

小清河口贝类养殖区大型底栖动物优势种及群落特征——生态位与功能群分析*

唐玉泽¹ 徐晓玮² 丁敬坤³ 薛素燕¹ 李加琦¹ 刘鲁雷¹
李 昂¹ 毛玉泽^{1①}

(1. 海水养殖生物育种与可持续产出全国重点实验室(中国水产科学研究院黄海水产研究所) 山东青岛 266071; 2. 自然资源部北海海域海岛中心 山东青岛 266061; 3. 中交水运规划设计院有限公司青岛分公司 山东青岛 266000)

摘要 为深入分析降雨对小清河口贝类养殖区大型底栖动物群落功能群特征的影响, 基于 2019 年 7 月(降雨前)和 8 月(降雨后)调查数据, 结合 Shannon-Wiener 生态位宽度、Pianka 生态位重叠及典范对应分析(CCA), 研究了大型底栖动物优势种群落变化特征及环境驱动因素。结果表明: (1) 共鉴定 8 个优势种, 彩虹明樱蛤(*Moerella iridescens*)、寡鳃齿吻沙蚕(*Nephtys oligobranchia*)为两个月份共有优势种。(2) 降雨前后大型底栖动物生活型和摄食功能群结构呈现显著差异, 7 月以底内型—浮游生物食者(平均密度 265 ind./m², 占比 71%)为主导, 8 月以肉食者为主(平均密度 103 ind./m², 占比 58%), GS/GSB 值由 0 增至 2/3。(3) 优势种生态位宽度差异显著(0.494~2.945), 广生态位种(如寡鳃齿吻沙蚕 *Nephtys oligobranchia*)与窄生态位种(如光滑河蓝蛤 *Potamocorbula laevis*)共存, 物种间竞争较弱(60% 的种对生态位重叠 $Q_{ik} < 0.3$)。(4) 典范对应分析表明, 盐度(解释率 32.7%, $P < 0.01$)是调控功能群演替(GS/GSB 值)及生态位分化的首要驱动因子。(5) 光滑河蓝蛤作为狭盐种(适宜盐度 22~34), 可作为盐度阈值指示种。研究结果揭示了降雨引起的环境变化(盐度、溶解氧、pH、叶绿素 *a*)是驱动底栖动物 GS/GSB 值及生态位分化的重要因素, 为小清河口底栖生物资源保护与可持续利用提供科学依据。

关键词 大型底栖动物; 盐度; 生态位宽度; GS/GSB; CCA

中图分类号 Q178.1 **doi:** 10.11693/hyh20250300089

河口生态系统作为海洋与陆地的交错地带, 是物质循环与能量流动的关键界面, 也是全球生态系统中生物多样性最为丰富的区域之一(吴斌等, 2014)。其独特的地理位置和复杂的水动力条件, 使得河口生态系统在调节区域气候、维持生物多样性、促进营养物质交换以及支撑渔业资源等方面发挥着不可替代的作用。然而, 河口生态系统也是生态敏感性极高的区域, 其生物群落结构和功能极易受到自然和人为因素的干扰, 如盐度变化、营养盐输入、极端气候事件以及人

类活动的影响。

大型底栖动物作为河口生态系统的关键功能物种, 通过生物扰动(摄食、避敌、排泄)以调控沉积物-水体界面的物质交换与能量流动, 其群落结构和功能的变化不仅反映生态系统对环境胁迫的敏感性, 还可作为生态健康的重要指示物(彭欣等, 2011; 詹启鹏等, 2023)。近年来, 随着全球气候变化和人类活动的加剧, 极端降水事件频发, 导致河口水动力条件和盐度梯度的剧烈变化, 进而对大型底栖动物群落的功能和

*国家重点研发计划, 2023YFD2400800 号; 中国水产科学研究院基本科研业务费, 2023TD54 号; 山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目, 2023TSGC0768 号。唐玉泽, 硕士研究生, E-mail: tangyuze2021@126.com

① 通信作者: 毛玉泽, 博士生导师, 研究员, E-mail: maoyz@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2025-03-31, 收修改稿日期: 2025-06-03

结构产生深远影响(Grilo *et al.*, 2011)。生态位理论作为解析群落构建机制的核心工具,通过量化物种资源利用策略与生境适应能力,能够有效揭示群落的竞争-共存机制(赵永强等, 2009; 张合烨等, 2024)。近年来,基于多变量功能群与生态位研究逐渐成为生态学领域的研究热点。相比较于传统的单变量多样性研究,多变量分析能够更全面地反映生态系统功能的稳定性(Kraft *et al.*, 2008; Hawkins *et al.*, 2015)。

小清河口作为莱州湾重要的河口生态系统,其喇叭状河口地貌特征及多变的环境特征,加剧了淡水输入后的盐度梯度效应,成为大型底栖动物群落结构分异的主导因子(Liu *et al.*, 2023)。尽管前期研究已揭示了该区域大型底栖动物群落的组成特征及空间分异规律(袁伟等, 2020; 丁敬坤等, 2021; 董建宇等, 2022),但针对极端降水事件驱动下生态位和功能群演替的生态位分化机制,仍缺乏系统研究。本研究选取 2019 年 7 月和 8 月(降水后盐度大幅度下降)的数据,结合功能群分析、生态位宽度、生态位重叠及 CCA 分析,探讨降雨扰动下大型底栖动物生态位与功能群的动态响应机制。研究旨在揭示极端降水事件对河口底栖生物群

落结构、功能及生态位的影响,为河口生态修复、底栖生物资源保护及经济贝类增殖养殖提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 样品采集

研究区域位于莱州湾小清河口附近海域(37° 15' 32.04"N~37° 20' 46.32"N, 119° 2' 36.66"E~119° 8' 54.66"E),调查站位见图 1。现场使用 YSI Pro (Yellow Springs, OH, USA)测定盐度(Sal)、水温(T)、溶解氧(DO),叶绿素 *a* 采样和分析方法按《海洋监测规范 第 4 部分:海水分析》(GB 17378.4—2007)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)进行。现场使用抓斗采泥器(型号为 Van Veen grab 0.1 m²)采集 3~4 次合并为一个样品,现场用 0.5 mm 网筛进行筛选,仔细挑选大型底栖动物样品,用 5% 的甲醛溶液固定,带回实验室对样品进行鉴定分类、称重,根据采样面积计算丰度(ind./m²)和生物量(g/m²)。样品处理等均按照《海洋调查规范 第 6 部分:海洋生物调查》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等, 2008)进行。

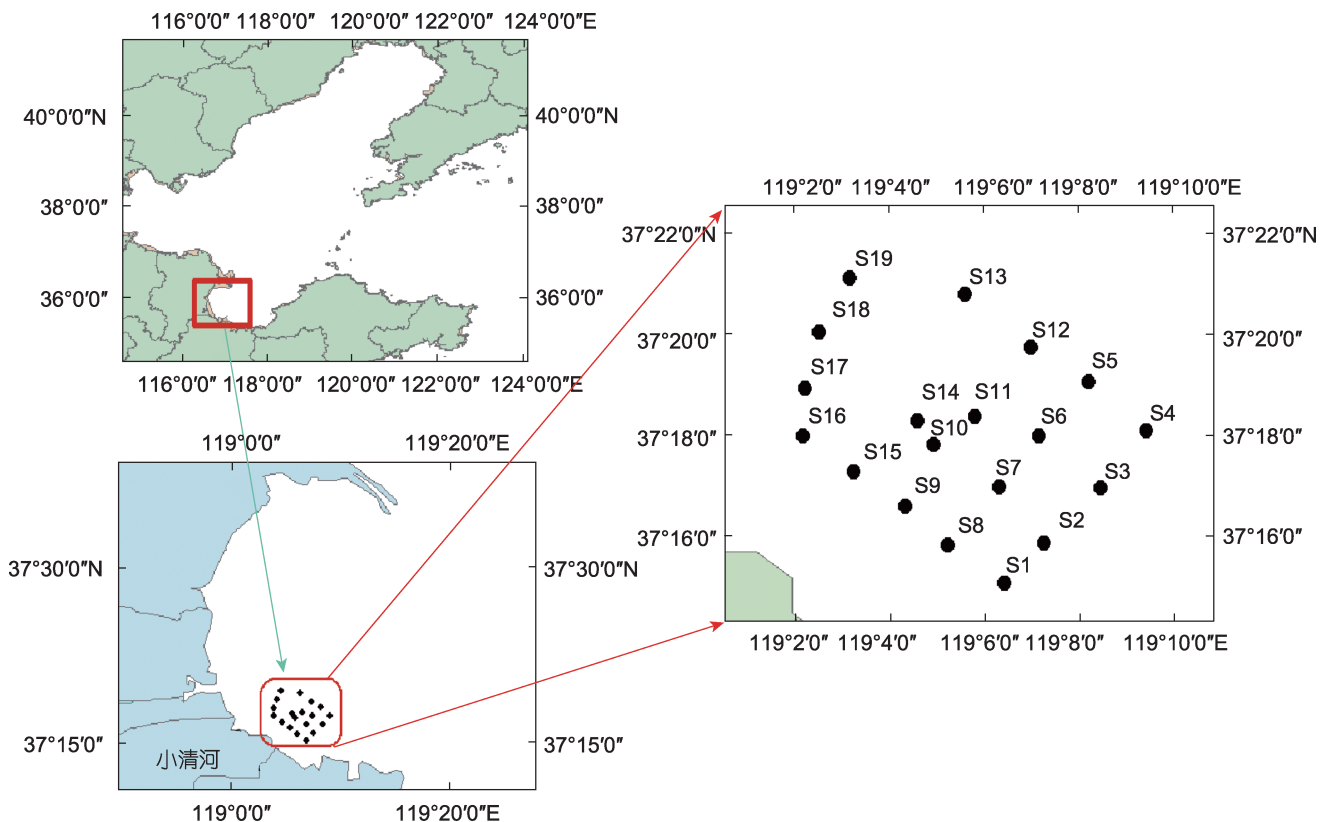


图 1 研究区域站位示意图

Fig.1 The deployment of stations in the Xiaoqing River estuary

1.2 指数计算

根据优势度公式确定优势种指数(刘坤等, 2016); 优势种更替率计算公式见参考文献(徐晓群等, 2013); 采用以 Shannon-Wiener 多样性指数为基础的生态位宽度指数(Shannon, 1948); 采用 Pianka 重叠指数计算生态位重叠(Pianka, 1973)。

$$Y = (n_i / N) \times f_i, \quad (1)$$

式中, Y 为物种优势度; n_i 为第 i 种生物的个体数; N 为研究区域内生物的总个体数; f_i 为该种生物在各站位出现的频率。

$$R = \frac{a+b-2c}{a+b-c} \times 100\%, \quad (2)$$

式中, R 为优势种更替率; a 与 b 分别为 7、8 月优势种的个数; c 为 7、8 月共有优势种个数。

$$B_i = - \sum_{j=1}^R p_{ij} \ln p_{ij}, \quad (3)$$

式中, p_{ij} 是物种 i 在 j 站位的个体数与 i 种所有个体数的比值, 即:

$$p_{ij} = n_{ij} / N_i, \quad (4)$$

$$N_i = \sum_{j=1}^R n_{ij}, \quad (5)$$

式中, R 为环境资源点位的总数, 本文中 $R=38$ (19 个站点在 2 个月份, 每个取样位点相当于一个环境位点)。 B_i 为物种 i 的生态位宽度, 其阈值为 $[0, \ln R]$ 。 $B_i > 2.0$ 为广生态位种, $1.0 < B_i \leq 2.0$ 为中生态位种, $0 < B_i \leq 1.0$ 为窄生态位种, $B_i = 0$ 单独划分为一组。

按生活型功能群特征将大型底栖动物分为底上生活功能群(GS)和底下生活功能群(GSB), 前者包括底上型和游泳型, 后者包括底内型和穴居型。GS/GSB 的值可以反映生境状况对两类生活类群动物的数量影响(范航清等, 2000)。

按摄食功能群特征, 将大型底栖动物分为以下 5 类功能群: 浮游生物食者(planktophagous group, Pl)、植食者(phytophagous group, Ph)、肉食者(carnivorous group, C)、杂食者(omnivorous group, O)、碎屑食者(detritivorous group, D)。

使用 R 4.1.2 软件中的“spaa”包及 Primer 7 对生态位宽度、生态位重叠等指数进行计算, 使用 Canoco for Windows 5 软件进行 CCA 分析。使用 Excel 计算各功能群 7 月和 8 月的平均栖息密度和平均生物量。站位分布图使用 ArcGis 10.7 软件进行绘制。

2 结果与分析

2.1 海区环境特征

该海区环境呈现明显的时空分布特征, 水深范围

在 0.5~6 m, 因降雨的影响 8 月盐度出现了明显的下降, 距离河口近的站位较其他站位(S8、S9、S10、S14、S15、S16)盐度下降明显, 溶解氧亦表现出同样趋势。盐度、水温、pH 总体表现出 7 月大于 8 月, 而溶解氧、叶绿素 a 总体表现出 8 月大于 7 月。见图 2。

2.2 大型底栖动物优势种

本研究共获取 8 个优势种(7 月 3 个优势种, 8 月 5 个优势种), 其中, 彩虹明樱蛤、寡鳃齿吻沙蚕为 2 个月份共有优势种(表 1)。

基于 Bray-Curtis 相似性聚类分析(图 3), 研究区域大型底栖动物在 26.3% 相似性水平上形成两个显著分离的类群, 光滑河蓝蛤(*Potamocorbula laevis*)具有显著生态位特异性。7 月和 8 月优势种更替明显(更替率为 66.7%)。7 月第一优势种是光滑河蓝蛤, 而 8 月第一优势种是彩虹明樱蛤。

2.3 生活型划分

该海域 7 月和 8 月优势种生活型分类见表 2。7 月优势种生活型均为底内型, 8 月底内型、穴居型、底上型、游泳型均有分布。底内型优势种彩虹明樱蛤、寡鳃齿吻沙蚕在 7 月和 8 月均有分布。GS/GSB 值表现为 8 月(2/3)>7 月(0)。

2.4 摄食功能群的组成及变化

该海域 7 月和 8 月大型底栖动物优势种的摄食功能群见表 3。总物种数最多的是肉食者(3 种), 占总优势种的 50%, 浮游生物食者(2 种)、杂食者(1 种)。3 种功能群的栖息密度和生物量组成见图 4。按栖息密度排序依次为浮游生物食者(265 ind./m²)、肉食者(103 ind./m²)、杂食者(14 ind./m²), 按生物量排序依次为浮游生物食者(24.6 g/m²)、肉食者(5.6 g/m²)、杂食者(5.5 g/m²), 浮游生物食者的栖息密度和生物量均最高。7 月浮游生物食者的种类数、生物量、栖息密度均大于 8 月, 而 8 月肉食者及杂食者的种类数、生物量、栖息密度则相反, 大于 7 月。

2.5 生态位宽度和生态位重叠

该海域 7 月和 8 月大型底栖动物优势种的生态位宽度值范围为 0.494~2.945 (表 4), 广生态位种 4 种, 为寡鳃齿吻沙蚕、彩虹明樱蛤、尖齿拳蟹、东方长眼虾; 中生态位种 1 种, 为托氏蛞蝓; 窄生态位种 1 种, 为光滑河蓝蛤。

优势种种群生态位重叠值的范围为 0.001~0.709 (表 4)。当生态位重叠值大于 0.6 时, 种间生态位重叠

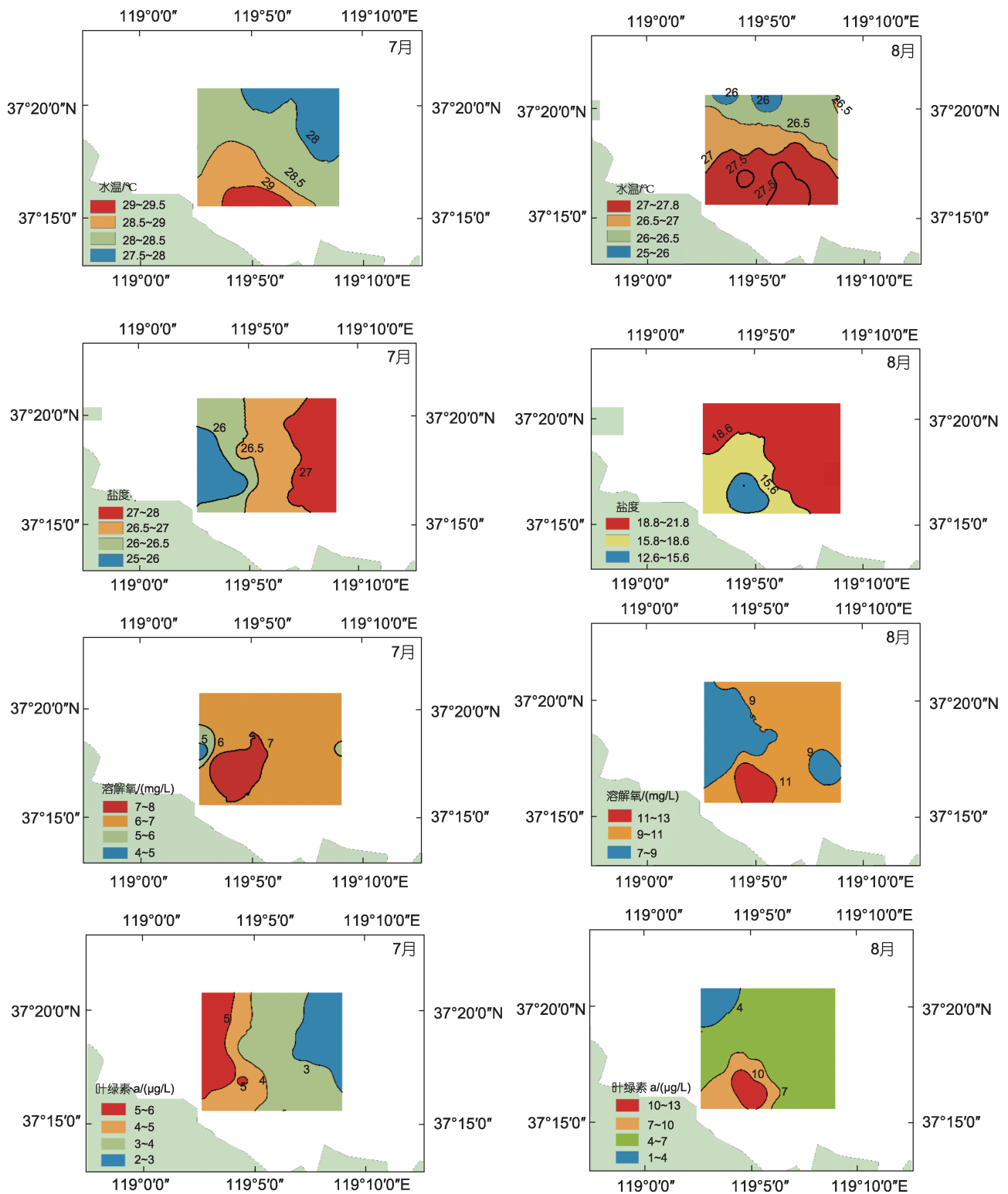


图2 各站位7月和8月水体理化参数
Fig.2 Water physicochemical parameters in July and August in different sampling stations

较为显著, 大于0.6的有2组, 分别为彩虹明樱蛤和寡鳃齿吻沙蚕(0.709)、尖齿拳蟹(0.613)。光滑河蓝蛤与东方长眼虾生态位重叠值最小, 为0.001。

2.6 生态位分化

CCA分析了6种大型底栖动物优势种与环境因子(水深、水温、盐度、叶绿素 a 、pH和溶解氧)的生

表 1 小清河口近岸 7~8 月大型底栖动物优势种

Tab.1 Dominant species of macrofauna in July and August in the Xiaoqing River estuary

月份	编号	种名	优势度 (Y)
2019.07	I	光滑河蓝蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>	0.11
	II	彩虹明樱蛤 <i>Moerella iridescens</i>	0.08
	III	寡鳃齿吻沙蚕 <i>Nephtys oligobranchia</i>	0.03
	IV	彩虹明樱蛤 <i>Moerella iridescens</i>	0.11
	V	托氏蛳螺 <i>Umbonium thomasi</i>	0.02
2019.08	VI	寡鳃齿吻沙蚕 <i>Nephtys oligobranchia</i>	0.06
	VII	尖齿拳蟹 <i>Philyra acutidens</i>	0.02
	VIII	东方长眼虾 <i>Ogyrides orientalis</i>	0.03

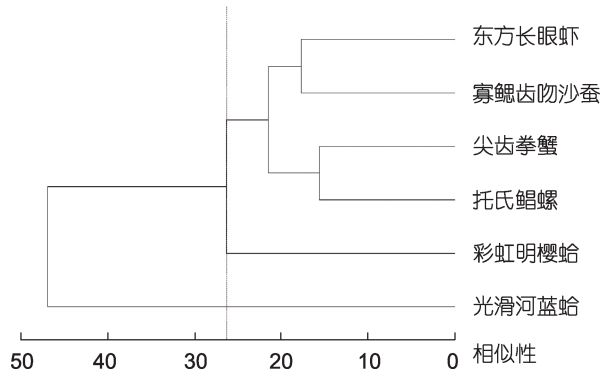


图 3 优势种相似性聚类

Fig.3 Similarity clustering results of dominant species

表 2 不同月份大型底栖动物优势种生活型及生活类群

Tab.2 Life forms and habitat groups of dominant macrofaunal species in different months

优势种	生活型	生活类群	月份
光滑河蓝蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>	底内型	GSB	▲
彩虹明樱蛤 <i>Moerella iridescens</i>	底内型	GSB	▲●
寡鳃齿吻沙蚕 <i>Nephtys oligobranchia</i>	底内型	GSB	▲●
托氏蛳螺 <i>Umbonium thomasi</i>	底上型	GS	●
尖齿拳蟹 <i>Philyra acutidens</i>	穴居型	GSB	●
东方长眼虾 <i>Ogyrides orientalis</i>	游泳型	GS	●

注: ▲. 7 月; ●. 8 月; GS. 面上生活群; GSB. 面下生活群

态位分化特征, 见图 5。前两排序轴累计解释 80.7% 的物种变异($\lambda_1=0.24$, $\lambda_2=0.07$), 能较好表征物种与环境互作关系(Ter Braak, 1987)。第一排序轴与溶解氧、叶绿素 *a* 和 pH 值呈正相关, 与其他环境因子呈负相关; 第二排序轴与水深、溶解氧和叶绿素 *a* 呈正相关, 与其他环境因子呈负相关。根据优势种在排序空间的分布格局(王宗兴等, 2012), 可将其划分为 3 个生态适应类群: I 类群(光滑河蓝蛤、彩虹明樱蛤、寡鳃齿吻沙蚕)聚集于高盐度附近, 对高盐度生境有较好的适应

表 3 不同月份大型底栖动物群落优势种功能群及栖息密度

Tab.3 Functional group and density of dominant macrofauna species in different months

月份	优势物种	栖息密度/(ind./m ²)	功能群
7 月	光滑河蓝蛤 <i>Potamocorbula laevis</i>	93	PI
	彩虹明樱蛤 <i>Moerella iridescens</i>	26	PI
	寡鳃齿吻沙蚕 <i>Nephtys oligobranchia</i>	11	C
	彩虹明樱蛤 <i>Moerella iridescens</i>	34	PI
	托氏蛳螺 <i>Umbonium thomasi</i>	23	C
8 月	寡鳃齿吻沙蚕 <i>Nephtys oligobranchia</i>	18	C
	尖齿拳蟹 <i>Philyra acutidens</i>	12	O
	东方长眼虾 <i>Ogyrides orientalis</i>	12	C

注: PI. 浮游生物食者; C. 肉食者; O. 杂食者

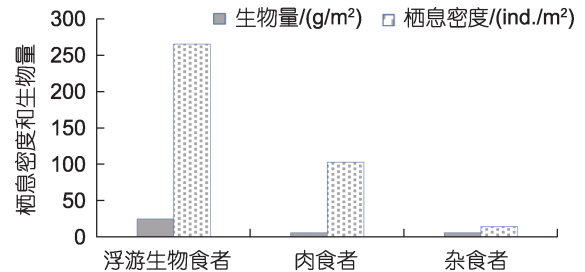


图 4 小清河口近岸海域各功能群栖息密度、生物量组成

Fig.4 Habitat density and biomass structure of functional groups in nearshore zone of the Xiaoqing River estuary

表 4 大型底栖动物群落优势种的生态位宽度和生态位重叠

Tab.4 The niche breadth and overlap of dominant species in macrofaunal communities

编号	种类	B_i	Q_{ik}					
			S1	S2	S3	S4	S5	S6
S1	光滑河蓝蛤	0.494	1					
S2	寡鳃齿吻沙蚕	2.945	0.004	1				
S3	彩虹明樱蛤	2.943	0.012	0.709	1			
S4	托氏蛳螺	1.350	0.024	0.203	0.276	1		
S5	尖齿拳蟹	2.055	0.159	0.563	0.613	0.451	1	
S6	东方长眼虾	2.194	0.001	0.450	0.334	0.063	0.180	1

性; II 类群托氏蛳螺独立分布于高 pH 区域, 与 pH 呈正相关; III 类群(尖齿拳蟹与东方长眼虾)与溶解氧呈正相关(图 5)。

3 讨论

3.1 盐度驱动的功能群演替与生态位分化机制

大型底栖动物功能群特征与生境状况和物种生物学密切相关(Naeem *et al*, 1997)。本研究发现, 该海域

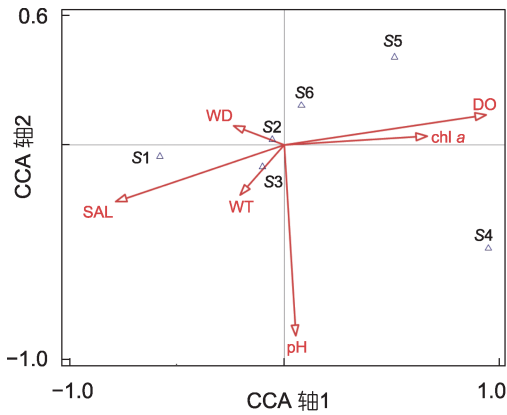


图5 小清河口近岸海域大型底栖动物与环境因子关系的 CCA 二维排序

Fig.5 CCA ordination of the relationships of distribution of 6 species of macrobenthos and environmental factors in the Xiaoqing River estuary

注: 盐度(SAL); 水温(WT); 溶氧(DO); 水深(WD); 叶绿素 *a* (chl *a*)

7 月以浮游生物食者为主(占比 71%), 其中营底内生活的双壳贝类(光滑河蓝蛤、彩虹明樱蛤)优势显著, 而 8 月则转变为肉食者为主(占比 58%), 且底内型双壳贝类的丰度大幅度下降。这一功能群更替现象可能与盐度骤降直接相关, 2019 年 8 月 10~12 日台风“利奇马”过境导致小清河入海口区域降水量激增(寒亭区平均降水量达 196.7 mm), 海域盐度显著降低(黄玉啟, 2022; 黄文彦等, 2024; 张端禹等, 2024)。光滑河蓝蛤作为狭盐种(适宜盐度 22~34), 其渗透压调节能力在盐度低于 22 时急剧下降(滕炜鸣等, 2018), 导致其滤食效率降低而退出优势种行列。彩虹明樱蛤作为广盐种(适宜盐度 7~42), 始终维持其优势地位(顾晓英等, 1998)。这种差异与两物种的生态位宽度特征高度吻合, 彩虹明樱蛤($Q_{ik}=2.943$)与寡鳃齿吻沙蚕($Q_{ik}=2.945$)作为广生态位种表现出更强的环境适应力, 而光滑河蓝蛤($Q_{ik}=0.494$)的窄生态位特性使其成为盐度敏感指示种。

值得注意的是, 受“台风”利奇马过境影响, 类似水域温度、溶解氧、叶绿素 *a* 有所增加(卢龙飞等, 2020; 丰新倩等, 2022)。另外, 小清河等多条河流为该海域带来大量营养盐、有机物, 促进浮游生物的增殖, 适宜的生境和丰富的食物资源使得浮游生物食者在该海域占据优势地位(王勇等, 2002)。但盐度骤降导致滤食性贝类(如光滑河蓝蛤)生理受抑, 摄食能力下降, 其对浮游生物的捕食压力减弱, 可能间接丰富浮游生物资源, 为游泳型甲壳类(如东方长眼虾)提供更丰富的食物基础(朱根海等, 1998)。此外, 8 月台风过境导

致的咸淡水交换增强带来的高溶解氧环境进一步增强肉食者的代谢效率, 这些因素共同促使其在 8 月占据优势地位(叶丰等, 2012)。这种“功能群让渡”现象揭示了底栖动物通过生态位分化响应环境梯度的适应性策略(Taupp, 2018)。

3.2 生态位分化与群落稳定性维持机制

生态位分化程度可通过重叠指数量化物种间资源利用的相似程度及潜在的竞争优势。本研究显示, 广生态位种间重叠值较高(如彩虹明樱蛤-寡鳃齿吻沙蚕 $Q_{ik}=0.709$), 反映其资源利用方式的相似性。窄生态位种(如光滑河蓝蛤)与其他物种重叠值普遍低于 0.3 (与东方长眼虾 $Q_{ik}\approx 0$), 表明生态位分离显著(张零念等, 2022)。另外, 高重叠种间仍可通过多维分化降低竞争, 彩虹明樱蛤(滤食性)与寡鳃齿吻沙蚕(杂食性)在食性上的分化, 前者为浮游生物摄食, 而后者可利用沉积物中的有机碎屑资源, 从而避免直接竞争。光滑河蓝蛤(底内型滤食者)与东方长眼虾(游泳型捕食者)则通过生活型和摄食功能的分离, 形成资源利用上的互补关系(李治霖等, 2021)。这种“食性-生境”多维分化模式(彭松耀等, 2015)有效缓解了种间竞争压力, 增强群落对环境扰动的缓冲能力(杨龙等, 2023)。

海洋环境的多变性和动力学过程使得影响大型底栖动物的环境因素极其复杂。CCA 分析进一步揭示了环境因子的协同驱动作用, 光滑河蓝蛤、彩虹明樱蛤聚集于高盐生境, 尖齿拳蟹等游泳型甲壳类喜好高溶解氧生境, 托氏蛞蝓则与 pH 显著正相关, $pH < 7.5$ 时其钙化过程受抑制(王有基等, 2014)。环境因素的协同作用导致物种在资源位点上呈阶梯状分布, 形成“特化种-广适种”的特定分布格局。其中, 特化种(如光滑河蓝蛤)通过高盐依赖实现资源独占, 其丰度异常减少可作为盐度阈值突破的生物指示物。广适种(如寡鳃齿吻沙蚕)则通过生态位扩张维持群落功能稳定性。

4 结论

(1) 盐度是小清河口贝类养殖区大型底栖动物功能群演变的关键驱动因子, 极端降水事件通过抑制滤食性贝类生理活动并释放浮游生物资源, 进而引发功能群更替。

(2) 广生态位种与窄生态位种通过盐度适应性、食性分化和生境分离实现共存, 群落稳定性依赖于功能群间的生态位互补。

(3) 光滑河蓝蛤作为特化种, 其丰度变化可预警盐

度阈值。广适种通过生态位扩张维持群落功能稳定性, 为河口生态系统健康管理提供参考。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参 考 文 献

- 丁敬坤, 李加琦, 薛素燕, 等, 2021. 莱州湾小清河口近岸海域底栖生境健康评价[J]. 生态学报, 41(12): 4806-4817.
- 丰新倩, 刘书琦, 韩阿祥, 等, 2022. 台风利奇马对城市淡水系统中微生物群落和抗生素耐药性基因的影响(英文)[J]. 微生物学通报, 49(7): 2428-1441.
- 王有基, 李丽莎, 李琼珍, 等, 2014. 海洋酸化和全球变暖对贝类生理生态的影响研究进展[J]. 生态学报, 34(13): 3499-3508.
- 王宗兴, 韦钦胜, 刘军, 等, 2012. 乳山湾外海夏季大型底栖动物分布与环境因子的典范对应分析[J]. 应用与环境生物学报, 18(4): 599-604.
- 王勇, 焦念志, 2002. 胶州湾浮游植物对营养盐添加的响应关系[J]. 海洋科学, 26(4): 8-13.
- 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, 2008. 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: 157.
- 卢飞龙, 常丽荣, 肖露阳, 等, 2020. 台风对桑沟湾、爱莲湾表层海水的影响探究[J]. 环境保护前沿, 10(1): 39-48.
- 叶丰, 黄小平, 刘庆霞, 2012. 2010 年夏季珠江口海域溶解氧的分布特征和海气交换通量[J]. 海洋环境科学, 31(3): 346-351.
- 朱根海, 王春生, 高爱根, 等, 1998. 南麂列岛国家海洋自然保护区几种海洋动物胃含物中的微、小型藻类组成分析[J]. 东海海洋, 16(2): 29-40.
- 刘坤, 林和山, 何雪宝, 等, 2016. 厦门近岸海域大型底栖动物摄食功能群及其与环境因子的关系[J]. 海洋学报(中文版), 38(12): 95-105.
- 李治霖, 多立安, 李晟, 等, 2021. 陆生食肉动物竞争与共存研究概述[J]. 生物多样性, 29(1): 81-97.
- 杨龙, 严令斌, 安明态, 等, 2023. 基于生态位理论的毛竹-杉栎群丛物种竞争共存机制[J]. 应用生态学报, 34(8): 2065-2072.
- 吴斌, 宋金明, 李学刚, 2014. 黄河口大型底栖动物群落结构特征及其与环境因子的耦合分析[J]. 海洋学报, 36(4): 62-72.
- 张合烨, 张琰超, 安文聪, 等, 2024. 黄海北部褡裢岛近岸海域大型底栖动物优势种的生态化学计量特征[J]. 应用生态学报, 35(11): 3157-3164.
- 张零念, 朱贵青, 杨宽, 等, 2022. 滇中云南杨梅灌丛主要木本植物生态位与种间联结[J]. 植物生态学报, 46(11): 1400-1410.
- 张端禹, 王俊超, 王晓芳, 等, 2024. 高、低空急流耦合对山东“利奇马”台风暴雨增幅影响的诊断研究[J]. 大气科学, 48(2): 445-462.
- 范航清, 何斌源, 韦受庆, 2000. 海岸红树林地沙丘移动对林内大型底栖动物的影响[J]. 生态学报, 20(5): 722-727.
- 赵永强, 曾江宁, 高爱根, 等, 2009. 椒江口潮间带大型底栖动物的生态位[J]. 应用生态学报, 20(5): 1176-1183.
- 袁伟, 王俊, 左涛, 等, 2020. 莱州湾大型底栖动物群落结构及其动态变化特征[J]. 海洋学报, 42(6): 52-61.
- 顾晓英, 尤仲杰, 王一农, 1998. 几种环境因子对彩虹明樱蛤 *Moerella iridescens* 不同发育阶段的影响[J]. 东海海洋, 16(3): 40-47.
- 徐晓群, 曾江宁, 陈全震, 等, 2013. 浙江三门湾浮游动物优势种空间生态位[J]. 应用生态学报, 24(3): 818-824.
- 黄文彦, 姚丽娜, 李斌, 等, 2024. 台风“利奇马”引发山东极端降水过程分析[J]. 气象与环境科学, 47(3): 38-47.
- 黄玉啟, 2022. 小清河入海口洪潮智能预报及风险调控研究[D]. 天津: 天津大学: 10-11.
- 彭松耀, 李新正, 王洪法, 等, 2015. 南黄海春季大型底栖动物优势种生态位[J]. 生态学报, 35(6): 1917-1928.
- 彭欣, 谢起浪, 陈少波, 等, 2011. 乐清湾潮间带大型底栖动物群落分布格局及其对人类活动的响应[J]. 生态学报, 31(4): 954-963.
- 董建宇, 孙昕, 詹启鹏, 等, 2022. 莱州湾东岸潮下带大型底栖动物群落 Beta 多样性格局及其驱动因素[J]. 生物多样性, 30(3): 21388.
- 詹启鹏, 董建宇, 孙昕, 等, 2023. 芙蓉岛海域人工鱼礁投放对大型底栖动物群落结构和功能性状的影响[J]. 应用生态学报, 34(3): 796-804.
- 滕炜鸣, 高士林, 刘谓, 等, 2018. 盐度对辽东湾四角蛤蜊和光滑河蓝蛤摄食率和滤水率的影响[J]. 水产科学, 37(5): 622-627.
- GRILO T F, CARDOSO P G, DOLBETH M, *et al*, 2011. Effects of extreme climate events on the macrobenthic communities' structure and functioning of a temperate estuary [J]. Marine Pollution Bulletin, 62(2): 303-311.
- HAWKINS C P, MYKRÄ H, OKSANEN J, *et al*, 2015. Environmental disturbance can increase beta diversity of stream macroinvertebrate assemblages [J]. Global Ecology and Biogeography, 24(4): 483-494.
- KRAFT N J B, VALENCIA R, ACKERLY D D, 2008. Functional traits and niche-based tree community assembly in an amazonian forest [J]. Science, 322(5901): 580-582.
- LIU L L, LI A, ZHU L, *et al*, 2023. The application of the generalized additive model to represent macrobenthos near Xiaqing Estuary, Laizhou Bay [J]. Biology, 12(8): 1146.
- NAEEM S, LI S B, 1997. Biodiversity enhances ecosystem reliability [J]. Nature, 390(6659): 507-509.
- PIANKA E R, 1973. The structure of lizard communities [J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 4: 53-74.
- SHANNON C E, 1948. A mathematical theory of communication [J]. The Bell System Technical Journal, 27(3): 379-423.
- TAUPP T, 2018. Distribution, trophic ecology, and functional ecology of the benthic macroinvertebrate fauna in the Elbe Estuary, Germany [D]. Koblenz: Universität Koblenz-Landau.
- TER BRAAK C J F, 1987. The analysis of vegetation-environment relationships by canonical correspondence analysis [J]. Vegetatio, 69(1/2/3): 69-77.

DOMINANT SPECIES AND COMMUNITY CHARACTERISTICS OF MACROBENTHOS IN THE SHELLFISH AQUACULTURE AREA OF XIAOQING RIVER ESTUARY—ECOLOGICAL NICHE AND FUNCTIONAL GROUP ANALYSIS

TANG Yu-Ze¹, XU Xiao-Wei², DING Jing-Kun³, XUE Su-Yan¹, LI Jia-Qi¹, LIU Lu-Lei¹, LI Ang¹, MAO Yu-Ze¹

(1. State Key Laboratory of Mariculture Biobreeding and Sustainable Goods, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China; 2. North Sea Marine and Island Affairs Center, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 3. Qingdao Branch of China Communications Water Transport Planning and Design Institute Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

Abstract To understand the impact of rainfall on the functional group characteristics of macrobenthic communities in the shellfish farming area of Xiaoqing River estuary in Laizhou Bay, Bohai Sea, survey data of rainfall were collected in July (pre-rainfall) and August (post-rainfall) 2019 and analyzed. By integrating Shannon-Wiener niche breadth, Pianka niche overlap, and canonical correspondence analysis (CCA), the variation in dominant microbenthic species and their environmental drivers were examined. Results are as follows. (1) Eight dominant species were identified, of which *Moerella iridescens* and *Nephtys oligobranchia* were consistently dominant in the two months. (2) Significant shifts in life-form and feeding functional groups were observed: July was dominated by endobenthic-planktivores (mean density 265 ind./m², 71%), while August shifted to carnivores (mean density 103 ind./m², 58%), with the GS/GSB ratio increasing from 0 to 2/3. (3) Dominant species exhibited marked niche breadth variation (0.494~2.945), featuring coexistence of broad-niche species (e.g., *Nephtys oligobranchia*) and narrow-niche specialists (e.g., *Potamocorbula laevis*), with weak interspecific competition (60% of species pairs showed a narrow niche overlap value (<0.3)). (4) CCA revealed that the salinity (32.7% explained variance, $P<0.01$) was the primary driver of functional group succession (GS/GSB ratio) and niche differentiation. The stenohaline bivalve *Potamocorbula laevis* (optimal salinity 22~34) served as a bioindicator for salinity thresholds. This study shows that rainfall-induced environmental changes (salinity, dissolved oxygen, pH, chlorophyll *a*) critically drive functional group succession and niche partitioning in macrobenthos, providing a scientific basis for conservation and sustainable utilization of benthic resources in the Xiaoqing River estuary.

Key words macrofauna; salinity; niche breadth; GS/GSB; CCA