

文章编号: 1000-5854(2026)03-0290-07

白颜果蝇成虫头部感器的种类、分布和超微结构

李德伟^{1,2}, 冯煦东¹, 邓 达²

(1. 陕西农发农业科技服务有限公司, 陕西 西安 710018; 2. 西北农林科技大学 植物保护学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 白颜果蝇 *Drosophila auraria* 是果树、蔬菜和食用菌上的重要害虫, 防治十分困难。本研究利用扫描电子显微镜技术对白颜果蝇成虫头部触角、下颚、复眼和额区的感受器种类、数量和超微结构进行了观察研究。结果表明: 白颜果蝇触角为芒羽状, 触角柄节上分布有毛形感器 I, 数量为 (168.00 ± 6.93) 个, 刺形感器 II, 数量为 (6.00 ± 0.58) 个; 梗节仅分布毛形感器 I, 数量为 (239.67 ± 7.88) 个; 鞭节分布毛形感器 I 数量为 (274.33 ± 9.94) 个和刺形感器 II 数量为 (13.67 ± 1.45) 个。下颚分布有刺形感器 I 和毛形感器 III 这 2 类。复眼分布有 4 类感器, 分别为刺形感器 II、毛形感器 II、毛形感器 III 和锥形感器。额区分布有 2 类感器, 分别为毛形感器 IV 和刺形感器 III。其中毛形感器较粗大, 有较明显弯曲; 刺型感器表面具纵纹, 形态上比毛形感器更长更尖; 锥形感器表面具横纹, 较粗于毛形感器, 近圆柱形。这些不同部位的同种感器在长度、基部直径以及形态存在一定的差异。本研究可为明确白颜果蝇感器对外界信息素的识别机制, 以及利用性诱剂、食诱剂等开展防治工作提供理论依据。

关键词: 白颜果蝇; 扫描电镜; 头部超微结构; 感器

中图分类号: Q 964 **文献标志码:** A **doi:** 10.13763/j.cnki.jhebnu.nse.202604008

Types, Distribution, and Ultrastructure of Sensilla on the Head of Adult *Drosophila auraria*

LI Dewei^{1,2}, FENG Xudong¹, DENG Da²

(1. Shaanxi Provincial Agricultural Science & Technology Development Co., Ltd, Xi'an Shaanxi 710018, China;

2. College of Plant Protection, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China)

Abstract: *Drosophila auraria* is an important pest of fruit trees, vegetables, and edible fungi, and its control remains challenging. In this study, scanning electron microscopy was used to observe and analyze the types, quantities, and ultrastructures of sensilla on the head of adult *D. auraria*, including those on the antennae, maxillae, compound eyes, and frons. The results showed that the antennae of *D. auraria* are plumose and consist of the scape, pedicel, and flagellum. The scape bear (168.00 ± 6.93) trichoid sensilla type I (ST I) and (6.00 ± 0.58) chaetic sensilla type II (SC II). The pedicel bears only (239.67 ± 7.88) ST I. The flagellum contains (274.33 ± 9.94) ST I and (13.67 ± 1.45) SC II. The maxillae possess two types of sensilla: chaetic sensilla type I (SC I) and trichoid sensilla type III (ST III). The compound eyes bear four types: SC II, trichoid sensilla type II (ST II), ST III, and conical sensilla type I (CS I). The frons region contains two types: trichoid sensilla type IV (ST IV) and chaetic sensilla type III (SC III). Among them, trichoid sensilla are relatively thick and distinctly curved; chaetic sensilla have longitudinal striations on their surface and are morphologically longer and sharper than trichoid sensilla; conical sensilla exhibit transverse

收稿日期: 2025-12-08; 修回日期: 2026-01-19

基金项目: 陕西省农业科技创新计划项目 (NYKJ-2022-YL(XN)07)

作者简介: 李德伟 (1974-), 男, 陕西旬阳人, 助理农艺师, 研究方向为农业技术研发与推广。

通信作者: 李德伟 (1974-), 男, 助理农艺师, 研究方向为农业技术研发与推广。E-mail: lry12.26@qq.com

striations, are thicker than trichoid sensilla, and are nearly cylindrical. These same types of sensilla vary in length, basal diameter, and morphology across different body regions. This study provides a theoretical basis for elucidating the mechanism by which sensilla of *D. auraria* recognize external pheromones, as well as for the application of sex attractants and food attractants in pest control.

Key words: *Drosophila auraria*; scanning electron microscopy (SEM); head ultrastructure; sensilla

白颜果蝇 *Drosophila auraria* 属双翅目果蝇科, 主要分布在中国、日本、朝鲜、菲律宾和泰国等国家^[1]。在中国, 白颜果蝇及其复合种在多个省份和地区广泛分布^[2], 主要危害果树和食用菌, 偏好在成熟的果实和食用菌上产卵, 繁殖能力强, 且防治困难。

昆虫头部集感觉与取食功能于一体, 承载着触角、复眼和口器等关键器官。其中, 触角表面分布有种类丰富的感受器, 是昆虫接受外界化学信号的主要器官^[3-4]。昆虫可通过复杂的感受器感知外界刺激, 将化学信号转变为电生理信号传递给脑部中枢神经, 进而调控昆虫自身的行为反应, 如昆虫取食、气味识别、寄主定位、产卵、避敌和求偶交配等行为^[5]。

扫描电镜技术是研究昆虫超微结构的常用手段, 采用该技术对不同昆虫成虫或幼虫感器的超微结构及功能的研究较为广泛^[6-7], 如鳞翅目^[8]、鞘翅目^[9]和膜翅目^[10]昆虫感器的研究等。随着研究的深入, 不断有多种昆虫感器类型被发现, 包括柱形感器^[11]、腔形感器^[12]、腔锥形感器^[13]和栓锥形感器^[14]等, 尹文英等^[15]首次利用扫描电镜在棉红铃虫 *Pectinophora gossypiella* 触角上观察到多种感受器; 刘丽等^[16]结合光镜与电镜对椰子织蛾 *Opisina arenosella* 触角感器进行鉴定分类, 奠定了其化学通讯的形态基础。国内外学者对双翅目触角感器已有了很多研究, 贺屹成等^[17]在黑带蚜蝇 *Episyrphus balteatus* 触角上鉴定出 8 类 13 种感器, 分析了其分布特征; Awad 等^[18]对雌雄枣实蝇 *Bactrocera zonata* 进行观察研究, 并比较了雌雄虫触角感器的差异; Hu 等^[19]系统研究了 6 种果蝇的的触角感器, 并讨论了不同感器的功能。

目前尚未有对白颜果蝇感器种类、分布及超微结构研究的报道, 本研究运用扫描电镜技术对其成虫头部的触角、下颚、复眼、额区感器超微形态结构进行系统观察, 明确了头部感器种类及分布, 为阐明白颜果蝇感器识别外界信息素的机制和利用性诱剂及食诱剂对其进行防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

白颜果蝇采集于西北农林科技大学科技园的食用菌种植基地, 于西北农林科技大学害虫综合防治实验室连续多代饲养。用人工饲料进行饲养, 配方见表 1, 饲养条件: 温度为 (25 ± 0.5) °C, 相对湿度为 (70 ± 10) %, 光周期 L : D = 16 : 8。饲养方法参考 Soares 等^[20]的方法饲养果蝇。将制作好的人工饲料倒入三角瓶中冷却定型, 再将果蝇成虫放入三角瓶中, 三角瓶口塞脱脂棉, 并在脱脂棉中打入适量蜂蜜水饲喂成虫, 成虫交配产卵于饲料上, 孵化后的幼虫直接在瓶内取食饲料, 直到化蛹, 将羽化的成虫再次移入新的有饲料的三角瓶中继代饲养。

1.2 扫描电镜样品制备及观察拍照

参考孙咏泽等^[21]的方法制备样品, 在解剖镜下随机选取白颜果蝇触角完整的成虫试虫 10 头; 向 5 mL 离心管中倒入 2 mL 丙酮, 将试虫放入离心管中, 用超声波清洗仪 (JP-040) 振动清洗 3 min, 更换丙酮后再次清洗, 重复 3 次; 清洗后将试虫在体积分数为 70% 酒精中浸泡 15 min, 再在解剖镜下将触角带头切下; 待酒精挥发后将这些样品分不同方向粘于载物台上, 将粘好的载物台放入抽真空干燥器中干燥; 用离子溅射仪 (日立 E-1045) 喷金镀膜 3 min; 置于扫描电子显微镜 (日立 S-4800) 下于 20 kV 加速电压下进行从不同角度观察白颜果蝇头部的触角、下颚、复眼和额区感器超微形态结构并进行拍照。

表 1 人工饲料配方

Tab.1 Artificial Feed Formulation

成分	每升加入量
水	900 mL
玉米粉	102 g
蔗糖	78 g
琼脂	9 g
酵母粉	8 g
丙酮	6 mL

1.3 数据处理

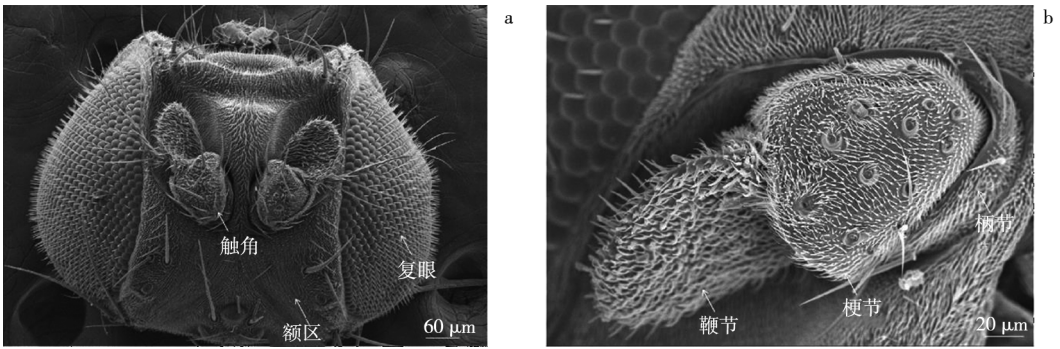
测量照片中的每种感器长度和直径,并分组录入 Excel 工作表,将测得的度量值通过电镜照片放大倍数进行换算(真实值=度量值/放大倍数),得到长度和直径真实值.采用 Excel 的 AVERAGE 和 STDEV.S 函数分别求出上述每组真实值的平均值和标准误.

2 结果与分析

2.1 白颜果蝇触角感器超微形态结构

2.1.1 触角形态及结构

对白颜果蝇成虫触角进行观察发现,触角为芒羽状,由柄节、梗节和鞭节 3 部分组成(图 1),通过扫描电镜测算触角的总长度为 $(392 \pm 7.96) \mu\text{m}$,触角柄节、梗节和鞭节长度分别为 (29.58 ± 1.44) 、 (187.72 ± 4.99) 、 $(175.60 \pm 3.07) \mu\text{m}$.



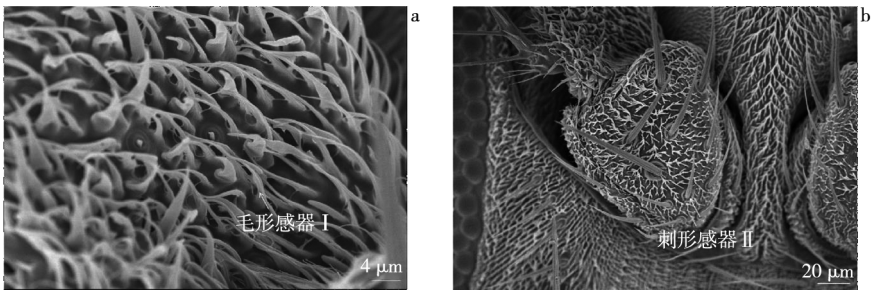
a. 头部形态; b. 触角形态.

图 1 白颜果蝇成虫头部结构形态图

Fig.1 Morphological Diagram of the Head Structure of Adult *Drosophila auraria*

2.1.2 白颜果蝇触角感器种类、形态和分布

白颜果蝇的触角主要分布有毛形感器 I (ST I) 和刺形感器 II (SC II) 2 种感器.柄节上的毛形感器 I 数量为 (168.00 ± 6.93) 个,长度为 $(17.04 \pm 2.46) \mu\text{m}$,基部直径为 $(4.47 \pm 0.93) \mu\text{m}$.毛形感器 I 形态上较粗,基部较大,有较明显弯曲,感器整体较短,呈弯刀形(图 2a),此外还分布大量表皮毛.刺形感器 II 数量为 (6.00 ± 0.58) 个,长度 $(88.92 \pm 16.46) \mu\text{m}$,基部直径 $(14.52 \pm 3.47) \mu\text{m}$.刺型感器 II 表面纵纹清晰,相比于同区域毛形感器基部直径更大,长度更长(图 2b).刺形感器相比毛形感器更长更尖,基部从触角表皮凹陷处伸出,着生于基窝中,更接近于表皮,匍匐在表皮上,其表面纹路较少.梗节的毛形感器 I 数量为 (239.67 ± 7.88) 个.鞭节上的毛形感器 I 数量为 (274.33 ± 9.94) 个,刺形感器 II 数量为 (13.67 ± 1.45) 个.



a. 毛形感器 I; b. 刺形感器 II.

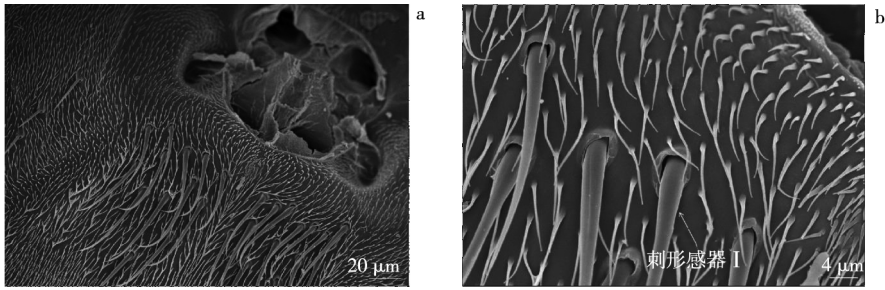
图 2 白颜果蝇成虫触角及其感器超微结构

Fig.2 Ultrastructure of the Antenna and Its Sensilla of Adult *Drosophila auraria*

2.2 白颜果蝇下颚感器超微形态结构

白颜果蝇下颚分布有大量表皮毛,刺形感器 I (SC I) 和毛形感器 III (ST III)(图 3a).刺型感器 I 长度 $(66.36 \pm 1.75) \mu\text{m}$,基部直径 $(8.20 \pm 0.63) \mu\text{m}$ (图 3b).毛形感器 III 整体较光滑,呈尖刺形,少有弯曲,为细长

锥状(图 4a).



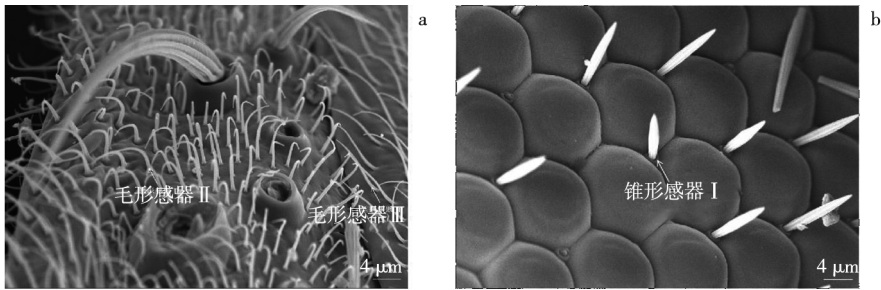
a.下颚形态; b.刺形感器 I.

图 3 白颜果蝇下颚形态及其感器超微结构

Fig.3 Ultrastructure of the Lower Jaw and Its Sensilla of Adult *Drosophila auraria*

2.3 白颜果蝇复眼感器超微形态结构

白颜果蝇的复眼区域有 4 种感器,分别为刺形感器 II (SC II)、毛形感器 II (ST II)、毛形感器 III (ST III)和锥形感器 I (SB I).白颜果蝇复眼毛形感器 II 长度(16.28 ± 1.29) μm ,基部直径(1.21 ± 0.13) μm ,分布在复眼周围,顶部有明显的弯曲,形状近似于 L 形(图 4a).毛形感器 III 长度(14.60 ± 2.39) μm ,基部直径(1.38 ± 0.15) μm ,分布于整个下颚周围,较毛形感器 II 较纤细,顶端无明显弯曲(图 4a).复眼上仅存在锥形感器 I (图 4b).锥形感器明显粗于毛形感器,近圆柱形,基部插入表皮凹陷的窝内,表面具有横纹.锥形感器长度(18.33 ± 0.44) μm ,基部直径(3.06 ± 0.43) μm .



a.毛形感器 II 和毛形感器 III; b.锥形感器 I.

图 4 白颜果蝇复眼锥形感器超微结构

Fig.4 Ultrastructure of the Sensillum Basiconicum on the Compound Eye of Adult *Drosophila auraria*

2.4 白颜果蝇头部额区感器超微形态结构

白颜果蝇头部额区有 2 种感器,分别为毛形感器 IV (ST IV)和刺形感器 III (SC III)(图 5).毛形感器 IV 长度为(29.60 ± 4.36) μm ,基部直径为(4.52 ± 1.52) μm ,分布于头部额区单眼附近,呈草叶形.刺形感器 III 长度为(63.24 ± 5.34) μm ,基部直径为(11.92 ± 1.03) μm 贴近表皮匍匐状,有清晰纵纹.

3 讨论

本研究对果蝇科白颜果蝇成虫的头部感器超微结构进行了系统观察.发现白颜果蝇触角为芒羽状,包括柄节、梗节和鞭节 3 部分.触角总长度为(392.00 ± 7.96) μm ,柄节长度为(29.58 ± 1.44) μm ,梗节长度为(187.72 ± 4.99) μm ,鞭节长度为(175.60 ± 3.07) μm .本研究与其测得铃木氏果蝇触角总长度相似,但各节长度略有不同^[22].

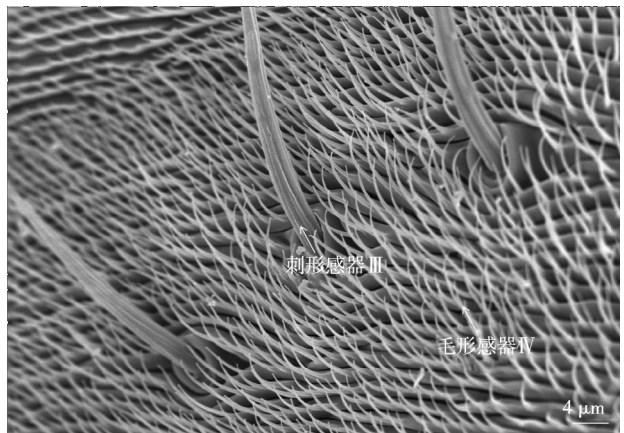


图 5 白颜果蝇头部额区毛形感器和刺形感器超微结构

Fig.5 Ultrastructure of Trichoid and Chaetic Sensilla on the Frons of Adult *Drosophila auraria*

白颜果蝇头部分布有 3 类感器,即毛形感器、刺形感器和锥形感器.毛形感器在白颜果蝇头部中数量最多且分布最广泛,其长度变化很大,而且可以自由活动,本研究发现其有不同程度的弯曲,且这些差异与已报道的昆虫触角感器一致^[23-24].此外,本研究结果与 Hu 等^[19]对 6 种果蝇触角感器的系统研究相呼应,表明双翅目昆虫触角感器在形态与功能上具有高度保守性,但不同种间在数量与分布上存在差异,可能与其寄主偏好和生态位分化相关.据报道毛形感器具有触觉、嗅觉、味觉和机械感受功能,是昆虫感受性信息素的关键器官^[25-26],其中表面无孔的一般被认为是机械感器,可见毛形感器在白颜果蝇识别外部刺激中也应具有重要作用^[27].

本研究观察到白颜果蝇头部刺型感器有 3 个亚型,刺形感器外壁光滑无孔,能够接受机械的刺激,广泛存在于鳞翅目昆虫的触角上,有识别声音、感受气流及支撑保护的作用^[28-29].徐天梅等^[30]研究发现刺形感器是一种能感受机械刺激,对直接接触、微弱空气流动、低频声音和中频震动有反应的机械感器.本研究在白颜果蝇触角、下颚和复眼周围均观察到刺形感器,推测该感器能够感受机械刺激,具有识别和定位的作用.

白颜果蝇头部的锥形感器无其他亚型,且仅在复眼上观察到锥形感器.复眼作为昆虫重要的视觉器官,参与昆虫的昼夜活动节律、导航与定位、光谱敏感等行为,锥形感器在其适应多变环境过程中也具有关键作用^[31];段宇蒙^[32]的研究发现绿豆象复眼上锥形感器直立着生在复眼表面一白状窝中,无孔,较短小,直立,顶端较钝.本研究发现白颜果蝇复眼上锥形感器形态与其相似,推测白颜果蝇复眼上的锥形感器同样具有调控果蝇光趋向性的作用.

Venkatesh^[33]利用扫描电镜技术发现黑腹果蝇头部存在毛形感器和刺形感器,且大量分布在触角上,本研究发现白颜果蝇头部感器类型和分布与其类似.这 2 种果蝇都能定位取食水果和食用菌,表明其对外界环境中的信息有强大的感知能力;此外,白颜果蝇作为危害食用菌与果实的重要害虫,其感器结构特征为其化学通讯机制提供了形态学基础,黄敏君和唐睿^[34]研究表明,昆虫触角感器能监测气味并识别寄主.因此,本研究对利用昆虫性诱剂和食诱剂对害虫进行防治具有一定的参考价值,但是其具体功能和嗅觉感受机制还需要结合透射电镜、电生理及分子生物学等技术作进一步研究.

参考文献:

- [1] 陆剑,吕静,陈慧贤,等.金色果蝇复合种(*Drosophila auraria* species complex)的分子系统学研究[J].遗传学报,2002,29(1):39-49.
- [2] LU Jian,LÜ Jing,CHEN Huixian,et al.Molecular Phylogeny of *Drosophila auraria* Species Complex[J].Acta Genetica Sinica,2002,29(1):39-49.
- [3] 戴灼华,刁福山.中国金色果蝇复合种的染色体研究: I.中国某些地区金色果蝇及Ⅲ金色果蝇核型的研究[J].遗传学报,1986,13(4):285-294.
- [4] DAI Zhuohua,DIAO Fushan.Chromosomes Study in *Drosophila auraria* Complex Species Found in China I. A Study of Karyotype Between *D. Auraria* and *D. Triauraria* Found in China[J].Acta Genetica Sinica,1986,13(4):285-294.
- [5] 崔小林,王宏民,张静,等.绿豆象幼虫虫龄的划分及末龄幼虫头部形态和感器观察[J].昆虫学报,2020,63(4):512-522. doi:10.16380/j.kcxb.2020.04.014
- [6] CUI Xiaolin,WANG Hongmin,ZHANG Jing,et al.Determination of Larval Instars and the Observation of Head Morphology and Sensilla of the Final Instar Larva of *Callosobruchus chinensis*(Coleoptera:Bruchidae)[J].Acta Entomologica Sinica,2020,63(4):512-522.
- [7] 刘伟,王桂荣.昆虫嗅觉中枢系统对外周信号的整合编码研究进展[J].昆虫学报,2020,63(12):1536-1545. doi:10.16380/j.kcxb.2020.12.012
- [8] LIU Wei,WANG Guirong.Research Progress of Integrated Coding of Peripheral Olfactory Signals in the Central Nervous System of Insects[J].Acta Entomologica Sinica,2020,63(12):1536-1545.
- [9] 吕东,赵祐,赵兴鹏,等.圆柏大痣小蜂雌成虫触角、下颚须及产卵器感器超微结构观察[J].环境昆虫学报,2020,42(4):1028-1036. doi:10.3969/j.issn.1674-0858.2020.04.30
- [10] LV Dong,ZHAO Hu,ZHAO Xingpeng,et al.Ultrastructural Observation of Female Adults Antennae,Maxipalp and Ovipositor Sensilla of *Megastigmus sabinae* Xu et He[J].Journal of Environmental Entomology,2020,42(4):1028-1036.
- [11] 栾添.蜜蜂科 8 种熊蜂触角显微结构研究[D].长春:东北师范大学,2009.

- LUAN Tian. Antennal Sensilla of *Bombus* (Hymenoptera: Apidae): A Comparative Scanning Electron Microscopy Study [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2009.
- [7] 刘占玲, 南彦斌, 陈帅, 等. 落叶松红腹叶蜂幼虫感器超微结构观察[J]. 植物保护, 2024, 50(5): 185-192. doi: 10.16688/j.zwbh.2023551
- LIU Zhanling, NAN Yanbin, CHEN Shuai, et al. Ultrastructure of Sensilla of *Pristiphora erichsonii* Larvae[J]. Plant Protection, 2024, 50(5): 185-192.
- [8] 袁向群, 高可, 张国云, 等. 曲纹稻弄蝶触角感器超微结构观察[J]. 中国植保导刊, 2013, 33(12): 18-20. doi: 10.3969/j.issn.1672-6820.2013.12.004
- YUAN Xiangqun, GAO Ke, ZHANG Guoyun, et al. Ultrastructure of Antennal Sensilla of *Parnara ganga* Evans[J]. China Plant Protection, 2013, 33(12): 18-20.
- [9] REN L L, WU Y, SHI J, et al. Antenna Morphology and Sensilla Ultrastructure of *Tetrigus lewisi* Candèze (Coleoptera: Elateridae) [J]. Micron, 2014, 60: 29-38. doi: 10.1016/j.micron.2014.01.005
- [10] ONAGBOLA E O, FADAMIRO H Y. Scanning Electron Microscopy Studies of Antennal Sensilla of *Pteromalus cerealellae* (Hymenoptera: Pteromalidae) [J]. Micron, 2008, 39(5): 526-535. doi: 10.1016/j.micron.2007.08.001
- [11] 李晓东, 赵善欢. 印楝素对昆虫的毒理作用机制[J]. 华南农业大学学报, 1996, 17(1): 118-122.
- LI Xiaodong, ZHAO Shanjuan. The Toxic Effects and Mode of Azadirachtin on Insects [J]. Journal of South China Agricultural University, 1996, 17(1): 118-122.
- [12] 白嘉诚, 陈科伟, 陈丽, 等. 前裂长管茧蜂触角感器的扫描电镜观察[J]. 环境昆虫学报, 2012, 34(3): 339-344.
- BAI Jiacheng, CHEN Kewei, CHEN Li, et al. Antennal Sensilla of *Diachasmimorpha longicaudata* (Ashmead) Observed with Scanning Electron Microscopy [J]. Journal of Environmental Entomology, 2012, 34(3): 339-344.
- [13] 张锋, 洪波, 王远征, 等. 枣食芽象甲触角感器的扫描电镜观察[J]. 西北农业学报, 2019, 28(8): 1373-1379. doi: 10.7606/j.issn.1004-1389.2019.08.021
- ZHANG Feng, HONG Bo, WANG Yuanzheng, et al. Observation of Antennal Sensilla from *Scythropus yasumatsui* (Coleoptera: Curculionidae) with Scanning Electron Microscope [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2019, 28(8): 1373-1379.
- [14] 刘玲, 耿硕, 仵均祥, 等. 2种金龟甲触角感器超微结构的研究[J]. 西南农业学报, 2015, 28(6): 2572-2576. doi: 10.16213/j.cnki.scjas.2015.06.043
- LIU Ling, GENG Shuo, WU Junxiang, et al. Study on Ultrastructure of Antennal Sensilla of Two Scarabs [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2015, 28(6): 2572-2576.
- [15] 尹文英, 郇一平. 棉红铃虫触角感觉器的扫描电镜观察[J]. 昆虫学报, 1980, 23(2): 123-129, 233-234. doi: 10.16380/j.kcxb.1980.02.001
- YIN Wenying, LI Yiping. Scanning Electron Microscopy of Antennal Sensilla of the Pink Boll Worm, *Pectinophora gossypiella* [J]. Acta Entomologica Sinica, 1980, 23(2): 123-129, 233-234.
- [16] 刘丽, 刘青钊, 阎雄飞, 等. 椰子织蛾触角感器的超微结构观察[J]. 环境昆虫学报, 2021, 43(4): 1070-1078. doi: 10.3969/j.issn.1674-0858.2021.04.29
- LIU Li, LIU Qingzhao, YAN Xiongfei, et al. Observation on the Ultrastructures of Antennal Sensilla in *Opisina arenosella* [J]. Journal of Environmental Entomology, 2021, 43(4): 1070-1078.
- [17] 贺屹成, 周雪梅, 白佳伟, 等. 黑带蚜蝇触角感器扫描电镜观察[J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 2024, 48(2): 167-174. doi: 10.13763/j.cnki.jhebnu.nse.202404004
- HE Yicheng, ZHOU Xuemei, BAI Jiawei, et al. Scanning Electron Microscopy on Antennal Sensilla of the Adult *Episyrphus balteatus* [J]. Journal of Hebei Normal University (Natural Science), 2024, 48(2): 167-174.
- [18] AWAD A A, ALI N A, MOHAMED H O. Ultrastructure of the Antennal Sensillae of Male and Female Peach Fruit Fly, *Bactrocera zonata* [J]. Journal of Insect Science, 2014, 14(1): 45. doi: 10.1093/jis/14.1.45
- [19] HU F, ZHANG G N, JIA F X, et al. Morphological Characterization and Distribution of Antennal Sensilla of Six Fruit Flies (Diptera: Tephritidae) [J]. Annals of the Entomological Society of America, 2010, 103(4): 661-670. doi: 10.1603/AN09170
- [20] SOARES J J, GONÇALVES M B, GAYER M C, et al. Continuous Liquid Feeding: New Method to Study Pesticides Toxicity in *Drosophila melanogaster* [J]. Analytical Biochemistry, 2017, 537: 60-62. doi: 10.1016/j.ab.2017.08.016

- [21] 孙咏泽,于瑞涛,李泽晨,等.角蝉触角及其传感器的扫描电镜观察[J].西北农业学报,2022,31(6):796-803.
SUN Yongze, YU Ruitao, LI Zechen, et al. Scanning Electron Microscope Observation on Antennae and Antennal Sensilla of Treehoppers[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2022, 31(6): 796-803.
- [22] 廖任娅,张金平,唐睿,等.铃木氏果蝇触角和下颚须传感器的超微形态特征及分布[J].植物保护,2017,43(1):68-75.doi:10.3969/j.issn.0529-1542.2017.01.011
LIAO Renya, ZHANG Jinping, TANG Rui, et al. Ultrastructural Morphology and Distribution of Sensilla on the Antennae and Maxillary Palpi of *Drosophila suzukii* (Matsumura)[J]. Plant Protection, 2017, 43(1): 68-75.
- [23] HIX R L. Egg-laying and Brochosome Production Observed in Glassy-winged Sharpshooter[J]. California Agriculture, 2001, 55(4): 19-22. doi:10.3733/ca.v055n04p19
- [24] 杨韩英.黑肩绿盲蝽触角传感器和求偶行为的研究[D].广州:华南农业大学,2019.
YANG Hanying. Antennal Sensilla and Courtship Behavior in *Cyrtorhinus lividipennis* Reuter (Hemiptera: Miridae)[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019.
- [25] CASTREJÓN GÓMEZ V R, NIETO G, VALDES J, et al. The Antennal Sensilla of *Zamagiria dixolophella* Dyar (Lepidoptera: Pyralidae)[J]. Annals of the Entomological Society of America, 2003, 96(5): 672-678. doi:10.1603/0013-8746(2003)096[0672:taso2d]2.0.co;2
- [26] DOLZER J, FISCHER K, STENGL M. Adaptation in Pheromone-sensitive Trichoid Sensilla of the Hawkmoth *Manduca sexta*[J]. The Journal of Experimental Biology, 2003, 206(Pt 9): 1575-1588. doi:10.1242/jeb.00302
- [27] Frazier J L. Nervous System: Sensory System[M]. New York: John Wiley & Sons, 1985: 287-356.
- [28] WANG R, ZHANG L, XU L L, et al. Sensilla on the Antennae and Ovipositor of the Sea Buckthorn Carpenter Moth, *Holcocerus hippophaecolus* Hua et al (Lepidoptera: Cossidae)[J]. Neotropical Entomology, 2015, 44(1): 68-76. doi:10.1007/s13744-014-0258-1
- [29] CHANG X Q, ZHANG S, LV L, et al. Insight into the Ultrastructure of Antennal Sensilla of *Mythimna separata* (Lepidoptera: Noctuidae)[J]. Journal of Insect Science, 2015, 15(1): 124. doi:10.1093/jisesa/iev103
- [30] 徐天梅,葛文超,杜广祖,等.蠨螋生殖器及胸足化学感受器的显微结构观察[J].云南农业大学学报(自然科学),2021,36(1):53-59,139.doi:10.12101/j.issn.1004-390X(n).201907052
XU Tianmei, GE Wenchao, DU Guangzu, et al. Microscopic Structure of the Genitals and Thoracic Legs Sensilla of *Arma chinensis* Under the Scanning Electron Microscopy[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2021, 36(1): 53-59, 139.
- [31] BUFFRY A D, CUREA J P, FRANKE-GERTH F A, et al. Evolution of Compound Eye Morphology Underlies Differences in Vision Between Closely Related *Drosophila* Species[J]. BMC Biology, 2024, 22(1): 67. doi:10.1186/s12915-024-01864-7
- [32] 段宇蒙.绿豆象头部超微结构及视觉和嗅觉对其交配产卵的影响[D].太谷:山西农业大学,2024.
DUAN Yumeng. Head Ultrastructure and Effects of Vision and Olfaction on Mating and Oviposition of *Callosobruchus chinensis*[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2024.
- [33] VENKATESH S, NARESH SINGH R. Sensilla on the Third Antennal Segment of *Drosophila melanogaster* Meigen (Diptera: Drosophilidae)[J]. International Journal of Insect Morphology and Embryology, 1984, 13(1): 51-63. doi:10.1016/0020-7322(84)90032-1
- [34] 黄敏君,唐睿.昆虫嗅觉编码的分子功能研究进展[J].应用昆虫学报,2025,62(4):851-866.doi:10.7679/j.issn.2095-1353.2025.081
HUANG Minjun, TANG Rui. Advances in Research on the Molecular Basis of Insect Olfactory Coding[J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2025, 62(4): 851-866.