等技术, 结合昆虫行为学开展进一步研究。

参考文献:

- [1] 刘湘早. 云南松毛虫生物学特性及综合治理 [J]. 西南林学院学报, 2006, 26 (3): 52-54, 58.
- LIU X Z. Study on biological characteristics and its integrated control

- of *Dendrolimus latipennis* [J]. *Journal of Southwest Forestry College*, 2006, 26 (3): 52-54, 58. (in Chinese)
- [2] HAN X H, LU C D, GEIB S M, et al. Characterization of *Dendrolimus houi* Lajonquiere (Lepidoptera: Lasiocampidae) transcriptome across all life stages [J]. *Insects*, 2019, 10 (12): 442.
- [3] 谢先兰, 尹湘春, 袁建光, 等. 云南松毛虫成虫发生规律初探 [J]. 湖南林业科技, 2018, 45 (1): 84-87.
- XIE X L, YIN X C, YUAN J G, et al. A preliminary study on occurrence of adult *Dendrolimus houi* [J]. *Hunan Forestry Science & Technology*, 2018, 45 (1): 84-87. (in Chinese)
- [4] 杨笑如. 云南松毛虫为害湿地松调查及其防治研究 [J]. 江西植保, 2005, 28 (3): 97-99.
- YANG X R. Investigation and control of *Pinus elliottii* damaged by *Dendrolimus yunnanensis* [J]. *Jiangxi Plant Protection*, 2005, 28 (3): 97-99. (in Chinese)
- [5] 华银. 柳杉毛虫对不同寄主的适应性及其生理机制[D]. 福州: 福建农林大学, 2020.
- HUA Y. Adaptability and physiological mechanism of *Dendrolimus houi* to different hosts [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2020. (in Chinese)
- [6] 周友军, 林浩宇, 华银, 等. 福建省柳杉毛虫的发生规律及生物学特性 [J]. 亚热带农业研究, 2019, 15 (1): 20-26.
- ZHOU Y J, LIN H Y, HUA Y, et al. Occurrence regularity and biological characteristics of *Dendrolimus houi* in Fujian Province [J]. *Subtropical Agriculture Research*, 2019, 15 (1): 20-26. (in Chinese)
- [7] 何香, 邹学梅, 尚慧艳, 等. 云南松毛虫在广安市柏木林区的发生规律及生物防治研究 [J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2018, 39 (2): 132-136.
- HE X, ZOU X M, SHANG H Y, et al. The occurrence regularity and biocontrol research of *Dendrolimus houi* Lajonquiere in cypress forest of Guang'an [J]. *Journal of China West Normal University (Natural Sciences)*, 2018, 39 (2): 132-136. (in Chinese)
- [8] 曹先聪, 孔祥波, 张真, 等. 云南松毛虫和思茅松毛虫对四种松树产卵和取食趋性分析 [J]. 中国森林病虫, 2017, 36 (3): 8-12.
- CAO X C, KONG X B, ZAHNG Z, et al. Oviposition and feeding preference of *Dendrolimus houi* and *Dendrolimus kikuchii* to four species of pines [J]. *Forest Pest and Disease*, 2017, 36 (3): 8-12. (in Chinese)
- [9] 华银, 卢赐鼎, 是雨霏, 等. 我国柳杉毛虫研究进展 [J]. 世界林业研究, 2019, 32 (4): 62-68.
- HUA Y, LU C D, SHI Y F, et al. Research advances in *Dendrolimus houi* Lajonquiere of China [J]. *World Forestry Research*, 2019, 32 (4): 62-68. (in Chinese)
- [10] SHIELDS V D C, HILDEBRAND J G. Recent advances in insect olfaction, specifically regarding the morphology and sensory physiology of antennal sensilla of the female sphinx moth *Manduca sexta* [J]. *Microscopy Research and Technique*, 2001, 55 (5): 307-329.
- [11] 谭琼. 基于超微结构探讨松毛虫属部分种的亲缘关系[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.

- TAN Q. Phylogenetic relationship of some *Dendrolimus* species based on ultrastructures[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012. (in Chinese)
- [12] 马瑞燕, 杜家纬. 昆虫的触角感器[J]. 昆虫知识, 2000, 37 (3): 179–183.
- MA R Y, DU J W. Antennal sensilla of insects [J]. *Entomological Knowledge*, 2000, 37 (3): 179–183. (in Chinese)
- [13] OLSSON P C, ANDERBRANT O, LÖFSTEDT C, et al. Electrophysiological and behavioral responses to chocolate volatiles in both sexes of the pyralid moths *Ephesia cautella* and *Plodia interpunctella* [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2005, 31 (12): 2947–2961.
- [14] 马菲, 于艳雪, 陈乃中, 等. 舞毒蛾触角感器的超微结构观察[J]. 植物保护, 2013, 39 (3): 120–123.
- MA F, YU Y X, CHEN N Z, et al. Observation on the ultrastructure of the antennal sensilla in *Lymantria dispar* [J]. *Plant Protection*, 2013, 39 (3): 120–123. (in Chinese)
- [15] 狄贵秋, 马庆辉, 马维超, 等. 美国白蛾触角感器超微结构[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48 (3): 95–99, 104.
- DI G Q, MA Q H, MA W C, et al. Ultrastructure of the antennal sensilla of the fall webworm, *Hyphantria cunea* (Drury) (Lepidoptera: Erebidae) [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2020, 48 (3): 95–99, 104. (in Chinese)
- [16] 李根层, 赵昱杰, 李嘉莉, 等. 云南锦斑蛾成虫触角、喙管和跗节感器超微结构[J]. 昆虫学报, 2020, 63 (11): 1385–1398.
- LI G C, ZHAO Y J, LI J L, et al. Ultrastructure of sensilla on the antennae, proboscis and tarsi of adult *Achelura yunnanensis* (Lepidoptera: Zygaenidae) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2020, 63 (11): 1385–1398. (in Chinese)
- [17] 靳泽荣, 刘志雄, 陈旭鹏, 等. 栎黄枯叶蛾触角感器的扫描电镜观察[J]. 电子显微学报, 2016, 35 (3): 282–285.
- JIN Z R, LIU Z X, CHEN X P, et al. Antennae sensilla of *Trabala vishnou gigantina* observed with scanning electron microscope [J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2016, 35 (3): 282–285. (in Chinese)
- [18] 钦俊德, 王琛柱. 论昆虫与植物的相互作用和进化的关系[J]. 昆虫学报, 2001, 44 (3): 360–365.
- QIN J D, WANG C Z. The relation of interaction between insects and plants to evolution [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2001, 44 (3): 360–365. (in Chinese)
- [19] 余海忠. 昆虫触角感受器研究进展[J]. 安徽农业科学, 2007, 35 (14): 4238–4240, 4243.
- YU H Z. Research progress of insect antennal sensilla [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35 (14): 4238–4240, 4243. (in Chinese)
- [20] HANSSON B S, LARSSON M C, LEAL W S. Green leaf volatile-detecting olfactory receptor neurones display very high sensitivity and specificity in a scarab beetle [J]. *Physiological Entomology*, 1999, 24 (2): 121–126.
- [21] 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): 1069–1081.
- [22] EBBINGHAUS D, LÖSEL P M, LINDEMANN M, et al. Detection of major and minor sex pheromone components by the male codling moth *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) [J]. *Journal of Insect Physiology*, 1997, 44 (1): 49–58.
- [23] DORN A. Comprehensive insect physiology, biochemistry and pharmacology [J]. *International Journal of Biochemistry*, 1985, 17 (11): 1279.
- [24] KRISHNAN A, PRABHAKAR S, SUDARSAN S, et al. The neural mechanisms of antennal positioning in flying moths [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2012, 215 (17): 3096–3105.
- [25] 徐伟, 董亚南, 崔娟, 等. 豆卜馍夜蛾触角感器的超微结构与分布[J]. 植物保护, 2019, 45 (5): 190–196.
- XU W, DONG Y N, CUI J, et al. Ultrastructure and distribution of the sensilla on the antennae of *Bomolocha tristalis* (Lepidoptera: Noctuidae) adult [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (5): 190–196. (in Chinese)
- [26] CARLE T, TOH Y, YAMAWAKI Y, et al. The antennal sensilla of the praying Mantis *Tenodera aridifolia*: A new flagellar partition based on the antennal macro-, micro- and ultrastructures [J]. *Arthropod Structure & Development*, 2014, 43 (2): 103–116.
- [27] 徐伟, 毕嘉瑞, 刘梅, 等. 杨背麦蛾(鳞翅目: 麦蛾科)触角感器的超微结构[J]. 林业科学, 2019, 55 (5): 95–103.
- XU W, BI J R, LIU M, et al. Ultrastructure of antennal sensilla of *Anacampsis populella* (Lepidoptera: Gelechiidae) [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, 55 (5): 95–103. (in Chinese)
- [28] 高宇, 陈宗懋, 孙晓玲. 茶丽纹象甲触角感器的扫描电镜观察[J]. 植物保护, 2013, 39 (3): 45–50.
- GAO Y, CHEN Z M, SUN X L. Antennal sensilla of the tea weevil *Myloccerinus aurolineatus* [J]. *Plant Protection*, 2013, 39 (3): 45–50. (in Chinese)

(责任编辑: 林海清)