

西沙赵述岛潮滩星虫形态特征及其环境适应性

李俊伟^① 李纯厚^{①*} 刘永^① 肖雅元^① 胡瑞萍^②
郭永坚^① 丁贤^① 周慧^①

^① 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东省渔业生态环境重点实验室 广州 510300; ^② 广州市海威水产科技有限公司 广州 510300

摘要: 基于 2018 年夏季赵述岛潮滩现场调查数据, 研究西沙赵述岛潮滩内星虫物种组成, 并结合沉积物和组织切片分析星虫对环境的适应性特征。在潮滩上设置 3 个取样站进行定性和定量研究, 并对星虫肠道内沙粒组成和摄食消化结构进行测定与观察。结果显示, 西沙赵述岛潮滩现存罗岛管体星虫 (*Siphonosoma rotumanum*)、库岛管体星虫 (*S. cumanense*) 和富岛管体星虫 (*S. funafuti*), 组成比例为 4 : 2 : 1, 三种管体星虫生长环境相同, 栖息层次均为 10 ~ 15 cm。管体星虫肠道内均充满沙粒, 去除沙粒后可观察到小型颗粒碎屑 (< 10 μm , 占 90%)、硅藻类、桡足类 (300 μm) 和植物纤维碎片等。下行肠 (前肠) 内大颗粒 (粒径 > 0.25 mm) 沙粒比例 (77.65%) 高于上行肠 (后肠) (62.67%), 下行肠内小颗粒 (粒径 \leq 0.25 mm) 沙粒 (22.34%) 低于上行肠 (37.33%), 表明管体星虫对珊瑚礁砂砾具有细化作用。管体星虫 (体重为 8.5 g) 吻部和躯干部角质层厚度分别为 59.08 μm 和 231.92 μm , 收吻肌由 9 000 ~ 9 500 个肌纤维组成, 表明发达的角质层是对珊瑚礁粗糙底质的适应, 收吻肌可以保证完成摄食过程。下行肠内的褶皱、肌纤维明显少于上行肠和直肠, 表明管体星虫的消化过程主要发生在后段, 这可能与珊瑚礁底质中的有机质含量低有一定关系。

关键词: 管体星虫; 物种组成; 赵述岛潮滩; 环境适应性; 大型底栖动物

中图分类号: Q958 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263 (2020) 02-204-09

Morphological Characteristics and Environmental Adaptability of Sipuncula in Tidal Flat of Tree Island in Xisha

LI Jun-Wei^① LI Chun-Hou^{①*} LIU Yong^① XIAO Ya-Yuan^① HU Rui-Ping^②
GUO Yong-Jian^① DING Xian^① ZHOU Hui^①

^① Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization of Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China, Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300; ^② Haiwei Aquaculture Technology, Co., Ltd., Guangzhou 510300, China

Abstract: To study the species composition and morphological characteristics of *Siphonosoma* in Zhaoshu

基金项目 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费项目 (No. 2019ZY13), 国家重点研发计划项目 (No. 2018YFD0900803), 国家自然科学基金项目 (No. 41606137), 海南省自然科学基金项目 (No. 318MS117);

* 通讯作者, E-mail: scslch@vip.163.com;

第一作者简介 李俊伟, 男, 博士; 研究方向: 滩涂增殖和养殖生态学; E-mail: lijunwei303@163.com。

收稿日期: 2019-09-03, 修回日期: 2020-01-10 DOI: 10.13859/j.cjz.202002009

Island, an onsite investigation was conducted in the tidal flat in Zhaoshu Island in Summer 2018. The environmental adaptability of *Siphonosoma* in tidal flat were analyzed based on the sediment characteristic and light microscopic observation of tissue biopsies. Three sampling section were selected in the tidal flat to collect and identify the macrobenthos qualitatively and quantitatively, and the sand grain size composition in gut and slices of gut were determined. The results indicated that, There are three species of *Siphonosoma*, and they are *S. rotumanum*, *S. cumanense* and *S. funafuti*, the species composition was about 4 : 2 : 1. The three species lived in the same environment and disturbed the same level of 10 - 15 cm. The gut of *Siphonosoma* was filled with sand, and the small organic particles, diatoms, copepods and plant fibers were found in gut. The large particles in down-gut were more than that in the upward-gut, and the small particles in down-gut was less than that in the upward-gut. The result indicated that the gut of *Siphonosoma* has grain refinement effects to sediment particles. The cuticle of introvert retractor muscle and body wall were 59.08 μm and 231.92 μm , respectively. The introvert retractor muscle consisted of 9 000 - 9 500 muscle fibers, and there were some mastoid in the skin. The thicker cuticle and strong introvert retractor muscle were two adaptions of *Siphonosoma* to the coral reef sediment environment. The numbers of folds and muscle fibers in down-gut were less than that in the upward-gut. This may be correlated to the low content of organic matter in the coral reef sand.

Key words: *Siphonosoma*; Species composition; Tidal flat of Zhaoshu Island; Environmental adaptability; Macrobenthos

珊瑚礁生态系统具有较高的生物多样性和生产力, 被誉为海洋中的热带森林, 具有重要的生态功能 (严宏强等 2009)。岛礁周边的潮滩是岛屿和海水之间的过渡生态系统, 对海洋自生物质和岛屿输入物质具有过滤和捕集作用。潮滩区域积累了大量的有机质, 为底栖动物提供了丰富的饵料来源。沉积食性底栖动物对潮滩区域颗粒物质的利用和转化具有重要意义 (Kristensen 2001, Volkenborn et al. 2007), 尤其穴居型底栖动物的管道网络结构可以促进潮滩沉积物硝化和反硝化作用 (Pelegrini et al. 1994)。根据扰动方式可以将穴居底栖动物分为上行搬运者、下行搬运者、再生者和管路扩散者 (孙刚等 2013), 潮滩沉积物中的下行搬运者 (如星虫类和多毛类) 对表层沉积物的向下迁移和封埋作用较为明显, 具有碳汇生物功能 (Kristensen 2001, Li et al. 2019)。

星虫类动物 (Sipuncula) 属于海洋无脊椎动物, 主要包括革囊星虫纲 (Phascolosomatidea) 和方格星虫纲 (Sipunculidea), 全世界现存星虫物种数量约 230 种, 在中国分布约 40 种。星

虫动物属于广分布类群, 除幼虫的浮游阶段外, 均营底栖穴居生活, 多数栖息在热带和亚热带浅海泥沙和珊瑚礁砂质中 (周红等 2007)。星虫类动物具有明显的生物扰动行为, 其摄食表层沉积物中的营养物质, 并在洞穴内部排泄, 实现了将表层沉积物向底层的搬运 (李俊伟等 2015a, Li et al. 2015), 一般认为星虫类对表面沉积物具有明显的迁移和封埋作用, 在生态系统的生物地球化学过程中发挥重要作用 (Shields et al. 2009, Li et al. 2019)。我国西沙群岛的大部分岛礁是由石珊瑚堆积而成的, 珊瑚礁潮滩包含海滩岩、珊瑚化石、被侵蚀的珊瑚石和大量的细沙底质, 岛礁和海水连接处的潮滩含有大量砂砾和细沙, 以往西沙岛礁潮滩上具有星虫物种组成, 如盾管星虫属 (*Aspidosiphon*)、管体星虫属 (*Siphonosoma*)、革囊星虫属 (*Phascolosoma*) 等, 其中, 库岛管体星虫 (*S. cumanense*) 和罗岛管体星虫 (*S. rotumanum*) 广泛分布在西沙群岛礁盘内的珊瑚砂中, 穴深 10 cm 左右 (李凤鲁等 1992)。随着人类生产活动的增强, 西沙岛礁潮滩环境发生变化, 星

虫类生物组成的现状需要详细了解,以及星虫类动物在珊瑚礁潮滩的生态作用也需要进一步研究。

本研究通过现场调查采样的方式,对赵述岛潮滩底质、星虫类和其他大型钻穴类底栖动物进行分析,研究潮滩星虫类动物组成及其分布。结合环境底质、管体星虫消化道内的泥沙粒径组成以及生物学特征,初步分析星虫类动物在珊瑚礁潮滩内的生态作用,为岛礁潮滩生物群落恢复和保护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地点

采样点位于赵述岛(112°16'19"E, 16°58'30"N),属于中国西沙群岛的七连屿,四周潮滩类型属于砾砂屑海滩和海滩岩,其中,西北侧潮滩主要是砾砂屑海滩,北侧和东侧以海滩岩为主,岛礁东南侧潮滩表层为粗砂砾,底层为海滩岩。调查区域位于赵述岛西北侧的砂砾屑海滩,退潮后露出面积约 1 000 m²,底质为珊瑚礁碎屑形成的海岸,在潮滩表面形成具有细沙沉积物的区域。

1.2 样品采集与测定

在潮滩设立 3 个取样站进行定量和定性采样,站位分别命名为 C1、C2 和 C3,取样站连线平行于岛礁边缘,分别相距约 20 m;每个站位各设置 3 个 0.5 m × 0.5 m 样方进行定量分析,另外,在每个取样站各采集一个样品进行定性分析。挖取样方内的星虫和其他大型底栖动物,深度为 20 cm,统计生物量和分布情况。潮间带星虫类动物和其他钻穴类底栖动物的采集和分析均参照《海洋监测规范》(GB17378-2007)和《海洋调查规范:海洋生物调查》(GB12763.6-2007)进行。生物样品用中性甲醛溶液固定,带回实验室进行物种鉴定和分析。

在每个样方内采集沉积物样品,现场采用氧化还原电位仪(SX 630, Sanxin Instrument Corporation, 上海)测定底质间隙水中的氧化还原电位值。将每个站位 3 个样方内的沉积物

样品混合并冷冻保存,低温运回实验室于 65 °C 烘干。采用 550 °C 灼烧法测定沉积物中的有机质含量,使用元素分析仪(PE-24 CHN analyzer, Heraecus, Banau, Germany)测定沉积物中的总氮(total nitrogen)、总碳(total carbon)和总硫(total sulfur)含量。采用样品筛(20 目、80 目)分级筛选沉积物的粒径,并称量以计算粒径组成。采集 3 个水样用于水温、溶解氧、盐度、pH 及氮磷营养盐的测定,海水中的硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮、活性磷、硅酸盐采用水化法测定(雷衍之 2006)。

管体星虫的生物组织经过乙醇脱水、二甲苯透明、石蜡包埋、石蜡切片、苏木素-伊红染色和中性树脂封片,采用光学显微镜(ZEISS Axio Scope. A1 型)进行观察和记录图像,分析星虫的生物组织结构,同时观察其生殖细胞。将管体星虫下行肠和上行肠内部沙质粒径按照砂砾(2 mm ≤ 粒径 < 4 mm)、中粗砂(0.25 mm ≤ 粒径 < 2 mm)、细砂(0.12 ≤ 粒径 < 0.25 mm)和极细砂(粒径 < 0.12 mm)进行分级量化。

1.3 数据分析

采用 SPSS 17.0 和 EXCEL 进行数据统计和分析。管体星虫下行肠和上行肠内细沙百分比的数值进行数据转换后,采用 One-way ANOVA 进行方差分析,显著度为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 潮滩环境理化特征

海水温度为 29.50 ~ 30.30 °C,盐度为 33.50 ~ 33.80, pH 为 7.43 ~ 7.98,水体溶解氧为 6.12 ~ 6.26 mg/L。水体中硝酸盐含量为 6 μg/L,氨氮含量为 5.9 μg/L,活性磷含量为 1 μg/L,硅酸盐含量为 3 μg/L,总无机氮含量为 13 μg/L。沉积物中总氮含量为 0.009 7% ~ 0.011 0%,总碳含量为 11.68% ~ 11.74%,总硫含量为 0.397 6% ~ 0.532 0%,氧化还原电位值为 96 ~ 129 mV,有机质含量为 3.87% ~ 3.93%。3 个取样站沉积物的粒径组成相近(表 1)。

表 1 潮滩沉积物的理化特征

Table 1 Environmental parameters of the sediment in the coral reef flat

样品 Samples	总氮 total nitrogen (%)	总碳 total carbon (%)	总硫 total sulfur (%)	氧化还原电位值 oxidation reduction potential (mV)	有机质含量 Organic content (%)	沙质比例 Grain size (%)		
						gs \geq 0.85 mm	0.18 mm \leq gs < 0.85 mm	gs < 0.18 mm
C1	0.011 0 \pm 0.002 2	11.71 \pm 0.007	0.532 0 \pm 0.076 4	129 \pm 16	3.87 \pm 0.17	34.40	54.96	9.68
C2	0.009 9 \pm 0.000 1	11.74 \pm 0.013	0.397 6 \pm 0.054 1	105 \pm 15	3.93 \pm 0.17	32.29	55.95	9.77
C3	0.009 7 \pm 0.000 1	11.68 \pm 0.078	0.406 9 \pm 0.070 2	96 \pm 9	3.88 \pm 0.01	37.14	54.26	8.13

gs 为粒径。gs means grain size.

2.2 星虫类物种组成

采样过程中共发现 3 种星虫，均属于方格星虫科 (Sipunculidae) 管体星虫属，分别为罗岛管体星虫、库岛管体星虫和富岛管体星虫 (*S. funafuti*)。其中，罗岛管体星虫的生物量最大，以上 3 个物种的采挖数量比例接近 4 : 2 : 1 (图 1a)，未发现革囊星虫、光裸方格星虫 (*Sipunculus nudus*) 等物种。3 种管体星虫的栖息环境和栖息层次相同，具有明显的洞穴，在采挖过程中会造成洞穴的破坏和消失，然而星虫的洞穴周围具有灰色带状区域 (图 1b)，灰色区域的氧化还原电位值为 -65 mV。管体星虫的生物量为 9.55 g/m²，栖息密度为 5.2 ind/m²。显微镜观察管体星虫虫体，雌性库岛管体星虫体重为 3.5 g 或 8.5 g 时，体腔液中均含有直径 $75 \sim 110$ μ m 的卵细胞，成熟度较高，卵径规格

较为均匀；雌性罗岛管体星虫体重 4.1 g 时，具有直径 $50 \sim 100$ μ m 的卵细胞，卵规格不均匀；在富岛管体星虫样本体腔液中未发现卵细胞。

在管体星虫的栖息环境中，其他钻穴类底栖动物主要属于环节动物门，生物密度可达 6.70 ind/m²，生物量可达 6.69 g/m²，主要物种包括白色吻沙蚕 (*Glycera alba*)、背蚓虫 (*Notomastus latericeus*) 和厚鳃蚕 (*Dasybranchus caducus*)，其中，白色吻沙蚕的生物量较高，其生物密度可达 5.0 ind/m²。

2.3 管体星虫的生物学特征

罗岛管体星虫体呈圆筒状，体色为黄色；体壁较厚，不透明；吻端较末端粗，后端逐渐变细；体表粗糙，吻部有多条浅横纹，吻基部有黄色颗粒，末端有疣足颗粒；排泄孔非常明显。纵肌束明显，数量为 $16 \sim 18$ ，在末端大部



图 1 在赵述岛采集的管体星虫

Fig. 1 *Siphonosoma* in Zhaoshu Island

a. 管体星虫；b. 沉积物中的管体星虫。a. *Siphonosoma*; b. *Siphonosoma* in sediment.

分纵肌束分离，部分融合，环肌不发达；收吻肌共两对，其基点分别在体前端 1/2、1/3 处各一对，基点均分开、对称；无食道后回环，纺锤肌在末端固着；肾管 2 条，右侧长度大于左侧；肾孔与排泄孔位于同一环肌水平；体腔壁上无隔膜产生。

库岛管体星虫体呈圆筒状，体色为黄色或棕黄色；体壁较厚，不透明；体表面布满乳突，排泄孔前的乳突较大，体中部乳突呈纵带排列（图 2a）。纵肌束 20 条，行次分明，无融合现象，环肌层也合成细束；收吻肌较短，基点起

于体中 1/2 处，两对收吻肌均起于同一水平；无食道后回环，纺锤肌在末端固着；肾管 2 条，棕色，长度可达 2 cm（图 2b）；体腔壁的中后端有隔膜。

富岛管体星虫体呈圆筒状，体壁较薄，半透明；吻基部和体末端均具有乳突，较大，黄色，稀疏排列。纵肌束 17 条；收吻肌 2 对，较短，基部不在同一水平。无食道后回环，纺锤肌在末端固着；固肠肌 1 条；2 个肾管，较小，褐色；肾孔位于排泄孔前方；体腔内无隔膜产生。

2.4 管体星虫肠道内容物质组成

3 种管体星虫的肠道内均充满细沙，内容物镜检发现斜纹藻、菱形藻、针杆藻等硅藻，以及海草碎屑（长度为 200 ~ 700 μm ）和桡足类（长度为 300 μm ），数量最多的是小粒径颗粒物质（粒径小于 10 μm ）。每个样方内采集到的沉积物样本中含有丰富的细菌和古细菌（其他未发表的实验数据，采用 16S rDNA 高通量测序技术获得）。即珊瑚礁潮滩中的细沙、硅藻、小型底栖生物、颗粒有机质、细菌等组成了星虫动物的主要饵料来源，其中细沙作为饵料载体占绝大多数（96.10%）。

分析 6 条管体星虫（未区分物种）肠道内容物的粒径，下行肠（前肠）和上行肠（后肠）内容物的粒径组成有区别。下行肠内物质粒径大于和等于 0.25 mm 的中粗砂砾比例为 77.65%，高于上行肠的 62.67%；下行肠内粒径小于 0.25 mm 的细砂和粉砂比例为 22.34%，低于上行肠的 37.33%。下行肠内粒径小于 0.12 mm 的极细砂和粉砂的比例为 7.65%，低于上行肠的 13.39%。在下行肠发现具有粒径 5 mm \times 3 mm 至 7 mm \times 4 mm 的砂砾，而上行肠中的较大砂砾粒径为 2 mm \times 1 mm 至 4 mm \times 3 mm，并且粒径超过 2 mm 但小于 4 mm 砂砾在上行肠内的比例低于下行肠内的比例（表 2）。

2.5 库岛管体星虫的摄食消化相关结构特征

为了解管体星虫对砂砾的摄食消化利用功能，对体重为 8.5 g 的库岛管体星虫进行观

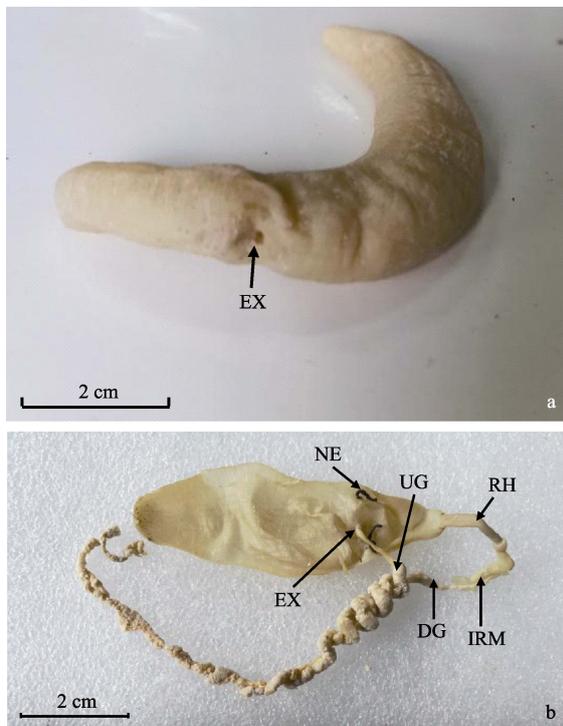


图 2 库岛管体星虫的形态特征

Fig. 2 Morphological characteristics of *Siphonosoma cumanense*

a. 库岛星虫的外部形态；b. 库岛星虫的内部特征。

a. External shape of *Siphonosoma cumanense*; b. Anatomical features of *Siphonosoma cumanense*.

DG. 下行肠；EX. 排泄孔；IRM. 收吻肌；NE. 肾管；RH. 吻部；UG. 上行肠

DG. Down-gut; EX. Excretory; IRM. Introvert retractor muscle; NE. Nephridia; RH. Rhynchodaenm; UG. Upward-gut

察。库岛管体星虫的吻和躯干均由角质层、表皮、真皮、肌肉层（环肌和纵肌）组成，主要区别在于吻部角质层发达，其平均厚度为 $59.08 \mu\text{m}$ ，占吻部组织厚度的 21.41%，而躯干部角质层平均厚度为 $231.92 \mu\text{m}$ ，占体壁组织厚度的 14.60%。吻部和躯干部环肌均未

形成完整闭环，吻部纵肌未分成肌束，而躯干部位的纵肌分离成束，纵肌束横切长度为 $1626.75 \mu\text{m}$ ，平均厚度为 $561.28 \mu\text{m}$ (3a, b)。吻部表层有多个突起结构，纵切宽度可达 $150 \mu\text{m}$ ，顶端具有结缔组织，突起可以闭合，乳突内具有多细胞集聚形成的腔体，腔体平均

表 2 管体星虫消化道内沙质粒径组成

Table 2 The grain composition of sand in the gut of *Siphonoma*

采样部位 Sampling location	沙质比例 The grain composition (%)			
	$2 \text{ mm} \leq \text{gs} < 4 \text{ mm}$	$0.25 \text{ mm} \leq \text{gs} < 2 \text{ mm}$	$0.12 \leq \text{gs} < 0.25 \text{ mm}$	$\text{gs} < 0.12 \text{ mm}$
下行肠 Down-gut	25.97 ± 2.03^b	51.68 ± 3.81	14.69 ± 2.12^a	7.65 ± 1.33^a
上行肠 Upward-gut	16.82 ± 1.89^a	45.84 ± 4.06	23.92 ± 2.57^b	13.39 ± 1.65^b

字母 a 和 b 表示下行肠和上行肠内细沙粒径比例之间的差异显著 ($P < 0.05$)。gs 为粒径。

Different lowercase superscripts (a and b) in the same column indicate significant difference of grain size between the down-gut and upward-gut ($P < 0.05$). gs means grain size.

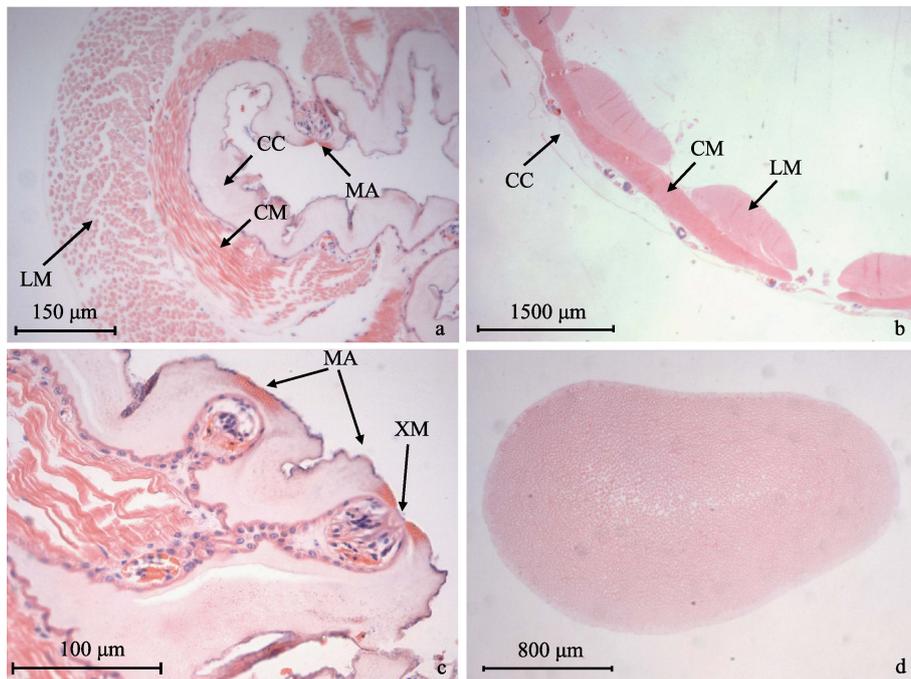


图 3 库岛管体星虫的组织切片特征

Fig. 3 Light microscopic observation of tissue biopsies

a. 吻部横切 ($\times 100$); b. 躯干部壁横切 ($\times 12.5$); c. 吻部乳突纵切 ($\times 200$); d. 收吻肌横切 ($\times 25$).

a. Transverse section of rhynchodaem ($\times 100$); b. Transverse section of body wall ($\times 12.5$); c. Longitudinal section of mastoid ($\times 200$); d. Transverse section of introvert retractor muscle ($\times 25$).

CC. 角质层; CM. 环肌层; LM. 纵肌层; MA. 乳突; XM. 纤毛结构

CC. Cuticular; CM. Circular muscle; LM. Longitudinal muscle; MA. Mastoid; XM. Cilia

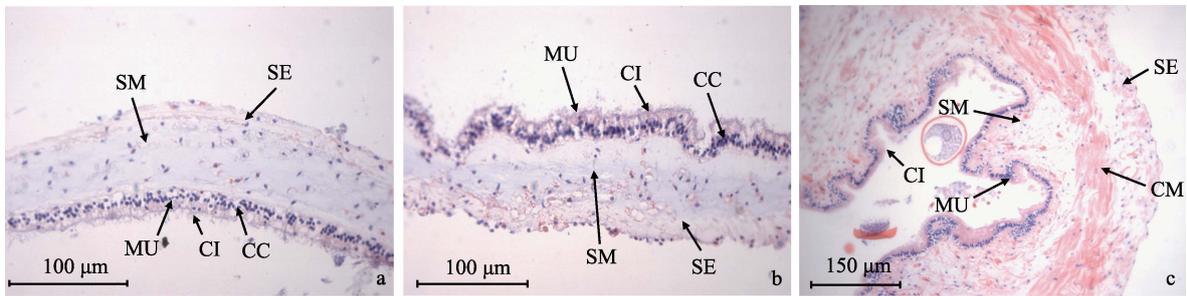


图 4 库岛管体星虫的消化组织结构光镜观察

Fig. 4 Light microscopic observation of digestive tissues

a. 下行肠横切 ($\times 200$); b. 上行肠横切 ($\times 200$); c. 直肠横切 ($\times 100$).

a. Transverse section of down-gut ($\times 200$); b. Transverse section of upward-gut ($\times 200$); c. Transverse section of rectum ($\times 100$).

CC. 柱状细胞; CI. 纤毛; CM. 环肌层; MU. 黏膜层; SE. 浆膜; SM. 黏膜下层

CC. Columnar cell; CI. Cilium; CM. Circular muscle; MU. Mucosa; SE. Serosa; SM. Submucosa

直径为 $50.01 \mu\text{m}$, 腔体通过结缔组织与环肌层相连接, 其为具有感触功能的乳突, 内有纤毛状结构 (图 3c)。躯干部未发现明显突起, 在角质层和环肌之间有被染成红色、蓝色的混合黏液细胞。库岛管体星虫的收吻肌发达, 宽度约为 $2 \sim 3 \text{ mm}$, 由 $9\ 000 \sim 9\ 500$ 个肌纤维组成, 肌纤维平均横切面积为 $213.53 \mu\text{m}^2$, 直径为 $15.72 \mu\text{m}$ (图 3d)。

下行肠和上行肠均由黏膜层、黏膜下层和浆膜组成, 各层次厚度相近。黏膜层厚度约为 $26.91 \mu\text{m}$, 向腔内无明显的褶皱和突起, 由纤毛柱状上皮细胞和固有层构成, 细胞多层排列且密集, 在腔内形成微绒毛层, 其厚度约为 $12.68 \mu\text{m}$ 。黏膜下层主要由结缔组织构成, 厚度约为 $53.85 \mu\text{m}$, 基质较为均匀, 颗粒细胞较少, 无明显肌纤维。浆膜与黏膜下层之间可见少量肌纤维, 未形成明显的肌肉层。下行肠和上行肠的主要区别在于下行肠腔内无明显褶皱, 而上行肠有明显褶皱; 下行肠浆膜处肌纤维极少, 而上行肠浆膜处可见明显的肌纤维 (图 4a, b)。直肠的肠腔扩大, 黏膜层有明显的褶皱和突起, 由单层纤毛柱状细胞组成, 褶皱平均高度为 $304.07 \mu\text{m}$, 纤毛长度约为 $29.72 \mu\text{m}$ 。与上行肠相比, 直肠黏膜层的比例

降低, 黏膜下层与浆膜层之间的肌纤维数量明显增加。黏膜下层有大量的枝状纤维向肠腔方向延伸 (图 4c)。

3 讨论

国内发现的管体星虫共 4 种, 分别为罗岛管体星虫、富岛管体星虫、库岛管体星虫和澳洲管体星虫 (*S. australe*) (周红等 2007), 均属于热带海洋物种。本研究发现, 赵述岛潮滩沉积物中的星虫类动物主要包括罗岛管体星虫、富岛管体星虫和库岛管体星虫, 其中, 罗岛管体星虫和库岛管体星虫的生物量较大。3 种管体星虫出现在相同的采样区域, 栖息层次均在地表以下 $10 \sim 15 \text{ cm}$ 。在管体星虫的栖息环境中, 钻穴类底栖动物主要有白色吻沙蚕、背蚓虫和厚鳃蚕, 其中白色吻沙蚕的数量最多。结合以上钻穴类底栖动物数据, 可知管体星虫是赵述岛潮滩沉积物中体型较大的钻穴类底栖动物。3 种管体星虫的栖息层次相同, 并且均通过吻部的伸展和收缩完成摄食过程, 肠道内容物相近, 推测 3 种管体星虫可能存在一定程度的饵料竞争。生物竞争的同时也存在其他方面的相互协同, 本研究发现珊瑚礁潮滩环境多为大颗粒的珊瑚礁碎石, 不利于细小颗粒物的

沉积，更不利于管体星虫的摄食，多个星虫物种的生物扰动有利于在相同环境中形成凹陷，有效积累更多的细沙和饵料。同时，采挖过程中发现在细沙明显沉积的区域极易发现管体星虫。

大型钻穴类底栖动物主动或被动摄取表层沉积物，通过摄食排泄实现物质的迁移和封埋。大型底栖动物的生物扰动会增加水泥界面的物质通量，加速底部有机碎屑的分解和利用，对水体物质循环、能量流动、营养结构等起到关键作用（孙刚等 2013）。星虫类动物的滩涂生态功能不同于蟹类（Wolfrath 1992）、多毛类（Palmer 2010, Musale et al. 2011, 江小桃等 2012），其主要生态功能体现在将表层颗粒沉积物在深处封埋（李俊伟等 2015a, Li et al. 2015），同时星虫对洞穴管道造成的理化影响还会改变洞穴管道内壁及周围的微生物群落组成（Li et al. 2019）。蚯蚓在生态系统中既是消费者、分解者，也是调节者，对土壤有机质分解和物质循环具有重要意义（张卫信等 2007），星虫类在近海滩涂生态系统中的生态作用与蚯蚓在陆地生态系统中的生态作用十分相近，二者的主要区别在于食物来源。蚯蚓以地面以下的土壤作为饵料载体，利用其中的有机物质和微生物等（Hoeffner et al. 2018），而星虫类需要不断地用吻部向上摄食粘附洞穴内的颗粒物质，以获取表层沉积物中的微藻、有机质以及细菌等物质。碎屑食者摄食底表的有机碎屑，吞食沉积物质，消化利用其中的有机质（彭松耀等 2013, 颜露露等 2016）。通过管体星虫内容物可以确定其为典型的碎屑食者。管体星虫的体型较大，扰动程度较强，其在珊瑚礁潮滩的生态作用十分重要。管体星虫的迁移深度在 10 ~ 15 cm，迁移方向接近水平或倾斜向下，而光裸方格星虫的栖息深度为 30 ~ 50 cm，移动速度较快，采挖深度约为 50 cm（李俊伟等 2018），这主要与潮滩结构和生物特征有关。管体星虫吻部的角质层厚度可达 59 μm ，其厚度可占组织的 1/4，明显大于光裸方格星虫的角

质层厚度（邓中日等 2009）。管体星虫栖息的珊瑚礁潮滩多为粗糙砂砾，其发达的收吻肌（图 3）使得吻部在珊瑚礁砂砾底质中不断伸展和收缩形成了较厚的角质层，这也是其体表结构对珊瑚礁粗糙底质的适应。

管体星虫对于珊瑚礁沉积物具有细化作用。星虫类动物只能摄取适合其口径大小的颗粒物质，本研究管体星虫上行肠内的粗沙比例小于下行肠，而细沙比例高于下行肠，表明管体星虫在摄食消化过程中，对摄入的珊瑚礁砂砾具有细化作用（表 1 和 3）。星虫类动物缺乏单独的消化腺，其消化机能较弱，只能通过延长肠道的消化过程以提高物质利用率（应雪萍等 2005, 操向文等 2009, 邓中日等 2009）。管体星虫动物具有螺旋状消化道，其长度可以达到体长的 2.5 ~ 3.0 倍，因此在内容物移动过程中，颗粒物质之间的挤压研磨起到了细化作用。以往研究也表明，光裸方格星虫排泄出的沙粒较细小，远小于消化道中的沙粒（李俊伟等 2015b）。管体星虫的肠道悬浮于体腔液中，并且下行肠和上行肠肌纤维较少，褶皱和突起也较少（图 4），缺乏较强的蠕动能力，通过收缩时体腔液的压力和吻部的收缩综合作用实现肠道内容物的排泄。以往研究也发现星虫类动物在摄食时收吻肌的收缩过程中伴随着颗粒物质的排出（李俊伟等 2015b）。管体星虫是赵述岛潮滩沉积物中体型较大的钻穴类底栖动物，其在沉积物内的摄食、排泄、筑穴、运动等对潮滩沉积物理化结构、微生物群落组成和其他底栖动物的摄食、生长、呼吸等生理过程的具体影响需要进一步研究。

参 考 文 献

- Hoeffner K, Monard C, Santonja M, et al. 2018. Feeding behaviour of epi-aneccic earthworm species and their impacts on soil microbial communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 125: 1-9.
- Kristensen E. 2001. Impact of polychaetes (*Nereis* spp. And *Arenicola marina*) on carbon biogeochemistry in coastal marine sediments. *Geochemical Transactions*, 2(12): 92-103.

- Li J W, Hu R P, Guo Y J, et al. 2019. Bioturbation of peanut worms *Sipunculus nudus* on the composition of prokaryotic communities in a tidal flat as revealed by 16S rRNA gene sequences. *Microbiology Open*, 8(8): e802.
- Li J W, Zhu C B, Guo Y J, et al. 2015. Experimental study of bioturbation by *Sipunculus nudus* in a polyculture system. *Aquaculture*, 437(9): 175–181.
- Musale A S, Desai D V. 2011. Distribution and abundance of macrobenthic polychaetes along the South Indian coast. *Environ Monit Assess*, 178(4): 423–436.
- Palmer P J. 2010. Polychaete-assisted sand filters. *Aquaculture*, 306(1): 369–377.
- Pelegri S P, Blackburn T H. 1994. Bioturbation effects of the amphipod *Corophium volutator* on microbial nitrogen transformation in marine sediments. *Marine Biology*, 121(2): 253–258.
- Shields M A, Kedra M A. 2009. Deep burrowing sipunculan of ecological and geochemical importance. *Deep Sea Research*, 56(1): 2057–2064.
- Volkenborn N, Hedtkamp S I C, van Beusekom J E E, et al. 2007. Effects of bioturbation and bioirrigation by lugworms (*Arenicola marina*) on physical and chemical sediment properties and implications for intertidal habitat succession. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 74(1): 331–343.
- Wolfrath B. 1992. Burrowing of the fiddler crab *Uca tangeri* in the Ria Formosa in Portugal and its influence on sediment structure. *Marine Ecology Progress Series*, 85(3): 237–243.
- 操向文, 王庆恒, 黄若男, 等. 2009. 光裸星虫消化系统的解剖学和组织学研究. *广东海洋大学学报*, 29(3): 6–10.
- 邓中日, 黄勃. 2009. 裸体方格星虫消化道组织学研究. *海洋科学*, 33(4): 40–44.
- 江小桃, 谭焯辉, 柯志新, 等. 2012. 投放双齿围沙蚕和马尾藻对养殖底泥上覆水氮、磷含量的影响. *热带海洋学报*, 31(4): 129–134.
- 雷衍之. 2006. 养殖水环境化学实验. 北京: 中国农业出版社, 80–85.
- 李凤鲁, 周红, 王玮. 1992. 中国沿海管体星虫属的研究. *青岛海洋大学学报*, 22(1): 97–102.
- 李俊伟, 颜晓勇, 郭永坚, 等. 2018. 光裸方格星虫养殖对滩涂底质的影响. *热带海洋学报*, 37(1): 37–44.
- 李俊伟, 朱长波, 郭永坚, 等. 2015a. 光裸方格星虫生物扰动对混养系统沉积物及间隙水中营养物质的影响. *渔业科学进展*, 36(1): 103–110.
- 李俊伟, 朱长波, 郭永坚, 等. 2015b. 光裸方格星虫对 3 种不同底质的适应性研究. *渔业科学进展*, 36(6): 95–99.
- 彭松耀, 李新正. 2013. 乳山近海大型底栖动物功能摄食类群. *生态学报*, 33(7): 5274–5285.
- 孙刚, 房岩. 2013. 底栖动物的生物扰动效应. 北京: 科学出版社, 30–40.
- 严宏强, 余克服, 谭焯辉. 2009. 珊瑚礁区碳循环研究进展. *生态学报*, 29(11): 6207–6215.
- 颜露露, 蔡立哲, 陈昕韩, 等. 2016. 广州南沙十四涌潮间带大型底栖动物的功能群. *生物多样性*, 24(7): 802–810.
- 应雪萍, 童莉里, 黄晓雷. 2005. 可口革囊星虫消化道的形态及组织学结构. *动物学杂志*, 40(5): 14–20.
- 张卫信, 陈迪马, 赵灿灿. 2007. 蚯蚓在生态系统中的作用. *生物多样性*, 15(2): 142–153.
- 周红, 李凤鲁, 王玮. 2007. 中国动物志: 第 46 卷: 无脊椎动物星虫动物门. 北京: 科学出版社, 104–113.