

## 江门近岸海域大型底栖动物群落结构的分布特征

陈梓林<sup>1,2,3</sup>, 李纯厚<sup>2,3</sup>, 肖雅元<sup>2,3</sup>, 刘永<sup>2,3</sup>, 林琳<sup>2,3</sup>, 王九江<sup>2,3</sup>, 全秋梅<sup>2,3</sup>

(1. 浙江海洋大学水产学院, 浙江舟山 316022; 2. 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, 广东广州 510300; 3. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广东广州, 511458)

**摘要:** 根据 2016 年江门近岸海域 4 个航次的调查数据, 对其大型底栖动物现存量 and 多样性分布特征进行了研究。调查共鉴定出大型底栖动物 56 种, 其中软体动物 21 种, 环节动物 18 种, 节肢动物 7 种, 棘皮动物 3 种, 纽形动物和腔肠动物各 2 种, 星虫动物、脊索动物和蠕虫各 1 种。江门近岸海域各站位大型底栖动物栖息密度和生物量分别介于 10~920 个·m<sup>-2</sup> 和 0.2~267.7 g·m<sup>-2</sup>, 栖息密度总体呈现湾外大于湾内的趋势; 群落中以膜质伪才女虫 (*Pseudopolydora kempfi*) 和中华内卷齿蚕 (*Aglaophamus sinersis*) 分布最广泛, 其中中华内卷齿蚕为四季共同优势种。ABC 曲线分析表明, 该海域群落整体的稳定性一般, 春、秋季大型底栖动物群落受到一定程度的干扰, 稳定性较弱。相关性分析表明, 水深、盐度、温度、磷酸盐、沉积物类型、捕食压力是影响群落结构时空差异的主要因素。

**关键词:** 大型底栖动物; 群落结构; 生物多样性; 环境因子; 江门

中图分类号: Q 958.8

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



## Distribution of structure of macrobenthic communities in coastal waters of Jiangmen, Guangdong

CHEN Zilin<sup>1,2,3</sup>, LI Chunhou<sup>2,3</sup>, XIAO Yayuan<sup>2,3</sup>, LIU Yong<sup>2,3</sup>, LIN Lin<sup>2,3</sup>, WANG Jiujiang<sup>2,3</sup>, QUAN Qiumei<sup>2,3</sup>

(1. College of Fisheries, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences/Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Development & Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecological Environment, Guangzhou 510300, China; 3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Guangzhou 511458, China)

**Abstract:** Based on the data collected from four-season investigations in Jiangmen coastal waters of the South China Sea in 2016, we examined the ecological characteristics and biodiversity of the macrobenthic community. A total of 56 species were identified, including 21 Mollusks, 18 Annelids, 7 Arthropods, 3 Echinoderms, 2 Nemertean, 2 Coelenterates, 1 Sipunculan, 1 Chordate and 1 Echiuran. The density and biomass values varied from 10 to 920 ind·m<sup>-2</sup> and from 0.2 to 267.7 g·m<sup>-2</sup>, respectively. The spatial distribution of density was generally higher in the waters outside the bay than inside. In the macrobenthos community, *Pseudopolydora kempfi* and *Aglaophamus sinersis* were most widely distributed, and *A. sinersis* was the common dominant species that appeared in four seasons. The evaluation results of abundance and biomass comparison curve show that the overall stability of the community in

收稿日期: 2019-12-03; 修回日期: 2020-02-18

资助项目: 公益性行业 (农业) 科研专项经费项目 (201403008); 国家自然科学基金 NSFC-广东联合基金重点项目 (U1301235); 广东省渔业生态环境重点实验室开放项目 (LFE-2016-14)

作者简介: 陈梓林 (1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水产动物种群遗传学。E-mail: 982808902@qq.com

通信作者: 李纯厚 (1963—), 男, 研究员, 从事水生生物学研究。E-mail: chunhou@scesfri.ac.cn

this area is general, while the macrobenthic community in spring and autumn is moderately disturbed with poor community stability. The correlation analysis shows that the tempo-spatial differences of the macrobenthic community are mainly affected by water depth, salinity, temperature, phosphate, sediment type, predation pressure and so on.

**Key words:** Macrobenthos; Community structure; Biodiversity; Environmental factors; Jiangmen

大型底栖动物是海洋环境的重要生态群落, 是海洋生态系统能量流动和物质循环的关键环节<sup>[1]</sup>。大型底栖动物具有行动缓慢、迁徙能力有限、容易受各种环境因素影响的特点, 其群落结构和营养结构的变化能够准确反映出所处生境的长期变化<sup>[2]</sup>, 因而常被作为海洋生态环境监测与评价的重要指示生物<sup>[3-4]</sup>。

江门市位于广东省中南部, 珠江三角洲西侧, 是粤港澳大湾区西岸门户, 拥有大小海岛 561 个, 数量位居广东省第二<sup>[5]</sup>。江门海域邻接珠江口, 是典型的河口岛屿复合海洋生态系统, 主要包括黄茅海、广海湾、镇海湾和川岛海域, 生境复杂, 渔业资源丰富, 是多种海洋生物的主要栖息地、产卵场和索饵场<sup>[6-7]</sup>, 是上、下川岛中国龙虾 (*Panulirus stimpsoni*) 国家级水产种质资源保护区与江门中华白海豚 (*Sousa chinensis*) 省级自然保护区的所在地<sup>[8-10]</sup>。随着江门工商业的蓬勃发展, 海洋开发与捕捞强度持续加大, 导致海域污染日渐加剧, 渔业资源逐步退化<sup>[11-13]</sup>, 亟需科学有效的海洋生态系统监测和评价指标, 以客观地反映该生态系统的演化趋势, 优化生态系统管理, 促进系统修复。

大型底栖动物数量与生物多样性信息是极具发

展前景的生态监测和评价指标<sup>[14-15]</sup>。目前对江门近岸海域大型底栖动物的研究鲜见报道, 只有覃超梅等<sup>[5]</sup>对该海域 2016 年春季大型底栖动物的种类组成进行了调查。大型底栖动物信息的缺失严重阻碍了该海域生态监测和调控工作的深入开展。因此本研究于 2016 年在江门海域进行了 4 个季节的调查, 对该海域大型底栖动物群落结构和多样性特征进行了分析, 以期对江门近岸海域生态系统管理和生物资源的可持续利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查区域与时间

于 2016 年 1 月 18—23 日 (冬季)、4 月 6—11 日 (春季)、8 月 9—12 日 (夏季) 和 10 月 25—28 日 (秋季) 在江门近岸海域进行了 4 个航次的生态学调查。分别于湾外 (A5、A6、A9 和 A10) 和湾内 (A1、A2、A3、A4、A7 和 A8) 设置 10 个采样站位 (112°24'20"E—113°05'30"E, 21°40'30"N—22°20'10"N, 图 1)。由于天气条件、技术、时间安排问题, 极少数站位 (夏季的 A9、A10 和冬季的 A6) 未能全年采样。

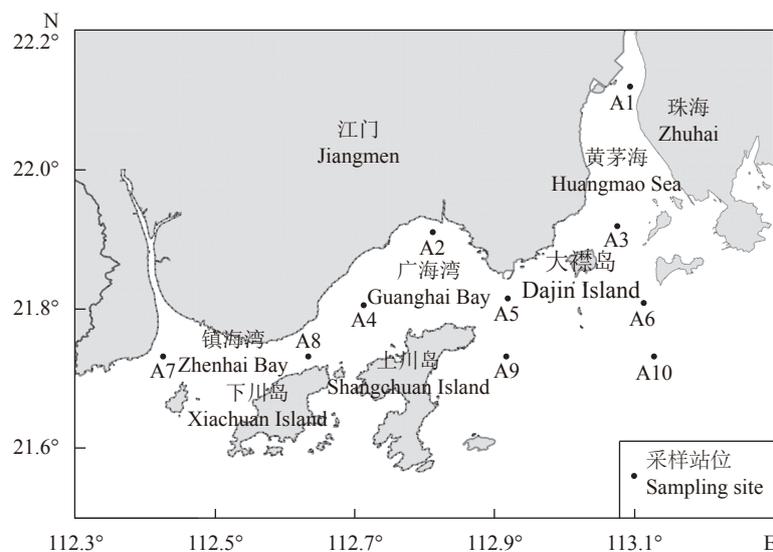


图1 江门近岸海域大型底栖动物采样站位分布

Figure 1 Sampling site of macrobenthos in coastal waters of Jiangmen

## 1.2 样品采集与处理

样品采集及分析测试等均按照《海洋监测规范》(GB 17378—2007 和 GB 17378.4—2007) 进行。使用抓斗式采器, 每站取样 2 次, 合并为 1 个样品, 每站取表层沉积物 0.1 m<sup>2</sup>, 之后使用双层套筛分选其中的大型底栖动物 (上层孔径为 1.0 mm, 下层为 0.5 mm), 获得的动物样品用 4% 甲醛溶液固定后带回实验室进行种类鉴定、个体计数和称质量。同时, 使用便携式温盐测深仪 (YSI 维赛 ProPlus) 现场测定各站位表、底层海水温度、盐度、pH、溶解氧等水质因子, 叶绿素 *a* 通过采水后用孔径为 0.45 μm 的醋酸纤维滤膜过滤后冷冻, 带回实验室经丙酮萃取后使用荧光计 (Turner-Design 10) 测定, 采集各站位水样带回实验室测定化学指标包括悬浮物、亚硝酸盐氮 (NO<sub>2</sub>-N)、磷酸盐 (PO<sub>4</sub>) 等指标。

## 1.3 数据处理与分析

调查站位图采用 Surfer 12.0 软件绘制, 使用 Excel 2010 软件进行原始数据录入和整理, 并统计栖息密度、生物量、优势度、种类更替率, 计算 Shannon-Wiener 指数 ( $H'$ )、Pielou 均匀度 ( $J'$ )、丰富度指数 ( $D$ ), 底栖动物  $H'$ 、 $J'$  和  $D$  指数计算公式<sup>[16]</sup> 为:

$$H' = - \sum (n_i/N) \times \log_2(n_i/N) \quad (1)$$

$$J' = H' / \ln S \quad (2)$$

$$D = (S - 1) / \log_2 N \quad (3)$$

式中  $N$  是所有物种的个体总数,  $n_i$  表示第  $i$  个物种的个体数,  $S$  是物种的数目 (种数)。其中大型底栖动物的  $H'$  可用于评价海域的受污染程度, 当  $H' < 1$  说明水质重度污染;  $H' = 1 \sim 2$  为中度污染;  $H' = 2 \sim 3$  为轻度污染;  $H' > 3$  为轻度污染至无污染<sup>[17-18]</sup>。

使用双因素方差分析以探讨该海域大型底栖动物对栖息密度、生物量、生物多样性参数的时空差异。优势种依公式  $Y = f_i \times P_i$  计算<sup>[19]</sup>, 式中  $Y$  为优势度,  $f_i$  为  $i$  种在采样点中出现频率,  $P_i$  为  $i$  种在总数量中的比例。将  $Y > 0.02$  的种类确定为优势种。并计算种类更替率 ( $R$ )<sup>[20]</sup>,  $R$  值越大, 更替种类数越多, 表明群落稳定性越小, 公式为:  $R = [(a+b-2c)/(a+b-c)] \times 100$ , 式中  $a$  与  $b$  分别为相邻 2 个季节的种数,  $c$  为相邻 2 个季节共同的种数。

利用 PRIMER 6.0 软件输入丰度和生物量数据绘制 ABC 曲线分析群落稳定性, 通过比较丰度和

生物量来分析大型底栖动物群落受污染或其他因素扰动的状况。当  $W$  逐渐接近 1 时, 表示群落生物量优势逐渐被单一物种统治, 但各物种的丰富度趋于相同, 群落稳定性越高; 当  $W$  逐渐趋近于 -1 时, 情况相反, 群落稳定性越低。若丰度曲线位于生物量曲线之下, 代表群落未受干扰; 若丰度曲线位于生物量曲线之上, 代表群落受到严重干扰; 若丰度曲线与生物量曲线重叠或交叉, 代表群落受到中等程度干扰<sup>[21]</sup>。将底栖软体动物丰度和生物量矩阵四次方根转化后, 进行等级聚类分析 (CLUSTER)、非度量多维尺度分析 (NMDS)、生物环境 (BIOENV) 和相关性检验 (RELATE) 以分析大型底栖动物在该海域的群落结构和环境因子与群落的相关性等规律性变化。

## 2 结果

### 2.1 底栖动物物种组成及群落类型

2.1.1 物种组成 4 次调查共采集到大型底栖动物 9 门 56 种, 其中软体动物门 21 种, 占总种类数的 37.5%; 环节动物门 18 种, 占总种类数的 32.1%; 节肢动物门 7 种, 占 12.5%; 棘皮动物门 3 种, 纽形动物门 2 种, 腔肠动物门 2 种, 星虫动物门 1 种, 脊索动物门 1 种和蠕虫动物门 1 种 (表 1)。

秋季共采集到 30 种, 其次是春季 28 种, 夏季和冬季均为 25 种 (图 2)。各季大型底栖动物种类组成基本以环节动物为主, 软体动物次之, 节肢动物第三。江门近岸海域四季的大型底栖动物种类更替率分别为: 春季-夏季 66.67%, 夏季-秋季 69.05%, 秋季-冬季 60.53%, 冬季-春季 61.54%, 平均季节更替率 64.44%, 表明该海域大型底栖动物种类季节性差异明显, 在夏秋季间种类更替最为明显, 春夏间次之。

江门近岸海域大型底栖生物在 4 个航次调查中共出现 12 种优势种, 结果显示该海域四季的第一优势种不完全相同。除秋冬季均为膜质伪才女虫 (*Pseudopolydora kempii*) 外, 春季为光滑倍棘蛇尾 (*Amphioplus laevis*), 夏季为棒锥螺 (*Turritella bacillum*) (表 2)。

2.1.2 群落类型 CLUSTER 分析与 NMDS 分析结果表明 (图 3), 该海域大型底栖动物可以划分为 2 个群落。群落 I, 位于西江入海口 A1 站; 群落 II, 位于江门西江入海口其他海域。MDS 分析的

表1 江门近岸海域底栖动物种类组成与分布  
Table 1 Composition and distribution of benthic species in Jiangmen coastal waters

种类 Species	采样站位 Sampling site									
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
环节动物门 Annelida										
膜质伪才女虫 <i>Pseudopolydora kempfi</i>		+	+	+	+	+	+	+	+	+
中华内卷齿蚕 <i>Aglaophamus sinersis</i>		+	+	+	+	+		+	+	+
背蚓虫 <i>Notomastus latericeus</i>		+	+	+	+			+	+	+
双齿围沙蚕 <i>Perinereis aibuhitensis</i>		+			+	+	+	+	+	
不倒翁虫 <i>Sternaspis scutata</i>		+	+			+	+		+	+
小头虫 <i>Capitella capitata</i>	+		+	+					+	
长吻沙蚕 <i>Glycere chirori</i>		+	+				+	+		
持真节虫 <i>Euclymene annandalei</i>				+		+			+	+
梳鳃虫 <i>Terebellides stroemii</i>				+	+	+			+	
白色吻沙蚕 <i>Glycera alba</i>				+	+	+	+			
厚鳃蚕 <i>Dasybranchus caducus</i>						+			+	
独齿围沙蚕 <i>Perinereis cultriferea</i>			+			+				
角海蛹 <i>Ophelina acuminata</i>					+			+		
弦毛内卷齿蚕 <i>Aglaophamus lyrochaeto</i>					+					
海毛虫 <i>Chloeia flava</i>							+			
背毛背蚓虫 <i>Notomastus cf. aberans</i>					+					
多齿围沙蚕 <i>Perinereis nuntia</i>		+								
异足索沙蚕 <i>Lumbrineris heteropoda</i>		+								
软体动物门 Mollusca										
肋蜆螺 <i>Umbonium coatum</i>		+		+	+	+	+		+	+
棒锥螺 <i>Turritella bacillum</i>		+	+	+	+		+	+		
小亮樱蛤 <i>Nitidotellina minuta</i>	+	+	+			+				+
辐射荚蛭 <i>Siliqua radiata</i>		+		+			+	+		
光滑河蓝蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>			+				+			
毛蚶 <i>Scapharca subcrenata</i>							+			
橄榄胡桃蛤 <i>Nucula paulula</i>										+
线纹玉螺 <i>Natica lineata</i>										+
大角贝 <i>Dentalium vernelei</i>									+	
小刀蛭 <i>Cultellus attenustus</i>				+						
斜纹甲壳蛤 <i>Jactellina obliquistriata</i>		+								
红带织纹螺 <i>Nassarius succinctus</i>		+			+				+	
假奈拟塔螺 <i>Turricula nelliae spurious</i>									+	
钻螺 <i>Terebellum terebellum</i>		+	+						+	
白龙骨乐飞螺 <i>Lophiotoma leucotropis</i>									+	+
粗帝汶蛤 <i>Timoclea scabra</i>				+				+		
日本镜蛤 <i>Dosinia japonica</i>				+		+				
小荚蛭 <i>Siliqua minima</i>				+				+		
波纹巴非蛤 <i>Paphia undulata</i>				+						
鳞杓拿蛤 <i>Anomalodiscus squamosa</i>									+	
文雅蛙螺 <i>Bursa elegans</i>						+				
西格织纹螺 <i>Nassarius siquinjorensis</i>							+			

续表 1

to be continued

种类 Species	采样站位 Sampling site									
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
节肢动物门 Arthropoda										
裸盲蟹 <i>Typhlocarcinus mudus</i>		+				+	+	+		+
钩虾 <i>Elasmopus</i>	+						+	+		
宽腿巴豆蟹 <i>Pinnixa penultipedalis</i>							+			+
小巧毛刺蟹 <i>Pilumnus minutus</i>								+		
日本鼓虾 <i>Alpheus japonicus</i>								+		
毛盲蟹 <i>Typhlocarcinus villosus</i>								+		
棘皮动物门 Echinodermata										
光滑倍棘蛇尾 <i>Amphioplus laevis</i>		+	+				+	+	+	+
棘刺锚参 <i>Protankyra bidentata</i>		+					+			
花艇蛇尾 <i>Ophionereis variegata</i>				+						
纽形动物门 Nemertea										
无沟纽虫 <i>Baseodiscus</i>	+	+	+		+		+		+	
孔纽虫 <i>Amphiporus</i>				+						
腔肠动物门 Coelentera										
纵条矶海葵 <i>Haliplanella luciae</i>									+	
东方角海葵 <i>Cerianthus orientalis</i>										+
螭虫动物门 Echiura										
短吻铲菜螭 <i>Listriolobus brevis</i>		+	+			+	+	+	+	+
星虫动物门 Sipuncula										
可口革囊星虫 <i>Phascolosoma esculenta</i>		+	+		+				+	
脊索动物门 Chordata										
凤鲚 <i>Coilia mystus</i>										+

注: +. 调查中出现的种

Note: +. The species that appeared in this survey

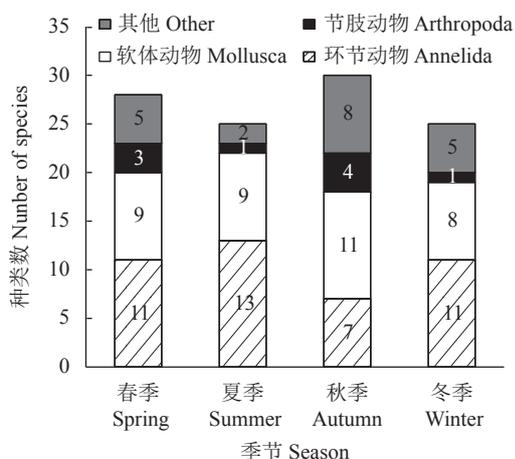


图2 江门近岸海域大型底栖动物各类群物种数季节变化  
Figure 2 Seasonal variation of species of macrobenthos in Jiangmen coastal waters

胁迫系数 stress 为 0.19, 对反映样本间的群落关系具有一定的解释意义。ANOSIM 检验分析表明,

各群落间的差异显著 ( $R=0.64, P<0.05$ )。

## 2.2 密度和生物量的时空变化

江门近岸海域四季大型底栖生物栖息密度介于  $10\sim 920$  个 $\cdot\text{m}^{-2}$ , 平均  $155.14$  个 $\cdot\text{m}^{-2}$ 。各季平均栖息密度由大到小为: 秋季>夏季>春季>冬季, 分别为  $218$ 、 $138.75$ 、 $138$  和  $118.89$  个 $\cdot\text{m}^{-2}$ ; 生物量介于  $0.2\sim 267.7$   $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ , 均值为  $43.13$   $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ , 各季平均生物量由大到小为: 夏季>秋季>春季>冬季, 分别为  $59.76$ 、 $50.45$ 、 $44.41$  和  $17.89$   $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。双因素方差分析结果显示, 栖息密度季节性间 ( $P=0.933>0.05$ ) 差异和站位间 ( $P=0.174>0.05$ ) 差异不显著, 生物量季节性间 ( $P=0.584>0.05$ ) 和站位间 ( $P=0.651>0.05$ ) 差异不显著。

各季节底栖动物类群栖息密度存在一定差异。水平分布总体呈现湾内低于湾外; 冬季湾内栖息密度略高于湾外, 其余各季节湾内均低于湾外。春季

表2 江门近岸海域大型底栖动物各季节优势种组成  
Table 2 Dominant species of macrobenthos in Jiangmen coastal waters

春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn		冬季 Winter	
物种 Species	优势度 指数 Y	物种 Species	优势度 指数 Y	物种 Species	优势度 指数 Y	物种 Species	优势度 指数 Y
光滑倍棘蛇尾 <i>Amphioplus laevis</i>	0.072	棒锥螺 <i>Turritella bacillum</i>	0.054	膜质伪才女虫 <i>Pseudopolydora kempii</i>	0.254	膜质伪才女虫 <i>Pseudopolydora kempii</i>	0.053
背蚓虫 <i>Notomastus latericeus</i> Sars	0.036	中华内卷齿蚕 <i>Aglaophamus sinersis</i>	0.050	中华内卷齿蚕 <i>Aglaophamus sinersis</i>	0.143	光滑河蓝蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>	0.046
无沟纽虫 <i>Baseodiscus</i> sp.	0.033	膜质伪才女虫 <i>Pseudopolydora kempii</i>	0.045	短吻铲荚蛭 <i>Listriolobus brevisrostris</i>	0.029	小头虫 <i>Capitella capitata</i>	0.034
中华内卷齿蚕 <i>Aglaophamus sinersis</i>	0.029	短吻铲荚蛭 <i>Listriolobus brevisrostris</i>	0.032			无沟纽虫 <i>Baseodiscus</i> sp.	0.029
肋蜡螺 <i>Umbonium coatatum</i>	0.026					中华内卷齿蚕 <i>Aglaophamus sinersis</i>	0.028

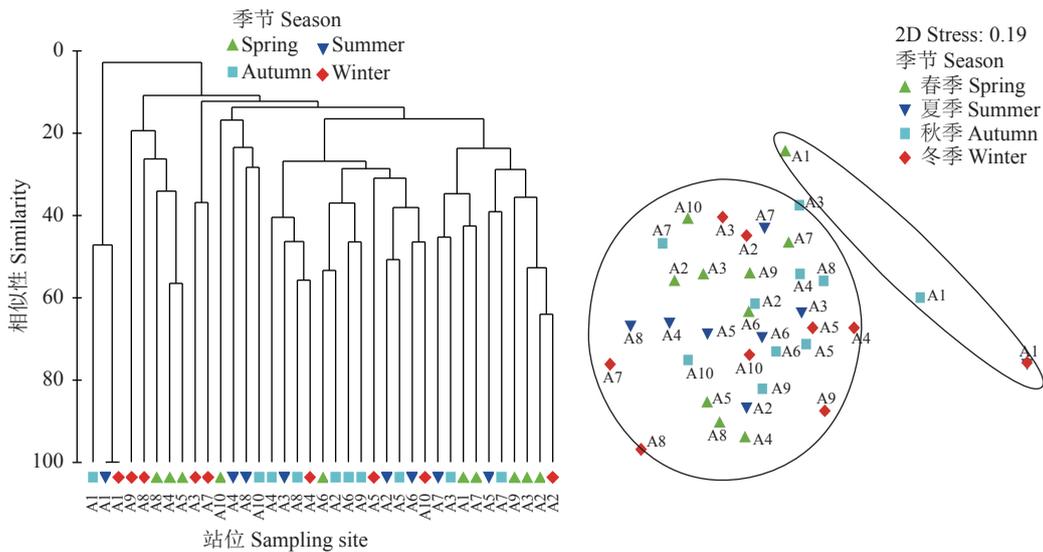


图3 江门近岸海域大型底栖动物群落的聚类分析和非度量多维尺度分析

Figure 3 Cluster analysis and non-metric multidimensional scaling analysis of macrobenthos in Jiangmen coastal waters

湾外、湾内以及秋季湾内主要构成类群相似，均为环节动物、软体动物和棘皮动物。其余各季湾内外环节动物、软体动物占比较高；夏季，湾内栖息密度接近湾外，主要构成类群相似，主要由环节动物、软体动物构成；单因素方差分析结果显示，栖息密度湾内外差异不显著 ( $P=0.136>0.05$ )。

各季节底栖动物各类群生物量分布也存在一定差异，由于各类群个体大小差异，生物量分布与栖息密度较为不同，春夏两季湾内生物量略低于湾外，秋冬两季湾内生物量略高于湾内。春季湾内以软体动物为主，湾外以棘皮动物和蠕虫动物为主；夏季湾内外生物量组成相似，以软体动物和蠕虫动物生物量较高；秋季湾内生物量略高于湾外，湾外

内生物量以软体动物为主；冬季生物量湾内外接近，湾内主要为软体动物，湾外主要为腔肠动物和软体动物生物量较高。单因素方差分析结果显示，生物量湾内外差异不显著 ( $P=0.652>0.05$ )。

### 2.3 大型底栖动物生物多样性时空变化。

该海域大型底栖生物  $H'$ 、 $J'$  和  $D$  变化分别介于 1.18~1.68, 0.78~0.93 和 1.41~2.20。  $H'$ 、 $J'$  和  $D$  整体表现出相同的季节变化趋势：春季>夏季、秋季>冬季。单因素方差分析表明， $D$  ( $P=0.081>0.05$ )、 $J'$  ( $P=0.098>0.05$ ) 和  $H'$  ( $P=0.058>0.05$ ) 不同季度间差异均不显著 (图 4)。

ABC 曲线显示，春季生物量曲线位于丰度曲线上方，但生物量曲线起始点较低，顶端与丰度曲

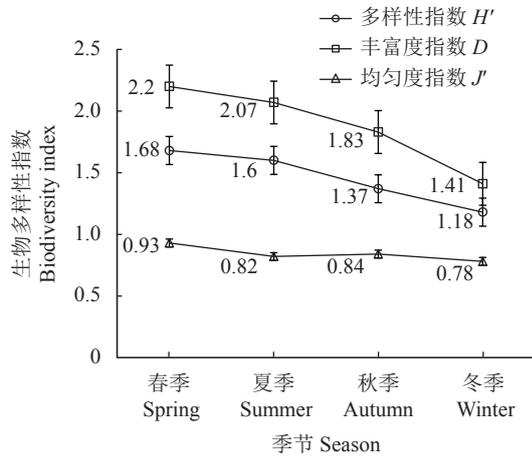


图4 江门近岸海域大型底栖动物多样性指数季节变动

Figure 4 Seasonal variation of macrobenthos diversity index in Jiangmen coastal waters

线重叠 ( $W=0.144$ ), 表明春季大型底栖动物群落受到中等程度干扰; 秋季生物量曲线与丰度曲线交叉 2 次 ( $W=0.056$ ), 表明该海域秋季大型底栖动物群落明显受到中等程度干扰且稳定性差。夏、冬季生物量曲线位于丰度曲线上方, 且生物量曲线起点较高 ( $W$  分别为 0.420、0.286), 表明该海域夏、冬季大型底栖动物群落相对稳定 (图 5)。ABC 曲线评价表明, 该海域群落整体稳定性一般, 夏、冬

季大型底栖动物群落受干扰不明显、春、秋季大型底栖动物群落受到一定程度的干扰, 稳定性较弱。

## 2.4 底栖动物与理化因子相关性分析

RELATE 分析表明, 该海域大型底栖动物栖息密度与环境因子的相关系数达到显著正相关水平 ( $R=0.337, P<0.05$ )。综合各环境因子, 与群落的栖息密度进行 BIOENV 分析得出的各环境因子与大型底栖动物的相关关系中, 相关系数最高的环境因子为盐度 ( $\rho=0.246$ ), 其次为水深 ( $\rho=0.183$ ), 这两者与温度 ( $\rho=0.120$ ) 和  $\text{PO}_4^{3-}$  ( $\rho=0.108$ ) 共同构成影响该海域大型底栖生物群落结构的最优环境因子组合 (总相关性 0.363, 表 3)。

## 3 讨论

### 3.1 群落结构

本研究 4 次调查共采集到大型底栖动物 56 种。由于未见江门近岸海域相关历史调查资料, 无法获得其时间差异信息。仅有覃超梅等<sup>[5]</sup> 与本研究同年 (2016 年) 对该海域春季大型底栖动物进行了调查, 结果共获得大型底栖动物 16 种。本研究春季获得 27 种, 明显多于覃超梅等的调查。覃超梅等<sup>[5]</sup> 均沿海岸线布置站位, 站位离岸距离较近, 不能完

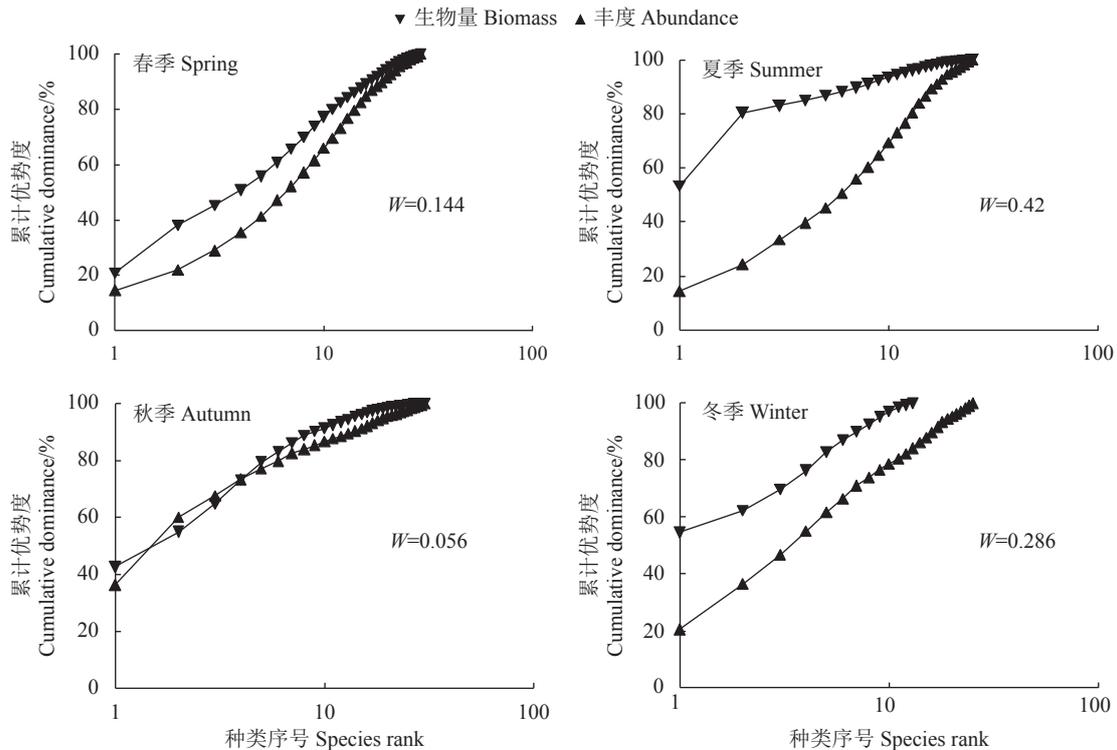


图5 江门近岸海域大型底栖生物群落ABC曲线

Figure 5 ABC plots of macrobenthic communities in Jiangmen coastal waters

表3 江门近岸海域底栖动物栖息密度与  
环境因子的生物-环境分析  
Table 3 BIOENV analysis of macrobenthos density and  
environmental factors

环境因子组合 Environmental factor	相关系数 $\rho$ Correlation coefficient $\rho$
盐度 Salinity	0.246
水深 Water depth	0.183
透明 Transparency	0.155
溶解氧 Dissolved oxygen	0.134
温度 Temperature	0.120
磷酸盐 Phosphate	0.108
亚硝酸盐 Nitrite	0.053
酸碱度 pH	0.051
悬浮物 Suspended matter	0.025
最大相关性 Maximum correlation	水深, 温度, 盐度, 磷酸盐 0.363

全反映江门近岸海域整体情况。而本研究站位涵盖江门整个近岸海域, 离岸距离较远, 因此获得的大型底栖动物种类更为丰富。与周边海域的调查结果相对比, 彭松耀等<sup>[22]</sup>2015年在珠江口海域采获67种大型底栖动物, 多于本研究, 这可能与各研究采样强度和采样方式不同有关。

大型底栖动物的  $H'$  被广泛应用于检测海洋底栖生物群落结构的变化情况和海域污染程度评价<sup>[23-25]</sup>。江门近岸海域大型底栖生物  $H'$  的季节变化介于 1.18~1.68, 年均 1.43, 说明水质污染程度为中度污染。珠江口 (2015 年) 大型底栖动物  $H'$  的季节变化介于 1.11~1.81, 年均 1.475<sup>[22]</sup>, 说明珠江口海域水质污染程度为中度污染。可见位于珠江口附近的海域  $H'$  差异较小, 整体上表现为受到中度污染。ABC 曲线分析也表明, 该海域群落整体的稳定性一般, 春、秋季大型底栖动物群落受到一定程度的干扰, 稳定性较弱。A1 站位构成的群落 I 平均  $H'$  较低 ( $H'=0.28$ ), 物种稀少 (仅 5 种), 主要由于该站位位于西江入海口之一, 从崖门水道和虎跳门水道流出的径流约分流西江流量的 11.2%<sup>[26]</sup>。大量的陆源污染物和生活污水从此排出<sup>[13]</sup>, 加上航道繁忙, 受人为干扰较多, 容易受到严重污染。而群落 II 包含除 A1 外另外 9 站位平均  $H'$  较高 ( $H'=1.6$ ), 物种数量较高, 这主要与该海域包含两个省级以上保护海域<sup>[9-10]</sup> [大襟岛以南周边海域为中华白海豚

保护区所在地和上、下川岛中国龙虾 (*Panulirus stimpsoni*) 国家级水产种质资源保护区] 受政府保护和监管力度大, 海域面积广、水体交换能力较高<sup>[5]</sup>、受污染程度较小有关。本研究水域与珠江口<sup>[22]</sup>和长江口<sup>[24]</sup>等河口水域大型底栖动物的分布类似, 均是湾内水域大型底栖动物的物种数远低于湾外水域。

对比江门近岸海域大型底栖动物优势种与覃超梅等<sup>[5]</sup>获得的春季优势种寡鳃齿吻沙蚕 (*Nephtys oligobranchia*)、红刺尖稚虫 (*Scoloplos rubra*)、小头虫和光滑河蓝蛤发现, 两者在春季无相同优势种, 这可能与两研究的站位设置有关。覃超梅等<sup>[5]</sup>采集底栖动物总站位数的经纬度设置, 仅有 2 个站位与本调查站位相似 (占本次调查站位数的 20%)。调查发现优势种中膜质伪才女虫 (*Pseudopolydora kempfi*) 在除 A1 站位外所有采样点都有分布, 中华内卷齿蚕 (*Aglaophamus sinensis*) 在除 A1 和 A7 站位外均有分布 (图 1), 两者属于江门近岸海域的广泛分布的优势种。底栖动物在 5 月生物量达到全年最高, 这可能与繁殖期有关。5 月为该海域大型底栖动物的盛卵期<sup>[26-27]</sup>, 从而导致该海域各大型底栖动物数量达到年度高峰。秋季, 许多新生个体进入到群落, 促使底栖生物的栖息密度达到最高值, 这也与该海域大型底栖动物种类四季更替率在夏秋季间数值最大的变化规律相契合。

### 3.2 底栖动物与环境因子分析

BIOENV 分析表明, 解释底栖动物群落丰度分布的最优环境因子组合为水深、温度、盐度和磷酸盐 (表 2)。鉴于江门大型底栖动物可划分为两个群落, 群落 I, 位于西江入海口 A1 站; 群落 II, 位于江门西江入海口其他海域 (图 3)。群落 I 平均水深 2.7 m, 群落 II 平均水深 9.1 m, 表明群落 I 和 II 可能受水深梯度的不同的影响。在水深越浅, 离岸越近受人类活动干扰越大, 不利于底栖动物的生存和生长<sup>[28]</sup>; 而当海域水深增加, 离岸距离变远, 同时较高的初级生产力到达底部, 为底栖动物提供营养物质, 促进底栖动物的生长繁殖, 进而形成空间上的群落划分。该海域大型底栖动物的栖息密度高值出现夏秋季节, 这主要与海域季节性水温变化对底栖动物群落分布的影响有关。Cooper 等<sup>[29]</sup>认为水温是影响底栖生物丰度的关键因子, 在底栖生物的分布和生长中起关键性作用。在营养充足的

条件下,当温度降低时,大型底栖动物的生长、发育受到抑制<sup>[30]</sup>。季节上江门海域冬季水体温度明显低于其他三季,而该季大型底栖动物栖息密度也明显低于其他三季。盐度和营养盐与底栖动物群落是影响底栖生物群落空间分布的主要因素<sup>[31]</sup>,江门海域底栖动物可划分为2个群落,可能是由于群落I位于西江入海口黄茅海海域,流经江门市区的西江冲淡水及其携带的营养盐等物质<sup>[13]</sup>,造成该区域同群落II所在的其他区域的盐度和营养盐相比变化较大。入海口大型底栖动物的物种分布随盐度梯度变化<sup>[32]</sup>,低盐度(5~8)海域的物种丰富度较低,而盐度30~40海域较高;周红等<sup>[33]</sup>对莱州湾的大型底栖动物研究发现,底栖动物对水层环境变化较为敏感,例如与富营养化有关的水体盐度增加会引起大型底栖动物群落结构的改变。因此,江门近岸海域大型底栖动物群落差异原因之一可能是其对水体盐度和营养盐的敏感性。

本研究中水深、温度、盐度和磷酸盐作为影响该海域底栖生物群落的最优组合,相关性系数略低(0.363),其群落结构可能受其他主要因素影响,如沉积物类型和捕食压力等。有研究表明沉积物类型与底栖生物群落类型密切相关<sup>[34]</sup>。每种沉积物类型支持着特定的底栖动物群落,而捕食压力能够动态调节群落结构和分布,不同生态位的海洋生物的季节性出现会对该海区的生物造成捕食压力的增加或降低<sup>[35-36]</sup>。

鉴于河口岛礁海域生境复杂,影响底栖动物群落的因素较多,且关于该海域的相关研究极为缺乏,因此需要对该海域进行长期定点调查,才能深刻阐明该海域环境因子和底栖动物群落结构间的关系。

#### 参考文献:

[1] MOODLEY L, HEIP C H R, MIDDELBURG J J. Benthic activity in sediments of the northwestern Adriatic Sea: sediment oxygen consumption, macro-and meiofauna dynamics[J]. *J Sea Res*, 1998, 40(3/4): 1-280.

[2] DAUVIN J C, RUELLET T, DESROY N, et al. The ecological quality status of the Bay of Seine and the Seine estuary: use of biotic indices[J]. *Mar Pollut Bull*, 2007, 55(1/2/3/4/5/6): 241-257.

[3] DAUVIN J C, ANDRADE H, de-la-OSSA-CARRETERO J A, et al. Polychaete/amphipod ratios: an approach to validating simple benthic indicators[J]. *Ecol Indic*, 2016, 63(3): 89-99.

[4] KÜRTEB B, AL-AIDAROOS A M, STRUCK U, et al. Influence

of environmental gradients on C and N stable isotope ratios in coral reef biota of the Red Sea, Saudi Arabia[J]. *J Sea Res*, 2014, 85: 379-394.

[5] 覃超梅,孙凯峰,赵庄明,等.江门市近岸海域春季环境质量评价[J].*环境污染与防治*, 2016, 38(12): 65-71.

[6] 晏磊,谭永光,杨炳忠,等.基于张网渔业休渔前后的黄茅海口渔业资源群落比较[J].*南方水产科学*, 2016, 12(6): 1-8.

[7] 田丰歌,郑琰晶,肖瑜璋,等.东海湾康氏小公鱼的产卵期及其鱼卵数量变动[J].*应用海洋学学报*, 2017, 36(3): 395-402.

[8] 李敏,王新星,许友伟,等.上川岛至海陵岛海域中华白海豚种群特征初探[J].*南方水产科学*, 2017, 13(5): 1-7.

[9] 马玉,陈浩昌,蔡钰灿,等.珠江口大襟岛中华白海豚保护区水质评价及影响因素分析[J].*环境化学*, 2011, 30(9): 1674-1675.

[10] 广东省海岛资源综合调查大队.川山群岛海岛资源综合调查报告[M].广州:广东科技出版社,1994: 210-226.

[11] 赵丽,刘芳娜.江门海洋经济发展的SWOT分析及策略选择[J].*新经济*, 2014(7): 59-62.

[12] 胡培,赵吉国.江门市黑臭水体水质现状及污染特征分析[J].*广东水利水电*, 2017(5): 20-34.

[13] 黄梦瑶.江门市海洋环境与海洋经济发展现状研究[D].广州:中山大学,2017: 18-23.

[14] HUTTON M, VENTURINI N, GARCÍA-RODRÍGUEZ F, et al. Assessing the ecological quality status of a temperate urban estuary by means of benthic biotic indices[J]. *Mar Pollut Bull*, 2015, 91(2): 441-453.

[15] FUKUMORI K, OI M, DOI H, et al. Bivalve tissue as a carbon and nitrogen isotope baseline indicator in coastal ecosystems[J]. *Estuar Coast Shelf Sci*, 2008, 79(1): 45-50.

[16] 陈佳勃,赵瑞辰,王艳杰,李法云.基于大型底栖动物群落生物指数的清河水环境模糊综合评价[J].*农业环境科学学报*, 2018, 37(12): 2837-2845.

[17] 冯剑丰,王秀明,孟伟庆,等.天津近岸海域夏季大型底栖生物群落结构变化特征[J].*生态学报*, 2011, 31(20): 5875-5885.

[18] 吴东浩,汪军涛,张咏,等.连云港主要河流大型底栖无脊椎动物水质生物评价[J].*环境监测管理与技术*, 2010, 22(1): 29-32.

[19] 谢志超,孙典荣,刘永,等.江门海域游泳动物群落组成及其多样性初步分析[J].*南方水产科学*, 2018, 14(5): 21-28.

[20] 舒黎明,陈丕茂,黎小国,等.柘林湾及其邻近海域大型底栖动物的种类组成和季节变化特征[J].*应用海洋学学报*, 2015, 34(1): 124-132.

[21] 田胜艳,于子山,刘晓收,等.丰度/生物量比较曲线法监测大型底栖动物群落受污染扰动的研究[J].*海洋通报*, 2006, 25(1): 92-96.

[22] 彭松耀,赖子尼,麦永湛.珠江口大型底栖动物数量与生物多样性的分布特征[J].*海洋渔业*, 2019, 41(3): 266-277.

[23] 李少文,张莹,李凡,等.调水调沙对黄河口海域大型底栖动物群落的影响[J].*环境科学研究*, 2015, 28(2): 259-266.

[24] 袁一鸣,秦玉涛,刘材材,等.长江口海域夏季大型底栖动物群落结构分析[J].*水产学报*, 2015, 39(8): 1127-1121.

[25] 梁森,姜倩,李德鹏,等.曹妃甸近岸海域大型底栖动物群落特

- 征 [J]. 水产科学, 2019, 38(4): 479-491.
- [26] 黄宗国, 蔡如星. 海洋污损生物及其防除 (上册) [M]. 北京: 海洋出版社, 1984: 352-354.
- [27] 刘吉明, 余君同. 光滑河蓝蛤生殖习性初步研究 [J]. 水产科学, 2003, 22(5): 12-13.
- [28] 王蔚颖, 王晨, 田伟, 等. 九龙江口南临海域大型底栖动物群落结构的研究 [J]. 复旦学报 (自然科学版), 2014, 53(4): 520-528.
- [29] COOPER M J, UZARSKI D G, BURTON T M. Macroinvertebrate community composition in relation to anthropogenic disturbance, vegetation, and organic sediment depth in four Lake Michigan drowned river-mouth wetlands [J]. *Wetlands*, 2007, 27(4): 894-903.
- [30] 王银东, 熊邦喜, 陈才保, 等. 环境因子对底栖动物生命活动的影响 [J]. 浙江海洋学院学报 (自然科学版), 2005, 24(3): 253-257.
- [31] GAUDÊNCIO M J, CABRAL H N. Trophic structure of macrobenthos in the Tagus estuary and adjacent coastal shelf [J]. *Hydrobiologia*, 2007, 587(1): 241-251.
- [32] YSEBAERT T, HERMAN P M, MEIRE P, et al. Large-scale spatial patterns in estuaries: estuarine macrobenthic communities in the Schelde estuary, NW Europe [J]. *Estuar Coast Shelf Sci*, 2003, 57(1/2): 335-355.
- [33] 周红, 华尔, 张志南. 秋季莱州湾及邻近海域大型底栖动物群落结构的研究 [J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(8): 80-87.
- [34] MAGNI P, de FALCO G, COMO S, et al. Distribution and ecological relevance of fine sediments in organic-enriched lagoons: the case study of the Cabras lagoon (Sardinia, Italy) [J]. *Mar Pollut Bull*, 2008, 56(3): 549-564.
- [35] 张军晓. 硇洲海域文昌鱼食性及其栖息地鱼类营养等级分析 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2008: 36-39.
- [36] 李亚芳, 杜飞雁, 王亮根, 等. 粤西海陵湾养殖区邻近海域大型底栖动物生态学特征 [J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(6): 1294-1307.