

北部湾江山半岛潮间带大型底栖动物多样性与生态质量评价

董建宇¹, 沈晓龙¹, 曾鸿滨¹, 王学锋^{1,2}

1. 广东海洋大学 水产学院, 广东 湛江 524088

2. 广东海洋大学/水生生物博物馆, 广东 湛江 524088

摘要: 潮间带是海陆生态系统的过渡地带, 对人类活动干扰较为敏感。为探究不同人类活动下北部湾江山半岛潮间带大型底栖动物多样性, 并揭示其底栖生态质量, 于 2023 年秋季 (11 月) 和 2024 年春季 (4 月) 分别对江山半岛白龙尾和白浪滩 2 个潮间带断面开展了大型底栖动物调查, 分析其种类组成、栖息密度、生物量、优势种及生物多样性, 并用海洋生物指数 (AZTI Marine Biotic Index, AMBI) 和多变量海洋生物指数 (M-AMBI) 对生态质量进行了评估。结果显示, 共采集到大型底栖动物 87 种, 其中软体动物 41 种, 环节动物 21 种和节肢动物 19 种, 其他类群动物 6 种; 春季大型底栖动物的平均栖息密度、生物量和香农多样性指数均低于秋季; 相对重要性指数 (Index of Relative Importance, IRI) 结果显示, 2 个断面优势种存在明显的季节更替且无共有优势种。AMBI 和 M-AMBI 评估结果表明, 虽然白龙尾断面受到的扰动整体略高于白浪滩断面, 但总体而言, 2 个断面的生态质量均处于良好水平。

关键词: 大型底栖生物; 潮间带; 生态质量评价; 生物指数; 北部湾; 防城港

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):



Diversity of macrobenthos and evaluation of ecological quality in intertidal zone of Jiangshan Peninsula, Beibu Gulf

DONG Jianyu¹, SHEN Xiaolong¹, ZENG Hongbin¹, WANG Xuefeng^{1,2}

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

2. Guangdong Ocean University/Museum of Aquatic Organisms, Zhanjiang 524088, China

Abstract: Intertidal zone is a transitional zone between marine and terrestrial ecosystems, which is sensitive to human activities. To explore the diversity of macrobenthos in the intertidal zone of Jiangshan Peninsula under different disturbances of human activity and evaluate its benthic ecological quality, we carried out a survey on macrobenthos in November 2023 (Autumn) and April 2024 (Spring) in two intertidal transects (Bailongwei and Bailangtan) in Jiangshan Peninsula, Beibu Gulf. We analyzed the species composition, density, biomass, dominant species and biodiversity of macrobenthos, and evaluated the ecological quality status of these two intertidal transects by using the AZTI Marine Biotic Index (AMBI) and multivariate AMBI (M-AMBI). The results showed that a total of 87 taxa of macrobenthos were collected, among which Mollusks were the most abundant (41 species), followed by Annelida (21 species), Arthropoda (19 species), and other groups (Six species). The average density, biomass and Shannon diversity index of macrobenthos in spring were lower than those in autumn. The results of the

收稿日期: 2024-11-25; 修回日期: 2025-02-12

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金 (2022A1515110957); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (42306159); 亚洲合作资金项目“中国与印度尼西亚近海海洋生态牧场技术合作研究” (12500101200021002); 亚洲合作资金项目“中国与南海周边国家现代渔业合作” (102125241620040000001); 广东海洋大学科研启动经费资助项目 (060302022302); 广东海洋大学大学生创新创业训练计划项目 (CXXL2024008); 广东海洋大学本科生创新团队项目资助 (CCTD201803)

作者简介: 董建宇 (1993—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为大型底栖生物与生态学。E-mail: dongjianyu@gdou.edu.cn

通信作者: 王学锋 (1980—), 男, 教授, 博士, 研究方向为渔业资源和海洋生态。E-mail: xuefeng1999@126.com

relative importance index (IRI) indicate that there was an obvious change in the dominant species of macrobenthos in the two intertidal transects across the season. The results of the AMBI and M-AMBI indexes show that although the disturbance at the Bailongwei transect is slightly higher than that at the Bailangtan transect, the overall ecological quality of both transects is generally at a good level.

Keywords: Macrobenthos; Intertidal zone; Ecological quality assessment; Biotic index; Beibu Gulf; Fangchenggang

潮间带作为海陆交汇的关键区域,是最敏感的生态系统之一,其生物多样性和生态环境复杂多变,受自然与人为因素共同影响^[1-2]。大型底栖动物是潮间带重要生物类群之一,其分布与变化直接反映潮间带的生态状况^[3-5]。大型底栖动物种类丰富,活动范围有限且对环境变化敏感,作为生态系统中的关键消费者,它们在物质循环、能量流动和环境污染监测方面发挥着重要作用,是评估生态系统健康和底栖环境质量的理想指示生物^[6-7]。研究潮间带大型底栖动物的种类组成及其生物多样性,对评估潮间带环境变化态势,解析潮间带生态系统的内在规律具有重要意义。

防城港市坐落于广西壮族自治区南部,地处中国大陆海岸线最西南端,南濒北部湾。江山半岛作为广西最大的半岛,位于防城港市西湾与珍珠湾之间,具有独特的沿海沿边优势。随着江山半岛区域经济发展一体化,人口迅速增加,人类活动明显增大,亟需评估其对潮间带生物多样性和生态系统的影响。李永强^[8]报道了北部湾(广西段)潮间带大型底栖动物现状;许铭本等^[9]指出邻近江山半岛的北仑河口北岸潮间带 2/3 的断面环境质量为中度污染,其大型底栖动物群落受到中等程度扰动;赖廷

和等^[10]通过评估大型底栖动物的多样性水平,指出防城港河口湾潮间带生态系统整体处于中度扰动状态;汪玮^[11]研究了广西北部湾潮间带大型底栖动物与环境因子的关系。然而,对于江山半岛的大型底栖动物的研究却鲜有报道。因此,本研究聚焦于北部湾防城港江山半岛潮间带,旨在通过对不同季节不同潮间带断面大型底栖动物的研究,查明江山半岛潮间带大型底栖动物的多样性现状,揭示其受扰动水平,并评估其生态质量状态,以期江山半岛潮间带生态保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本研究区域位于广西壮族自治区防城港市江山半岛(图 1),其中,白龙尾潮间带断面(108°12'57.67"E、21°29'52.89"N)位于江山半岛最南部,底质类型为多砾石的沙滩,周围分布有养殖池塘和厂棚,附近为著名的怪石滩,每年吸引众多游客前来露营和摄影等,人类活动相对较为频繁;白浪滩潮间带断面(108°17'52.45"E、21°32'19.96"N)位于江山半岛潮间带中部,底质类型为砂质沙滩,是滨海旅游休闲景区之一,游客活动相对较为频繁。

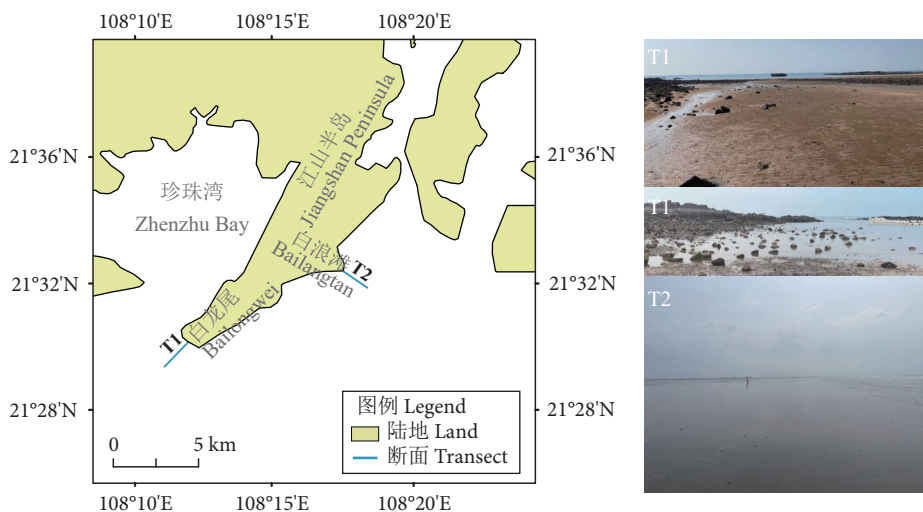


图1 北部湾江山半岛潮间带大型底栖动物采样断面

Fig. 1 Sampling transects of macrobenthos in intertidal zone of Jiangshan Peninsula, Beibu Gulf

1.2 取样方法

本研究分别于 2023 年 11 月 (秋季) 和 2024 年 4 月 (春季) 在北部湾防城港江山半岛潮间带设置了 2 个断面, 即白龙尾潮间带断面 (T1) 和白浪滩潮间带断面 (T2); 各断面依据潮汐区带分布, 于高潮区设 2 个站位 (H1—H2), 中潮区设 4 个站位 (M1—M4), 低潮区设 2 个站位 (L1—L2), 并于退大潮时段, 开展大型底栖动物样品采集。采用 25 cm×25 cm×30 cm 规格的定量样方框, 每站位随机采集 4 个样方。采样时, 首先收集样框内地表底栖动物, 随后挖掘至 30 cm, 通过 0.5 mm 孔径筛网筛选大型底栖动物。所得样品即时以 5% 中性甲醛溶液固定, 带回实验室, 使用体视显微镜 (尼康 SMZ25) 进行种类鉴定, 使用电子天平称质量 (0.001 g)。每个站位 4 个样方数据汇总后进行计算分析。样品采样与处理参照 GB 12763.6—2007 《海洋调查规范》第六部分——海洋生物调查执行。

1.3 生物多样性指数

生物多样性指数采用 Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、Margalef 种类丰富度指数 (D) 以及 Pielou 种类均匀度指数 (J') 进行计算, 公式分别为:

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i \tag{1}$$

$$D = (S - 1) / \log_2 N \tag{2}$$

$$J' = H' / \log_2 S \tag{3}$$

式中: P_i 为第 i 个物种的个体数占有所有物种个体总数比例; N 为所有物种总个体数; S 为样本中物种数目。

1.4 相对重要性指数 (Index of Relative Importance, IRI)

采用 IRI 计算大型底栖动物相对重要性, 当某一物种的 IRI>1 000 时, 则判定该物种为优势种, IRI 的计算公式为:

$$IRI = (N + W) \times F \tag{4}$$

式中: N 为该物种个体数占有所有物种个体总数的百分比; W 为该物种的质量占有所有物种个体总质量的百分比; F 为该物种出现的站位数量占有所有调查站位数百分比。

1.5 海洋生物指数 (AZTI Marine Biotic Index, AMBI) 和多变量海洋生物指数 (M-AMBI)

AMBI 是基于群落中对环境压力耐受性不同的大型底栖动物物种及其相对比例计算得到^[12]。参照 AMBI 软件 2024 年 10 月更新的物种名录, 根据大型底栖动物对污染的耐受性可以将其划分为 5 个生态组, 即敏感种 (EGI)、不敏感种 (EGII)、耐受种 (EGIII)、二阶机会种 (EGIV) 和一阶机会种 (EGV)。其中, EGI 组对污染高度敏感, EGV 组对污染高度耐受。AMBI 值的范围为 0~7, 数值越高, 表明群落受到的扰动越严重, 生态质量健康状况越差。根据 AMBI 阈值可以将其分为 5 个等级 (表 1)。AMBI 的计算公式为:

$$AMBI = 0 \times EGI + 1.5 \times EGII + 3 \times EGIII + 4.5 \times EGIV + 6 \times EGV \tag{5}$$

式中: EGI—EGV 分别为敏感种、不敏感种、耐受种、二阶机会种和一阶机会种在群落中的百分比。

M-AMBI 是在 AMBI 的基础上融合了生物多样性指数和丰富度指数得到, 其值范围为 0~1, 数值越高, 表明生态质量越好^[13]。根据 M-AMBI 可以将底栖生境质量分为 5 个不同的等级 (表 1)。

1.6 统计分析

大型底栖动物多样性指数使用 R v4.3.2 中的 “vegan” 包中的 diversity() 函数进行计算; IRI 使用 Excel 2021 软件通过公式进行计算; AMBI 和 M-AMBI 使用 AMBI v6.0 软件进行计算; 单因素方差分析 (One-way ANOVA) 使用 R v4.3.2 中 anova() 函数进行分析; 采样地图采用 ArcMap 10.8 软件进行绘制。使用 Origin 2022 软件绘图。

表1 不同生态质量等级的海洋生物指数和多变量海洋生物指数阈值
Table 1 AMBI and M-AMBI thresholds for different ecological quality levels

| 海洋生物指数阈值 AMBI threshold | 扰动等级 Disturbance level | 多变量海洋生物指数阈值 M-AMBI threshold | 生态质量状况 Ecological quality status |
|----------------------------|---------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| 0.0<AMBI≤1.2 | 未扰动 Undisturbed | 0.77<M-AMBI≤1.00 | 优 Excellent |
| 1.2<AMBI≤3.3 | 轻度扰动 Slightly disturbed | 0.53<M-AMBI≤0.77 | 良 Good |
| 3.0<AMBI≤5.0 | 中度扰动 Moderately disturbed | 0.38<M-AMBI≤0.53 | 一般 Fair |
| 5.0<AMBI≤6.0 | 重度扰动 Heavily disturbed | 0.20<M-AMBI≤0.38 | 差 Poor |
| 6.0<AMBI≤7.0 | 极度扰动 Extremely disturbed | 0<M-AMBI≤0.20 | 劣 Bad |

2 结果

2.1 大型底栖动物群落组成

春、秋季江山半岛潮间带共鉴定大型底栖动物 87 种。其中软体动物最多 (41 种, 47.13%), 其次为环节动物 (21 种, 24.14%) 和节肢动物 (19 种, 21.84%), 其他类群动物较少 (6 种, 6.90%)。春季共鉴定大型底栖动物 39 种, 以软体动物最多 (20 种), 其次为环节动物 (11 种) 和节肢动物 (7 种), 其他类群动物较少 (1 种); 秋季共鉴定大

型底栖动物 66 种, 同样以软体动物最多 (28 种), 其次为节肢动物 (17 种) 和环节动物 (15 种), 其他类群动物较少 (6 种)。T1 断面春、秋季调查共鉴定出大型底栖动物 54 种, 其中软体动物 21 种, 环节动物 11 种, 节肢动物 16 种, 其他类群动物 6 种。T2 断面共鉴定出大型底栖动物 51 种, 其中软体动物 24 种, 环节动物 17 种, 节肢动物 9 种, 其他类群动物 1 种。各季节和各断面大型底栖动物种类组成及其占比如图 2 所示。

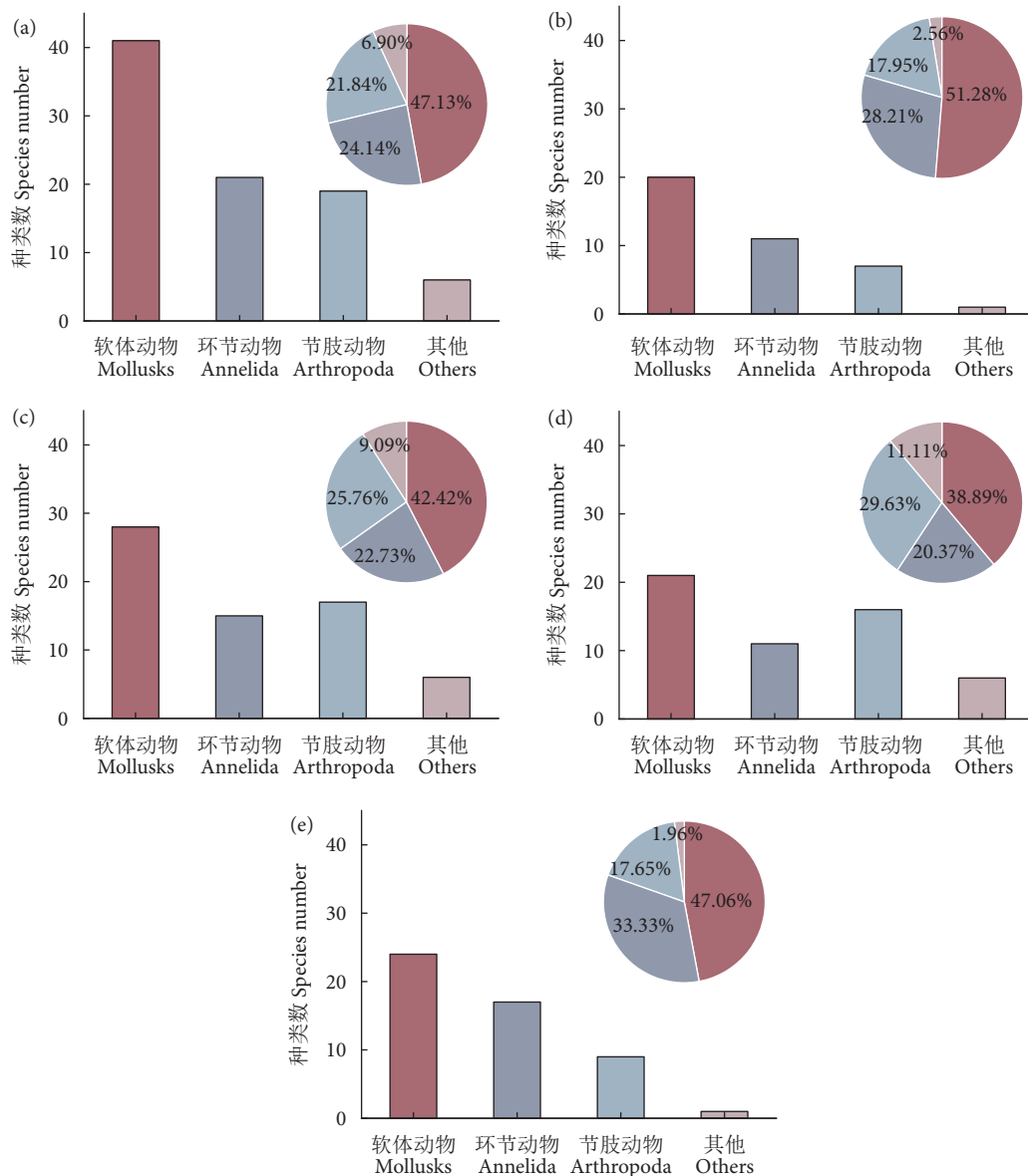


图2 春、秋季江山半岛潮间带大型底栖动物种类组成

注: a. 春、秋季汇总; b. 春季; c. 秋季; d. T1 断面; e. T2 断面。

Fig. 2 Species composition of macrobenthos in intertidal zone of Jiangshan Peninsula in spring and autumn

Note: a. Sum of spring and autumn; b. Spring; c. Autumn; d. Transect T1; e. Transect T2.

2.2 栖息密度与生物量

T1 断面春季大型底栖动物的栖息密度介于 0~

84 个·m⁻², 生物量介于 0~417.10 g·m⁻²; 秋季的栖息密度介于 80~320 个·m⁻², 生物量介于 9.90~

519.71 g·m⁻²。其中, 春、秋季大型底栖动物的平均栖息密度均以低潮区为最高, 生物量均以中潮区为最高, 且春季各潮带的平均栖息密度和平均生物量均低于秋季。T2 断面春季大型底栖动物的栖息密度介于 36~336 个·m⁻², 生物量介于 36.95~318.19 g·m⁻²; 秋季的栖息密度介于 48~368 个·m⁻², 生物量介于 13.10~113.81 g·m⁻²。其中, 春、秋季大型底

栖动物的平均栖息密度均以低潮区为最高, 春季生物量以低潮区为最高, 秋季生物量则以中潮区为最高, 高潮区平均生物量在春、秋季均低于其他潮区。春、秋季 2 个潮间带各站位的大型底栖动物栖息密度和生物量如表 2 所示。ANOVA 显示春、秋季 2 个潮间带断面大型底栖动物栖息密度和生物量均无显著性差异 ($p>0.05$)。

表2 春、秋季江山半岛潮间带大型底栖动物栖息密度与生物量
Table 2 Abundance and biomass of macrobenthos at each station in intertidal zone of Jiangshan Peninsula in spring and autumn

| 站 位 Station | 春季 Spring | | | | 秋季 Autumn | | | |
|-------------------|--|---|--|---|--|---|--|---|
| | T1 断面 Transect T1 | | T2 断面 Transect T2 | | T1 断面 Transect T1 | | T2 断面 Transect T2 | |
| | 密度 Abundance/ (个·m ⁻²) | 生物量 Biomass/ (g·m ⁻²) | 密度 Abundance/ (个·m ⁻²) | 生物量 Biomass/ (g·m ⁻²) | 密度 Abundance/ (个·m ⁻²) | 生物量 Biomass/ (g·m ⁻²) | 密度 Abundance/ (个·m ⁻²) | 生物量 Biomass/ (g·m ⁻²) |
| L1 | 40 | 24.35 | 96 | 40.44 | 80 | 33.04 | 96 | 13.10 |
| L2 | 52 | 3.31 | 48 | 40.53 | 136 | 18.10 | 112 | 23.25 |
| M1 | 28 | 417.10 | 36 | 36.95 | 220 | 246.01 | 104 | 113.81 |
| M2 | 16 | 3.86 | 84 | 90.88 | 176 | 519.71 | 200 | 53.00 |
| M3 | 12 | 6.27 | 72 | 95.17 | 116 | 9.90 | 48 | 112.05 |
| M4 | 0 | 0 | 76 | 39.06 | 320 | 481.70 | 72 | 59.97 |
| H1 | 84 | 26.87 | 36 | 53.20 | 264 | 66.95 | 368 | 87.57 |
| H2 | 40 | 12.24 | 336 | 318.19 | 240 | 65.06 | 80 | 49.89 |
| 均值±标准差 Mean±SD | 34±25 | 61.75±134.63 | 98±92 | 89.3±89.28 | 194±76 | 180.06±197.96 | 135±98 | 64.08±35.24 |

2.3 大型底栖动物多样性

春季江山半岛潮间带大型底栖动物的 H' 介于 0.46~2.92, 均值为 1.82±0.74; D 介于 0.46~2.11, 均值为 1.20±0.49; J' 介于 0.23~1.00, 均值为 0.78±0.23。秋季江山半岛潮间带大型底栖动物的 H' 、 D 和 J' 分别介于 1.51~3.63、0.73~2.73 和 0.51~0.95, 均值分别为 2.76±0.59、1.95±0.65 和 0.79±0.11。各站位大型底栖动物多样性如表 3 所示。ANOVA 结果显示, T1 断面春、秋季大型底栖动物的 H' 、 D 和 J' 均无显著性差异 ($p>0.05$); T2 断面春季大型底栖动物的 H' 和 D 均显著低于秋季 ($p<0.05$), 而 J' 在 2 个季节则无显著性差异 ($p>0.05$)。

2.4 优势种

IRI 结果表明春季江山半岛潮间带断面 IRI>1 000 的大型底栖动物优势种共有 4 种; 其中 T1 断面的优势种为疣滩栖螺 (*Batillaria sordida*) 和粒花

冠小月螺 (*Lunella coronata*); T2 断面的优势种为韦氏毛带蟹 (*Dotilla wichmanni*) 和斧文蛤 (*Meretrix lamarckii*)。秋季大型底栖动物优势种共有 3 种, 其中 T1 断面的优势种有 2 种, 分别为日本和美虾 (*Nihonotrypaea japonica*) 和扁平蛛网海胆 (*Arachnoides placenta*); T2 断面的优势种仅有 1 种即文蛤 (*Meretrix meretrix*)。

2.5 生态质量

春、秋季江山半岛潮间带各站位大型底栖动物生态功能组的组成如图 3 所示。春季 T1 断面大型底栖动物总体以不敏感种为主, 平均占比 (40.76±26.61)%, 其次为敏感种, 平均占比 (38.16±25.98)%, 耐受种占比较少, 未发现二阶机会种和一阶机会种。T2 断面各站位大型底栖动物以不敏感种占绝对优势, 平均占比 (75.85±18.77)%, 其次为敏感种, 平均占比 (22.38±17.55)%, 耐受种仅出现在 1 个站位, 未发现二阶机会种和一阶机会种。

表3 春、秋季江山半岛潮间带各站位大型底栖动物多样性指数

Table 3 Diversity indexes of macrobenthos at each station in intertidal zone of Jiangshan Peninsula in spring and autumn

| 断面 Transect | 站位 Station | 春季 Spring | | | 秋季 Autumn | | |
|----------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | H' | D | J' | H' | D | J' |
| T1 | L1 | 2.92 | 2.11 | 0.97 | 2.55 | 1.65 | 0.81 |
| | L2 | 2.65 | 1.89 | 0.88 | 2.95 | 2.06 | 0.77 |
| | M1 | 2.24 | 1.42 | 0.96 | 2.95 | 2.65 | 0.72 |
| | M2 | 1.50 | 1.00 | 0.95 | 3.06 | 2.54 | 0.77 |
| | M3 | 1.58 | 1.26 | 1.00 | 1.87 | 2.08 | 0.51 |
| | M4 | — | — | — | 2.13 | 0.73 | 0.92 |
| | H1 | 1.41 | 0.91 | 0.61 | 2.14 | 1.16 | 0.83 |
| | H2 | 0.92 | 0.60 | 0.58 | 1.51 | 0.79 | 0.65 |
| | 均值±标准差 Mean±SD | 1.89±0.67 | 1.31±0.50 | 0.85±0.16 | 2.40±0.53 | 1.71±0.70 | 0.75±0.12 |
| T2 | L1 | 1.89 | 1.09 | 0.73 | 3.10 | 2.18 | 0.81 |
| | L2 | 1.55 | 0.84 | 0.78 | 3.37 | 2.50 | 0.88 |
| | M1 | 2.42 | 1.58 | 0.94 | 3.63 | 2.55 | 0.93 |
| | M2 | 0.55 | 0.46 | 0.35 | 3.28 | 2.48 | 0.77 |
| | M3 | 2.33 | 1.20 | 0.9 | 2.61 | 1.12 | 0.87 |
| | M4 | 2.69 | 1.88 | 0.85 | 3.03 | 2.16 | 0.95 |
| | H1 | 2.20 | 1.26 | 0.95 | 2.55 | 1.84 | 0.65 |
| | H2 | 0.46 | 0.47 | 0.23 | 3.46 | 2.73 | 0.86 |
| | Mean±SD | 1.76±0.79 | 1.10±0.47 | 0.72±0.26 | 3.13±0.36 | 2.20±0.48 | 0.84±0.09 |

注：—，未采集到底栖动物。

Note: —, No macrobenthos was collected.

秋季 T1 断面大型底栖动物生态功能组总体以不敏感种、敏感种和耐受种为主，平均占比分别为 $(34.05 \pm 31.12)\%$ 、 $(32.34 \pm 30.43)\%$ 和 $(32.09 \pm 26.11)\%$ ；一阶机会种 [小头虫 (*Capitella* sp.)] 平均占比比较小 $[(1.52 \pm 2.20)\%]$ ，未发现二阶机会种；T2 断面大型底栖动物主要以不敏感种和敏感种为主，平均占比分别为 $(46.71 \pm 13.45)\%$ 和 $(40.71 \pm 17.95)\%$ ，耐受种平均占比为 $(12.56 \pm 10.71)\%$ ，未发现二阶机会种和一阶机会种。

基于 AMBI 的春、秋季江山半岛潮间带各站位受扰动状况评估结果如图 4 所示。春季 T1 断面各站位的 AMBI 介于 0.5~2.25，均值为 1.24 ± 0.59 。根据其评价阈值标准，L1、M1 和 M3 等 3 个站位处于“未扰动”状态，L2、M2、H1 和 H2 等 4 个站位均处于受到“轻度扰动”状态。T2 断面各站位 AMBI 介于 0.56~1.46，均值为 1.19 ± 0.26 。其中 M1 与 M3 站位处于“未扰动”的理想状态，其他 6 个站位则处于“轻度扰动”状态。T1 断面 AMBI 的均值略高于 T2 断面，表明其受到的扰动相对较高，但 ANOVA 结果显示二者无显著性差异 ($p=0.84$)。就不同潮区而言，春季江山半岛 AMBI 均值：高潮区 (1.37 ± 0.11) > 低潮区 (1.22 ± 0.41) > 中潮

区 (1.12 ± 0.55)。

秋季 T1 断面各站位的 AMBI 介于 0.34~2.55，均值为 1.57 ± 0.77 。根据其评价阈值标准，L2 和 M3 站位 (25%) 处于“未扰动”状态，其他 6 个站位 (75%) 均处于“轻度扰动”状态。T2 断面的 AMBI 介于 0.54~1.76，均值为 1.08 ± 0.39 ，表明整体生态系统处于较为稳定的状态，其中 L1 和 H2 站位被判定为“轻度扰动”状态，其他 6 个站位则处于“未扰动”的理想状态。与春季类似，秋季 T1 断面 AMBI 均值高于 T2 断面，表明其受到的扰动相对较高，但 ANOVA 结果显示二者无显著性差异 ($p=0.16$)。就不同潮区而言，秋季江山半岛 AMBI 均值：高潮区 (1.41 ± 0.38) > 中潮区 (1.35 ± 0.79) > 低潮区 (1.18 ± 0.55)。

春、秋季江山半岛潮间带各站位 M-AMBI 评估结果如图 5 所示。T1 断面各站位的 M-AMBI 介于 0.46~0.91，均值为 0.65 ± 0.15 。其中 M2 与 H2 站位的底栖生态质量处于“一般”的状态，L2 和 L1 站位处于“优”的状态，其他 3 个站位的底栖生态质量均处于“良”的状态。T2 断面的 M-AMBI 介于 0.46~0.87，均值为 0.68 ± 0.14 。其中，M1、M3 和 M4 站位的底栖生态质量处于

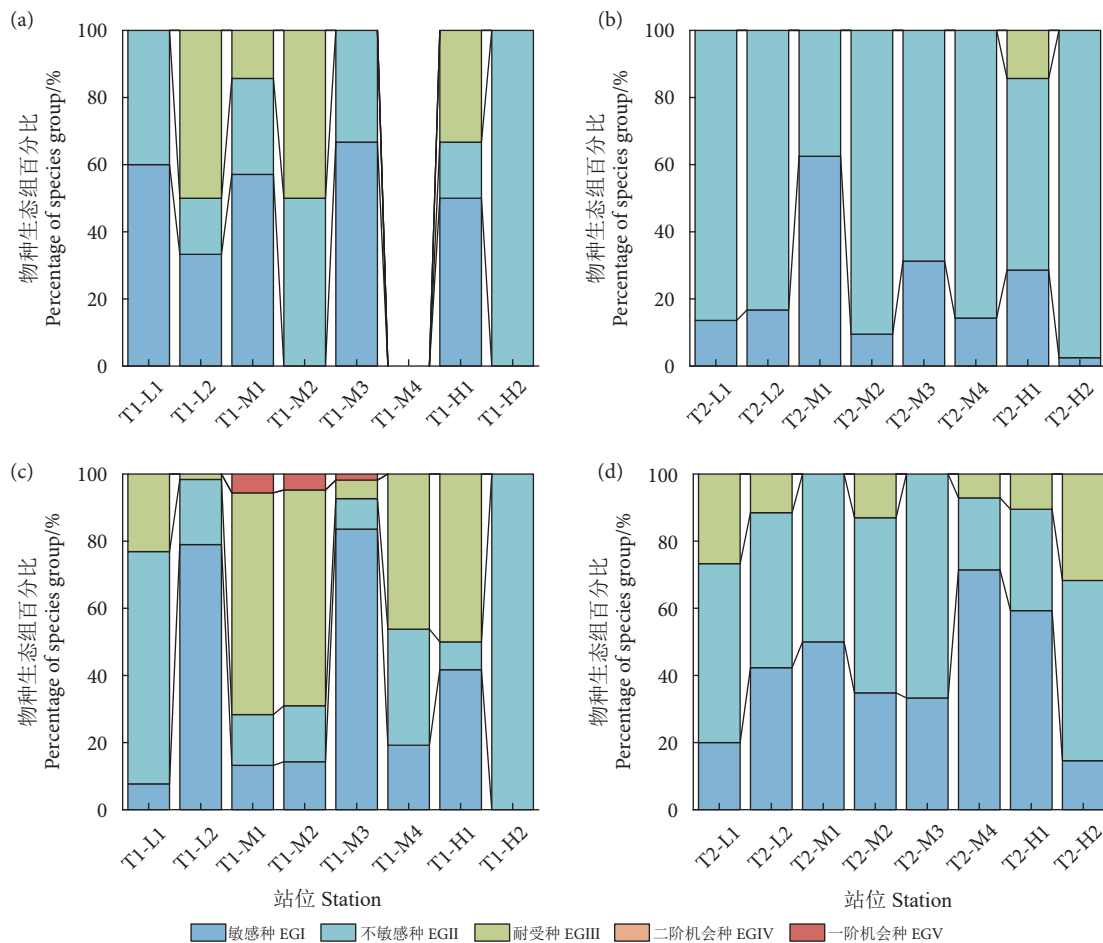


图3 春、秋季江山半岛潮间带各站位大型底栖动物生态组占比

注: a. 春季白龙尾潮间带物种生态组百分比; b. 春季白浪滩潮间带物种生态组百分比; c. 秋季白龙尾潮间带物种生态组百分比; d. 秋季白浪滩潮间带物种生态组百分比。

Fig. 3 Proportion of ecological groups of macrobenthos at each station in intertidal zone of Jiangshan Peninsula in spring and autumn

Note: a. Proportion of species groups in the intertidal zone of Bailongwei in spring; b. Proportion of species groups in the intertidal zone of Bailagntan in spring; c. Proportion of species groups in the intertidal zone of Bailongwei in autumn; d. Proportion of species groups in the intertidal zone of Bailagntan in autumn.

“优”的状态, L1、L2 和 G1 站位处于“良”的状态, 其他 2 个站位的生态质量处于“一般”的状态。T2 断面 M-AMBI 均值略高于 T1 断面, 表明前者生态质量相对较高, 但 ANOVA 结果显示二者无显著性差异 ($p=0.71$)。就不同潮区而言, 春季江山半岛 M-AMBI 均值: 高潮区 (0.57 ± 0.10) < 中潮区 (0.67 ± 0.15) < 低潮区 (0.76 ± 0.11)。

秋季 T1 断面各站位的 M-AMBI 介于 0.51~0.88, 均值为 0.68 ± 0.12 。根据评价结果, H2 站位处于“一般”的状态, L2 和 M2 站位处于“优”的状态, 其他 5 个站位均处于“良”的状态。T2 断面各站位的 M-AMBI 介于 0.54~0.84, 均值为 0.75 ± 0.09 。根据评价结果, L2、M1、M2 和 H2 站位处于“优”的状态, 而其他 4 个站位则处于“良”的状态。与春季类似, 秋季 T2 断面 M-AMBI

均值高于 T1 断面, 表明前者生态质量相对较高, 但 ANOVA 结果显示二者无显著性差异 ($p=0.23$)。就不同潮区而言, 秋季江山半岛 M-AMBI 均值: 高潮区 (0.67 ± 0.13) < 中潮区 (0.72 ± 0.10) < 低潮区 (0.75 ± 0.09)。

3 讨论

3.1 大型底栖动物种类组成及多样性

本研究共鉴定出大型底栖动物 87 种, 其中春季 39 种, 秋季 66 种; 软体动物占比最多, 其次为环节动物和节肢动物。这与环北部湾其他邻近潮间带的调查结果一致, 如北仑河口北岸的竹山半岛, 在秋季 3 个潮间带断面共记录大型底栖动物 63 种, 其中以软体动物最多^[9]; 防城河河口的老鼠墩和白浪滩潮间带断面 4 个季度分别共鉴定出大型

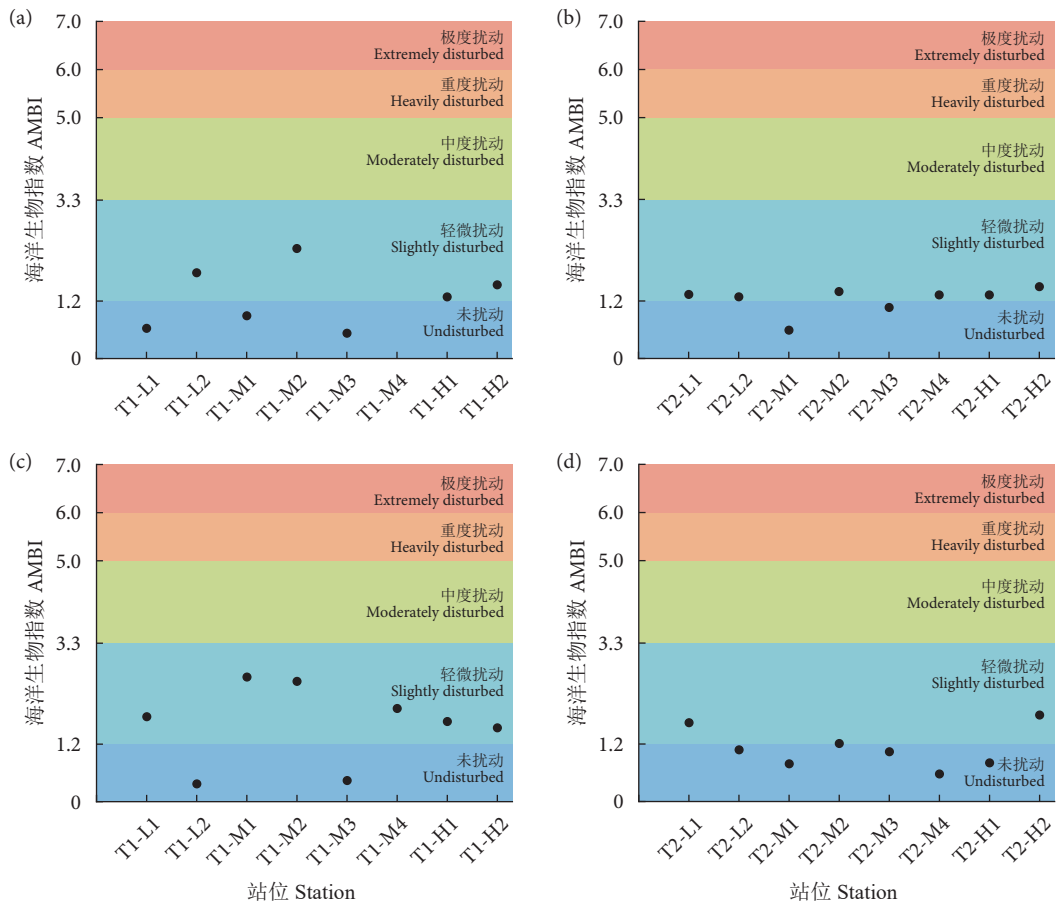


图4 春、秋季江山半岛潮间带各站位 AMBI 指数

注: a. 春季白龙尾潮间带 AMBI; b. 春季白浪滩潮间带 AMBI; c. 秋季白龙尾潮间带 AMBI; d. 秋季白浪滩潮间带 AMBI。

Fig. 4 AMBI index of each station in intertidal zone of Jiangshan Peninsula in spring and autumn

Note: a. AMBI in the intertidal zone of Bailongwei in spring; b. AMBI in the intertidal zone of Bailagntan in spring; c. AMBI in the intertidal zone of Bailongwei in autumn; d. AMBI in the intertidal zone of Bailagntan in autumn.

底栖动物 48 和 108 种, 其中也均以软体动物种类占比最高^[10]; 北海冯家江入海口夏季 5 个潮间带断面共鉴定出大型底栖动物 31 种, 亦以软体动物居多^[14]。这可能与研究区域、断面数量和采样频次以及底质类型等有关^[15-16], 软体动物尤其是双壳类多偏好栖息于含沙量相对较高的区域, 这与上述潮间带多为沙质底质的结果一致。

北部湾江山半岛潮间带大型底栖动物春、秋季平均栖息密度 ($119 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}$) 和平均生物量 ($101.98 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) 略低于环北部湾其他区域, 如北仑河口^[9]、防城港河口^[10] 以及冯家江河口^[14] 潮间带, 这主要与该区域春季调查的潮间带大型底栖动物栖息密度和生物量相对较低有关。若仅就秋季而言, 江山半岛潮间带大型底栖动物平均栖息密度和平均生物量则处于环北部湾潮间带中等水平。在生物多样性方面, 江山半岛潮间带大型底栖动物春季明显低于秋季, 这主要与春季采集到的大型底栖动物物种数量

较少和丰度较低有关。与环北部湾周边区域相比, 秋季江山半岛潮间带大型底栖动物生物多样性指数 (2.76 ± 0.59) 则明显高于其他潮间带, 如北仑河口北岸潮间带 (2.27 ± 0.67) 和北海市冯家江入海口潮间带 (2.52 ± 0.42), 同时也高于钦州湾 (1.80) 和北部湾北部海域等潮下带区域^[17-18]。

3.2 底栖生态质量状况评价

群落中大型底栖动物敏感物种比例常被用作环境质量的评估指标, 较高的敏感物种比例通常表明环境条件良好^[19-20]; 而随着环境质量的恶化, 如有机质富集或富营养化加剧, 群落中的耐受种则会慢慢增多, 逐渐取代原本占据主导地位的敏感种, 成为群落中新的优势种^[21-23]。在本研究中, 春、秋季 T1 和 T2 断面大型底栖动物均以敏感种和不敏感种为主, 耐受种和机会种占比较小, 并且其优势种 (如斧文蛤、文蛤和扁平蛛网海胆等) 也多属于敏感种或不敏感种, 反映出江山半岛潮间带受到的

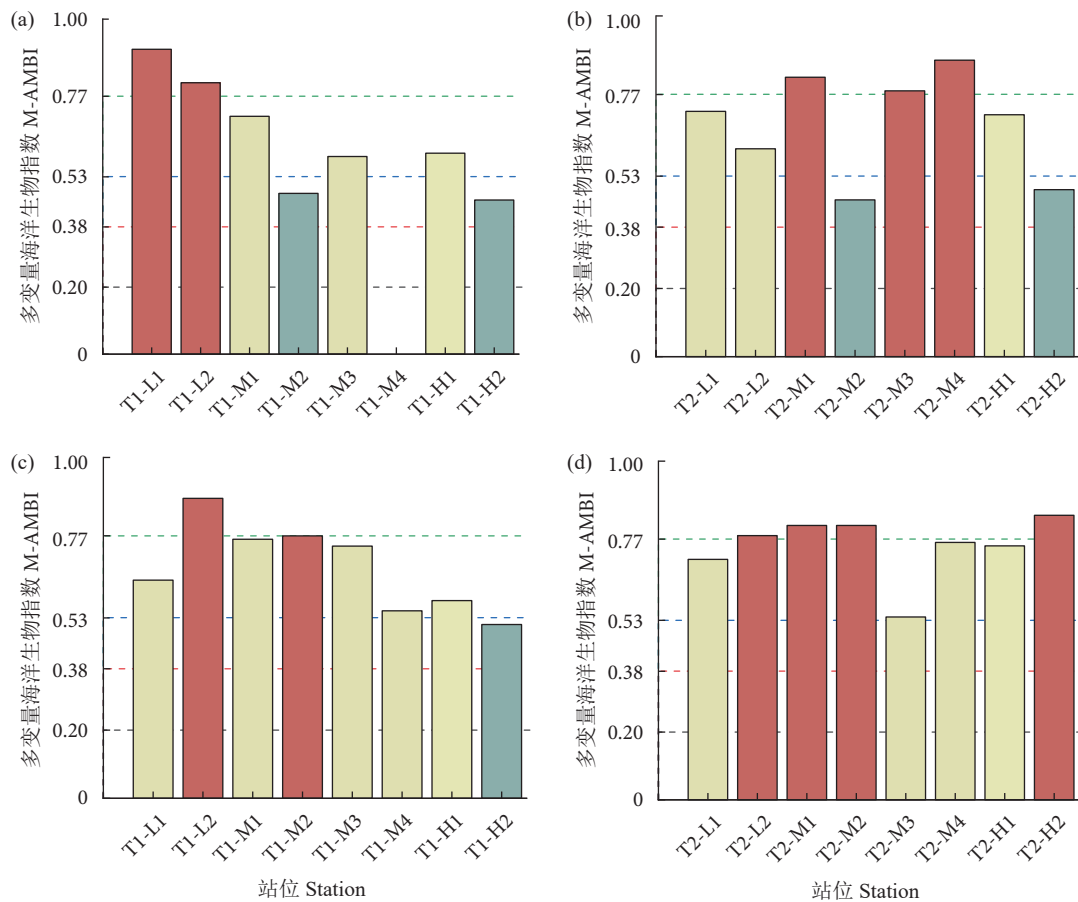


图5 春、秋季江山半岛潮间带各站点 M-AMBI 指数

注: a. 春季白龙尾潮间带 M-AMBI; b. 春季白浪滩潮间带 M-AMBI; c. 秋季白龙尾潮间带 M-AMBI; d. 秋季白浪滩潮间带 M-AMBI。

Fig. 5 M-AMBI indices of each station in the intertidal zone of Jiangshan Peninsula in spring and autumn.

Note: a. M-AMBI in the intertidal zone of Bailongwei in spring; b. M-AMBI in the intertidal zone of Bailagntan in spring; c. M-AMBI in the intertidal zone of Bailongwei in autumn; d. M-AMBI in the intertidal zone of Bailagntan in autumn.

扰动较轻, 底栖生态质量整体处于较好水平。

为了更准确和直观评估江山半岛潮间带大型底栖动物群落受到的扰动水平及其底栖生态质量, 本研究应用 AMBI 和 M-AMBI 对其进行评估。AMBI 的评估结果显示, 春、秋季江山半岛潮间带未受到扰动和受到轻微扰动的站点占比分别为 41.94% 和 58.06%; 未发现受到中等及以上扰动的站点, 表明研究区域整体受到的外界扰动或压力较小, 生态质量处于良好水平。而就不同区域而言, 白浪滩潮间带的生态质量优于白龙尾潮间带, 这可能与白龙尾潮间带受到的外源扰动压力较大有关, 外源压力越高 (如人类活动或环境污染), 生境受到的扰动就越严重, 生态质量就越差^[24-26]。M-AMBI 的评估结果显示, 江山半岛春、秋季潮间带生态质量处于“优”、“良”和“一般”的站点占比分别为 35.48%、48.39% 和 16.13%, 表明江山半岛潮间带生态质量出现了一定程度的退化, 但整体仍处于相

对较好的水平。对于部分站点而言, M-AMBI 的评估结果与 AMBI 呈现一定差异, 评估的生态等级略低, 这主要是因为 M-AMBI 是在 AMBI 的基础上, 进一步整合了生物多样性指数和丰富度指数所得, 其对生态质量的评价更严格, 且相对于 AMBI 更不易受群落单一物种丰度偏高的影响^[27-29]。

与 AMBI 的评估结果类似, M-AMBI 同样也显示 T2 断面的生态质量优于 T1, 暗示白龙尾整体受到的外部扰动或环境压力要大于白浪滩。笔者认为, 这主要与白龙尾潮间带的生境特征、周边环境以及人为干扰有关。白龙尾潮间带沙滩多有砾石分布, 砾石的存在挤占了一些营埋栖生活的大型底栖动物的生存空间, 可能会导致部分物种减少。本研究在该区域的 1 个站点未采集到大型底栖动物也反映了这一情况。白龙尾周边还存在一些养殖池塘和厂棚, 养殖尾水的排放也可能对白龙尾潮间带大型底栖动物产生一定的影响^[30-31]。此外, 白龙尾

潮间带采样区域附近是著名景点怪石滩及摄影基地, 每年吸引大量游客, 特别是自驾游客, 区域内的人为扰动程度较高; 较高的人类活动如高强度踩踏和对底栖生物的挖掘等会造成大量底栖生物死亡, 生物多样性降低, 进而导致生态质量健康下降^[32-33]。这可能也是导致白龙尾潮间带生态质量退化的原因之一。相对而言, 白浪滩是砂质沙滩, 沙滩较为平坦, 周边几乎没有养殖池塘及工厂等, 但是随着江山半岛旅游度假区的开发建设, 游客数量也呈逐年增加趋势。尽管其生态质量稍优于白龙尾潮间带, 但是 AMBI 和 M-AMBI 评估结果也表明, 其大型底栖动物群落已经受到了一定的扰动, 部分站位的生态质量有所退化, 尤其是春季。因此, 有必要强化对人类活动干扰的管控, 增加对海滩的保护力度, 从而提升海滩整体的生态质量与健康水平。

4 结论

北部湾防城港江山半岛潮间带大型底栖动物种类丰富, 生物多样性较高, 并且存在空间和季节上的差异, 总体表现出白浪滩断面高于白龙尾断面, 秋季资源量高于春季。AMBI 和 M-AMBI 显示江山半岛潮间带大型底栖动物群落处于“轻度扰动”或“未扰动”的状态, 个别站位扰动程度相对较高, 但底栖生态质量总体处于良好水平。白龙尾潮间带的整体生态质量略低于白浪滩潮间带, 可能与其环境条件以及受到的人为干扰相对较高有关。本研究为江山半岛潮间带生态系统保护和管理提供了科学依据, 并且强调了可以针对不同断面特性实施差异化保护策略。

参考文献:

- [1] SIMEONI C, FURLAN E, PHAM H V, et al. Evaluating the combined effect of climate and anthropogenic stressors on marine coastal ecosystems: insights from a systematic review of cumulative impact assessment approaches[J]. *Sci Total Environ*, 2023, 861: 160687.
- [2] COSTA L L, FANINI L, ZALMON I R, et al. Cumulative stressors impact macrofauna differentially according to sandy beach type: a meta-analysis[J]. *J Environ Manag*, 2022, 307: 114594.
- [3] CHECON H H, CORTE G N, ESMAEILI Y S, et al. Sandy beach bioindicators: how each benthic taxon tells its own story[J]. *Ocean Coast Manag*, 2023, 240: 106645.
- [4] 李北兴, 黎傲雪, 董建宇, 等. 湛江湾潮间带大型底栖动物的

- 群落结构及其受干扰程度[J]. *南方水产科学*, 2023, 19(2): 12-20.
- [5] 李雪, 李亚芳, 陈清华, 等. 大亚湾潮间带大型底栖动物群落结构特征及其影响因素[J]. *南方水产科学*, 2023, 19(3): 42-50.
- [6] HAN W H, HAN Q X. Macrobenthic indicator species: from concept to practical applications in marine ecology[J]. *Glob Ecol Conserv*, 2024, 55: e03262.
- [7] YANG W, LI X X, SUN T, et al. Macrobenthos functional groups as indicators of ecological restoration in the northern part of China's Yellow River Delta Wetlands[J]. *Ecol Indic*, 2017, 82: 381-391.
- [8] 李永强. 北部湾(广西段)潮间带大型底栖动物的调查研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2011: 20-100.
- [9] 许铭本, 赖俊翔, 张荣灿, 等. 北仑河口北岸潮间带大型底栖动物生态特征及潮间带环境质量评价[J]. *广东海洋大学学报*, 2015, 35(1): 57-61.
- [10] 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.
- [11] 汪玮. 广西北部湾潮间带大型底栖动物与环境因子的关系[D]. 钦州: 北部湾大学, 2024: 107-123.
- [12] BORJA A, FRANCO J, PEREZ V. A marine biotic index to establish the ecological quality of soft-bottom benthos within European estuarine and coastal environments[J]. *Mar Pollut Bull*, 2000, 40(12): 1100-1114.
- [13] MUXIKA I, BORJA Á, BALD J. Using historical data, expert judgement and multivariate analysis in assessing reference conditions and benthic ecological status, according to the European Water Framework Directive[J]. *Mar Pollut Bull*, 2007, 55(1/2/3/4/5/6): 16-29.
- [14] 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.
- [15] 董建宇, 邱堃龙, 曾鸿滨, 等. 鉴江口潮间带春季底栖双壳贝类多样性与群落结构特征初探[J]. *海洋科学*, 2024, 48(5): 13-21.
- [16] 葛广玉, 周丽青, 井浩, 等. 长山列岛潮间带贝类群落结构季节变化[J]. *渔业科学进展*, 2024, 45(2): 199-209.
- [17] 王迪, 陈丕茂, 马媛. 钦州湾大型底栖动物生态学研究[J]. *生态学报*, 2011, 31(16): 4768-4777.
- [18] 穆文丹, 裴丽伊, 朱祖浩, 等. 北部湾北部海域大型底栖动物的群落结构特征[J]. *南方农业学报*, 2024, 55(2): 299-310.
- [19] 李文豪, 于晓清, 蒋增杰, 等. 基于 AMBI 和 M-AMBI 法的桑沟湾底栖生态环境质量评价[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2024, 54(6): 55-67.
- [20] 蒋文贤, 张明伟, 刘晓收. 不同污染压力对青岛董家口邻近海域大型底栖动物群落的影响[J]. *生态学报*, 2024, 44(17): 7830-7843.
- [21] KODAMA K, LEE J H, OYAMA M, et al. Disturbance of benthic macrofauna in relation to hypoxia and organic enrichment in a eutrophic coastal bay[J]. *Mar Environ Res*, 2012, 76: 80-89.
- [22] SHI Y, HE Y X, SHIN P K S, et al. Responses of biological traits of

- macrobenthic fauna to a eutrophication gradient in a semi-enclosed bay, China[J]. *Mar Environ Res*, 2023, 189: 106072.
- [23] WU H Y, FU S F, HU W J, et al. Response of different benthic biotic indices to eutrophication and sediment heavy metal pollution, in Fujian coastal water, East China sea[J]. *Chemosphere*, 2022, 307: 135653.
- [24] DONG J Y, ZHAO L L, YANG X L, et al. Functional trait responses of macrobenthos to anthropogenic pressure in three temperate intertidal communities[J]. *Front Mar Sci*, 2021, 8: 756814.
- [25] LIANG J, SHU M Y, HUANG H R, et al. Using benthic indices to assess the ecological quality of sandy beaches and the impact of urbanization on sandy beach ecosystems[J]. *J Disper Sci Technol*, 2024, 12(3): 487.
- [26] DONG J Y, WANG X F, BIDEgain G, et al. Assessment of the benthic ecological quality status (EcoQs) of Laizhou Bay (China) with an integrated AMBI, M-AMBI, BENTIX, BO2A and feeding evenness index[J]. *Environ Monit Assess*, 2023, 153: 110456.
- [27] BORJA A, BALD J, FRANCO J, et al. Using multiple ecosystem components, in assessing ecological status in Spanish (Basque Country) Atlantic marine waters[J]. *Mar Pollut Bull*, 2009, 59 (1/2/3): 54-64.
- [28] PAUL J, NESTLERODE J A, JARVIS B M. Evaluating the effectiveness of M-AMBI with other biotic indexes in a temperate estuary[J]. *Mar Pollut Bull*, 2023, 193: 115194.
- [29] 刘旭东, 王振钟, 汪进生, 等. 基于多指数分析确定胶州湾底栖生态状况的参考条件[J]. *海洋环境科学*, 2023, 42(4): 597-603.
- [30] GARAFFO G V, JAUBET M L, LLANOS E N, et al. Assessing functional diversity of macrobenthic assemblages in sewage-affected intertidal shores[J]. *Int Aquat Res*, 2018, 10(4): 333-347.
- [31] LIAO Y B, SHOU L, JIANG Z B, et al. Effects of fish cage culture and suspended oyster culture on macrobenthic communities in Xiangshan Bay, a semi-enclosed subtropical bay in eastern China [J]. *Mar Pollut Bull*, 2019, 142: 475-483.
- [32] WU X W, ZOU X Q, ZHONG C Q, et al. Assessing the response of sandy-beach macrobenthos to recreation and the ecological status of the beach ecosystem at Liandao, China[J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 2020, 41(1): e12580.
- [33] CORTE G N, CHECON H H, ESMAELI Y S, et al. Evaluation of the effects of urbanization and environmental features on sandy beach macrobenthos highlights the importance of submerged zones[J]. *Mar Pollut Bull*, 2022, 182: 113962.