

DOI: 10.3724/j.1007-6336.2025-0108

基于鱼类生物完整性指数的北部湾东北部 海域生态质量评价

李颖^{1,2}, 黎明民³, 何佳敏³, 蓝文陆³, 张云雷²,
李文², 李宏俊²

(1.大连海洋大学海洋科技与环境学院, 辽宁大连 116023; 2.国家海洋环境监测中心生态环境部近岸海域生态环境重点实验室, 辽宁大连 116023; 3.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)

摘要:本研究在北部湾东北部设置 29 个采样站位, 利用环境 DNA (environment DNA, eDNA) 宏条形码技术分析鱼类群落结构, 并基于鱼类完整性指数 (F-IBI) 进行了生态质量评估。在北部湾东北部共检测到 70 种鱼类, 隶属 11 目 31 科 59 属, 以鲈形目为主, 优势种包括卵形鲳鲹 (*Trachinotus ovatus*)、隆背小沙丁鱼 (*Sardinella gibbosa*) 和日本海鲷 (*Nematalosa japonica*)。冗余分析结果显示, NO₃-N、Pb、Dep、pH、Cu、TPH 和 Chl *a* 是显著驱动因子。F-IBI 评估结果表明研究区域整体生态状况较好, 45% 的站位评为好及以上等级, 55% 为一般及以下等级, 未见极差等级。在空间上, 好及以上等级站位偏西部和外海, 一般等级站位多见于湾中-南部外海, 差等级站位集中在北部和东部近岸, 并与港口航运等人类活动区域重叠。研究表明, eDNA 结合 F-IBI 在海湾生态质量评估中具有可行性与应用潜力, 评估结果可为生态保护与修复提供依据。

关键词: 鱼类生物完整性指数; 生态系统质量评价; 环境 DNA; 北部湾

中图分类号: X826 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2026)02-0262-13

Evaluation of ecological quality in the northeastern waters of the Beibu Gulf based on the fish index of biotic integrity

Li Ying^{1,2}, Li Mingmin³, He Jiamin³, Lan Wenlu³, Zhang Yunlei²,
Li Wen², Li Hongjun²

(1.College of Marine Science and Environment, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China; 2.State Environmental Protection Key Laboratory of Coastal Ecosystem, National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China; 3.Marine Environmental Monitoring Center of Guangxi, Beibu Gulf Marine Ecological Environment Field Observation and Research Station of Guangxi, Beihai 536000, China)

Abstract: In this study, 29 sampling stations were established in the northeastern Beibu Gulf. Environmental DNA (eDNA) metabarcoding was applied to analyze fish community structures, and the fish index of biotic integrity (F-IBI) was used to evaluate ecological quality. A total of 70 fish species were detected, belonging to 11 orders, 31 families, and 59 genera, dominated by Perciformes. The dominant species included *Trachinotus ovatus*, *Sardinella gibbosa*, and *Nematalosa japonica*. Redundancy analysis indicated that NO₃-N, Pb, Dep, pH,

收稿日期: 2025-07-02, 修订日期: 2025-09-16

基金项目: 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); 国家自然科学基金项目(42206128)

作者简介: 李颖(2001—), 女, 河北廊坊人, 硕士, 主要研究方向为海洋生态质量评价, E-mail: lypopo2001@163.com

通信作者: 李宏俊(1982—), 男, 辽宁丹东人, 研究员, 博士, 主要研究方向为海洋生态学, E-mail: hjli@nmemc.org.cn

Cu, TPH, and Chl *a* were significant driving factors of fish community patterns. The F-IBI results suggested that the overall ecological status was relatively good, with 45% of stations rated as “good” or above, and 55% rated as “fair” or below, while no stations were classified as “poor”. Spatially, stations with “good or above” conditions were mainly distributed in the western and offshore areas, “fair” conditions in the central-southern offshore areas, and “poor” conditions in the northern and eastern nearshore areas, which overlapped with regions of intensive human activities such as port shipping. This study demonstrates that combining eDNA with F-IBI provides a feasible and promising approach for ecological quality assessment, offering a scientific basis for bay ecosystem conservation and restoration.

Key words: fish index of biotic integrity (F-IBI); ecosystem quality assessment; environmental DNA (eDNA); Beibu Gulf

海湾生态系统不仅通过提供交通枢纽、临海工业基地和旅游资源等经济支持,发挥直接的社会经济价值,还通过提供栖息地、调节气候等自然功能,维护生态稳定与生物多样性。海湾作为陆海相互作用的过渡区域,具有生态敏感性与脆弱性,极易受到人类活动干扰^[1]。近年来,随着沿海地区社会经济的快速发展,海湾面临栖息地退化、自然岸线缩减、生物多样性下降等多重生态问题,生态系统结构受损、功能退化,区域生态安全与可持续发展受到威胁^[1-2]。因此,科学评估海湾生态系统质量状况,制定科学管理措施,对于维护海湾生态系统稳定具有重要意义。

鱼类处于食物链高位,生命周期长且活动能力强,常作为生态质量评估的指示生物,反映水域环境整体状况。Karr^[3]提出的生物完整性指数(index of biotic integrity, IBI)方法,利用鱼类群落对水生态质量进行综合评估,已广泛应用于河流、湖泊、河口、海湾等生态系统^[4-10]。以往常使用传统捕捞方法获取的数据构建 F-IBI,评估研究区域的质量状况^[2, 7-9],而使用环境 DNA (environmental DNA, eDNA)方法获取数据构建鱼类生物完整性指数(F-IBI)评估质量状况的相关研究较少。相较于传统依赖捕捞或目视的调查方式,eDNA 技术具备非侵入性、高效性等优势,能在不干扰生态系统的前提下实现对目标物种的精准监测^[11]。

eDNA 技术在水生态系统健康评估中的应用已有一定进展。例如,对武汉市及其周边湖泊的研究中,研究者通过 eDNA 技术建立了城市湖泊生态健康的 F-IBI 评价体系,评估了 27 个采样站位的湖泊健康状况^[10]。对青龙湾水库的研究

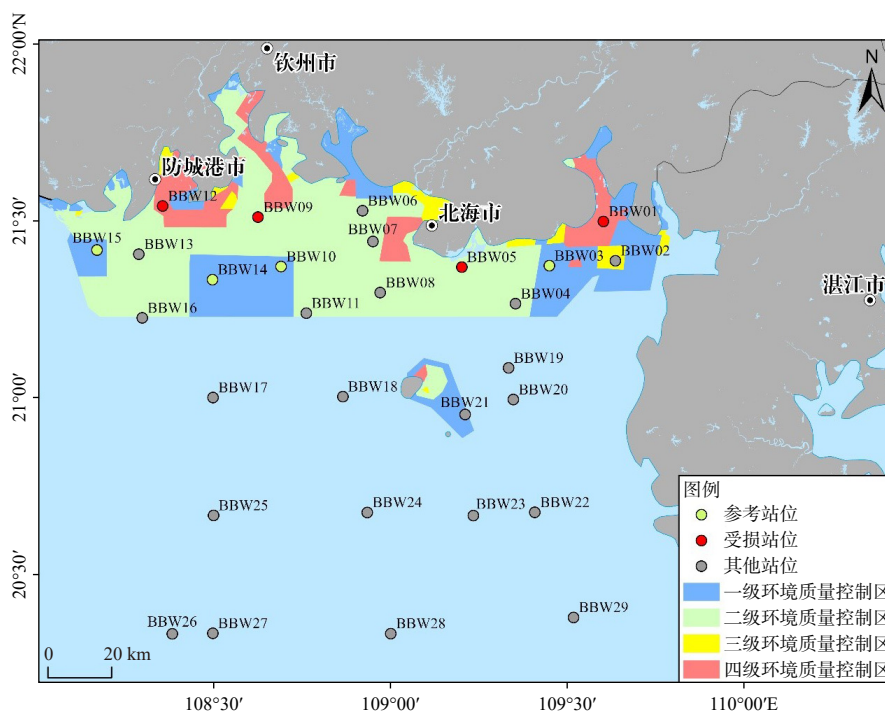
中,研究者通过 eDNA 技术构建了基于 Shannon-Wiener 多样性指数的 F-IBI,有效评估了水生态健康状况^[12]。赤水河流域的研究验证了 eDNA 在无损检测鱼类分布和多样性方面的有效性^[13]。类似地,长江下游江段的浮游植物生物完整性评价展示了 eDNA 技术在群落多样性监测中的应用^[14]。上述研究为 eDNA 在淡水生态系统健康评估中的可行性与应用价值提供了实证支持。相较之下,海湾等区域的应用案例仍然有限^[15],亟须在多尺度与多指标框架下进一步开展验证。

北部湾位于我国南海北部,是天然的半封闭型海湾,渔业资源丰富,生态环境独特,既是我国传统重要渔场之一,也是海洋生物多样性分布的热点区域。然而,北部湾正面临自然岸线缩减、栖息地退化和生物多样性下降等生态问题。本研究基于 eDNA 宏条形码技术,系统调查了北部湾东北部海域鱼类群落的组成特征,并通过 F-IBI 综合评价方法对北部湾东北部海域进行生态质量评估,旨在为海湾生态质量状况评估以及 eDNA 技术在近海生态监测中的应用提供科学依据与实践支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域与数据采集

本研究搭载国家典型海洋生态系统健康监测北部湾航次,布设 29 个采样站位(图 1),于 2024 年 7 月进行样品采集。每个站位采集 5 L 表层水于聚乙烯采样桶,使用双通道水环境 eDNA 过滤仪(南京易基诺,WD-2)配套一体化 eDNA 富集试剂盒(WF0201012,集成式滤芯,孔径 2 μm)现场快速富集;富集后向滤芯内加入 2.5 mL



注: 环境质量控制区规划参照《广西壮族自治区海洋环境保护规划(2016—2025)》(广西海洋和渔业厅, 2017)^①, 一级: 海水、沉积物及生物质量均不低于一类标准; 二级: 海水质量不低于二类标准, 沉积物与生物质量不低于一类标准; 三级: 海水质量不低于三类标准, 沉积物与生物质量不低于二类标准; 四级: 海水质量不低于四类标准, 沉积物与生物质量不低于三类标准

图1 北部湾东北部采样站位与环境质量控制区(EQCZ)分级叠加(2016—2025)

Fig. 1 Overlay map of sampling stations and environmental quality control zone (EQCZ) classifications in the northeastern Beibu Gulf (2016—2025)

eDNA Later 保存液(南京易基诺), 颠倒混匀 10 次后常温条件下保存、运输, 待实验室提取核酸^[16-17]。

各个环境因子的测量方法如下: 水温(T)、盐度(Sal)和 pH 使用 YSI ProPlus 仪器测量; 深度(Dep)由船载深度仪记录; 化学需氧量(COD)、氨氮(NH_4-N)、亚硝态氮(NO_2-N)、硝态氮(NO_3-N)、活性磷酸盐(PO_4-P)、石油类(TPH)、铜(Cu)、铅(Pb)、镉(Cd)和 $Chl\ a$ 质量浓度的测定在实验室中进行。所有测量和分析方法依据《海洋监测规范》(GB 17378—2007)^[18]、《近岸海域环境监测技术规范》(HJ 442—2020)^[19]和《海洋调查规范》(GB/T 12763—2007)^[20], 监测数据符合实验室质量控制要求。

1.2 eDNA 的提取、测序

使用 E.Z.N.A.® Water DNA Kit(Omega Biotek, Norcross, GA, USA)按说明书从样品中提取

eDNA, 产物于 $-20\ ^\circ C$ 条件下保存。鱼类靶标采用 MiFish^[21] 通用引物扩增 12S 片段: MiFishE-F(5'-GTTGGTAAATCTCGTGCCAGC-3')与 MiFishE-R(5'-CATAGTGGGGTATCTAATCCTAGTTTG-3'), 每个样品配套唯一的 8 bp 条形码。PCR 反应体系为: $5\times$ FastPfu Buffer $4\ \mu L$ 、 $2.5\ mM$ dNTPs $2\ \mu L$ 、 $5\ \mu M$ 引物各 $0.8\ \mu L$ 、FastPfu 聚合酶 $0.4\ \mu L$ 、模板 DNA $10\ ng$, 余量以无酶水补足至 $20\ \mu L$, 设置 3 个重复。PCR 条件: $95\ ^\circ C$ 2 min; 随后 25 个循环($95\ ^\circ C$ 30 s, $55\ ^\circ C$ 30 s, $72\ ^\circ C$ 30 s); $72\ ^\circ C$ 5 min。扩增产物从 2% 琼脂糖凝胶中切胶回收, 并使用 AxyPrep DNA Gel Extraction Kit(Axygen Biosciences, Union City, CA, USA)按说明书进行纯化。纯化后的扩增子用 Qubit® 3.0(Life Invitrogen)定量, 将 24 个带不同条形码的扩增子等摩尔混合; 经超声方式片段化后, 按标准流程

① 可通过 <http://hyj.gxzf.gov.cn> 获取

构建双端测序文库并完成质控。送往上海凌恩生物科技有限公司由下一代测序平台 MGI-G99 按 PE300 模式遵循标准流程完成测序。

1.3 鱼类群落结构组成

鱼类群落结构指标包括 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Margalef 丰富度指数(D)、Pielou 均匀度指数(J)和物种优势度指数(Y)^[22], 各指标计算公式如下:

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

$$D = \frac{(S-1)}{\log_2 N} \quad (2)$$

$$J = \frac{H'}{H'_{\max}} = \frac{H'}{\log_2 S} \quad (3)$$

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

式中: S 为该样本检出的总物种数; $P_i = N_i/N$, N_i 为物种 i 的有效序列数 (ASV reads) 在全体站位中的总和, N 为同一数据集中所有鱼类有效序列数的总和; $H'_{\max}$ 是样本中可能的最大 Shannon 多样性指数; Y 表示第 i 种鱼类的优势度指数, 当 $Y > 0.02$ 时该物种被视为优势种; f_i 为该物种在所有站位中出现的频率^[23]。

1.4 F-IBI 评价体系构建

1.4.1 参考站位的选择

参考站位的确定是研究生物完整性评价质

量的重要步骤。参考站位是指没有受到人类干扰或者受到人为干扰较小的采样站位, 对于参考站位的选择目前没有明确的规定, 通常是依靠人工判定或者专家经验判断。本研究结合 Karr^[3] 提出的参考站位筛选方法和环境质量控制区规划, 以及考虑北部湾的实际情况, 确定选取 4 个一级环境质量控制区的站位 (BBW03、BBW10、BBW14、BBW15) 为参考站位; 选取 2 个二级环境质量控制区和 2 个四级环境质量控制区的站位 (BBW01、BBW05、BBW09、BBW12) 为受损站位。环境质量控制区规划参照《广西壮族自治区海洋环境保护规划 (2016—2025)》(广西海洋和渔业厅, 2017), 一级环境质量控制区执行不低于海水、沉积物和生物质量一类标准, 被认为是参考站位的良好选择。

1.4.2 候选指标的确定与筛选

鱼类的种类组成、耐受性、繁殖共位群、营养结构等生态习性, 均参考相关文献和 FishBase 信息^[7-8, 10, 24-25] 进行确定。根据这些信息, 初步选择了候选指标, 具体列于表 1。首先, 通过干扰反应分析对所有候选指标进行初步筛选, 剔除分布范围狭窄、异常值差距过大以及 0 值比例超过 95% 的指标。其次, 通过判断能力分析, 将筛选出的参考站位和受损站位分为两组, 分别绘制

表 1 北部湾鱼类生物完整性候选指标

Tab.1 Candidate indicators for fish biological integrity in the Beibu Gulf

指标属性	候选指标	指标缩写	干扰增加的反应
种类组成与丰度	鱼类总物种数	M1	减少
	Shannon-Wiener 指数	M2	减少
	丰富度指数	M3	减少
	均匀度指数	M4	减少
	中下层鱼类物种数百分比/%	M5	减少
	中下层鱼类 ASV 相对丰度百分比/%	M6	减少
	中上层鱼类物种数百分比/%	M7	减少
	中上层鱼类 ASV 相对丰度百分比/%	M8	减少
	底层鱼类物种数百分比/%	M9	减少
	底层鱼类 ASV 相对丰度百分比/%	M10	减少
	鲈形目鱼类物种数百分比/%	M11	增加
	鲈形目鱼类 ASV 相对丰度百分比/%	M12	增加
	虾虎鱼科物种数百分比/%	M13	减少
	虾虎鱼科鱼类 ASV 相对丰度百分比/%	M14	减少

续表

指标属性	候选指标	指标缩写	干扰增加的反应
营养结构	广食性鱼类物种数百分比/%	M15	减少
	广食性鱼类ASV相对丰度百分比/%	M16	减少
	杂食性鱼类物种数百分比/%	M17	增加
	杂食性鱼类ASV相对丰度百分比/%	M18	增加
	浮游生物食性鱼类物种数百分比/%	M19	增加
	浮游生物食性鱼类ASV相对丰度百分比/%	M20	增加
	底栖生物食性鱼类物种数百分比/%	M21	减少
	底栖生物食性鱼类ASV相对丰度百分比/%	M22	减少
耐受性	敏感种鱼类物种数百分比/%	M23	减少
	敏感种鱼类ASV相对丰度百分比/%	M24	减少
	耐受种鱼类物种数百分比/%	M25	增加
	耐受种鱼类ASV相对丰度百分比/%	M26	增加
繁殖共位群	浮性卵鱼类物种数百分比/%	M27	减少
	浮性卵鱼类ASV相对丰度百分比/%	M28	减少
	沉性卵鱼类物种数百分比/%	M29	减少
	沉性卵鱼类ASV相对丰度百分比/%	M30	减少
	黏性卵鱼类物种数百分比/%	M31	增加
	黏性卵鱼类ASV相对丰度百分比/%	M32	增加
	附着性卵鱼类物种数百分比/%	M33	增加
	附着性卵鱼类ASV相对丰度百分比/%	M34	增加
	黏着沉性卵鱼类物种数百分比/%	M35	增加
	黏着沉性卵鱼类ASV相对丰度百分比/%	M36	增加

各指标在两组中的箱型图,并比较其 1/4 分位数和 3/4 分位数之间的重叠情况。仅保留参考站位组和受损站位组中位数均在对方箱体之外的指标,需确保其具有较高的区分能力。最后,对候选指标进行 Pearson 相关性检验,若 $|R| < 0.9$ 则通过检验;若 $|R| \geq 0.9$ 则选取最优的一个指标,去除冗余指标,同时优先选用以前文献中出现较多、具有代表性的指标。

1.4.3 评价指标体系的构建及指标分值的计算

根据筛选出的指标建立 F-IBI 指标体系,利用 1、3、5 赋值法对北部湾鱼类生物完整性指标进行赋值,将每个指标的实际观测值分为三等分,最差的等级区域设为 1 分,中间的等级区域设为 3 分,最好的等级区域设为 5 分^[3],评分标准列于表 2。为了避免指标个数不同引起 IBI 总分不同,采用如下公式计算 F-IBI^[26]:

表 2 北部湾鱼类生物完整性评分标准
Tab.2 Scoring criteria for fish biotic integrity in the Beibu Gulf

属性	指标	评分标准			对干扰的反应
		1分	3分	5分	
种类组成与丰度	M1鱼类总物种数	<24	24 ~ 29	>29	减少
	M3丰富度指数	<2.74	2.74 ~ 3.21	>3.21	减少
	M13虾虎鱼科物种数百分比/%	<3.11	3.11 ~ 4.96	>4.96	减少
营养结构	M15广食性鱼类物种数百分比/%	<42.70	42.70 ~ 50.00	>50.00	减少
	M17杂食性鱼类物种数百分比/%	>42.61	35.56 ~ 42.61	<35.56	增加
耐受性	M24敏感种鱼类ASV相对丰度百分比/%	<25.00	25.00 ~ 58.72	>58.72	减少
	M25耐受种鱼类物种数百分比/%	>60.47	55.33 ~ 60.47	<55.33	增加

$$I = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \times 12 \quad (5)$$

式中: I 为综合指数, 采用等权重法计算, 为各指标得分的平均值; P_i 为第 i 个指标的分数; n 为指标的个数, $i=1, 2, \dots, n$ 。

1.4.4 评价标准的划分

以参考站位组的 F-IBI 值的 75% 分位数作为极好评价标准^[27], 对小于 75% 分位数的分布范围进行 4 等分, 分别划分出好、一般、差和极差的评价标准, 具体列于表 3。

1.5 数据分析

原始 fastq 数据首先结合 Trimmomatic v0.39 与自编脚本按样品条形码进行拆分与质控: 对 300 bp 读长(truncLen)采用 10 bp 滑动窗口评估, 窗口内平均质量值 < 20 时截断, 截断后长度 < 50 bp 的读长予以剔除; 条形码要求完全匹配

或者引物匹配允许 ≤ 2 个错配, 去除含不确定碱基(N)的读长; 双端测序数据仅保留重叠长度 > 10 bp 的拼接序列, 无法拼接者剔除。通过初筛的序列去冗余后, 在 QIIME2 平台运行 DADA2 算法^[28]进行去噪与错误校正: 设置每端最大预期错误数(maxEE=2), 按质量分布裁剪读长, 去除低质量碱基, 合并双端读长并去除嵌合体, 生成扩增子序列变体(ASVs)及其代表序列。随后, 将代表序列与 NCBI 数据库(<https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/>)进行比对(物种判定阈值: identity ≥ 99%、coverage ≥ 98%), 经人工校核获得物种注释; 据此构建 ASV×样本丰度矩阵用于下游分析。物种中文名与分类系统参考《北部湾鱼类图鉴》《广西北部湾海洋硬骨鱼类图鉴》^[29-30]及 FishBase(www.fishbase.org), 以 FishBase 有效学名为准。

表 3 北部湾生态质量评价标准

Tab.3 Table of ecological quality evaluation criteria for the Beibu Gulf

等级	特征描述	分数区间
极好	鱼类总物种数多, 丰富度指数高, 广食性鱼类物种数百分比高, 杂食性鱼类物种数百分比低, 敏感种鱼类 ASV 相对丰度高, 耐受种鱼类物种数百分比低	[43, 60]
好	鱼类总物种数较多, 丰富度指数较高, 广食性鱼类物种数百分比偏高, 杂食性鱼类物种数百分比偏低, 敏感种鱼类 ASV 相对丰度较高, 耐受种鱼类物种数占比较低	[32, 43]
一般	鱼类总物种数适中, 丰富度指数一般, 广食性鱼类物种数百分比适中, 杂食性鱼类物种数占比偏高, 敏感种鱼类 ASV 相对丰度中等, 耐受种鱼类物种数占比适中	[22, 32]
差	鱼类总物种数较少, 丰富度指数较低, 杂食性鱼类物种数占比高, 敏感种鱼类 ASV 相对丰度低, 耐受种鱼类物种数占比偏高	[11, 22]
极差	鱼类总物种数非常少, 丰富度指数极低, 杂食性鱼类物种数占比高, 敏感种鱼类 ASV 相对丰度低, 耐受种鱼类物种数占比高	[0, 11]

在数据处理方面, 环境背景与鱼类基础状况的描述性统计分析使用 Microsoft Excel 2019 进行; 物种组成的堆积柱状图和鱼类群落与环境因子之间的冗余分析(RDA)图以及北部湾东北部的 F-IBI 评估图通过 R 语言(版本 4.5.0)绘制; 参考站位与受损站位的比较采用 GraphPad Prism 10.1.2 绘制箱线图; 相关性分析使用 Origin(版本 2021)软件。

2 结果与讨论

2.1 鱼类群落结构组成

在本次于北部湾开展的鱼类 eDNA 调查中, 共检测出鱼类 70 种, 隶属于 11 目、31 科、59 属。与历史底拖网调查数据^[31-36]相比, 有

28 种鱼类出现重合, 占本次 eDNA 检测鱼类总数的 40%。此外, 与《北部湾鱼类图鉴》对照, 共有 44 种鱼类一致, 占总数的 63%。综合两者, 共有 49 种鱼类在已有资料中有记录, 占本次鉴定鱼类总数的 70%。其余 21 种未在上述资料中出现的鱼类, 在 FishBase 数据库中对其栖息地分布进行比对, 结果显示, 其分布基本符合北部湾海域的生态特征, 具有一定的可信度。

从分类组成(图 2)上看, 鲈形目(Perciformes)物种最为丰富, 共检测出 44 种, 占鱼类总数的 63%; 其次为鲱形目(Clupeiformes), 共 13 种, 占 19%; 鳗鲡目(Anguilliformes)、颌针鱼目(Beloniformes)、鲻形目(Mugiliformes)、鲹形目(Pleuronectiformes)各 2 种; 银汉鱼目

(Atheriniformes)、仙女鱼目(Aulopiformes)、灯笼鱼目(Myctophiformes)、海鲱目(Elopiformes)与鲱形目(Siluriformes)各1种,属低频类群。

为识别优势种群,采用优势度指数 Y 进行计算, $Y > 0.02$ 即为优势物种。结果显示,优势物种共计8种,依次为:卵形鲳鲹(*Trachinotus ovatus*, $Y = 0.202$)、隆背小沙丁鱼(*Sardinella gibbosa*,

$Y = 0.200$)、日本海鲱(*Nematalosa japonica*, $Y = 0.082$)、黑尾小沙丁鱼(*Sardinella melaneura*, $Y = 0.080$)、克氏副叶鲽(*Alepes kleinii*, $Y = 0.053$)、尖吻半棱鲷(*Encrasicholina heteroloba*, $Y = 0.048$)、岛侧带小公鱼(*Stolephorus insularis*, $Y = 0.036$)及韦氏侧带小公鱼(*Stolephorus waitei*, $Y = 0.021$)。

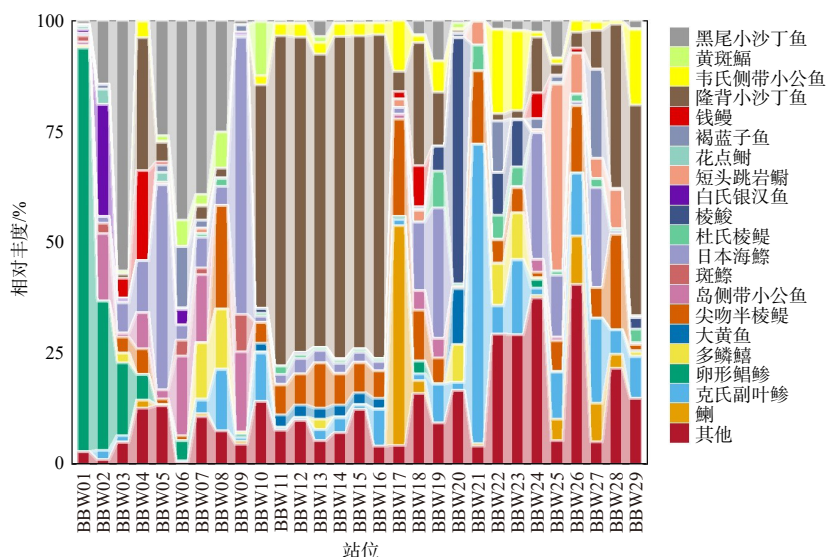


图2 各站位相对丰度前20的物种组成堆积柱状图

Fig. 2 Stacked bar chart of species composition with top 20 relative abundances at each station

2.2 环境因子对北部湾东北部鱼类群落空间结构的影响

为选择适当的排序方法,首先进行了去趋势对应分析(detrended correspondence analysis)。结果显示,第一轴的梯度长度为1.87(< 4),表明数据适合采用线性排序方法,因此采用冗余分析(redundancy analysis, RDA)探讨环境变量对鱼类群落结构的驱动机制。第一轴解释率为25.1%,第二轴解释率为13.4%。主要环境影响因子为Dep(0.0002)、Pb(0.0005)、pH(0.0017)、Cu(0.0042)、TPH(0.0083)、 $\text{NO}_3\text{-N}$ (0.0191)和Chl a (0.0207)($p < 0.05$);COD、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、Sal、 T 、Cd、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 与 $\text{PO}_4\text{-P}$ 对群落结构影响不显著($p > 0.05$)。

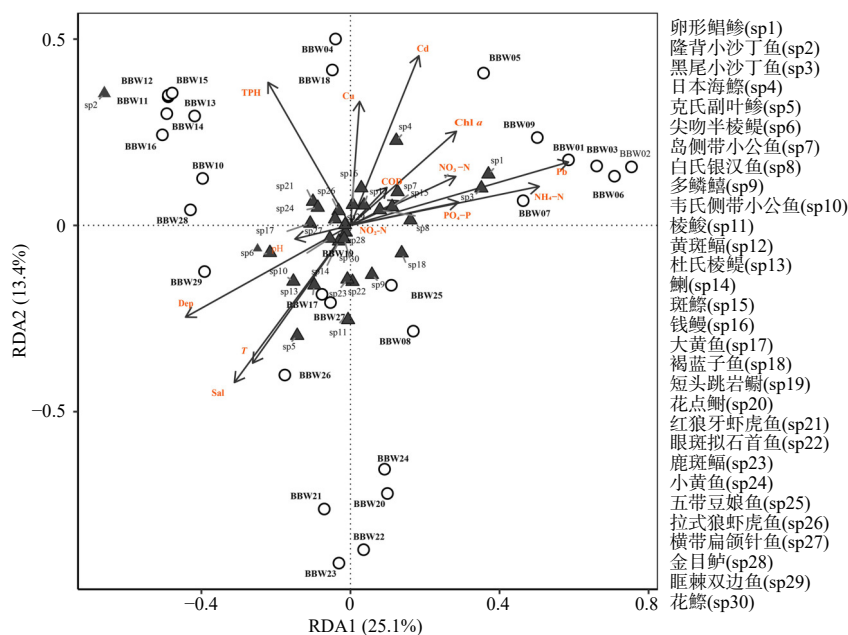
从RDA图(图3)可见,卵形鲳鲹sp1、黑尾小沙丁鱼sp3等物种与营养盐和重金属($\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、Pb)呈正相关关系,主要分布于BBW01–BBW03、BBW06、BBW09等营养盐

输入增强且Pb浓度偏高的站位;隆背小沙丁鱼sp2与石油类TPH呈正相关关系,主要分布于BBW10–BBW16等站位;而克氏副叶鲽sp5、尖吻半棱鲷sp6、韦氏侧带小公鱼sp10、棱鲛sp11、杜氏棱鲷sp13与Dep、Sal呈正相关关系,其分布倾向于较深、盐度较大的站位(如BBW20–BBW24、BBW26、BBW29)。此外,日本海鲱sp4与Cu、Chl a 呈正相关关系,主要分布于BBW05等站位。

逐站位环境因子:总体以满足一级水质标准为主,BBW01的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 与Pb满足二级水质标准,BBW02与BBW12的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 满足二级水质标准,其余项目满足所在环境质量控制区限值。

2.3 候选指标的确定与评价结果

通过文献调研,在参考不同水域的F-IBI评价指标的基础上,筛选出鱼类生物学特征及生态系统功能相关的36个候选指标,涵盖了种类组



注: 箭头长度表示该变量在前两轴上的表示度与相关强度, 而非回归系数大小

图3 北部湾东北部鱼类与环境因子冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis (RDA) of fishes and environmental factors in the Northeastern Beibu Gulf

成、耐受性、繁殖共位群和营养结构等4个方面。首先通过初步筛选,剔除了M6、M14、M20、M21、M22、M30、M31、M32、M34、M36共10个指标;通过箱体图(图4)剔除参考站位与受损站位差异不明显的指标,即保留参考站位与受损站位的中位数在对方25%~75%分位数箱体之外(即 $IQ \geq 2$)的指标,得到M1、M3、M13、M15、M17、M23、M24、M25、M26、M33共10个指标;最后,对剩余参数进行Pearson相关性检验(表4),得到了最终的M1、M3、M13、M15、M17、M24、M25共7个指标。

利用1、3、5赋值法对北部湾鱼类生物完整性指标进行赋值并制定评分标准(表2),根据评价标准得到北部湾生态质量评价标准(表3)。评价结果如图5所示,极好等级的站位7个(24.1%),好等级的站位6个(20.6%),一般等级的站位10个(34.4%),差等级的站位6个(20.6%)。好及以上等级的站位分布于北部湾偏西部与外海,一般等级的站位多分布于湾中-南部外海,差等级的站位分布于偏北部和东部近岸。

根据箱体图(图4)显示的结果,对参考站位、受损站位和其他站位的F-IBI值进行了比

较。分析结果显示,参考站位组的F-IBI值明显高于受损站位组($p < 0.05$),两组之间存在显著差异。这表明,参考站位在F-IBI值上具有显著的优势,参考站位与受损站位之间存在明显区别。 F 值为5.164,进一步说明了观察到的差异具有统计学意义。

2.4 F-IBI与环境因子及 α 指数的关系

基于Spearman相关性分析(图6),F-IBI与 S (物种数)和 D (Margalef丰富度)呈正相关关系($\rho = 0.63$ 与 0.57 , $p < 0.05$),表明完整性得分随物种丰富度升高而提高。F-IBI与石油类(TPH)呈正相关关系($\rho = 0.48$, $p < 0.05$),与铅(Pb)呈负相关关系($\rho = -0.52$, $p < 0.05$)。F-IBI与营养盐($\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$)和Dep、 T 、 Sal 、 pH 的相关性较弱或不显著。指标间相关性显示 H' 与 J 呈高度正相关关系($\rho = 0.97$),各营养盐彼此亦呈高度相关关系($\rho \geq 0.74$),提示存在共同来源或过程驱动。

2.5 讨论

本次调查中,鲈形目物种数量最多,共计44种,占鉴定鱼类总数的63%;鲱形目次之。该结果与以往研究中“鲈形目占据优势、鲱形目次之”的结论基本一致^[31,35]。此外,传统调查中

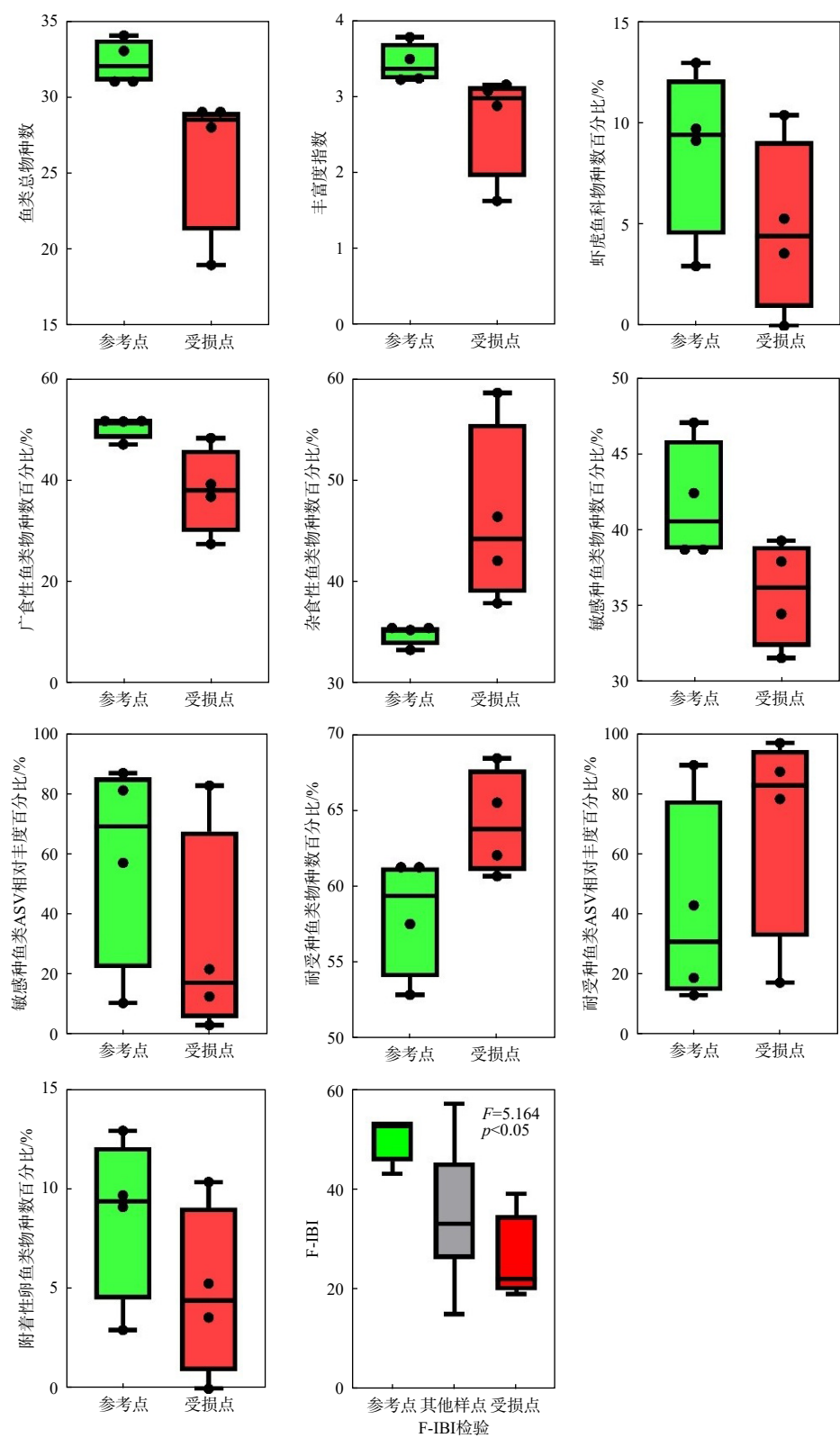


图 4 通过判别能力筛选的 10 个候选指标在参考站位和受损站位的箱体图及 F-IBI 可靠性分析组合

Fig. 4 Combined graph of box plots for 10 candidate indices (screened by discriminative ability) at reference sites and impaired sites, along with reliability analysis of F-IBI

表4 10个候选指标的 Pearson 相关性计算
Tab.4 Calculation of Pearson correlation for 10 candidate indicators

	M1	M3	M13	M15	M17	M23	M24	M25	M26	M33
M1	1.000									
M3	0.752**	1.000								
M13	0.586**	0.423*	1.000							
M15	0.060	0.150	0.310	1.000						
M17	-0.230	-0.120	-0.372*	-0.878**	1.000					
M23	-0.280	-0.100	-0.402*	0.476**	-0.379*	1.000				
M24	0.300	0.310	0.621**	0.250	-0.170	-0.060	1.000			
M25	0.280	0.100	0.402*	-0.476**	0.379*	-1.000**	0.060	1.000		
M26	-0.300	-0.310	-0.621**	-0.250	0.170	0.060	-1.000**	-0.060	1.000	
M33	0.586**	0.423*	1.000**	0.310	-0.372*	-0.402*	0.621**	0.402*	-0.621**	1.000

注: *为 $p \leq 0.05$, **为 $p \leq 0.01$, 指标加粗为 $|R| < 0.9$ 通过检验7个指标

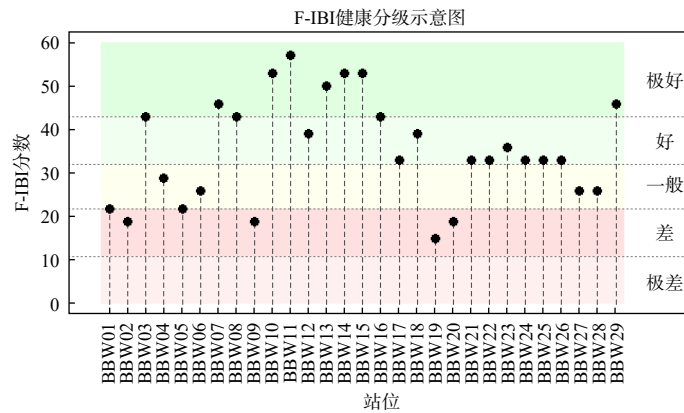


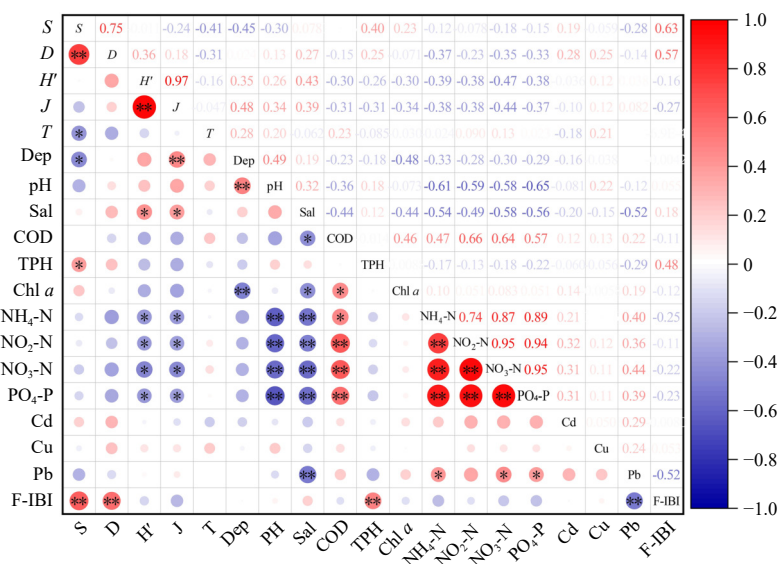
图5 北部湾东北部 F-IBI 评价结果

Fig. 5 Evaluation results of F-IBI in the Northeastern Beibu Gulf

的优势种类如鹿斑鲷、二长棘鲷、黄斑鲷、克氏副叶鲽、长尾大眼鲷及花斑蛇鲷等亦在本次 eDNA 分析中检出,进一步验证了其代表性。值得注意的是,本次调查中卵形鲳鲹、隆背小沙丁鱼、日本海鲷、黑尾小沙丁鱼、克氏副叶鲽、尖吻半棱鲷、岛侧带小公鱼及韦氏侧带小公鱼为优势种。这些鱼类均为在中上层活动的小至中型种类,集群性强,常栖息于表层或近岸水域,容易释放大量 eDNA。相比之下,以往传统底拖网调查中出现频率较高、个体较大且偏底层的鱼类^[34, 36],如二长棘鲷、长尾大眼鲷和花斑蛇鲷,在本次 eDNA 调查中并未表现为优势种。这种差异可能与两种方法的技术特性有关。eDNA 方法对水体中微量遗传物质的检出能力较强,尤

其对于体型小、生物量低但广泛分布的中上层鱼类,展现出更高的灵敏度和检测概率。然而,表层水中的 eDNA 方法对于底层鱼类的检出率较低。因此,未来调查中若能结合底层水样的采集,将有助于更全面地反映鱼类群落的生物多样性和垂直分布特征。鉴于缺乏与 eDNA 同步的底拖网资料,建议在后续研究中开展配合拖网的 eDNA-F-IBI 的同步监测,以量化两者在等级判定与指数上的一致性。

人类干扰、气候和水文因子等环境因子的异质性会引起鱼类物种组成和群落结构的变化^[37]。本研究的 RDA 结果显示,研究区鱼类分布主要受 3 类因子影响:营养盐和重金属、水体理化因子、石油类。前人研究指出,富营养化水



注: *为 $p \leq 0.05$, **为 $p \leq 0.01$, ρ 为 Spearman 相关系数

图6 F-IBI 和 α 多样性及环境因子相关性计算

Fig. 6 Correlation calculation between F-IBI and α -diversity as well as environmental factors

域可能抑制非耐污性鱼类的生长,而滤食性或杂食性类群更易在此类环境中占据优势,从而改变群落结构^[38]。本研究中,卵形鲳鲹 sp1、黑尾小沙丁鱼 sp3 等耐受种与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、Pb 呈正相关关系,提示在营养盐输入增强并叠加重金属暴露的背景下,耐受类群更易出现并形成优势;对应站位主要集中在 BBW01-03、BBW06、BBW09。在石油类梯度上,已有研究认为低浓度石油烃可能对特定初级生产者产生选择性影响,并可能通过食物网过程间接改变浮游生物资源,从而影响以浮游生物为食的鱼类^[39]。本研究中,隆背小沙丁鱼 sp2 和石油类呈正相关关系,可能与低浓度石油烃暴露相关^[40]。在水体理化和水文条件方面,克氏副叶鲽 sp5、尖吻半棱鲉 sp6、韦氏侧带小公鱼 sp10、棱鲉 sp11、杜氏棱鲉 sp13 等物种与 Dep 和 Sal 呈正相关关系,表明其更偏好较深、盐度较高的水团环境,主要分布于 BBW20-BBW24、BBW26、BBW29 等站位。此外,日本海鲷 sp4 等物种和 Cu 和 Chl *a* 呈正相关关系,集中分布于 BBW05 站位。综上所述,研究区域鱼类群落格局是营养盐和重金属、水体理化因子、石油类等多种环境因子共同塑造的结果。

与此相应, F-IBI 与物种数 *S*、Margalef 丰富

度 *D* 呈正相关关系,符合群落完整性随物种丰富度提升而提高的预期; F-IBI 与 Pb 呈负相关关系,提示重金属压力对鱼类群落具有抑制效应^[41]。在本研究的数据范围内 F-IBI 与 TPH 呈正相关关系,这一结果与 RDA 中“石油类与浮游食性鱼类相关”的发现一致。该相关性可能与低浓度 TPH 对微藻产生选择性影响进而通过食物网过程间接影响浮游食性鱼类有关。

本研究采用鱼类生物完整性指数对北部湾东北部水域的生态质量状况进行评估。F-IBI 评价体系中参考站位的设定至关重要,直接影响评价结果的科学性与代表性。然而,目前尚无统一标准指导参考站位的选取,研究中常采用两类方法:一是使用区域历史数据;二是选择受人类干扰较小的站位或时段。鉴于北部湾历史监测资料较为欠缺,难以获取长期稳定的参考值,本研究参照《广西壮族自治区海洋环境保护规划(2016—2025)》(广西海洋和渔业厅,2017)中提出的环境质量控制区划分方法,选择4个一级环境质量控制区的站位(BBW03、BBW10、BBW14、BBW15)作为参考站位。该区域海水、沉积物和生物质量标准不低于国家一类海域水质要求,具备良好的生态基础,是适宜的参考站位选取对象。同时,选取2个二级控制区的站位

(BBW01、BBW05)和2个四级控制区的站位(BBW09、BBW12)作为受损站位。为检验参考站位与受损站位划分的合理性,进一步分析了F-IBI在参考站位、一般站位和受损站位之间的分值分布特征(图4)。结果显示,参考站位与受损站位间的F-IBI值存在显著差异,说明参考站位设定具有区分效力;而一般站位F-IBI值分布较为均匀,验证了F-IBI对不同质量状况水域的响应能力。该结果可支持F-IBI作为区域生态质量综合评价工具的有效性和实用性。

本研究基于F-IBI对海湾生态系统进行评估。F-IBI低值站位多分布于邻近港口航运与旅游岸线密集的海域(如BBW01、BBW02、BBW05、BBW09、BBW19、BBW20);这些站位在RDA图中亦位于营养盐输入增强与Pb浓度偏高的一侧海域,表明营养盐与重金属压力增大与生态状况变差相对应。既有研究显示,船舶噪声可干扰鱼类迁移、摄食与交流,频繁疏浚和港口建设会破坏底栖栖息地并降低幼鱼庇护度,旅游岸线的硬化及光和噪声也会影响鱼类栖息行为与群落稳定性^[42-45];同时,过度捕捞可降低鱼类生物量并通过营养级联作用促使群落简化。研究区域的F-IBI低值站位集中于人类活动强度较高的海域,提示鱼类群落可能受到复合干扰。与之相对,好及以上等级的站位主要位于湾中-西部水域(BBW10-BBW15等站位),在RDA中与Dep呈正相关关系,指示水体交换较好、营养盐与重金属背景较低,群落结构较完整。被评为一般等级的站位大多位于BBW20-BBW24一带海域,在RDA1轴上处于中间区,同时和石油类呈负相关关系,表现为营养盐和重金属浓度中等、石油类浓度偏低的过渡状态。综上所述,本研究区域呈现出环境梯度-生态状态的对应关系: $\text{NO}_3\text{-N}$ 与Pb浓度升高的一侧对应F-IBI低值,而深水交换较好的低营养盐、重金属水团对应F-IBI高值。据此,管理上宜优先关注港口-航道与高人类活动岸线周边海域的生态缓冲带建设、水下噪声与水质管控以及基于生态系统的渔业养护;考虑到鰾科中上层鱼为布氏鲸(*Balaenoptera edeni*)的重要饵料,在其核心觅食区审慎设置季节性禁渔与缓冲带具有现实

意义^[46]。

3 结论

(1)基于eDNA宏条形码技术与F-IBI,对北部湾东北部29个站位开展评价,共检出鱼类70种(11目、31科、59属),以鲈形目为主。

(2)F-IBI结果显示全区未见极差等级的站位,45%的站位评为好及以上等级,55%的站位为一般及以下等级。空间上,好及以上等级的站位多见于湾西部及外海,一般等级的站位多位于湾中-南部外海,差等级的站位主要位于北部与东部近岸。

(3)本研究构建了基于eDNA和F-IBI的近岸海域生态质量评估流程,可作为本区生态状况判读与对比的技术依据,可为北部湾重点海域的生态保护与管理提供参考。

参考文献:

- [1] 黄小平,张凌,张景平,等.我国海湾开发利用存在的问题与保护策略[J].中国科学院院刊,2016,31(10): 1151-1156.
- [2] Su L, Xu Y W, Qiu Y S, et al. Long-term change of a fish-based index of biotic integrity for a semi-enclosed bay in the Beibu Gulf[J]. *Fishes*, 2022, 7(3): 124.
- [3] Karr J R. Assessment of biotic integrity using fish communities[J]. *Fisheries*, 1981, 6(6): 21-27.
- [4] 张亚,余宏昌,毕宝帅,等.基于鱼类生物完整性指数的上海苏州河水生态系统健康评价[J].中国环境监测,2021,37(6): 164-177.
- [5] 张浩,丁森,张远,等.西辽河流域鱼类生物完整性指数评价及与环境因子的关系[J].湖泊科学,2015,27(5): 829-839.
- [6] 惠筠,方冬冬,贺海战,等.基于鱼类生物完整性指数的丹江口水库水生态健康评价[J].河南水产,2024(4): 32-35,44.
- [7] 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.
- [8] 牛明香,王俊,左涛,等.基于鱼类生物完整性指数的黄河口近岸渔业水域健康评价[J].水生态学杂志,2023,44(6): 45-52.
- [9] 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.
- [10] 郭昌陇,张鹏,郑伟,等.基于eDNA鱼类群落监测的武汉市及周边城市湖泊水生态健康评价[J].湖泊科学,2025,37(4): 1106-1119.
- [11] Fujii K, Doi H, Matsuoka S, et al. Environmental DNA metabarcoding for fish community analysis in backwater lakes: a comparison of capture methods[J]. *PLoS One*, 2019,

- 14(1): e0210357.
- [12] 王宇星, 叶章义, 罗平, 等. 基于鱼类生物完整性的青龙湾水库生态系统健康评价 [J/OL]. 大连海洋大学学报, 1-21[2025-09-19]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1575.S.20250709.1104.004>.
- [13] 郭宁宁. 基于 eDNA 技术研究赤水河流域鱼类分布及影响因素 [D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2023.
- [14] 周宇恒, 赵旭, 王玉清, 等. 基于 eDNA 技术的长江下游典型江段浮游植物生物完整性评价 [J]. 南方农业学报, 2025, 56(1): 275-286.
- [15] Duarte S, Simões L, Costa F O. Current status and topical issues on the use of eDNA-based targeted detection of rare animal species[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 904: 166675.
- [16] 雷俊, 苏园园, 尹连政, 等. 基于 eDNA 技术与传统渔具调查方法的万泉河鱼类多样性的比较研究 [J]. 渔业科学进展, 2025, 46(2): 147-161.
- [17] 何瑞, 高保燕, 金宗安, 等. 利用环境 DNA 与生态网络分析探索赣江浮游植物对水质的指示作用 [J]. 环境科学研究, 2025, 38(7): 1430-1439.
- [18] GB 17378—2007 海洋监测规范 [S].
- [19] HJ 442—2020 近岸海域环境监测技术规范 [S].
- [20] GB/T 12763—2007 海洋调查规范 [S].
- [21] Miya M, Sato Y, Fukunga T, et al. MiFish, a set of universal PCR primers for metabarcoding environmental DNA from fishes: detection of more than 230 subtropical marine species[J]. *Royal Society Open Science*, 2015, 2(7): 150088.
- [22] 李尚清, 叶深, 王雨航, 等. 瓯江口海域鱼类早期资源群落结构及优势种相关性分析 [J]. 水生生物学报, 2024, 48(6): 898-912.
- [23] 崔晓玉, 张云雷, 张金勇, 等. 基于环境 DNA 宏条形码的辽东半岛重要河口鱼类多样性特征 [J]. 大连海洋大学学报, 2024, 39(4): 578-588.
- [24] 张晓牧, 王晶, 徐宾铎, 等. 海州湾鱼类群落功能多样性的时空变化 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(9): 3233-3244.
- [25] 李文, 滕航, 田辉伍, 等. 应用鱼类生物完整性指数评价黑水河河流健康状况 [J]. 水生态学杂志, 2024, 45(2): 73-83.
- [26] Moyle P B, Randall P J. Evaluating the Biotic Integrity of Watersheds in the Sierra Nevada, California[J]. *Conservation Biology*, 1998, 12(6): 1318-1326.
- [27] 池仕运, 竺维佳, 施练东, 等. 应用底栖动物完整性指数评价水源水库溪流健康状态 [J]. 水生态学杂志, 2012, 33(2): 16-25.
- [28] Callahan B J, Mcmurdie P J, Rosen M J, et al. DADA2: high-resolution sample inference from Illumina amplicon data[J]. *Nature Methods*, 2016, 13(7): 581-583.
- [29] 刘静, 吴仁协, 康斌, 等. 北部湾鱼类图鉴 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [30] 赖廷和, 何斌源. 广西北部湾海洋硬骨鱼类图鉴 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [31] 张公俊, 杨长平, 刘岩, 等. 北部湾防城港—钦州近岸海域鱼类群落格局及其与环境因子的关系 [J]. 南方水产科学, 2022, 18(4): 20-33.
- [32] 孙冬芳, 朱文聪, 艾红, 等. 北部湾海域鱼类物种分类多样性研究 [J]. 广东农业科学, 2010, 37(6): 4-7.
- [33] 张公俊, 杨长平, 孙典荣, 等. 北部湾中北部海域鱼类群落季节变化特征 [J]. 南方农业学报, 2021, 52(10): 2861-2871.
- [34] 罗峥力, 杨长平, 王良明, 等. 北部湾北部沿岸海域鱼类资源时空分布特征及多样性变化 [J]. 南方农业学报, 2023, 54(6): 1847-1857.
- [35] 袁华荣, 陈丕茂, 贾晓平, 等. 北部湾东北部游泳生物资源现状 [J]. 南方水产科学, 2011, 7(3): 31-38.
- [36] 袁蔚文. 北部湾底层渔业资源的数量变动和种类更替 [J]. 中国水产科学, 1995(2): 56-65.
- [37] 帅方敏, 李新辉, 刘乾甫, 等. 珠江水系鱼类群落多样性空间分布格局 [J]. 生态学报, 2017, 37(9): 3182-3192.
- [38] 刘伟, 张远, 高欣, 等. 浑河流域 2010—2014 年的鱼类群落和水生态健康变化分析 [J]. 水生生物学报, 2016, 40(5): 968-977.
- [39] 黄逸君, 江志兵, 曾江宁, 等. 石油烃污染对海洋浮游植物群落的短期毒性效应 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(9): 1095-1106.
- [40] 冯雪, 戴小杰, 袁华荣, 等. 外伶仃海洋牧场附近海域游泳生物群落结构及其与环境因子的关系 [J]. 上海海洋大学学报, 2024, 33(1): 186-201.
- [41] Hodson P V. The effect of metal metabolism on uptake, disposition and toxicity in fish[J]. *Aquatic Toxicology*, 1988, 11(1/2): 3-18.
- [42] Slabbekoorn H, Bouton N, Van Opzeeland I, et al. A noisy spring: the impact of globally rising underwater sound levels on fish[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2010, 25(7): 419-427.
- [43] 焦敏, 高郭平, 陈新军. 东北大西洋海洋捕捞渔获物营养级变化研究 [J]. 海洋学报, 2016, 38(2): 48-63.
- [44] Dugan J, Airolidil L, Chapman M G, et al. 8.02-Estuarine and coastal structures: environmental effects, a focus on shore and nearshore structures[M]//WOLANSKI E, MCLUSKY D. Treatise on Estuarine and Coastal Science. New York: Academic Press, 2011: 17-41.
- [45] Erftemeijer P L A, Lewis Iii R R R. Environmental impacts of dredging on seagrasses: a review[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2006, 52(12): 1553-1572.
- [46] 林佳, 庞碧剑, 林海英, 等. 广西涠洲岛海域浮游动物群落结构的季节变化及影响因素 [J]. 海洋学报, 2024, 46(9): 73-87.

(本文编辑: 曲丽梅)