

沙埕港泥质海岸潮间带秋季大型底栖动物群落结构特征 及环境因素对群落结构的影响

刘怡君^{1,2}, 郑碧琪^{1,2}, 樊立静^{1,2}, 陈萍贞^{1,2}, 李益云^{1,2},
余巧艳^{1,2}, 刘溢馨^{1,2}, 张奇伟³

(1.自然资源部宁德海洋中心, 福建 宁德 352000; 2.自然资源部海洋生态监测与修复技术重点实验室, 上海 201206; 3.国家知识产权局专利局专利审查协作北京中心福建分中心, 福建 福州 350200)

摘要:潮间带大型底栖动物是潮间带生态系统重要的生态类群, 分析其群落结构及分布特征可为生态系统保护与修复提供理论依据。本研究基于沙埕港 2 个泥质海岸区域潮间带(八尺门、前岐)调查数据, 对沙埕港泥质海岸潮间带底栖动物生态现状及变化趋势进行了研究。结果显示, 在八尺门共鉴定大型底栖动物 47 种, 以甲壳动物和软体动物为主, 平均栖息密度为 62.33 ind/m^2 , 平均生物量为 135.16 g/m^2 。前岐共鉴定大型底栖动物 40 种, 以环节动物、甲壳动物为主, 平均栖息密度为 132.44 ind/m^2 , 平均生物量为 86.86 g/m^2 。聚类分析可见物种分布存在明显的地理分区现象。冗余分析表明, 锌和硫化物是影响八尺门潮间带大型底栖动物分布的关键环境因子, pH 和总磷是影响前岐潮间带大型底栖动物分布的关键环境因子。

关键词:沉积物环境因子; 潮间带; 大型底栖动物; 群落结构

中图分类号: X835

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2025)03-0360-09

Community structure characteristics and influencing environmental factors of intertidal macrobenthos in the muddy coast of Shacheng harbour in autumn

LIU Yijun^{1,2}, ZHENG Biqu^{1,2}, FAN Lijing^{1,2}, CHEN Pingzhen^{1,2}, LI Yiyun^{1,2},
YU Qiaoyan^{1,2}, LIU Yixin^{1,2}, ZHANG Qiwei³

(1.Ningde Marine Center, Ministry of Natural Resources, Ningde 352000, China; 2.Key Laboratory of Marine Ecological Monitoring and Restoration Technologies, Ministry of Natural Resources, Shanghai 201206, China; 3.Patent Examination Cooperation Center of the Patent Office, Fujian Branch of Beijing, CNIPA, Fuzhou 350200, China)

Abstract: The intertidal macrobenthos within the muddy coastal ecosystem constitute a critical ecological group. Examining the community structure and distributional patterns of these organisms is essential for providing theoretical data underpinning the conservation and restoration of ecosystems. Utilizing monitoring data from two intertidal zones (Bachimen and Qianqi) within Shacheng Harbour, this study assesses the current status and trends of benthic organisms in the intertidal zones of the muddy coastline. The findings reveal that in Bachimen, 47 species of benthic macrobenthos were identified, with crustaceans and mollusks as the predominant taxa. The average density was 62.33 ind/m^2 , and the average biomass was 135.16 g/m^2 . In Qianqi, a total of 40 species of intertidal benthic organisms were identified, with annelids and crustaceans being

收稿日期: 2024-07-23, 修订日期: 2024-11-11

基金项目: 自然资源部海洋生态监测与修复技术重点实验室开放研究基金课题(MEMRT202206)

作者简介: 刘怡君(1996—), 女, 福建宁德人, 助理工程师, 硕士, 主要从事海洋生物生态研究, E-mail: liuyijun0511@163.com

通信作者: 樊立静(1980—), 女, 河北保定人, 高级工程师, 主要从事海洋环境监测评价, E-mail: fanlijing@ecs.mnr.gov.cn

dominant. The average density was 132.44 ind/m², and the average biomass was 86.86 g/m². Cluster analysis revealed distinct geographical zoning of species distribution. Redundancy analysis indicated that zinc and sulfide were key environmental factors influencing the distribution of intertidal macrobenthos in Bachimen, while pH and total phosphorus were key environmental factors influencing the distribution of intertidal macrobenthos in Qianqi.

Key words: sedimentary environmental factors; intertidal zone; macrobenthos; community structure

潮间带大型底栖动物物种丰富,是泥质海岸潮间带生态系统的关键组成部分,在海洋生态系统的物质循环和能量流动中发挥着重要作用^[1]。近年来,随着潮间带人类活动的加剧,潮间带大型底栖动物群落结构正不断发生变化^[2],因此研究大型底栖动物的分布模式及影响因素,对海岸带生态保护修复、海洋生物资源的保护和持续开发利用具有重大意义。

沙埕港位于福建省最北缘与浙江交界处,是我国天然良港之一,港湾深邃,弯曲狭长,湾顶(八尺门)港汊发育并有宽阔平坦的滩涂,近年来八尺门水产养殖、工程开发利用等人类活动均较频繁,海洋生态环境形势较严峻^[3],目前有关沙埕港(八尺门)的研究集中在海洋水质环境^[4]、浮游生物^[5-6]、潮下带底栖动物^[7],关于潮间带大型底栖动物的研究仍处于空白。此外,2023年以来国家在沙埕港八尺门开展了海洋生态保护修复工作,但关于生态修复效果的评估尚处于探索阶段,因此,本研究以沙埕港八尺门为研究对象,以八尺门湾外的前岐区域为对照区域,结合沉积物理化监测资料,开展潮间带生物群落调查,为后续评价生态修复项目对潮间带大型底栖动物群落的修复效果提供基础数据支撑。

1 材料与方法

1.1 样品采集

于2023年9月在沙埕港区域设置5条泥质海岸潮间带生物调查断面进行样品采集,其中,八尺门3条断面(SCC01: 27°12.840'N, 120°11.310'E; SCC02: 27°15.078'N, 120°12.090'E和 SCC03: 27°16.649'N, 120°12.139'E),前岐2条断面(SCC04: 27°15.964'N, 120°15.872'E和 SCC05: 27°15.657'N, 120°16.866'E)。

沉积环境样品的采集按照《海洋监测规范

第5部分:沉积物分析》(GB 17378.5—2007)^[8]执行,每条断面按照高、中、低潮各采集1个样品,在潮间带沉积物中采集样品时刮取表层覆水和浮泥,取样深度为表层0~5 cm。表层样品用聚乙烯袋包装,每个样品采集不少于500 g。依据《海洋监测规范 第5部分:沉积物分析》(GB 17378.5—2007)^[8]和《海洋调查规范 第8部分:海洋地质地球物理调查》(GB 12763.8—2007)^[9],监测站位沉积物pH采用电位法测定;氧化还原电位(Eh)采用电位计法现场测定;沉积物有机碳采用重铬酸钾氧化-还原容量法测定;硫化物采用碘量法测定;油类采用紫外分光光度法测定;总氮采用凯氏定氮法测定;总磷采用分光光度法测定;汞、砷采用原子荧光法测定;锌采用火焰原子吸收分光光度法测定;铜、铅、镉和铬采用无火焰原子吸收分光光度法测定;采用激光法进行沉积物粒径的测定。根据《土壤检测 第16部分:土壤水溶性盐总量的测定》(NY/T 1121.16—2006),采用重量法进行水溶性盐的测定。

潮间带大型底栖动物样品的采集按照《海洋调查规范 第6部分:海洋生物调查》(GB T 12763.6—2007)^[10]和《海洋监测规范 第7部分:近海污染生态调查和生物监测》(GB 17378.7—2007)^[11]执行,高潮区布设2个站位,中潮区布设3个站位,低潮区布设1个站位。调查内容包括种类、密度和生物量。潮间带大型底栖动物用25 cm×25 cm×30 cm(长×宽×高)的定量框定量取4个样方,所获样品用孔径为1.0 mm的筛网,分离其中的底栖动物,加入75%的酒精固定,每站定量取样的同时,将附近出现的生物种类收集齐全,做定性分析。

1.2 数据分析

采用生物多样性指数(H')、均匀度指数(J)、丰富度指数(d)、优势种优势度(Y)对样本

进行分析评价^[11-12]。

(1) 香农-韦弗 (Shannon-Weaver) 多样性指数:

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

(1)

式中: H' 为生物多样性指数; S 为样品中的总种数; P_i 为第 i 种的个体数 (n_i) 与总个体数 (N) 的比值 (n_i/N)。

(2) 均匀度指数:

$$J = \frac{H'}{\log_2 S}$$

(2)

式中: J 为均匀度指数; H' 为生物多样性指数; S 为样品中总种数。

(3) 丰富度指数:

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

(3)

式中: d 为丰富度指数; S 为样品中的总种数; N 为样品中的生物总个数。

(4) 优势种优势度 (Y):

$$Y = \frac{n_i}{N} \times f_i$$

(4)

式中: f_i 为第 i 个种在各样方中出现频率; n_i 为群落中第 i 个种在空间中的个体数量; N 为群

落中所有种的个体数总和。

各断面的潮间带大型底栖动物群落结构差异, 采用 PRIMER 6.0 软件中的聚类分析 (cluster analysis) 和非度量多维排序分析 (NMDS) 进行分析^[13]; 采用 ABC 曲线分析群落结构稳定状况^[14]; 应用 SPSS 26.0 软件对两个区域的沉积物要素和多样性指数进行单因素方差分析, 设置显著性水平为 0.05; 此外, 采用 Spearman 相关性分析 (SPSS 26.0) 对潮间带大型底栖动物调查数据与环境因子的关系进行分析^[15]。

2 结果与讨论

2.1 泥质海岸潮间带沉积环境因子

沙埕港八尺门与前岐调查区域均为泥质岸滩, 进一步对比分析八尺门和前岐的沉积物要素差异, 结果见表 1, 砷、铜、镉、pH、平均粒径、中值粒径在八尺门和前岐的空间差异显著 ($p<0.05$), 除重金属铜的含量在八尺门区域的值大于前岐区域, 其余大部分环境要素均为前岐高于八尺门。根据《海洋沉积物质量》(GB18668—

表 1 八尺门和前岐调查区域沉积物环境因子
Tab.1 Sediment environmental factors of the Bachimen and Qianqi

环境要素	均值		分类标准		<i>p</i>
	八尺门	前岐	八尺门	前岐	
汞Hg(mg/kg)	0.043	0.049	第一类	第一类	0.262
砷As(mg/kg)	9.16	11.1	第一类	第一类	0.042*
铜Cu(mg/kg)	44.0	32.6	第二类	第一类	0.034*
铅Pb(mg/kg)	32.4	33.5	第一类	第一类	0.482
镉Cd(mg/kg)	0.06	0.08	第一类	第一类	0.005**
铬Cr(mg/kg)	39	42.8	第一类	第一类	0.190
锌Zn(mg/kg)	117	117	第一类	第一类	0.921
总磷(mg/kg)	507	625	第一类	第一类	0.094
总氮(mg/kg)	660	676	第一类	第一类	0.695
油类(mg/kg)	11.7	73.6	第一类	第一类	0.091
硫化物(mg/kg)	45.7	65.2	第一类	第一类	0.415
有机碳	0.79	0.89	第一类	第一类	0.149
水溶性盐(g/kg)	17.4	21.9	/	/	0.212
pH	7.30	7.44	/	/	0.001**
Eh(mv)	-150	-146	/	/	0.622
平均粒径Mzφ	7.49	7.21	/	/	0.009**
中值粒径Mdφ	7.34	7.15	/	/	0.012*

注: *, $p<0.05$, 相关性显著; **, $p<0.01$, 相关性极显著

2002)分类标准,八尺门各沉积要素除铜符合第二类海洋沉积物质量标准外,其余要素符合第一类海洋沉积物质量标准,前岐的各沉积物要素均符合第一类海洋沉积物质量标准。

2.2 潮间带大型底栖动物群落结构

2.2.1 生物种类组成

2023年秋季在沙埕港(八尺门)SCC01、SCC02、SCC03断面作潮间带大型底栖动物定性和定量调查,共鉴定潮间带大型底栖动物47种,隶属于7个类群。定量样品有7个类群43种,定性样品有7个类群34种。其中,甲壳动物种类最为丰富,共19种,占潮间带大型底栖动物种类组成的40.4%;软体动物,共14种,占29.8%;脊索动物,共6种,占12.8%;环节动物,共5种,占10.6%;纽形动物、腔肠动物和星虫动物,各1种,分别占总种数的2.1%。优势种共有4种,分别为弧边管招潮(*Tubuca arcuata*)、平疣桑椹石磺(*Platevindex mortoni*)、珠带拟蟹守螺(*Cerithidea cingulata*)、纹斑棱蛤(*Trapezium liratum*)。

在沙埕港(前岐)SCC04、SCC05断面作潮间带大型底栖动物定性和定量调查,共鉴定潮间带大型底栖动物40种,隶属于6个类群。其中,定量样品有6个类群35种,定性样品有5个类群22种。其中,环节动物种类最为丰富,共16种,占潮间带大型底栖动物种类组成的40.0%;其次为甲壳动物,共12种,占30.0%;脊索动物,共6种,占15.0%;软体动物,共4种,占10.0%;星虫动物和纽形动物,各1种,分别占2.5%。优势种共有6种,分别为昆士兰稚齿虫(*Prionospio queenslandica*)、弧边管招潮、秀丽长方蟹(*Metaplex elegans*)、背毛背蚓虫(*Notomastus aberans*)、平疣桑椹石磺、长足长方蟹(*Metaplex longipes*)。

2.2.2 生物密度与生物量

2023年秋季在沙埕港各断面的生物密度与生物量如图1所示。

八尺门区域三条断面SCC01、SCC02、SCC03平均栖息密度为62.33 ind/m²,其中高潮区为62.67 ind/m²,中潮区为55.00 ind/m²,低潮区为

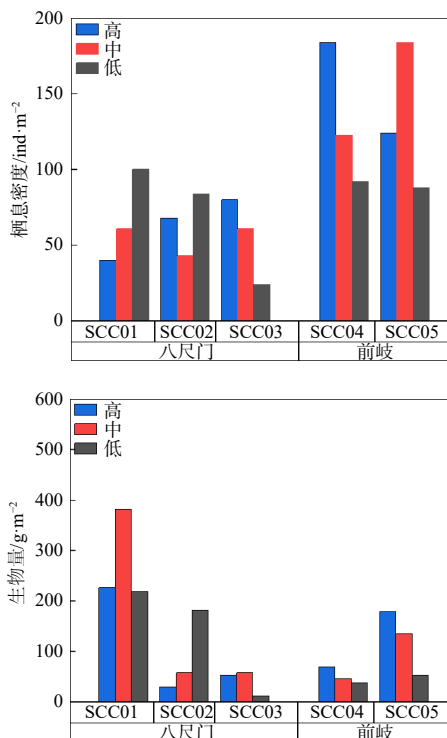


图1 沙埕港(八尺门与前岐)各断面平均生物量与生物密度分布

Fig. 1 Average density and biomass of macrobenthos in high, middle and low tide zone of Bachimen and Qianqi

69.33 ind/m²。总体来看,密度分布为低潮区>高潮区>中潮区;平均生物量为135.16 g/m²,其中高潮区为102.71 g/m²,中潮区为165.72 g/m²,低潮区为137.04 g/m²,生物量分布为中潮区>低潮区>高潮区,中潮区检出较多的软体动物平疣桑椹石磺和牡蛎(*Ostreidae*),低潮区检出脊索动物大弹涂鱼(*Boleophthalmus pectinirostris*)、绿斑缢虾虎鱼(*Amoya chlorostigmatoides*)、短吻缢虾虎鱼(*Amoya brevirostris*)、台湾丝虾虎鱼(*Cryptocentrus yatsui*),所以中潮区与低潮区的生物量较高。

前岐区域两条断面SCC04、SCC05平均栖息密度为132.44 ind/m²,其中高潮区为154.00 ind/m²,中潮区为153.33 ind/m²,低潮区为90.00 ind/m²。总体来看,密度分布为高潮区>中潮区>低潮区,高中潮区因检出高密度的环节动物昆士兰稚齿虫(*Prionospio queenslandica*),所以生物栖息密度较高;平均生物量为86.86 g/m²。其中高潮区

为 124.31 g/m², 中潮区为 90.91 g/m², 低潮区为 45.36 g/m², 生物量分布为高潮区>中潮区>低潮区, 高潮区因检出较多的甲壳动物弧边管招潮和秀丽长方蟹, 所以生物量较高。

2.2.3 生物多样性

八尺门区域潮间带生物种类多样性指数 H' 范围在 1.58~2.59, 平均值为 2.11; 均匀度指数 J 范围在 0.82~0.90, 平均值为 0.87; 丰富度指数 d 范围在 0.57~1.22, 平均值为 0.87(表 2)。

前岐区域潮间带生物种类多样性指数 H' 变化范围在 2.15~2.66, 平均值为 2.33; 均匀度指数 J 变化范围是 0.73~0.80, 平均值为 0.77; 丰富度指数 d 变化范围是 0.85~1.33, 平均值为 1.08 (表 2)。

前岐区域的多样性指数和丰富度指数高于八尺门区域(图 2), 但是差异并不明显($p>0.05$), 综合三项指数来看, 前岐区域的生物多样性优于八尺门区域。

2.2.4 群落稳定性

使用 ABC 曲线对沙埕港(八尺门与前岐)进行潮间带大型底栖动物群落稳定性分析。如图 3 所示, 八尺门区域的 SCC01 断面的生物量曲线始终在丰度曲线之上, $W=0.191$, 表明群落结构稳定; SCC02 断面刚开始时丰度曲线在生物量

表 2 沙埕港(八尺门与前岐)潮间带生物多样性指数表
Tab.2 The biodiversity indexes in intertidal zone of Baichimen and Qianqi

区域	潮区	H'	J	d
八尺门	高潮区	1.58	0.82	0.57
	中潮区	2.15	0.88	0.82
	低潮区	2.59	0.90	1.22
	均值	2.11	0.87	0.87
前岐	高潮区	2.66	0.79	1.33
	中潮区	2.18	0.73	1.05
	低潮区	2.15	0.80	0.85
	均值	2.33	0.77	1.08

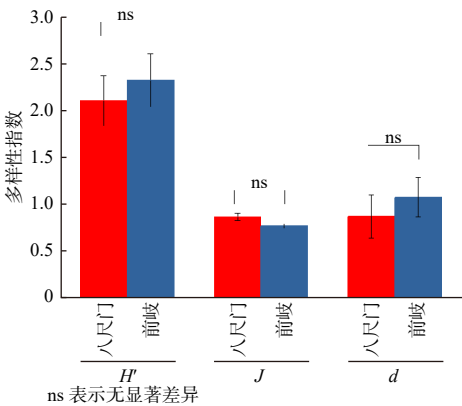


图 2 沙埕港(八尺门与前岐)多样性指数统计图
Fig.2 The biodiversity indexes in Bachimen and Qianqi

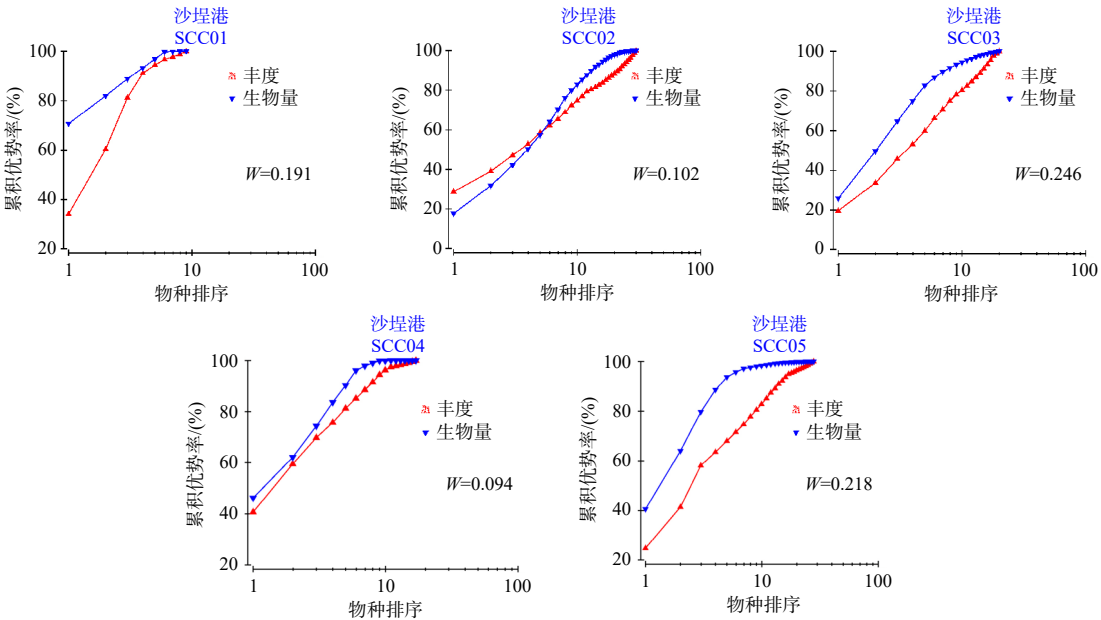


图 3 沙埕港(八尺门与前岐)潮间带大型底栖动物群落 ABC 曲线
Fig.3 ABC curves of macrobenthos in Bachimen and Qianqi

曲线之上, 相交之后生物量曲线在丰度曲线之上, 表明群落受到中等程度干扰; SCC03 断面的生物量曲线始终在丰度曲线之上, $W=0.246$, 表明群落结构稳定。

前岐区域 SCC04、SCC05 两条断面生物量曲线始终在丰度曲线之上, 表明群落结构稳定。

综合来看, 前岐区域的群落结构较八尺门区域稳定。

2.3 潮间带大型底栖动物群落结构空间分布特征

对调查的五个断面潮间带生物栖息密度进行 Cluster 聚类分析和 NMDS 标度分析(图 4, 图 5), 在相似性水平为 20%~30%, 可以分为 4 个组, 组 1 包括 SCC03 断面、SCC02 中潮区和低潮区; 组 2 包括 SCC04 和 SCC05 断面; 组 3 包括 SCC01 断面; 组 4 包括 SCC02 高潮区。

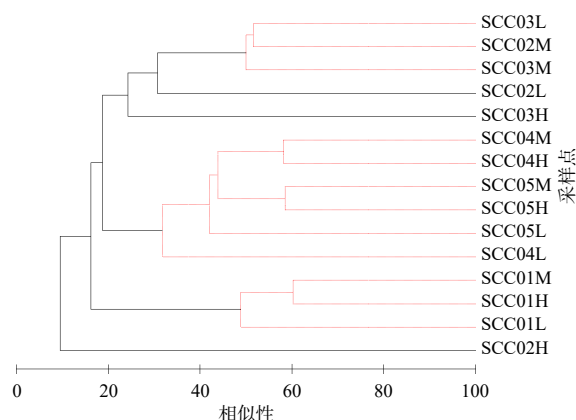


图 4 各站点聚类分析树状图

Fig. 4 Cluster analysis of macrozoobenthic communities among sites

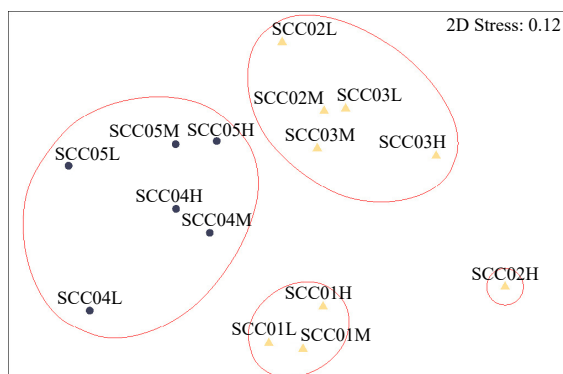


图 5 各站点非度量多维标度图

Fig. 5 Non-metric multidimensional scaling of macrobenthos communities among sites

因此将 SCC04 与 SCC05 断面划分为前岐区域, 前岐区域断面生物群落结构组成较相似, 其余三条断面划分为八尺门区域, 与地理区域的划分一致。Cluster 聚类分析和 NMDS 标度分析, 两图组群分类结构相似, 相互验证。

2.4 潮间带大型底栖动物和沉积环境因子的关系

Spearman 相关性分析的结果见表 3, 八尺门区域潮间带大型底栖动物的密度受总磷、总氮、锌和硫化物的影响较大, 且与锌呈显著正相关 ($p<0.05$), 与硫化物呈显著负相关 ($p<0.05$)。弧边管招潮受油类、总氮和 pH 的影响较大, 与总氮和油类均呈显著正相关 ($p<0.05$), 与 pH 呈显著负相关 ($p<0.05$); 平疣桑椹石磺受铜、汞和 Eh 的影响较大, 与铜呈极显著正相关 ($p<0.01$), 与 Eh 呈极显著负相关 ($p<0.01$); 珠带拟蟹守螺与平疣桑椹石磺相似, 受铜、汞和 Eh 的影响较大, 与铜呈显著正相关 ($p<0.05$), 与 Eh 呈显著负相关 ($p<0.01$); 纹斑梭蛤受环境因子影响不大。

前岐区域潮间带大型底栖动物的密度受总磷、总氮、油类和 pH 的影响较大, 且与 pH 呈显著负相关 ($p<0.05$), 与总磷呈极显著负相关 ($p<0.01$)。昆士兰稚齿虫与铅呈显著负相关 ($p<0.05$); 背毛背蚓虫受环境因子影响不大; 弧边管招潮与总氮呈极显著负相关 ($p<0.05$); 平疣桑椹石磺与汞、铬和有机碳的相关系数较大, 与汞呈极显著正相关 ($p<0.01$), 与铬和有机碳呈极显著负相关 ($p<0.01$); 秀丽长方蟹受硫化物和水溶性盐的影响较大, 与硫化物呈极显著负相关 ($p<0.01$); 长足长方蟹受总氮、油类和中值粒径的影响较大, 与总氮和中值粒径呈显著负相关 ($p<0.05$), 与油类呈极显著正相关 ($p<0.01$)。

2.5 讨论

2.5.1 八尺门区域与前岐区域群落结构特征差异

基于 Cluster 聚类分析和 NMDS 标度分析得出沙埕港潮间带大型底栖动物优势种及共同种空间分布存在明显的空间异质性。八尺门区域优势种为弧边管招潮、平疣桑椹石磺、珠带拟蟹守螺、纹斑梭蛤, 前岐区域的优势种为昆士兰稚齿虫、弧边管招潮、秀丽长方蟹、背毛背蚓虫、平疣桑椹石磺、长足长方蟹。前岐区域优势种

表 3 生物变量与沉积环境因子的 Spearman 相关系数

Tab.3 Spearman's correlation coefficients between the biological variables and the sediment environmental factors

生物	汞	砷	铜	铅	镉	铬	锌	总磷	总氮	油类	硫化物	有机碳	含水率	水溶性盐	pH	Eh	中值粒径
八尺门区域																	
潮间带底栖动物	0.543	0.429	0.371	0.543	0.525	0.086	0.880[*]	0.600	0.771	0.200	-0.829[*]	0.086	-0.600	-0.771	-0.261	-0.314	-0.371
弧边管招潮	-0.203	-0.290	0.261	0.087	-0.329	0.754	0.185	0.696	0.812[*]	0.841[*]	-0.290	0.696	0.203	0.174	-0.897[*]	-0.058	-0.551
平疣桑椹石磺	0.638	-0.577	0.941^{**}	-0.698	0.557	-0.395	0.548	0.273	0.213	0.091	-0.273	0.273	0.213	-0.091	0.031	-0.941^{**}	-0.334
珠带拟蟹守螺	0.778	-0.270	0.845[*]	-0.372	0.657	-0.304	0.718	0.439	0.507	0.270	-0.439	0.439	0.135	-0.270	-0.051	-0.845[*]	-0.169
纹斑梭蛤	0.131	0.393	-0.393	0.393	0.424	-0.393	0.139	-0.655	-0.393	-0.655	0.131	-0.655	-0.655	-0.655	0.399	0.131	0.131
前岐区域																	
潮间带底栖动物	0.000	0.087	-0.319	-0.145	0.125	-0.029	-0.145	-0.941^{**}	-0.754	0.754	-0.116	0.074	-0.348	0.464	-0.812[*]	0.464	-0.638
昆士兰稚齿虫	0.353	-0.600	-0.657	-0.829[*]	0.185	-0.257	-0.771	-0.493	-0.086	0.371	0.429	0.058	-0.143	-0.143	-0.086	0.714	-0.657
背毛背蚓虫	-0.448	-0.696	0.203	-0.406	-0.016	0.580	0.116	-0.721	-0.493	0.319	-0.029	0.735	0.261	0.551	-0.551	0.029	-0.464
弧边管招潮	-0.179	0.232	0.058	0.058	0.250	0.145	0.319	-0.794	-0.928^{**}	0.696	-0.493	0.176	0.058	0.696	-0.638	0.000	-0.522
平疣桑椹石磺	0.955^{**}	0.383	-0.765	-0.147	0.588	-0.971^{**}	-0.647	0.358	0.177	0.294	0.559	-0.925^{**}	-0.265	-0.794	0.530	0.618	-0.235
秀丽长方蟹	-0.448	0.145	0.290	0.029	-0.235	0.348	0.406	-0.426	-0.435	0.029	-0.928^{**}	0.397	0.203	0.783	-0.261	-0.435	-0.058
长足长方蟹	0.318	-0.029	-0.324	-0.324	0.763	-0.235	-0.088	-0.702	-0.912[*]	0.971^{**}	0.088	-0.090	0.177	0.235	-0.324	0.412	-0.883[*]

注:*, $p<0.05$,相关性显著;**, $p<0.01$,相关性极显著

类群较丰富,可能是由于前岐沉积环境较稳定,优势度占比较高的生物为昆士兰稚齿虫,其属于环节动物门多毛纲海稚虫科稚齿虫属生物,海稚虫科中分布于潮间带的种类数量明显较多,有的种类在潮间带有着很高的栖息密度^[16]。目前关于昆士兰稚齿虫的生态学习性未有详细报道,但是同属的生物具有相似的生活习性,如同属的稚齿虫属生物奇异稚齿虫,栖息密度与铅、镉、锌、铜含量呈显著负相关^[17],可能是由于八尺门内超标的铜含量限制了多毛类的生长,而前岐区域的沉积环境较适宜使得昆士兰稚齿虫成为优势类群。总的来说,水文特征、食物条件、生境等差异,导致了八尺门与前岐区域优势种的分异,反映出不同海域生物多样性的互补性。

本研究中八尺门区域潮间带生物平均栖息密度为 62.33 ind/m²,栖息密度与前岐潮间带生物(132.44 ind/m²)、宁德核电厂附近潮间带生物(178.5 ind/m²)和三沙湾西北部滨海湿地潮间带生物(368 ind/m²)相比明显较低;八尺门区域潮

间带生物平均生物量为 135.16 g/m²,生物量相比于前岐潮间带生物(86.86 g/m²)、宁德核电厂附近潮间带生物(69.3 g/m²)和三沙湾西北部滨海湿地潮间带生物(12.45 g/m²)较高;八尺门区域潮间带生物多样性指数 H' 为 2.11,均匀度指数 J 为 0.87,丰富度指数 d 为 0.87,相比于前岐区域(H' 为 2.33、 J 为 0.77、 d 为 1.08)和宁德核电厂附近潮间带生物(H' 为 3.16、 J 为 0.82、 d 为 2.03),多样性指数与丰富度指数低得多,均匀度指数则较高^[18-19]。其中,前岐区域、宁德核电厂附近潮间带生物和三沙湾西北部滨海湿地潮间带生物主要是环节动物、甲壳动物和软体动物占优势,八尺门区域的主要优势类群为甲壳动物和软体动物。相比其他区域,八尺门生物密度较低,但生物量比其他区域高,主要是因为有个体较大的弧边管招潮和秀丽长方蟹。注意到八尺门区域受沙埕港工业区重金属污染、农业农药面源及生活污水排放等人类活动及海水内外交流不畅的影响较大^[4];前岐区域、宁德核电厂和三沙湾

西北部滨海湿地相对来说水动力较强,海水交换畅通,污染相对八尺门区域较轻,而八尺门区域沉积物铜的超标可能会导致大型底栖动物密度下降^[20],具体表现为沙埕港潮间带大型底栖动物栖息密度由八尺门区域向前岐区域逐步增高的特征,表明沉积物中的铜可能会对潮间带大型底栖动物存在潜在的风险^[21]。综上所述,八尺门区域海域环境质量堪忧,对底栖动物的生存环境造成影响,因此需要持续关注并加强生态修复工作。

2.5.2 环境要素对潮间带大型底栖动物群落结构的影响

本研究发现八尺门区域潮间带大型底栖动物的密度受总磷、总氮、锌和硫化物的影响较大,且与锌呈显著正相关,与硫化物呈显著负相关。锌是重要的微量元素,适量有利于底栖动物生长,但过量可能会产生毒性效应。硫化物通常是缺氧环境下的产物,过高浓度会对好氧性底栖动物产生毒性影响^[22]。优势种珠带拟蟹守螺和平疣桑椹石磺受铜含量影响较大,重金属污染物如铜、汞等会对底栖动物造成毒性影响,干扰其生理代谢过程^[23],环境因子监测表明八尺门区域处于重金属铜污染的状态,可能是由于白琳镇玄武岩石材加工排放的污水对八尺门区域造成的影响^[3],导致底栖动物生存环境存在铜超标的情况,制约八尺门区域底栖动物生长^[24]。

前岐区域潮间带大型底栖动物的密度受总磷、总氮、油类和pH的影响较大,且与pH呈显著负相关,与总磷呈极显著负相关。pH的变化会影响底栖动物的生理代谢过程,而过高或过低的pH可能会对其产生不利影响^[25]。总磷反映了沉积环境的营养状态,已有研究表明底栖动物生长与氮、磷呈显著负相关,这与本区域研究结果相一致^[26]。

两个区域的总磷、总氮与潮间带大型底栖动物群落参数间存在一定的相关性^[27],由于本次调查区域为潮间带区域,受人类活动影响较大,陆源汇入营养盐(主要是总磷、总氮)浓度较高,成为大型底栖动物生长发育的基础,这与港湾区域等高营养盐海域大型底栖动物多样性降低的情况相反^[21]。从空间分布上表现出大型底栖动物栖

息密度大致呈现出前岐区域高、八尺门区域低的趋势,与总磷和总氮的分布趋势大致相同,但两个区域对于总磷、总氮的响应趋势不同,说明总磷、总氮含量可能是底栖动物生长的制约因素之一^[28],因此与总磷、总氮的相关性分析还需进一步研究。

3 结论

前岐区域的pH和总磷水平可能更有利于底栖动物的生存和繁衍,因此,潮间带大型底栖动物密度相对较高。八尺门区域沉积环境状况较差,尤其是重金属铜含量超一类海洋沉积物质量标准,这可能会对较为敏感的底栖动物产生不利影响,限制底栖动物生长,导致潮间带生物多样性水平较低以及群落结构受到干扰。这种情况可能与八尺门区域较多的人类活动(水产养殖、海岸工程和污水排放等)有关。

参考文献:

- [1] 李新正. 我国海洋大型底栖生物多样性研究及展望: 以黄海为例[J]. 生物多样性, 2011, 19(6): 676-684.
- [2] RANASINGHE J A, SCHIFF K C, MONTAGNE D E, et al. Benthic macrofaunal community condition in the Southern California Bight, 1994–2003[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60(6): 827-833.
- [3] 王 颢, 刘 炜, 许珠华, 等. 沙埕港多种环境介质中重金属的含量分布及来源分析[J]. *应用海洋学学报*, 2015, 34(1): 80-86.
- [4] 卢兴润. 福鼎市近岸海域水环境现状及成因分析[J]. *河南科技*, 2021, 40(32): 141-144.
- [5] 朱延忠, 陈洪举, 刘光兴. 福建沙埕港浮游动物群落特征及影响因子[J]. *中国海洋大学学报*, 2008, 38(6): 943-950.
- [6] 孙晓庆, 董树刚. 沙埕港春季浮游植物群落结构的初步研究[J]. *南方水产*, 2008, 4(3): 48-57.
- [7] 李 艺, 何晨翔, 胡成业, 等. 沙埕港大型底栖动物空间分布及其与环境因子之间的关系[J]. *浙江海洋大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(4): 312-318.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋监测规范 第5部分: 沉积物分析: GB 17378.5—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋调查规范 第8部分: 海洋地质地球物理调查: GB 12763.8—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋调查规范 第6部分: 海洋生物调查:

- GB/T 12763.6—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋监测规范 第7部分: 近海污染生态调查和生物监测: GB 17378.7—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [12] 徐兆礼, 陈亚瞿. 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, 1989, 8(4): 13-15, 19.
- [13] 周红, 张志南. 大型多元统计软件 PRIMER 的方法原理及其在底栖群落生态学中的应用[J]. 青岛海洋大学学报, 2003, 33(1): 58-64.
- [14] 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, 25(1): 92-96.
- [15] 张文斌, 孙伟, 许歆, 等. 某核电厂附近海域生态环境特征及潜在致灾生物研究[J]. 海洋科学, 2022, 46(7): 32-43.
- [16] 周进. 中国海异毛虫科和海稚虫科分类学和地理分布研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2008: 158-161.
- [17] 蔡立哲. 深圳湾底栖动物生态学[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2015: 1-303.
- [18] 刘端辉. 宁德核电站填海造地后的海域环境现状研究[D]. 厦门: 集美大学, 2013: 47-56.
- [19] 黄雅琴, 李荣冠, 郑成兴, 等. 三沙湾西北部滨海湿地潮间带生物生态研究[J]. 台湾海峡, 2009, 28(2): 279-292.
- [20] KUK-DZUL J G, GOLD-BOUCHOT G, ARDISSON P L. Benthic infauna variability in relation to environmental factors and organic pollutants in tropical coastal lagoons from the northern Yucatan Peninsula[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(12): 2725-2733.
- [21] 吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 等. 福建省主要海湾潮下带大型底栖无脊椎动物组成与分布特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4240-4248.
- [22] 王菊英, 马德毅, 闫启仑, 等. 海洋沉积物中酸溶硫化物对二价金属镉的地球化学特征及生物毒性的影响[J]. *海洋与湖泊*, 2001, 32(5): 483-488.
- [23] 郑玲芳. 黄浦江上游底栖动物与沉积物重金属潜在生态风险[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(2): 230-234.
- [24] 高爱根, 陈全震, 曾江宁, 等. 浙江苍南泥相潮间带春末底栖动物生态特征[J]. *海洋科学*, 2006, 30(5): 92-96.
- [25] 任海庆, 袁兴中, 刘红, 等. 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, 2015, 35(10): 3148-3156.
- [26] 高欣, 牛翠娟, 胡忠军. 太湖流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(12): 3329-3336.
- [27] 黄昆, 傅婷婷, 黄智伟, 等. 福建省南部近海夏季大型底栖动物群落特征[J]. *渔业研究*, 2022, 44(4): 312-323.
- [28] 于宗灵, 董英莉, 袁欣, 等. 2012—2019年松花江干流底栖动物群落变化及其对水环境因子的响应[J]. *中国环境监测*, 2023, 39(6): 12-26.
- (本文编辑: 曲丽梅)

(上接第359页)

- [36] 刘璇, 张莹, 李爱芬. 活性氧介导微藻脂质积累的研究现状及进展[J]. 植物生理学报, 2022, 58(7): 1201-1211.
- [37] 查荣博, 张辉, 孙佳明. 微藻的有效成分及生物活性[J]. 吉林中医药, 2015, 35(1): 64-67.
- [38] 张丽, 蒋凤华, 曹为, 等. 四溴双酚 A(TBBPA) 对中肋骨条藻的毒性效应研究[J]. 生态毒理学报, 2014, 9(6): 1219-1225.
- [39] WU S, ZHANG J M, XIA A, et al. Microalgae cultivation for antibiotic oxytetracycline wastewater treatment[J]. *Environmental Research*, 2022, 214: 113850.
- [40] BRANCO D, LIMA A, ALMEIDA S F P, et al. Sensitivity of biochemical markers to evaluate cadmium stress in the freshwater diatom *Nitzschia palea* (Kützinger) W. Smith[J]. *Aquatic Toxicology*, 2010, 99(2): 109-117.
- [41] GEORGE B, PANCHAI I, DESAI C, et al. Effects of different media composition, light intensity and photoperiod on morphology and physiology of freshwater microalgae *Ankistrodesmus falcatus* – a potential strain for bio-fuel production[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 171: 367-374.
- [42] XIONG J Q, GOVINDWAR S, KURADE M B, et al. Toxicity of sulfamethazine and sulfamethoxazole and their removal by a green microalga, *Scenedesmus obliquus*[J]. *Chemosphere*, 2019, 218: 551-558.
- [43] MOHAMED Z A. Polysaccharides as a protective response against microcystin-induced oxidative stress in *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus quadricauda* and their possible significance in the aquatic ecosystem[J]. *Ecotoxicology*, 2008, 17(6): 504-516.
- [44] WANG H T, HU C Y, WANG Y, et al. Elucidating microalgae-mediated metabolism for sulfadiazine removal mechanism and transformation pathways[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 327: 121598.
- [45] MOCK T, KROON B M A. Photosynthetic energy conversion under extreme conditions—I: important role of lipids as structural modulators and energy sink under N-limited growth in Antarctic sea ice diatoms[J]. *Phytochemistry*, 2002, 61(1): 41-51.
- (本文编辑: 曲丽梅)