

长角扁谷盗触角感器的扫描电镜观察

唐培安*, 李非凡, 段锦艳, 吴海晶, 陶冶心

(南京财经大学食品科学与工程学院, 江苏省现代粮食流通与安全协同创新中心,
江苏高校粮油质量安全控制及深加工重点实验室, 南京 210023)

摘要 利用扫描电镜对长角扁谷盗雌、雄成虫触角形态及感器进行观察,分析了雌、雄成虫触角的类型、形态与分布。结果表明,长角扁谷盗成虫触角由柄节、梗节和鞭节组成,其中鞭节由9个亚节组成。成虫触角上共有3类感受器,可将其分为8种,分别是:刺形感器(I、II、III、IV)、毛形感器(I、II、III)以及Böhm氏鬃毛。比较发现,雄虫触角每节的长度均显著长于雌虫,雌、雄虫触角的形态相似,类型基本相同。结合长角扁谷盗触角的形态、分布和已报道的锈赤扁谷盗的相关研究等,对长角扁谷盗成虫触角各类感器的功能进行了分析与推测。

关键词 长角扁谷盗; 扫描电镜; 触角; 感受器

中图分类号: Q 964 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.0529-1542.2017.04.011

Scanning electron microscopy observations on the antennal sensilla of *Cryptolestes pusillus*

Tang Peian, Li Feifan, Duan Jinyan, Wu Haijing, Tao Yexin

(College of Food Science and Engineering, Collaborative Innovation Center for Modern Grain Circulation and Safety, Key Laboratory of Grains and Oils Quality Control and Processing, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023, China)

Abstract Antennal morphology and sensilla of *Cryptolestes pusillus* were studied by scanning electron microscopy. The results showed that the antennae were made up of scape, pedicel and flagellum that consisted of nine segments. There were 3 kinds and 8 types of sensilla on the antennae of both sexes, including Böhm bristles, 4 types of sensilla chaetica and 3 types of sensilla trichodea. The length of every segment of the male antennae was significantly longer than that of female's. No difference was found among the morphology and distribution of sensilla between male and female. The functions of sensilla were speculated according to their morphology, distribution, and the previously reported research of rusty grain beetle.

Key words *Cryptolestes pusillus*; scanning electron microscope; antenna; sensillum

长角扁谷盗 *Cryptolestes pusillus* Schoenherr, 隶属鞘翅目 Coleoptera 扁谷盗科 Laemophloeidae, 其分布遍及全世界,在国内各省均有发现。长角扁谷盗以成虫及幼虫为害破碎或损伤的谷物、油料、粉类、豆类及干果等多种农产品及其加工品,偶尔也取食玉米象的卵,是仓库及加工厂中常见的、重要的后期性储粮害虫之一^[1]。当前,国内粮库对储粮害虫的防治仍以化学熏蒸为主。这种防治方法见效快、前期效果极好,然而,频繁、过量地使用不仅诱使害

虫产生抗药性,而且容易造成农药残留,引起环境污染。因此,探索绿色环保的生物防治剂已成为国内外防治储粮害虫的研究热点^[2-3]。目前,针对昆虫信息素、激素类似物等生物防治剂的研究较多,有研究证明:聚集信息素不仅可以用于储粮害虫的大量诱杀,而且可用于实时监测以及进口货物的检验检疫^[4-5]。与化学药剂相比,生物防治剂主要通过干扰害虫的新陈代谢、化学通讯等方式控制害虫,所以残留少,污染小。

收稿日期: 2016-08-15 修订日期: 2016-12-04

基金项目: 粮食公益性行业科研专项(201413007-2);国家级星火计划(2015GA690174);国家自然科学基金(31000828);江苏高校优势学科建设工程项目

* 通信作者 E-mail: tangpeian@163.com

昆虫触角感器是由触角表皮特化而成的重要器官,具有感受外界物理、化学刺激等功能^[6-8]。以常见的毛形感器为例,对皮蠹科、吉丁虫科、芫菁科、瓢虫科、天牛科等鞘翅目昆虫的研究发现:毛形感器可充当化学感器从而对多种信息素有反应^[9-15]。目前,扁谷盗类害虫已经上升为主要的储粮害虫之一,然而,对该类害虫的研究主要集中在形态特征及生活习性等方面,对其触角感器的研究报道较少^[16]。为此,本团队在研究报道了锈赤扁谷盗 *Cryptolestes ferrugineus* Stephens 触角感器超微结构的基础上,通过扫描电镜观察长角扁谷盗成虫触角及触角感器的外部形态,探究其触角感器的类型、形态和分布,推测感器与其相应行为反应之间的关系,为进一步了解昆虫触角感器的功能,进而为探索防治长角扁谷盗等扁谷盗科储粮害虫的途径提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

供试昆虫长角扁谷盗于 2014 年采自中储粮成都粮食储藏科学研究所,并在养虫室内连续繁殖数代。试验前,用全麦粉:干酵母粉=19:1(质量比)混合而成的饲料,在温度为(30±1)℃,湿度为(75±5)%、无光照条件的人工气候箱中饲养成虫。

1.2 试验试剂

叔丁醇(C₄H₁₀O),中国医药集团上海化学试剂公司;戊二醛(C₅H₈O₂),国药集团化学试剂有限公司;乙腈(CH₃CN),国药集团化学试剂有限公司。

1.3 试验仪器

超声波清洗器:KH5200B 型,昆山禾创超声仪器有限公司;扫描电镜:TM3000,日本株式会社日立那珂有限公司;HWS 型恒温恒湿箱:300D-4,宁波东南仪器有限公司;电热鼓风干燥箱:303-TA,

上海苏进仪器设备厂。

1.4 试验方法

昆虫触角的处理方法参考孙虹霞等^[17]并稍作修改。取雌、雄长角扁谷盗成虫触角各 5 对,在 0.1 mol/L 磷酸缓冲液中浸泡并用超声波处理 30 s,之后用超纯水冲洗 3 次。放入 2.5%戊二醛中固定 2 h,随后用 0.1 mol/L 磷酸缓冲液和超纯水各清洗 3 次。将清洗好的触角依次用 30%、50%、60%、70%、80%、90%和无水乙醇进行梯度脱水,每次脱水 10 min。最后依次用 50%叔丁醇、70%叔丁醇、100%叔丁醇、叔丁醇-乙腈(2:1)、叔丁醇-乙腈(1:1)、100%乙腈进行梯度干燥。

将干燥好的触角样品用导电双面胶按背面、腹面粘在扫描电镜样品台上,采用离子溅射器喷金,应用 TM3000 扫描电镜在 15 kV 加速电压下观察和摄影。雌、雄虫触角各观察 5 对。触角感器类型的形态学鉴定参照 Schneider^[18]。长度测量采用显微图像分析测量软件 Digimizer 3.2。

1.5 数据处理

采用 SPSS 17.0 进行数据计算和分析,采用独立样本 *t* 检验法比较长角扁谷盗雌、雄成虫触角每节长度、直径的差异;利用 Photoshop 对图片进行处理。

2 结果与分析

2.1 触角的一般形态

长角扁谷盗成虫触角由柄节、梗节和鞭节组成,其中鞭节由 9 个亚节组成,外形具有雌雄二型性,雌虫触角每节均呈念珠状,雄虫呈线状(图 1a~b)。雄虫触角(1 415.1~1 455.7 μm)显著长于雌虫(796.1~832.3 μm),雌雄触角各节长度均有显著差异(*P*<0.05)。长角扁谷盗成虫触角每节的长度和直径数据见表 1 和表 2。

表 1 长角扁谷盗成虫触角各节的长度¹⁾

Table 1 Mean lengths of antennal segments of *Cryptolestes pusillus*

| 性别 Sex | 柄节/μm Scape | 梗节/μm Pedicel | 鞭节/μm Flagellum | | | | | | | | | 全长/μm Overall length |
|-------------|----------------|------------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------------------|
| | | | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | F6 | F7 | F8 | F9 | |
| 雌 Female | (98.4±1.9)b | (73.4±1.4)b | (55.9±1.5)b | (56.8±1.4)b | (63.5±1.7)b | (55.7±1.6)b | (68.4±1.9)b | (54.6±1.7)b | (88.2±1.7)b | (85.0±1.7)b | (114.4±1.7)b | (814.2±18.1)b |
| 雄 Male | (134.0±2.2)a | (94.3±0.9)a | (79.8±2.4)a | (104.0±2.5)a | (130.5±1.5)a | (120.2±1.2)a | (131.3±2.2)a | (123.7±1.1)a | (151.0±1.2)a | (155.0±2.2)a | (211.7±2.8)a | (1435.4±20.3)a |

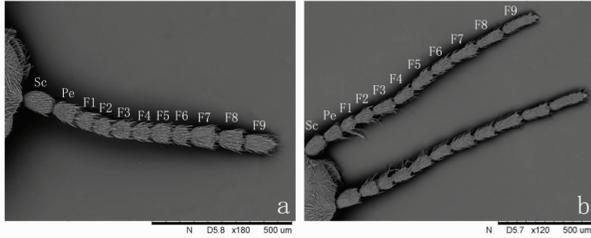
1) 表中数据为平均值±标准误;同列数据后不同字母表示雌、雄成虫触角各节长度差异显著(*P*<0.05)。下同。

Data in this table are mean±SE. The different letters in the same column indicate significant difference between sexes based on *t*-test at 0.05 level. The same below.

表 2 长角扁谷盗成虫触角各节的直径

Table 2 Diameters of the antennal segments of *Cryptolestes pusillus*

| 性别 Sex | 柄节/ μm Scape | 梗节/ μm Pedicel | 鞭节/ μm Flagellum | | | | | | | | |
|-------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | F6 | F7 | F8 | F9 |
| 雌 Female | (70.3 \pm 2.3)b | (59.7 \pm 3.4)b | (53.6 \pm 1.9)b | (51.8 \pm 3.4)b | (55.3 \pm 2.6)a | (52.1 \pm 2.8)a | (56.4 \pm 2.6)a | (52.8 \pm 2.9)a | (63.1 \pm 4.1)a | (52.1 \pm 4.1)b | (60.8 \pm 3.9)a |
| 雄 Male | (85.8 \pm 4.6)a | (68.5 \pm 6.6)a | (62.9 \pm 2.8)a | (56.9 \pm 0.8)a | (53.3 \pm 4.4)a | (49.7 \pm 5.4)a | (51.5 \pm 2.9)b | (52.8 \pm 5.4)a | (54.0 \pm 2.4)b | (57.0 \pm 4.8)a | (53.2 \pm 3.9)b |



a: 雌虫柄节(Sc)、梗节(Pe)、第1至第9亚鞭节(F1~F9); b: 雄虫柄节(Sc)、梗节(Pe)、第1至第9亚鞭节(F1~F9)
a: Scape (Sc), pedicel (Pe), flagellum 1 to flagellum 9 (F1-F9) of female; b: Scape (Sc), pedicel (Pe), flagellum 1 to flagellum 9 (F1-F9) of male

图 1 长角扁谷盗触角一般形态

Fig. 1 Morphology of antennae of *Cryptolestes pusillus*

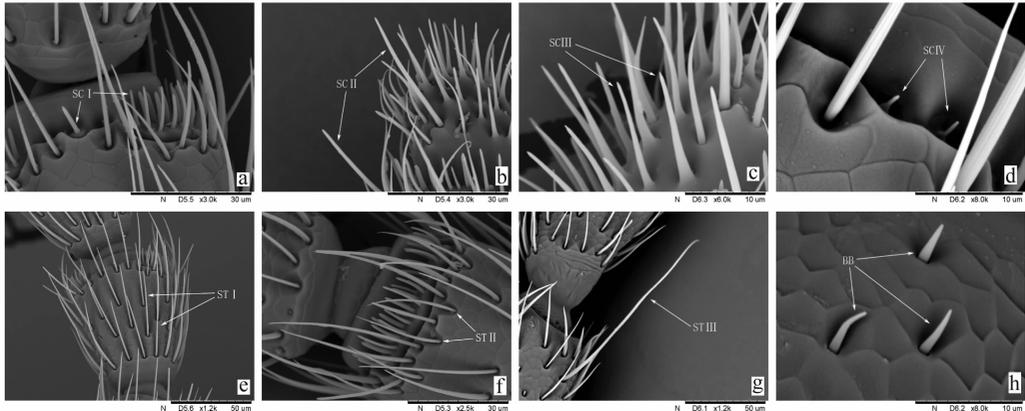
2.2 触角感器类型、形态、分布与数量

利用扫描电镜观察长角扁谷盗成虫触角感器,发现有 3 种类型的感器,分别为毛形感器、刺形感器、Böhm 氏鬃毛。

2.2.1 刺形感器 (sensilla chaetica, SC)

长角扁谷盗刺形感器由基部向端部渐细,端部钝

圆且略微弯曲,着生于鞭节第 7、8、9 节,表面光滑无明显纵纹。根据其长度与形状不同可分为 4 种类型: I 型、II 型、III 型和 IV 型。刺形感器 I (SCI, 图 2a) 着生于鞭节第 7、8、9 亚节,长度 7.87~11.6 μm ,基部直径 1.01~1.49 μm ;鞭节第 7、8 亚节端部两侧各有一簇感器,有大量的刺形感器 I 着生于感器簇中,数量较多。刺形感器 II (SCII, 图 2b) 着生于鞭节第 9 亚节端部,明显高于同一区域内的其他感器,长度 30.2~32.4 μm ,基部直径 1.45~1.59 μm ;数量较少,仅数根。刺形感器 III (SCIII, 图 2c) 着生于鞭节第 9 亚节,长度 8.6~14.3 μm ,基部直径 1.20~1.73 μm ;大多直立生长于触角表面,端部较基部略细,数量较少。刺形感器 IV (SCIV, 图 2d) 着生于鞭节第 7、8 亚节端部开阔的臼状触角窝内,长度 2.00~2.33 μm ,基部直径 0.33~0.41 μm ;形似芽状,感器细而短,数量较少。



a: 刺形感器 I (SC I); b: 刺形感器 II (SC II); c: 刺形感器 III (SC III); d: 刺形感器 IV (SC IV); e: 毛形感器 I (ST I); f: 毛形感器 II (ST II); g: 毛形感器 III (ST III); h: Böhm 氏鬃毛 (BB)
a: Sensilla chaetica I (SC I); b: Sensilla chaetica II (SC II); c: Sensilla chaetica III (SC III); d: Sensilla chaetica IV (SC IV); e: Sensilla trichodea I (ST I); f: Sensilla trichodea II (ST II); g: Sensilla trichodea III (ST III); h: Böhm bristles (BB)

图 2 长角扁谷盗触角感器类型

Fig. 2 Morphology of antennal sensilla of *Cryptolestes pusillus*

2.2.2 毛形感器 (sensilla trichodea, ST)

长角扁谷盗毛形感器细长,端部尖细,表面具明显纵纹,大多平行于触角表面。根据其长度与形状不同可分为 3 种类型: I 型、II 型和 III 型。毛形感器

I (ST I, 图 2e) 着生于触角每一节上凹陷的基窝内;整体贴近触角表面,与触角表面形成 20° 左右夹角,长度 22.1~86.0 μm ,基部直径 1.10~3.32 μm ;数量最多,在柄节、梗节、鞭节均有分布。毛形感器

II (ST II, 图 2f) 在鞭节第 7、8、9 亚节端部均有分布, 主要着生于鞭节第 9 亚节端部, 与 ST I 外形相似, 但长度较短且更尖细, 端部更弯曲, 长度 12.1~17.3 μm , 基部直径 0.92~1.33 μm , 数量较少。毛形感器 III (ST III, 图 2g) 仅分布于柄节腹面, 着生处基窝深且宽, 长度 122~153 μm , 基部直径 2.69~3.33 μm , 是所有感器中最长的, 仅有一根。

2.2.3 Böhm 氏鬃毛 (Böhm bristles, BB)

长角扁谷盗 Böhm 氏鬃毛 (BB, 图 2h) 着生于柄节与梗节连接处, 被柄节表皮遮盖, 端部钝圆且略微弯

曲, 长度 3.22~4.86 μm , 基部直径 0.87~1.16 μm , 数量较少, 鞭节上无此感器。

2.3 雌、雄虫触角感器比较

长角扁谷盗雌、雄成虫触角均具有 Böhm 氏鬃毛、毛形感器 (I、II、III) 与刺形感器 (I、II、III、IV) 这三类感器。对长角扁谷盗雌、雄成虫触角感器的长度、基部直径和形态特征的比较表明: 除雄虫毛形感器 I 的长度、基部直径显著长于雌虫外, 其他各类型的感器均无显著差异; 雌、雄成虫触角感器的形态特征不存在差异。雌、雄成虫间触角感器的比较数据见表 3。

表 3 长角扁谷盗雌、雄成虫触角感器的类型与形态¹⁾

Table 3 Morphological characteristics of antennal sensilla of *Cryptolestes pusillus*

| 感器类型 Type of sensillum | 性别 Sex | 感器的外部特征 Morphological characteristics of sensilla | | | | | |
|------------------------------------|-----------|---|----------------------------------|-----------|------------|-------------|--------------|
| | | 长度/ μm Length | 基部直径 $r/\mu\text{m}$ Diameter | 顶端 Tip | 外壁 Wall | 形状 Shape | 基窝 Socket |
| 刺形感器 I Sensilla chaetica I | 雌 Female | 9.2±1.7 | 1.1±0.1 | 钝圆 | 光滑 | 弯曲 | 狭窄 |
| | 雄 Male | 9.9±2.0 | 1.3±0.1 | Blunt | Smooth | Curved | Tight |
| 刺形感器 II Sensilla chaetica II | 雌 Female | 30.8±1.2 | 1.5±0.1 | 尖细 | 光滑 | 直立 | 狭窄 |
| | 雄 Male | 31.4±1.3 | 1.4±0.1 | Sharp | Smooth | Straight | Tight |
| 刺形感器 III Sensilla chaetica III | 雌 Female | 10.1±0.8 | 1.4±0.1 | 钝圆 | 光滑 | 直立 | — |
| | 雄 Male | 11.6±1.0 | 1.4±0.1 | Blunt | Smooth | Straight | — |
| 刺形感器 IV Sensilla chaetica IV | 雌 Female | 2.1±0.3 | 0.3±0.05 | 钝圆 | 光滑 | 直立 | 宽阔 |
| | 雄 Male | 2.1±0.1 | 0.3±0.07 | Blunt | Smooth | Straight | Wide |
| 毛形感器 I Sensilla trichodea I | 雌 Female | (34.6±2.8)b | (1.5±0.7)b | 尖细 | 具纵纹 | 直立 | 宽阔 |
| | 雄 Male | (55.7±6.1)a | (2.2±0.8)a | Sharp | Grooved | Straight | Wide |
| 毛形感器 II Sensilla trichodea II | 雌 Female | 14.7±1.6 | 1.1±0.2 | 尖细 | 具纵纹 | 弯曲 | 狭窄 |
| | 雄 Male | 15.3±1.2 | 1.2±0.1 | Sharp | Grooved | Curved | Tight |
| 毛形感器 III Sensilla trichodea III | 雌 Female | 131±3.9 | 2.6±0.3 | 尖细 | 具纵纹 | 弯曲 | 宽阔 |
| | 雄 Male | 140±4.7 | 2.8±0.4 | Sharp | Grooved | Curved | Wide |
| Böhm 氏鬃毛 Böhm bristles | 雌 Female | 3.7±0.4 | 0.9±0.1 | 尖细 | 光滑 | 弯曲 | 狭窄 |
| | 雄 Male | 4.1±0.3 | 1.0±0.2 | Sharp | Smooth | Curved | Tight |

1) 表中数据为平均值±标准误; 不同字母表示雌、雄成虫触角同种感器长度有显著差异 ($P < 0.05$); “—”表示无此结构。

Data in this table are mean±SE. Different letters for the same antennal sensilla between sexes indicate significant difference based on t -test at 0.05 level. “—” means no such structure.

3 讨论

本文对长角扁谷盗成虫触角感器的超微结构进行了扫描电镜观察, 在参考对近缘种昆虫锈赤扁谷盗触角感器研究结果的基础上, 对长角扁谷盗触角感器的功能做了推测。长角扁谷盗触角感器类型属于鞘翅目昆虫常见类型, 其主要生理功能在其他鞘翅目昆虫中已有报道^[6,19-21]。一般认为刺形感器具有感受外界机械力的作用和感受化学信息的作用^[2]。长角扁谷盗刺形感器 I 较短, 集中分布于感器簇中, 因此认为刺形感器 I 为化学感器。刺形感器 II 高于周围感器, 较先接触到外界物体, 因此认为刺形感器 II 为机械感器。刺形感器 III 表面光滑, 长

度较短, 分布较集中, 故认为其为化学感器。刺形感器 IV 长度较短, 着生于臼状触角窝内, 这种微小的凹陷结构常被定义为腔锥感器或坛形感器, 具有感受温度、湿度的功能^[23], 因此认为刺形感器 IV 为化学感器。

长角扁谷盗毛形感器 I 数量多, 分布广, 表面具明显纵纹, 而且感器整体可发生较大程度的弯曲, 因此认为毛形感器 II 为机械感器。毛形感器 II 长度较短, 主要分布在鞭节第 9 亚节端部, 其形态特点与云杉卷叶蛾 *Choristoneura fumiferana* 的一种毛形感器十分相似, 该感器被证明为化学感受器, 因此推测长角扁谷盗毛形感器 II 也为化学感受器^[24]。毛形感器 III 在其他昆虫中未见报道, 因其着生于柄节腹面, 长度为毛形感器 I 的 2~3 倍, 生长方向向口部

靠拢,便于感受口部周围的化学信息,有助觅食,因此推测毛形感器Ⅲ为化学感受器^[25]。

Böhm 氏鬃毛仅着生于柄节和梗节基部,大多垂直于表面或略微弯曲,传感器表面光滑无孔。一般认为 Böhm 氏鬃毛为一种感受重力的机械传感器,当遇到机械刺激时,能够缓冲重力的作用力,进而控制触角位置下降的速度^[18]。

长角扁谷盗与锈赤扁谷盗均为扁谷盗属的后期性储粮害虫。研究发现:两者均具有毛形感器、刺形感器、Böhm 氏鬃毛这 3 类感器;其中,毛形感器在长角扁谷盗中发现了 3 种,而锈赤扁谷盗中仅有 2 种,这可能是由于分类标准与命名方式的不同造成的^[25],其他 2 类感器的形态、分布均十分相似。基于两种害虫在生物学、生态学以及触角传感器特性的相似性,认为对这两种害虫可采用相同的防治措施^[26-28]。

本文为今后进一步开展长角扁谷盗形态学、行为学、电生理研究等奠定了基础。对成虫触角传感器更深层次的研究有待于借助电生理实验技术,从本质上探讨长角扁谷盗成虫各类传感器的功能以及在行为反应中的作用。

参考文献

[1] 白旭光. 储藏物害虫与防治[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 268-269.

[2] 周健, 刘尊华, 周剑宇, 等. 绿色储粮技术防治储粮害虫的研究[J]. 粮食储藏, 2013, 42(3): 20-25.

[3] 赵英杰, 王殿轩, 郭超, 等. 储粮害虫生物防治技术研究现状与应用思考[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2006, 27(5): 68-72.

[4] 赵玉民, 王艳军, 陈国发, 等. 小蠹聚集信息素研究与应用的进展[J]. 内蒙古林业科技, 2011, 37(3): 55-60.

[5] 高长启, 徐桂莲, 张晓军, 等. 应用聚集信息素监测与防治纵坑切梢小蠹[J]. 中国森林病虫, 2004, 23(2): 30-32.

[6] 张晓军, 孙伟, 张健, 等. 鞘翅目昆虫触角感器研究进展[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(7): 2932-2935.

[7] 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.

[8] Lopes O, Barata E N, 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.

[9] 闻鸣, 曲叶宽, 赵文琦, 等. 2 种鞘翅目仓储害虫触角的显微结构研究[J]. 安徽农学通报, 2015, 21(12): 36-38.

[10] 刘玉双, 石福明. 红缘吉丁(鞘翅目: 吉丁虫科)触角传感器的扫描电镜观察[J]. 昆虫学报, 2005, 48(3): 469-472.

[11] 李秀敏, 任国栋, 王新谱. 蓝绿齿角芫菁异型触角的扫描电镜观察(鞘翅目: 芫菁科)[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2013, 33(4): 408-412.

[12] 韩宝瑜, 陈宗懋, 王梅. 七星瓢虫和异色瓢虫 3 变种成虫触角感器扫描电镜观察[J]. 华东昆虫学报, 2000, 9(1): 24-28.

[13] 王四宝, 周弘春, 苗雪霞, 等. 松褐天牛触角感器电镜扫描和触角电位反应[J]. 应用生态学报, 2005, 16(2): 317-322.

[14] Saïd I, Tauban D, Renou M, et al. Structure and function of the antennal sensilla of the palm weevil *Rhynchophorus palmarum* (Coleoptera, Curculionidae)[J]. Journal of Insect Physiology, 2003, 49(9): 857-872.

[15] Bartlett 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 and Embryology, 1999, 28(4): 291-300.

[16] 段锦艳, 吴海晶, 唐培安, 等. 八个品系锈赤扁谷盗和谷蠹的磷化氢抗性测定[J]. 粮食储藏, 2016, 45(1): 1-4.

[17] 孙虹霞, 胡新军, 舒迎花, 等. 白背飞虱触角感器的扫描电镜观察[J]. 昆虫学报, 2006, 49(2): 349-354.

[18] Schneider D. Insect antennae [J]. Annual Review of Entomology, 1964, 9(1): 103-122.

[19] 胡飞. 十种储藏物害虫触角感器的超微结构研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009.

[20] 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.

[21] 费仁雷, 李克斌, 肖春, 等. 暗黑鳃金龟触角超微结构[J]. 植物保护, 2012, 38(4): 63-67.

[22] 马瑞燕, 杜家纬. 昆虫的触角感器[J]. 昆虫知识, 2000, 37(3): 179-183.

[23] Rü B, Renard S, Allo M R, et al. Antennal sensilla and their possible functions in the host-plant selection behaviour of *Phenacoccus manihoti* (Matile-Ferrero) (Homoptera: Pseudococcidae)[J]. International Journal of Insect Morphology and Embryology, 1995, 24(4): 375-389.

[24] Palanaswamy P, Seabrook W. Behavioral responses of the female eastern spruce budworm *Choristoneura fumiferana* (Lepidoptera: Tortricidae) to the sex pheromone of her own species [J]. Journal of Chemical Ecology, 1978, 4(6): 649-655.

[25] 唐培安, 薛昊, 孔德英, 等. 锈赤扁谷盗触角传感器的扫描电镜观察[J]. 植物保护, 2015, 41(1): 74-77.

[26] 姜自德, 苏林. 锈赤扁谷盗的防治措施[J]. 粮油仓储科技通讯, 2015, 31(3): 31-32.

[27] 苏青峰, 王殿轩, 郑超杰, 等. 锈赤扁谷盗的综合治理技术对策[J]. 粮食储藏, 2013, 42(4): 3-7.

[28] 沈兆鹏. 重要储粮甲虫的识别与防治: V. 赤拟谷盗、杂拟谷盗、长角扁谷盗、锈赤扁谷盗[J]. 粮油仓储科技通讯, 1998(6): 41-44.