

基于浮游动物生物完整性指数的北部湾海域 生态健康评价

沈芳琦¹, 黎明民¹, 庞碧剑¹, 陈莹¹, 李宏俊²

(1.广西壮族自治区海洋环境监测中心站, 北部湾海洋生态环境广西野外科学观测研究站, 广西 北海 536000; 2.国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023)

摘要: 本文将生物完整性理论和方法应用于北部湾近岸海域, 构建浮游动物生物完整性指数 (Z-IBI), 并应用该指数对 2016 年至 2020 年北部湾近岸海域的生态健康进行了评价, 研究旨在探讨 Z-IBI 在北部湾海域的适用性, 并分析该海域的生态健康状况。结果表明, 在北部湾的 3 个水期 (丰水期、枯水期和平水期) 中, 丰水期的生态健康评价结果最佳, Z-IBI 得分为 3.398; 枯水期次之, 得分为 3.045; 平水期表现最差, 得分为 3.011。北部湾近岸大部分水域处于健康水平, 但钦州湾和防城港 (湾) 的生态状况亟需改善。3 个水期的 Z-IBI 得分均与水质类别呈正相关关系, 说明 Z-IBI 在生态健康评价中具有适用性和广泛的应用潜力。

关键词: 北部湾; 浮游动物; 生物完整性指数; 生态健康评价

中图分类号: Q178.53; X171

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2025)04-0481-08

Ecological health assessment of Beibu Gulf based on the integrity of zooplankton

SHEN Fangqi¹, LI Mingmin¹, PANG Bijian¹, CHEN Ying¹, LI Hongjun²

(1. Marine Environmental of Monitoring Center of Guangxi, Beibu Gulf Marine Ecological Environment Field Observation and Research Station of Guangxi, Beihai 536000, China; 2. National Marine Environment Monitoring Center, Dalian 116023, China)

Abstract: This article applies the theory and methods of biological integrity to the coastal waters of the Beibu Gulf, constructs the zooplankton biological integrity index (Z-IBI), and uses this index to evaluate the ecological health of the coastal waters of the Beibu Gulf from 2016 to 2020. The study aims to explore the applicability of Z-IBI in the Beibu Gulf waters and analyze the ecological health status of the waters. The results showed that among the three water periods (wet season, dry season, and normal season) in the Beibu Gulf, the ecological health evaluation results were the best during the wet season, with a Z-IBI score of 3.398; The dry season comes second, with a score of 3.045; The performance was the worst during the normal season, with a score of 3.011. Most waters near the coast of the Beibu Gulf are in a healthy state, but the ecological conditions of Qinzhou bay and Fangcheng port (bay) urgently need to be improved. Z-IBI is positively correlated with water quality categories in all three water periods, indicating its applicability and wide potential for application in ecological health assessment.

收稿日期: 2024-08-12, 修订日期: 2025-01-13

基金项目: 广西自然科学基金项目 (2023GXNSFBA026253); 广西重点研发计划项目 (桂科 AB25069112); 北部湾海洋生态环境广西野外科学观测研究站科研能力建设项目 (桂科 23-026-271); 科技基础资源调查专项 (2023FY100800)

作者简介: 沈芳琦 (2002—), 女, 广西北海人, 本科, 主要研究方向为资源与环境, E-mail: 1359498574@qq.com

通信作者: 黎明民 (1979—), 男, 高级工程师, 主要从事海洋生态监测与研究, E-mail: 50146093@qq.com

Key words: Beibu Gulf; zooplankton; biological integrity index; ecological health evaluation

生物完整性指数 (biological integrity index, IBI) 最初由 Karr 提出^[1], 旨在建立鱼类生物完整性指数 (F-IBI) 的评价方法。近年来, IBI 已经发展到了适用于大型底栖动物、浮游生物等多种生物类群^[2-7]。2024 年, 生态环境部发布了《水生生态监测技术指南 河流水生生物监测与评价 (试行)》, 其中将生物完整性指数作为重要内容应用于河流水生态评价。F-IBI 在海域研究方面已取得成效^[8-9]。浮游动物相比鱼类对外界环境变化更为敏感, 它们可以作为暖流、寒流、水污染和水体富营养化的指示生物, 在环境监测和生态评价中具有独特的优势。然而, 浮游动物生物完整性指数 (Z-IBI) 的研究和应用, 特别是在海洋环境中的应用, 除孙永坤等在胶州湾的研究外^[10-11],

其他相关报道较少。
本文基于 IBI 生态健康评价的研究成果, 探讨了 Z-IBI 指数在海湾生态健康评价中的应用情况, 并以广西北部湾近岸海域为例, 研究了其在海湾及近岸海域生态健康评价中的应用效果, 旨在为“美丽海湾”环境质量评估和生态健康评价提供有效的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

北部湾地处中国南海西北部, 东临雷州半岛和海南岛, 北临广西。本研究在北部湾近岸海域布设 44 个采样站位 (表 1), 采样站位水深范围为 0.8 ~ 23 m, 平均水深约 8.5 m。

表 1 北部湾海域采样站位信息
Tab.1 Sampling station information in the Beibu Gulf

采样 站位	经度 (°E)	纬度 (°N)	站位描述	采样 站位	经度 (°E)	纬度 (°N)	站位描述
S1	108.09	21.49	防城港北仑河口	S23	108.69	21.65	钦州湾外湾近岸
S2	108.16	21.52	防城港金滩	S24	108.76	21.58	三娘湾近岸
S3	108.20	21.57	防城港珍珠湾	S25	108.92	21.53	廉州湾中部
S4	108.22	21.55	防城港珍珠湾	S26	108.95	21.44	廉州湾中部
S5	108.27	21.50	防城港外湾	S27	108.97	21.29	廉州湾外海
S6	108.28	21.46	防城港外湾	S28	109.03	21.54	廉州湾中部
S7	108.29	21.41	防城港外湾	S29	109.05	21.47	廉州湾近岸
S8	108.34	21.65	防城港湾西湾	S30	109.09	21.49	廉州湾近岸
S9	108.36	21.54	防城港湾外湾	S31	109.09	21.07	涠洲岛近岸
S10	108.40	21.63	防城港湾东湾	S32	109.12	21.01	涠洲岛近岸
S11	108.48	21.50	钦州湾外湾	S33	109.13	21.41	银滩近岸
S12	108.51	21.81	钦州湾内湾茅尾海	S34	109.13	21.07	涠洲岛近岸
S13	108.54	21.85	钦州湾内湾茅尾海	S35	109.20	21.37	银滩近岸
S14	108.55	21.80	钦州湾内湾茅尾海	S36	109.35	21.00	涠洲岛外海
S15	108.56	21.62	钦州湾外湾近岸	S37	109.35	21.27	银滩外海
S16	108.56	21.72	钦州湾外湾近岸	S38	109.37	21.43	铁山港近岸
S17	108.58	21.82	钦州湾内湾茅尾海	S39	109.45	21.37	铁山港中部
S18	108.62	21.63	钦州湾外湾近岸	S40	109.54	21.42	铁山港中部
S19	108.62	21.69	钦州湾外湾近岸	S41	109.56	21.64	铁山港近岸
S20	108.63	21.51	钦州湾外湾	S42	109.60	21.50	铁山港近岸
S21	108.63	21.72	钦州湾外湾近岸	S43	109.64	21.39	铁山港中部
S22	108.64	21.35	钦州湾外湾	S44	109.76	21.44	铁山港近岸

1.2 研究数据与方法

1.2.1 研究数据

本研究的数据来源于广西海洋环境监测中心站 2011 年至 2016 年北部湾常规大面监测, 每年在枯水期(3 月至 4 月)、丰水期(7 月至 8 月)和平水期(10 月至 11 月)监测, 共计 18 期数据。浮游动物样品使用浅水 I 型浮游生物网进行垂直拖网采集。样品的采集、保存和分析均遵循《海洋监测规范》(GB 17378—2007)^[12] 的相关规定进行。

1.2.2 Z-IBI 指数构建

参照孙永坤等^[10-11]和黎明民等^[13]的 IBI 构建方法, 确立北部湾浮游动物生物完整性指数的建立过程: 划分生境区域→确定评价因子→构建评价因子得分体系→赋分并建立 Z-IBI。其中非参数检验、相关性分析等统计分析在 SPSS 和 Matlab 软件中进行, Shannon-wiener 多样性指数(以下简称生物多样性指数)、Pielou 均匀度、丰富度等群落结构指数中使用到的对数计算用 LN 函数完成。

2 结果与讨论

2.1 北部湾浮游动物物种组成及优势种变化

2016 年至 2020 年, 广西近岸海域的浮游动物种类数量介于 106 至 261 种之间。具体而言, 2019 年枯水期的种类数最高, 2020 年丰水期的种类数最低。在各个采样水期, 桡足类始终是数量最多的类群, 构成广西近岸海域浮游动物的主要组成部分。2016 年至 2020 年, 广西近岸海域浮游动物的优势种组成表现出显著的季节性变

化。枯水期时, 夜光虫(*Noctiluca scientillans*)、短尾类溞状幼虫(*Brachyura zoea larva*)和鸟喙尖头溞(*Penilia avirostris*)为主要优势种。而在丰水期, 以肥胖三角溞(*Pseudevadne tergestina*)和短尾类溞状幼虫为主导。平水期时, 中型莹虾(*Lucifer intermedius*)、长尾类糠虾幼虫(*Mccruran mysis larva*)和肥胖箭虫(*Flaccisagitta enflata*)则为主要优势种。

2.2 生境区域划分

本研究使用北部湾生态健康评价中的生境区划分方法^[13], 并基于透明度、无机氮、活性磷酸盐 3 个关键的水质理化参数指标^[14], 将研究区域划分为参照区、边缘区和受损区(表 2)。其中, 参照区代表健康的水质状况, 受损区则指代严重污染的水体, 而边缘区则表示过渡性的水体状态。

2.3 北部湾 Z-IBI 评价因子确定与体系建立

在选择候选生物因子时, 本研究综合考虑群落结构特征、生长量以及生物对环境胁迫(包括环境变化)的响应等因素。评价因子的筛选过程遵循北部湾生态健康评价的相关方法^[13]。经过筛选, 最终确定适用于不同水期的评价因子: 枯水期选择了生物多样性指数、小拟哲水蚤(*Paracalanus parvus*)、鱼卵(Fish eggs)和球形侧腕水母(*Pleurobrachia globosa*); 丰水期选择生物多样性指数、仔鱼(Fish larva)、钳形歪水蚤(*Tortanus forcipatus*)和蔓足类无节幼虫(*Cirripedia nauplius larva*); 平水期则选择短尾类溞状幼虫、中型莹虾、多毛类幼虫(*Polychaeta larva*)和仔鱼。部分研究结果列于表 3 和表 4。

表 2 采样站位分区
Tab.2 Stations in each water period

受损区		边缘区	参照区
枯水期	S12、S13、S14、S17	S1、S2、S3、S4、S8、S9、S10、S15、S16、S21、S23、S24、S25、S28、S29、S30、S33、S37、S41、S42、S44	S5、S6、S7、S11、S18、S19、S20、S22、S26、S27、S31、S32、S34、S35、S36、S37、S38、S39、S43
		S1、S2、S3、S4、S8、S9、S10、S11、S15、S18、S21、S23、S24、S25、S28、S29、S30、S31、S32、S33、S38、S40、S41、S42、S44	S5、S6、S7、S20、S22、S26、S27、S34、S35、S36、S37、S39、S43
丰水期	S12、S13、S14、S16、S17、S19	S2、S3、S4、S5、S8、S9、S10、S11、S15、S18、S19、S20、S21、S23、S24、S25、S28、S29、S30、S33、S34、S38、S40、S41、S42、S44	S1、S6、S7、S22、S26、S27、S31、S32、S35、S36、S37、S39、S43
平水期	S12、S13、S14、S16、S17		

表 3 Mann-Whitney 非参数检验结果

Tab.3 Mann-Whitney test results

初选因子	丰富度	生物多样性指数	总丰度	长尾类幼虫	小拟哲水蚤	鱼卵	仔鱼	百陶箭虫	球形侧腕水母	
枯水期	Z	4.5677	3.1347	4.5677	3.4929	2.7316	4.1646	3.9407	4.3885	2.866
	P	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
初选因子	丰富度	生物多样性指数	总丰度	长尾类幼虫	中型莹虾	仔鱼	百陶箭虫	钳形歪水蚤	蔓足类无节幼虫	
丰水期	Z	4.473	4.5607	3.6836	4.5607	4.0345	3.5959	3.5082	4.0345	3.9468
	P	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.02
初选因子	丰富度	生物多样性指数	总丰度	短尾类溞状幼虫	中型莹虾	百陶箭虫	鱼卵	仔鱼	多毛类幼虫	
平水期	Z	4.4851	4.4851	3.2036	3.9922	3.8936	2.415	4.4851	3.5979	2.415
	P	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

表 4 候选 Z-IBI 指标的 Pearson 相关性分析

Tab.4 Pearson's correlating coefficient between candidate biological metrics

枯水期	丰富度	生物多样性指数	总丰度	长尾类幼虫	小拟哲水蚤	鱼卵	仔鱼	百陶箭虫	球形侧腕水母
丰富度	1								
生物多样性指数	0.564**	1							
总丰度	0.019	-0.301*	1						
长尾类幼虫	0.074	0.101	-0.029	1					
小拟哲水蚤	0.094	0.06	0.625**	-0.03	1				
鱼卵	0.214	0.147	-0.026	-0.036	-0.047	1			
仔鱼	0.283	-0.203	0.388**	0.08	0.04	0.113	1		
百陶箭虫	0.227	-0.363*	0.502**	0.079	0.089	0.037	0.729**	1	
球形侧腕水母	0.049	-0.157	0.26	0.079	-0.061	-0.008	0.675**	0.532**	1
丰水期	丰富度	生物多样性指数	总丰度	长尾类幼虫	中型莹虾	仔鱼	百陶箭虫	钳形歪水蚤	蔓足类无节幼虫
丰富度	1								
生物多样性指数	0.758**	1							
总丰度	0.364*	0.03	1						
长尾类幼虫	0.340*	0.165	0.712**	1					
中型莹虾	0.363*	0.148	0.497**	0.782**	1				
仔鱼	-0.253	-0.481**	0.065	-0.003	0.063	1			
百陶箭虫	0.186	0.079	0.298*	0.243	0.288	0.350*	1		
钳形歪水蚤	0.065	0.092	-0.08	-0.012	-0.085	-0.151	0.175	1	
蔓足类无节幼虫	0.093	-0.015	0.384*	0.554**	0.369*	0.352*	0.284	0.08	1
平水期	丰富度	生物多样性指数	总丰度	短尾类溞状幼虫	中型莹虾	百陶箭虫	鱼卵	仔鱼	多毛类幼虫
丰富度	1								
生物多样性指数	0.644**	1							
总丰度	-0.138	-0.562**	1						
短尾类溞状幼虫	0.175	0.289	0.286	1					
中型莹虾	-0.001	-0.099	0.193	0.111	1				
百陶箭虫	-0.13	0.04	0.212	0.666**	-0.052	1			
鱼卵	0.213	0.221	0.065	0.046	-0.01	0.015	1		
仔鱼	-0.066	0.104	0.091	0.622**	-0.049	0.919**	-0.012	1	
多毛类幼虫	0.062	0.136	0.297	0.308*	-0.01	0.281	0.051	0.025	1

注: ** 在 0.01 级别(双尾), 相关性显著; * 在 0.05 级别(双尾), 相关性显著

参照孙永坤等^[10-11]的赋分方法以及 Z-IBI 的建立过程, 本研究构建了北部湾浮游动物评价因子的指数赋分体系。该体系依据受损区和参照区的数据, 对评价因子进行排序, 并选取不同

百分位的数据作为参考。根据因子与参照区的接近程度, 将赋分定为 5(最接近)、3(稍微偏离)、1(明显偏离)。赋分越高, 表示生态健康状况越好。具体赋分标准见表 5。

表 5 浮游动物评价因子赋分阈值及赋分标准

Tab.5 Threshold selection of zooplankton index and assignment standards

水期	指标	区域	统计分布						赋分标准		
			15%*	25%	35%	50%	75%	85%	1	3	5
枯水期	生物多样性指数	受损区	1.70	1.82	1.91	1.91	2.02	2.14			
		参照区	1.70	1.92	2.33	2.43	2.86	3.05	<1.92	1.92 ~ 2.43	≥2.43
	小拟哲水蚤	受损区	0.23	0.39	0.73	2.60	6.46	8.58			
		参照区	1.31	2.51	3.67	5.50	15.56	27.19	<1.31	1.31 ~ 5.50	≥5.50
	鱼卵	受损区	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.28			
		参照区	0.79	2.12	3.73	4.26	8.85	14.36	<0.79	0.79 ~ 4.26	≥4.26
	球形侧腕水母	受损区	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	0.70			
		参照区	0.00	0.17	0.24	0.40	1.18	3.44	<0.17	0.17 ~ 0.4	≥0.4
	生物多样性指数	受损区	1.06	1.22	1.24	1.56	1.72	1.83			
		参照区	2.21	2.43	2.50	2.52	2.61	2.81	<2.21	2.21 ~ 2.52	≥2.52
	仔鱼	受损区	0.76	0.90	1.04	2.81	2.88	3.02			
		参照区	0.13	0.18	0.21	0.29	0.46	0.52	>0.76	0.52 ~ 0.76	≤0.52
丰水期	钳形歪水蚤	受损区	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		参照区	0.39	0.51	0.67	0.79	3.55	3.82	<0.39	0.39 ~ 0.79	≥0.79
	蔓足类无节幼虫	受损区	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05			
		参照区	0.00	0.00	0.10	0.56	10.27	21.08	<0.1	0.1 ~ 0.56	≥0.56
	短尾类蚤状幼虫	受损区	1.11	1.85	2.05	2.57	2.72	4.63			
		参照区	3.79	7.93	14.45	16.75	24.78	25.15	<7.93	7.93 ~ 16.75	≥16.75
	中型莹虾	受损区	0.00	0.00	0.33	0.87	0.89	1.54			
		参照区	2.15	3.07	7.81	15.47	25.12	27.10	<3.07	3.07 ~ 15.47	≥15.47
	多毛类幼虫	受损区	0.00	0.00	0.08	0.28	0.33	0.58			
		参照区	0.00	0.00	0.41	0.67	2.08	2.51	<0.41	0.41 ~ 0.67	≥0.67
	仔鱼	受损区	0.00	0.00	0.00	0.12	0.20	0.30			
		参照区	0.18	0.26	0.448	0.72	1.02	1.25	<0.26	0.26 ~ 0.72	≥0.72

注: *15%代表该因子数据从小到大第15百分位数(P15)的值;加粗数值为选定的因子阈值

按照上述赋分标准, 对浮游动物评价因子进行赋分, 并将得分平均, 最终得到 Z-IBI 值。

以参照区 Z-IBI 值的 25% 百分位数作为健康评价标准, 将低于 25% 百分位数的值域 3 等分, 分别代表一般、较差和极差 3 个等级^[13](表 6)。

2.4 基于 Z-IBI 的北部湾生态评价结果

箱型图(图 1a、图 1b、图 1c)显示, 两个箱体之间无重叠, 这表明所采用的评价体系在北部湾

生态评价中具有可行性。在枯水期, Z-IBI 的得分为 3.045, 其中 27 个采样站点的评价结果为“健康”、7 个采样站点为“一般”、6 个采样站点为“较差”、4 个采样站点为“极差”。在

表 6 Z-IBI 评价标准

Tab.6 Z-IBI indicator system health evaluation standard

健康	一般	较差	极差
[3,5]	[2.4,3)	[1.7,2.4)	[1,1.7)

丰水期, Z-IBI 的得分为 3.398, 评价结果显示 32 个采样站位为“健康”、4 个采样站位为“一般”、2 个采样站位为“较差”、6 个采样站位为“极差”。而在平水期, Z-IBI 的得分为 3.011, 评价结果显示 27 个采样站位为“健康”、4 个采样站位为“一般”、2 个采样站位为“较差”、11 个采样站位为“极差”(表 7 和图 1d)。

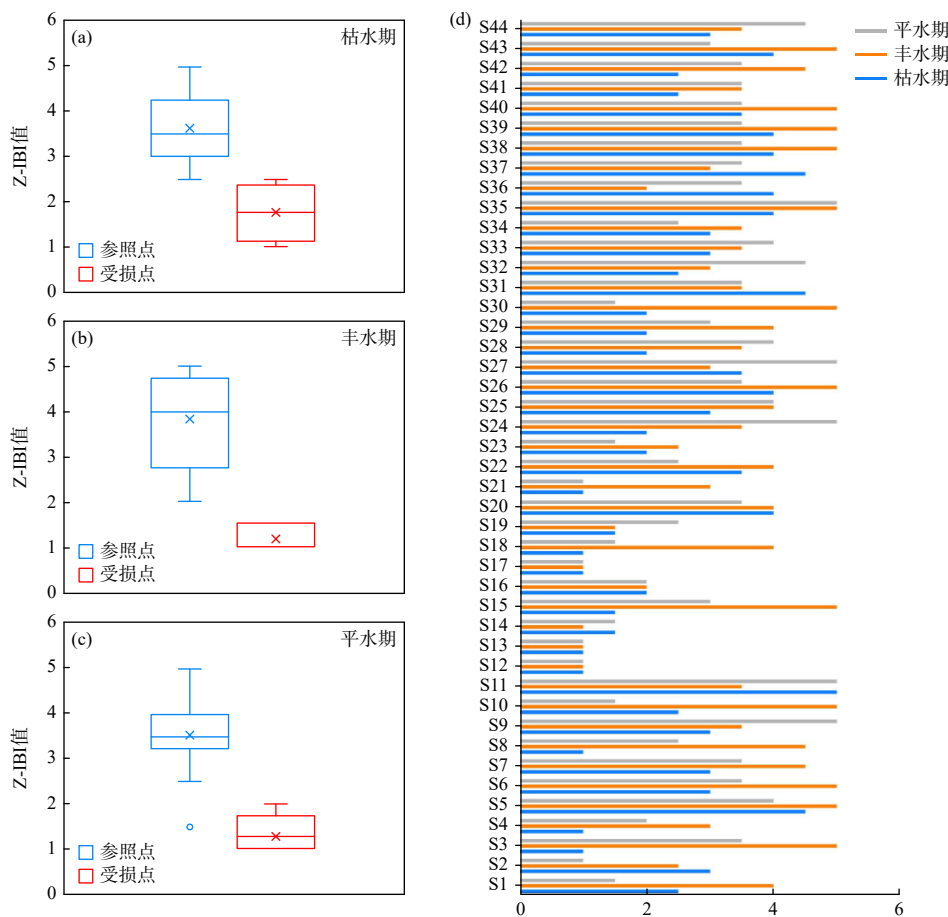


图 1 参照区和受损区结果比较及评价结果

Fig. 1 Reference area and damaged area results; Z-IBI ecosystem health assessment results

表 7 北部湾海域平均 Z-IBI 得分及站点评分结果
Tab.7 Average Z-IBI scores and stations ' results of three periods in Beibu Gulf

评价水期	Z-IBI得分	健康	一般	较差	极差
枯水期	3.045	27	7	6	4
丰水期	3.398	32	4	2	6
平水期	3.011	27	4	2	11

2.5 Z-IBI 与水质类别的相关性分析

依据《海水水质标准》(GB 3097—1997)^[14]将符合一类水质标准的赋分为 5、二类为 4、三类为 3、四类为 2、劣四类为 1, 我们对 Z-IBI 结果与 2016—2020 年枯水期、丰水期和平水期水

质类别进行相关性分析(表 8), 分析结果的显著相关性进一步证实了浮游动物生物完整性指数在北部湾生态评价中的实际应用价值。

表 8 Z-IBI 的 Pearsin 相关性分析结果
Tab.8 Pearsin correlation analysis of Z-IBI

Pearson相关性	枯水期	丰水期	平水期
Z-IBI与水质类别	0.665**	0.709**	0.575**

注: **为在 0.01 水平上显著相关

2.6 Z-IBI 在北部湾评价中的适用性

自 20 世纪末以来, 环境保护工作已开始从重视水质向重视生态转变, 但迄今为止, 生态环境评价仍然主要依赖于化学指标。随着生态环

境质量评价方法的不断发展,生物多样性指数,如 Shannon-Wiener 指数,已被纳入生境质量等级的评价体系。然而,应用生物多样性指数等对北部湾近岸海域生态环境质量进行的评价结果显示,海水环境质量被评为“极差”^[15],这一评价结果与人们的基本感知存在显著差异。此外,诸如生态系统 PSR 模型等评价体系涉及数十个指标,在常规监测和评价实践中难以操作。目前,仍然缺乏一种参数较少且能有效反映海洋生态健康状况的评价方法^[13]。

黎明民等构建了适用于北部湾的浮游植物生物完整性指数(P-IBI),该指数能够较好地应用于北部湾水生态评价,然而,该指数存在一些缺点,例如,浮游植物数据参数波动较大,导致其稳定性不足^[13]。浮游动物作为海洋生态系统中初级生产的主要消费者,位于能量转换和物质循环的关键环节,它们的种群动态不仅能够调控初级生产力的数量和周期,还通过上行效应影响经济海产动物的变动^[16]。相较于鱼类,浮游动物对外界环境变化的响应更为敏感,且其数值波动小于浮游植物。在本研究中,构建的北部湾 Z-IBI 箱型图(图 1a、图 1b、图 1c)显示,两个箱体之间无重叠,表明所筛选的参数能有效区分参照点和受损点,对环境变化具有敏感性和区分度;Z-IBI 与水质之间的显著相关性进一步说明 Z-IBI 在生态评价中具有重要的实际意义。

2.7 北部湾近岸海域生态状况评价

本研究采用 Z-IBI 对北部湾近岸海域生态状况进行评价,结果显示大多数站点均达到了健康水平,表明北部湾的生态健康状况整体良好。这一发现与李凤华^[16]、黎明民等^[13]的研究结果相一致。在 3 个水期中,丰水期的生态健康评价结果最优,枯水期次之,平水期最差,这与 P-IBI 评价结果^[13]存在一定差异。在对 P-IBI 评价结果与水质类别进行相关性分析时,枯水期的相关性未达到显著水平,相关系数仅为 0.134。相反,在本研究中,枯水期的相关性较高,并且在 0.01 的水平上显著,说明在评价北部湾枯水期的生态状况时,Z-IBI 比 P-IBI 更能准确地反映海域生态的实际状况。

在北部湾的众多小海湾中,茅尾海 3 个水期评价结果均为较差和极差。茅尾海作为钦州湾

内的封闭河口湾,接受了大量河流输入的营养物质,同时作为海水养殖场,茅尾海中的饵料和养殖生物排泄物含有大量营养盐,加之茅尾海与钦州湾外湾连接处的口门较窄,污染物滞留时间较长,进一步加剧了生态压力,使得茅尾海生态系统处于亚健康状态^[17-19]。茅尾海浮游动物的丰度和生物量均低于钦州湾外湾和北部湾的其他小海湾。防城港湾的评价结果显示,外湾优于东湾,东湾优于西湾。夏季,防城港湾西湾的防城江入海径流携带大量营养盐等污染物,成为西湾污染的主要来源;东湾上游存在防城港市污水处理厂排污口和磷酸厂,西边存在工业区废水排放,这一结果与庞敏倩^[20]、何祥英^[21]的研究结果一致。徐轶肖等^[22]对北海半岛的研究提到廉州湾附近海域存在一定的污染现象,但在本研究中,廉州湾附近海域的大部分评价结果为健康。从浮游动物的丰富度、生物量及生物多样性来看,廉州湾与外部海域的差异较小,这可能是因为本研究中的站点距离河流较远,更显著地受到外海的影响。

2.8 Z-IBI 评价存在的局限性

根据现行的《海洋监测规范》(GB 17378—2007)^[12]等相关海洋生态监测技术规范,浮游动物的采集工具和采样方法适用于水深超过 2 m 的海域。然而,在北部湾近岸海域的监测站点中,部分站点的水深小于 2 m,导致在这些浅水区域进行采样不仅困难,而且准确性较低。本研究中,部分站点的采样数据显示浮游动物丰度为零,这种情况在参照区和受损区均有出现,从而影响了生物完整性评价结果的准确性。在解决水深小于 2 m 的监测站点浮游动物采样问题之前,应用浮游动物进行近岸浅水海域评价的可行性需要在未来予以关注和解决。

本研究探讨了海洋生态系统健康指数(IBM)的评价标准,并注意到目前海洋 IBM 的评价体系还未形成统一标准。通过采用 Mann-Whitney 检验(表 3)和 Pearson 相关性分析(表 4),本文筛选出了 IBM 评价的关键因子。然而,本研究并未深入分析评价因子的筛选过程,以及物种种类和数量变化对生态系统功能的影响及其作用机制。展望未来,研究工作应重点阐明不同物种在海洋

生态系统中的功能角色,并深入探讨物种群落结构及其数量变化对 IBI 评价结果的潜在影响。同时,研究者们应当共同努力,推动海洋 IBI 评价标准的规范化与统一,从而为海洋生态系统的健康评估和管理提供更加科学和可靠的依据。

3 结论

(1)本研究基于生物生态学监测指标,构建了适用于北部湾近岸海域的浮游动物生物完整性指数(Z-IBI),并应用该指数对 2016 年至 2020 年北部湾近岸海域的生态健康进行了评价。评价结果表明,丰水期的生态健康状况评价结果最理想,Z-IBI 得分为 3.398;其次是枯水期,得分为 3.045;平水期的评价结果最不理想,得分为 3.011。总体而言,北部湾近岸大部分水域保持健康水平,然而,钦州湾和防城港的生态状况亟需改善。

(2)Z-IBI 是一种参数较少且能有效反映海洋生态健康状况的评价方法,在生态健康评价中表现出良好的适用性和广泛的应用潜力。Z-IBI 与水质之间的显著相关性进一步证实了其在生态评价中的实际应用价值。

(3)尽管 Z-IBI 在北部湾的应用评价显示出积极效果,但仍面临着浅水区域浮游动物采样难度大、数据准确性不高的难题。为了提升评价的精确度和实际应用价值,亟需深入研究物种群落结构及其数量变动对 IBI 评价的具体影响,并推进 IBI 评价标准的规范化与统一,从而确保评价结果的可靠性和适用性。

参考文献:

- [1] KARR J R. Assessment of biotic integrity using fish communities[J]. Fisheries, 1981, 6(6): 21-27.
- [2] BECK M W, HATCH L K, VONDRACEK B, et al. Development of a macrophyte-based index of biotic integrity for Minnesota lakes[J]. Ecological Indicators, 2010, 10(5): 968-979.
- [3] KANE D D, GORDON S I, MUNAWAR M, et al. The Planktonic Index of Biotic Integrity (P-IBI): an approach for assessing lake ecosystem health[J]. Ecological indicators, 2009, 9(6): 1234-1247.
- [4] LIGEIRO R, HUGHES R M, KAUFMANN P R, et al. Defining quantitative stream disturbance gradients and the additive role of habitat variation to explain macroinvertebrate taxa richness[J]. Ecological Indicators, 2013, 25: 45-57.
- [5] RUARO R, GUBIANI É A. A scientometric assessment of 30 years of the Index of Biotic Integrity in aquatic ecosystems: applications and main flaws[J]. Ecological Indicators, 2013, 29: 105-110.
- [6] STAPANIAN M A, MICACCHION M, ADAMS J V. Wetland habitat disturbance best predicts metrics of an amphibian index of biotic integrity[J]. Ecological Indicators, 2015, 56: 237-242.
- [7] MICACCHION M, STAPANIAN M A, ADAMS J V. Site-scale disturbance and habitat development best predict an index of amphibian biotic integrity in Ohio shrub and forested wetlands[J]. Wetlands, 2015, 35(3): 509-519.
- [8] 蒋圣琪,徐宾铎,张崇良,等.基于鱼类生物完整性指数的海州湾生态健康评价[J].上海海洋大学学报,2024,33(2): 424-432.
- [9] 林群,袁伟,单秀娟,等.莱州湾水域鱼类生物完整性评价[J].水生态学杂志,2021,42(2): 101-106.
- [10] 孙永坤.基于生物完整性指数的胶州湾生态环境综合评价方法研究[D].青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所),2013.
- [11] 孙永坤,杨光,李超伦,等.胶州湾浮游动物生物完整性指数的建立[J].海洋科学,2015,39(10): 1-7.
- [12] 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:GB 17378—2007[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [13] 黎明民,骆鑫,付家想,等.基于浮游植物生物完整性的北部湾生态健康评价[J].中国环境监测,2018,34(6): 113-121.
- [14] 国家环境保护局.海水水质标准:GB 3097—1997[S].北京:环境科学出版社,2004.
- [15] 庞碧剑,覃秋荣,蓝文陆.生物多样性指数在生态评价中的实用性分析:以北部湾为例[J].广西科学院学报,2019,35(2): 91-99.
- [16] 李风华.广西重要海湾海洋生态健康评价[C]//中国环境科学学会 2009 年学术年会论文集(第三卷).武汉:中国环境科学学会,2009: 3.
- [17] 蒙贝君,黄丽婷,许铭本.夏季防城港海域浮游动物群落结构及多样性研究:以 2021 年为例[J].农业与技术,2024,44(14): 105-109.
- [18] 蓝文陆,李天深.钦州湾生态系统健康主要存在问题及保护对策[J].环境科学与管理,2013,38(1): 118-122,146.
- [19] 张荣灿,姜发军,陈宪云,等.钦州湾近岸海域水质污染状况评价[J].广西科学,2014,21(4): 403-410.
- [20] 庞敏倩.防城港湾连续 10 年海水水质变化及其影响因素分析[J].广西科学院学报,2021,37(1): 29-36.
- [21] 何祥英.北部湾防城港近岸海域海水环境参数变化与水质状况评价[J].广西科学院学报,2012,28(4): 293-297.
- [22] 徐轶肖,陶晓娣,刘成辉,等.广西北海半岛夏季营养盐及水质状况分析[J].海洋科学,2021,45(6): 107-117.

(本文编辑:胡莹莹)