

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.20240103

草地贪夜蛾幼虫内脏器官解剖结构研究

陈琦^{1,2,3}, 姜万岩^{1,2}, 井焕然^{1,2}, 吴梅香^{1,2*}

¹福建农林大学植物保护学院, 福建 福州 350002; ²农林生物安全国家重点实验室, 福建 福州 350002;

³漳州市华安县农业农村局, 福建 漳州 363800

摘要:【目的】草地贪夜蛾是近年来入侵中国的一种重大害虫。通过开展该虫幼虫内脏器官解剖结构研究, 掌握其各内脏器官的构造组成, 可为该虫的生理学研究 and 害虫防治提供基础。【方法】在超景深体视数码显微镜下对草地贪夜蛾 5 龄幼虫的内脏器官进行解剖观察和拍照分析。【结果】草地贪夜蛾幼虫主要内部器官系统包括消化系统、中枢神经系统、排泄器官和呼吸系统等。消化系统由消化道、丝腺和唾腺等组成, 其中消化道由前肠、中肠和后肠 3 段组成; 淡红色的脑和具有 12 对体神经节的腹神经索共同构成中枢神经系统, 其中腹末最后 2 对体神经节靠近愈合; 主要排泄器官马氏管位于消化道后端的两侧, 每侧各 3 条共 6 条, 呈黄色透明状; 呼吸系统由气门和气管组成, 有 9 对有效气门, 分布于幼虫的前胸和腹部的第 1~8 节; 每个气门内部包括闭弓、闭带和闭杆等; 气管由粗细不等的主气管和支气管构成, 气管内膜局部加厚形成螺旋丝, 可增强气管的韧性。【结论】草地贪夜蛾幼虫内脏器官系统的构成、分布位置与鳞翅目其他昆虫相似, 该结果可为杀虫剂作用靶标及机理等研究奠定基础。

关键词: 草地贪夜蛾; 消化系统; 中枢神经系统; 马氏管; 呼吸系统

Anatomical structures of the larval internal organs of *Spodoptera frugiperda*

CHEN Qi^{1,2,3}, JIANG Wanyan^{1,2}, JING Huanran^{1,2}, WU Meixiang^{1,2*}

¹College of Plant Protection, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China;

²State Key Laboratory of Agricultural and Forestry Biosecurity, Fuzhou, Fujian 350002, China;

³The Bureau of Agriculture and Rural Affairs of Hua'an County, Zhangzhou, Fujian 363800, China

Abstract: 【Aim】The fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, is a major invasive pest that has recently entered China. Investigating the anatomical structures of the larval internal organs of *S. frugiperda* can provide foundational knowledge for physiological study and control against this pest. 【Method】The internal organs of the fifth-instar larvae of *S. frugiperda* were dissected, observed, and photographed under a deep-field stereo-microscope. 【Result】The primary internal organ systems of *S. frugiperda* larvae include the digestive system, central nervous system, excretory organs, and respiratory system. The digestive system consists of the alimentary canal, silk glands, and salivary glands, with the alimentary canal comprising the fore-gut, mid-gut, and hind-gut. The central nervous system is composed of a pale red brain and a ventral nerve cord with 12 pairs of ganglia, with the last two pairs of abdominal ganglia being close and fused. The primary excretory organs, the Malpighian tubules, are located on both sides of the posterior end of the alimentary canal, with 3 tubules on each side, totaling six, and appear yellow and transparent. The respiratory system consists of spiracles and tracheae, with 9 pairs of functional spiracles distributed on the prothorax and abdominal segments 1-8 of each larva. Each spiracle internally contains a closing bow, a closing band, and a closing rod. The tracheal system is composed of main tracheae and branch tracheae of varying thicknesses, with the tracheal intima locally thickened to form helical filaments to enhance the tracheal resilience. 【Conclusion】The composition and distribution of the internal organ systems in *S. frugiperda* larvae are similar to those of other lepidopteran insects. This result can lay a foundation for the study of insecticide targets and mechanisms.

Key words: *Spodoptera frugiperda*; digestive system; central nervous system; Malpighian tubes; respiratory system

收稿日期(Received): 2024-07-29 接受日期(Accepted): 2024-11-25

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1202101-4); 福建省科技特派员工作经费(KTP21283A); 2021年度县级科技特派员工作经费(KTP23005B)

作者简介: 陈琦, 女, 硕士研究生。研究方向: 有害生物综合治理。E-mail: 1171976196@qq.com

* 通信作者(Author for correspondence), 吴梅香, E-mail: wuivy2000@126.com

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (J.E.Smith) 又称草地夜蛾、伪黏虫,隶属于鳞翅目 Lepidoptera 夜蛾科 Noctuidae 灰翅夜蛾属 *Spodoptera*,原产地为美洲的热带和亚热带地区 (Sparks, 1979),具适生区广、世代重叠严重和迁飞能力强等特点 (潘兴鲁等, 2020; Montezano *et al.*, 2018)。2018年12月,我国云南省首次高空捕获到草地贪夜蛾成虫 (Sun *et al.*, 2019); 2019年1月该虫成功从东南亚侵入我国,并逐渐由南向北扩展危害区域 (魏向敏等, 2020; 杨学礼等, 2019)。草地贪夜蛾寄主丰富,可取食危害包括禾本科、豆科、菊科等在内的 76 个科 350 多种植物 (Montezano *et al.*, 2018)。目前,我国超过 30 个省发生草地贪夜蛾,已发现可危害玉米 *Zea mays* L.、水稻 *Oryza sativa* L.、甘蔗 *Saccharum officinarum* L.、花生 *Arachis hypogaea* Linn. 等粮食和经济作物 21 种,严重威胁国家粮食生产安全 (郭井菲等, 2022)。

当前,草地贪夜蛾的研究多聚焦在准确鉴定 (孔德英等, 2019; 孔子艺等, 2020)、寄主偏好 (牛浩等, 2024; 邱良妙等, 2024; 徐蓬军等, 2019)、潜在分布 (韩欣娆等, 2021)、应急防控 (丁奎婷等, 2023; 王磊等, 2019; 吴孔明, 2020)、生物防治 (梁铭荣等, 2020; 薛陶然等, 2024)、抗药性监测 (邱良妙等, 2025) 等方面,但关于其内脏器官解剖学层面则鲜有报道。与其他昆虫相似,草地贪夜蛾幼虫的取食、蜕皮和假死等生理活动行为和体内各器官、系统的协调运作密不可分。冯波等 (2020) 通过解剖草地贪夜蛾雌性生殖系统,研究卵巢的发育状态,为其种群的发生和迁飞动态提供精准监测依据;赵静等 (2021) 运用卵巢解剖技术,观察不同日龄草地贪夜蛾雌性成虫的卵巢发育进度,并分析其与生殖关键基因卵黄原蛋白表达的相关性;葛文超等 (2019) 运用扫描电镜观察草地贪夜蛾 5 龄幼虫头部、触角及口器,明确其超微形态特征及感器种类、分布及数量等。本研究通过解剖草地贪夜蛾幼虫主要内脏器官,观察分析该虫各内脏器官的相互位置、构造组成等,为深入研究其行为机制、生理特性和防控策略等提供依据。

1 材料与与方法

1.1 供试虫源

供试草地贪夜蛾采自福建省闽侯县大湖乡的玉米田,在人工气候箱 (PRX-350B) 内用玉米粒进

行继代饲养,不定期补充野外虫源复壮。饲养条件为温度 (27 ± 1) °C、相对湿度 (75 ± 5) %、光周期 16 h : 8 h (L : D)。选择健康、活跃的 5 龄幼虫进行解剖观察。

1.2 试验器材

人工气候箱、LEICA DVM6 超景深体视数码显微镜、海信冰箱、蜡盘、解剖针、昆虫针、解剖剪、眼用镊、0.9%生理盐水等。

1.3 试验方法

取一头草地贪夜蛾 5 龄幼虫,置于冰箱冷冻室 ($0\sim 4$ °C) 冷冻 15 min 后取出。左手食指和拇指夹住幼虫的头胸交界处,虫体背面朝上,右手用解剖剪自肛门上方插入,沿背中线由后向前剪开体壁,至头部时偏向右侧剪开头壳,用解剖针和眼用镊轻轻平推开体壁,用 3 号昆虫针将其固定在蜡盘中,加入 0.9%生理盐水浸没虫体,在超景深体视数码显微镜下放大不同倍数仔细观察并拍照记录。

将解剖开的草地贪夜蛾幼虫头部朝前,置于体视数码显微镜下,仔细观察贯穿体腔中央的消化道、消化道两侧的侧气管干、消化道中后端近腹部第 5 节两侧的睾丸 (雄虫) 以及马氏管等器官组织。

观察好内部器官的相互位置后,将气管组织与消化道剥离开,分离丝腺与消化道,一并移出整段的消化道,置于另一干净蜡盘上观察消化道分段和马氏管着生位置。观察已剥离消化道的幼虫体腔,用眼用镊和解剖针去除体腔内的脂肪体,小心剔除头部肌肉,并用品红溶液将中枢神经系统染色后在超景深体视数码显微镜下拍摄图像、观察分析脑和腹神经索的构造组成。

另取一头幼虫,冷冻后取出,将幼虫头部朝左,侧面观放置于蜡盘中,在超景深体视数码显微镜下观察分析躯体上的气门组成和外观构造;然后在腹部最后一对气门周围用解剖针刺破体壁一圈,用眼用镊和解剖针配合剥离气门表皮,仔细观察并拍摄气门的内部构造。

2 结果与分析

2.1 草地贪夜蛾内脏器官的相互位置

观察发现,草地贪夜蛾幼虫的体壁为位于体躯外表的柔软构造,表面散生原生刚毛;体壁肌附着在体壁下方。消化道为一条自口到肛门的管道,位于体腔中央,占据体腔的大部分,其中直肠位于消化道的最后部位,呈卵圆形。丝腺位于消化道两

侧,为一对无色透明细长腺体。脑为左右对称的一对构造,位于头壳正下方及消化道前端背侧面,呈淡红色。腹神经索位于消化道腹面,前端向前上方绕过消化道背面与脑相连。消化道近腹部第 5 节处有左右对称的一对睾丸,呈黄色,上面密布气管(图 1)。马氏管位于幽门瓣和括约肌之间。背血管位于消化道正上方的背膈之上(图 2)。气管由虫体两侧气门通入,由粗渐细分支的黑褐色气管主干或气管分支,分布在体腔两侧和各内脏气管表面(图 2)。

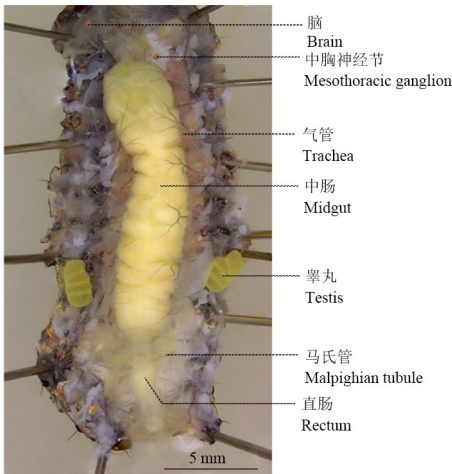


图 1 草地贪夜蛾幼虫内脏器官的相互位置

Fig.1 Mutual position of internal organs of *S. frugiperda* larva

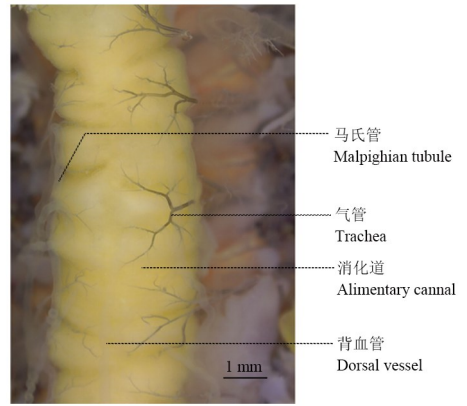


图 2 草地贪夜蛾幼虫的背血管

Fig.2 Dorsal vessels of *S. frugiperda* larva

2.2 消化系统

草地贪夜蛾幼虫的消化系统由消化道、唾腺、丝腺等结构共同组成。消化道开口于头部的口,终止于腹部末端的肛门,为一根圆筒形的直管,包括前肠、中肠和后肠,前肠由食道和嗦囊构成,后肠则由回肠和直肠构成(图 3A)。食道为一条细长的管道,呈乳黄色;嗦囊紧接着食道,较食道直径更大。中肠为消化道的中间部分,位于第 1~6 腹节,约占整个消化道的 7/10 长,较前肠和后肠粗大,上面密布气管。后肠是消化道的后段,位于第 7 腹节至腹部末端,包括回肠和直肠 2 个部分。丝腺(图 3B)为一对透明的无色细长腺体,前段均匀细长,后段变粗。

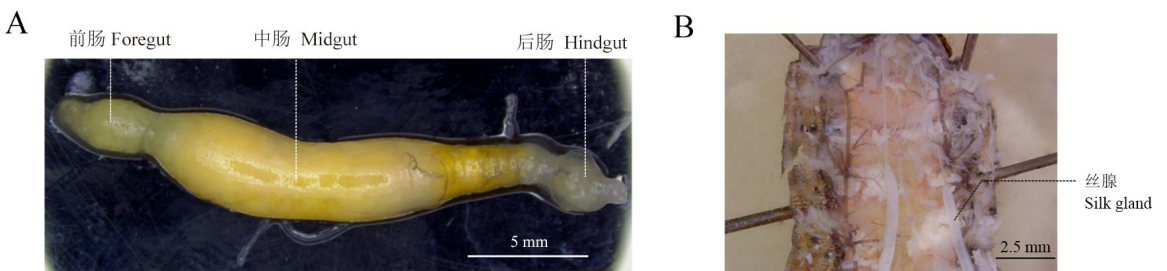


图 3 草地贪夜蛾幼虫的消化道(A)和丝腺(B)

Fig.3 Larval digestive tract (A) and silk gland (B) of *S. frugiperda*

2.3 排泄系统

草地贪夜蛾幼虫与鳞翅目家蚕幼虫一样,排泄系统的主要器官为马氏管(图 4)。由于草地贪夜蛾幼虫取食食物的不同,马氏管所呈现的颜色也不同,当取食玉米叶片时,马氏管呈绿色,当取食玉米子粒时,消化道呈黄色。马氏管开口于幽门瓣和括约肌之间,总体呈黄色透明,波浪弯曲状,开口于消

化道中后肠之间,消化道左右两侧各 3 条,共 6 条。其中 3 根曲折弯曲的马氏管会沿着中肠两侧向前向上折行,最长者抵达至腹部的第 2 节后折回;另 3 根马氏管向后延伸,末端黏连成环形,扭曲盘绕形成蜿蜒曲折的“S”形(图 4),与脂肪体、支气管及结缔组织细长条丝一起粘附在直肠两侧。

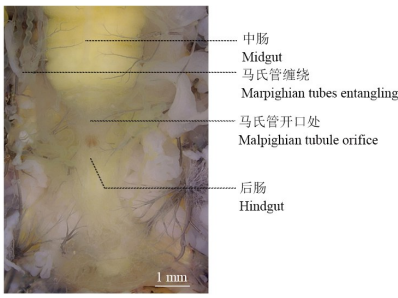


图 4 草地贪夜蛾幼虫的马氏管

Fig.4 Marpighian tube of *S. frugiperda* larva

2.4 中枢神经系统

2.4.1 脑 中枢神经系统由头部的脑和腹面的腹神经索组成。用眼镊和解剖针小心将脑挑出后发现,脑位于头壳的下方及咽喉上方,又称为咽上神经节。其色淡红,为左右对称的一对近似球状构造,向后通过围咽神经连索与颞神经节(又称为咽下神经节)相连(图 5)。

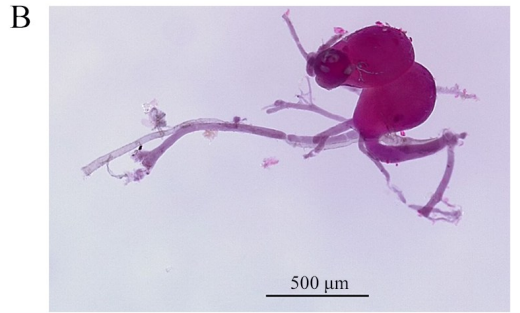
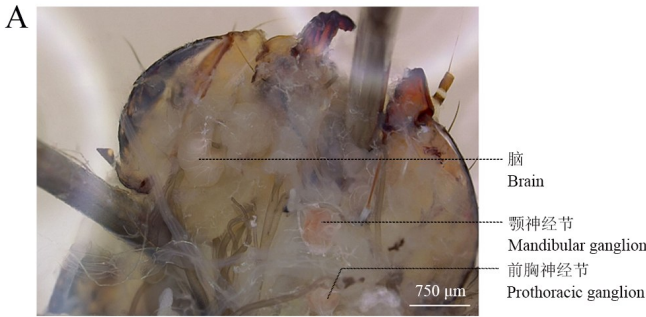


图 5 草地贪夜蛾幼虫的脑

Fig.5 The enlarged brain of *S. frugiperda* larva

A: 脑与颞神经节相接处; B: 脑。

A: The junction between brain and jaw ganglion; B: The enlarged brain.

2.4.2 腹神经索 草地贪夜蛾幼虫的颞神经节和体神经节共同组成腹神经索,颞神经节与各体神经节均为淡红色。体神经节又分为胸神经节和腹神经节 2 种神经节(图 6)。经过品红染色后可明显看出,腹神经索的第一个神经节是颞神经节,位于咽喉腹面,为复合神经节,可支配昆虫口器的取食活动;胸神经节 3 对,与颞神经节紧接着为前胸神经节,中后胸上分别着生中胸神经节和后胸神经节;腹神经节共 8 对,其中腹部第 1~6 节各有一对神经节,通过并在一起的 2 根神经索将前后神经节连接起来,其位置在于各节 2 个气门的侧气管干之间,各神经节还发出侧神经通向气门,用以控制腹部气门的开闭活动;腹部第 7 节和第 8 节之后的神经节形成一个比前面各体神经节大约 1 倍的神经节复合体(图 7),并发出 6 根侧神经,其中前面一对侧神经通向腹部第 8 节的气门,以控制气门的的活动;后面发出 4 条较大的神经通向臀足和后肠,用以控制臀足的活动和后肠的活动。神经索连接着前后的神经节。

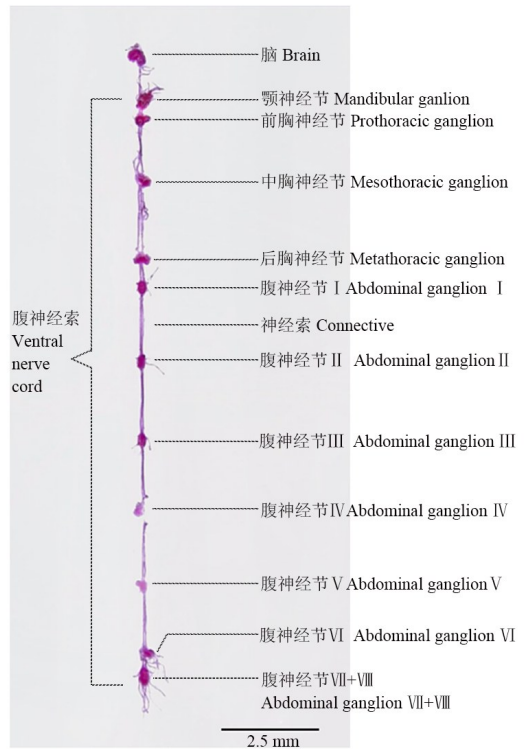


图 6 草地贪夜蛾幼虫的中枢神经系统

Fig.6 Central nervous system of *S. frugiperda* larva

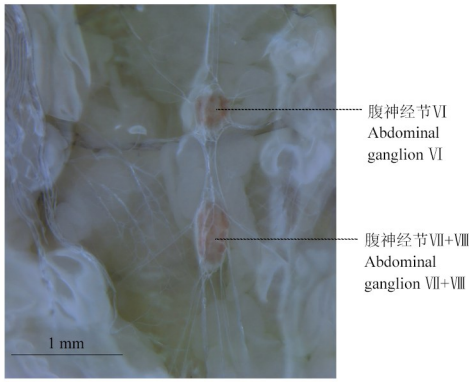


图 7 草地贪夜蛾幼虫腹部第 7 节与第 8 节形成的复合神经节

Fig.7 Compound ganglion of abdominal segment 7 and 8 of *S. frugiperda* larva

2.5 呼吸系统

草地贪夜蛾幼虫的呼吸系统主要由气门和气管组成。有 9 对有效气门,前胸 1 对,腹部 1~8 节各 1 对,气门外观为长椭圆形,在气腔口内侧围有紧密的细毛,是气门的过滤结构,称为气门筛或筛板,其作用是过滤和阻止外来异物的侵入;在气腔口还围着一块较硬化的骨片,称为围气门片(图 8A)。气门内部构造包括闭弓、闭带和闭杆 3 个部分(图 8B)。气管是外胚层内陷形成的具螺旋丝内壁的管道(图 8C),分布于体内各处,分为气管主支和气管分支,呈白色或黑色。螺旋丝为内膜加厚形成螺旋缠绕状的内脊,其作用是增强气管的弹性,使气管保持饱和挺立状,有利于体内的气体交换。

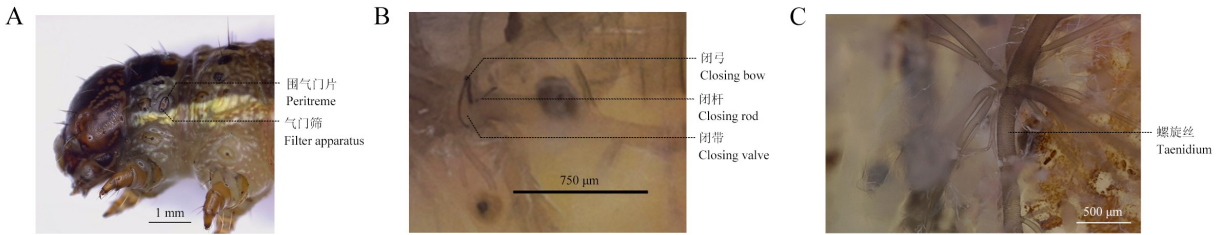


图 8 草地贪夜蛾幼虫的呼吸系统

Fig.8 Respiratory system of *S. frugiperda* larva

A: 前胸气门外观;B: 气门内面观;C: 气管螺旋丝。

A: Appearance view of pre-thorax spiracle; B: Internal view of spiracle; C: Larval spiral filament.

3 讨论

不同种类的昆虫,因行为习性和生活环境的不同,其体内各内脏器官的分布位置和结构组成常存在差异。本研究表明,草地贪夜蛾幼虫内脏器官的分布位置及结构组成与鳞翅目其他昆虫,如棉铃虫 *Helicoverpa armigera* Hübner、棒蝠蛾 *Napialus hunanensis* Chu et Wang、小菜蛾 *Plutella xylostella* L. 等的幼虫基本相同(程云吉和牟吉元,1998;梁勇,2013;王建国等,1997)。

鳞翅目幼虫中肠前端通常有胃盲囊突起,胃盲囊的作用是增大中肠消化和吸收面积。棉铃虫中肠两侧共有 4~6 个指状胃盲囊(程云吉和牟吉元,1998),棒蝠蛾中肠两侧共有 7~8 个圆形突起的胃盲囊(王建国等,1997)。本次解剖学研究暂未观察到草地贪夜蛾幼虫中肠胃盲囊的数量和形状,因此其胃盲囊是否与草地贪夜蛾的多食性与暴食性有关仍需进一步考证。

草地贪夜蛾幼虫中枢神经系统的组成与其他昆虫类似,包括脑和腹神经索 2 个部分,前后 2 个

神经节是由神经索相互连接的。研究表明,小菜蛾幼虫的第 7 腹节腹神经节(腹神经节 VII)和第 8 腹节腹神经节(腹神经节 VIII)靠得较近,但未结合在一起,未形成复合神经节(梁勇,2013);而家蚕 *Bombyx mori* Linnaeus 幼虫的第 7 腹节腹神经节(腹神经节 VII)和第 8 腹节腹神经节(腹神经节 VIII)却结合在一起,形成复合神经节。本研究也发现,草地贪夜蛾幼虫的腹神经节 VII 和腹神经节 VIII 结合形成了复合神经节,明显大于幼虫腹部其他各节的神经节;幼虫最后的神经节所连的神经索通到后肠、臀足,以此控制后肠的排泄和臀足的运动。鳞翅目蛾类成虫的最后神经节所连的神经索通到性腺、外生殖器,最后的神经节在生殖过程中起调控产卵器运动的作用(谢桂英等,2019),草地贪夜蛾幼虫和成虫的最后神经节所起的作用不同,二者的神经节大小和功能还有待进一步分析。在不同种类昆虫中,体神经节的数量不同。草地贪夜蛾的体神经节有 11 对,其中胸部 3 对,腹部 8 对;而直翅目 Orthoptera 的蝗虫 *Locusta* 体神经节仅 8 对,其中,前胸和中胸

各1对,后胸的1对神经节与腹部第1~3节的神经节合并,腹部第4~7节各1对、第8~11节的神经节愈合;半翅目 Hemiptera 的尺蠖 *Hydrometra* 和猎蝽 *Rhodnius* 所有体神经节合并成一个整体(许再福,2009)。

马氏管是排泄系统的主要器官,草地贪夜蛾幼虫的马氏管与其他鳞翅目幼虫如家蚕(钟仰进等,2004)、大蜡螟 *Galleria mellonella* (Linnaeus)(南宫自艳等,2015)、东方粉蝶 *Pieris canidia* (Linnaeus)(张伟权和王建斌,1993)、小地老虎 *Agrotis ypsilon* (Rottemberg)(陈长琨等,1991)、巨疔蝙蝠蛾 *Endoclyta davidii* (Poujade)(李幸等,2016)等的马氏管结构和数量基本一致,均为6条,分布于消化道左右两侧。马氏管与直肠构成隐肾结构,起再回收水份和其他营养物质的作用。

草地贪夜蛾幼虫呼吸系统中气门的数目、位置和结构,与甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* Hiibner、银纹夜蛾 *Argyrogramma agnata* Staudinger 和近缘种斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* Fabricius 基本一致,气门共9对,分布于前胸和腹部第1~8节两侧,每个气门外观上均具有围气门片和气门筛,能防止灰尘、雨水、病原菌等外来有害物质的侵入(崔峰等,2004;宋月芹等,2007a,2007b,2007c;魏向敏等,2020)。

对草地贪夜蛾幼虫的内脏器官进行解剖学研究,旨在为草地贪夜蛾的防治提供基本资料,为杀虫剂作用靶标及机理等研究奠定基础。实际生产中防控草地贪夜蛾难以完全依赖化学防治,需结合生物制剂、生态调控、物理防治、生物防治等技术来防治害虫(齐国君等,2020)。后续研究中可通过免疫组织化学方法(于奇等,2011),染色标记后运用共聚焦激光扫描显微镜获取系统各结构数码图像,并使用三维图像分析软件对其系统进行构建三维结构模型(南宫自艳等,2015;于奇等,2011),为深入探究草地贪夜蛾幼虫的行为机制、生理特性和防控策略等提供依据。

参考文献

陈长琨,朱荣生,王荫长,尤子平,1991. 小地老虎马氏管细微结构的特点. 昆虫学报, 34(4): 417-420.
程吉吉,牟吉元,1998. 棉铃虫消化系统及马氏管的解剖学研究. 山东农业大学学报, 29(2): 12-18.
崔峰,洪富,王竑,周真,2004. 甜菜夜蛾胚胎发育的研究

(Ⅲ)——呼吸、消化、神经、生殖系统的发育. 西北农业学报, 13(2): 64-66.

丁奎婷,杜素洁,杨念婉,刘万学,郭建洋,2023. 草地贪夜蛾综合防控技术研究进展. 生物安全学报, 32(4): 291-302.
冯波,郭前爽,毛必鹏,钟玲,宋建辉,肖明徽,杜永均,2020. 不同地区田间草地贪夜蛾卵巢的结构和发育. 昆虫学报, 63(5): 639-648.
葛文超,符成悦,赵英杰,和淑琪,桂富荣,杜广祖,张立敏,陈斌,2019. 草地贪夜蛾幼虫头部感受器种类、分布和数量特征. 环境昆虫学报, 41(5): 947-953.
韩欣娆,朱耿平,门永亮,杨琢,2021. 基于集合模型的草地贪夜蛾的潜在分布预测. 生物安全学报, 30(1): 65-71.
孔德英,孙涛,滕少娜,叶军,2019. 草地贪夜蛾及其近似种的鉴定. 植物检疫, 33(4): 37-40.
孔子艺,王鹏,朱军生,国栋,迟秀丽,孔宝玉,胡磊,褚栋,2020. 利用 mtCOI/PCR RELP 技术鉴别草地贪夜蛾与其他3种形态相近昆虫. 生物安全学报, 29(1): 16-22.
李幸,李纲,陈珊,周琼,2016. 巨疔蝙蝠蛾幼虫的生活习性及其内部结构观察. 华中昆虫研究(1): 373.
梁勇,2013. 小菜蛾神经细胞的形态描述及其轴突长度对杀虫剂的响应. 硕士学位论文. 福州:福建农林大学.
梁铭荣,李子园,戴轩萱,陆永跃,陈科伟,王磊,2020. 4种昆虫病原线虫对草地贪夜蛾的致死作用. 生物安全学报, 29(2): 82-89
南宫自艳,杨君,王勤英,宋萍,2015. 大蜡螟幼虫消化道的组织学研究. 河北农业大学学报, 38(5): 63-67.
牛浩,兰珍珍,王新谱,刘媛,牛通,2024. 草地贪夜蛾对7种寄主植物的选择性和适应性. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 52(8): 112-121.
潘兴鲁,董丰收,芮昌辉,崔丽,吴小虎,徐军,刘新刚,郑永权,2020. 我国草地贪夜蛾应急化学防控风险评估及对策. 植物保护, 46(6): 117-123.
齐国君,苏湘宁,章玉苹,雷研圆,郭义,黄少华,肖勇,袁曦,石庆型,张振飞,2020. 草地贪夜蛾监测预警与防控研究进展. 广东农业科学, 47(12): 109-121.
邱良妙,陈秀琴,卢学松,刘必炮,刘其全,2025. 福建省草地贪夜蛾对5种常用杀虫剂的抗药性. 生物安全学报, 34(2): 155-161, 179.
邱良妙,刘其全,陈秀琴,卢学松,刘必炮,2024. 草地贪夜蛾对玉米和五种非禾本科作物的寄主选择性与寄主适合度及为害风险. 植物保护学报, 51(4): 918-927.
宋月芹,李怡萍,孙会忠,仵均祥,何成毅,2007a. 斜纹夜蛾幼虫气门超微结构的电镜观察. 华中农业大学学报, 26(3): 319-321.
宋月芹,仵均祥,孙会忠,成卫宁,2007b. 银纹夜蛾幼虫气门形态特征的扫描电镜观察. 昆虫知识, 44(6): 840-843.

- 宋月芹,徐进,李怡萍,贾晖,孙会忠,仵均祥,2007c. 甜菜夜蛾幼虫气门的超微结构观察. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 35(4): 105-108.
- 王建国,薛芳森,黄日宗,江永成,沈荣武,1997. 湖南棒蝠蛾幼虫内部解剖. 江西农业大学学报, 19(2): 7-10.
- 王磊,陈科伟,钟国华,冼继东,何晓芳,陆永跃,2019. 重大入侵害草地贪夜蛾发生危害、防控研究进展及防控策略探讨. 环境昆虫学报, 41: 479-487.
- 魏向敏,崔勇,叶国浚,朱克森,相辉,2020. 草地贪夜蛾寄主适应性、种群动态特征及防控新思路展望. 环境昆虫学报, 42(1): 42-51.
- 谢桂英,马百伟,刘晓岚,常亚军,陈文波,张永军,赵新成,2019. 绿盲蝽腹神经节的解剖结构. 昆虫学报, 62(9): 1102-1108.
- 吴孔明,2020. 中国草地贪夜蛾的防控策略. 植物保护, 46(2): 1-5.
- 许再福,2009. 普通昆虫学. 北京: 科学出版社.
- 薛陶然,潘静,刘丽红,徐腾,黄建,何玉仙,王竹红,2024. 草地贪夜蛾卵寄生蜂——夜蛾黑卵蜂的种内识别及过寄生. 中国生物防治学报, 40(1): 1-11.
- 徐蓬军,张丹丹,王杰,吴孔明,王新伟,王秀芳,任广伟,2019. 草地贪夜蛾对玉米和烟草的偏好性研究. 植物保护, 45(4): 61-64, 90.
- 杨学礼,刘永昌,罗茗钟,李依,王文辉,万飞,姜虹,2019. 云南省江城县首次发现迁入我国西南地区的草地贪夜蛾. 云南农业(1): 72.
- 于奇,周启升,刘庆信,2011. 家蚕神经系统研究进展. 昆虫学报, 54(10): 1172-1180.
- 张伟权,王建斌,1993. 东方粉蝶幼虫马氏管的超微构造分化. 实验生物学报, 26(3): 197-202.
- 赵静,邱之雨,肖留斌,谭永安,姜义平,柏立新,2021. 草地贪夜蛾卵黄原蛋白基因的分子特征及表达特性. 植物保护学报, 48(4): 798-805.
- 钟仰进,黄志君,魏剑波,温承宇,2004. 家蚕马氏管组织构造的研究. 蚕业科学, 30(4): 443-446.
- MONTEZANO D G, SPECHT A, SOSA-GÓMEZ D R, ROQUE-SPECHT V F, SOUSA-SILVA J C, PAULA-MORAES S V, PETERSON J A, HUNT T E, 2018. Host plants of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in the Americas. *African Entomology*, 26(2): 286-300.
- SPARKS A N, 1979. A review of the biology of the fall armyworm. *The Florida Entomologist*, 62(2): 82-87.
- SUN X X, HU C X, JIA H R, WU Q L, SHEN X J, ZHAO S Y, JIANG Y Y, WU K M, 2021. Case study on the first immigration of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* invading into China. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(3): 664-672.

(责任编辑:郭莹)