

三亚蜈支洲岛海洋牧场近岛区底表大型底栖动物群落结构及评价

马文刚, 夏景全, 魏一凡, 尹洪洋, 覃乐政, 刘相波, 胡雪晴, 许强, 李秀保, 王爱民

海南大学海洋学院, 南海海洋资源利用国家重点实验室, 海南 海口 570228

摘要: 三亚蜈支洲岛海洋牧场拥有丰富的岛礁生物资源。为掌握海洋牧场近岛区的底表大型底栖动物群落组成和分布特征及其影响因子、评估海洋牧场底栖生态系统健康状况, 本研究于 2020—2021 年进行了底表大型无脊椎动物群落季节变动的调查。结果表明: 近岛珊瑚礁区共鉴定出棘皮动物、软体动物、节肢动物 3 大门类 90 种, 其中秋季种类数最多为 55 种, 夏季种类数最少为 16 种; 底表大型底栖动物的年平均丰度为 $0.87 \pm 0.26 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$, 年平均生物量为 $76.99 \pm 34.32 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。群落聚类分析(cluster)与多维排序尺度分析(multidimensional Scaling, MDS)表明, 该区域群落结构季节性差异不显著, 各站位间群落结构受沉积物性质以及人类活动的频繁程度的影响, 形成北部与南部区域 2 个聚类组。全年的物种丰富度指数 d 为 2.7 ± 1.16 , 多样性指数 H' 为 3.14 ± 0.88 , 均匀度指数 J 为 0.76 ± 0.11 。基于多样性指数 H' 及多变量海洋生物指数(Multivariate-AZTI's marine biotic index, M-AMBI)评价指标, 海洋牧场近岛区环境除夏季为轻度污染外, 其他季节均为无污染状态。采用动物丰度与生物量比较曲线(abundance-biomass curves, ABC 曲线)法评价底栖动物群落稳定性状况得出, 除冬季以外, 其他季节底表大型底栖动物群落受到一定程度干扰, 尤其是夏季群落结构稳定性较低。建议应持续关注底表大型底栖动物群落变动, 调整、优化涉海休闲旅游活动, 以保证蜈支洲岛海洋牧场生态系统的长期健康与稳定。

关键词: 海洋牧场; 珊瑚礁; 底表大型底栖动物; 群落结构; 环境因子

中图分类号: Q958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5470(2022)03-0135-12

Community structure evaluation of epifaunal macrozoobenthos in the near-island waters of marine ranching in Wuzhizhou Island, Sanya

MA Wengang, XIA Jingquan, WEI Yifan, YIN Hongyang, QIN Lezheng, LIU Xiangbo, HU Xueqing, XU Qiang, LI Xiubao, WANG Aimin

College of Marine Science, Hainan University, State Key Laboratory of Marine Resources Utilization in South China Sea, Haikou 570228, China

Abstract: Marine ranching in Wuzhizhou Island was rich in reef biological resources. The composition, distribution characteristics, and influencing factors of epifaunal macrozoobenthos community in the near-island area of marine ranching were studied; and the health status of marine ranching ecosystem was evaluated, based on samples obtained from the epibenthic macroinvertebrates community during 2020–2021. Ninety species of echinoderms, molluscs, and arthropods were

收稿日期: 2021-09-15; 修订日期: 2021-11-23。林强编辑

基金项目: 国家重点研发计划课题(2019YFD0901304); 国家自然科学基金(42076097); 海南省自然科学基金(2019RC070)

作者简介: 马文刚(1997—), 男, 山东省济南市人, 硕士研究生, 从事群落生态学研究。email: 956497289@qq.com

通信作者: 许强, email: xuqianghnu@hainanu.edu.cn; 李秀保, email: xiubaoli@163.com

Received date: 2021-09-15; Revised date: 2021-11-23. Editor: LIN Qiang

Foundation item: National Key R&D Program of China (2019YFD0901304); National Natural Science Foundation of China (42076097); Hainan Natural Science Foundation (2019RC070)

Corresponding author: XU Qiang, email: xuqianghnu@hainanu.edu.cn; LI Xiubao, email: xiubaoli@163.com

identified in the near-island coral reef area, of which 55 species were the most in autumn and 16 species were the least in summer. The average annual abundance of epifaunal macrozoobenthos was $0.87 \pm 0.26 \text{ ind. m}^{-2}$, and the average annual biomass was $76.99 \pm 34.32 \text{ g m}^{-2}$. Community cluster analysis and Multi-dimensional scaling analysis showed that the seasonal difference of community structure in this area was not significant. The community structure among stations was affected by the nature of sediments and the frequency of human activities, forming two cluster groups in the north and south areas. The Margalef's richness index (d) was 2.7 ± 1.16 , Shannon-Wiener index (H') was 3.14 ± 0.88 , and Pielou's evenness index (J) was 0.76 ± 0.11 . Based on the diversity evaluation index and Multivariate-AZTI's marine biotic index (M-AMBI), the environment of marine ranching near the island was not polluted in most seasons except for summer when it was lightly polluted. The stability of macrozoobenthos community was evaluated by abundance-biomass curves. We conclude that the epifaunal macrozoobenthos community was disturbed to a certain extent in all seasons except winter, especially in summer. We should continue to pay attention to the changes of epifaunal macrozoobenthos community and adjust recreational tourism activities so as to ensure the long-term health and stability of marine ranching ecosystem in Wuzhizhou Island.

Key words: marine ranching; coral reef; epifaunal macrozoobenthos; community structure; environmental factors

现代化海洋牧场建设已成为国家促进渔业产业转型升级、缓解近海渔业资源衰退的重要举措。南海热带海域幅员辽阔,生物资源种类丰富,休闲旅游产业发达,发展热带岛礁型海洋牧场潜力巨大,以增殖放流、发展休闲旅游业及修复珊瑚礁生境为主要目标,可实现资源可持续利用与生态环境优良协同发展(许强等, 2018; 黄晖等, 2020)。三亚蜈支洲岛海洋牧场是我国第一个热带休闲旅游型海洋牧场国家级示范区,近岛珊瑚礁区域为休闲渔业开发的核心区,通过开展珊瑚修复和渔业资源养护,显著促进了珊瑚礁生态系统的恢复,也为各类礁栖生物提供了丰富的饵料和栖息场所(Soares et al, 2021)。

大型底栖动物群落多样性是珊瑚礁生态系统健康的重要指标之一(吴莹莹等, 2021),开展大型底栖动物群落结构监测与评价对于评估海洋牧场的生态修复作用至关重要(杨东等, 2017)。珊瑚礁区的大型底栖动物(macrozoobenthos)多为无脊椎动物,主要包括节肢动物甲壳类、软体动物、腔肠动物、环节动物多毛类和棘皮动物5个类群(田胜艳等, 2009),在其摄食和筑巢等活动时,造成的生物扰动会促进有机质的代谢循环产生能流和物流的传递,对生物地球化学循环造成重大影响,促使水层-底栖耦合机制的建立(张志南, 2000)。近年来,全球范围内珊瑚礁生态系统均呈退化趋势,严重扰乱了礁区内大型底栖动物与底栖生境的平衡(李元超等, 2015; 吴钟解等, 2015)。有研究发现,某些底栖动物种类是海洋污染的敏感指示生物,因此许多研究人员将监测大型底栖动物群落组成的改变,作为监控海洋生态系统变化及生态状况评估的主要手段(Von Der Ohe et al, 2013; Azovsky et al, 2019)。

大型底栖动物是海洋食物网中的重要成员(罗章凤等, 2017),是多种肉食性动物的天然食物来源,生物资源量的分布及变动还将直接影响渔业资源的变化(刘帅磊等, 2018),因此大型底栖动物是海洋牧场建设中备受关注的生物类群。目前,国内已有对海洋牧场底栖生物群落的研究,发现海洋牧场建成后,底栖动物资源增加,有效证明了海洋牧场建设工程对生境的改善,并且利于底栖动物群落结构的稳定性,有助于海洋牧场生物资源的可持续利用(陈晨等, 2016; 王言丰等, 2019)。热带休闲旅游型海洋牧场受旅游等人为因素干扰较大,底表大型底栖动物群落很可能会受其影响,因此亟须加强持续的监测评估,分析其变动趋势及人为影响程度。但目前相关研究仅有黄端杰等(2020)对棘皮动物的研究报道。

与此同时,三亚蜈支洲岛海洋牧场靠近琼东沿岸上升流核心区,其近岸珊瑚礁位于我国珊瑚礁过渡区,上升流可以减弱区域内海温上升对珊瑚胁迫的影响,使得岛周珊瑚礁保存了较高的生物多样性(Huang et al, 2020)。蜈支洲岛海洋牧场近岛区底表大型底栖动物群落的研究对于海南近岛珊瑚礁系统健康的评价与保护也具有借鉴意义。

本文研究了蜈支洲岛海洋牧场底表大型底栖动物群落组成和结构及其时空变动,以期探究环境因子变化对群落分布的影响,初步评估水环境状况和生物群落稳定状况,为蜈支洲岛海洋牧场生态系统健康评价提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 调查站位

蜈支洲岛海洋牧场分为近岛区及远岛毗邻区

两部分。毗邻区投放有多处人工鱼礁区, 而近岛区主要为拥有高生物多样性的自然珊瑚礁生态系统, 为整体海洋牧场提供了观光旅游和资源养护等重要功能, 所以本文着重研究近岛区。为充分调查蜈支洲岛近岛区底表大型底栖动物群落状况, 以前

期珊瑚礁生物群落普查结果为基础(李秀保等, 2019), 在近岛区北部和南部近岸区域设置四个站位, 调查站位分布见图 1。蜈支洲岛珊瑚礁分布在水深 3~12m, 因此礁栖大型底栖动物采样选择水深 6~8m 区域进行。

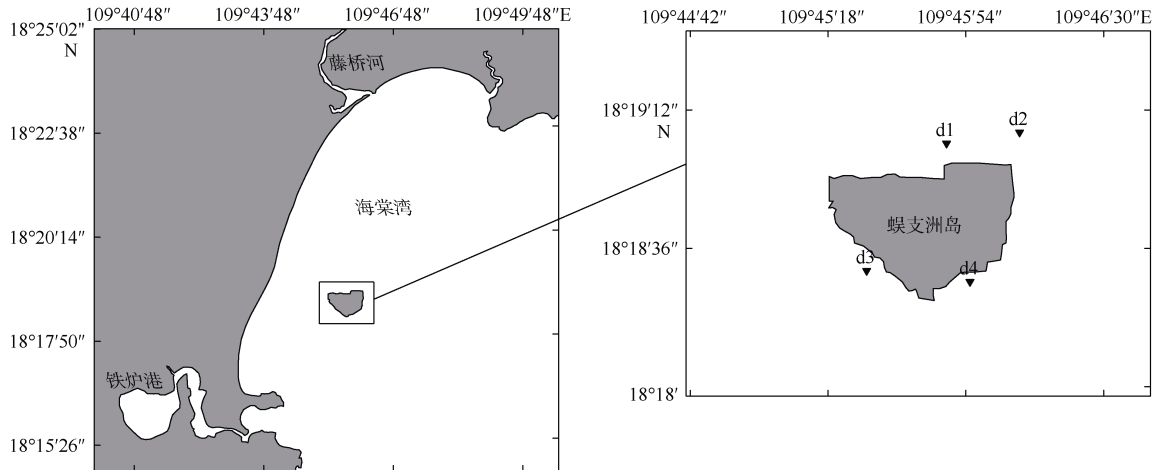


图 1 蜈支洲岛近岛区调查站位(d1—d4)

该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为琼 S(2021)024 号的标准地图制作。图中黑色三角为调查站位

Fig. 1 Map of survey stations (triangles) in the near-island area of Wuzhizhou Island

1.2 调查时间

蜈支洲岛属热带海区, 7—10月台风伴随暴雨灾害频发, 2018—2020 年每月平均降雨量如图 2 所示(数据来源于海南省气象局, 网址: <http://hi.cma.gov.cn/>)。台风期间潜水员不宜作业, 故本研究根据实际情况分别在夏季(2020 年 6 月)、秋季(2020 年 11 月)、冬季(2021 年 1 月)和春季(2021 年 4 月)进行 4 个季度的底表大型底栖动物调查及环境因子采样。

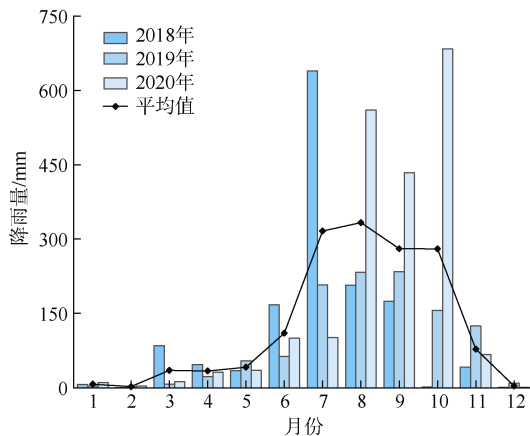


图 2 2018—2020 年三亚市各月份降雨量及平均值

Fig. 2 Monthly rainfall and average values of Sanya during 2018-2020

1.3 调查方法

依据已有珊瑚礁底栖动物调查方法及本文研究

目的, 本研究中底表大型底栖动物(以下简称“大型底栖动物”)特指生活在珊瑚礁区底质表面上肉眼可见的大型底栖动物(Hutchings, 1990; 孙有方等, 2018)。调查采用国际上通用的珊瑚礁区调查方法(黄丁勇等, 2021), 将潜水视频记录及样带采样法相结合, 在各站位根据水深(约 8m)及海底地形设置采样断面, 布设 3 条平行于海岛岸线的 20m 长样带作为采样平行。调查人员手持水下高清摄像机(GoPro 5)沿样带拍摄两侧各 1m 范围内的底栖生境录像, 构成三段 20m×2m 的基准调查范围, 同步采集该区域内的大型底栖动物。采样后 2h 内将样品送至岛上实验室进行生物鉴定、计数和称量工作, 并结合样带视频和现场记录资料汇总统计分析, 将大型底栖动物数量换算为单位面积的丰度(ind·m⁻²), 湿重换算为单位面积的生物量(g·m⁻²)。

用有机玻璃采水器于各站位 1m 深处采集表层水 1L, 避光冷藏保存至实验室抽滤测定营养盐; 采集表层沉积物, 上岸后用铝箔纸包好沉积物样品送检测定沉积物粒度和有机质含量; 各站位表层(海面以下 1~2m)水体温度(*T*)、盐度(*Sal*)和溶解氧(dissolved oxygen, *DO*)等环境参数采用 YSI 6600 型多参数水质监测仪现场测定。

1.4 数据处理与分析

大型底栖动物群落的生物多样性指数: 丰富度

指数 (Margalef index, d)、多样性指数 (Shannon-Weaver index, H')、均匀度指数 (Pielou index, J) 以及优势度 (Y) 计算分别采用如下公式 (董栋等, 2015):

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

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

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

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

式中, S 表示样品中的种类总数, N 表示样品中的生物总个体数, P_i 为第 i 种的个体数与总个体数 N 的比值, n_i 为群落中第 i 个种在空间中的个体数量, f_i 为第 i 个种在各样方中出现频率; 当优势度 $Y \geq 0.02$ 时, 该种为优势种 (徐兆礼等, 1989)。

本文采用生物多样性指数 (H') 和多变量海洋生物指数 (Multivariate-AZTI's marine biotic index, M-AMBI) 对环境质量状况进行初步评价 (林和山等, 2015), 利用丰度与生物量比较曲线 (ABC 曲线) 法对底栖动物群落结构稳定性进行评判 (田胜艳等, 2006)。群落结构的时空差异采用聚类分析 (cluster) 与多维排序尺度分析 (multidimensional scaling, MDS) 进行, 以四季中相对丰度超过 3% 的物种 (减少机会种干扰) 绘制图表划分聚类组; 环境因子与底栖动物群落结构指标相关性分析采用 Spearman 相关性分析法进行, 分析前对大型底栖动物丰度、生物量与环境因子数据利用平方根转化进行均一化预处理。

大型底栖动物的优势度采用微软 Excel 统计计算; 站位图及丰度、生物量分布图采用 Surfer 12 软件绘制; 生物多样性指数、聚类分析和生物量比较曲线 (abundance-biomass curves, ABC 曲线) 分析采用 PRIMER 6 软件分析绘制; M-AMBI 指数采用 AMBI V5.0 软件分析计算; 大型底栖动物丰度与生物量季节性 & 区域性差异, 环境因子和生物群落多样性指

数的季节性差异采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 进行, 使用 SPSS 23 软件。

2 结果与分析

2.1 近岛区环境特征

近岛区四个季度的环境因子统计结果如表 1 所示, 不同季节近岛区北部和南部的环境因子变动如图 3 所示。蜈支洲近岛区水体温度 (T) 季节性变化特征为冬季最低, 受琼东上升流影响夏季水体温度并没有出现显著升温, 与春季和秋季差异不显著; 溶解氧 (DO) 在冬季最高, 秋季受台风和降雨的影响显著低于其他季节。各环境因子的空间分布也有所不同, 近岛区北部的磷酸盐 (P) 和硅酸盐 (Si) 含量在春、秋和冬季高于南部 (图 3c、d); 北部的沉积物有机质含量 (Org) 分布表现为在不同季节均高于南部 (图 3f)。相关性分析的结果显示大型底栖动物的丰度与溶解氧 (DO) 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 生物量同其他环境因子均未呈现出相关性 ($P > 0.05$)。温度和其他多个环境因子具有相关性, 如温度与溶解无机氮 (dissolved inorganic nitrogen, DIN) 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 也与磷酸盐中磷元素呈极显著负相关 ($P < 0.05$)。

进一步对底栖生境调查发现, 蜈支洲岛近岛区北部与南部生境斑块类型差异较大。北部区域造礁石珊瑚和软珊瑚覆盖度为 14.52% 左右, 还包含 80.02% 的砂砾及粉砂—黏土底质类型; 而岛南区域两种底质类型分别占到 41.85% 和 52.84% (李秀保等, 2019; Huang et al, 2020)。

2.2 种类组成和优势种

蜈支洲岛海洋牧场近岛区 4 个季节共采集到大型底栖动物 90 种, 隶属于棘皮动物、软体动物、节肢动物 3 个门类。其中软体动物种类数最高, 达 62 种, 占总种类数的 68.89%; 其次是棘皮动物 (22 种) 和节肢动物 (6 种)。大型底栖动物群落种类组成存在季节性变化, 秋季种类数最为丰富, 有 55 种, 占全

表 1 近岛区水体环境因子季节变化

Tab. 1 Seasonal variation of water environmental factors in coastal area of Wuzhizhou Island

季节	$T/^{\circ}\text{C}$	$\text{DO}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{Chl } a/(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{P}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{Si}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{DIN}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	Md	$\text{Org}/(0.1\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$
夏季	$27.44 \pm 0.70^{\text{ab}}$	$6.51 \pm 0.07^{\text{b}}$	$0.37 \pm 0.08^{\text{ab}}$	$0.001 \pm 0.0002^{\text{b}}$	$0.075 \pm 0.011^{\text{ab}}$	$0.112 \pm 0.011^{\text{b}}$	$1.89 \pm 1.31^{\text{a}}$	$2.60 \pm 0.94^{\text{a}}$
秋季	$27.24 \pm 0.30^{\text{b}}$	$3.84 \pm 0.68^{\text{c}}$	$2.03 \pm 0.34^{\text{a}}$	$0.003 \pm 0.0009^{\text{ab}}$	$0.379 \pm 0.278^{\text{a}}$	$0.347 \pm 0.068^{\text{a}}$	—	$2.23 \pm 0.28^{\text{a}}$
冬季	$22.16 \pm 0.24^{\text{c}}$	$7.25 \pm 0.08^{\text{a}}$	$0.49 \pm 0.29^{\text{b}}$	$0.003 \pm 0.0014^{\text{a}}$	$0.095 \pm 0.013^{\text{ab}}$	$0.324 \pm 0.120^{\text{a}}$	$2.26 \pm 2.47^{\text{a}}$	$2.87 \pm 0.43^{\text{a}}$
春季	$28.10 \pm 0.31^{\text{a}}$	$6.62 \pm 0.17^{\text{b}}$	$0.57 \pm 0.14^{\text{ab}}$	$0.001 \pm 0.0005^{\text{b}}$	$0.030 \pm 0.013^{\text{b}}$	$0.112 \pm 0.027^{\text{b}}$	$2.37 \pm 1.48^{\text{a}}$	$3.10 \pm 0.36^{\text{a}}$

注: “—”表示数据缺失; 同一列中不同字母上标表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)。T: 温度; DO: 溶解氧; Chl a : 叶绿素 a ; P: 磷酸盐-磷元素; Si: 硅酸盐-硅元素; DIN: 溶解无机氮; Md: 中值粒径; Org: 沉积物有机质

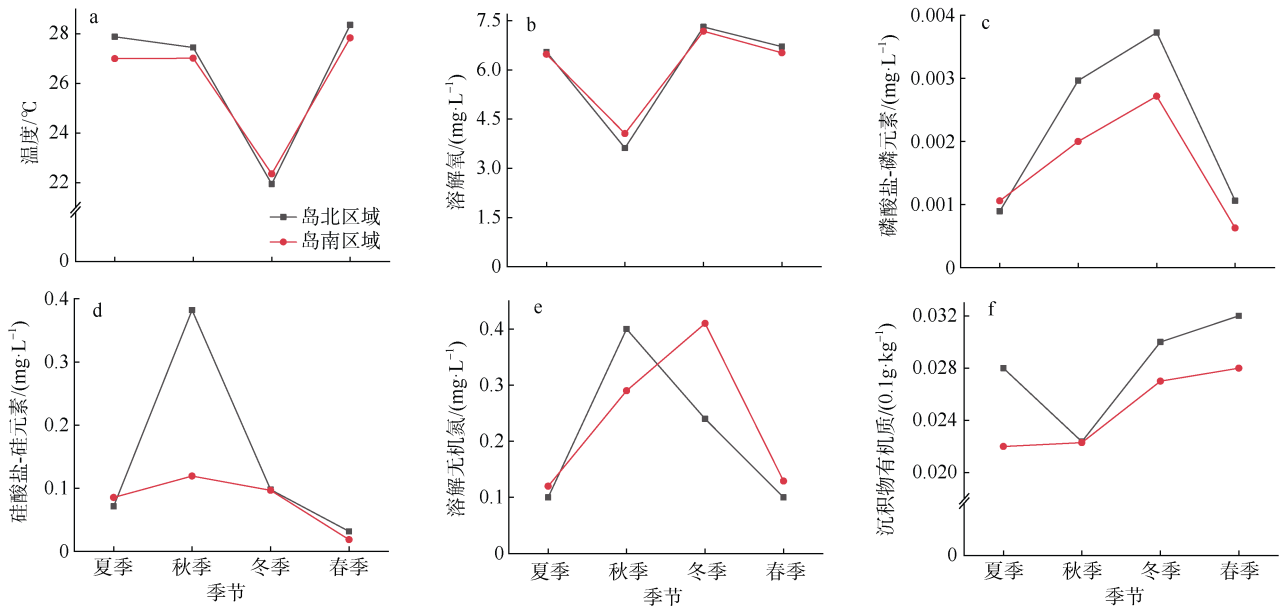


图3 不同季节岛北部与南部区域环境因子差异

Fig. 3 Differences in environmental factors between the north and south areas in different seasons

年大型底栖动物总种类数的 61.11%, 冬季(51 种)大型底栖动物种类数略低于秋季, 夏季发现的种类数最少, 共鉴定出大型底栖动物 2 个门类共 16 种, 仅占全年大型底栖动物种类数的 17.78%。近岛区南、北区域的群落种类组成也存在变化, 四个季节在北部区域采集到的种类数均高于南部(图 4)。

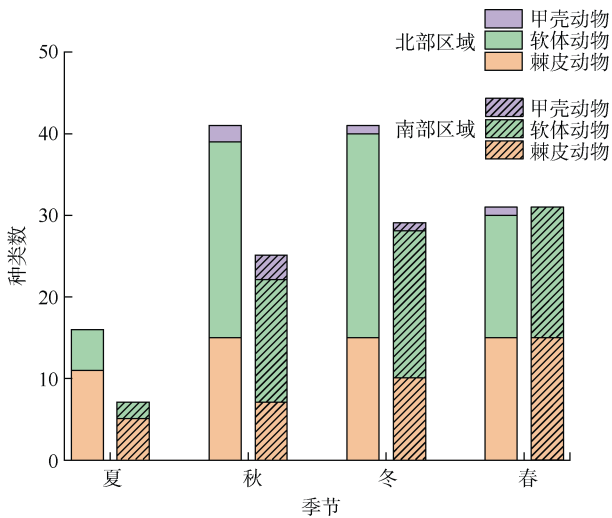


图4 近岛区北部和南部大型底栖动物种类数及其占比

Fig. 4 Species and proportion of macrozoobenthos in the north and south areas near the island

海洋牧场近岛区优势种共 16 种(表 2), 棘皮动物在四个季节均占据优势。冬季优势种最多共 14 种, 角小核果螺(*Drupella cornus*)优势度最高($Y=0.107$); 其次为春季共 10 种, 优势种以红腹海参(*Holothuria*

edulis) ($Y=0.225$)和黑海参(*Holothuria atra*)($Y=0.121$)为主; 秋季有 8 种, 主要优势种同春季一致; 夏季优势种最少有 7 种, 以黑海参($Y=0.305$)和角小核果螺($Y=0.146$)为主。蓝指海星(*Linckia laevigata*)、吕宋棘海星(*Echinaster luzonicus*)、红腹海参、黑海参和金口螺(*Turbo argyrostomus*)是全年优势种。

2.3 丰度和生物量分布

图 5 及图 6 分别为四季各站位的大型底栖动物丰度和生物量分布。大型底栖动物的年平均丰度为 $0.87 \pm 0.26 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$, 夏季大型底栖动物丰度最低(图 5a), 仅有 $0.59 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$, 春季丰度($1.18 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$)为四季中最高(图 5d), 季节间丰度变化的差异不显著($P > 0.05$), 近岛北部区域(d1、d2)的丰度要显著高于南部区域(d3、d4)($P > 0.05$)。棘皮动物是海洋牧场近岛区大型底栖动物群落的优势类群, 只有冬季丰度(51.49%)占比略低, 其他季节其占比都达 70%及以上, 尤其以春季丰度最高, 同全年大型底栖动物丰度在近岛区域的分布一致, 棘皮动物的丰度在北部的两站位要高于南部。

近岛区大型底栖动物年平均生物量为 $76.99 \pm 34.32 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 生物量的季节性变化同丰度的类似。春季($126.28 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)最高(图 6d), 秋季($53.09 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)与夏季($54.03 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)的生物量相近(图 6a、b), 处于较低水平, 生物量季节差异不显著($P > 0.05$), 北部区域(d1、d2)的生物量要显著高于南部区域(d3、d4)($P > 0.05$)。棘皮动物的生物量优势依旧明显, 除冬季

表 2 各季节优势种
Tab. 2 Dominant species in each season

优势种		优势度			
种名	学名	夏季	秋季	冬季	春季
吕宋棘海星	<i>Echinaster luzonicus</i>	0.046	0.042	0.038	0.037
蓝指海星	<i>Linckia laevigata</i>	0.060	0.032	0.043	0.039
蓝环冠海胆	<i>Diadema savignyi</i>	—	—	0.038	0.078
刺冠海胆	<i>Diadema setosum</i>	—	0.049	—	—
冠刺棘海胆	<i>Echinothrix diadema</i>	—	—	0.029	—
红腹海参	<i>Holothuria edulis</i>	0.114	0.225	0.057	0.191
黑海参	<i>Holothuria atra</i>	0.305	0.121	0.060	0.106
绿刺参	<i>Stichopus chloronotus</i>	0.101	—	0.034	0.055
金口蛛螺	<i>Turbo argyrostomus</i>	0.050	0.028	0.047	0.028
塔形扭柱螺	<i>Tectus pyramis</i>	—	—	0.038	—
角小核果螺	<i>Drupella cornus</i>	0.146	—	0.107	0.028
紫栖珊瑚螺	<i>Coralliophila violacea</i>	—	—	0.023	—
焦棘螺	<i>Chicoreus torrefactus</i>	—	—	0.036	—
秉氏海齿花	<i>Comanthus bennetti</i>	—	0.048	0.047	0.094
许氏大羽花	<i>Comanthina schlegeli</i>	—	—	0.023	0.049
小足真寄居蟹	<i>Dardanus pedunculatus</i>	—	0.084	—	—

注: “—”表示非优势种或调查中未发现

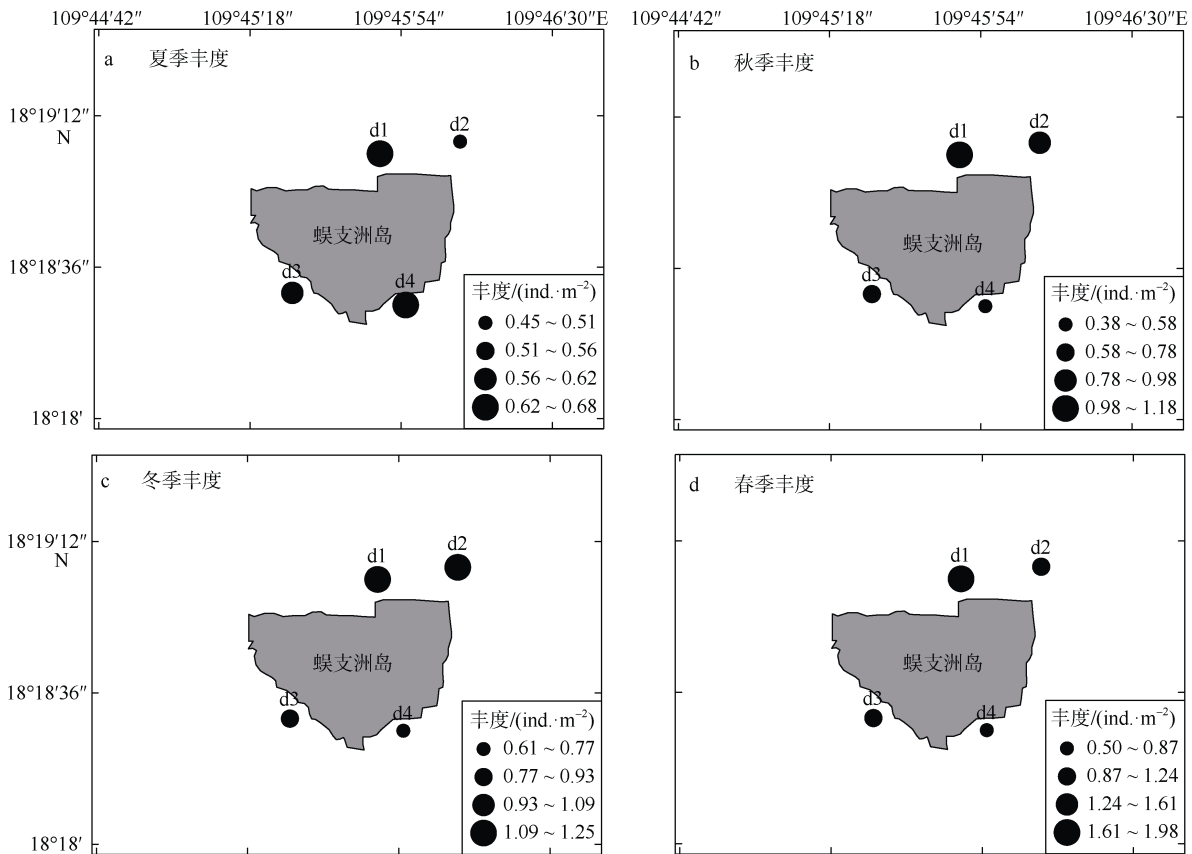


图 5 四季各站位大型底栖动物丰度平面分布图
Fig. 5 Distributions of macrozoobenthos abundance at each station in four seasons

(76.72%)外, 其他三个季节的占比都达到 90%及以上。因棘皮动物生物量及丰度均占比较高, 所以大

型底栖动物的总体丰度及生物量变化趋势同棘皮动物一致。

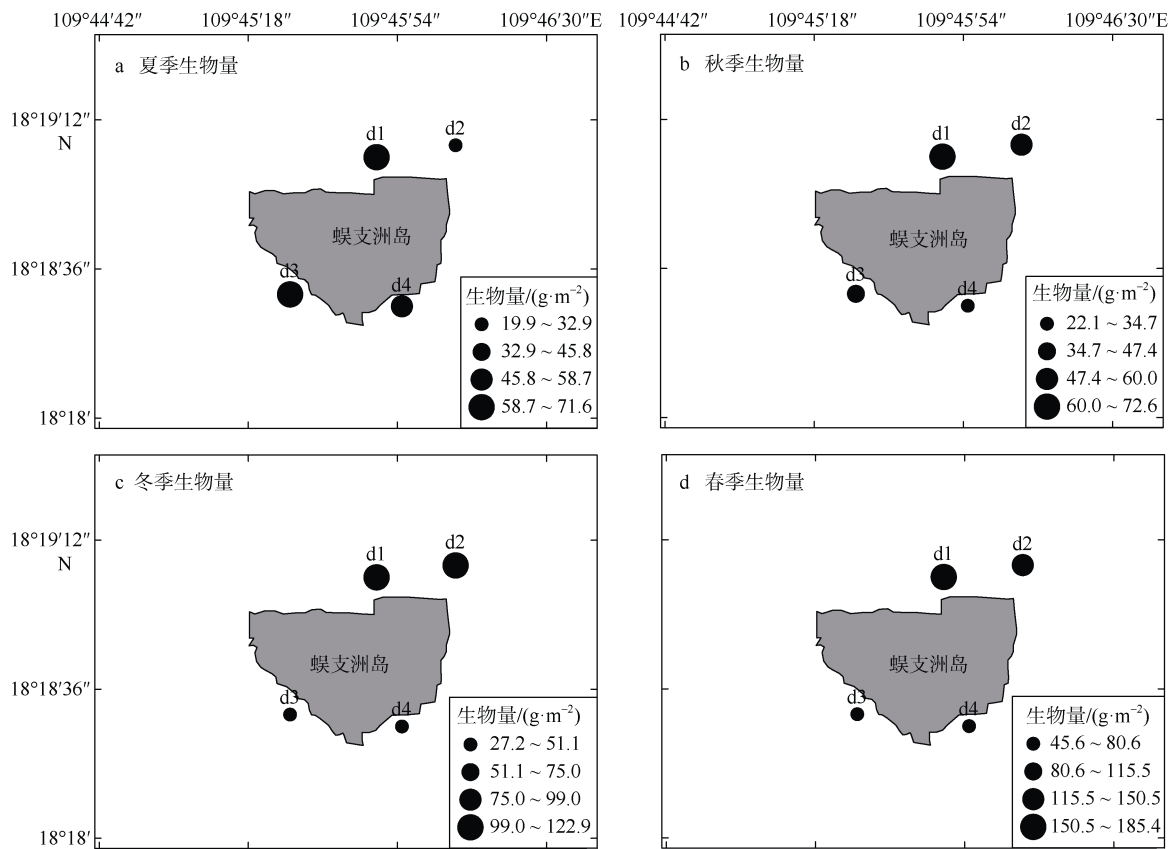


图 6 四季各站位大型底栖动物生物量平面分布图
Fig. 6 Distributions of macrozoobenthos biomass at each station in four seasons

2.4 群落结构空间差异分析

本文采用聚类分析(cluster)与多维排序尺度分析(MDS), 分别以四个季节的不同站位底栖动物群落结构相似性进行分组(图 7)。依据 50%的相似性水平, 四个季节的近岛区底栖动物群落分别可划分为 2 个聚类组, 聚类组间存在较为明显的区域性差异。

大致可划分为近岛区北部两站位(d1、d2)的大型底栖动物群落为一群组, 南部 d3 和 d4 两个站位的大型底栖动物群落为一群组。

北部聚类组的生境状况表现为水体中部分营养盐(P、Si)含量和沉积物有机质含量较高, 底质类型多为砂地, 沉积物粒径偏细, 大型底栖动物的种类

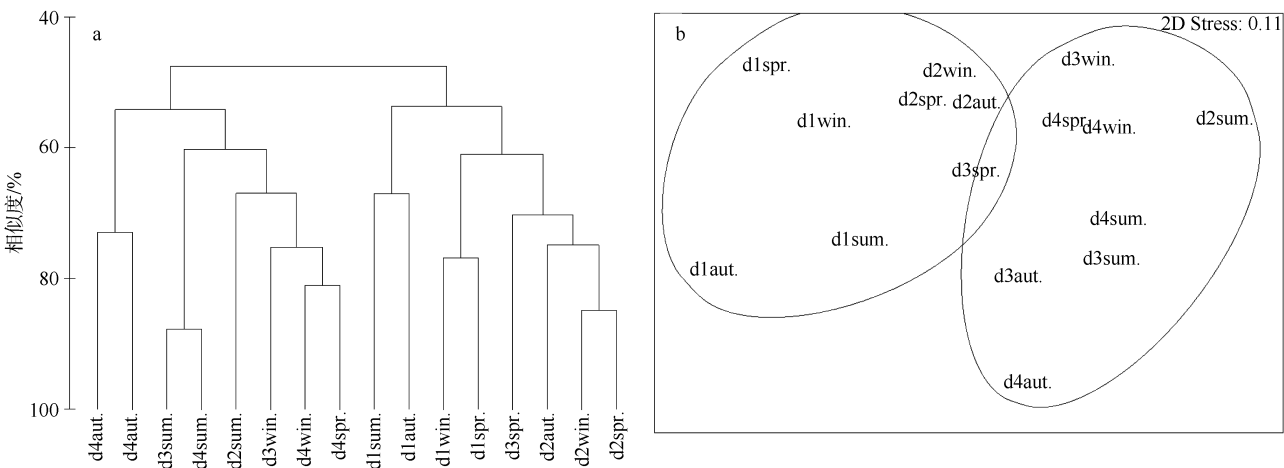


图 7 群落结构的聚类分析(a)与多维排序尺度分析(b)
spr. 春季; sum. 夏季; aut. 秋季; win. 冬季
Fig. 7 Cluster analysis (a) and multi-dimensional scaling (MDS) analysis (b) of community structure

数、丰度和生物量也较丰富,同时人类活动较为密集;南部聚类组环境中的营养物质较北部低,珊瑚覆盖度高,沉积物粒径较大,生物的各项指数也低于北部区域,且人为干扰较少。

2.5 生物多样性指数及 M-AMBI 指数

海洋牧场近岛区四季的生物多样性指数如表 3 所示。 d 的最大值在冬季,为 3.40 ± 0.26 ,显著高于夏季($P < 0.05$),秋季的 d 值在站位间变化最大; J 和 H' 的最大值均出现在冬季,分别为 0.81 ± 0.09 和 3.71 ± 0.52 。四个季节的 J 值无显著差异($P > 0.05$), H'

值为春、秋和冬季显著高于夏季($P < 0.05$)。

根据蔡立哲等(2002)采用的多样性指数(H')与水质污染程度的分级标准,即 H' 值于 2~3 之间时,研究区域属轻度污染; H' 值 > 3 ,该区域为无污染;以及当 M-AMBI 指数介于 0.77~1 时,生态环境质量为高等,介于 0.53~0.77 时为优良(林和山等, 2015)。初步判断蜈支洲岛海洋牧场近岛区的大型底栖动物在春季、秋季和冬季的生物多样性较高,水体无污染,而夏季的生物多样性较低,且水体受到轻度污染影响。

表 3 各季节生物多样性指数及 M-AMBI 指数值

Tab. 3 Biodiversity index and M-AMBI in four seasons

	d	J	H'	水体状况	M-AMBI	水体环境状况
夏季	1.26 ± 0.53^b	0.70 ± 0.10^a	2.14 ± 0.41^b	轻度污染	0.59 ± 0.06^b	优良
秋季	3.11 ± 1.24^{ab}	0.74 ± 0.13^a	3.21 ± 0.93^a	无污染	0.77 ± 0.16^a	高等
冬季	3.40 ± 0.26^a	0.81 ± 0.09^a	3.71 ± 0.52^a	无污染	0.85 ± 0.07^a	高等
春季	3.04 ± 0.99^{ab}	0.79 ± 0.13^a	3.52 ± 0.75^a	无污染	0.82 ± 0.09^a	高等

注: 同一列中不同字母上标表示差异显著($P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著($P > 0.05$)

2.6 群落结构稳定性评价

海洋牧场近岛区四个季节的大型底栖动物 ABC 曲线(图 8)显示冬季的生物量曲线一直在丰度

曲线之上,没有出现交叉现象,仅在两曲线终点处非常接近(图 8c),说明冬季大型底栖动物群落的稳定性最好。而春季、夏季和秋季的两条曲线相距较

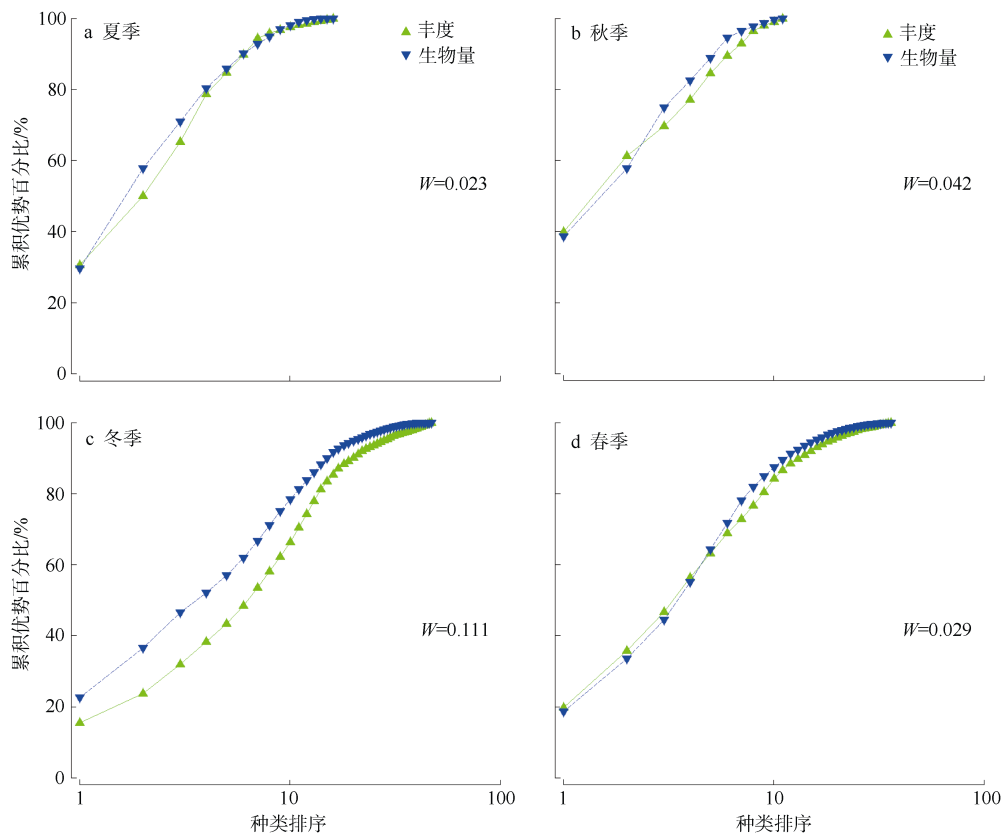


图 8 各季节的大型底栖动物群落 ABC 曲线

W 表示生物量曲线对丰度曲线的优势程度

Fig. 8 ABC curve of macrozoobenthos in four seasons

近, 生物量曲线部分位于丰度曲线下, 两条曲线出现交叉和重叠现象(图 8a、b、d), 说明大型底栖动物群落受到扰动, 群落稳定性有所下降; 夏季的 W 值(0.023)在四季中最低, 且出现两次交叉现象, 群落受到的扰动最为严重。

3 讨论

本研究调查站位间距较大, 覆盖的范围广, 因此近岛区物种数量调查的结果相较于已有研究文献更为丰富(李秀保 等, 2019; 黄端杰 等, 2020)。与三亚珊瑚礁保护区内的其他海域相比, 蜈支洲岛海洋牧场近岛区的大型底栖动物丰度要低于东岛、鹿回头和大东海珊瑚礁保护区的平均丰度($1.36 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$)(孙有方 等, 2018), 也明显低于西岛、亚龙湾和鹿回头($566.29 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$)(董栋 等, 2015), 但大型底栖动物的生物量与该三处相邻海域的调查结果平均值相近($82.15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)且物种具有较高的相似性(董栋 等, 2015; 黄丁勇 等, 2021)。

3.1 大型底栖动物群落结构季节变动

本研究发现夏季海洋牧场近岛区的大型底栖动物丰度($0.59 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$)、生物量($54.03 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)及群落多样性(1.26 ± 0.53)较低, 这可能和夏季岛周出现的季节性冷水上升流造成的底层温度持续偏低有关(Li et al, 2015)。蜈支洲岛位于琼东沿岸上升流区, 在夏季高温时, 上升流能部分缓解水体温度升高, 珊瑚礁区的底层温度能维持在礁栖性生物相对适宜范围内(Li et al, 2012; Huang et al, 2020)。但随着上升流加强, 底层水体温度出现较明显下降(表 1), 并将持续 1~2 周, 琼东上升流期间文昌海域测得底层上升流水体(8m)与表层水体(0m)温差达 5°C 以上(Li et al, 2015)。底层持续的低温会导致与温度相关的一系列环境因子的变化, 从而干扰到大型底栖动物的生存状态, 进而产生群落分布格局的变化。

本研究同时发现因受 2020 年秋季持续台风带来的强降雨造成的水体低氧影响, 秋季大型底栖动物的丰度($0.74 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-2}$)与生物量($53.09 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)也都维持在较低的水平。Rajan 等(2021)研究发现, 地表径流加强伴随的水体低氧会影响底栖生物的生理和繁殖等生命活动, 大型动物如甲壳动物和棘皮动物对 DO 降低相对更敏感。对比发现, 2020 年夏、秋季节蜈支洲岛经历的台风和暴风雨较往年偏多(图 2), 频繁而强烈的风暴潮造成的恶劣海况和上游泄洪使水体浊度较高, DO 含量处于较低值(表 1), 大型底栖动物向离岛深水区等相对稳定的生境迁移(Lunt et al,

2014), 导致近岛礁区的大型底栖动物的生物量出现全年最低值。

3.2 大型底栖动物群落结构空间差异

聚类(cluster)与 MDS 分析结果间的差异性表明, 蜈支洲岛海洋牧场近岛区可划分为北部和南部 2 个聚类组。相较季节间差异, 群落结构的区域性差异更为明显, 北部区域大型底栖动物的丰度及生物量明显偏高, 能够在不同季节形成较大规模的聚类组, 而南部受到部分环境因素限制, 形成另一个聚类组。这可能与近岛南北两侧的沉积物性质以及人类活动的频繁程度差异相关。南部区域为发育良好的珊瑚礁生境, 生物群落稳定性高整体变动较小, 北部区域尚处于恢复阶段, 稳定性略差, 易受环境等因素变化影响。

底栖动物的群落组成与海底沉积物粒径(袁涛萍 等, 2017; Kolyuchkina et al, 2020; Gerasimova et al, 2021)及沉积物的有机质含量(Rajan et al, 2021; Boutoumit et al, 2021)有重要的关系。经鉴定, 海洋牧场近岛区北部区域底质粒径偏细, d1 站位底质多为粉砂, 而其他站位多为粒径大于 $63 \mu\text{m}$ 的粉砂质砂, 棘皮动物与软体动物多分布于沉积物为粉砂—黏土等粒径较细的区域(黄端杰 等, 2020; 全秋梅 等, 2020); 北部区域靠近蜈支洲岛码头和主要娱乐设施, 人类活动较为密集, 各类船艇及休闲潜水活动对水体造成较强的扰动会造成底质营养盐的再悬浮, 同时潜水游客对观赏鱼类的投饵也会带来一定的外源营养(Huang et al, 2020; 许惠丽 等, 2020), 因此水体中营养盐含量及表层沉积物有机质含量在全年大部分时间均高于南部区域(图 3), 为底栖藻类的生长提供了充足营养物质(徐帅帅 等, 2017; Rojas-Montiel et al, 2020)。文献数据表明, 岛北藻皮与钙化藻的覆盖度介于 $19.44\% \sim 35.83\%$ (夏景全, 2021), 海藻来源有机质构成了底栖动物的潜在食物来源, 使得该区域底栖动物丰度及生物量均较南部区域高。相较而言, 近岛区南部海域水质良好, 透明度高, 珊瑚覆盖度要远高于岛北部, 沙质底生境斑块较少。由于海参等棘皮动物对沙质底生境有较强的依赖性, 同时岛南侧近岛区浪大流急, 因此海参等棘皮动物分布较少, 这也与国外学者研究结论一致(Rodríguez-Troncoso et al, 2019)。因此, 岛南部两站位的丰度与生物量相差不大且低于北部区域。

3.3 群落结构稳定性评价

本研究基于 Shannon-Wiener 多样性指数(H')以及 M-AMBI 指数评价环境受污染程度标准(蔡立哲

等, 2002; 林和山 等, 2015), 初步判断蜈支洲岛海洋牧场近岛区春、秋和冬季水质状况良好, 仅在夏季海区出现轻度污染现象, 整体生态状况处于良好状态。ABC 曲线法评估结果表明, 夏季大型底栖动物群落受到一定程度干扰, 群落结构出现稳定性较差的情况, 这与生物多样性指数的评估结果一致。究其原因可能与季节性自然环境变动因素有关, 夏季进入雨季导致的降雨量持续增加, 同时上升流介导的底层溶氧水平下降和低温可能也会造成影响。区域性差异方面, 北部区域靠近游客码头及主要娱乐区域(夏景全 等, 2020), 海上船舶活动和潜水活动频繁, d1 站位的水质状况在春季和秋季为各站位最低, 呈现轻度污染, 主要原因可能是营养盐水平偏高; 南部区域的水质状况除夏季出现下降外, 其他季节均为良好, 推测可能因南部水动力引起的潮流复杂, 水体自净能力最强, 大部分时间处于洁净状态。

对比邻近珊瑚礁生态系统的多样性指数, 如东岛(3.07)、鹿回头(2.88)和大东海(1.85)(孙有方 等, 2018), 蜈支洲岛近岛区的多样性指数(3.14±0.88)较高。在其他三片海域依然存在人类过度捕捞, 生境被破坏的威胁下, 蜈支洲岛旅游区在多年前就一直

对海域开展严格的监管维护, 其自身优良的水环境条件及周边多样化的底栖生境类型, 为近岛区礁栖性生物栖息提供了良好的庇护所及索饵场地, 复杂的底质类型会使底栖动物丰富度更高(Rojas-Montiel et al, 2020)。未来需要长期的监测数据来了解群落结构变化对海洋牧场生态效应的影响。

4 结论

蜈支洲岛海洋牧场近岛区大型底栖动物丰度与生物量的变化总体上以软体动物和棘皮动物的变动为主要特征。夏季上升流造成的底层水体低温环境, 以及秋季频繁的热带风暴与强降雨天气造成的水环境剧烈波动, 可能是近岛区大型底栖动物丰度及生物量偏低的原因。蜈支洲岛北侧和南侧的大型底栖动物群落存在明显的差异, 可能与底栖生境类型、水动力条件以及人类活动的频繁程度等因素有关。综合研究结果表明, 蜈支洲岛海洋牧场近岛区大型底栖动物种类与资源量丰富, 生物多为大型化成体, 同时底栖群落多样性指数总体维持在正常范围内, 但群落稳定性在部分季节偏低。建议夏季近岛区北侧旅游活动应进行调整、优化, 保证海洋牧场近岛区珊瑚礁生态系统的稳定性与健康。

参考文献 References

- 蔡立哲, 马丽, 高阳, 等, 2002. 海洋底栖动物多样性指数污染程度评价标准的分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 41(5): 641–646. CAI LIZHE, MA LI, GAO YANG, et al, 2002. Analysis on assessing criterion for polluted situation using species diversity index of marine macrofauna[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 41(5): 641–646 (in Chinese with English abstract).
- 陈晨, 焦海峰, 王一农, 等, 2016. 象山港海洋牧场示范区大型底栖生物的时空变化[J]. 海洋与湖沼, 47(1): 130–139. CHEN CHEN, JIAO HAIFENG, WANG YINONG, et al, 2016. Temporal and spatial changes of macrobenthos in marine pasture demonstration area in Xiangshan Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 47(1): 130–139 (in Chinese with English abstract).
- 董栋, 李新正, 王洪法, 等, 2015. 海南岛三亚珊瑚礁区大型底栖动物群落特征[J]. 海洋科学, 39(3): 83–91. DONG DONG, LI XINZHENG, WANG HONGFA, et al, 2015. Macrobenthic community characters of coral reef at Sanya, Hainan[J]. Marine Sciences, 39(3): 83–91 (in Chinese with English abstract).
- 黄丁勇, 王建佳, 陈甘霖, 等, 2021. 亚龙湾珊瑚礁大型礁栖生物的群落结构及生态警示[J]. 生态学杂志, 40(2): 412–426. HUANG DINGYONG, WANG JIANJIA, CHEN GANLIN, et al, 2021. Community structure and ecological warning of reef-associated fish and macrobenthos in the Yalong Bay[J]. Chinese Journal of Ecology, 40(2): 412–426 (in Chinese with English abstract).
- 黄端杰, 许强, 李秀保, 等, 2020. 三亚蜈支洲岛珊瑚礁-沙质底复合区棘皮动物群落结构[J]. 海洋与湖沼, 51(1): 103–113. HUANG DUANJIE, XU QIANG, LI XIUBAO, et al, 2020. The community structure of echinoderms in sandy coral reef area in Wuzhizhou Island, Sanya, China[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 51(1): 103–113 (in Chinese with English abstract).
- 黄晖, 张浴阳, 刘骋跃, 2020. 热带岛礁型海洋牧场中珊瑚礁生境与资源的修复[J]. 科技促进发展, 16(2): 225–230. HUANG HUI, ZHANG YUYANG, LIU CHENGYUE, 2020. Coral reef habitat and resources restoration in tropical island marine ranching[J]. Science and Technology for Development, 16(2): 225–230 (in Chinese with English abstract).
- 李秀保, 李元超, 许强, 2019. 三亚蜈支洲岛珊瑚礁的现状、生态修复及保护对策[M]. 北京: 科学出版社: 14–84 (in Chinese).
- 李元超, 杨毅, 郑新庆, 等, 2015. 海南三亚后海海域珊瑚礁生态系统的健康状况及其影响因素[J]. 生态学杂志, 34(4): 1105–1112. LI YUANCHAO, YANG YI, ZHENG XINQING, et al, 2015. Health status and influencing factors of coral reef ecosystems in Houhai waters, Sanya, Hainan Province[J].

- Chinese Journal of Ecology, 34(4): 1105–1112 (in Chinese with English abstract).
- 林和山, 俞炜炜, 刘坤, 等, 2015. 基于 AMBI 和 M-AMBI 法的底栖生态环境质量评价——以厦门五缘湾海域为例[J]. 海洋学报, 37(8): 76–87. LIN HESHAN, YU WEIWEI, LIU KUN, et al, 2015. Assessing benthic ecological status in stressed Wuyuan Bay (Xiamen, China) using AMBI and M-AMBI[J]. Acta Oceanologica Sinica, 37(8): 76–87 (in Chinese with English abstract).
- 刘帅磊, 王赛, 崔永德, 等, 2018. 亚热带城市河流底栖动物完整性评价——以流溪河为例[J]. 生态学报, 38(1): 342–357. LIU SHUAILEI, WANG SAI, CUI YONGDE, et al, 2018. Ecological assessment of a subtropical urban river based on the Benthic-Index of Biotic Integrity—Liuxi River[J]. Acta Ecologica Sinica, 38(1): 342–357 (in Chinese with English abstract).
- 罗章凤, 方展强, 2017. 珠海横琴岛芒洲湿地红树林人工恢复期大型底栖动物群落结构研究[J]. 热带海洋学报, 36(3): 61–72. LUO ZHANGFENG, FANG ZHANQIANG, 2017. A study on the community structure of macrobenthos during the period of artificial mangrove restoration in Mangzhou wetland of Hengqin Island, Zhuhai[J]. Journal of Tropical Oceanography, 36(3): 61–72 (in Chinese with English abstract).
- 全秋梅, 肖雅元, 徐姗姗, 等, 2020. 胶州湾大型底栖动物群落结构季节变化及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志, 39(12): 4110–4120. QUAN QIUMEI, XIAO YAYUAN, XU SHANNAN, et al, 2020. Seasonal variation in macrozoobenthos community structure and its relation to environmental factors in Jiaozhou Bay[J]. Chinese Journal of Ecology, 39(12): 4110–4120 (in Chinese with English abstract).
- 孙有方, 雷新明, 练健生, 等, 2018. 三亚珊瑚礁保护区珊瑚礁生态系统现状及其健康状况评价[J]. 生物多样性, 26(3): 258–265. SUN YOUFANG, LEI XINMING, LIAN JIANSHENG, et al, 2018. Ecosystem status and health assessment of Sanya Coral Reef National Nature Reserve[J]. Biodiversity Science, 26(3): 258–265 (in Chinese with English abstract).
- 田胜艳, 于子山, 刘晓收, 等, 2006. 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, 25(1): 92–96. TIAN SHENGYAN, YU ZISHAN, LIU XIAOSHOU, et al, 2006. Abundance/biomass curves for detecting pollution effects on marine macrobenthic communities[J]. Marine Science Bulletin, 25(1): 92–96 (in Chinese with English abstract).
- 田胜艳, 张文亮, 张锐, 2009. 大型底栖动物在海洋生态系统中的作用[J]. 盐业与化工, 38(2): 50–54. TIAN SHENGYAN, ZHANG WENLIANG, ZHANG RUI, 2009. Role of macrobenthos in marine ecosystem[J]. Journal of Salt and Chemical Industry, 38(2): 50–54 (in Chinese with English abstract).
- 王言丰, 胡启伟, 余景, 等, 2019. 粤东柘林湾海洋牧场渔业资源增殖效果评估[J]. 南方水产科学, 15(2): 12–19. WANG YANFENG, HU QIWEI, YU JING, et al, 2019. Effect assessment of fishery resources proliferation in Zhelin Bay marine ranching in eastern Guangdong[J]. South China Fisheries Science, 15(2): 12–19 (in Chinese with English abstract).
- 吴莹莹, 雷新明, 黄晖, 等, 2021. 南海典型珊瑚礁生态系统健康评价方法研究[J]. 热带海洋学报, 40(4): 84–97. WU YINGYING, LEI XINMING, HUANG HUI, et al, 2021. Study on the health assessment method of typical coral reef ecosystem in the South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 40(4): 84–97 (in Chinese with English abstract).
- 吴钟解, 张光星, 陈石泉, 等, 2015. 海南西瑁洲岛周边海域造礁石珊瑚空间分布及其生态系统健康评价[J]. 应用海洋学报, 34(1): 133–140. WU ZHONGJIE, ZHANG GUANGXING, CHEN SHIQUAN, et al, 2015. Spatial distribution and ecosystem health assessment of hermatypic corals in surrounding waters of Ximaozhou Island, Hainan[J]. Journal of Applied Oceanography, 34(1): 133–140 (in Chinese with English abstract).
- 夏景全, 贾志宇, 张国豪, 等, 2020. 火山石对破碎化珊瑚礁的修复效果研究[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 39(3): 237–244. XIA JINGQUAN, JIA ZHIYU, ZHANG GUOHAO, et al, 2020. Study on effect of basalt on restoration of damaged coral reef[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 39(3): 237–244 (in Chinese with English abstract).
- 夏景全, 2021. 火山石生境重构与珊瑚移植在修复三亚破碎化珊瑚礁上的作用[D]. 海南: 海南大学. XIA JINGQUAN, 2021. The role of volcanic habitat reconstruction and coral transplantation in the restoration of fragmented coral reefs in Sanya[D]. Hainan: Hainan University (in Chinese with English abstract).
- 许惠丽, 冯博轩, 谢敏睿, 等, 2020. 三亚蜈支洲岛两种造礁石珊瑚的生理特征[J]. 应用海洋学报, 39(2): 181–188. XU HUILI, FENG BOXUAN, XIE MINRUI, et al, 2020. Physiological characteristics of two reef-building corals in Wuzhizhou Island, Sanya[J]. Journal of Applied Oceanography, 39(2): 181–188 (in Chinese with English abstract).
- 许强, 刘维, 高菲, 等, 2018. 发展中国南海热带岛礁海洋牧场——机遇、现状与展望[J]. 渔业科学进展, 39(5): 173–180. XU QIANG, LIU WEI, GAO FEI, et al, 2018. Development of marine ranching at tropical island area in South China Sea—advantages, status and prospects[J]. Progress in Fishery Sciences, 39(5): 173–180 (in Chinese with English abstract).
- 徐帅帅, 邸宝平, 王玉珏, 等, 2017. 我国典型潮间带底栖硅藻群落空间分布特征[J]. 海洋学报, 39(6): 95–113. XU SHUAISHUAI, DI BAOPING, WANG YUJUE, et al, 2017. Spatial distribution of benthic diatom in the typical intertidal zones in China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 39(6): 95–113 (in Chinese with English abstract).
- 徐兆礼, 陈亚瞿, 1989. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲐鲐渔场的关系[J]. 生态学杂志, 8(4): 13–15. XU ZHAOLI, CHEN YAZHU, 1989. East Yellow Sea autumn planktonic dominant species aggregation intensity and relationship with the fishery of *Scomber japonicus* [J]. Ecology Magazine, 8(4): 13–15.

- ZHAOLI, CHEN YAQU, 1989. Aggregated intensity of dominant species of zooplankton in autumn in the East China Sea and Yellow Sea[J]. *Journal of Ecology*, 8(4): 13–15, 19 (in Chinese with English abstract).
- 杨东, 周政权, 张建设, 等, 2017. 烟台牟平海洋牧场夏季大型底栖动物群落特征[J]. *海洋科学*, 41(5): 134–143. YANG DONG, ZHOU ZHENGQUAN, ZHANG JIANSHE, et al, 2017. Characteristics of macrobenthic communities at the Muping marine ranch of Yantai in summer[J]. *Marine Sciences*, 41(5): 134–143 (in Chinese with English abstract).
- 袁涛萍, 李恒翔, 李路, 等, 2017. 夏季大亚湾大型底栖动物群落结构[J]. *热带海洋学报*, 36(1): 41–47. YUAN TAOPING, LI HENGXIANG, LI LU, et al, 2017. Community structure of macrobenthos in summer in Daya Bay[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 36(1): 41–47 (in Chinese with English abstract).
- 张志南, 2000. 水层—底栖耦合生态动力学研究的某些进展[J]. *青岛海洋大学学报*, 30(1): 115–122. ZHANG ZHINAN, 2000. Some progress of the study on the ecosystem dynamics for benthic -pelagic coupling[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 30(1): 115–122 (in Chinese with English abstract).
- AZOVSKY A I, KOKAREV V N, 2019. Stable but fragile: long-term dynamics of arctic benthic macrofauna in Baydaratskaya Bay (the Kara Sea)[J]. *Polar Biology*, 42(7): 1307–1322.
- BOUTOUMIT S, BOUOUAROUR O, KAMCHA R E, et al, 2021. Spatial patterns of macrozoobenthos assemblages in a sentinel coastal lagoon: biodiversity and environmental drivers[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(5): 461.
- GERASIMOVA A V, FILIPPOVA N A, LISITSYNA K N, et al, 2021. Current state of macrobenthos in the southwestern Kara Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 224: 104452.
- HUANG JIANZHONG, WANG FENGXIA, ZHAO HONGWEI, et al, 2020. Reef benthic composition and coral communities at the Wuzhizhou Island in the south China sea: the impacts of anthropogenic disturbance[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 243: 106863.
- HUTCHINGS P, 1990. Review of the effects of trawling on macrobenthic epifaunal communities[J]. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research*, 41(1): 111–120.
- KOLYUCHKINA G A, SYOMIN V L, GRIGORENKO K S, et al, 2020. The role of abiotic environmental factors in the vertical distribution of macrozoobenthos at the northeastern black sea coast[J]. *Biology Bulletin*, 47(9): 1126–1141.
- LI XIUBAO, LIU SHENG, HUANG HUI, et al, 2012. Coral bleaching caused by an abnormal water temperature rise at Luhuitou fringing reef, Sanya Bay, China[J]. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 15(2): 227–233.
- LI XIUBAO, WANG DAORU, HUANG HUI, et al, 2015. Linking benthic community structure to terrestrial runoff and upwelling in the coral reefs of northeastern Hainan Island[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 156: 92–102.
- LUNT J, SMEE D L, 2014. Turbidity influences trophic interactions in estuaries[J]. *Limnology and Oceanography*, 59(6): 2002–2012.
- RAJAN R S P, JYOTHIBABU R, ARUNPANDI N, et al, 2021. Macrobenthos community response to the seasonal hypoxia associated with coastal upwelling off Kochi, along the Southwest coast of India[J]. *Continental Shelf Research*, 224: 104450.
- RODRÍGUEZ-TRONCOSO A P, RODRÍGUEZ-ZARAGOZA F A, MAYFIELD A B, et al, 2019. Temporal variation in invertebrate recruitment on an Eastern Pacific coral reef[J]. *Journal of Sea Research*, 145: 8–15.
- ROJAS-MONTIEL B, REYES-BONILLA H, CALDERON-AGUILERA L E, et al, 2020. Echinoderm functional diversity does not correlate with the protection level of marine protected areas in the Mexican Pacific[J]. *Biodiversity and Conservation*, 29(6): 1871–1896.
- SOARES M O, ROSSI S, GURGEL A R, et al, 2021. Impacts of a changing environment on marginal coral reefs in the Tropical Southwestern Atlantic[J]. *Ocean & Coastal Management*, 210: 105692.
- VON DER OHE P C, GOEDKOOP W, 2013. Distinguishing the effects of habitat degradation and pesticide stress on benthic invertebrates using stressor-specific metrics[J]. *Science of the Total Environment*, 444: 480–490.