

DOI: 10.12131/20220199

文章编号: 2095-0780-(2023)02-0012-09

湛江湾潮间带大型底栖动物的群落结构及其受干扰程度

李北兴¹, 黎傲雪¹, 董建宇¹, 吕少梁^{1,2}, 王学锋^{1,2}

1. 广东海洋大学水产学院, 广东湛江 524088

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江), 广东湛江 524025

摘要: 大型底栖动物是潮间带生态环境监测与评价的良好指示生物。湛江湾是粤西最大的港湾, 为揭示湛江湾潮间带大型底栖动物群落特征和受干扰程度, 为其生态保护提供科学依据, 分别在2020年8月(夏季)和2021年1月(冬季)实地调查了湛江湾5个不同人类活动胁迫下的断面(东海岛、东头山岛、鹿渚村、特呈岛和海湾大桥), 分析了大型底栖动物的种类组成、栖息密度与生物量空间分布以及生物多样性, 并采用分类学多样性指数和栖息密度-生物量比较(Abundance-biomass comparison, ABC)曲线分析了大型底栖动物群落受干扰程度。结果表明: 1) 共鉴定出大型底栖动物98种, 其中软体动物最多(45种), 其次为节肢动物(26种)和环节动物(19种); 2) 5个断面大型底栖动物夏、冬季的平均栖息密度分别为174和187个·m⁻², 平均生物量分别为171.27和188.38 g·m⁻², 均表现为冬季大于夏季; 软体动物疏纹满月蛤(*Lucina scarlatoi*)和节肢动物白脊管藤壶(*Fistulobalanus albicostatus*)为冬夏两季的共有优势种; 3) Bray-Curtis聚类分析和非度量多维标度排序分析(nMDS)结果表明, 不同季节5个断面均可分为4个亚群, 其中鹿渚村和海湾大桥为一个亚群, 东头山岛和特呈岛为一个亚群, 而东海岛夏、冬季各为一个亚群; 4) 分类学多样性指数和ABC曲线对湛江湾潮间带大型底栖生物群落受扰动分析评估结果存在一定差异, 其中分类学多样性分析结果表明东头山岛断面和受旅游休闲影响较大的海湾大桥断面冬季受干扰程度相对严重, 而ABC曲线则显示受贝类养殖影响的鹿渚村断面夏季受干扰程度较为严重。研究表明人类活动已经对湛江湾潮间带大型底栖生物群落产生了一定程度的不利影响。

关键词: 大型底栖动物; 潮间带; 群落结构; ABC曲线; 湛江湾

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):



Intertidal macrozoobenthic community structure and its disturbed state in Zhanjiang Bay

LI Beixing¹, LI Aoxue¹, DONG Jianyu¹, LYU Shaoliang^{1,2}, WANG Xuefeng^{1,2}

1. College of Fisheries, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhanjiang), Zhanjiang 524025, China

Abstract: Macrozoobenthos are ideal indicators for monitoring and evaluating the ecological environment of intertidal zones. Zhanjiang Bay is the largest harbor in western Guangdong. In order to reveal the characteristics and disturbed state of macrozoobenthos communities in the intertidal zone of Zhanjiang Bay as well as to provide a scientific basis for their ecological protection, we investigated five intertidal zones (Donghai Island, Dongtoushan Island, Luzhu Village, Techeng Island and Zhanjiang Bay Bridge) exposed to different anthropogenic pressures in Zhanjiang Bay in August 2020 (Summer) and January 2021 (Winter). We analyzed the species composition, distribution of abundance and biomass, and biodiversities of macrozoobenthos. Besides, we studied the disturbed state of macrozoobenthos communities by using the taxonomic diversity indexes and Abun-

收稿日期: 2022-07-20; 修回日期: 2022-11-20

基金项目: 中国-东盟海上合作基金项目“中国与印度尼西亚近海海洋生态牧场技术合作研究”(12500101200021002); 广东省科技厅科技基础条件建设项目(2021B1212110005); 国家重点研发计划项目(2020YFD0901103); 广东海洋大学本科生创新团队项目(CCTD201803)

作者简介: 李北兴(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔业生态学。E-mail: beixing2000@126.com

通信作者: 王学锋(1980—), 男, 教授, 博士, 研究方向为渔业生态与环境保护。E-mail: xuefeng1999@126.com

dance-biomass comparison (ABC) curves. The results show that: 1) A total of 98 species appeared in the five intertidal zones, among which Mollusca (45 species) were the most, followed by Arthropoda (26 species) and Annelida (19 species). 2) The average abundance and biomass of the macrozoobenthos were all greater in winter ($187 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$, $188.38 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) than in summer ($174 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-2}$, $171.27 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$). The mollusk *Lucina scarlato*i and the arthropod *Fistulobalanus albicostatus* were the dominant species both in summer and winter. 3) Bray-Curtis similarity clustering analysis on the communities and non-metric multi-dimensional scaling (nMDS) suggest that the communities in the five intertidal zones in summer and winter could be spatially clustered into four groups. Among them, Luzhu Village and Zhanjiang Bay Bridge formed a subgroup, Dongtoushan Island and Techeng Island formed a subgroup, and Donghai Island formed a subgroup in summer and winter. 4) The taxonomic diversity index and ABC curves show some differences in evaluating the anthropogenic stresses on the intertidal macrozoobenthic community in Zhanjiang Bay. Furthermore, the taxonomic diversity index shows that Dongtoushan Island and Zhanjiang Bay Bridge were affected by tourism, and were more severely disturbed in winter, while the ABC curves show that Luzhu Village was affected by shellfish farming and was more severely disturbed in summer. The study reveals that human activities have had a negative impact on the macrozoobenthic communities in the intertidal zones of Zhanjiang Bay.

Keywords: Macrozoobenthos; Intertidal zone; Community structure; ABC curves; Zhanjiang Bay

潮间带位于陆海交汇处, 其环境因素波动较为剧烈, 是最敏感的生态系统之一, 也是受人类活动干扰最为严重的区域之一^[1-3]。大型底栖动物是潮间带生态系统的重要组成部分, 也是鸟类、鱼类等的重要食物来源。此外, 大型底栖动物还具有迁移能力较弱、活动范围较小和寿命相对较长等特点, 并且能够对自然和人为压力快速作出反应。因此, 大型底栖动物可作为潮间带生态环境监测与评价的理想指示生物^[4-8], 研究潮间带大型底栖动物群落特征(种类组成、分布特征和生物多样性)及其对环境变化的响应, 有助于近岸海域潮间带生态系统开发与保护管理水平的提升。

港口是海洋经济的重要枢纽, 但港口地区周边旅游业、工业和农业等不断发展对港口沿岸生态环境和生物多样性的压力与日俱增^[1,4,9-10]。湛江湾是粤西最大的港湾, 港内水深浪静, 作为新中国成立后自行设计和建造的第一个现代化港口, 湛江湾也是“一带一路”支点港口和中西部地区货物出口的主通道, 在航运、旅游等方面发挥着重要作用。随着湛江湾沿岸经济的快速发展和人口的不断增长, 湛江湾近岸海洋生态环境正日益引起人们的重视^[11-13]。

目前已有不少学者研究了湛江湾区域的多个生物类群, 如红树植物^[14]、贝类^[15-16]、藻类^[17]以及底栖原生动物的^[18]等, 而关于大型底栖动物的研究报道仍较少^[11,19-20]。已有研究中的大型底栖动物涉及红树林和潮下带的群落结构组成^[11]、摄食类群^[19]和次级生产力^[20], 生境较为单一, 尚不足以反映湛江湾多样化生境中的大型底栖动物群落生态及其受干扰程度。本研究聚焦于湛江湾 5 种不同类型的

生境, 研究了夏、冬季湛江湾潮间带大型底栖动物的群落组成、结构和多样性, 对比分析不同生境的底栖动物群落结构稳定性, 以期能够更为综合地反映湛江湾潮间带大型底栖动物的群落特征和受扰动程度, 为其潮间带生态保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样断面

研究区域位于广东省湛江市湛江湾的 5 个断面, 分别为东海岛 (C1)、东头山岛 (C2)、鹿渚村 (C3)、特呈岛 (C4) 和海湾大桥 (C5), 于 2020 年 8 月 (夏季) 和 2021 年 1 月 (冬季) 在每个断面各设置 1 个断面采样 (图 1)。其中, C1 位于东海岛通往东头山岛的港口附近, 以淤泥、泥沙底质为主; C2 位于东头山岛边缘, C3 靠近鹿渚村贝类滩涂养殖区, 亦靠近船舶停泊区域, C4 位于特呈岛红树林保护区附近, C5 靠近海湾大桥桥底, 市民和游客活动频繁; C2—C5 均以泥沙底质为主。

1.2 采样方法

样品的采集和分析均按照 GB 12763.6—2007《海洋调查规范 第 6 部分: 海洋生物调查》和 GB 17378—2007《海洋监测规范》中规定的方法进行。根据当地的潮汐水位参数将潮间带划分为高潮区、中潮区和低潮区, 每个潮区设置 1 个采样站位。采用长 25 cm×宽 25 cm×高 30 cm 定量取样框取样, 取样时先充分采集表面的生物, 然后铲出取样框内的沉积物, 用孔径为 0.5 mm 的筛网淘洗, 每个站位重复取样 3 次。采集到的样品用体积分数为 75% 的乙醇固定后, 带回实验室进行种类鉴定、计数和称质量。

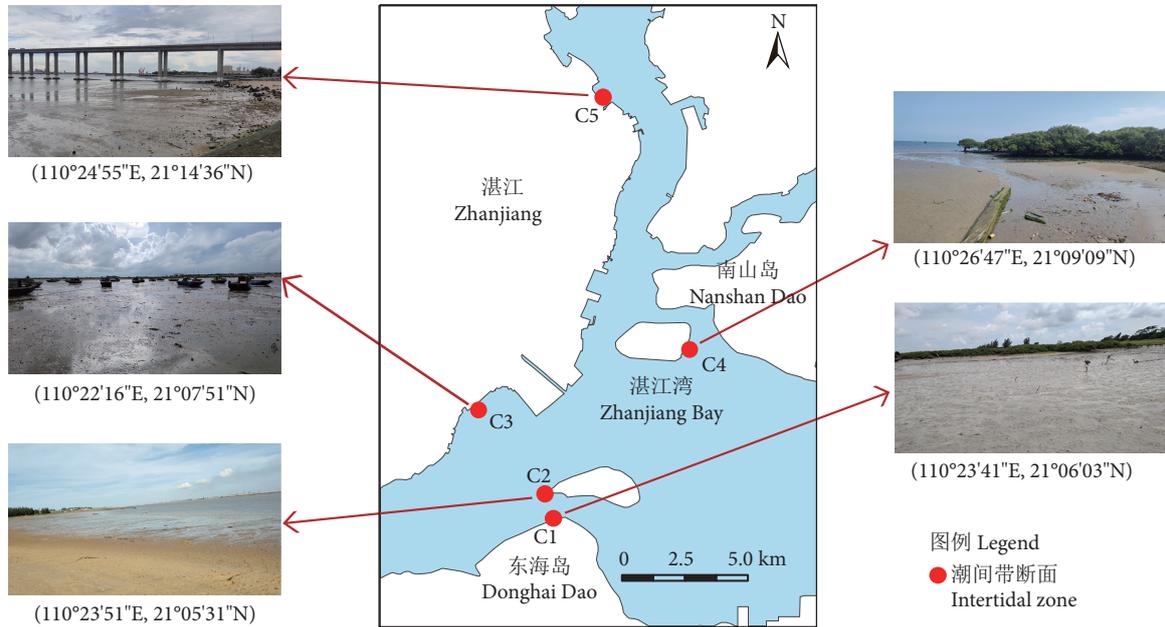


图1 湛江湾潮间带大型底栖生物采样断面

Fig. 1 Map of sampling sites of intertidal macrozoobenthos in Zhanjiang Bay

1.3 数据处理

1.3.1 生物多样性指数与优势度

使用 R v3.6.3 软件完成潮间带大型底栖动物生物多样性指数的计算, 具体公式如下:

Shannon-Wiener 多样性指数 (H'):

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

Margalef 种类丰富度指数 (d):

$$d = (S - 1) / \log_2 N \quad (2)$$

Pielou 种类均匀度指数 (J'):

$$J' = H' / \log_2 S \quad (3)$$

采用优势度指数 (Y) 计算大型底栖生物的优势度, 当 $Y \geq 0.02$ 为优势种^[1], 计算公式如下:

$$Y = (n_i / N) \times f_i \quad (4)$$

式中: S 为总种类数; P_i 为第 i 种的个体数占样品总个体数的比例; n_i 为第 i 种的个体数; f_i 为该种在各站位出现的频率; N 为所有种类的个体数。

1.3.2 分类多样性指数

平均分类差异指数 (Δ^+) 是样品中每对物种之间的平均分类距离路径长度^[21], 其公式为:

$$\Delta^+ = \frac{\sum \sum_{i < j} w_{ij}}{s(s-1)/2} \quad (5)$$

式中: s 为种类数; w_{ij} 为 2 个物种之间分类距离的路径长度权重值。

分类差异性指数 (Λ^+) 是物种间路径长度的差

异程度, 衡量物种之间分类距离的不均匀性。其公式为:

$$\Lambda^+ = \frac{\sum \sum_{i \neq j} (w_{ij} - \Delta^+)^2}{s(s-1)/2} \quad (6)$$

各等级间的路径距离权重值 w_{ij} 根据名录中不同等级水平的物种丰富度确定。本研究中物种分类等级确定为门、纲、目、科、属、种共 6 个水平, 因此 w_{ij} 种间 16.67, 属间 33.33, 科间 50, 目间 66.67, 纲间 83.33, 门间 100^[21-22]。使用 PRIMER 5.0 软件进行绘制 Δ^+ 和 Λ^+ 的 95% 置信区间漏斗图^[21]。

1.3.3 ABC 曲线

栖息密度-生物量比较 (Abundance-biomass comparison, ABC) 曲线法是通过比较同一坐标系中栖息密度优势度曲线和生物量优势度曲线的分布情况分析群落的受干扰状况^[12,23]: 当栖息密度优势度曲线在生物量曲线之上, 表明群落受严重干扰; 两者出现相交, 表明群落受中度干扰; 当栖息密度优势度曲线在生物量优势度曲线之下, 表明群落不受干扰或受轻微干扰。统计量用 W 表示, 范围为 $-1 \sim 1$, 当 W 为 +1 时表明底栖动物的栖息密度值均匀但生物量由单一物种占优势; 当 W 为 -1 时则相反。 W 的计算公式如下:

$$W = \sum_{i=1}^S [(B_i - A_i) / 50 (S - 1)] \quad (7)$$

式中: S 为出现的种类数; B_i 、 A_i 分别为第 i 种对应的生物量和栖息密度。

1.3.4 群落聚类

采用 Primer 软件中的 Bray-Curtis 相似性聚类分析和非度量多维标度 (nMDS) 排序分析研究大型底栖动物群聚特征, 为了降低生物量占优势的个别种类的权重, 对原始密度数据作 4 次方根转换^[23]。

2 结果

2.1 大型底栖动物群落组成

湛江湾潮间带 5 个断面调查共记录大型底栖动物 98 种, 隶属于 9 门 12 纲 29 目 53 科, 其中软体动物最多 (45 种), 占调查总物种数的 45.92%; 其次为节肢动物 (26 种) 和环节动物 (19 种), 分别占调查总物种数的 26.53% 和 19.39%; 其他类群动物仅有 6 种 (图 2)。在 5 个断面中, 特呈岛断面 (C4) 大型底栖生物种类数最多, 为 41 种, 占调查总物种数的 41.84%; 其次为海湾大桥断面 (C5) 和东头山岛断面 (C2), 分别有 34 种 (34.69%) 和 33 种 (33.67%); 鹿渚村断面 (C3) 最少, 为 25 种 (25.51%)。就季节而言, 冬季 C5 种类最多 (24 种, 占 24.49%), 其次为 C2 和 C4, 均为 21 种, C1 最少 (19 种); 夏季 C4 种类最多 (32 种, 占 32.65%), 其次为 C2 和 C5, 均为 21 种, C1 最少 (12 种)。

2.2 栖息密度与生物量空间分布与分区

湛江湾潮间带 5 个断面大型底栖动物总平均栖息密度为 $179 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}$, 总平均生物量为 $178.71 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 3)。栖息密度方面, 5 个断面以 C5 最高 (249

$\text{个} \cdot \text{m}^{-2}$), 其次是 C3 (241 $\text{个} \cdot \text{m}^{-2}$) 和 C1 (187 $\text{个} \cdot \text{m}^{-2}$), C2 最低 (97 $\text{个} \cdot \text{m}^{-2}$)。生物量方面, C1 最高 (261.51 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), 其次是 C4 (206.71 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)、C2 (172.21 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), C3 最低 (94.22 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)。季节变动方面, 冬季大型底栖生物的栖息密度为 C5 (426 $\text{个} \cdot \text{m}^{-2}$) > C4 (202 $\text{个} \cdot \text{m}^{-2}$) > C3 (132 $\text{个} \cdot \text{m}^{-2}$) > C1 (98 $\text{个} \cdot \text{m}^{-2}$) > C2 (76 $\text{个} \cdot \text{m}^{-2}$), 生物量则为 C4 (287.20 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) > C1 (230.60 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) > C5 (197.92 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) > C2 (182.12 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) > C3 (44.06 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$); 夏季 5 个断面大型底栖生物的栖息密度表现为 C3 (350 $\text{个} \cdot \text{m}^{-2}$) > C1 (276 $\text{个} \cdot \text{m}^{-2}$) > C4 (216 $\text{个} \cdot \text{m}^{-2}$) > C2 (214 $\text{个} \cdot \text{m}^{-2}$) > C5 (72 $\text{个} \cdot \text{m}^{-2}$), 生物量为 C2 (334.51 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) > C1 (292.42 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) > C4 (229.58 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) > C6 (144.38 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) > C5 (112.38 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)。

2.3 优势种

湛江湾潮间带冬、夏季的优势种数量和优势度均存在一定差异, 整体表现为夏季大于冬季 (表 1)。夏季优势种类有 7 种, 优势度范围为 0.021~0.063, 平均优势度为 0.043; 冬季优势种类有 4 种, 优势度范围为 0.025~0.081, 平均优势度为 0.040。软体动物疏纹满月蛤 (*Lucina scarlatoi*) 和节肢动物白脊管藤壶 (*Fistulobalanus albicostatus*) 为两季的共有优势种。

2.4 生物多样性指数

湛江湾夏、冬季的 Shannon 指数 (H')、Margalef 丰富度指数 (d) 和 Pielou 均匀度指数 (J') 平均值分别为 2.39、2.00 和 0.79 (表 2)。其中 H' 和 J' 在夏季的 C2 和 C5 最高, 分别为 2.40 和 0.93; d 在

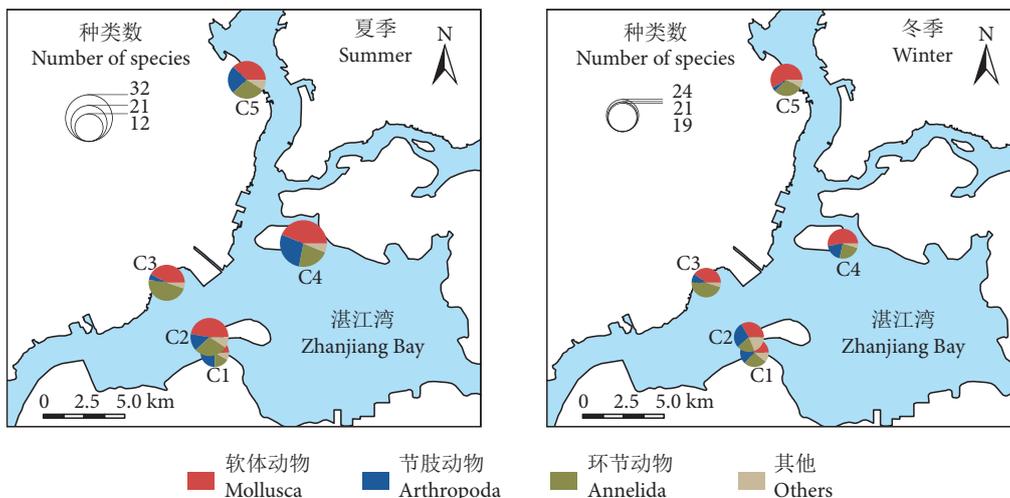


图2 湛江湾潮间带5个断面夏、冬两季的大型底栖动物物种数量和比例

Fig. 2 Number and proportion of macrozoobenthos species in five intertidal sampling zones in Zhanjiang Bay in summer and winter

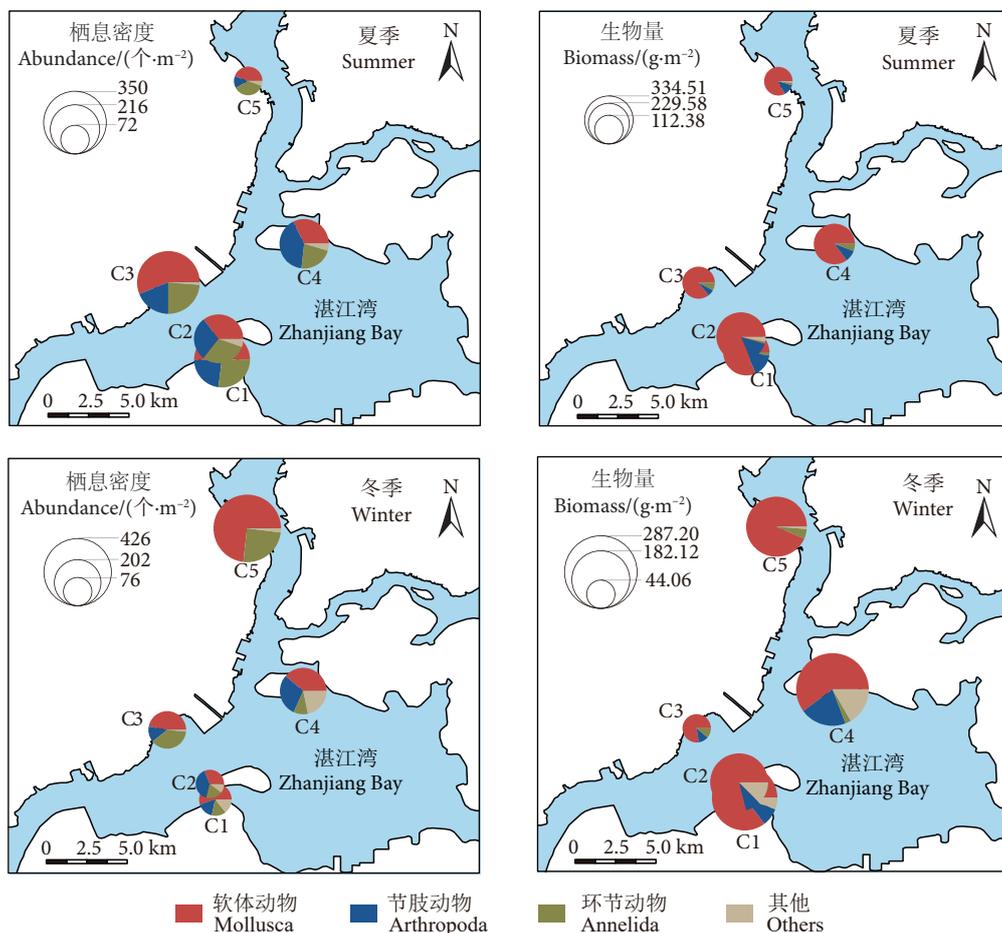


图3 湛江湾潮间带5个断面夏、冬季大型底栖动物栖息密度和生物量

Fig. 3 Abundance and biomass of macrozoobenthos in five intertidal sampling zones in Zhanjiang Bay in summer and winter

表1 不同季节湛江湾潮间带大型底栖动物优势种和优势度
Table 1 Dominant species and their dominance on macrozoobenthos in Zhanjiang Bay in different seasons

种类 Species	夏季 Summer	冬季 Winter
珠带拟蟹守螺 <i>Cerithidea cingulata</i>	—	0.081
疏纹满月蛤 <i>Lucina scarlatoi</i>	0.063	0.023
白脊管藤壶 <i>Fistulobalanus albicostatus</i>	0.060	0.033
相拟节虫 <i>Praxillella affinis</i>	0.050	—
欧文虫 <i>Owenia fusiformis</i>	0.043	—
韦氏毛带蟹 <i>Dotilla wichmanni</i>	0.033	—
绿螂 <i>Glauconome</i> sp.	0.032	—
革囊星虫 <i>Phascolosoma</i> sp.	—	0.025
纵带滩栖螺 <i>Batillaria zonalis</i>	0.021	—

注：—表示 $Y < 0.02$ 。

Note: —. Y is less than 0.02.

夏季的 C4 最高 (3.10); C1 的 H' 、 d 和 J' 均最低, 分别为 1.74、1.10 和 0.70。

表2 不同季节5个断面大型底栖动物生物多样性指数
Table 2 Indexes of H' , d , J' of macrozoobenthos in five intertidal zones in different seasons

采样断面 Sampling cross-section	季节 Season	Shannon指数 H'	Margalef 丰富度指数 d	Pielou 均匀度指数 J'
C1	夏季 Summer	1.74	1.10	0.70
	冬季 Winter	2.44	1.80	0.83
C2	夏季 Summer	2.40	2.00	0.79
	冬季 Winter	2.84	2.00	0.93
C3	夏季 Summer	2.02	1.80	0.69
	冬季 Winter	2.22	1.90	0.74
C4	夏季 Summer	2.56	3.10	0.74
	冬季 Winter	2.57	2.00	0.84
C5	夏季 Summer	2.84	2.00	0.93
	冬季 Winter	2.24	2.30	0.70
平均值 Mean		2.39	2.00	0.79

2.5 分类学多样性指数

平均分类差异指数 (Δ^+) 和分类差异变异指数 (Λ^+) 的 95% 置信区间漏斗图如图 4。 Δ^+ 和 Λ^+ 的理论平均值分别为 88.62 和 364.77, 除 C2 与 C5 冬季

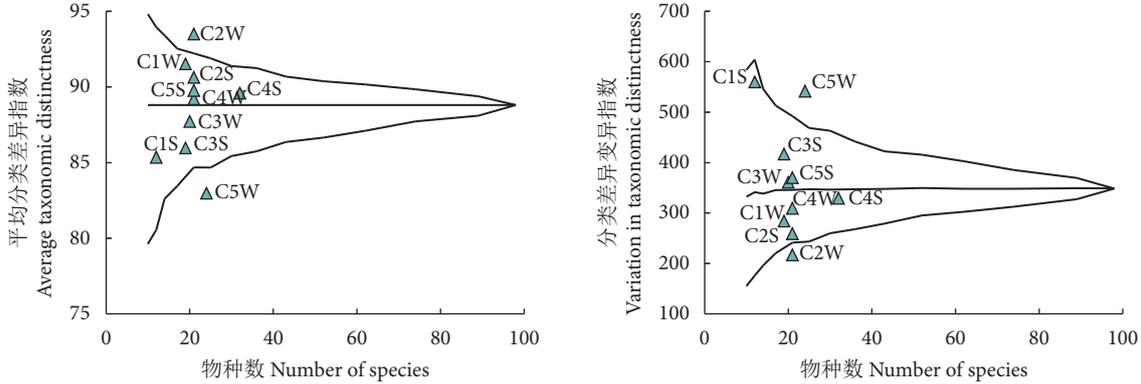


图4 湛江湾潮间带5个断面夏季和冬季大型底栖动物的平均分类差异指数 (Δ^+) 和分类差异变异指数 (Λ^+) 的95%置信区间漏斗图
注: 图中前2个字母代表潮间带断面, 如断面C1、C2; 第3个字母代表采样季节, 其中S为夏季, W为冬季; 后图同此。

Fig. 4 95% probability funnels for average taxonomic distinctness (Δ^+) and variation in taxonomic distinctness (Λ^+) in five intertidal sampling zones of macrozoobenthos in Zhanjiang Bay in summer and winter

Note: The first two letters in the figure represent the intertidal zone, such as Zone C1 and C2; the third letter represents the sampling seasons, and S represents summer while W represents winter. The same case in the following figures.

2.6 ABC 曲线分析

ABC 曲线分析 (图 5) 结果表明, 夏季 C3 (靠近贝类底播养殖区) 大型底栖生物的栖息密度优势度曲线在生物量曲线之上, 且统计量 W 为 -0.058 , 表明 C3 受到严重干扰; 冬季 C3、C4 和 C5 两条曲线发生交叉, $W > 0$, 表明其均受轻微干扰。其余站点各季节均为生物量曲线位于栖息密度曲线之上, 且不发生交叉, 表明均不受干扰。

2.7 群落聚类

以生物量为基础的大型底栖动物群落 Bray-Curtis 聚类分析结果与 nMDS 排序分析的结果一致 (图 6)。聚类分析表明夏、冬季 5 个断面可划分为 4 个亚群落 (图 6-a)。其中夏、冬季, C5 和 C3 在相似度大于 21.68% 时优先聚为一支, C2 和 C4 在相似度大于 30.61% 时聚为一支, C1 则分别为相对独立的两支。5 个断面不同季节的大型底栖生物群落的 nMDS 排序结果亦显示其可分为 4 个亚群 (图 6-b), 与 Bray-Curtis 聚类分析结果一致。

3 讨论

3.1 大型底栖动物群落结构与多样性

本研究共鉴定出大型底栖动物 98 种, 与附近海域相比, 湛江湾潮间带主要底栖动物类群组成与

外, 其余断面 Δ^+ 和 Λ^+ 值均分布在 95% 置信区间内, 表明冬季潮间带 C2 和 C5 环境受到一定程度的干扰, 物种间亲缘关系均匀程度较差。

广西防城河口^[24]、广东大亚湾^[25]和广东拓林湾-南澳岛^[26]等海域的调查结果相一致, 物种的丰富度均为软体动物>节肢动物>环节动物。与大亚湾 (物种多样性指数范围在 1.42~3.56, 平均为 2.66, 处于中等水平)^[25]相比, 本研究的物种多样性指数介于 1.74~2.84, 平均为 2.39, 亦属中等水平。

潮间带的自然生境特征对底栖生物的栖息密度和生物量具有决定性作用, 其次是底质、季节和人类活动等因素的影响^[27-30]。首先, 本研究中 C4 断面靠近红树林, 而红树林生境通常有利于维持较高的大型底栖动物多样性^[29], 该区域的矿物质和营养物质可随着涨退潮输入到邻近的潮间带, 为潮间带生物所用。其次, 生境破碎是生物多样性下降的原因之一, 若潮间带区域受人类活动影响较严重, 其物种会更加单一^[31]。C3 断面靠近村落, 附近有村民在滩涂区养殖琴文蛤 (*Meretrix lyrata*), 且该区域附近多船舶停泊, 同时在调查过程中发现该区域滩涂表面有大量的死亡贝壳, 生境受人类活动 (如采挖贝类、踩踏、起、抛锚等) 影响程度大, 这很可能是该断面的物种丰富度相对较低的主要原因。最后, 底质类型是影响大型底栖动物群落生物量和栖息密度的重要因素^[30,32]。本研究中, 仅 C1 断面底质大部分为淤泥, 其余断面为泥沙底质。通常来

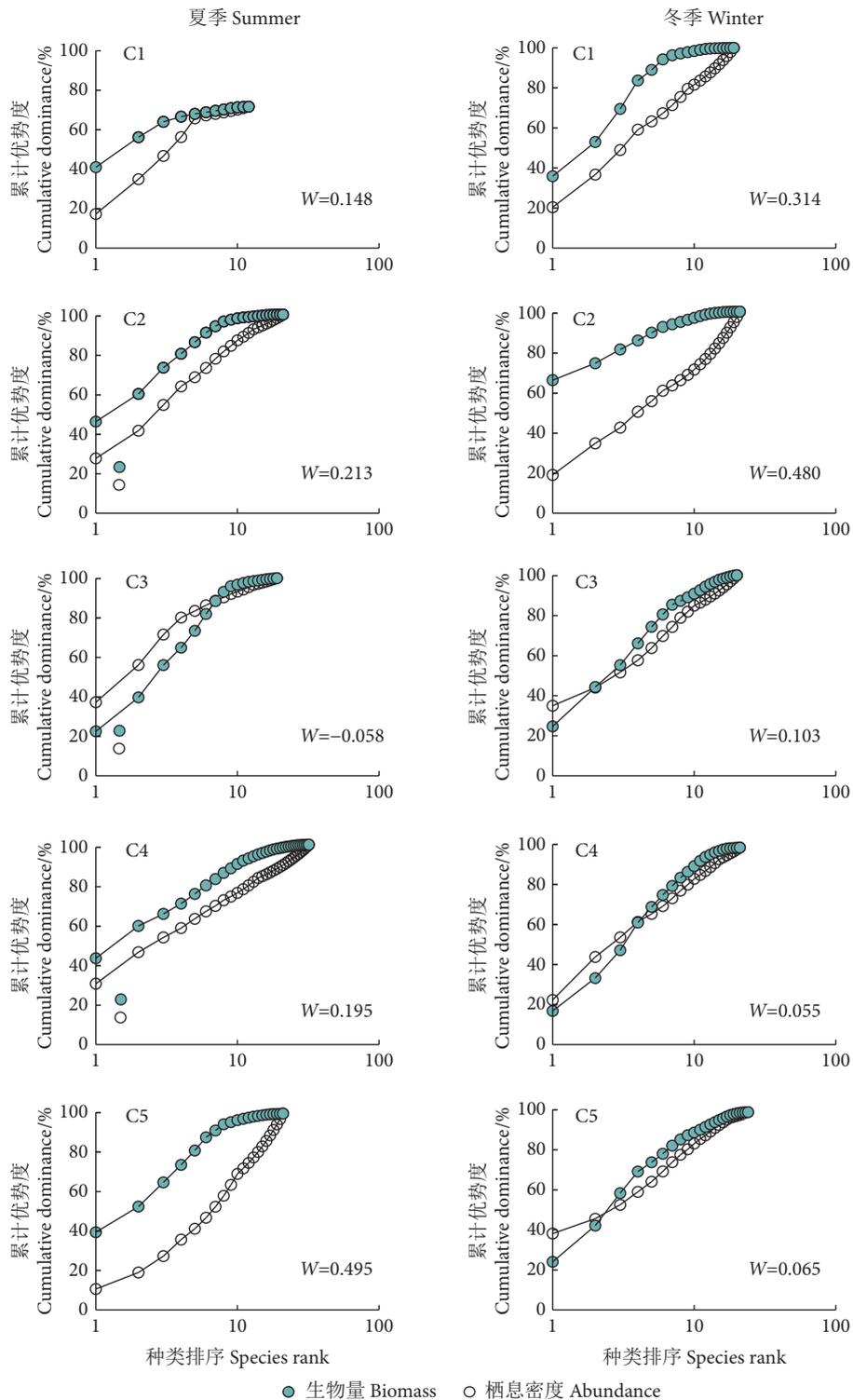


图5 湛江湾潮间带夏、冬季5个断面的ABC曲线

Fig. 5 ABC curves of five intertidal sampling zones in Zhanjiang Bay in summer and winter

讲, 淤泥和黏土底质中有机质含量更丰富, 成为绝大多数大型底栖生物的饵料来源, 因此 C1 大型底栖动物的生物量也相对较高, 但有机质含量过高形成污染后则会降低底栖动物的栖息密度^[32]。底质类型含淤泥底质的 C1 断面生物量最高, 而栖息密

度次于 C3 和 C5。C3 断面生物量和栖息密度均为最低的原因可能与该站点为泥沙底质, 大型底栖动物种类最少, 且个体小有关。

3.2 大型底栖动物受干扰程度

作为传统生物多样性评价方法的补充, 分类学多

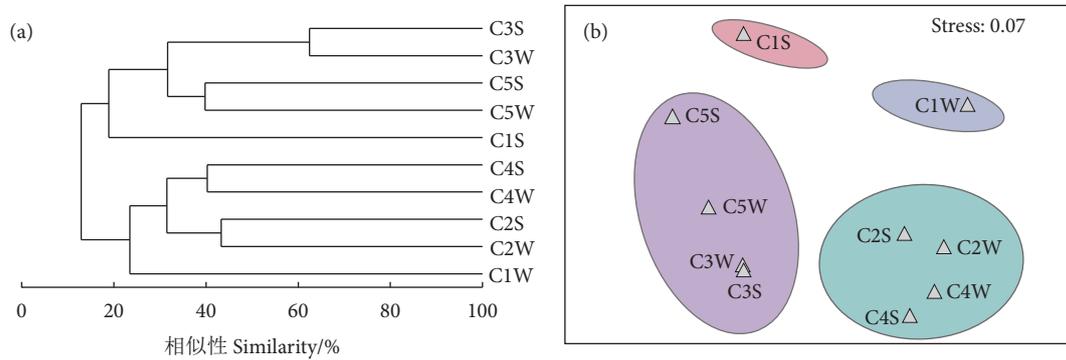


图6 湛江湾潮间带5个断面大型底栖动物群落Bray-Curtis聚类 (a) 和nMDS排序分析 (b)

Fig. 6 Bray-Curtis clusters (a) and nMDS (b) of macrozoobenthos in five intertidal zones in Zhanjiang Bay

多样性指数在大型底栖动物研究中应用广泛^[21-22,33-36]。受干扰程度越高的群落,其平均分类差异指数(Δ^+)和分类差异变异指数(Λ^+)越低^[34]。以往研究表明,受干扰程度较严重的群落其 Λ^+ 升高^[21-22,35],分类学多样性指数的高低与栖息密度、物种间亲缘关系和均匀度等相关^[22]。本研究中C4和C5的 Δ^+ 均表现为夏季低于冬季,表明除C4和C5断面外,其余3个断面在夏季受干扰程度较高,这与以往研究相一致。冬季C2和C5断面大型底栖动物种间亲缘关系均匀度较差,且其 Δ^+ 和 Λ^+ 均落在95%置信区间外,表明C2和C5断面受干扰程度大于其他3个断面。这主要是由于C2断面优势种白脊管藤壶的栖息密度在冬季迅速减少(夏季116个 $\cdot\text{m}^{-2}$,冬季28个 $\cdot\text{m}^{-2}$),而C5断面优势种珠带拟蟹守螺(*Cerithidea cingulata*)的栖息密度剧增(夏季24个 $\cdot\text{m}^{-2}$,冬季640个 $\cdot\text{m}^{-2}$)所导致。

ABC曲线可较好地揭示底栖动物群落受环境扰动的程度,在栖息地生态环境质量评价中应用较多^[23,37]。本研究的ABC曲线评估结果表明,冬、夏季C3的底栖动物群落受干扰程度较其他断面较为严重,其余各断面仅受轻微干扰或未受干扰。已有研究表明贝类底播区域附近底栖生物群落结构由于受到人类活动干扰程度较大,其稳定性通常较差且生物多样性也较低^[15]。本研究中C3断面位于贝类养殖区域和船舶停泊区域附近,潮滩上人类采挖贝类、踩踏痕迹严重,且滩涂上残留着大量贝壳,受人类活动直接影响最大。然而,这与分类学多样性指数评估结果却存在一定差异。究其原因,其一可能是ABC曲线和分类学多样性指数的评估结果等级划分存在差异,ABC曲线评估等级为未受扰动、中等扰动和严重扰动^[12,23],而分类学多样性指

数等级为未受扰动、受一定扰动^[21-22],致使二者评估等级无法完全匹配;其二可能是该两种评估方法原理不同,ABC曲线侧重生物量与生物密度,而分类学多样性指数则侧重物种进化的亲缘关系。究竟哪一种方法更适宜评估湛江湾潮间带大型底栖动物群落受扰动程度,还需进一步研究。

本研究中,大型底栖动物划分为4个亚群落。其中,靠近市区和村落的C5和C3聚成一支,位于海岛边缘的C2和C4为一支,而C1的夏、冬季各为一支。人类活动对自然生态系统的干扰会影响大型底栖动物群落种类组成和比例^[4,10]。通常多毛类动物相较于软体动物和甲壳动物更具耐受性,它们能在污染程度较高的潮间带依然保持较高的栖息密度和丰富度^[24]。C3和C5断面环节动物的栖息密度均高于节肢动物,C5断面优势种珠带拟蟹守螺为耐污种^[38],表明位于靠近市区与贝类增殖区的潮间带受污染更严重,而处于海岛边缘的C1、C2和C4断面不受污染或仅受轻微污染。由于交通和资源的便利条件差异,人类活动强度在市区、养殖区要远大于海岛,反映了距离人类活动影响范围越近,大型底栖生物群落受扰动程度会越大。

4 结论

湛江湾5个断面大型底栖动物生物多样性较高,群落结构状况良好且分布较均匀。分类学多样性指数和ABC曲线评估结果表明,虽然湛江湾潮间带整体受到的扰动水平较低,大型底栖生物群落处于良好状态,但个别断面(C3和C5)受到的外源压力扰动已导致其大型底栖动物群落多样性下降。底播贝类养殖和人类旅游等活动可能是影响湛江湾潮间带大型底栖生物群落结构的主要因素。此外,为深入研究湛江湾潮间带大型底栖动物结构特征及

其对外源扰动的响应,需进一步扩大采样的空间尺度并加强对外源压力因子的全面调查,采用多种评价指标对潮间带大型底栖生物群落进行综合评估分析,以更好地揭示大型底栖生物群落的受扰动水平和程度,为海湾生态的保护提供科学决策依据。

参考文献:

- [1] 刘颖,李进京,陈晨,等.浙江象山港岛屿春、夏季潮间带大型底栖生物的群落结构特征[J].海洋与湖沼,2021,52(3):685-696.
- [2] 李亚芳,杜飞雁,王亮根,等.底质类型对三亚湾潮间带大型底栖动物生态功能的影响[J].水产学报,2018,42(10):1559-1571.
- [3] DONG J Y, ZHAO L, YANG X, et al. Functional trait responses of macrobenthos to anthropogenic pressure in three temperate intertidal communities[J]. Front Mar Sci, 2021, 8: 1-15.
- [4] CHATZINIKOLAOU E, MANDALAKIS M, DAMIANIDIS P, et al. Spatio-temporal benthic biodiversity patterns and pollution pressure in three Mediterranean touristic ports[J]. Sci Total Environ, 2018, 624: 648-660.
- [5] 李宝泉,姜少玉,吕卷章,等.黄河三角洲潮间带及近岸浅海大型底栖动物物种组成及长周期变化[J].生物多样性,2020,28(12):1511-1522.
- [6] 杨颖,陈思思,周红宏,等.长江口潮间带底栖生物生态及变化趋势评价[J].生态学报,2022,42(4):1-13.
- [7] REHITHA T V, VINEETHA G, MADHU N V. Ecological habitat quality assessment of a tropical estuary using macrobenthic functional characteristics and biotic indices[J]. Environ Sci Pollut Res, 2022, 29(31): 47629-47646.
- [8] 陈梓林,李纯厚,肖雅元,等.江门近岸海域大型底栖动物群落结构的分布特征[J].南方水产科学,2020,16(4):18-27.
- [9] 纪莹璐,王尽文,张亮,等.日照岚山港邻近海域大型底栖动物群落结构及季节变化[J].生态科学,2020,39(5):151-160.
- [10] MOSBAHI N, PEZY J P, NEIFAR L, et al. Ecological status assessment and non-indigenous species in industrial and fishing bays of the Gulf of Gabès (central Mediterranean Sea)[J]. Environ Sci Pollut Res, 2021, 28(46): 65278-65299.
- [11] 周伟男,孙省利,李荣冠,等.湛江湾大型底栖动物的群落结构和多样性特征[J].广东海洋大学学报,2013,33(1):1-8.
- [12] 刘前,王学锋,吕少梁,等.湛江湾海域游泳动物群落结构及多样性分析[J].广东海洋大学学报,2021,41(2):103-110.
- [13] 周凤霞,袁柳婷,陆旋,等.湛江湾表层沉积物不同形态磷的变化特征[J].海洋环境科学,2022,41(4):509-518.
- [14] 唐秋霞,王友绍.雷州半岛红树林群落特征及其分布格局[J].生态科学,2021,40(5):23-32.
- [15] 柯盛,申玉春,谢恩义,等.雷州半岛流沙湾潮间带底栖贝类多样性[J].生物多样性,2013,21(5):547-553.
- [16] 崔宗梅,黄津伟,王海艳,等.广东雷州半岛东部沿岸潮间带常见牡蛎的种类及其分布[J].海洋与湖沼,2018,49(6):1350-1357.
- [17] ZHANG Y, LI Y, SHI F, et al. Seasonal and spatial variation in species diversity, abundance, and element accumulation capacities of macroalgae in mangrove forests of Zhanjiang, China[J]. Acta Oceanol Sin, 2014, 33(8): 73-82.
- [18] CHEN Q, JING L I, ZHAO Q, et al. Changes in the benthic protozoan community during succession of a mangrove ecosystem in Zhanjiang, China[J]. Ecosphere, 2018, 9(4): 1-13.
- [19] CHEN Q, ZHAO Q, JIAN S, et al. Changes in the functional feeding groups of macrobenthic fauna during mangrove forest succession in Zhanjiang, China[J]. Ecol Res, 2018, 33(5): 959-970.
- [20] 蔡立哲,许鹏,傅素晶,等.湛江高桥红树林和盐沼湿地的大型底栖动物次级生产力[J].应用生态学报,2012,23(4):965-971.
- [21] 曲方圆,于子山.分类多样性在大型底栖动物生态学方面的应用:以黄海底栖动物为例[J].生物多样性,2010,18(2):150-155.
- [22] 朱晓芬,陈彬,俞炜炜,等.厦门湾大型底栖动物分类学多样性指数及分类充分性[J].生态学报,2018,38(15):5554-5565.
- [23] 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(1):92-96.
- [24] 赖廷和,何斌源,黄中坚,等.防城河口湾潮间带大型底栖动物群落结构研究[J].热带海洋学报,2019,38(2):67-77.
- [25] 梁超愉,张汉华,吴进锋.大亚湾潮间带生物种类组成、数量分布及生物多样性研究[J].南方水产,2005,1(3):42-48.
- [26] 舒黎明,陈丕茂,秦传新,等.柘林湾-南澳岛潮间带冬夏两季大型底栖动物种类组成及优势种[J].生态学杂志,2016,35(2):423-430.
- [27] ZHOU H X, LIU J E, QIN P. Impacts of an alien species (*Spartina alterniflora*) on the macrobenthos community of Jiangsu coastal inter-tidal ecosystem[J]. Ecol Eng, 2009, 35(4): 521-528.
- [28] 彭茂潇,钱培力,张永善,等.洞头无居民海岛岩相潮间带夏季大型底栖动物群落格局[J].生态学杂志,2013,32(9):2469-2479.
- [29] 卓异,蔡立哲,郭涛,等.泉州湾罍埔潮间带大型底栖动物群落的时空分布[J].生态学报,2014,34(5):1244-1252.
- [30] 史会剑,李玄,王海艳,等.黄河三角洲潮间带大型底栖无脊椎动物群落结构与分布特征[J].海洋科学,2021,45(2):11-21.
- [31] 陶世如,姜丽芬,吴纪华,等.长江口横沙岛、长兴岛潮间带大型底栖动物群落特征及其季节变化[J].生态学杂志,2009,28(7):1345-1350.
- [32] 王海博,蔡文倩,林岩璇,等.环渤海潮间带秋季大型底栖动物生态学研究[J].环境科学研究,2011,24(12):1339-1345.
- [33] 胡成业,杜肖,水玉跃,等.浙江6个列岛潮间带大型底栖动物分类多样性[J].中国水产科学,2016,23(2):458-468.
- [34] WARWICK R M, CLARKE K R. Taxonomic distinctness and environmental assessment[J]. J Appl Ecol, 1998, 35(4): 532-543.
- [35] 余骥,马长安,吕巍巍,等.崇明东滩潮间带大型底栖动物的空间分布与历史演变[J].海洋与湖沼,2013,44(4):1078-1085.
- [36] MOUILLOT D, LAUNE J, TOMASINI J A, et al. Assessment of coastal lagoon quality with taxonomic diversity indices of fish, zoobenthos and macrophyte communities[J]. Hydrobiologia, 2005, 550(1): 121-130.
- [37] 金文育,彭欣,王宁,等.渔山列岛夏季潮间带大型底栖生物群落结构研究[J].海洋科学,2017,41(3):17-25.
- [38] 刘士龙,秦旭东,王广军,等.2017年夏季北海市冯家江入海口红树林潮间带大型底栖动物群落结构及多样性[J].湿地科学,2019,17(3):352-358.