

广西北海红树林宜林滩涂大型底栖动物群落结构特征

耿婉璐^{1,2}, 邢永泽², 张秋丰^{1,2}, 管卫兵¹

1. 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306;

2. 自然资源部第四海洋研究所, 自然资源部热带海洋生态系统与生物资源重点实验室, 广西 北海 536015

摘要: 为了解广西北海红树林宜林滩涂大型底栖动物群落特征, 本文首次在北海市选择了 2 条光滩断面、2 条有少量互花米草分布的断面和 2 条被互花米草覆盖的断面开展生态调查, 调查了大型底栖动物的群落结构特征, 并分析了其与环境因子之间的关系。结果表明, 调查区域大型底栖动物共 29 种, 不同生境的软体动物生物量、节肢动物栖息密度及蟹洞数量差异显著 ($P < 0.05$), 大型底栖动物的种类组成与沉积物的偏态显著正相关 ($P < 0.05$)。光滩样地黄金村 HJ 群落结构稳定, 其余样地大型底栖动物的群落结构均不稳定。互花米草的生长会对大型底栖动物群落结构产生影响。

关键词: 大型底栖动物; 群落结构; 互花米草; 红树林

中图分类号: P735 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2024)01-0107-09

Structural characteristics of macrobenthic communities at intertidal zone for mangrove in Beihai, Guangxi

GENG Wanlu^{1,2}, XING Yongze², ZHANG Qiufeng^{1,2}, GUAN Weibing¹

1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Key Laboratory of Tropical Marine Ecosystem and Bioresource, Fourth Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Beihai 536015, China

Abstract: In order to understand the characteristics of macrobenthic communities in the intertidal zone for mangroves, two sections of bare flat, two sections with a small number of *Spartina alterniflora* distribution and two sections covered by *Spartina alterniflora* were selected in Beihai for ecological investigation, and the community structure of macrobenthic animals and its relationship with environmental factors were analyzed. There were 29 macrobenthic species in the survey area, and there were significant differences in mollusc biomass, arthropod habitat density and crab burrow number in different habitats ($P < 0.05$), and the species composition of macrobenthic animals was positively correlated with sediment skewness ($P < 0.05$). The HJ community structure was stable in the bare flat, but the community structure of macrobenthic animals in the other plots was unstable. The growth of *Spartina alterniflora* affects the structure of macrobenthic communities.

Key words: macrobenthic animals; community structure; *Spartina alterniflora*; mangrove

大型底栖动物和其他底栖生物类群相比, 生命周期较长, 活动范围较小, 并且对外界环境变化敏感 (Tolhurst et al, 2007), 作为滨海湿地食物网中的重要组成部分 (Mcgill, 2010), 其群落结构特征常用于监测湿地生态系统 (Aschenbroich et al, 2016)。大型底栖动物

通过捕食作用、分解凋落物和有机物来调节红树林及周边滩涂的结构和功能 (Jennings et al, 2002), 因此评估其多样性和分布对于了解红树林生态系统至关重要 (Kristensen et al, 2008)。国内外已有大量关于红树林区大型底栖动物的多样性和分布的研究 (Farooq et al,

收稿日期: 2023-04-12; 修订日期: 2023-05-25。孙翠慈编辑

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42141016); 自然资源部第四海洋研究所基本科研业务费专项资金资助项目 (202005)

作者简介: 耿婉璐 (1997—), 女, 河南省许昌市人, 硕士研究生, 主要从事湿地生态修复研究。email: genggengwanlu@163.com

通信作者: 邢永泽, email: xingyongze@4io.org.cn; 张秋丰, email: zhangqiufeng@ncs.mnr.gov.cn

Received date: 2023-04-12; Revised date: 2023-05-25. Editor: SUN Cuici

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (42141016); Scientific Research Fund of the Fourth Institute of Oceanography, MNR (202005)

Corresponding author: XING Yongze, email: xingyongze@4io.org.cn; ZHANG Qiufeng, email: zhangqiufeng@ncs.mnr.gov.cn

2020; Kon et al, 2022; Zhen et al, 2022), 但是对宜林滩涂底栖动物群落结构的研究还较为缺乏。

广西北海市红树林宜林滩涂地理条件优越, 底栖生物资源丰富。但近二十年来, 互花米草(*Spartina alterniflora*)入侵对大型底栖动物生长产生了一定的影响(赵彩云 等, 2014)。本研究首次在北海市拟开展红树林造林的宜林滩涂, 分别选择光滩、少量互花米草覆盖区和互花米草全覆盖区, 采集大型底栖动物样品和土壤样品, 研究红树林宜林滩涂大型底栖动物群落结构特征, 分析可能影响大型底栖动物群落结构的因素, 以期对红树林修复提供参考。

1 材料和方法

1.1 采样方法

1.1.1 大型底栖动物调查

本文研究区域位于北海市廉州湾和铁山港湾, 地理坐标 20°26'N—21°55'N, 108°50'E—109°47'E, 年平均气温 22.9℃, 海洋性季风气候。2022 年在红树林宜林滩涂选择 6 条断面, 其中 2 条光滩断面 HJ 和 NJ, 2 条少量互花米草断面 ZX 和 NT, 2 条互花米草断面 RG1 和 RG2, 每条断面随机布设 4 个采样点, 每个采样点随机取 4 个样方, 以 25cm×25cm 的定量框采取 30cm 深的样品(图 1)。

1.1.2 沉积物取样

在进行大型底栖动物采样的各样方同时进行沉积物采样, 在各样地通过泥炭采样器垂直采取柱状样, 依据样地大小, 每个样地采集 3~5 个平行样。柱状样长度为 50cm, 分层取样: 0~10、10~20、20~30、30~40、40~50cm。少数样地由于底质较硬, 柱状样在 20~40cm 之间。

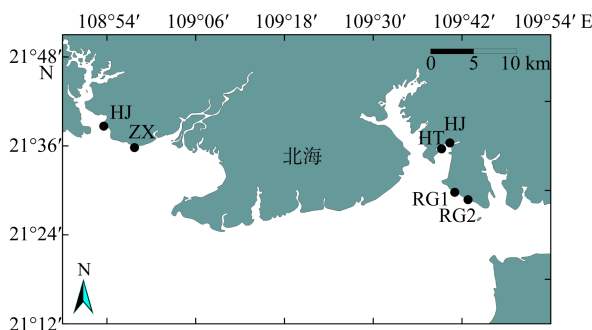


图 1 研究区范围和调查样地分布示意图

该图基于广西壮族自治区自然资源厅监制、广西壮族自治区地图院编制、审图号为桂 S(2022)40 号的标准地图制作。图中光滩样地: HJ、NJ; 少量互花米草样地: ZX、NT; 互花米草样地: RG1、RG2。

Fig. 1 Sketch map of the study area and survey sample plots. Note: Bare flat: HJ, NJ; a small number of alterniflora: ZX, NT; covered by alterniflora: RG1, RG2

1.2 数据测定

1.2.1 沉积物有机质含量测定

采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定土壤有机质含量(鲍士旦, 2000)。

1.2.2 沉积物粒度测定

沉积物粒径采用 Malvern Mastersizer 3000 激光粒径分析仪测定。

1.3 数据处理与分析

1.3.1 沉积物有机质含量

$$O.M = \frac{c \times (V_0 - V) \times 0.003 \times 1.724 \times 1.10}{m} \times 1000 \quad (1)$$

式中:

$O.M$: 土壤有机质质量分数/(g·kg⁻¹);

V_0 : 空白试验所消耗硫酸亚铁标准溶液的体积/(mL);

V : 试样测定所消耗硫酸亚铁标准溶液的体积/(mL);

c : 硫酸亚铁标准溶液浓度/(mol·L⁻¹);

0.003: 1/4 碳原子的毫摩尔质量/(g·mmol⁻¹);

1.724: 有机碳和有机质的换算系数;

1.10: 氧化校正系数;

m : 试样质量/g。

1.3.2 物种优势度(Y)

物种优势度(Y)计算公式如下:

$$Y = (n_i / N) \times f_i \quad (2)$$

式中: n_i 为第 i 种的个体数;

N 为样品中所有种类的总个体数;

f_i 为该种在各样地出现的频率。

当物种优势度 $Y > 0.02$ 时该种即为优势种(黄雅琴等, 2020)。物种数和物种优势度指数计算的数据取各断面站位的平均值。

1.3.3 群落生物多样性分析

Shannon-Wiener 物种多样性指数(H')、Margalef 物种丰富度指数(d)、Pielou 物种均匀度指数(J)计算公式如下 (Shannon & Wiener, 1949; 马克平, 1994; Pielou, 1975):

$$H' = -\sum_{i=1}^s (P_i) (\ln P_i) \quad (3)$$

$$d = (S - 1) / \log_2 N \quad (4)$$

$$J = H' / \log_2 S \quad (5)$$

式中: P_i 是物种 i 的个体数与总个体数的比值; N 为采泥样品中所有种类的总个体数目; S 为采泥样品中的种类总数。

1.3.4 群落结构分析

利用等级聚类分析(cluster)和群落结构序列分析方法(multidimensional scaling, MDS)进行群落结构分析, 根据群落的 Bray-Curtis 相似性系数, 用 Origin 2021 构建群落等级聚类树枝图。

1.3.5 丰度/生物量比较曲线(abundance biomass comparison, ABC)

利用 ABC 曲线来分析监测大型底栖动物群落受到污染和扰动情况(蔡永久 等, 2010)。在未受到扰动的群落中, 体型大数量少的个体生物量占优势, 个体相对较小的种数量占优势, 其丰度随机性较强, 因此图形中生物量的 k 优势度曲线始终位于丰度曲线之上; 在受到中等程度扰动的群落中, 体型大的物种优势度减弱, 丰度和生物量曲线接近重合或者部分交叉; 在受到严重扰动的群落中, 个体较小的种类占优势, 丰度曲线位于生物量曲线之上(Warwick, 1986)。

1.3.6 统计分析

利用 SPSS 27.0, 用单因素方差分析(one-way

ANOVA)进行差异检验($P < 0.05$); 对潮间带大型底栖动物物种数、丰度、生物量以及生物多样性指数与土壤理化因子进行皮尔逊相关性(Pearson correlation)分析。用 Origin Pro 2021 绘制相关性热图。

2 结果

2.1 土壤理化因子水平

少量互花米草生长区 NT 有机碳含量为 3.08, 符合国家沉积物质量三类标准(表 1)。光滩、互花米草生长区和少量互花米草生长区 ZX 的有机碳含量 $< 2\%$, 符合国家沉积物质量一类标准。少量互花米草区的有机碳含量显著高于光滩和互花米草生长区 ($P < 0.05$), 光滩和互花米草生长区差异不显著。

光滩的黏土、粉砂含量与少量互花米草区、互花米草区的含量均差异显著 ($P < 0.05$), 互花米草区的砂含量显著高于光滩和少量互花米草区 ($P < 0.05$), 各样地类型的细砾含量之间无显著差异(表 1)。

表 1 不同样地土壤理化因子

Tab.1 Soil physical and chemical factors in different places

样地类型	样地名称	有机质/%	黏土/%	粉砂/%	砂/%	细砾/%
光滩	HJ	0.47±0.05 ^a	1.42±0.21 ^{ab}	28.56±3.48 ^{bc}	69.83±3.60 ^{ab}	0.19±0.11
	NJ	0.47±0.03 ^a	2.41±0.21 ^b	37.91±3.90 ^c	59.68±4.10 ^a	-
	平均值	0.48±0.09	1.92±0.01 [*]	33.23±0.15 [*]	64.76±0.18	0.10±0.039
少量互花米草	ZX	1.88±0.12 ^{ab}	2.18±0.09 ^b	29.95±0.64 ^{bc}	67.56±0.64 ^{ab}	0.31±0.18
	NT	3.08±0.45 ^b	1.97±0.06 ^{ab}	26.21±0.63 ^{abc}	71.82±0.61 ^{abc}	-
	平均值	2.48±0.12 [*]	2.08±0.01 ^b	28.08±0.01	69.69±0.01	0.16±0.06
互花米草	RG1	0.77±0.22 ^a	1.23±0.36 ^a	17.88±1.71 ^{ab}	80.75±2.02 ^{bc}	0.14±0.08
	RG2	1.35±0.33 ^a	0.90±0.15 ^a	15.19±0.29 ^a	83.83±0.37 ^c	0.08±0.04
	平均值	1.06±0.38	1.07±0.08	16.54±0.50	82.29±0.59 [*]	0.11±0.01

注: a, b, c 表示不同调查站位之间差异显著($P < 0.05$); *表示各样地类型之间差异显著($P < 0.05$); -表示调查站位该因子含量为 0

2.2 大型底栖动物种类组成与优势种组成

2.2.1 种类

在光滩、少量互花米草生长区和互花米草生长区三种生境大型底栖动物共采到 111 个样本, 经鉴定共

计 29 种, 隶属于 6 门(表 2)。其中软体动物种类最多, 有 14 种, 占 48.28%; 节肢动物 11 种, 占 37.93%; 其他类群动物 4 种(包括环节动物 1 种, 脊索动物 1 种, 星虫动物 1 种, 纽形动物 1 种), 占 13.79%。

表 2 不同样地大型底栖动物物种数

Tab. 2 The number of macrobenthic species in different places

样地类型	样地名称	物种数						总计
		软体动物	节肢动物	纽形动物	星虫动物	环节动物	脊索动物	
光滩	HJ	7	0	1	0	0	0	8
	NJ	3	1	0	0	1	0	5
	合计	10	1	1	0	1	0	13
少量互花米草	ZX	7	1	0	0	0	1	9
	NT	3	5	0	1	1	0	10
	合计	10	6	0	1	1	1	19
互花米草	RG1	4	1	0	0	0	0	5
	RG2	1	4	0	0	1	0	6
	合计	5	5	0	0	1	0	11

2.2.2 优势种

光滩、少量互花米草区和互花米草区的大型底栖动物优势种组成差异显著(表 3)。各样地类型大型底

栖动物的优势种($Y>0.02$)均有 2 种, 优势度指数最高的物种均不相同, 分别为中国绿螂(0.095)、珠带拟蟹守螺(0.091)和凹指招潮(0.074)。

表 3 不同样地大型底栖动物优势种

Tab. 3 Dominant species of macrofauna in different places

样地类型	优势种	优势度指数(Y)
光滩	中国绿螂 <i>Glaucanome chinensis</i>	0.095
	红树蚬 <i>Geloina coaxans</i>	0.037
少量互花米草	珠带拟蟹守螺 <i>Cerithidea cingulata</i>	0.091
	红果滨螺 <i>Littorina coccinea</i>	0.036
互花米草	凹指招潮 <i>Uca vocans</i>	0.074
	中国绿螂 <i>Glaucanome chinensis</i>	0.033

2.3 生物量和栖息密度

2.3.1 生物量

生物量表现为互花米草区 $[(736.96\pm23.73)\text{g}\cdot\text{m}^{-2}]>$ 少量互花米草区 $[(592.83\pm258.54)\text{g}\cdot\text{m}^{-2}]>$ 光滩 $[(182.21\pm1.26)\text{g}\cdot\text{m}^{-2}]$, 平均为 $(504\pm321.79)\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ (表 4)。

不同样地类型的大型底栖动物生物量差别较大, 各样地大型底栖动物的生物量都以软体动物为主要群体。光滩的软体动物的生物量显著低于少量互花米草区和互花米草区($P<0.05$), 节肢动物和其他动物的生物量在不同生境差异不显著。

表 4 不同样地大型底栖动物生物量

Tab. 4 Biomass of macrofauna in different places

样地类型	样地名称	生物量/ $(\text{g}\cdot\text{m}^{-2})$			
		软体动物	节肢动物	其他动物	合计
光滩	HJ	182.83	0	0.64	183.47
	NJ	176.16	2.45	2.35	180.96
	平均值	179.49 ± 3.34^a	1.23 ± 1.23^a	1.49 ± 0.86^a	182.23 ± 1.26^a
少量互花米草	ZX	318.51	10.19	5.6	334.29
	NT	793.07	38.61	19.68	851.36
	平均值	555.79 ± 237.28^b	24.4 ± 14.21^a	12.64 ± 7.04^a	592.83 ± 258.54^b
互花米草	RG1	693.87	66.83	0	760.69
	RG2	703.95	3.79	5.49	713.23
	平均值	698.91 ± 5.04^b	35.31 ± 31.52^a	2.75 ± 2.75^a	736.96 ± 23.73^b

注: a, b 表示不同样地类型之间差异显著($P<0.05$)

2.3.2 栖息密度

不同样地类型的大型底栖动物平均栖息密度差别较大(表 5), 平均为 $(100\pm69)\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}$, 少量互花米草区 $[(169\pm57)\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}]>$ 光滩 $[(71\pm5)\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}]>$ 互花米草区 $[(59\pm16)\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}]$ 。节肢动物在 RG2 的栖息密度最大, 星虫动物在 NT 的栖息密度最大, 其他各断面平均栖息密度最大的都是软体动物。蟹洞数量表现为少量互花米草区 $[(1880\pm723)\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}]>$ 光滩 $[(656\pm352)\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}]>$ 互花米草区 $[(472\pm115)\text{ind}\cdot\text{m}^{-2}]$ 。光滩的节肢动物栖息密度显著低于互花米草区的节肢动物的栖息密度($P<0.05$), 软体动物和其他动物在不同类型样地差异不显著, 少量互花米草区域的蟹洞数量显著高于光滩和互花米草区($P<0.05$)。

2.4 大型底栖动物群落特征指数

各断面大型底栖动物的多样性指数和丰富度指数均表现为少量互花米草区 $>$ 光滩 $>$ 互花米草区(表 6)。均匀度指数表现为光滩 $>$ 互花米草区 $>$ 少量互花米草区。HJ 的多样性指数和丰富度指数均高于 NJ, 二者的均匀度相同; NT 的物种多样性指数、物种丰富度指数、物种均匀度指数均高于 ZX; RG2 的物种多样性指数、物种丰富度指数、物种均匀度指数均高于 RG1。少量互花米草区和互花米草区的丰富度指数差异显著($P<0.05$), 二者与光滩样地差异均不显著。光滩和少量互花米草区的均匀度指数差异显著($P<0.05$), 二者与互花米草区差异不显著。3 种样地类型的多样性指数差异不显著。

表 5 不同样地大型底栖动物栖息密度
Tab. 5 Density of macrofauna in different places

样地类型	样地名称	栖息密度/(ind.·m ⁻²)				
		软体动物	节肢动物	其他动物	合计	蟹洞
光滩	HJ	70	0	6	76	304
	NJ	54	6	6	66	1008
	平均值	62±8 ^a	3±3 ^a	6 ^a	71±5 ^a	656±352 ^a
少量互花米草	ZX	214	6	6	226	1158
	NT	32	27	54	113	2603
	平均值	123±91 ^a	17±11 ^{ab}	30±24 ^a	169±57 ^b	1880±723 ^b
互花米草	RG1	43	32	0	75	587
	RG2	6	22	16	44	358
	平均值	25±19 ^a	27±5 ^b	8±8 ^a	59±16 ^a	472±115 ^a

注: a, b 表示不同样地类型之间差异显著($P<0.05$)

表 6 不同样地大型底栖动物群落的物种多样性指数
Tab. 6 Species diversity index for macrobenthic communities in different places

样地类型	样地名称	多样性指数(H')	丰富度指数(d)	均匀度指数(J)
光滩	HJ	2.11	1.12	0.70
	NJ	1.63	0.66	0.70
	平均值	1.87 ^a	0.89 ^{ab}	0.70 ^a
少量互花米草	ZX	1.66	1.02	0.52
	NT	2.22	1.32	0.67
	平均值	1.94 ^a	1.17 ^a	0.59 ^b
互花米草	RG1	1.38	0.64	0.59
	RG2	1.67	0.92	0.65
	平均值	1.52 ^a	0.78 ^b	0.62 ^{ab}

注: a, b 表示各样地类型之间差异显著($P<0.05$)

2.5 大型底栖动物群落结构及其稳定性

2.5.1 群落结构相似性

RG1 和 RG2 的相似度最高, 约为 84, 都为互花米草区样地; 少量互花米草区样地 ZX 和 NT 相似度为 60; 光滩样地 HJ 和 NJ 的相似度为 70。少量互花米草区和互花米草区之间的相似度为 30, 二者与光滩的相似度为 20(图 2)。

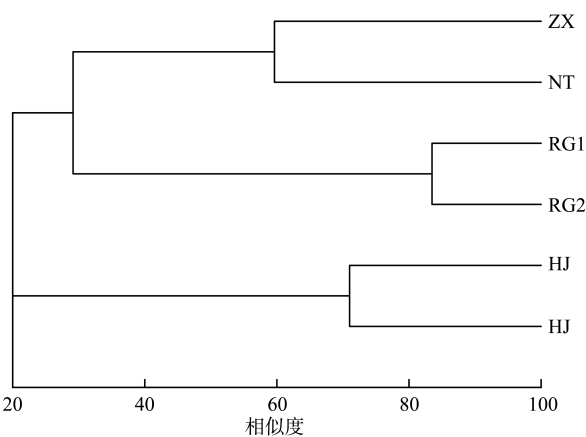


图 2 大型底栖动物聚类分析
Fig. 2 Cluster analysis of macrobenthic animals

2.5.2 群落结构稳定性

光滩样地 HJ 的生物量优势度曲线位于丰度曲线

之上, 群落结构稳定; 而光滩样地 NT 的丰度曲线位于生物量曲线之上, 群落结构不稳定, 受到严重扰动; 其他样地的丰度曲线和生物量曲线均有交叉, 群落受到中度扰动(图 3)。

2.6 大型底栖动物与土壤理化因子相关性分析

大型底栖动物的种类组成与沉积物的偏态呈显著正相关关系($P<0.05$), 平均栖息密度和生物量与沉积物环境因子均无显著线性相关关系(图 4)。黏土含量和粉砂含量、平均粒径都呈显著正相关关系($P<0.05$), 和砂含量呈显著负相关关系($P<0.05$), 砂含量和粉砂含量与平均粒径也呈显著负相关关系($P<0.05$), 偏态与细砾含量之间是显著负相关关系($P<0.05$), 和大型底栖动物种类组成、峰态呈显著正相关关系($P<0.05$)。分选系数和有机质含量之间是显著正相关关系($P<0.05$), 和峰态是显著负相关关系($P<0.05$)(图 4)。

3 讨论

虽然 3 种样地类型中大型底栖生物物种组成差异不显著, 但是优势度指数最高的物种不相同, 在光滩、少量互花米草区和互花米草区群落分别为中国绿螂(0.095)、珠带拟蟹守螺(0.091)和凹指招潮(0.074)。不

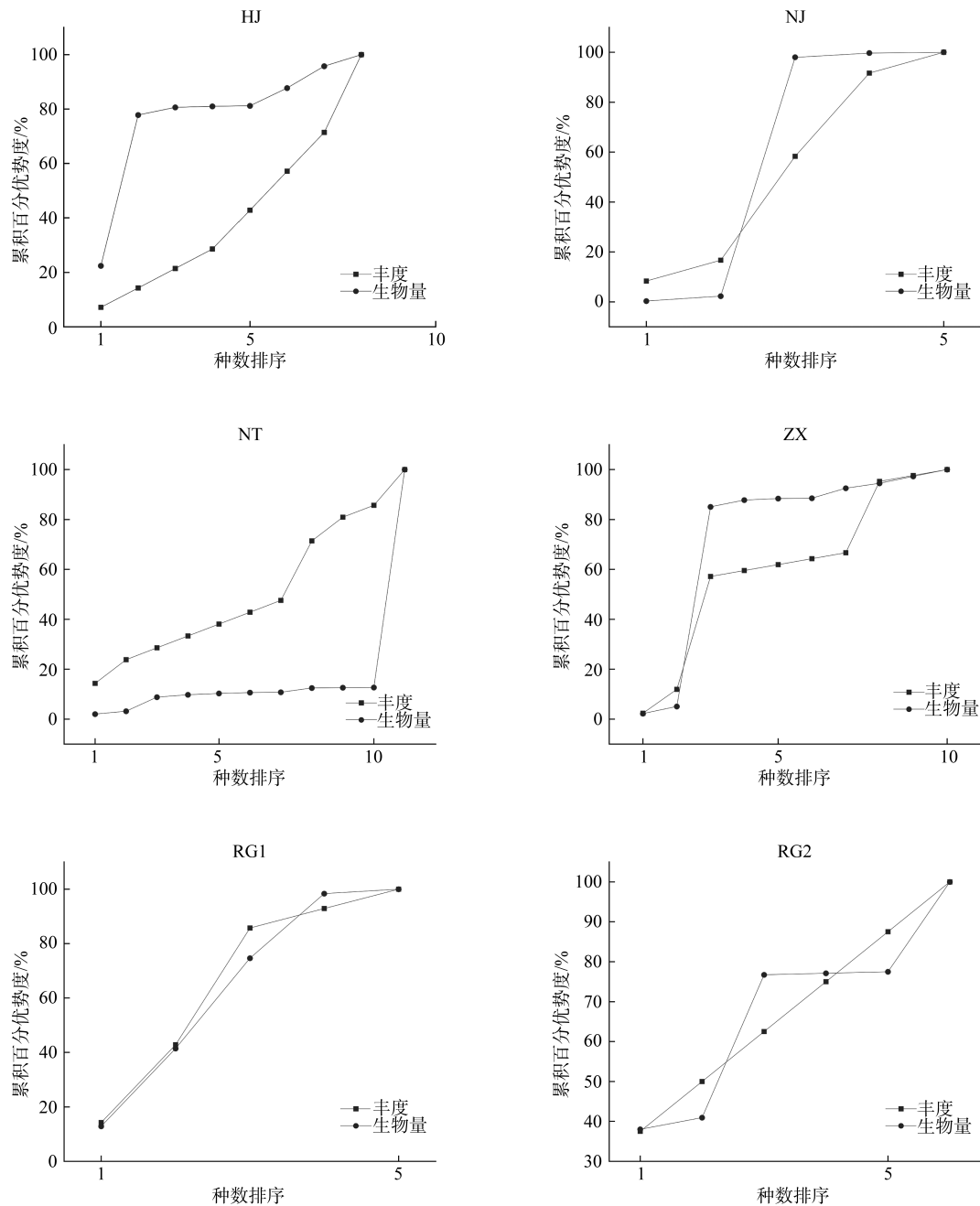


图3 大型底栖动物群落优势度曲线

Fig. 3 Community abundance biomass composite k-dominance curve of macrobenthic animals

同生境间大型底栖动物物种数表现为少量互花米草区(20)> 光滩(12)> 互花米草区(11), 少量互花米草区较光滩样地物种数有所增加, 这可能是因为互花米草的生长使光滩的环境结构更加复杂(Grosholz, 2002), 增加了有机质的含量并减少了禽类对大型底栖动物的捕食(da Cunha Lana et al, 1991)。在互花米草密度增加之后物种数又稍有下降, 这可能是因为互花米草的生长影响了水流, 导致水淹状况改变(da Cunha Lana et al, 1991), 从而影响微生物的繁殖和输入(Daehler et al, 1996; Grosholz et al, 2009), 并且互花米草可通过泌盐来改变土壤盐分含量(陆琳莹 等, 2020), 底质特征发生

改变, 导致一些大型底栖动物食物减少, 生长受到影响(任海庆 等, 2015; 袁涛萍 等, 2017; 冯建祥 等, 2018)。

除了 HJ 的群落结构特征稳定, 其他样地均受到不同程度的扰动, 环境的改变不仅会导致大型底栖动物种类改变(Sullivan et al, 2000; 杨泽华 等, 2007; 沈永明 等, 2013), 也会降低其群落结构稳定性。不同生境类型大型底栖动物的多样性指数和丰富度指数均表现为少量互花米草区> 光滩> 互花米草区, 与物种数、平均栖息密度和蟹洞数量的水平分布变化趋势相吻合。均匀度指数表现为光滩> 互花米草区> 少量互花米草区。这与 Hedge 等(Hedge et al, 2000; Neira et al,

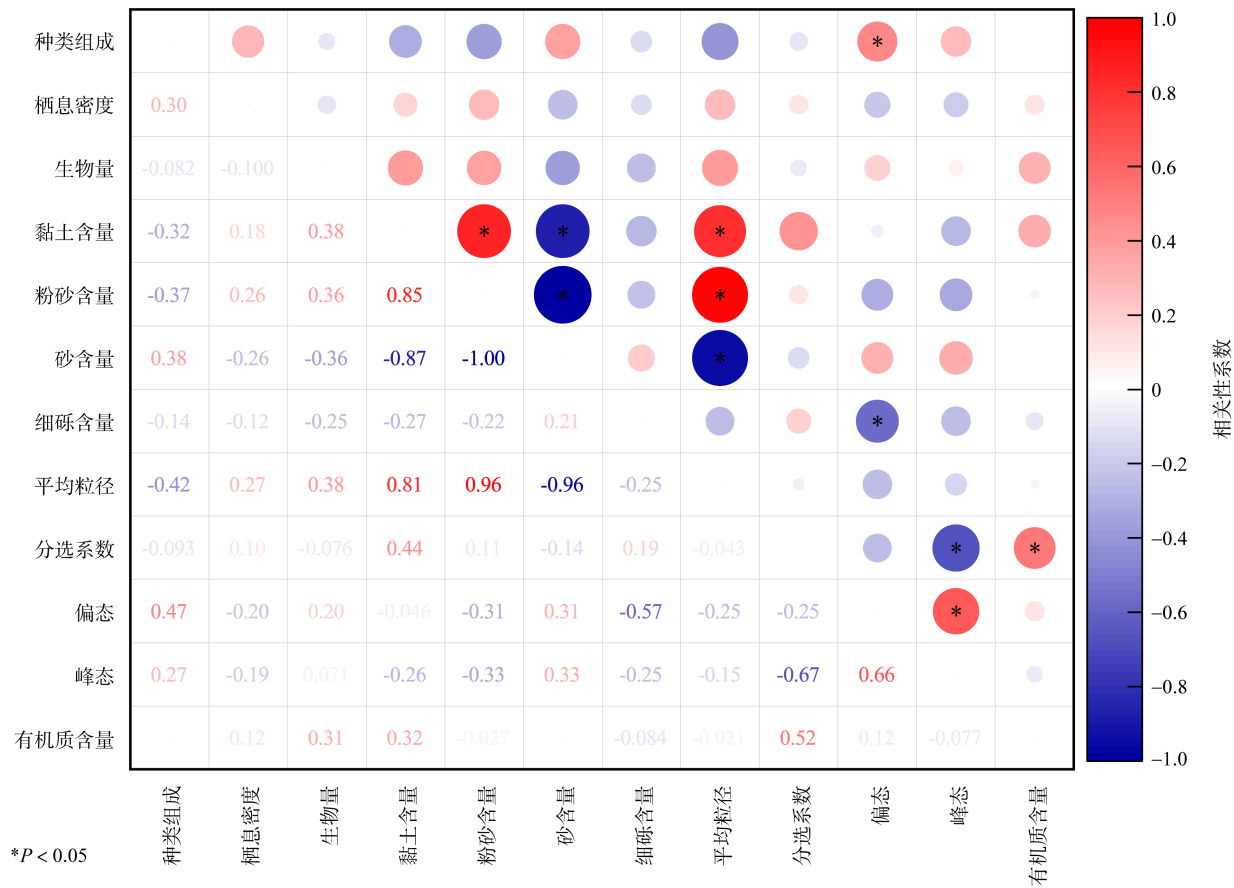


图4 大型底栖动物生物参数与土壤理化因子的相关性
Fig. 4 Correlation of macrobenthic biological parameters with soil physicochemical factors

2007; 赵永强 等, 2009)的研究结果一致, 他们认为互花米草的密度不同, 对底栖动物生长的影响也不同。这可能是因为少量互花米草生长时, 群落密度较低, 多样性指数和丰富度指数相比光滩有所提高, 但是互花米草具有促淤作用, 大量生长会导致原本适合生存的底栖动物生长环境被破坏, 物种多样性降低(仇乐 等, 2010)。但是也有部分专家研究结果相反, 有少量互花米草生长的区域大型底栖动物的多样性指数较光滩更低, 然后随着互花米草密度的增加, 物种多样性逐渐升高(谢志发 等, 2008; 黄雅琴 等, 2020)。这可能与互花米草的生长阶段有关, 如要进一步确定还需要长期的跟踪监测。

本研究中各样地大型底栖动物的生物量都以软体动物为主要贡献群体, 光滩的软体动物的生物量显著低于少量互花米草区和互花米草区($P < 0.05$), 表现为互花米草区> 少量互花米草区> 光滩。栖息密度和蟹洞数量的分布趋势和物种数相同, 表现为少量互花米草区> 光滩> 互花米草区, 光滩的节肢动物栖息密度显著低于互花米草区的节肢动物的栖息密度($P < 0.05$)。说明在互花米草大量生长的区域体型较大的底栖动物生长占优势, 体型较小的底栖动物受到限

制。一般来说, 互花米草的生长会使水流变慢, 减少了某些体型较大的底栖动物的食物来源, 从而限制此类群生长, 光照减少也会限制部分对养分需求较高的底栖动物的生长(Grosholz et al, 2009; 纪莹璐 等, 2022)。本文结果与之相反, 这可能是因为光滩和少量互花米草区有部分周边居民赶海活动等, 使体型较大的底栖动物数量减少, 群落结构稳定性降低, 也可能是因为盐度或降雨对大型底栖动物的密度和生物量产生了较大影响(赖廷和 等, 2019; 马文刚 等, 2022), 同时导致样地内的优势种都是珠带拟蟹守螺、红树蚬、中国绿螂等, 与刘士龙等 2017 年对北海市冯家江入海口红树林潮间带大型底栖动物的调查结果接近(刘士龙 等, 2019)。

4 结论

(1)北海市红树林宜林滩涂 6 个断面共发现大型底栖动物 29 种, 其中少量互花米草区种类最多, 有 20 种。

(2)互花米草区的生物量较高, 少量互花米草区的栖息密度、多样性指数和丰富度指数均较高, 但是均匀度指数较低。

(3)各断面大型底栖动物的群落均受到不同程度的植物入侵或人为扰动。大型底栖动物群落结构相似度与互花米草生长状况相关。

(4)大型底栖动物的种类组成与沉积物的偏态呈显著正相关关系,平均栖息密度和生物量与土壤粒度组成和有机质含量之间均无显著线性相关关系。

参考文献 References

- 鲍士旦, 2000. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社: 25–38. BAO SHIDAN, 2000. Soil agrochemical analysis (3rd Edition) [M]. Beijing: China Agriculture Press: 25–38 (in Chinese).
- 蔡永久, 龚志军, 秦伯强, 2010. 太湖大型底栖动物群落结构及多样性[J]. 生物多样性, 18(1): 50–59. CAI YONGJIU, GONG ZHIJUN, QIN BOQIANG. 2010. Community structure and diversity of macrozoobenthos in Lake Taihu, a large shallow eutrophic lake in China[J]. Biodiversity Science, 18(1): 50–59(in Chinese with English abstract).
- 冯建祥, 黄茜, 陈卉, 等, 2018. 互花米草入侵对盐沼和红树林滨海湿地底栖动物群落的影响[J]. 生态学杂志, 37(3): 943–951. FENG JIANXIANG, HUANG QIAN, CHEN HUI, et al, 2018. Effects of *Spartina alterniflora* invasion on benthic faunal community in saltmarsh and mangrove wetland[J]. Chinese Journal of Ecology, 37(3): 943–951 (in Chinese with English abstract).
- 黄雅琴, 王建军, 何雪宝, 等, 2020. 三沙湾互花米草(*Spartina alterniflora*) 入侵对大型底栖动物群落结构的影响[J]. 海洋与湖沼, 51(3): 506–519. HUANG YAQIN, WANG JIANJUN, HE XUEBAO, et al, 2020. Effect of *spartina alterniflora* invasion on community structure of macrobenthos in Sansha Bay, Fujian[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 51(3): 506–519(in Chinese with English abstract).
- 纪莹璐, 蒲思潮, 陶卉卉, 等, 2022. 丁字湾盐沼湿地不同植被生境大型底栖动物群落结构研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 53(3): 412–420. JI YINGLU, PU SICHAO, TAO HUIHUI, et al, 2022. Study on the structure of microbenthic communities in coastal wetlands with different vegetation types in Dingzi Bay[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 53(3): 412–420 (in Chinese with English abstract).
- 赖廷和, 何斌源, 黄中坚, 等, 2019. 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, 38(2): 67–77. LAI TINGHE, HE BINYUAN, HUANG ZHONGJIAN, et al, 2019. Study on the macrozoobenthic community structure in intertidal zone of Fangchenghe Estuary of Guangxi, China[J]. Journal of Tropical Oceanography, 38(2): 67–77 (in Chinese with English abstract).
- 刘士龙, 秦旭东, 王广军, 等, 2019. 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, 17(3): 352–358. LIU SHILONG, QIN XUDONG, WANG GUANGJUN, et al, 2019. Structure and diversity of macrozoobenthic communities in intertidal zone with mangrove forest in Fengjiajiang Estuary, Beihai city in summer in 2017[J]. Wetland Science, 17(3): 352–358 (in Chinese with English abstract).
- 陆琳莹, 邵学新, 杨慧, 等, 2020. 浙江滨海湿地互花米草生长性状对土壤化学因子的响应[J]. 林业科学研究, 33(5): 177–183. LU LINYING, SHAO XUOXIN, YANG HUI, et al, 2020. Response of *Spartina alterniflora* growth to soil chemical properties in coastal wetland of Zhejiang[J]. Forest Research, 33(5): 177–183 (in Chinese with English abstract).
- 马克平, 1994. 生物群落多样性的测度方法I α 多样性的测度方法(上)[J]. 生物多样性, 1994(3): 162–168. MA KEPING, 1994. Measurement of biotic community diversity I α diversity (Part 1), Biodiversity Science, 1994(3): 162–168 (in Chinese with English abstract).
- 马文刚, 夏景全, 魏一凡, 等, 2022. 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[J]. 热带海洋学报, 41(3): 135–146. MA WENGANG, XIA JINGQUAN, WEI YIFAN, et al, 2022. Community structure evaluation of epifaunal macrozoobenthos in the near-island waters of marine ranching in Wuzhizhou Island, Sanya[J]. Journal of Tropical Oceanography, 41(3): 135–146 (in Chinese with English abstract).
- 仇乐, 刘金娥, 陈建琴, 等, 2010. 互花米草扩张对江苏海滨湿地大型底栖动物的影响[J]. 海洋科学, 34(8): 50–55. QIU LE, LIU JINE, CHEN JIANQIN, et al, 2010. Impacts of *Spartina alterniflora* invasion on the macrobenthos communities of Jiangsu's coastal wetlands[J]. Marine Sciences, 34(8): 50–55 (in Chinese with English abstract).
- 任海庆, 袁兴中, 刘红, 等, 2015. 环境因子对河流底栖无脊椎动物群落结构的影响[J]. 生态学报, 35(10): 3148–3156. REN HAIQING, YUAN XINGZHONG, LIU HONG, et al, 2015. The effects of environment factors on community structure of benthic invertebrate in rivers[J]. Acta Ecologica Sinica, 35(10): 3148–3156 (in Chinese with English abstract).
- 沈永明, 王艳芳, 陈寿军, 等, 2013. 互花米草盐沼湿地大型底栖动物时空分布特征[J]. 地理研究, 32(4): 638–644. SHEN YONGMING, WANG YANFANG, CHEN SHOUJUN, et al, 2013. The temporal and spatial distributions of the macrobenthos in *Spartina alterniflora* salt marsh[J]. Geographical Research, 32(4): 638–644 (in Chinese with English abstract).
- 谢志发, 何文珊, 刘文亮, 等, 2008. 不同发育时间的互花米草盐沼对大型底栖动物群落的影响[J]. 生态学杂志, 27(1): 63–67. XIE ZHIFA, HE WENSHAN, LIU WENLIANG, et al, 2008. Influence of *Spartina alterniflora* salt marsh at its different development stages on macrobenthos[J]. Chinese Journal of Ecology, 27(1): 63–67 (in Chinese with English abstract).
- 杨泽华, 童春富, 陆健健, 2007. 盐沼植物对大型底栖动物群落的影响[J]. 生态学报, 27(11): 4387–4393. YANG ZEHUA,

- TONG CHUNFU, LU JIANJIAN, 2007. Effects of saltmarsh on the benthic macroinvertebrate community in Yangtze Estuary[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 27(11): 4387–4393 (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).
- 赵彩云, 李俊生, 宫璐, 等, 2014. 广西北海市滨海湿地互花米草入侵对大型底栖动物的影响[J]. *湿地科学*, 12(6): 733–739. ZHAO CAIYUN, LI JUNSHENG, GONG LU, et al, 2014. Effect of *Spartina alterniflora* invasion on benthic macroinvertebrates in coastal wetlands of Beihai, Guangxi Zhuang autonomous region[J]. *Wetland Science*, 12(6): 733–739 (in Chinese with English abstract).
- 赵永强, 曾江宁, 陈全震, 等, 2009. 不同互花米草(*Spartina alterniflora* Loisel)密度生境中大型底栖动物群落格局[J]. *自然资源学报*, 24(4): 630–639. ZHAO YONGQIANG, ZENG JIANGNING, CHEN QUANZHEN, et al, 2009. Community pattern of macrozoo benthos in distinct habitats with different densities of *Spartina alterniflora* Loisel[J]. *Journal of Natural Resources*, 24(4): 630–639 (in Chinese with English abstract).
- ASCHENBROICH A, MICHAUD E, STIEGLITZ T, et al, 2016. Brachyuran crab community structure and associated sediment reworking activities in pioneer and young mangroves of French Guiana, South America[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 182(Part A): 60–71.
- DA CUNHA LANA P, GUISS C, 1991. Influence of *Spartina alterniflora* on structure and temporal variability of macrobenthic associations in a tidal flat of Paranaguá Bay (southeastern Brazil)[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 73(2–3): 231–244.
- DAEHLER C C, STRONG D R, 1996. Status, prediction and prevention of introduced cordgrass *Spartina* spp. invasions in Pacific estuaries, USA[J]. *Biological Conservation*, 78(1–2): 51–58.
- FAROOQ S, SIDDIQUI P J A, 2020. Assessment of three mangrove forest systems for future management through benthic community structure receiving anthropogenic influences[J]. *Ocean & Coastal Management*, 190: 105162.
- GROSHOLZ E D, 2002. Ecological and evolutionary consequences of coastal invasions[J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 17(1): 22–27.
- GROSHOLZ E D, LEVIN L A, TYLER A C, et al, 2009. Changes in community structure and ecosystem function following *Spartina alterniflora* invasion of Pacific estuaries[M]// SILLIMAN B R, GROSHOLZ E D, BERTNESS M D, eds. *Human Impacts on Salt Marshes: A Global Perspective*. Berkley: University of California Press:23–40.
- HEDGE P, KRIWOKEN L K, 2000. Evidence for effects of *Spartina anglica* invasion on benthic macrofauna in Little Swanport estuary, Tasmania[J]. *Austral Ecology*, 25(2): 150–159.
- JENNINGS S, PINNEGAR J K, POLUNIN N V C, et al, 2002. Linking size-based and trophic analyses of benthic community structure[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 226: 77–85.
- KON K, GOTO A, TANITA I, et al, 2022. Multiple effects of a typhoon strike and wastewater effluent on benthic macrofaunal communities in a mangrove estuary[J]. *Hydrobiologia*, 849(11): 2569–2579.
- KRISTENSEN E, 2008. Mangrove crabs as ecosystem engineers; with emphasis on sediment processes[J]. *Journal of Sea Research*, 59(1–2): 30–43.
- MCGILL B J, 2010. Matters of scale[J]. *Science*, 328(5978): 575–576.
- NEIRA C, LEVIN L A, GROSHOLZ E D, et al, 2007. Influence of invasive *Spartina* growth stages on associated macrofaunal communities[J]. *Biological Invasions*, 9(8): 975–993.
- PIELOU E C, 1975. *Ecological diversity*[M]. New York:Wiley-Inters.
- SHANNON C E, WIENER W J, 1949. *The mathematical theory of communication*, Urbana: University of Illinois Press:117.
- SULLIVAN M J, CURRIN C A, 2000. Community structure and functional dynamics of benthic microalgae in salt marshes[J]. *Concepts and Controversies in Tidal Marsh Ecology*, 81–106.
- TOLHURST T J, CHAPMAN M G, 2007. Patterns in biogeochemical properties of sediments and benthic animals among different habitats in mangrove forests[J]. *Austral Ecology*, 32(7): 775–788.
- Warwick R M, 1986. A new method for detecting pollution effects on marine macrobenthic communities[J]. *Marine biology*, 92: 557–562.
- ZHEN WENQUAN, KWAN K Y, WANG C-C, et al, 2022. Community structure of benthic macroinvertebrates in native and introduced mangroves of northern Beibu Gulf, China: Implication for restoring mangrove ecosystems[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 180: 113796.