

豆卜馍夜蛾触角感器的超微结构与分布

徐 伟, 董亚南, 崔 娟, 张益恺, 史树森*

(吉林农业大学农学院, 长春 130118)

摘要 为了解豆卜馍夜蛾 *Bomolocha tristalis* Lederer 成虫触角感器的类型、超微结构、数量和分布,探索其化学感受机制。利用扫描电镜技术对豆卜馍夜蛾雌、雄蛾的触角感器进行观察。结果表明:在豆卜馍夜蛾触角上共观察到8种类型感器:Böhm氏鬃毛(两种亚型,BB I型和BB II型)、毛形感器、锥形感器、刺形感器、腔锥形感器、耳形感器、鳞形感器和栓锥形感器。其中毛形感器数量最多,其次是腔锥形,除刺形和栓锥形感器外,其他感器数量在触角鞭节从基部到端部呈现由少到多,再减少的趋势。毛形、锥形和耳形感器表皮具多孔属于嗅觉感器。雄蛾触角与雌蛾相比,鞭亚节多2~4节;毛形、刺形和鳞形感器明显长于雌蛾,耳形感器明显短于雌蛾;毛形和腔锥形感器数量均明显多于雌蛾。豆卜馍夜蛾触角感器种类丰富,数量较多,雌、雄蛾间存在性二型现象,Böhm氏鬃毛、刺形和栓锥形感器在结构和分布上存在有利其功能的特化现象。

关键词 豆卜馍夜蛾; 触角; 感器; 超微结构; 扫描电镜

中图分类号: Q964 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2018415

Ultrastructure and distribution of the sensilla on the antennae of *Bomolocha tristalis* (Lepidoptera: Noctuidae) adult

XU Wei, DONG Yanan, CUI Juan, ZHANG Yikai, SHI Shusen

(College of Agronomy, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract The aim of this study was to clarify the types, ultrastructure, quantity and distribution of sensilla on the antennae of *Bomolocha tristalis* adult and explore the chemosensory mechanism. The sensilla on female and male adult antennae of *B. tristalis* were observed by scanning electron microscope. The results showed that eight types of sensilla including Böhm bristles (two subtypes, BB I and BB II), trichodea, basiconica, chaetica, coeloconica, auricillica, squamiformia, styloconica were detected on the antennae of *B. tristalis*. The amount of sensilla trichodea was most among these sensilla, followed by coeloconica. Except for sensilla chaetica and styloconica, the amounts of other sensilla on the flagellum from the base to the end showed a trend from less to more and then less. Sensilla trichodea, basiconica and auricillica were multiporous on the cuticle, which were considered to be olfactory organ. The flagellum of male antennae had 2–4 segments more than that of female moth. Sensilla trichodea and chaetica of male moth were significantly longer than that of the female moth. Sensilla auricillica of male moth were significantly shorter than that of the female moth. The amounts of sensilla trichodea, chaetica, coeloconica, auricillica and styloconica of male moth were more than those of female. It was evident that the antennal sensilla of *B. tristalis* were abundant, and the antennae exhibited obvious sexual dimorphism. Moreover, the specialization phenomenon that is beneficial for the sensilla function occurred in the structure and distribution of Böhm bristles, sensilla chaetica and styloconica.

Key words *Bomolocha tristalis*; antenna; sensilla; ultrastructure; scanning electronic microscopy (SEM)

豆卜馍夜蛾 *Bomolocha tristalis* Lederer 属于鳞翅目 Lepidoptera, 夜蛾科 Noctuidae, 是我国北方大豆产区主要害虫之一, 以幼虫为害大豆叶片, 将叶

片吃成缺刻或孔洞, 严重时可将叶片吃得仅剩叶脉, 喷施化学药剂是目前防治这一害虫的主要方法。由于其幼虫有保护色和拟态, 发生之初不易发现, 当幼

收稿日期: 2018-09-25

修订日期: 2018-11-11

基金项目: 吉林省科技发展计划(20180201015NY); 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-04)

* 通信作者 E-mail: sss-63@263.net

虫个体较大被发现时,则造成了一定经济损失,并因其抗性增强,防治较为困难,加大药剂施用量会杀伤天敌,造成环境污染。

触角是昆虫的嗅觉器官,其上分布着多种传感器,主要有毛形、锥形、刺形和腔锥形传感器等,这些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,中枢神经系统引发相应的神经冲动做出各种行为反应,包括择食、觅偶、寻找产卵场所和避敌等^[1]。对鳞翅目蛾类昆虫触角传感器的超微结构和电生理的研究发现,不同类型传感器的结构不同,功能也存在差异,昆虫对寄主的识别,以及同一种群昆虫间的信息交流主要依靠其中具有嗅觉作用的毛形和锥形等传感器。例如,雌性棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 产生性信息素,引起雄蛾性行为,这些性信息素被雄蛾触角上的毛形传感器识别^[2]。宋亚茹等从黏虫 *Mythimna separata* 雌蛾的性腺浸提液中分离到 3 种化合物,均能够激发雄蛾触角的电生理反应^[3]。目前这些研究成果已在利用信息素进行害虫测报和防控中陆续得到应用。

本文利用扫描电镜观察了豆卜馍夜蛾的触角传感器,对传感器的超微结构、类型和分布等特征进行了描述、分析和比较,为进一步研究豆卜馍夜蛾触角化学感受机制和行为识别机制,通过昆虫信息交流进行监控和防控该害虫提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

6 月上旬于吉林农业大学大豆田采集豆卜馍夜蛾幼虫。于养虫室内在温度(25 ± 1)℃,湿度 75% $\pm$ 5%,光周期 L//D=14 h//10 h 的条件下用新鲜的大豆叶片进行饲养,待幼虫老熟化蛹。

1.2 扫描电镜样品的制备与观察

取新羽化的豆卜馍夜蛾雌、雄蛾各 10 头,在体视解剖镜下用手术刀切取其完整触角,放入蒸馏水中,用超声波清洗(每个样品处理 30 s),去除表面黏附物。清洗后用 50%、75%、90%和 100%乙醇溶液逐级脱水。样品干燥后,用双面导电胶固定于样品台上,并置于 JFC-1600 型离子溅射仪内进行真空喷金处理,在 JSM-6700F 型冷场发射电子显微镜下观察和扫描。

1.3 数据处理及命名方法

应用 Photoshop CS5 软件测量触角传感器的长度、基部直径,以及触角鞭亚节感器区的长度和宽度,以 SPSS 16.0 软件对雌、雄蛾同一类型触角传感器的长度、基部直径和数量,以及鞭节基部、中部和端部感器区的长度和宽度进行 One-Sample 方差分析,采用 *t* 检验雌、雄蛾间的差异显著性。触角传感器类型鉴定参照 Schneider^[4]。

2 结果与分析

2.1 触角的一般形态

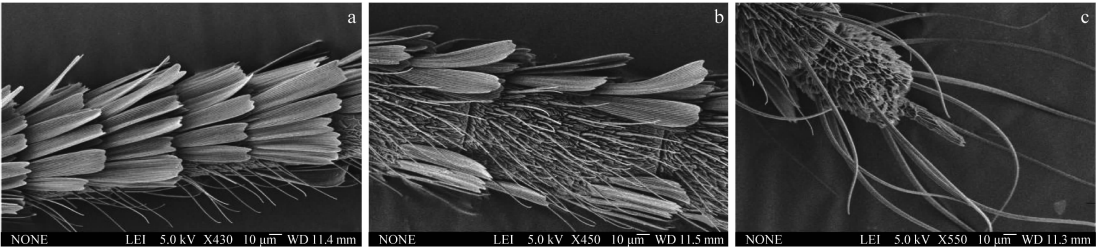
豆卜馍夜蛾触角呈线状,柄节较长且粗大,梗节较短,鞭节由 58~62 个亚节组成。鞭节表面具嵴状结构,背面和侧面着生鳞片(图 1a 和 b),鳞片层层相叠,排列规则。雌、雄蛾触角在外形上没有明显差异。

2.2 触角传感器的类型与分布

通过对豆卜馍夜蛾雌、雄蛾触角扫描电镜观察发现其触角上共有 8 种类型传感器,分别为: Böhm 氏鬃毛(Böhm bristles, BB)、毛形传感器(sensilla trichodea, ST)、锥形传感器(sensilla basiconica, SB)、刺形传感器(sensilla chaetica, SC)、腔锥形传感器(sensilla coeloconica, SCO)、耳形传感器(sensilla auricillica, SAU)、鳞形传感器(sensilla squamiformia, SQ)和栓锥形传感器(sensilla styloconica, SS)。柄节和梗节主要为鳞片所覆盖,传感器种类和数量较少,传感器主要分布于鞭节腹面两侧由鳞片围成的感器区(图 1b)。除刺形和栓锥形传感器,其他传感器在基部鞭亚节比较短小数量少,向后逐渐变长数量增多,分布密集,到末端又变少,末亚节没有分布(图 1c)。

2.2.1 Böhm 氏鬃毛(Böhm bristles, BB)

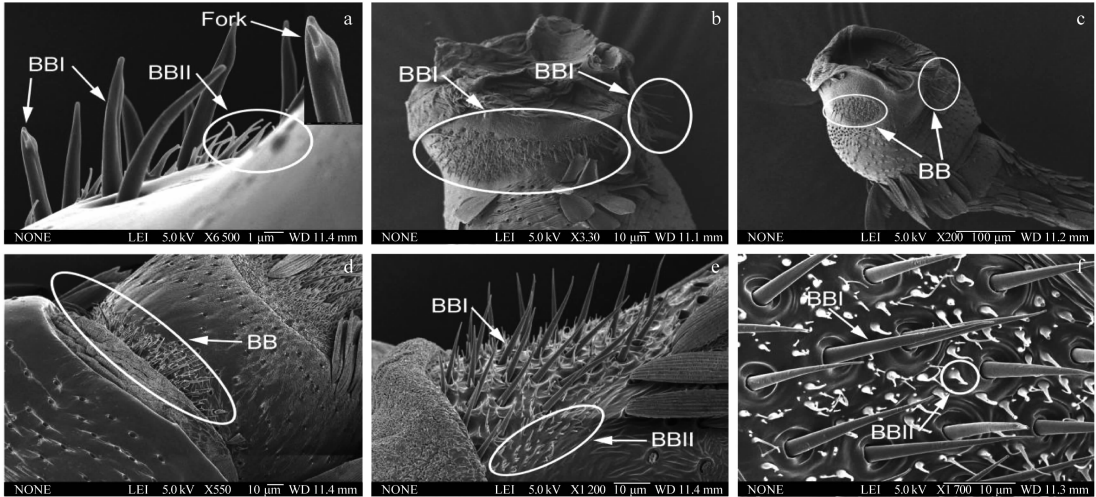
Böhm 氏鬃毛,刺状,表面光滑无孔,基部较粗,端部或尖细或钝圆。按其长度和基部着生方式可分为 2 个亚型(图 2a)。BB I 型分布于柄节基部背面(图 2b)、腹面中间和两侧(图 2c),及柄节与梗节连接处(图 2d 和 e)。传感器粗且长,有的端部有指状分叉(图 2a),着生于触角表面凹陷的圆形小腔内,腔边缘微隆起(图 2f),感器长 19.25~20.98 μm ,基部直径 2.29~2.50 μm 。BB II 型数量较多,成群分布在 BB I 型周围,该传感器短且细,着生于触角表皮上,在基部或端部有的有分叉(图 2f),感器长 4.44~4.86 μm ,基部直径 1.22~1.28 μm 。



a: 触角鞭节背面; b: 触角鞭节腹面; c: 触角鞭节末节
a: Dorsal surface of antenna flagellum; b: Ventral surface of antenna flagellum; c: The end of antenna flagellum

图 1 豆卜馍夜蛾触角感器的分布

Fig. 1 Distribution of antennal sensilla of *Bomolocha tristalis*



a: 柄节背面的Böhm氏鬃毛 I 型(BB I)和 II 型(BB II)局部放大; b: 柄节背面的Böhm氏鬃毛 I 型(BB I); c: 触角柄节腹面的Böhm氏鬃毛; d: 梗节前缘的Böhm氏鬃毛 I 型(BB I)和 II 型(BB II); e: 梗节前缘的Böhm氏鬃毛 I 型(BB I)和 II 型(BB II)局部放大; f: 触角柄节腹面的Böhm氏鬃毛 I 型(BB I)和 II 型(BB II)局部放大
a: Amplification of Böhm bristles I (BB I) and Böhm bristles II (BB II) distributed on dorsal side of scape; b: Böhm bristles I (BB I) distributed on dorsal side of scape; c: Böhm bristles distributed on ventral side of scape; d: Böhm bristles I (BB I) and Böhm bristles II (BB II) distributed on proximal pedicel; e: Amplification of Böhm bristles I (BB I) and Böhm bristles II (BB II) distributed on proximal pedicel; f: Amplification of Böhm bristles I (BB I) and Böhm bristles II (BB II) distributed on ventral side of scape

图 2 Böhm 氏鬃毛的形态与分布

Fig. 2 Morphology and distribution of Böhm bristles

2.2.2 毛形感器(sensilla trichodea,ST)

毛形感器是豆卜馍夜蛾触角上数量最多的感器(表 1)。感器细长如毛发,着生在触角鞭节表面的凹陷内(图 3a),向触角端部斜向伸出,逐渐变细,近端部弯曲,顶端稍钝圆,其基部表皮有较粗的纵向隆起(图 3b),向上延伸形成“V”字形纹,纹间表皮上均匀着生小而浅的孔(图 3c),折断后发现其为厚壁的中空结构(图 3b)。感器长 43.57~103.31 μm ,基部直径 2.04~4.09 μm 。

2.2.3 锥形感器(sensilla basiconica,SB)

锥形感器散生于毛形感器之间,基部着生于触角表皮内陷的一个较大的腔内(图 3d),近基部收缩略扁,向上变粗(图 3e),端部尖细,感器表面具斜向平行隆起,隆起间可见一系列密集的小孔(图 3f)。感

器长 19.95~29.91 μm ,基部直径 1.05~2.37 μm 。

2.2.4 刺形感器(sensilla chaetica,SC)

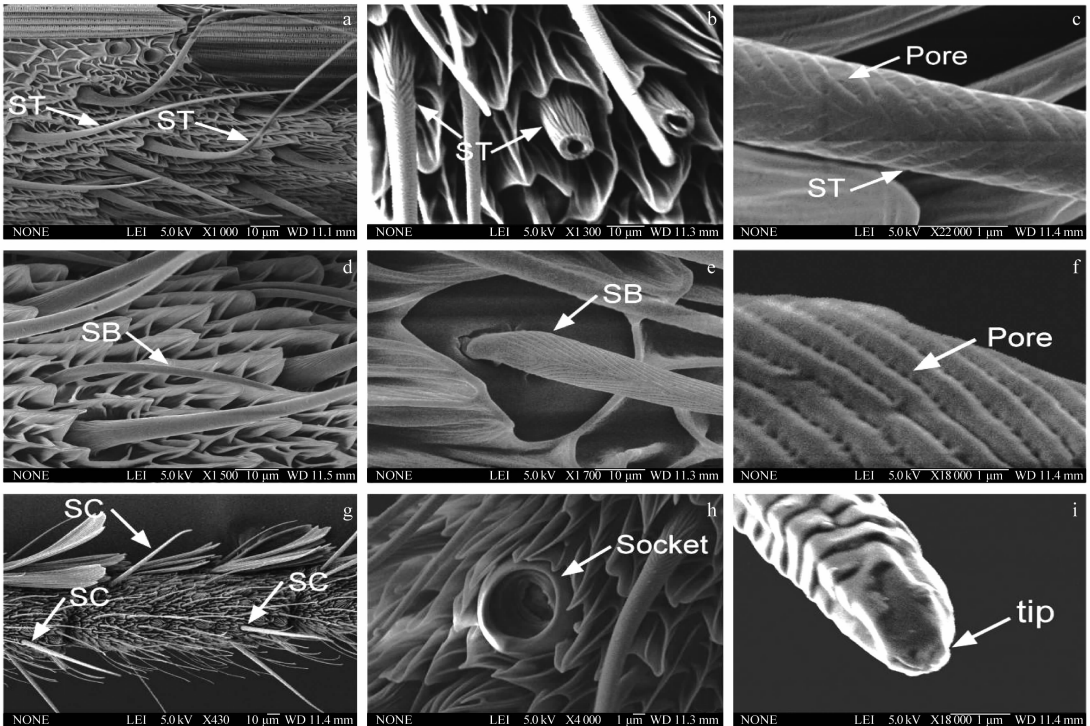
刺形感器较规律地分布于鞭亚节腹面感器区和背面鳞片间(图 3g)。该感器外形刚直如刺,且质地坚硬粗壮,着生在一突起的臼状窝(基窝)内(图 3h),向端部渐细,顶端钝圆,感器表面有明显纵向隆起的脊突,高倍电镜下可见感器表面突出的环纹,无孔,顶端呈指状聚拢,指状结构间有缝隙(图 3i)。刺形感器长 23.71~150.67 μm ,基部直径 2.97~4.74 μm 。

2.2.5 腔锥形感器(sensilla coeloconica,SCO)

腔锥形感器数量仅次于毛形感器(表 1),形如菊花,主要分布于鞭亚节感器区中后部(图 4a),着生于触角表皮凹陷的浅圆腔内。浅圆腔直径 10.11~12.00 μm ,腔中央有一个感觉锥似由多个指状结构

愈合而成,其顶端圆钝,腔周边着生 15~16 根花瓣状长度不等的缘毛,其上有隆起的纵脊,缘毛向中心

弯曲相互聚拢(图 4b)。感觉锥高 3.39~5.70 μm ,缘毛长 4.47~10.38 μm 。



a: 毛形感器; b: 毛形感器基部和横截面; c: 毛形感器表面纹理和小孔; d: 锥形感器; e: 锥形感器基部; f: 锥形感器表面纹理和小孔; g: 刺形感器; h: 刺形感器基窝; i: 刺形感器表面纹理和顶端结构
a: Sensilla trichodea (ST); b: The base and transection of sensilla trichodea (ST); c: Surface texture and pores of sensilla trichodea (ST); d: Sensilla basiconica (SB); e: The base of sensilla basiconica (SB); f: Cuticle texture and pores of sensilla basiconica (SB); g: Sensilla chaetica (SC); h: Basal socket of sensilla chaetica (SC); i: Cuticle texture and tip of sensilla chaetica (SC)

图 3 毛形、锥形和刺形感器的形态与分布

Fig. 3 Morphology and distribution of sensilla trichodea, basiconica and chaetica

2.2.6 耳形感器(sensilla auriculica,SAU)

耳形感器形似兔耳,分布于感器区的两侧,靠近鳞片(图 4a),着生于触角表面的凹陷内,与触角表面近于平行,感器基部两侧向内卷曲,端部尖细(图 4c),表面有纵向隆起,隆起间可见表皮上有成列的小孔(图 4d)。感器长 17.12~27.49 μm ,宽 2.11~3.57 μm ,厚 0.19~0.93 μm ,基部直径 0.99~2.95 μm 。

2.2.7 鳞形感器(sensilla squamiformia,SQ)

鳞形感器平贴于触角表面,分布于触角柄节、梗节和鞭节背面的鳞片间。表面结构与触角上的普通鳞片相似,但呈狭长的柳叶形,着生在一臼状窝内。其端部尖细,中部稍宽,其上有明显的纵脊(图 4e)。感器长 42.25~82.68 μm ,宽 1.83~2.22 μm ,基部直径 2.13~4.33 μm 。

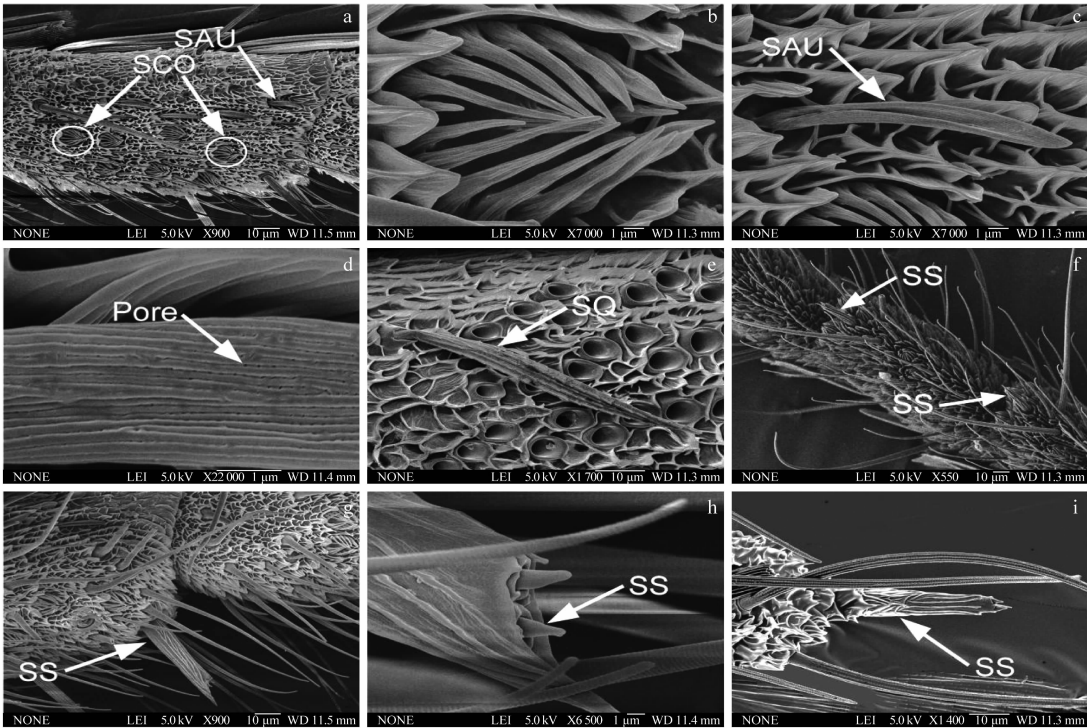
2.2.8 栓锥形感器(sensilla styloconica,SS)

栓锥形感器呈圆柱状,较为粗壮,着生于鞭亚节端部边缘上,每鞭亚节一个,斜向伸出(图 4f 和 g)。感器表面有纵脊(图 4h),顶端一侧延伸呈指状,顶端

中间凹陷,边缘有小的棘状突起,中间凹陷内有 1~2 个锥形突。感器柱状体高 24.63~35.17 μm ,基部直径 5.67~8.14 μm ,顶端锥体高 1.83~5.44 μm 。触角末节的栓锥形感器则着生于末端,向后伸出,长 48.70 μm ,基部直径 11.18 μm ,该感器约占触角末亚节长度的 1/2(图 4i)。

2.3 豆卜馍夜蛾雌、雄蛾触角感器比较

豆卜馍夜蛾雌、雄蛾触角不同类型感器在形态上没有差异,但在数量、大小和分布上存在差异。雄蛾鞭亚节数量多于雌蛾 2~4 节,触角中部和端部鞭亚节感器区长度和宽度均明显超过雌蛾(表 2),感器分布更密集(表 1),其毛形、刺形、腔锥形、耳形和栓锥形感器数量明显多于雌蛾,在末鞭亚节雄蛾刺形感器数量 10~12 个,而雌蛾刺形感器仅为 6 个。并且雄蛾的毛形、刺形和鳞形感器明显长于雌蛾,但雄蛾耳形感器明显短于雌蛾。除 Böhm 氏鬃毛、耳形和鳞形感器,其余类型感器在雌、雄蛾触角上的分布位置存在差异(表 1)。



a: 腔锥形感器; b: 腔锥形感器局部放大; c: 耳形感器; d: 耳形感器表面纹理和小孔; e: 鞭节上的鳞形感器; f, g: 栓锥形感器; h: 栓锥形感器表面纹理; i: 鞭节末节的栓锥形感器
a: Sensilla coeloconica (SCO); b: Partial enlarged sensilla coeloconica; c: Sensilla auriculica (SAU); d: Cuticle texture and pores of sensilla auriculica; e: Sensilla squamiformia (SQ) distribute on flagellum; f, g: Sensilla styloconica (SS); h: Cuticle texture of sensilla styloconica; i: Sensilla styloconica (SS) distributed on the end of flagellum

图 4 腔锥形、耳形、鳞形和栓锥形感器的形态与分布

Fig. 4 Morphology and distribution of sensilla coeloconica, auriculica, squamiformia and styloconica

表 1 豆卜馍夜蛾触角感器的大小、数量和分布¹⁾

Table 1 Size, amount and distribution of antennal sensilla of *Bomolocha tristalis*

感器类型 Sensillum type	性别 Sex	长度/ μm Length	基部直径/ μm Basal diameter	数量/个 Amount	分布位置 Distribution
Böhm 氏鬃毛 I 型	♀	(20.98±1.78)a	(2.29±0.26)a	(90.33±4.73)a	柄节、梗节
Böhm bristles I	♂	(19.25±2.42)a	(2.50±0.42)a	(96.33±2.52)a	柄节、梗节
Böhm 氏鬃毛 II 型	♀	(4.86±0.89)a	(1.28±0.46)a	(474.33±2.06)a	柄节、梗节
Böhm bristles II	♂	(4.44±0.76)a	(1.22±0.35)a	(482.67±4.62)a	柄节、梗节
毛形感器	♀	(58.86±4.50)b	(3.40±0.50)a	(2 338.13±56.25)b	第 2 鞭亚节-末 2 节
Sensilla trichodea	♂	(80.96±3.91)a	(3.49±0.43)a	(2 592.64±77.64)a	第 1 鞭亚节-末 2 节
锥形感器	♀	(23.54±1.47)a	(1.77±0.31)a	(290.73±7.58)a	第 5 鞭亚节-末 2 节
Sensilla basiconica	♂	(24.84±1.03)a	(1.59±0.51)a	(299.63±14.31)a	第 2 鞭亚节-末 2 节
刺形感器	♀	(96.82±4.05)b	(3.97±0.71)a	(254.06±4.15)b	第 6 鞭亚节-末 1 节
Sensilla chaetica	♂	(121.11±3.40)a	(3.99±0.16)a	(285.11±8.91)a	第 2 鞭亚节-末 1 节
腔锥形感器	♀	(11.13±0.89)a	(10.11±1.69)a	(443.68±7.10)b	第 6 鞭亚节-末 2 节
Sensilla coeloconica	♂	(11.80±0.34)a	(12.00±2.31)a	(516.30±8.23)a	第 2 鞭亚节-末 2 节
耳形感器	♀	(24.50±1.11)a	(2.57±0.36)a	(351.83±4.08)b	第 6 鞭亚节-末 2 节
Sensilla auriculica	♂	(21.64±1.02)b	(1.71±0.77)a	(396.19±9.01)a	第 6 鞭亚节-末 2 节
鳞形感器	♀	(46.13±3.52)b	(2.05±0.20)a	(110.37±2.14)a	柄节-末 2 节
Sensilla squamiformia	♂	(77.44±4.55)a	(2.45±0.17)a	(124.62±1.76)a	柄节-末 2 节
栓锥形感器	♀	(28.51±2.58)a	(6.40±0.66)a	(40.70±7.21)b	第 19 鞭亚节-末 1 节
Sensilla styloconica	♂	(29.03±1.70)a	(7.06±0.95)a	(42.97±6.11)a	第 18 鞭亚节-末 1 节

1) 数据为平均值±标准差。同列中不同字母表示雌、雄蛾成虫间有显著差异(t -test, $P < 0.05$)。下同。
Data in the table represents the mean±SD. The different letters indicate significant difference between sexes (t -test, $P < 0.05$). The same below.

表 2 豆卜馍夜蛾雌、雄蛾触角鞭节感器区大小比较¹⁾

Table 2 Comparison of the size of antenna sensillum area of *Bomolocha tristalis* between female and male

感器区 Sensillum area	性别 Sex	基部 Proximal segment	中部 Middle segment	端部 Distal segment
长度/ μm Length	♀ ♂	(135.67±7.85) a (142.71±15.86) a	(187.73±7.06) b (205.18±4.90) a	(145.07±40.63) b (190.83±19.83) a
宽度/ μm Width	♀ ♂	(96.87±10.86) a (83.24±7.42) b	(103.20±1.58) b (125.88±7.38) a	(77.80±25.14) a (98.64±16.21) a

1) 基部(1~20 鞭亚节),中部(21~40 鞭亚节),端部(41~末亚节)。
Proximal segments of antenna flagellum (1—20 flagellum), middle segments of antenna flagellum (21—40 flagellum), distal segments of antenna flagellum (41—the end flagellum).

3 讨论

触角是昆虫重要的感觉器官,感器是触角的基本功能单位^[5]。不同类型的感器,其功能存在差异。豆卜馍夜蛾触角扫描电镜观察发现 8 种类型感器,其中数量最多的是毛形感器,其表皮上着生小而浅的孔,表明其具有嗅觉功能^[6],并且雄蛾毛形感器显著长于雌蛾,数量明显多于雌蛾,这与许多蛾类毛形感器的特征类似^[7-9],雌、雄蛾毛形感器存在明显的性二型现象,表明该感器在雌、雄生理行为和功能上存在差异。研究证实雄蛾毛形感器具有感知性信息素分子的作用,雌蛾毛形感器多数认为能够感受寄主挥发物寻找产卵场所^[9-10],而 Hillier 等对 *Heliothis virescens* 雄蛾毛形感器中的嗅觉神经元生理学功能的研究发现短毛形感器能够对雌虫信息素和植物挥发物反应^[11]。豆卜馍夜蛾仅有一种毛形感器,是否兼具有感受植物挥发物的功能需要单细胞和电生理等试验进一步确定。

蛾类另外两种常见的嗅觉感器是锥形和耳形感器,感器内丰富的嗅觉细胞具有感受气味分子的功能,感器表皮上也有大量小孔^[12]。锥形感器表面孔的排列可分为两个亚型,一类是孔无规则排列,如花布灯蛾 *Camptoloma interiorata*^[13];另一类是孔呈线性排列,如苹果蠹蛾 *Cydia pomonella*^[14]。豆卜馍夜蛾的锥形感器数量不多,感器表皮上的小孔呈线性排列,小孔比较密集,孔的排列方式不同是否在功能上存在差异有待进一步研究。豆卜馍夜蛾耳形感器与夜蛾科的棉铃虫^[15]和小地老虎^[16]相比数量较多,雌蛾耳形感器比雄蛾的长且宽,明显更发达,推测该感器可能与雌蛾的生理活动有关。Anderson 等发现棘翅夜蛾 *Scoliopteryx libatrix* 耳形感器对寄主植物挥发物(±)-芳樟醇、 α -蒎烯和 Δ -3-蒎烯等有反应,认为耳形感器可能在雌蛾寄主定位时起重要作用^[17]。

Böhm 氏鬃毛、刺形感器和鳞形感器具有感受机械刺激的功能。其中 Böhm 氏鬃毛被认为是感知昆虫触角位置和运动的感器^[4]。Krishnan 等研究发现 Böhm 鬃毛在触角运动过程中可能刺激了与大脑相连的底层神经元,从而使昆虫能够主动地控制触角飞行时的定位^[18]。豆卜馍夜蛾具有两种亚型 Böhm 氏鬃毛,着生于柄节基部背面和腹面凹陷处,以及柄节与梗节间,均为关节部位,两种亚型的 Böhm 氏鬃毛均有分叉结构,从而增加了感受面积,且细长的 BB I 型着生在触角表面凹陷的圆形小腔内,更易感受刺激并传导到其下的感觉神经元受体上产生神经冲动,从而有利于发挥机械感受器作用。刺形感器被认为是典型的机械感器,感受外界的振动与压力^[4]。此感器主要分布在鞭节具有韧性的臼状窝结构内,与其他感器相比明显长出许多,这一特征有利于首先接触到外界环境。豆卜馍夜蛾刺形感器是中空的,其末端指状结构间具有缝隙,这与黄刺蛾 *Monema flavescens* 和番茄潜麦蛾 *Tuta absoluta* 触角上的刺形感器末端结构相似^[19-20],推测其具有接触化学感受功能。Jiang 等对棉铃虫触角刺形感器的研究证实了这一点,刺形感器对 D-果糖敏感,能够表达参与糖代谢的味觉受体 HarmGR4^[21]。鳞形感器能够感受机械刺激或风速^[22]。豆卜馍夜蛾触角上的鳞形感器较少,分布在柄节、梗节和鞭亚节鳞片间,在鞭亚节感器区没有发现,这与多数夜蛾类的鳞形感器在感器区有分布不同^[23-24]。

腔锥形感器主要感受水蒸气、二氧化碳、湿度变化、冷刺激和植物气味等^[25]。一般有两种,一种是无缘毛腔锥形,另一种具缘毛腔锥形,豆卜馍夜蛾的腔锥形感器为具缘毛形,与大多数蛾类的形态相似,但数量较多,中央锥体可见由指状结构聚拢形成,Shields 发现中央锥状体的指状物之间有孔隙,向内连接到感觉神经元,从而感受植物气味^[1]。

栓锥形感器具有感受温湿度、二氧化碳等功

能^[26],是蛾类常见的感器类型,但豆卜馍夜蛾的栓锥形感器不同于这些蛾类,表现为感器更长,分布在触角鞭亚节腹面的末端边缘,这种突伸着生方式,以及末端侧伸的指状突和小的棘突,更有利于感受环境的温、湿度。并且在鞭节末端还有一个大型栓锥形感器,表面具许多褶皱,Wee 等研究发现鞭节末端的栓锥形感器可能承担味觉的功能^[27]。

本文对豆卜馍夜蛾触角感受器的超微结构进行了观察,发现其感器类型与其他鳞翅目蛾类相同,但其 Böhm 氏鬃毛、锥形、刺形、鳞形和栓锥形感器的形态和分布与大多数蛾类存在一定的差异,这种差异与特化是否更有利于其功能的发挥还有待于通过透射电镜以及电生理技术等来确定。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 吴才宏. 棉铃虫雄蛾触角的毛形感器对其性信息素组分及类似物的反应[J]. *昆虫学报*, 1993, 36(4): 385–389.
- [3] 宋亚茹, 张蕾, 程云霞, 等. 粘虫雌性信息素特征成分鉴定及其不同配比的室内引诱效果[J]. *植物保护学报*, 2017, 44(3): 393–399.
- [4] SCHNEIDER D. Insect antennae [J]. *Annual Review of Entomology*, 1964, 9: 103–122.
- [5] GULLAN P J, GRANSTON P S. The insects: An outline of entomology [M]. London: Blackwell Publishing Ltd, 2000: 86–105.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 田彩红, 王瑛, 封洪强, 等. 二点委夜蛾触角感器的超微结构研究[J]. *植物保护*, 2015, 41(1): 63–67.
- [9] BINYAMEEN M, ANDERSON P, IGNELL R, et al. Spatial organization of antennal olfactory sensory neurons in the female *Spodoptera littoralis* moth: differences in sensitivity and temporal characteristics [J]. *Chemical Senses*, 2012, 37(7): 613–629.
- [10] WU Han, XU Meng, HOU Chao, et al. Specific olfactory neurons and glomeruli are associated to differences in behavioral responses to pheromone components between two *Helicoverpa* species [J]. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 2015(9): 206.
- [11] HILLIER N K, VICKERS N J. Physiology and antennal lobe projections of olfactory receptor neurons from sexually isomorphic sensilla on male *Heliothis virescens* [J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 2007, 193(6): 649–663.
- [12] 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(1): 51–68.
- [13] 张健, 侯丽伟, 程彬, 等. 花布灯蛾触角感器扫描电镜观察[J]. *电子显微学报*, 2017, 36(6): 582–588.
- [14] DUMÉNIL C, JUDD G, BOSCH D, et al. Intraspecific variation in female sex pheromone of the codling moth *Cydia pomonella* [J]. *Insects*, 2014, 5(4): 705–721.
- [15] 王桂荣, 郭予元, 吴孔明. 棉铃虫触角感器的超微结构观察[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(12): 1479–1482.
- [16] 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): 1340–1347.
- [17] ANDERSON P, HALLBERG E, SUBCHEV M. Morphology of antennal sensilla auricillica and their detection of plant volatiles in the Herald moth, *Scoliopteryx libatrix* L. (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Arthropod Structure & Development*, 2000, 29(1): 33–41.
- [18] 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.
- [19] YANG S, LIU H, ZHANG J T, et al. Scanning electron microscopy study of the antennal sensilla of *Monema flavescens* Walker (Lepidoptera: Limacodidae) [J]. *Neotropical Entomology*, 2017, 46(2): 175–181.
- [20] THOMAS B, FRANCE C, DE BACKER L, et al. Structure and distribution of the sensilla on the antennae of *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) [J]. *Mircon*, 2017, 96: 16–28.
- [21] JIANG Xiaojing, NING Chao, GUO Hao, et al. A gustatory receptor tuned to D-fructose in antennal sensilla chaetica of *Helicoverpa armigera* [J]. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 2015, 60: 39–46.
- [22] SEADA M A. Antennal morphology and sensillum distribution of female cotton leaf worm *Spodoptera littoralis* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Journal of Basic and Applied Zoology*, 2015, 68: 10–18.
- [23] ZHENG Haixia, LIU Hongxia, GUO Shuyin, et al. Scanning electron microscopy study of the antennal sensilla of *Catocala remissa* [J]. *Bulletin of Insectology*, 2014, 67(1): 63–72.
- [24] 王焱, 穆兰芳, 曾凡荣, 等. 樟巢螟成虫触角感器的扫描电镜观察[J]. *应用昆虫学报*, 2011, 48(3): 675–679.
- [25] 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.
- [26] 马瑞燕, 杜家纬. 昆虫的触角感器[J]. *昆虫知识*, 2000(3): 179–183.
- [27] WEE S L, OH H W, PARK K C. Antennal sensillum morphology and electrophysiological responses of olfactory receptor neurons in trichoid sensilla of the diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae) [J]. *Florida Entomologist*, 2016, 99(sp1): 146–158.