

DOI: 10.20103/j.stxb.202407231733

曾圣, 杨德援, 杨盛昌, 蔡立哲, 王飞飞, 曹文志. 九龙江河口大型底栖动物多样性格局及其影响因素. 生态学报, 2025, 45(12): - .
Zeng S, Yang D Y, Yang S C, Cai L Z, Wang F F, Cao W Z. Spatial patterns of macro-benthic faunal diversity and its impact factors in the Jiulongjiang Estuary. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(12): - .

九龙江河口大型底栖动物多样性格局及其影响因素

曾 圣, 杨德援, 杨盛昌, 蔡立哲, 王飞飞, 曹文志*

厦门大学滨海湿地生态系统教育部重点实验室, 厦门大学环境与生态学院, 厦门 361102

摘要: 九龙江河口位于漳州市东部海域和厦门市西部海域, 水体盐度跨度大 (1.8‰—28.2‰), 区域内航运、渔业活动频繁。于 2022 年选取九龙江口八个站位 (E1—E8) 开展了四个季度的航次调查, 以研究九龙江口水域大型底栖动物群落的分布、多样性格局及其影响因素。结果表明, 九龙江口水域大型底栖动物计有 101 个分类单元, 平均栖息密度 376.3 个/m², 平均湿重生物量 4.92 g/m², 具小型化特征。从混合区 (E1—E4) 到海水区 (E5—E8) 的共有优势种为螺赢蜆 *Corophium* sp.、中蚓虫 *Mediomastus* sp.、钩虾 *Gammarus gregoryi*。单因素方差分析 (One-way ANOVA) 结果表明, Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、Margalef 丰富度指数 (D) 以及 Pielou 均匀度指数 (J') 均在站位间变化显著。Mantel 分析显示多毛类群落受磷相关参数 (磷酸盐 PO_4^{3-} 、总颗粒态磷 TPP、总磷 TP) 和蓝绿藻生物量影响显著。Person 相关性分析显示, 大型底栖动物多样性与氮 (亚硝酸盐 NO_2^- -N、硝酸盐 NO_3^- -N、溶解无机氮 DIN)、磷 (TP、总溶解态磷 TDP、TPP) 相关参数呈负相关, 与盐度、电导率和总溶解固体 TDS 呈正相关。随机森林模型分析表明, TDP 是影响大型底栖动物多样性的关键因子。不同季节大型底栖动物群落存在显著差异。综合分析得出, 大型底栖动物多样性分布格局受盐度、氮、磷等因素共同调控, 部分站位受到扰动的原因可能与水动力条件、底质类型、工程建设相关。建议在九龙江口进行长期定点监测以深入阐明多样性格局分布的驱动因素。

关键词: 九龙江河口; 大型底栖动物; 群落结构; 多样性格局

Spatial patterns of macro-benthic faunal diversity and its impact factors in the Jiulongjiang Estuary

ZENG Sheng, YANG Deyuan, YANG Shengchang, CAI Lizhe, WANG Feifei, CAO Wenzhi*

Key Laboratory of the Ministry of Education for Coastal and Wetland Ecosystems, College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China

Abstract: The Jiulongjiang Estuary, located between the eastern coastal waters of Zhangzhou City and the western coastal waters of Xiamen City, features a broad salinity range (1.8‰—28.2‰) and is subject to frequent shipping and fishery activities. In 2022, quarterly survey were conducted at eight stations to investigate macro-benthic faunal diversity, distribution patterns, and influencing factors within this estuarine area. A total of 101 macro-benthic faunal taxa were identified, averaging a density of 376.3 ind./m² and a wet biomass of 4.92 g/m², predominantly consisting of species with small body sizes. The dominant species common across the mixing zone (E1—E4) and marine zone (E5—E8) were *Corophium* sp., *Mediomastus* sp., and *Gammarus gregoryi*. A one-way ANOVA revealed significant differences in the Shannon-Wiener diversity index (H'), Margalef richness index (D), and Pielou evenness index (J') among stations. Mantel analysis indicated that polychaete communities were significantly influenced by phosphorus-related parameters (phosphate [PO_4^{3-}], total particulate phosphorus [TPP], total phosphorus [TP]) and cyanobacteria biomass. Pearson

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFF1301301); 福建省厦门环境监测中心站环保科技项目 (2022S01)

收稿日期: 2024-07-23; 网络出版日期: 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wzcao@xmu.edu.cn

correlation analysis showed that macro-benthic faunal diversity was inversely correlated with nitrogen parameters (nitrite-N [NO_2^- -N], nitrate-N [NO_3^- -N], dissolved inorganic nitrogen [DIN]) and phosphorus parameters (TP, total dissolved phosphorus [TDP], TPP) while showing positive correlations with salinity, conductivity, and total dissolved solids (TDS). The random forest model identified TDP as the primary factor influencing macro-benthic faunal diversity. Significant seasonal differences were also observed in macro-benthic faunal community composition. Overall, the diversity patterns of macro-benthic fauna were jointly regulated by salinity, nitrogen, and phosphorus, with potential disturbances at certain stations linked to hydrodynamic conditions, substrate types, and construction activities. Long-term monitoring in the Jiulongjiang Estuary is necessary to clarify further the driving factors of macro-benthic faunal diversity patterns.

Key Words: Jiulongjiang Estuary; macro-benthic fauna; community structure; diversity patterns

底栖动物生活史的全部或部分时间生活在底内、底表或依托于水体中,是河口生态系统的重要组成部分^[1]。大型底栖无脊椎动物系指不能通过 500 μm 孔径筛网的生物类群,一般包括环节动物、软体动物和甲壳动物等^[2]。大型底栖动物具有活动能力弱、区域性明显、寿命相对较长等特点,其群落结构特征可在一定程度上反映特定区域的自然和人为扰动情况^[3]。河口是半封闭的水域,与海洋直接相连,兼具淡水和咸水特征^[4-5]。河口生态系统是世界上生产力最高的生态系统之一,也是陆地与海洋之间物质能量交换最强的地带,具有复杂的物理化学过程^[6]。河口生态系统能量流动和物质循环的维持离不开大型底栖动物的参与,研究表明大型底栖动物在水层-底栖耦合中发挥着不可替代的作用,且以节律性浮游、摄食、筑穴等活动影响水体和底质的能流^[7]。

九龙江由西溪、南溪和北溪组成,作为福建省第二大河,是流入九龙江河口和厦门湾的主要河流^[8]。九龙江河口(九龙江口)是典型的潮汐型河口,物质运输受潮汐、径流等水动力因素影响,存在频繁的航运、渔业活动^[9],沉积物环境受扰动的潜在因素较多。九龙江河口地理位置优越,水体盐度跨度大,具有红树林、盐沼、礁石等多种生态栖息环境,物种资源丰富,拥有中华白海豚、白鹭等国家保护动物^[10]。目前,有关九龙江口大型底栖动物的研究并不充分,其中,何明海等于 1980—1981 年间,对九龙江口的底栖生物进行了较为全面的调查,但仅涉及中盐水区和高盐水区^[11];朱延忠等运用 MCI(Macrozoobenthos Community Index)法对厦门湾近九龙江口的部分区域大型底栖动物群落健康状态进行了评估^[12];吴海燕等分析了不同底栖生物指数在福建近岸海域(含九龙江口部分区域)的适用性^[13];周细平等对九龙江口海门岛红树林潮间带大型底栖动物进行了调查^[14];李蓉等分析了九龙江口草埔头村和白礁村两处沿岸桐花树群落恢复对大型底栖动物的影响^[15];陈光程等研究了九龙江口浮宫和厦门海沧两处秋茄林中大型底栖动物群落受林龄变化的影响^[16]。以上研究的调查区域均局限在较小范围,本文希望能从更大的空间尺度出发,较为完整地反映九龙江河口的大型底栖动物分布特征及季节性变化,分析大型底栖动物多样性分布格局与环境因子间的关系,揭示格局形成的潜在原因,为九龙江河口自然资源的利用、区域内生物多样性保护和生态管理提供了数据支撑。

1 材料及方法

1.1 采样区域及样品处理

九龙江流域面积 $1.47 \times 10^4 \text{ km}^2$,属亚热带海洋性气候,降雨量充沛,年均降水量约 1684.4 mm,年平均径流量约 $1.49 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ^[8, 17]。流域水体处富营养化状态^[18-19]。九龙江河口位于漳州市东部海域和厦门市西部海域,北靠厦门西港,东靠厦门外港。河口区域为半日潮潮汐,流速可达 $>2 \text{ m/s}$ ^[20],河口冲洗时间约 2—3 d^[21]。

在九龙江河口设置八个大型底栖动物潮下带调查站点,分别命名为 E1、E2、E3、E4、E5、E6、E7 和 E8(图 1)。根据以往研究结果^[17],九龙江河口区域分为:河流区、混合区和海水区。本次调查站位分为两类:偏向河流的 E1、E2、E3 和 E4 站位为混合区(盐度较低且梯度变化大,冲淡水量大);靠近海湾的 E5、E6、E7 和

E8 站位系海水区(盐度较高但变化幅度较小)。

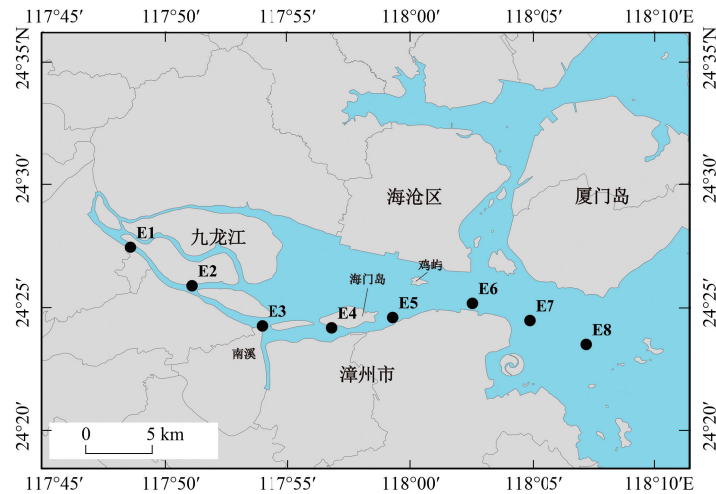


图1 九龙江口采样站位分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in Jiulongjiang Estuary

E1—8 为站位编号,其中:E1—4 站位为混合区;E5—8 站位为海水区

于2022年2月(冬季)、5月(春季)、8月(夏季)和11月(秋季)进行四个航次调查,在满潮前后,使用 0.05 m^2 ($25\text{ cm} \times 20\text{ cm}$)的抓斗式采泥器在同一站点进行4—6次重复采集(采样面积 $0.2\text{—}0.3\text{ m}^2$),用 0.5 mm 孔径的筛网进行过滤淘洗,截留的样品及残渣并在一起装入塑料采样瓶中,用95%的酒精进行固定。样品带回实验室后,使用解剖镜、显微镜进行鉴定并计数,鉴定到种、属水平,随后尽量吸干液体进行称重(湿重,精确至 0.0001 g)。生物残段按头部进行计数,软体动物带壳进行称重。样品的采集、保存和分选鉴定遵循《海洋调查规范》(GB/T 12763.6—2007)第6部分《海洋生物调查指南》、《海洋监测规范》(GB/T 17378.7—2007)第7部分《近海污染生态调查和生物监测》进行。生物种名参照《中国海洋生物名录》^[22]、《厦门湾物种多样性》^[23]进行。

使用多参数水质分析仪(YSI-EXO 2018)现场测量浊度(Tur, FNU)、盐度(Salt, ‰)、蓝绿藻(BGA, $\mu\text{g/L}$)、水温($T, ^\circ\text{C}$)、叶绿素a(Chla, $\mu\text{g/L}$)、电导率(EC, $\mu\text{S/cm}$)、酸碱度(pH)、溶解氧(DO, mg/L)、总溶解固体(TDS, mg/L)和总悬浮固体(TSS, mg/L)。使用无菌瓶采集水样并立即进行过滤处理($0.45\text{ }\mu\text{m}$ 醋酸酯滤膜),存放在 4°C 下用于后续理化指标的测定。使用全自动连续流分析仪(AA3, SEAL, Germany)对水样进行分析,以确定总氮(TN, mg/L)、总溶解氮(TDN, mg/L)、硝酸盐($\text{NO}_3^- \text{-N}$, mg/L)、亚硝酸盐($\text{NO}_2^- \text{-N}$, mg/L)、氨氮($\text{NH}_4^+ \text{-N}$, mg/L)、溶解无机氮(DIN, mg/L)、总磷(TP, mg/L)、磷酸盐(PO_4^{3-} , mg/L)、总溶解态磷(TDP, mg/L)、总颗粒态磷(TPP, mg/L)、颗粒态无机磷(PIP, mg/L)和溶解无机磷(DIP, mg/L)的浓度。水质监测与大型底栖动物采集同步进行,每个站点的水质参数测定重复三次。

1.2 数据分析

1.2.1 物种优势度计算

利用物种优势度 Y 来反映各站位的优势物种,计算公式见公式(1),当 $Y > 0.02$ 时,该物种即为优势物种^[24]。

$$Y_i = P_i \times f_i; P_i = N_i / N \quad (1)$$

式中: Y_i 为第 i 个物种的优势度; P_i 为第 i 个物种占全部物种个体数比例,其值等于 N_i / N ; f_i 为第 i 个物种在各个站位出现的频率。

1.2.2 群落多样性分析

利用Shannon-Wiener多样性指数(H')^[25]、Margalef丰富度指数(D)^[26]以及Pielou均匀度指数(J')^[27]指

示九龙江河口大型底栖动物群落结构,计算公式如下:

$$H' = \sum_{i=1}^S (P_i) (\log_2 P_i) \quad (2)$$

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

$$J' = H' / H'_{\max}; H'_{\max} = \log_2 S \quad (4)$$

1.2.3 群落结构分析

为了减少机会物种对群落结构的影响,剔除了在流域中相对丰度小于 1% 的物种,并保留了在各站位相对丰度大于 3% 的非机会物种。数据选取每个采样季度的八个站位栖息密度(剔除未检出生物站位),同时构建物种分布矩阵(未剔除物种),使用 UPGMA 方法对两个矩阵进行群落聚类。

1.2.4 受扰动情况分析

丰度生物量曲线(Abundant Biomass Comparison curve, ABC)可以对环境扰动引起的大型底栖动物群落变化做出灵敏反应^[28]。在 ABC 曲线中,x 轴为各物种依据丰度和生物量对数的重要性排序,y 轴是丰度和生物量优势度的累积百分比,若生物量曲线在丰度曲线上方,则表明群落未受扰动^[29],反之。

此外,用 W 统计量作为 ABC 曲线的具体量化^[30],当生物量优势度曲线在丰度优势度曲线上方时, W 为正,反之为负,公式如下:

$$W = \sum_{i=1}^S \frac{(B_i - A_i)}{50 \times (S - 1)} \quad (5)$$

式中: B_i 为第 i 个物种生物量累积百分比; A_i 为第 i 个物种丰度累积百分比。

1.2.5 统计分析

运用 SPSS v.25.0,以季节、站位为固定因子,对大型底栖动物的物种数(S)、栖息密度(N)、生物量(g)、 H' 、 D 和 J' 共六个参数进行单因素方差分析(One-way ANOVA),分析前运用 Kolmogorov-Smirnov 法对数据进行正态性分布检验,其中,参数 S 、 H' 、 D 、 J' 均符合正态性分布,对参数 N 、 g 进行对数转换($\log_{10} N$ 、 $\log_{10} g$),确保其符合正态分布。

运用 R 语言的“cor”函数进行九龙江口四个季节、八个站位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。使用 R 包“rfPermute”,构建随机森林模型,分析对多样性指数影响的关键环境因子。使用 R 包“linkET”进行 Mantel 检验分析大型底栖动物与环境因子(如 pH、盐度、氮、磷等)之间的关系,探究九龙江口海域三个主要类群(多毛类、甲壳类和软体动物)的栖息密度矩阵与环境因子矩阵之间的相关性,并探讨对其影响显著的环境因子。

2 结果

2.1 种类组成和优势种分布

调查期间共鉴定大型底栖动物 101 个分类单元,隶属 6 门 8 纲 23 目 68 科,其中,多毛类 55 种,占总物种数的 54.5%;甲壳类 22 种,占比 21.8%;双壳类 14 种、腹足类 3 种,分别占 13.9%、3.0%;还有刺胞动物 4 种、棘皮动物 2 种、纽形动物 1 种。物种类群组成因站位不同而存在差异,但基本上以多毛类居多,E2 站位检出大型底栖动物最少,为 3 种,E8 站位检出最多,为 46 种(附录 I)。

单因素方差分析显示,大型底栖动物的物种数在站位间差异极显著($F=4.681, P<0.01$),总体呈现出多毛类、甲壳类、刺胞动物和棘皮动物物种更多分布在海水区,软体动物和纽形动物物种分布较平均;季节间差异也极显著($F=5.516, P<0.01$),区域内冬季物种数最多(63 种),春季物种数最少(20 种)。

九龙江河口四次航次调查共在不同站位发现优势种 11 种,其中多毛类 7 种,甲壳类 3 种,双壳类 2 种,纽形动物 1 种(表 1)。各站位的优势物种优势度相差较大,其值在 0.0203—0.4698 之间,最小值为 E8 站位的辐射不倒翁虫 *Sternaspis radiata*,最大值为 E4 站位的螺赢蜚 *Corophium* sp.。在混合区和海水区共有的优势物种有螺赢蜚(六个站位)、中蚓虫 *Mediomastus* sp.(三个站位)、钩虾 *Gammarus gregoryi*(二个站位)。

表 1 九龙江口不同站位优势物种及其优势度
Table 1 Dominant species and dominance at different sites in Jiulongjiang Estuary

物种 Species	采样站位 Sampling sites							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
多毛类 Polychaeta								
溪沙蚕 <i>Namalycastis abiuma</i>	0.0257							
中蚓虫 <i>Mediomastus</i> sp.		0.0595			0.0218			0.0315
才女虫 <i>Polydora</i> sp.			0.0357					
背蚓虫 <i>Notomastus latericeus</i>			0.0238					
太平洋稚齿虫 <i>Prionospio pacifica</i>						0.1124	0.0948	
索沙蚕 <i>Lumbrineris</i> sp.							0.0259	
辐射不倒翁虫 <i>Sternaspis radiata</i>								0.0203
甲壳类 Crustacea								
钩虾 <i>Gammarus gregoryi</i>	0.1544					0.0383		
螺赢蜚 <i>Corophium</i> sp.	0.1471		0.0952	0.4698	0.3656		0.1164	0.1646
宽甲古涟虫 <i>Eucoma lata</i>								0.0305
双壳类 Bivalvia								
河蓝蛤 <i>Potamocorbula</i> sp.		0.1786	0.0357					
焦河蓝蛤 <i>Potamocorbula ustulata</i>			0.0476					
纽形动物 Nemertea								
脑纽虫 <i>Cerebratulina</i> sp.								0.0691

2.2 密度与生物量

九龙江口海域大型底栖动物栖息密度及生物量的站位、季节变化如图 2 所示。冬季的 E2、E3 站位,夏季的 E2、E4 站位以及秋季的 E1 站位未检出生物。单因素方差分析显示,大型底栖动物的栖息密度在站位间无显著差异 ($F=1.000, P>0.05$),生物量在站位间也无显著差异 ($F=1.054, P>0.05$)。一年的栖息密度高值出现在 E4 站位 (900.0 个/ m^2 , 甲壳类占优,为 852.2 个/ m^2)、E5 站位 (516.3 个/ m^2),低值在 E3 站位 (35.0 个/ m^2)、E2 站位 (10.5 个/ m^2);一年生物量高值出现在 E6 站位 (23.88 g/ m^2 , 刺胞动物占多,为 16.43 g/ m^2)、E8 站位 (5.44 g/ m^2),低值在 E3 站位 (0.58 g/ m^2)、E2 站位 (0.21 g/ m^2)。

单因素方差分析结果表明,大型底栖动物栖息密度在季节间差异显著 ($F=3.131, P<0.05$),生物量在季节间无显著差异 ($F=0.687, P>0.05$)。栖息密度平均值在冬季最高 (702.7 个/ m^2 , 甲壳类占优,为 571.0 个/ m^2),秋季次之 (140.1 个/ m^2),春季再次之 (91.3 个/ m^2),夏季最低 (62.5 个/ m^2);生物量平均值夏季最大 (11.42 g/ m^2 , 刺胞动物占多,为 10.95 g/ m^2),冬季次之 (4.24 g/ m^2),春季再次之 (2.64 g/ m^2),秋季最小 (1.37 g/ m^2)。

九龙江河口大型底栖动物栖息密度组成以甲壳类和多毛类为主,其中,甲壳类贡献较大的物种是螺赢蜚 *Corophium* sp.,在冬季的 E4、E5 站位的栖息密度分别高达 2447.0 、 1455.0 个/ m^2 ;在多毛类中贡献较大的物种为太平洋稚齿虫 *Prionospio pacifica* (秋季 E6 站位, 470.0 个/ m^2) 和中蚓虫 (冬季 E8 站位, 155 个/ m^2)。生物量组成类群中较突出的为甲壳类、刺胞动物和棘皮动物,其中,甲壳类占优物种仍为螺赢蜚 (冬季 E4 站位, 8.86 g/ m^2),刺胞动物主要为太平洋侧花海葵 *Anthopleura nigrescens* (夏季 E6 站位, 64.97 g/ m^2),棘皮动物主要为棘刺锚参 *Protankyra bidentata* (夏季 E6 站位, 19.71 g/ m^2)。

2.3 多样性指数

H' 和 D 的最大值均出现在 E8 站位,分别为 4.46 和 4.38 , J' 的最高值出现在 E3 站位,为 0.93 ; E4 站位的 H' 和 J' 最小,分别为 0.50 和 0.13 , E2 站位的 D 值最低,为 0.46 (图 3)。

单因素方差分析显示,大型底栖动物的 Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 在站位间差异极显著 ($F=4.814, P<0.01$),季节间无显著差异 ($F=0.369, P>0.05$); Margalef 丰富度指数 (D) 在站位间差异极显著 ($F=5.171,$

$P<0.01$), 季节间差异显著 ($F=3.888, P<0.05$); Pielou 均匀度指数 (J') 在站位间差异显著 ($F=3.555, P<0.05$), 季节间无显著差异 ($F=0.376, P>0.05$)。三个多样性指数在站位间均存在显著差异。

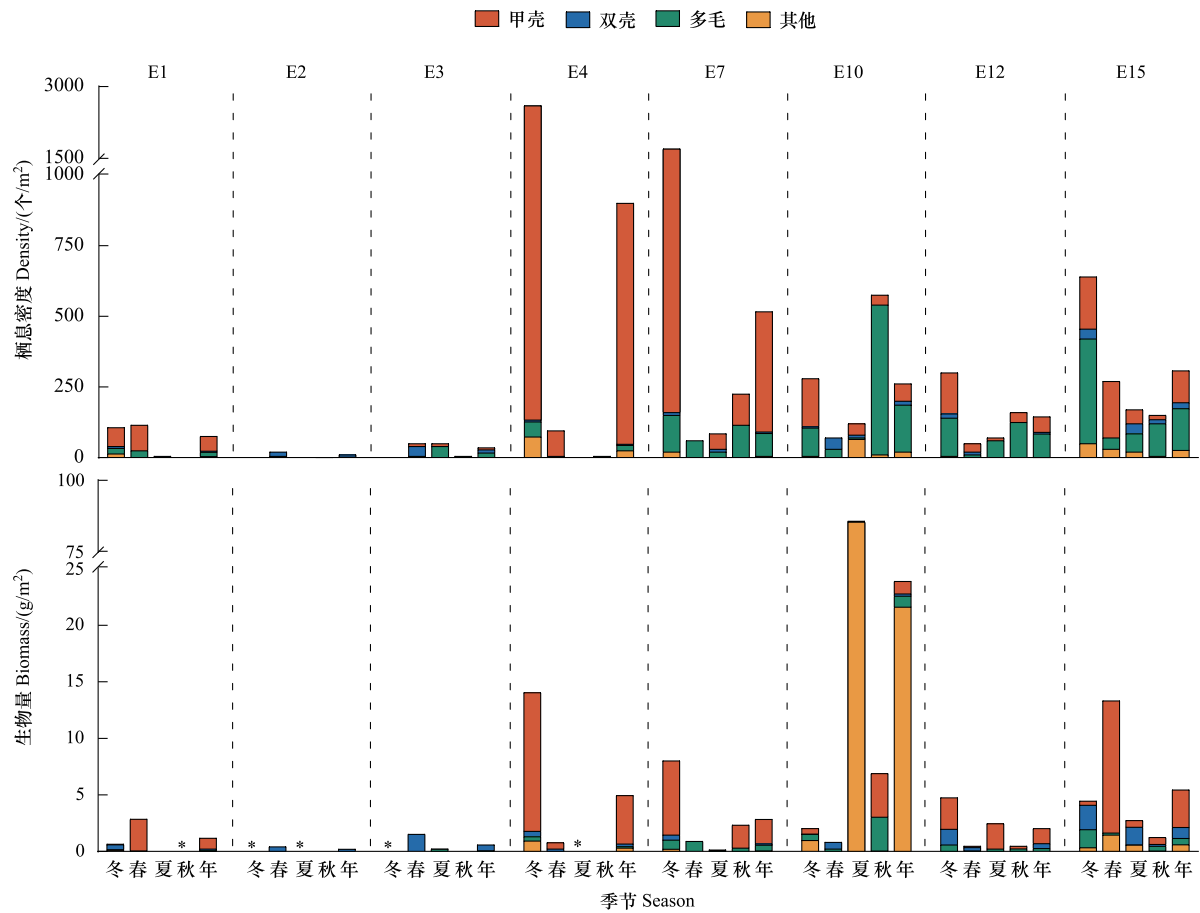


图2 九龙江口大型底栖动物栖息密度和生物量的站位、季节变化

Fig.2 Spatial and seasonal variations in density and biomass of macro-benthic fauna in Jiulongjiang Estuary

未检出站位用“*”标识;“Win.”为冬季 Winter 缩写;“Spr.”为春季 Spring 缩写;“Sum.”为夏季 Summer 缩写;“Aut.”为冬季 Autumn 缩写;“年”(“All”)表示全年平均值

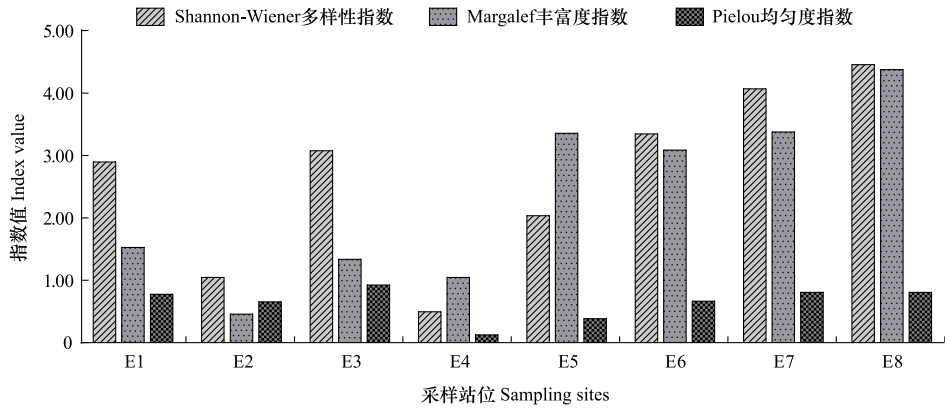


图3 九龙江口不同站位大型底栖动物多样性指数

Fig.3 Diversity indices of macro-benthic fauna at different sites in Jiulongjiang Estuary

2.4 群落结构聚类分析

对九龙江口大型底栖动物四季的物种分布和栖息密度进行聚类分析发现,两种矩阵除冬季、夏季聚类结果不同,其余结果一致(图4)。以栖息密度矩阵为例:冬季,E1与E4站位,E5与E6站位之间的相似度较高,而E1和E4站位与其他站位之间相似度较低;春季,E3与E4站位,E1与E5站位间相似度较高;夏季,E3和E5站位间相似度较高,而E1站位同其余站位间的相似度较低;秋季,E3和E4站位,E6和E7站位之间相似度较高,而E2站位与其他站位之间的相似度较低。不同季节站位间的相似性和聚类情况差异较大。将四次航次调查的物种分布及栖息密度数据合并,进行全年聚类分析,结果显示,八个站位之间分为三组,分别是组一:E2和E3站位;组二:E1和E4站位;组三:E8、E5、E6和E7站位。

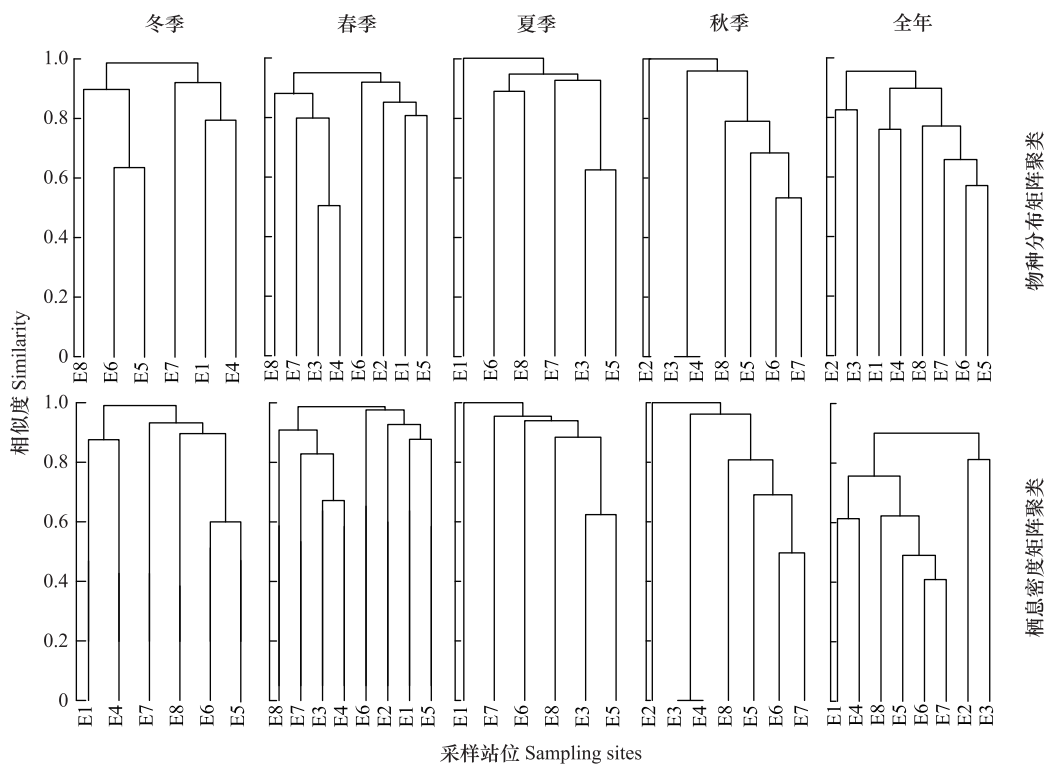


图4 九龙江口大型底栖动物四季和全年的物种0、1分布及栖息密度矩阵聚类分析

Fig.4 Species 0/1 distribution and abundance matrix clustering analysis of macro-benthic fauna in Jiulongjiang Estuary across four seasons and the entire year

2.5 受扰动情况及与环境因子相关性

九龙江河口各站位大型底栖动物群落的ABC曲线如图5。各站位受扰动情况不尽相同,除E4站位丰度曲线在生物量曲线之上及E5站位两曲线相交之外,其余站位的生物量曲线在丰度曲线的上方。从W统计量来看,从靠近河流的E1站位($W=0.2957$)开始到受干扰最轻的E3站位($W=0.5269$),再到受干扰程度最高的E4站位($W=-0.1274$),随后E5站位($W=0.0078$)到E8站位($W=0.2517$)慢慢恢复至较低干扰状态。

Mantel检验的分析结果显示, PO_4^{3-} 和TPP对多毛类动物群落的影响极显著($P<0.01$),同时受TP和蓝绿藻生物量显著影响($P<0.05$),其余环境参数同其他三个类群之间无显著相关(图6)。分析影响九龙江口大型底栖动物多样性指数的关键影响因子发现,TDP是影响三个多样性指数的共有关键因子,其分别解释了 H' 、 D 、 J' 指数14.03%、11.16%、11.90%的变化(图6)。各季节所有站位的多样性指数(H' 、 D 和 J')与环境因子间的Person相关性分析结果显示, NO_2^- -N、 NO_3^- -N、DIN、TP、TDP和TPP与三个多样性指数均呈显著负相关($P<0.05$),盐度、电导率和TDS与三个多样性指数均呈显著正相关($P<0.05$)(图6)。

PO_4^{3-} 、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、TPP、DIN、TN、TP、TDP指标站位平均值存在从E1到E8逐步降低的现象。盐度、电

导率和 TDS 站位平均值则为从 E1 到 E8 逐步升高。根据国家《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)对九龙江河口各站位测定的总氮和总磷进行分析发现,近河流站位 E1、E2 和 E3 的总氮含量均超过 V 类水标准 ($>2.0 \text{ mg/L}$),E4、E5 和 E6 站位达 V 类水标准 ($1.5\text{—}2.0 \text{ mg/L}$),靠近海水的 E7、E8 站位总氮含量较低,达 IV 类水标准 ($1.0\text{—}1.5 \text{ mg/L}$);八个站位总磷含量均高于 V 类水标准 ($>0.4 \text{ mg/L}$)。从季节性上看,总氮含量呈春季 $>$ 秋季 $>$ 夏季 $>$ 冬季,总磷含量各季节差距不大。综上所述,2022 年九龙江口水域具有高营养盐浓度、高氮磷比(TN/TP)的特征。

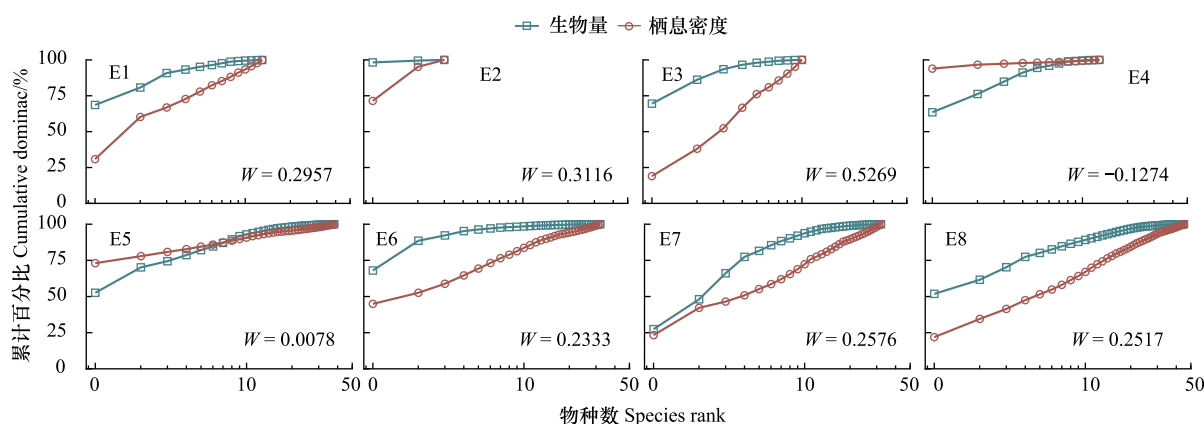


图5 九龙江口不同站位大型底栖动物群落 ABC 曲线及分离系数 W

Fig.5 ABC curves and separation coefficient W of macro-benthic fauna communities at different sites in Jiulongjiang Estuary

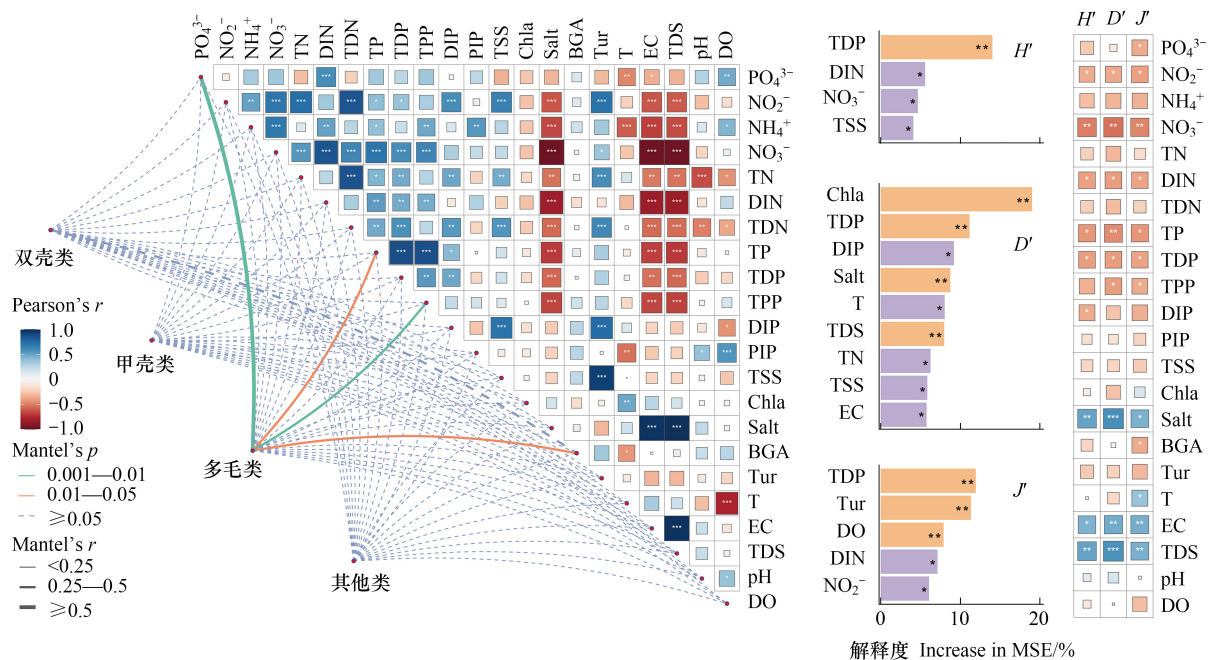
3 讨论

3.1 混合区与海水区大型底栖动物物种数和多样性指数的差异及原因

本研究结果显示,九龙江河口混合区的大型底栖动物物种数低于海水区,与珠江口^[31]、长江口^[32]、黄河口^[33]等河口型水域底栖动物的分布格局类似。底栖动物多样性随河口距离增加而增加^[34],且在离河口远的海域较高^[35]。九龙江河口大型底栖动物多样性指数 H' 、 D 和 J' 在站位间均存在显著差异,且与盐度呈显著正相关(图6)。因此,海水盐度升高是导致九龙江河口大型底栖动物多样性增加的重要原因之一。

本研究部分站次采样虽均采集得到沉积物,但清洗过筛后并未检出生物,其原因可能在于站位所在大型底栖动物分布不均,使用采泥器采样未采集到生物,在未来研究中增加不同采样方法可适当弥补这一缺陷。不同站位优势物种的变化反映了生境异质性较大的特点。不同大型底栖动物生境适应能力不同,一些海水性物种,在适应河口盐度的变化后可能成为河口生物,而难以适应河口盐度变化的物种只能生活在海水中,继续维持较窄的生态位。在本研究中,从混合区到海水区均有分布的优势种为螺赢蜚、中蚓虫、钩虾,均为分布较广、生态位较宽、适应能力较强的物种。九龙江河口大型底栖动物呈现出以小型机会物种(如小型多毛类、小型甲壳类)为主、总体密度较高但总生物量较低的群落特点。

将本研究四个航次大型底栖动物的调查结果与九龙江口及邻近海域的历史调查数据进行比较,结果如表2。与1980—1981年的调查结果相比^[11],本研究的物种数和生物量处于较低值,栖息密度略高,这主要是由于其调查点位布设更多(二十四四个采泥站和六个拖网站),本研究设置站位为八个;此外,该研究站位主要布设在物种多样性更高的海水区附近,拖网调查方式弥补了采泥调查的局限性,故其所获的物种更多、个体较大。同其他在九龙江口和周边海域的研究相比^[36-42],本研究调查所得物种数处在中等水平,而栖息密度和生物量均处在较低水平,原因在于本研究捕获的大型底栖动物个体较小,且由于各航次的采样点位位于不同地区,大型底栖动物的栖息环境不尽相同、异质性较大,故大型底栖动物的组成也相差较大。

图6 Mantel 分析、随机森林分析所得 H' 、 D' 、 J' 的重要环境因子及 Pearson 相关性热图Fig.6 Mantel analysis, Important environmental factors from random forest analysis H' , D' , J' , and Pearson correlation heatmap

“*”表示相关显著 ($P < 0.05$); “**”表示相关极显著 ($P < 0.01$); PO_4^{3-} : 磷酸盐 Phosphate; NO_2^- -N: 亚硝酸盐 Nitrite; NH_4^+ -N: 氨氮 Ammonium; NO_3^- -N: 硝酸盐 Nitrate; TN: 总氮 Total nitrogen; DIN: 溶解无机氮 Dissolved inorganic nitrogen; TDN: 总溶解氮 Total dissolved nitrogen; TP: 总磷 Total phosphorus; TDP: 总溶解态磷 Total dissolved phosphorus; TPP: 总颗粒态磷 Total particulate phosphorus; DIP: 溶解无机磷 Dissolved inorganic phosphorus; PIP: 颗粒态无机磷 Particulate inorganic phosphorus; TSS: 总悬浮固体 Total suspended solids; Chla: 叶绿素 a Chlorophyll a; Salt: 盐度 Salinity; BGA: 蓝绿藻 Blue-green algae; Tur: 浊度 Turbidity; T: 水温 Temperature; EC: 电导率 Electrical conductivity; TDS: 总溶解固体 Total dissolved solids; pH: 酸碱度 pH; DO: 溶解氧 Dissolved oxygen; H' : Shannon-Wiener 多样性指数; D' : Margalef 丰富度指数; J' : Pielou 均匀度指数

表2 不同河口、海域大型底栖动物的物种数、栖息密度和生物量

Table 2 Species number, abundance, and biomass of macro-benthic fauna in different estuarine and marine areas

调查区域 Survey area	调查时间 Survey time	总物种数 Number of Species	优势类群 Dominant group	平均栖息密度 Mean density/ (ind./m ²)	平均生物量 Mean biomass/ (g/m ²)	来源 Source
九龙江河口 Jiulongjiang Estuary	2022 年	101	多毛类 55 种	376.3	4.92	本研究
九龙江河口及邻近海域 Jiulongjiang Estuary and adjacent area	1980—1981 年	440	多毛类 151 种	358.0	56.17	[11]
九龙江口海门岛潮间带 Intertidal zone of Haimen Island at Jiulongjiang Estuary	2014—2015 年	112	多毛类 42 种	991.0	77.58	[14]
九龙江口白礁、浮宫潮间带 Intertidal zone of Baijiao and Fugong at Jiulongjiang Estuary	2005—2006 年	23	甲壳类 15 种	391.1	52.41	[15]
九龙江河口及厦门湾海域 Jiulongjiang Estuary and Xiamen Bay	2014—2015 年	247	环节动物 149 种	/	/	[36]
厦门湾海域 Xiamen Bay	2012 年 8 月	103	多毛类	/	/	[37]
厦门湾海域 Xiamen Bay	2010 年 8 月	52	环节动物 27 种	1553.2	308.61	[38]
古雷半岛周边海域 Adjacent area of Gulei Peninsula	2011 年 4—5 月	145	多毛类 69 种	111.0	14.79	[39]
泉州湾海域 Quanzhou Bay	2009—2012 年	103	多毛类 48 种	76	7.77	[40]
闽北近岸海域 Coastal area of northern Fujian	2016 年春季	62	环节动物 34 种	77.7	25.36	[41]
闽江口以南近岸海域 Southern coastal area of Minjiang Estuary	2003 年 8—9 月	114	多毛类 63 种	161.0	14.42	[42]

3.2 E4、E5 站位受到扰动及其可能原因探讨

ABC 曲线能够较好地表征底栖动物群落受扰动情况^[43-44]。本研究中,九龙江口物种小型化及机会种可能是对该区域不稳定环境的适应,位于海门岛附近海域的 E4、E5 站位大型底栖动物群落受到扰动较大(图 5),推测可能与水动力条件、底质类型及工程建设相关。

孙凯静认为,在水深浅、盐度低、污染高和水动力作用强的河口、近岸区域不利于大型底栖动物生存^[33]。E4、E5 站位位于九龙江南港,受南溪河水汇入影响,加上潮汐作用,区域内水动力作用强,盐度日变化大,对底栖动物存在一定影响。

刘治帅等^[45]、左书华^[46]等对九龙江口表层沉积物粒径的研究指出,海门岛附近水域的粒径较粗,为粗中砂。在本研究采样过程中发现,本研究 E4、E5 站位所采集沉积物以砂质居多而泥质较少,推测原因在于水动力作用强导致细颗粒物较难沉降,故沉积物以粗砂和中粗砂居多,而泥质沉积物更适合多毛类和软体动物的生长及活动^[47],所以 E4、E5 站位的物种数及栖息密度较低。

李青生等对九龙江口表层沉积物重金属的研究指出,海门岛下游海域重金属含量较高,具体表现为表层沉积物中的硫化物、TOC、Cu、Pb 和 Zn 含量较高^[48]。本研究 E4、E5 站位位于海门岛附近海域,沉积物重金属含量较高,可能与 E4 站位周围修船厂(财成造船厂、海门连福船厂等)运营活动以及 E5 站位沿岸码头(添鸿码头、兆龙码头等)建设运行有关,从而影响了大型底栖动物群落。

不同站位的分离系数 W 反映出九龙江口大型底栖动物群落沿河口距离受到较低水平(E1-E3)到较严重(E4、E5)再减轻(E6-E8)的干扰,但 E2 站位仅检出 3 个物种,分离系数 W 的变化与物种多样性指数 H' 沿河口距离从较高值(E1)先下降(E4)再上升(E8)的变化在一定程度上呈负相关关系,侧面体现出大型底栖动物群落对环境变化和受扰动情况的响应,此种关系与许多研究相一致^[49-52]。

3.3 水质因子影响九龙江口大型底栖动物的分布格局

水生生态系统中底栖动物的种群结构、栖息密度、繁殖活动等均会受到水环境因子的影响^[53]。周红等研究发现,莱州湾大型底栖动物对水体环境的变化敏感,如径流减小和富营养化所引起的盐度增加会引起大型底栖动物群落结构的改变^[54]。周增荣基于 3 个站点监测数据对 2011—2020 年九龙江北溪、南溪和西溪的总氮、总磷污染物入海通量进行估算,结果表明,虽然总氮和总磷的入海通量呈现递减趋势,但仍具有较高养分通量的特点。姜双城等运用评价模型对九龙江河口水质污染的关键区域和指标进行筛查,结果显示,区域内污染兼具面源和点源污染特征,面源污染的关键指标为无机氮磷,点源主要为海门岛西南侧和紫泥东侧(污染因子为 N、P 以及重金属),关键区域在于漳州近岸海域^[19]。本研究分析显示,氮、磷的相关环境因子指标与大型底栖动物群落关系密切(图 6)。此外,本研究所调查的总氮、总磷含量处于较高水平,具有高营养盐浓度、高氮磷比特点。春季九龙江口大型底栖动物调查期间正值枯水期,富营养化水平较其他季节更高。九龙江河口上游河流输入氮、磷等营养物质进入河口区域,导致河口水体处于富营养化状态,影响水体中的溶解氧浓度,部分区域上层水体藻类数量激增,导致底层水体处缺氧状态^[55],进而影响大型底栖动物的生理过程,使得大型底栖动物的多样性降低^[56]。DO 与均匀度指数 J' 之间的相关密切也佐证此点(图 6)。

Shannon-Wiener 多样性指数(H')被广泛应用于评估大型底栖动物群落结构变化以及受污染情况^[32, 57],在本研究中,E4、E5 站位受到扰动与其 H' 值较低相对应。本研究中,三个多样性指数 H' 、 D 和 J' 在站位间均存在显著差异,整体呈 E2、E4 和 E5 偏低,其他站位多样性较高的分布格局(图 3)。九龙江口大型底栖动物以个体小的甲壳类和多毛类占物种数、栖息密度优势,符合富营养水域的特征^[58]。水体径流减小和富营养化所引起的盐度增加会引起莱州湾大型底栖动物群落结构的改变^[54];总氮、总磷是影响三亚湾大型底栖动物的主要环境因子^[59];底栖动物多样性与 TN、TP 呈负相关,水体的富营养化会导致某些种类消失^[60]。由此可见,富营养化对大型底栖动物的多样性具负面影响,长时间的富营养化会加速群落的更新,导致其结构和功能多样性降低^[61]。

4 结论

九龙江口 2022 年四个季节共鉴定出大型底栖动物 101 个分类单元,以多毛类和甲壳类动物为主,整体呈小型化。优势种计 11 种,其中多毛类 7 种,螺赢蛭、中蚓虫、钩虾在混合区和海水区均有分布,适应能力较强。混合区大型底栖动物的物种数和多样性指数低于海水区,海水盐度升高是导致九龙江河口的大型底栖动物多样性增加的重要原因之一。海门岛附近海域 E4、E5 站位受到扰动较为明显,主要原因可能在于区域水动力条件强、底质为中粗砂及近岸工程建设。在九龙江口区域,富营养化也是影响大型底栖动物多样性分布的重要因素。鉴于河口生态系统生境较多、水动力作用复杂、物质能量交换强烈,影响底栖动物群落分布及多样性的各类因素较多,因此需要对该区域进行长期且较全面的定点监测,以期更深入阐明该区域底栖动物群落分布及多样性格局的驱动因素。

参考文献 (References):

- [1] 蔡立哲. 深圳湾底栖动物生态学. 厦门: 厦门大学出版社, 2015.
- [2] 杨湘君, 崔雯瑶, 张蒙生, 陈晨, 于子山. 胶州湾大型底栖动物生态学初步研究. 海洋科学进展, 2021, 39(1): 89-101.
- [3] Niemi G J, McDonald M E. Application of ecological indicators. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2004, 35: 89-111.
- [4] Potter I C, Chuwen B M, Hoeksema S D, Elliott M. The concept of an estuary: a definition that incorporates systems which can become closed to the ocean and hypersaline. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, 87(3): 497-500.
- [5] 童春富. 河口湿地生态系统结构、功能与服务——以长江口为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2004.
- [6] Bianchi T S, Allison M A. Large-river delta-front estuaries as natural “recorders” of global environmental change. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009, 106(20): 8085-8092.
- [7] 马骏, 付荣恕. 大型底栖动物生态学研究进展. 山东农业科学, 2010, 42(2): 78-81.
- [8] 黄秀琴. 九龙江流域水文特性. 水利科技, 2008(1): 16-17, 20.
- [9] 蒋春华, 易津旭, 朱礼鑫, 刘凯, 宗常兴, 李道季. 水体微塑料的垂向分布及采样方法比较研究——以九龙江河口为例. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2024(1): 79-89.
- [10] 王飞飞, 钱灵颖, 丁升, 曹文志, 陈能汪, 周克夫. 基于陆海统筹的九龙江-厦门湾海岸生态过渡带综合监测体系构建. 生态学报, 2021, 41(11): 4271-4277.
- [11] 何明海, 蔡尔西, 吴启泉, 江锦祥, 林双淡, 徐惠州, 刘泉顺, 郑凤武, 李荣冠. 九龙江口底栖生物生态研究. 生态学报, 1988, 8(2): 133-139.
- [12] 朱延忠, 周娟, 林岩璇, 刘静, 蔡文倩, 刘录三. 基于 MCI 的厦门湾大型底栖动物群落健康状况评价. 广西科学, 2015, 22(5): 549-557.
- [13] 吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 陈庆辉. 不同底栖生物指数在福建省近岸海域的适用性. 应用生态学报, 2018, 29(6): 2051-2058.
- [14] 周细平, 徐帅良, 吴培芳, 李艺蝉, 沈露, 吴兆东, 刘爽, 刘东艳, 王玉珏, 王跃启. 九龙江口海门岛红树林湿地大型底栖动物群落生态研究. 应用海洋学报, 2019, 38(1): 21-29.
- [15] 李蓉, 叶勇, 陈光程, 翁劲. 九龙江口桐花树红树林恢复对大型底栖动物的影响. 厦门大学学报: 自然科学版, 2007, 46(1): 109-114.
- [16] Chen G C, Ye Y, Lu C Y. Changes of macro-benthic faunal community with stand age of rehabilitated Kandelia candel mangrove in Jiulongjiang Estuary, China. Ecological Engineering, 2007, 31(3): 215-224.
- [17] Lin L, Xiong J, Liu L H, Wang F F, Cao W Z, Xu W F. Microbial interactions strengthen deterministic processes during community assembly in a subtropical estuary. Science of the Total Environment, 2024, 906: 167499.
- [18] 周增荣. 九龙江-厦门湾氮磷污染物入海通量估算与研究. 渔业研究, 2021, 43(2): 175-182.
- [19] 姜双城, 林培梅, 蔡建堤, 吴立峰, 席英玉, 杨妙锋, 郑盛华, 颜聪毅, 吴水清. 近海水质综合评价模型的构建及其应用——以九龙江口为例. 广东海洋大学学报, 2019, 39(5): 65-70.
- [20] Cao W Z, Hong H S, Yue S P. Modelling agricultural nitrogen contributions to the Jiulong River estuary and coastal water. Global and Planetary Change, 2005, 47(2-4): 111-121.
- [21] Liu B L, Cao W Z, Huang Z, Chen W H, Chen H H, Liu L S. Developing nutrient criteria for the Jiulong River Estuary, Southeast China. Acta Oceanologica Sinica, 2018, 37(2): 1-13.
- [22] 刘瑞玉. 中国海洋生物名录. 北京: 科学出版社, 2008.
- [23] 黄宗国. 厦门湾物种多样性. 北京: 海洋出版社, 2006.
- [24] 徐兆礼, 陈亚瞿. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲐鲷渔场的关系. 生态学杂志, 1989, 8(4): 13-15, 19.
- [25] Shannon C E, Weaver W. The mathematical theory of communication. Urbana: University of Illinois Press, 1963.
- [26] Margalef R. Information theory in ecology. General Systems, 1958, 3: 36-71.
- [27] Pielou E C. Species-diversity and pattern-diversity in the study of ecological succession. Journal of Theoretical Biology, 1966, 10(2): 370-383.

- [28] Warwick R M. A new method for detecting pollution effects on marine macrobenthic communities. *Marine Biology*, 1986, 92(4): 557-562.
- [29] 李宝泉, 李新正, 王洪法, 王永强, 王金宝, 张宝琳. 长江口附近海域大型底栖动物群落特征. *动物学报*, 2007, 53(1): 76-82.
- [30] 李乃成, 刘晓收, 徐兆东, 赵瑞, 石洪华. 庙岛群岛南部海域大型底栖动物多样性. *生物多样性*, 2015, 23(1): 41-49.
- [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. *海洋渔业*, 2019, 41(3): 266-277.
- [32] 袁一鸣, 秦玉涛, 刘材材, 季晓, 邓邦平, 刘守海. 长江口海域夏季大型底栖动物群落结构分析. *水产学报*, 2015, 39(8): 1107-1121.
- [33] 孙凯静. 黄河口及邻近海域底栖群落健康及生境适宜性评价[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [34] 吴斌, 宋金明, 李学刚. 黄河口大型底栖动物群落结构特征及其与环境因子的耦合分析. *海洋学报: 中文版*, 2014, 36(4): 62-72.
- [35] 李少文, 任中华, 王田田. 黄河口海域夏季大型底栖动物的生态学特征. *渔业科学进展*, 2017, 38(6): 9-17.
- [36] 朱晓芬, 陈彬, 俞炜炜, 林俊辉, 黄雅琴, 廖建基. 厦门湾大型底栖动物分类学多样性指数及分类充分性. *生态学报*, 2018, 38(15): 5554-5565.
- [37] 黄昆, 陈岚, 傅婷婷, 黄智伟, 陈凯. 厦门湾大型底栖动物多样性指数空间分布及其与环境因子的关系. *渔业研究*, 2019, 41(4): 293-301.
- [38] 吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 陈庆辉. 福建省主要海湾潮下带大型底栖无脊椎动物组成与分布特征. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4240-4248.
- [39] 林俊辉, 王建军, 林和山, 何雪宝, 黄雅琴, 李荣冠, 郑凤武, 郑成兴. 福建古雷半岛周边海域春季大型底栖生物多样性现状. *渔业科学进展*, 2015, 36(2): 23-29.
- [40] 蓝虹, 黄央央, 郑崇荣, 苏荣. 2009—2012 年泉州湾大型底栖生物多样性研究. *海洋开发与管理*, 2018, 35(5): 87-92.
- [41] 程宏, 王金辉, 唐娅菲, 郑碧琪, 鲁超. 春季闽北海域大型底栖动物群落特征及环境质量分析. *上海海洋大学学报*, 2018, 27(2): 238-249.
- [42] 蓝虹, 郑崇荣, 周时强, 董炜峰. 闽江口以南近海底栖生物群落生态研究. *海洋环境科学*, 2006, 25(S1): 52-56.
- [43] 田胜艳, 于子山, 刘晓收, 张志南, 林岩璇, 刘廷志. 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. *海洋通报*, 2006, 25(1): 92-96.
- [44] 李北兴, 黎傲雪, 董建宇, 吕少梁, 王学锋. 湛江湾潮间带大型底栖动物的群落结构及其受干扰程度. *南方水产科学*, 2023, 19(2): 12-20.
- [45] 刘治帅, 杨旸, 陈坚, 王爱军, 李东义, 汪亚平. 厦门湾及邻近海域沉积物分布特征和沉积速率. *海洋科学*, 2012, 36(6): 1-8.
- [46] 左书华, 韩志远, 赵洪波, 杨华. 九龙江口-厦门湾海域表层沉积物粒度分布特征及其动力响应. *水利水运工程学报*, 2011(4): 74-79.
- [47] 方建勇, 陈坚, 王爱军, 李东义, 黄财宾. 九龙江河口区现代沉积环境及其物质输运趋势. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(2): 35-41.
- [48] 李青生, 王翠, 蒋金龙, 黄金良, 吴耀建. 九龙江口表层沉积物重金属的污染特征与来源分析. *海洋科学*, 2020, 44(12): 32-43.
- [49] 贺湛斐, 童春富. 太浦河大型底栖动物群落组成及时空分布特征. *生态学报*, 2023, 43(11): 4619-4631.
- [50] Wang B X, Liu D X, Liu S R, Zhang Y, Lu D Q, Wang L Z. Impacts of urbanization on stream habitats and macroinvertebrate communities in the tributaries of Qiantang River, China. *Hydrobiologia*, 2012, 680(1): 39-51.
- [51] Helms B S, Schoonover J E, Feminella J W. Seasonal variability of landuse impacts on macroinvertebrate assemblages in streams of western Georgia, USA. *Journal of the North American Benthological Society*, 2009, 28(4): 991-1006.
- [52] Luo K, Hu X B, He Q, Wu Z S, Cheng H, Hu Z L, Mazumder A. Impacts of rapid urbanization on the water quality and macroinvertebrate communities of streams; a case study in Liangjiang new area, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 621: 1601-1614.
- [53] 雷莉莎. 贵州松桃喀斯特洞穴底栖动物的群落结构特征及其与环境因子的关系[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2020.
- [54] 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. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2010, 40(8): 80-87.
- [55] Dai M H, Zhao Y Y, Chai F, Chen M R, Chen N W, Chen Y M, Cheng D Y, Gan J P, Guan D B, Hong Y Y, Huang J L, Lee Y T, Leung K M Y, Lim P E, Lin S J, Lin X, Liu X, Liu Z Q, Luo Y W, Meng F F, Sangmanee C, Shen Y, Uthaipan K, Wan Talaat W I A, Wan X S, Wang C, Wang D Z, Wang G Z, Wang S L, Wang Y M, Wang Y T, Wang Z, Wang Z X, Xu Y P, Yang J Y T, Yang Y, Yasuhara M, Yu D, Yu J M, Yu L Q, Zhang Z K, Zhang Z L. Persistent eutrophication and hypoxia in the coastal ocean. *Cambridge Prisms: Coastal Futures*, 2023, 1: e19.
- [56] Hale S S, Cicchetti G, Deacutis C F. Eutrophication and hypoxia diminish ecosystem functions of benthic communities in a new England Estuary. *Frontiers in Marine Science*, 2016, 3: 249.
- [57] 陈梓林, 李纯厚, 肖雅元, 刘永, 林琳, 王九江, 全秋梅. 江门近岸海域大型底栖动物群落结构的分布特征. *南方水产科学*, 2020, 16(4): 18-27.
- [58] 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. *Journal of Sea Research*, 1998, 40(3-4): 263-280.
- [59] 廖一波, 寿鹿, 曾江宁, 高爱根. 三门湾大型底栖动物时空分布及其与环境因子的关系. *应用生态学报*, 2011, 22(9): 2424-2430.
- [60] 王银东, 熊邦喜, 陈才保, 胡宏胜. 环境因子对底栖动物生命活动的影响. *浙江海洋学院学报: 自然科学版*, 2005, 24(3): 253-257.
- [61] Villnäs A, Perus J, Bonsdorff E. Structural and functional shifts in Zoobenthos induced by organic enrichment—implications for community recovery potential. *Journal of Sea Research*, 2011, 65(1): 8-18.