

东亚飞蝗雄性生殖系统组织结构观察及三维可视化数字模型^{*}

李德智^{1,2**} 娄延霞² 陈义昆¹ 连国云¹ 刘志刚^{1***} 张泽华^{2***}

(1. 深圳大学生命科学学院 深圳 518060; 2. 中国农业科学院植物保护研究所农业部生物防治重点开放实验室 北京 100081)

摘 要 本文研究东亚飞蝗 *Locusta migratoria manilensis* (Meyen) 雄性生殖系统组织解剖结构及三维可视化数字模型的构建。采用石蜡切片技术对东亚飞蝗进行组织切片,脱水、透明、HE 染色和拍照;并应用冰冻切片技术将冰冻包埋剂包埋后的飞蝗雄性个体进行连续切片,进行截面图像信息采集,建立数据集;通过 Photoshop、Image-Pro Plus (IPP) 软件对雄性生殖器官截面图像进行分割、处理、序列化和三维重建。通过试验观察分析东亚飞蝗雄性生殖器官精巢、附腺、输精管、精球囊和射精囊及交配器的组织构造;并成功构建了飞蝗雄性生殖系统的三维结构可视化数字模型。该模型可以任意旋转,能从不同角度观察,该试验为研究和教学提供了理论基础。

关键词 东亚飞蝗, 雄性生殖系统, 石蜡切片, 三维可视化

A three-dimensional, visualized, digital model of the genital system of the male oriental migratory locust: *Locusta migratoria manilensis*

LI De-Zhi^{1,2**} LOU Yan-Xia² CHEN Yi-Kun¹ LIAN Guo-Yun¹
LIU Zhi-Gang^{1***} ZHANG Ze-Hua^{2***}

(1. College of Life Science, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. Key Laboratory for Biological Control of Ministry of Agriculture, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract We conducted a three-dimensional reconstruction of the genital system of male *Locusta migratoria manilensis* (Meyen). The genital system was HE stained, and male adults embedded in frozen embedding medium (OCT) and sliced serially in accordance with the frozen section technique. Digital section image information was gathered and collated in a data set. Photoshop 7.0 and Image-Pro Plus (IPP) software were used to segment, process and merge all sectional images of genital organs and then to complete a three-dimensional reconstruction of the genital system. Using this method, the histological micro-structure of the testis, vas deferens, accessory gland, ejaculatory duct, seminal vesicle, ejaculatory sac and spermatophore sac were observed, and a three-dimensional visualized digital model of the genital system of *L. m. manilensis*'s was successfully constructed. The model can be rotated randomly and observed from different angles. These results provide the theoretical foundation for further study of the genital system of the male oriental migratory locust.

Key words *Locusta migratoria manilensis*, genital system, three-dimensional digital model, Image-Pro Plus (IPP)

东亚飞蝗 *Locusta migratoria manilensis* (Meyen) 是我国的 3 个飞蝗亚种之一,分布于北纬 42°以南地区(朱恩林,1999)。它是重要的农业

害虫之一。国内学者对东亚飞蝗已进行过很多研究,刘玉素和卢宝廉(1955,1959,1960)对东亚飞蝗消化系统、生殖系统、感觉器官和附肢的解剖

^{*} 资助项目:国家 863 计划(2006AA10Z236)、现代农业产业体系(CARS-35)、公益性行业(农业)科研专项(200903021,201003079)、深圳市科技计划项目、深圳大学科技创新团队项目(T200904)。

^{**} E-mail: ldz_82927@163.com

^{***} 通讯作者, E-mail: lzg@szu.edu.cn; lgbee@263.net

收稿日期:2011-10-30,接受日期:2011-12-16

和组织构造进行了研究和阐述;陆近仁和虞佩玉(1957,1964)对东亚飞蝗头部、胸部的骨骼肌肉系统进行了研究和阐述;郭鄂等(1991)编写了《中国飞蝗生物学》一书。

而随着科学技术的发展,基于计算机技术及图像处理技术的三维数字化重建技术成为研究组织构造和形态结构的新手段。通过对生物体组织结构三维重建和可视化,阐明其与生理功能之间的关系,以及在形态学、比较解剖学、细胞化学定位等领域中所起到的重要作用(Spitzer,1997)。尤其在医学领域得到了广泛应用(张玮和李杉,1999;Lada and Eytan,2005)。关于昆虫的三维重建和数字化虚拟技术研究也逐步展开,如基于激光扫描共聚焦显微镜(confocal laserscanning microscope,CLSM)技术,对双翅目昆虫冈比亚按蚊雄性外生殖器和冈比亚按蚊触角叶内的神经纤维球的分布进行的三维重建(Klaus *et al.*, 2003; Ghaninia *et al.*, 2006);基于核磁共振(magnetic resonance imaging,MRI)技术,对膜翅目昆虫蜜蜂大脑的三维表面重建(Haddad *et al.*, 2004);Ai等(2007)采用半薄切片技术对蜜蜂触角中的Johnston's Organ进行了连续切片,并三维重建。国内目前开展了一些关于尘螨消化系统生物组织切片和基于激光扫描共聚焦显微镜(CLSM)平台的计算机昆虫嗅觉神经三维重建的研究工作(付丙鲜和祝增荣,2008;Zhang *et al.*, 2008)。这为飞蝗组织构造和形态结构的进一步研究提供了有力的支持。

本文对东亚飞蝗雄性生殖系统进行组织结构观察和建模研究,从微观上说明了东亚飞蝗雄性生殖器官的组织构造;宏观上构建了雄性生殖系统三维数字可视化模型。这可为昆虫研究和教学提供形象直观的形态学静态图像和立体感强的三维动态图像资料,这有助于阐明组织结构与生理功能的相互关系。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试虫源 供试东亚飞蝗系作者实验室内用新鲜小麦苗继代饲养的健康株系,取生长一致的5龄东亚飞蝗作为试虫。

1.2 方法

1.2.1 石蜡切片 将东亚飞蝗样品在卡诺氏固定液中固定12 h,用50%的酒精洗数次后,放于70%的酒精内保存。采用常规方法制作切片,厚度为5 μm ,脱蜡、脱水、苏木精-伊红染色、透明、封片。光学显微镜下观察并照相。

1.2.2 三维重建

1.2.2.1 材料准备 东亚飞蝗由作者实验室自己饲养,选择体长2.5~3.5 cm之间的雄成虫,将虫体装入7 mL离心管中,注入OCT包埋剂后,于液氮中速冻,制成圆柱形样本备用。

1.2.2.2 切片制作及图像数据采集 将样本固定在冻台模具上,通过LeiCa CM3050S冰冻切片机对其横截面每25 μm 连续切片。同时用位置固定的数码相机对样本横截面进行二维图像数据采集,冰冻切片机的冻头最高点位置和CCD数码照相镜头采集图像的位置是相对固定的,切片机每切一片,冻头位置水平向前步进25 μm ,最高点垂直位置固定不变,不用重新调焦,以保证获取图像条件的一致性。将获得的东亚飞蝗横截面二维图像输入电脑,建立原始图像数据集。

1.2.2.3 图像配准 图像配准是指对于一幅图像寻求一种(或一系列)空间变换,使它与另一幅图像上的对应点达到空间上的一致,使两幅图像上所有的解剖点或感兴趣点都达到匹配。实验中有个别图像出现平移的,通过比较相邻两幅截面图像的连续性和完整性,在截面图像内部寻找定位结构,利用计算机图像处理软件Photoshop7.0得到2幅连续截面图像间的配准参数,进行修正后,得到最终配准后的截面图像数据集。

1.2.2.4 图像分割 本实验将东亚飞蝗雄性生殖器官作为感兴趣区域,结合形态学与手工勾画的方法,应用图像处理软件Photoshop7.0进行处理,利用Photoshop7.0的钢笔工具将目标图像的边界勾勒出来,并对图像进行感兴趣区域分割。逐一将所有图像分割,得到分割后的生殖系统外形图像数据,建立分割后数据集。

1.2.2.5 三维重建可视化 三维重建可视化技术利用连续图像,在计算机内部建立起组织或器官的三维结构,即三维重建。应用三维图像处理软件Image-Pro Plus(IPP,Media Cybernetics公司),点击Sequence下拉菜单中Merge Files,输入二维图像数据,建立序列图像数据。于Process下拉菜单中Segmentation选择消化道截面区域,确定

灰度值为 16, 点击 Apply Mask 蒙皮, 然后保存。于 Advanced 下拉菜单中 3D Constructor 进行表面重建。根据软件对标尺的校正, 以图片实际像素和切片的层距进行计算, 将 X, Y, Z 坐标轴的比例设置为 26: 16: 1, 得到生殖系统三维模型, 继续选择添加 Volume Measurements 即可实现基于表面的三维重建 (Iso Surface)。全部重建过程在一台 Inter core2 Q9400、2. 6G CPU、内存为 3. 0G 的 PC 计算机上完成。

2 结果与分析

2.1 东亚飞蝗雄性生殖系统组织结构

成熟的雄性生殖系统主要包括一对精巢 (testis, tes), 一对输精管 (vas deferens, vd) 和一个射精管 (ejaculatory duct, dej)。2 个精巢的内侧紧紧连接在一起, 前端有悬韧带, 细长透明, 有弹性。每个精巢的腹部有一条输精管, 沿体侧向后延伸与射精管相通。射精管的顶端有两丛弯曲成团的小管组成的附腺 (accessory gland, ag), 有的呈乳白色, 有的透明。一对被脂肪包围的储精囊 (seminal vesicle, vsm) 位于附腺丛中。射精管末端较为膨大的部分是射精囊 (ejaculatory sac, sej) 和精球囊 (spermatophore sac, sps)。射精囊与体外的阳茎相接。射精囊与精球囊都被包围在交配器 (copulatory organ, cog) 内。

2.1.1 精巢 (testis, tes) 精巢 (图 1: A) 由中胚层形成。由精原小管 (tesl) 组成, 精巢管和精巢管间是结缔组织, 在结缔组织内有很多脂肪细胞 (ft) 和微气管 (tr)。精巢的外围是结缔组织形成的围脏膜 (pr)。精巢小管 (图 1: B ~ D, F) 外被有 2 层薄膜, 外边的一层称为外上皮膜, 是一层透明无细胞结构的薄膜, 里边一层称为内上皮膜, 是由一层扁形上皮细胞所组成。在这 2 层膜的里边是结缔组织。在结缔组织中充满着未成熟和已成熟的生殖细胞。按着这些细胞不同发育程度, 可把精巢管分为 4 个区域: 原精区、生长区、成熟区和变形区。精巢小管切面显示在疏松结缔组织中分布有各期生殖细胞: 精原细胞、初级精母细胞、次级精母细胞、精细胞和精子。

原精区 (germinative area, grm) 位于精巢管顶端, 精原细胞是由管壁细胞衍生而来, 细胞核大, 位于中央, 细胞密集而不成群。生长区 (zone of growth, grw) 位于原精区下面, 由精原细胞分化

形成初级精母细胞, 成为放射状排列在育精囊 (spermcyst, cst) 中。精母细胞在这里进行有丝分裂; 成熟区 (maturation zone, matz) 位于生长区的下方, 次级精母细胞在此进行减数分裂并形成精细胞; 变形区 (zone of transformation, trs) 是精巢小管的最末一部分, 包围在育精囊中的精细胞转化为的精子 (spermatid, spd), 精子成熟后突破育精囊。此时它们往往仍然聚集在一起。

2.1.2 输精管 (vas deferens, vd) 输精管 (图 1: F) 是由中胚层所形成, 是 2 条由中胚层形成的细长管子, 长度约为 2. 0 cm, 从精巢腹面开始呈球形, 不向其前方开口, 向后延伸逐渐变细, 直达消化道的直肠背面, 转向两侧, 又到消化道的下方, 其末端又微向前伸, 转而与射精管的前部相连。射精管壁的组织构造依次为: 上皮组织、底膜、肌肉层和围脏膜。上皮组织 (ep) 靠近管腔是一层柱形上皮细胞 (中部) 和长柱形的假复层 (基部), 细胞核很大, 多位于细胞的中央。在上皮细胞的内缘有少量的分泌物附着在表面上。底膜较薄, 无细胞结构。输精管基部肌肉特别发达, 中部肌肉层较薄; 内环肌 (cm) 位于底膜外缘, 内环肌间有少量结缔组织, 其外为外纵肌 (lm), 在肌束间是结缔组织, 结缔组织内又有微气管 (tr) 和脂肪细胞 (ft)。围脏膜 (pr) 是较薄的一层膜, 由一层结缔组织组成。

2.1.3 储精囊 (seminal vesicle, vsm) 储精囊 (图 1: G, H, N) 位于射精管前端两侧, 在附腺丛中, 是一条乳白色的细管, 长约 1. 60 cm。它的顶端封闭, 微膨大, 弯曲成团, 外被脂肪质膜。

储精囊的上皮是假复层上皮, 有 2 种细胞: 柱形上皮细胞, 核大, 染色较深; 第 2 种分泌细胞 (scl), 在柱形细胞之间。上皮组织外是无细胞结构的底膜, 较发达。储精囊的肌肉层是比较薄的, 有纵肌和环肌。围脏膜包被在储精囊的最外层, 是一层很厚的结缔组织, 内有大量的脂肪细胞和纵横交织分布的微气管。

2.1.4 附腺 (accessory gland, ag) 附腺 (图 1: G, H, N) 是两丛相长弯曲成团的小管, 一端封闭, 另一端与射精管相通, 每丛约 15 条, 长度颇不一致, 在两丛之间的较短。因分泌物不同而呈现透明和乳白色 2 种颜色。从切片上看, 透明附腺腔内的分泌物是染成红色胶状, 是嗜酸性的胶状物; 另一种乳白色附腺腔内的分泌物经染色后, 红色

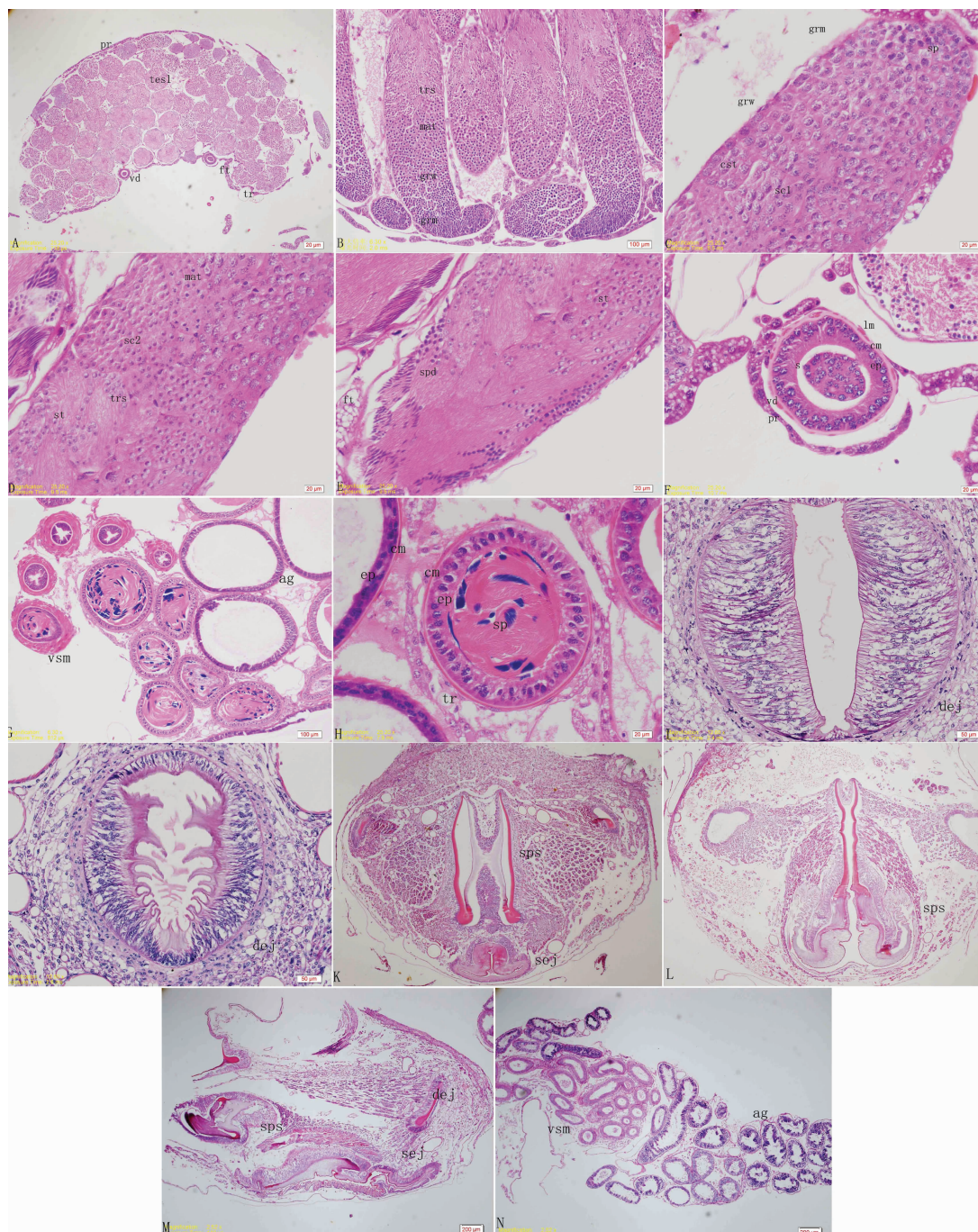


图1 东亚飞蝗雄性生殖系统组织结构图

Fig. 1 The organization structure of the genital system of male oriental migratory locust: *Locusta migratoria manilensis*

A, B. 精巢横截面 the cross-section image of testis($\times 40$, $\times 100$); C, D, E. 精巢管横截面 the cross-section image of testicular tubule($\times 400$); F. 输精管横截面 the cross-section image of vas deferens($\times 400$); G, H. 附腺横截面 the cross-section image of accessory gland ($\times 100$, $\times 400$); I, J. 射精管横截面 the cross-section image of ejaculatory duct ($\times 200$); K, L. 交配器(精球囊和射精囊)横截面 the cross-section image of copulatory organ ($\times 40$); M. 交配器(精球囊和射精囊)纵截面 the vertical-section image of copulatory organ ($\times 40$); N. 附腺和储精囊纵截面 the vertical-section image of accessory gland and seminal vesicle($\times 40$).

tes: 精巢 testis; tesl: 精巢管 testicular tubule; vd: 输精管 vas deferens; grm: 原精区 germinative area; grw: 生长区 zone of growth; mat: 成熟区 maturation zone; trs: 变性区 zone of transformation; spd: 精子细胞 spermatid; sc2: 次级精母细胞 secondary spermatocyte; ft: 脂肪细胞 fat cell; pr: 围脏膜 perithelial membrane; tr: 微气管 tracheole; ep: 上皮组织 epithelium; in: 内膜 intima; cm: 环肌 circular muscle; lm: 纵肌 longitudinal muscle. sej: 射精囊 ejaculatory sac; dej: 射精管 ejaculatory duct; ag: 附腺 accessory gland; vsm: 储精囊 seminal vesicle; sps: 精球囊 spermatophore sac; cog: 交配器 copulatory organ.

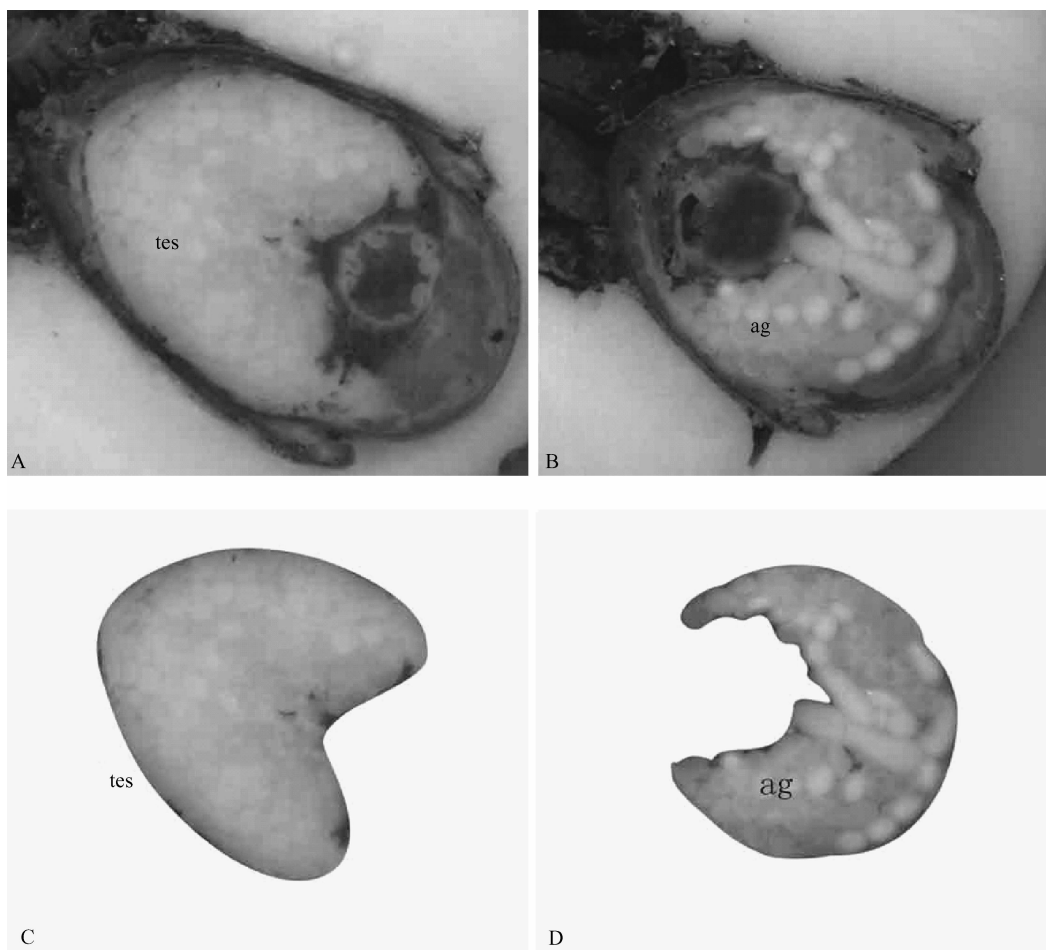


图2 东亚飞蝗精巢、附腺和储精囊横截面原始图像和分割处理后图像

Fig. 2 The cross-section image of testis, accessory gland and seminal vesicle of *Locusta migratoria manilensis* and the image after segmentation

A, B. 原始图片 original image ($\times 7$); C, D. 处理后图片 the image after processing ($\times 7$).

tes: 精巢 testis; ag: 附腺 accessory gland.

很浅或无色,无浆状物。

附腺的上皮组织由短柱形上皮细胞组成,细胞核位于中央,很大,细胞外侧有很多分泌物;附腺的底膜很发达,透明而有弹力,但无细胞结构。底膜外是一层很薄的环肌和一层不发达的纵肌束,其间包裹着结缔组织,在肌束间有微气管;最外层是一层很薄由结缔组织组成的围脏膜。

2.1.5 射精管 (ejaculatory duct, dej) 射精管(图1: I, J)是一个粗而短扁圆形的管子,管子的腔很窄。它的前方两侧分岔,每岔是一丛附腺,附腺丛中有储精囊。射精管管壁的组织构造依次为:内膜,一层透明薄膜,在中部的内膜上具有少

数的小突起;射精管末端图的内膜很厚并具有小刺的纵褶。射精管的上皮组织,管壁左右两侧的呈细长形的长柱形细胞,细胞核排列不整齐。背腹两面的上皮细胞很矮呈方形上皮细胞。底膜是一层透明的薄膜,无细胞结构。最后2层是胶质纤维层和网状结缔组织层。

2.1.6 射精囊 (ejaculatory sac, sej) 射精囊(图1: K, M)是一个较射精管微粗长囊形的构造,前端与射精管相接,后端通入精球囊(sps)。射精囊的组织构造由内向外是:内膜、上皮组织、底膜和围脏膜。内膜很厚,分为3层上表皮(epc),外表皮(exc)和内表皮(enc);上皮组织(ep)由排列不整齐的不规则长柱形上皮细胞组成,向内膜突出

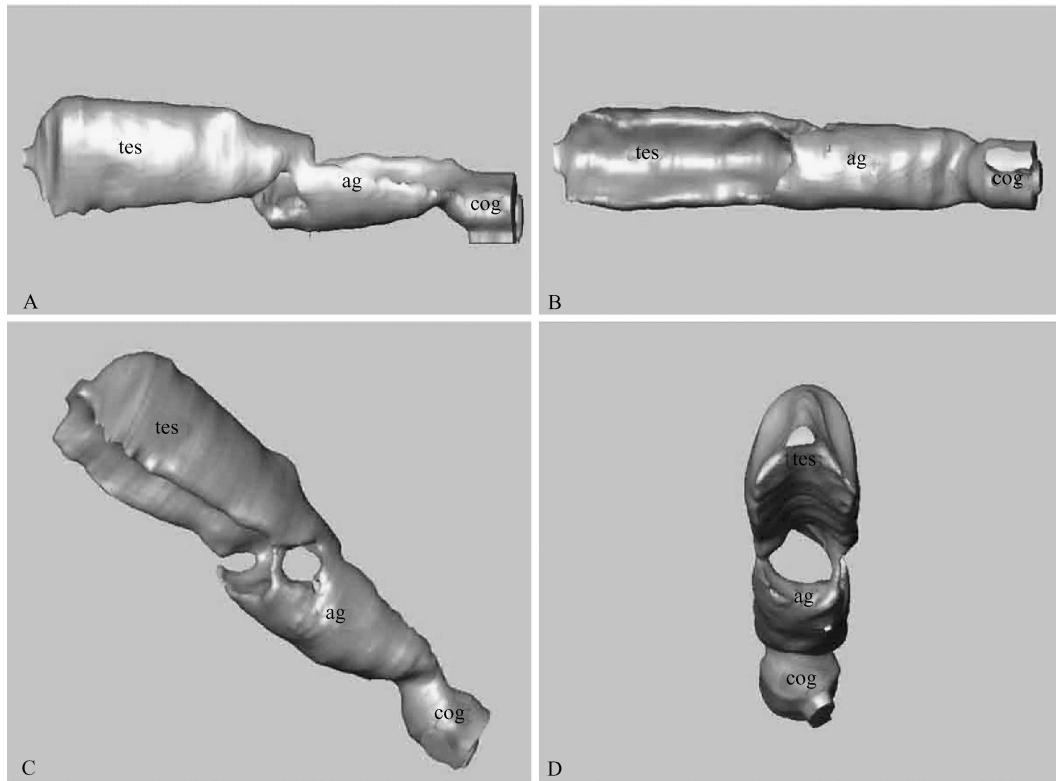


图3 东亚飞蝗雄性生殖系统三维表构建模型

Fig. 3 Three-dimensional reconstruction surface model map of the male reproductive system of *Locusta migratoria manilensis*

A. 侧面观 lateral view; B. 腹面观 ventral view; C. 斜侧面观 inclined-lateral view; D. 正腹面观 frontal-ventral view.

tes:精巢 testis; ag:附腺 accessory gland; cog:交配器 copulatory organ.

伸入内膜。底膜是薄薄的一层透明膜,无细胞结构。最外层的围脏膜是稀松的结缔组织,和射精管的网状结缔组织相连,网孔内有微气管。

2.1.7 精球囊 (spermatophore sac, sps) 精球囊(图1: K,L,M)在射精囊末端背部有一个膨大成球形的囊状构造,囊壁很薄,微透明呈条纹状。它前接射精囊后端,开口于生殖孔。射精囊与精球囊都被包围在交配器内(图1:L)。精球囊的组织构造由内至外是内膜、上皮组织、底膜和围脏膜。精球囊的内膜较射精囊的内膜更厚,也可分为上表皮、外表皮和内表皮。上皮组织的方形上皮细胞,核大、位于细胞中央,接近内膜的细胞质染色很浅,呈分泌现象。精球囊的底膜很薄,无细胞结构。围脏膜的结缔组织很少,在组织内有微气管存在。

2.2 东亚飞蝗生殖器官原始图像数据及分割处理后数据图像

通过冰冻切片机进行横截面连续切片,得到

570 张蝗虫雄性生殖器官部分图片数据,图2(A, B)分别为雄性生殖器官的精巢、附腺和储精囊的截面图像。图2(C, D)是对图2(A, B)用Photoshop7.0配准、分割处理后得到的图像。

2.3 东亚飞蝗生殖器官外形三维重建可视化结果

应用三维图像处理软件 Image-Pro Plus,将图像数据集序列化,然后蒙皮提取感兴趣区域。通过3D Constructor进行表面重建,获得了飞蝗雄性生殖系统的三维表面重建模型。图3为重建得到的三维结构模型效果图,模型中展示了精巢、附腺和交配器的立体结构。此三维表面模型可以任意旋转,同时从不同角度观察生殖器形态结构。

3 结论及讨论

绝大多数昆虫都进行两性生殖,由生殖系统负责繁衍后代。生殖器官是昆虫体内重要的器官,当昆虫达到一定的阶段后即性成熟后,便会发挥生殖的功能。与高等动物相比,昆虫对子代的

保护能力较差,大量繁殖后代,以数量取胜是昆虫种群繁衍的主要生殖对策。在自然界中,昆虫要成功的进行大量繁殖,首先要完成生长发育。很多的外部因素都会对蝗虫的生殖造成影响,比如外部环境如温度、营养条件,内部因素如共生菌对昆虫的生殖的影响。实验证明,辐射、化学农药的处理均能够对生殖系统造成影响,甚至能造成昆虫不育。学习昆虫生殖系统有助于从根本上防治蝗虫,科学的指导进行害虫防治,探索害虫防治的新途径。

昆虫的雄性生殖系统包括精巢、输精管以及由外胚层形成的射精管和附腺。雄虫的精巢是由一对精巢组成,外包薄膜,膜上含有大量脂肪组织,呈现出黄色。精巢的管壁是由1层含有细胞的围鞘组成,其主要功能是吸收血液中的营养物质,供应精巢管内生殖细胞生长发育所需要的营养。附腺是两丛细长弯曲成团的小管,一端封闭,另一端与射精管相通,每丛约15条。交配器包含射精囊和精球囊。按照生殖细胞在睾丸内的发育程度,精巢管可分为生殖区、生长区、成熟区和转化区(雷朝亮和荣秀兰,2003)。

基于图像的三维重建技术是根据若干幅图片来恢复物体和场景的三维模型的方法,该方法是一个交叉领域,涉及到计算机图像处理、计算机图形学、计算机视觉以及模式识别等诸多学科。目前,基于图像的三维重建技术已经成为一个研究热点,三维重建技术广泛的应用在了医学、电学等领域。基于图像的三维重建不仅能达到简单的三维建模功能,并且其所需要的成本比较低、具有相当大的灵活性(蔡钦涛,2004)。由于基于计算机自动的重建方法效果不太理想,在本文中我们采用了人机交互的方法。通过人工标记一些目标区域,输入一些已知的参数来重建三维表面,虽然增加了工作量,但是可使构建出更好的效果。

本文构建了东亚飞蝗生殖器官的三维表面模型,展示了东亚飞蝗精巢、附腺、交配器等空间立体结构。为进一步研究生殖器的形态、构造提供了基础。本研究使形态学认识从二维平面发展到三维空间,使人们能从立体空间上了解东亚飞蝗生殖系统的结构。但是该模型还不能完全将这些结构展现的很清晰,有可能是三维重建软件有缺陷所造成的,这也是本研究遇到的困难,对于三维重建IPP软件在图像色彩的选择上做的不是太好,希望能够

找到更好的方法显现这些细微的结构。

参考文献 (References)

- Ai H, Nishino H, Itoh T, 2007. Topographic organization of sensory afferents of Johnston's organ in the honeybee brain. *J. Comp. Neurol.*, 502(6):1030—1046.
- Ghaninia M, Bill S, Ignell R, Hansson BS, 2006. The antennal lobe of the African malaria mosquito, *Anopheles gambiae*-innervation and three-dimensional reconstruction. *Arthropod Struct. Dev.*, 36(1):1—17.
- Haddad D, Schaupp F, Brandt R, Manz G, Menzel R, Haase A, 2004. NMR Imaging of the honeybee brain. *J. Insect Sci.*, 4(7):1—7.
- Klaus AV, Kulasekera VL, Schawaroch V, 2003. Three-dimensional visualization of insect morphology using confocal laser scanning microscopy. *J. Microscopy*, 212(2):107—121.
- Lada A, Eytan A, 2005. How to search a social network. *Social Networks*, 27(3):187—203.
- Spitzer VM, 1997. The visible human: a new language for communication in health care education. *Caduceus*, 13(2):42—48.
- Zhang YY, Sun X, Liu ZG, 2008. Morphology of the digestive system and three-dimensional reconstruction of *Dermatophagoides farinae*. *Int. Arch. All. Immunol.*, 146:219—226.
- 蔡钦涛, 2004; , 基于图像的三维重建技术研究. 硕士学位论文. 杭州:浙江大学.
- 付丙鲜, 祝增荣, 2008. 昆虫嗅觉神经的计算机三维重建. *昆虫知识*, 45(4):668—673.
- 郭郭, 陈永林, 卢宝廉, 1991. 中国飞蝗生物学. 北京:山东科学技术出版社. 1—591.
- 雷朝亮, 荣秀兰, 2003. 普通昆虫学. 北京:中国农业出版社. 300—313.
- 刘玉素, 卢宝廉, 1955. 东亚飞蝗消化系统组织与构造. *昆虫学报*, 5(3):245—260.
- 刘玉素, 卢宝廉, 1959. 东亚飞蝗生殖系统解剖和组织构造. *昆虫学报*, 9(1):1—11.
- 刘玉素, 卢宝廉, 1960. 东亚飞蝗的感觉器官和附肢的组织构造. *昆虫学报*, 10(3):243—260.
- 陆近仁, 虞佩玉, 1957. 东亚飞蝗的骨骼肌肉系统 I. 头部. *昆虫学报*, 7(1):1—19.
- 陆近仁, 虞佩玉, 1964. 东亚飞蝗的骨骼肌肉系统 II. 胸部. *昆虫学报*, 13(4):510—535.
- 张玮, 李杉, 1999. 生物组织连续切片图像的计算机三维重建研究的进展. *生物医学工程学杂志*, 16(3):377—381.
- 朱恩林, 1999. 中国东亚飞蝗发生与治理. 北京:中国农业出版社. 5—6.