

珠江口大型底栖动物群落结构特征及影响因素

孙 叶^{1,2,3}, 刘 永^{2,3}, 李纯厚^{2,3}, 吴 鹏^{2,3}, 李亚芳², 舒黎明², 林 琳^{2,3}, 肖雅元^{2,3},
唐广隆^{2,3}

1. 浙江海洋大学 水产学院, 浙江 舟山 316000

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/广东珠江口生态系统野外科学观测
研究站/广东省渔业生态环境重点实验室, 广东 广州 510300

3. 西沙岛礁渔业生态系统海南省野外科学观测研究站/海南省深远海渔业资源高效利用与加工重点实验室/三亚热带水产研
究院, 海南 三亚 572018

摘要: 珠江口是广东最大的出海口, 在中国河口生态系统中占据重要地位。为揭示珠江口大型底栖动物群落季节性变化规律, 分别于2019年冬季(12月)、2020年夏季(8月)、2021年春季(3月)和秋季(10月)对珠江口海域开展了4个航次的调查。运用多元统计分析方法对采集的大型底栖动物的种类组成、生物量和多样性指数等进行了分析。结果显示: 4次调查共发现大型底栖动物138种, 以春季大型底栖动物种类数最高(45种), 春季栖息密度最高(590个·m⁻²), 夏季最低。生物量则是冬季最高、秋季最低。光滑倍棘蛇尾(*Amphipholis laevis*)为春、夏和秋季的共有优势种。单因素方差分析(One-way ANOVA)结果表明, Margalef丰富度指数(*D*)、Shannon指数(*H'*)和Pielou均匀度指数(*J'*)均在季节间变化显著($P<0.05$)。Pearson相关性分析显示, 大型底栖动物多样性与pH、悬浮物(Suspended solids, SS)和化学需氧量(Chemical oxygen demand, COD)等多种环境因子呈显著相关性。研究表明大型底栖动物的季节性变化是多种环境因子共同作用的结果, 需进一步加强对该海域生物多样性的长期监测与保护。

关键词: 大型底栖动物; 群落结构; 季节变化; 环境因子; 珠江口

中图分类号: S 931.1

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Community characteristics and influencing factors of macrobenthos in Pearl River Estuary

SUN Ye^{1,2,3}, LIU Yong^{2,3}, LI Chunhou^{2,3}, WU Peng^{2,3}, LI Yafang², SHU Liming², LIN Lin^{2,3}, XIAO Yayuan^{2,3},
TANG Guanglong^{2,3}

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/Observation and Research Station of Pearl River
Estuary Ecosystem of Guangdong Province/Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecological Environment, Guangzhou
510300, China

3. Observation and Research Station of Xisha Island Reef Fishery Ecosystem of Hainan Province/Key Laboratory of Efficient Utilization
and Processing of Marine Fishery Resources of Hainan Province/Sanya Tropical Fisheries Research Institute, Sanya 572018, China

收稿日期: 2023-03-16; 修回日期: 2023-04-25

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金项目(2019B1515120065); 国家重点研发计划项目(2019YFD0901204, 2019YFD0901201); 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专项资金资助(2020TD16); 中国水产科学研究院南海水产研究所中央级公益性科研院所基本
科研业务费专项资金资助(2021SD04, 2017YB11); 农业农村部财政专项(NFZX2021)

作者简介: 孙 叶(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为底栖动物生态学。E-mail: 2737431856@qq.com

通信作者: 刘 永(1982—), 男, 研究员, 博士, 研究方向为海洋渔业生态学。E-mail: liuyong@scsfri.ac.cn

Abstract: The Pearl River Estuary is the largest estuary in Guangdong Province, and plays an important role in China's estuarine ecosystem. In order to explore the seasonal variation of macrobenthic community, we conducted four surveys in Pearl River Estuary waters in summer 2020 (August), winter 2019 (December), spring 2021 (March) and autumn 2021 (October). The species composition, biomass and diversity of the collected macrobenthic fauna were analyzed by multivariate statistical analysis. A total of 138 benthic species were recorded. The number of macrobenthic species was higher in spring (45) than that in the other three seasons. The highest density was observed in spring and the lowest in summer; the highest biomass was observed in winter and the lowest in autumn. *Amphipholis laevis* was the dominant species in spring, summer and autumn. One-way analysis of variance (ANOVA) shows that the changes of Margalef richness index (D), Shannon index (H') and Pielou evenness index (J') were all significantly different in different seasons ($P < 0.05$), and the Pearson correlation analysis shows that the diversity of macrobenthic fauna was significantly correlated with pH, suspended solids, chemical oxygen demand (COD) and other environmental factors. The results indicate that the seasonal variation of macrobenthic community results from the combined effect of multiple environmental factors. Thus, it is necessary to strengthen the long-term monitoring and protection of biodiversity in this area.

Keywords: Macrobenthos; Community structure; Seasonal variation; Environmental factor; Pearl River Estuary

海洋大型底栖动物是指生活周期的全部或大部分时间栖息在水体底部的水生动物群。大多栖息固着于岩石等牢固基体上,或是深埋于泥质、沙质等松软的底质中,具有区域性强、迁移能力弱等特点,对栖息环境的变化回避性弱^[1]。大型底栖动物群落类群主要由环节动物、软体动物和棘皮动物等大型无脊椎动物组成^[2]。河口生态系统物质循环的稳定性离不开大型底栖动物的参与,相关研究表明大型底栖动物通过生物沉降等活动在底层耦合及化学循环过程等方面发挥了重要作用^[3]。此外,大型底栖动物分布广、食性杂,能够摄取水域中的有机碎屑、无机颗粒物等,从而有效降低水体富营养化水平,净化了水体环境,在水域环境健康状况评价上发挥了重要作用^[4]。

珠江口作为珠江入海口,被称为广东最大的出海口,与黄河口、长江口并誉为中国的三大河口,在我国河口生态系统中占据重要地位^[5]。珠江口具有得天独厚的河口自然资源,水网分布密集,包含了河口、红树林等多种生态栖息环境,物种多样性丰富,生态环境容量大,是粤港澳大湾区规划发展的海上生态健康屏障,同时也是进行地球科学和生态学综合研究的重点区域^[6]。近年来陆续对珠江口大型底栖动物群落开展了一系列研究^[7-8],但有关珠江口大型底栖动物群落结构季节性变化特征及其与环境因子相关性的调查仍较少。本文探究了珠江口大型底栖动物群落的季节性差异,并揭示其季节演变规律,以为维护珠江口生态系统的稳定以及为其他栖息生物对河口自然资源的利用提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 研究区域

分别于 2019 年 12 月 (冬季)、2020 年 8 月 (夏季)、2021 年 3 月 (春季) 和 10 月 (秋季) 在珠江口海域进行了 4 个航次的大型底栖动物生态学调查。共设置了 20 个大面调查站点 (图 1, 表 1), 由于时



审图号: GS 粤 (2023) 1090 号

图1 珠江口大型底栖动物采样站位图

注: 因 C2 站点靠近岸边, 选择在涨潮期进行监测。

Fig. 1 Sampling stations of macrobenthos in Pearl River Estuary
Note: C2 station is close to the shore, so the monitoring was carried out during the high tide period.

表1 珠江口大型底栖动物各季节的调查站位
Table 1 Sampling stations of macrobenthos in Pearl River Estuary in different seasons

季节 Season	调查站位 Sampling station
春季 Spring	A1、A2、A4、A6、A9、A10、A11、A12、A13、A14、A15
夏季 Summer	A1、A2、A4、A6、A7、A9、A10、A11、A12、A13、A14、A15、A17
秋季 Autumn	A1、A2、A4、A6、A9、A10、A11、A12、A13、A14、A15、A17
冬季 Winter	A1、A2、A4、A6、A8、A10、A11、B2、B6、C1、C2、C5

间安排、天气条件和技术等问题，少数站位 (A17、B2、B6、C1、C2、C5) 未能进行连续采样。

1.2 大型底栖动物采集

用 0.1 m² 的彼得森采泥器在同一站点进行 2 次重复采集，过 60 目的筛网^[9]。两次采样所得样品作为一个数据，将采集的所有样品用 75% (体积分数) 的乙醇固定后带回实验室，对样品进行种类鉴定、计数和称质量 (0.001 g 天平)，将采集个体的数量与质量除以对应采样面积即可得到各个大型底栖动物的栖息密度与生物量^[10-11]。

1.3 环境参数的测定

水温、溶解氧 (Dissolved oxygen, DO)、pH 和化学需氧量 (Chemical oxygen demand, COD) 等环境因子由便携式水质分析仪进行现场检测，用容积为 5 L 的有机玻璃采水器采集海域水样，水深 < 5 m 仅采集表层 (表下 0.5 m) 的水样；当水深介于 5~25 m 时，分为表层和底层，底层距离海底 2 m。活性磷酸盐 (PO₄³⁻) 等指标根据《海洋监测规范》(GB 17378—2007 和 GB 17378.4—2007) 测定。

1.4 数据分析

大型底栖动物群落的 Peilou 均匀度指数 (*J'*)、Margalef 丰富度指数 (*D*) 和 Shannon-Wiener 多样性指数 (*H'*) 的计算公式为：

$$D = \frac{S - 1}{\ln N} \tag{1}$$

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i \tag{2}$$

$$J' = \frac{H'}{\ln S} \tag{3}$$

式中：*S* 为所采大型底栖动物的总种类数；*N* 为大型底栖动物总数量；*P_i* 为第 *i* 种物种个体数量占获得大型底栖动物数量总和的比例。

将大型底栖动物的优势度指数作为优势种的判断依据，计算公式为：

$$Y = f_i \times p_i \tag{4}$$

式中：*Y* 为优势度；*f_i* 表示第 *i* 种在调查点中出现

的频率；*p_i* 为第 *i* 种在大型底栖动物总数量中的比例。若 *Y* > 0.02，即将该物种认定为优势种^[12]。

运用 SPSS 22.0 软件分别进行珠江口海域 4 个季节大型底栖动物群落多样性的单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和大型底栖动物的群落多样性指数、丰富度指数等与环境因子的 Pearson 相关性分析。运用 PRIMER 6.0 软件对大型底栖动物群落结构进行聚类分析。

2 结果

2.1 大型底栖动物物种组成和季节性差异

对珠江口水域大型底栖动物开展 4 个航次调查，共采集到大型底栖动物 138 种，隶属于 9 门。各类群大型底栖动物物种组成以软体动物种数最多，环节动物次之，刺胞动物和蠕虫动物在本次调查中的种数最少 (表 2)。

大型底栖动物群落在各季节呈现的种类组成各不相同。春季种类最多，夏季最少，仅为春季的一半多。春、夏和秋季均以环节动物出现频率最高，其次为软体动物、节肢动物等，而刺胞动物和星虫动物仅在个别季节中出现。

2.2 优势种

由表 3 可知，4 个航次采集获得的大型底栖动物中共发现 6 种优势种。其中，春季珠江口海域有 2 种优势种，为光滑河篮蛤 (*Potamocorbula laevis*) 和光滑倍棘蛇尾 (*Amphiopholis laevis*)，分别属于软体动物和棘皮动物；夏季珠江口海域有 3 种优势种，为裸盲蟹 (*Typhlocarcinus nudus* Stimpson)、光滑倍棘蛇尾和角海蛹 (*Ophelina acuminata* Oersted)，分别属于节肢动物、棘皮动物和环节动物；秋季有 2 种优势种，为背蚓虫 (*Notomastus latericeus*) 和光滑倍棘蛇尾，分别属于环节动物和棘皮动物；冬季优势种仅有短角双眼钩虾 (*Ampe-lisca brevicornis*)。优势物种的季节性类群差异性较

表2 珠江口大型底栖动物各类群组成的季节分布
Table 2 Seasonal distribution of group composition of macrobenthos in Pearl River Estuary

类群 Group	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn		冬季 winter	
	种数 Number of species	比例 Percentage/%	种数 Number of species	比例 Percentage/%	种数 Number of species	比例 Percentage/%	种数 Number of species	比例 Percentage/%
刺胞动物 Cnidaria	0	0	0	0	0	0	1	3.22
环节动物 Annelida	20	44.44	9	39.13	15	53.57	7	22.58
棘皮动物 Echinodermata	2	4.44	1	4.34	2	7.14	1	3.22
脊索动物 Chordata	0	0	1	4.34	1	3.57	2	6.45
节肢动物 Arthropoda	6	13.33	6	26.08	7	25	5	16.12
纽形动物 Nemertinea	1	2.22	1	4.34	0	0	1	3.22
软体动物 Mollusca	14	31.11	5	21.73	2	7.14	12	38.70
星虫动物 Sipuncula	1	2.22	0	0	0	0	1	3.22
蠕虫动物 Echiurida	1	2.22	0	0	1	3.57	1	3.22
合计 Total	45	100.00	23	100.00	28	100.00	31	100.00

表3 珠江口大型底栖动物优势种及优势度分布
Table 3 Distribution of dominant species and dominance of macrobenthos in Pearl River Estuary

季节 Season	优势种 Dominant species	优势度 Dominance index	栖息密度 Density/(个·m ⁻²)	生物量 Biomass/(g·m ⁻²)
春季 Spring	光滑河篮蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>	0.03	190	11.15
	光滑倍棘蛇尾 <i>Amphiopholis laevis</i>	0.02	30	2.96
夏季 Summer	裸盲蟹 <i>Typhlocarcinus nudus</i>	0.11	65	19.75
	光滑倍棘蛇尾 <i>Amphioplus laevis</i>	0.05	40	10.65
	角海蛭 <i>Ophelina acuminata</i>	0.04	50	6.15
秋季 Autumn	背蚓虫 <i>Notomastus latericeus</i>	0.02	60	2.72
	光滑倍棘蛇尾 <i>Amphiopholis laevis</i>	0.02	30	1.71
冬季 Winter	短角双眼钩虾 <i>Ampelisca brevicornis</i>	0.03	45	2.4

大，棘皮动物为珠江口海域调查的主要优势类群。光滑倍棘蛇尾为春、夏和秋三季共有优势种，其优势度在夏季达到最高值 (0.05)，在各个季节优势地位明显 (表 1)。

2.3 生物量和栖息密度

珠江口海域大型底栖动物的栖息密度与生物量的季节变化如图 2 所示，栖息密度平均值在春季最高 (590 个·m⁻²)，冬季次之 (510 个·m⁻²)，秋季为 455 个·m⁻²，夏季最低 (375 个·m⁻²)。珠江口水域大型底栖动物生物量的平均值在冬季最高 (263.9 g·m⁻²)，其次为春季 (139.88 g·m⁻²)，夏季为 72.55 g·m⁻²，秋季最低 (56.46 g·m⁻²)。

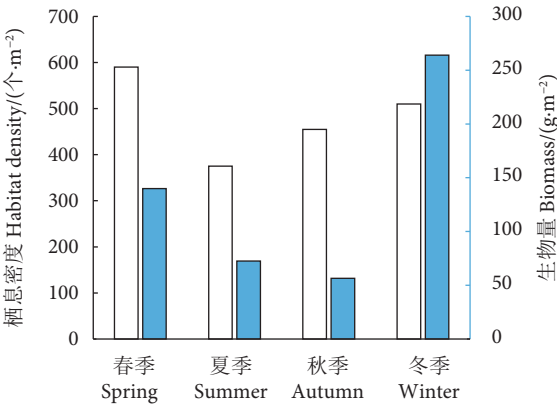


图2 珠江口大型底栖动物栖息密度和生物量的季节变化
Fig. 2 Seasonal variation of total habitat density and total biomass of macrobenthos in Pearl River Estuary

对四季不同类群大型底栖动物的生物量与栖息密度进行统计分析, 结果如表 4 所示。环节动物的栖息密度在秋季达到最高值 (300 个·m⁻²), 生物量在夏季达到最高值 (14.2 g·m⁻²); 棘皮动物的栖息密度在春季达到最高值 (70 个·m⁻²), 生物量在夏季达到最高值 (31.26 g·m⁻²); 软体动物的栖息密度和生物量的最高值均出现在春季, 分别为 190 个·m⁻² 和 83.56 g·m⁻²。其他大型底栖动物类群的栖息密

度和生物量最高值均出现在冬季, 分别为 195 个·m⁻² 和 158.25 g·m⁻²。各季节环节动物的栖息密度始终处于较高水平, 生物量处于较高水平的物种则为软体动物。

对珠江口大型底栖动物四季的栖息密度进行聚类分析, 结果如图 3 所示。春季, A6 与 A12 站位, A1 与 A13 站位, A2 与 A4 站位间的相似度高; A6、A12 站位同其他站位间的相似度较低。

表4 珠江口大型底栖动物主要类群栖息密度和生物量季节变化

Table 4 Seasonal variation of habitat density and biomass of main groups of macrozoobenthos in Pearl River Estuary

类群 Group	项目 Item	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
环节动物 Annelids	栖息密度 Density/(个·m ⁻²)	265	175	300	95
	生物量 Biomass/(g·m ⁻²)	8.35	14.20	8.43	5.85
棘皮动物 Echinodermata	栖息密度 Density/(个·m ⁻²)	70	40	45	10
	生物量 Biomass/(g·m ⁻²)	5.08	10.65	31.26	1.95
节肢动物 Arthropoda	栖息密度 Density/(个·m ⁻²)	45	110	80	105
	生物量 Biomass/(g·m ⁻²)	36.90	36.75	9.52	22.05
软体动物 Mollusca	栖息密度 Density/(个·m ⁻²)	190	30	20	105
	生物量 Biomass/(g·m ⁻²)	83.56	9.50	6.88	75.80
其他类群 Others	栖息密度 Density/(个·m ⁻²)	30	20	10	195
	生物量 Biomass/(g·m ⁻²)	6.02	2.00	0.35	158.25

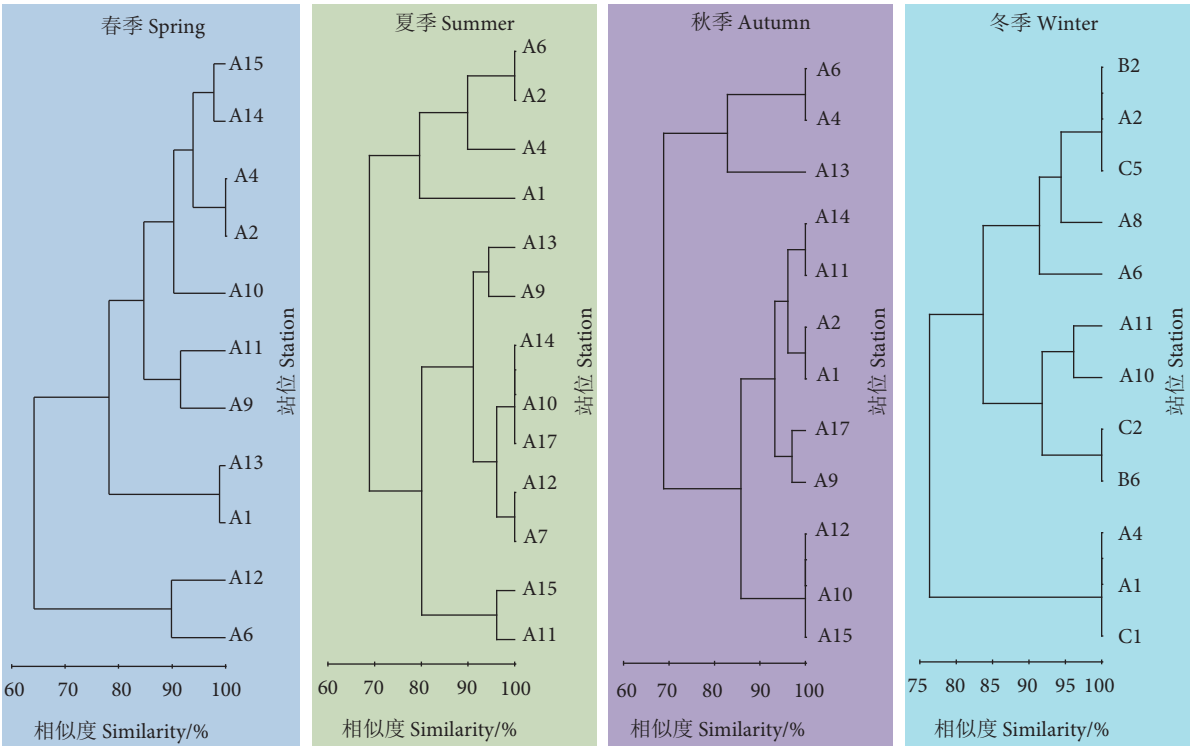


图3 珠江口大型底栖动物四季的栖息密度聚类分析

Fig. 3 Cluster analysis of habitat density of macrobenthos in Pearl River Estuary in four seasons

夏季, A7 与 A12 站位, A17、A10 与 A14 站位, A2 与 A6 站位间的相似度较高, 而 A1 与 A4 站位、A2 与 A6 站位, 同其他调查站位之间的相似度较低。秋季, A15、A10 与 A12 站位, A1 与 A2 站位, A11 与 A14 站位, A4 与 A6 站位间的相似度较高; A13 站位除了与 A4、A6 站位间的相似度较高外, 与其他站位的相似度均较低。冬季, C1、A1 与 A4 站位, B6 与 C2 站位, A10 与 A11 站位,

C5、A2 与 B2 站位间的相似度较高。

2.4 大型底栖动物多样性季节变化

珠江口海域大型底栖动物各季节 H' 、 J' 和 D 结果如表 5 所示。 H' 和 J' 的最大值均出现在冬季, 分别为 1.66 ± 0.15 和 0.97 ± 0.03 ; D 最大值出现在春季 (2.36 ± 0.83)。春季 J' 最低 (0.18 ± 0.07), 而秋季 H' 最低 (0.29 ± 0.16)。

表5 珠江口大型底栖动物多样性指数季节分布
Table 5 Seasonal distribution of macrobenthos diversity index in Pearl River Estuary

季节 Season	Margalef 丰富度指数 D	Shannon-Wiener 多样性指数 H'	Pielou 均匀度指数 J'
春季 Spring	2.36 ± 0.83^a	0.34 ± 0.21^a	0.18 ± 0.07^a
夏季 Summer	1.56 ± 0.87^b	1.62 ± 0.90^b	0.80 ± 0.34^b
秋季 Autumn	1.51 ± 0.82^b	0.29 ± 0.16^a	0.21 ± 0.08^a
冬季 Winter	1.47 ± 0.81^b	1.66 ± 0.15^a	0.97 ± 0.03^a

注: 同列不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different letters within the same column indicate significant differences ($P<0.05$).

2.5 大型底栖动物群落与环境因子的相关性

各季节全部调查采样点的多样性指数 (H' 、 D 和 J') 与环境因子的 Pearson 相关性分析结果显示, 大型底栖动物 H' 与 pH 呈极显著正相关性 ($P<0.01$), 与盐度则呈显著正相关性, 同 COD 呈极显著负相关性 ($P<0.01$), 与 PO_4^{3-} 呈显著正相关性。 J' 与 pH、 PO_4^{3-} 呈极显著正相关性, 和 COD 呈极显著负相关性, 与悬浮物呈显著正相关性 ($P<0.05$); D 与温度和 PO_4^{3-} 呈显著负相关性, 与盐度

呈极显著正相关性 (表 6)。

3 讨论

3.1 珠江口大型底栖动物群落结构的变化特征

将本研究 4 个航次大型底栖动物的调查结果同珠江口及周边海域的历史数据进行比较, 结果见表 7。可以看出, 本研究中大型底栖动物的物种数为 2008 年以来的最高值, 可能是由于本次调查频次相较之前增加, 故所获大型底栖动物的物种数增

表6 珠江口大型底栖动物物种多样性指数与环境因子间的相关性
Table 6 Correlation analysis of macrozoobenthos diversity index and environmental factors in Pearl River Estuary

指数 Index	温度 Tem- perature	溶解氧 DO	pH	盐度 Salinity	Shannon-Wiener 多样性指数 H'	化学需氧量 COD	Peilou 均匀度指数 J'	Margalef 丰富度指数 D	磷酸盐 PO_4^{3-}
溶解氧 DO	-0.621**								
pH	-0.693**	0.596**							
盐度 Salinity	-0.247	0.157	0.302*						
Shannon-Wiener 多样性指数 H'	-0.093	-0.060	0.468**	0.344*					
化学需氧量 COD	-0.297*	0.170	-0.307*	-0.044	-0.464**				
Peilou 均匀度指数 J'	-0.139	0.043	0.585**	0.174	0.866**	-0.538**			
Margalef 丰富度指数 D	-0.332*	0.026	0.125	0.527**	0.336*	0.345*	0.115		
磷酸盐 PO_4^{3-}	0.206	-0.253	0.272	-0.301*	0.526**	-0.515**	0.687**	-0.294*	
悬浮颗粒物 SS	0.032	-0.226	0.249	-0.365*	0.197	-0.346*	0.287*	-0.193	0.536**

注: *. $P<0.05$; **. $P<0.01$ 。

表7 本次调查与周边海域的比较
Table 7 Comparison of results from this investigation and surrounding waters

调查区域 Survey area	调查时间 Survey time	种数 Number of Species	栖息密度 Density/(个·m ⁻²)	生物量 Biomass/(g·m ⁻²)	来源 Source
珠江口海域 Pearl River Estuary	1980 年		228	26.1	[13]
珠江口海域 Pearl River Estuary	1991 年		96.6	26.99	[14]
珠江口伶仃水道 Lingding Waterway	1996 年	27	55	19.95	[15]
珠江口海域 Pearl River Estuary	1998 年		97	20.48	[16]
珠江口海域 Pearl River Estuary	1999—2000 年	32	338.35	10.05	[17]
珠江口海域 Pearl River Estuary	2004 年	223	1 435.16	314.37	[14]
珠江口海域 Pearl River Estuary	2005 年	240	160.75	76.26	[14]
珠江口海域 Pearl River Estuary	2006 年	156	627.85	14.57	[18]
珠江口海域 Pearl River Estuary	2007 年	248	288.9	33.73	[14]
北部珠江口 North Pearl River Estuary	2006—2007 年	225.67	593.4	9.16	[8]
珠江口横琴岛海域 Hengqin Island	2008 年	33	236.3	13.25	[19]
珠江口滩涂 Pearl River Estuary mudflat	2009 年	40			[20]
珠江口潮间带东南部 Southeast intertidal zone of Pearl River Estuary	2014 年	52	269.3	129.61	[21]
珠江八大出海口 Eight outlets of Pearl River	2015 年	67	336.5	21.26	[22]
珠江口海域 Pearl River Estuary	2019—2021 年	138	482.5	133.19	本研究
大亚湾海域 Daya Bay	1984—1985 年	98			[23]
大亚湾海域 Daya Bay	2004 年	79			[24]
大亚湾海域 Daya Bay	1988—2015 年		155~621	4.95~17.25	[25]
大亚湾海域 Daya Bay	2013 年	153	410	84.83	[25]

多；但与 2004—2007 年相比，物种数却处于较低值，这可能是由于近年来珠江口海域出现了季节性的底层海水大范围缺氧现象^[26]，使得该海域大型底栖动物的生境被破坏，导致其种类和数量直线下降。而 2010 年以后，随着环境生态保护措施投入的增加和海水污染源的监控，珠江口海域 DO 处于相对稳定水平，因此大幅提高了大型底栖动物的生境稳定性^[27]。

在丰度和生物量方面，本研究的平均栖息密度为 2008 年调查以来的最高值，大型底栖动物生物量也处于上升趋势。这可能是由于各航次采样调查点位于珠江口不同海域，大型底栖动物的栖息环境不同，本次调查点位于珠江口的外部海域，而 2015 年的调查点主要位于珠江口八大入海口区域内。此外，两次大型底栖动物调查使用不同孔径底层筛^[28]，也可能导致密度与生物量存在一定差异。而同时时间段的大亚湾海域调查结果显示大型底栖动物的栖息密度和生物量呈下降趋势^[25]。这可

能是由于 2015 年后调查主要位于大亚湾西北部区域，该片区紧邻大亚湾工业集中区，相对湾口受人类干扰的影响更显著。近年来陆续开展的航道疏浚工程和填海工程产生的大颗粒悬浮物对大亚湾西北片区海域造成了严重污染^[23-24]，对大型底栖动物的生存环境造成较大影响，破坏了其生理过程的稳定性。同时随着环境污染加重，水体富营养化使得该海域赤潮现象频发，致使 DO 浓度降低，大型底栖动物的饵料来源减少，从而导致大型底栖动物栖息密度和生物量降低^[29]。

本次调查结果显示，软体动物为各类群中对生物量贡献最大的种类，主要优势种为光滑河篮蛤、波纹巴非蛤 (*Paratapes undulatus*) 和菲律宾蛤仔 (*Ruditapes philippinarum*) 等。这些双壳贝类数量庞大^[30]，以群居为主，主要栖居在近岸泥沙混合底质^[31]。有研究表明光滑河篮蛤是珠江口春、秋季的优势种且高值区在春季^[32-33]，而本研究结果显示光滑河篮蛤在夏季的优势度远高于春、秋两季，这

可能由不同调查区域降雨量差异所致。本次调查中夏季降雨量较以往增加,导致海水盐度降低,海水盐度稳定在 5‰~25‰,促进了光滑河篮蛤的繁殖与生长,从而使其的夏季出现频率高于春季^[34]。

本研究中珠江口大型底栖动物春季的均匀度指数和多样性指数均低于夏、秋季,与田伟等^[34]对椒江口的调查结果一致。春季珠江口大型底栖动物调查期间处于枯水期,富营养化水平较高^[35]。在沉积物有机质含量较高、沉积环境不稳定的条件下,调查海域的生态环境处于亚健康状态。随之而来的水体富营养化造成季节性缺氧现象发生,影响了大型底栖动物的生理过程,从而使大型底栖动物种数剧减、多样性降低^[36]。因此,珠江口沉积物中高含量的有机质可能是造成该海域大型底栖动物多样性较低的重要原因之一^[37]。

3.2 珠江口环境状况对大型底栖动物分布的影响

根据本研究中大型底栖动物群落多样性与环境因子的相关性结果,盐度是影响其群落多样性变化的关键因素。已有研究发现,盐度梯度性变化是河口海域的重要特征之一^[38]。河口生态系统处于动态变化过程中,盐度是影响河口生物分布的主要限制因素之一,且盐度介于 30‰~34‰的大型底栖动物群落的物种多样性较高;若盐度介于 5‰~15‰,则会出现大型底栖动物群落种类较少、丰富度较低的现象。本文研究区域的盐度主要介于 25‰~35‰,相较于以往调查区域处于较高水平,因而大型底栖动物物种数相对较多,多样性较为丰富。

大型底栖动物群落结构与环境因子的分析结果显示,悬浮物对大型底栖动物群落的丰富度指数也产生了一定影响。秦蕴珊和李凡^[39]的调查表明,海水中悬浮物含量与颗粒大小会影响海水透明度,当悬浮物含量处于较低水平时,海水透明度呈现较高值^[40]。海水中的悬浮物大多要沉降到海底,当悬浮物含量较高、颗粒较大时,下沉速度处于较慢水平,则会影响光在海水中的传播。这对海域中浮游植物群落的光合作用会产生干扰,阻碍其繁殖与生长,导致海水生态系统的初级生产效率降低、浮游植物群落丰富度下降,无法为大型底栖动物提供充足饵料,进而使其群落物种数、生物量和群落多样性降低。但本研究中 Pearson 相关性分析显示,大型底栖动物多样性指数与悬浮物含量之间未表现出相关性 ($P>0.05$),可能是近年来珠江口海域大型

底栖动物群落的栖息环境发生了一些变化,多种复杂的生态环境和底质变化,掩盖了悬浮物含量对大型底栖动物多样性的影响。

本研究还发现,温度与大型底栖动物丰富度指数之间存在显著相关性,河口区的温度在一定程度上影响着底栖生物的定着、栖息和活动。张景平等^[24]研究表明,温度与大型底栖动物群落多样性具有显著相关性,本研究调查的结果与其一致。在一定范围内,适当提升温度能够促进大型底栖动物的繁殖和发育,提高其群落生产力。在盐度、磷酸盐、pH 等环境要素保持适宜的前提下,摇蚊幼虫 (*Chironomus riparius*) 在春夏季温暖的栖息环境下表现为较高的丰富度,而在冬季发育缓慢,生物量较低。若温度临界值超过其适应性范围,则会破坏其生长环境的平衡性,导致其大量死亡^[41]。

珠江口大型底栖动物群落的栖息环境在近 20 年发生了一定变化,多种影响因子间相互作用使得本次调查与以往研究调查的大型底栖动物在物种数、生物量等方面存在一定差异性,这说明了大型底栖动物采样调查中影响因子的波动性和偶然性。

4 小结

1) 4 个季节采样调查所获的大型底栖动物共计 138 种,其中软体动物的种类最多 (50 种)。春季出现的大型底栖动物种数丰富度高于夏、秋、冬三季,夏季的物种数最少,仅为春季的一半多。各季节的优势种组成差异较大,然而,光滑倍棘蛇尾是珠江口海域的主要优势种,为春、夏、秋三季的共有优势种。

2) 4 个航次调查的大型底栖动物的栖息密度平均值在春季最高 ($590 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}$)。就类群组成而言,秋季环节动物的栖息密度平均值为 $300 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}$ 。大型底栖动物 4 个季节生物量的平均值为 $532.79 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,季节性差异大,最高值出现在冬季,秋季最低。

3) 从大型底栖动物多样性与环境因子的相关性分析来看,多样性指数、丰富度指数和均匀度指数受多种因子的共同作用,本研究海域的盐度处于适宜生物群落栖息的范围内 (25‰~35‰),故而大型底栖动物的群落丰富度较高、种类数较多,同时海水中悬浮物颗粒含量与大小也会影响大型底栖动物栖息环境的平衡。需进一步加强水域环境的健康监测,提高大型底栖动物群落生态系统的稳定性。

参考文献:

- [1] 马骏, 付荣恕. 大型底栖动物生态学研究进展 [J]. 山东农业科学, 2010(2): 78-81.
- [2] 杨湘君, 崔雯瑶, 张蒙生, 等. 胶州湾大型底栖动物生态学初步研究 [J]. 海洋科学进展, 2021, 39(1): 89-101.
- [3] WANG Q X, SONG L, AGUSTI S, et al. Changes of the macrobenthos community with non-native mangrove rehabilitation (*Kandelia obovata*) and salt marsh invasion (*Spartina alterniflora*) in Ximen Island, Zhejiang, China[J]. Ocean Sci J, 2021, 56(4): 395-405.
- [4] KOSARI S, NADUSHAN R M, FATEMI M R, et al. Macrobenthos as bioindicator of ecological status in the Yekshabe Creek-estuary, Persian Gulf[J]. Iranian J Fish Sci, 2021, 20(2): 514-528.
- [5] 张晓浩, 黄华梅, 王平, 等. 1973—2015 年珠江口海域岸线和围填海变化分析 [J]. 海洋湖沼通报, 2016(5): 9-15.
- [6] 王丽荣, 赵焕庭. 中国河口湿地的一般特点 [J]. 海洋通报, 2000(5): 47-54.
- [7] GAUDENCIO M J, CABRAL H N. Trophic structure of macrobenthos in the Tagus estuary and adjacent coastal shelf[J]. Hydrobiologia, 2007, 587(1): 241-251.
- [8] 周细平, 李贞, 吴培芳, 等. 珠江河口区大型底栖动物群落结构 [J]. 生物多样性, 2019, 27(10): 1112-1121.
- [9] 蓝虹, 黄央央, 郑崇荣, 等. 2009—2012 年泉州湾大型底栖生物多样性研究 [J]. 海洋开发与管理, 2018, 35(5): 87-92.
- [10] 田胜艳, 张文亮, 于子山, 等. 胶州湾大型底栖动物的丰度、生物量和生产量研究 [J]. 海洋科学, 2010, 34(6): 81-87.
- [11] 吴振斌, 贺锋, 付贵萍, 等. 深圳湾浮游生物和底栖动物现状调查研究 [J]. 海洋科学, 2002(8): 58-64.
- [12] LOBON-CERVIA J, REZENDE C F, CASTELLANOS C. High species diversity and low density typify drift and benthos composition in neotropical streams[J]. Fundamental Appl Limnol, 2012, 181(2): 129-142.
- [13] 贾海波, 胡颖琰, 唐静亮, 等. 南黄海大型底栖动物生态调查与研究 [J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(6): 842-849.
- [14] 毛婕昕, 闫启仑, 王立俊. 典型河口底栖动物种类数、生物量及种群密度变化趋势的研究 [J]. 海洋环境科学, 2011, 30(1): 37-40.
- [15] 刘玉, 李适宇, 吴仁海, 等. 珠江口伶仃水道浮游生物及底栖动物群落特征分析 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2001(S4): 114-118.
- [16] 林凤梅, 白福臣. 南海海洋生态安全及渔业可持续发展研究 [J]. 渔业现代化, 2014, 41(6): 58-62.
- [17] 黄洪辉, 林燕棠, 李纯厚, 等. 珠江口底栖动物生态学研究 [J]. 生态学报, 2002(4): 603-607.
- [18] 张敬怀, 高阳, 方宏达, 等. 珠江口大型底栖动物群落生态特征 [J]. 生态学报, 2009, 29(6): 2989-2999.
- [19] 黄道建, 杜飞雁, 吴文成. 珠江口横琴岛海域春季大型底栖动物调查分析 [J]. 生态科学, 2011, 30(2): 117-121.
- [20] 黄少峰, 刘玉, 李策, 等. 珠江口滩涂围垦对大型底栖动物群落的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(4): 499-503.
- [21] 沈月含, 丁森, 王慧, 等. 滦河秋季大型底栖动物群落结构空间格局与关键环境影响因子识别 [J]. 环境科学研究院, 2020, 33(10): 2298-2307.
- [22] 彭松耀, 赖子尼, 麦永湛. 珠江口大型底栖动物群落及沉积物生态毒理效应指示种筛选 [J]. 海洋渔业, 2020, 42(5): 571-584.
- [23] 朱文涛, 秦传新, 段丁毓, 等. 大亚湾典型珊瑚礁区域冬春季底栖动物分布研究 [J]. 海洋渔业, 2020, 42(2): 170-182.
- [24] 刘开珍, 杜飞雁, 李亚芳, 等. 大亚湾大型底栖动物近 30 年次级生产力变化特征 [J]. 南方水产科学, 2018, 14(2): 1-9.
- [25] 袁涛萍, 李恒翔, 李路, 等. 夏季大亚湾大型底栖动物群落结构 [J]. 热带海洋学报, 2017, 36(1): 41-47.
- [26] 谢群, 施玉珍, 张际标, 等. 珠江口海域春季富营养化现状与影响分析 [J]. 应用海洋学学报, 2017, 36(3): 356-364.
- [27] FAN Y J, ZHENG K, ZHU Z W, et al. Distribution, sedimentary record, and persistence of microplastics in the Pearl River catchment, China[J]. Environ Pollut, 2019, 251(2): 862-870.
- [28] DOU P, CUI B S, XIE T, et al. Macrobenthos diversity response to hydrological connectivity gradient[J]. Wetlands, 2016, 36(1): S45-S55.
- [29] 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物种组成和季节变化特征 [J]. 应用海洋学学报, 2015, 34(1): 124-132.
- [30] WANG M, CHENG W, REN J H, et al. Intelligent distribution characteristic analysis of heavy metals in reservoir sediments[J]. Cluster Comput-J Networks Software Tools Applications, 2019, 22(1): 2285-2292.
- [31] 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.
- [32] 罗艳, 林丽华, 张翠萍, 等. 珠海横琴岛海域大型底栖动物的生态特征 [J]. 海洋湖沼通报, 2017(5): 69-79.
- [33] 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.
- [34] 田伟, 徐兆礼, 周进, 等. 椒江口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), 2013, 52(2): 271-277.
- [35] 张景平, 黄小平, 江志坚, 等. 2006—2007 年珠江口富营养化水平的季节性变化及其与环境因子的关系 [J]. 海洋学报 (中文版), 2009, 31(3): 113-120.
- [36] 赵春宇, 谭烨辉, 柯志新, 等. 珠江口赤潮爆发过程中水体及表层沉积物间隙水中营养盐与叶绿素的变化特征 [J]. 海洋通报, 2016, 35(4): 457-466.
- [37] VEAS R, HERNANDEZ-MIRANDA E, QUINONES R A, et al. Spatio-temporal biodiversity of soft bottom macrofaunal assemblages in shallow coastal waters exposed to episodic hypoxic events[J]. Mar Environ Res, 2012, 78: 1-14.
- [38] 龙诗颖, 修玉娇, 李瑶, 等. 黄河三角洲水质对底栖动物群落结构的影响 [J]. 环境科学学报, 2022, 42(1): 104-110.
- [39] 秦蕴珊, 李凡. 渤海海水中悬浮体的研究 [J]. 海洋学报 (中文版), 1982(2): 191-200.
- [40] 胡忠军, 史先鹤, 吴昊, 等. 上海青草沙水库食物网结构特征分析 [J]. 水生态学杂志, 2019, 40(2): 47-54.
- [41] 陈晨, 杨湘君, 崔雯瑶, 等. 胶州湾大型底栖动物群落的年次级生产力及其影响因素的研究 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2021, 51(9): 45-56.