

◆水动力与生态环境◆

广西北海冯家江口及其邻近海域生态环境综合评价*

欧阳贤清¹, 关瑶^{2**}, 李小维¹, 裴木凤¹

(1. 国家海洋局北海海洋环境监测中心站, 广西北海 536000; 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 536000)

摘要:河口生态系统具有开放性、敏感性和脆弱性, 保护好河口生态环境十分重要。广西北海冯家江口及其邻近海域拥有红树林湿地和沙滩景观, 具有较高的生态服务价值, 同时又容易受人类活动影响。为了研究冯家江口及其邻近海域生态环境状况和主要影响因素, 本文根据 2021 年 9 月在研究区进行的海洋环境质量调查结果, 通过构建三级评价标准体系, 采用指标体系法对海区生态环境进行综合评价。评价结果显示海区生态环境质量整体为优, 其中冯家江口邻近海域生态环境质量为优; 而冯家江口海洋生态环境受海水中的溶解氧、无机氮、活性磷酸盐含量以及浮游动物多样性等因素的影响, 生态环境质量只达到中等或良好水平。保护冯家江口生态环境需要控制河口营养盐的输入和恢复海洋生物多样性。

关键词:河口生态系统 北海冯家江 海洋生态环境 指标体系方法 综合评价

中图分类号: P76 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2022)06-1044-14

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20230110.004

河口生态系统处于陆地、河流和海洋相互作用的界面上, 具有一定的开放性、敏感性和脆弱性^[1]。河口生态系统在人为活动和气候变化的影响下, 容易受到富营养化、有害藻华、缺氧和 pH 值变化等方面的威胁^[2]。我国长江口^[3,4]、珠江口^[5]等大型河口近岸海域仍然面临水质污染严重、海洋生态功能受损、滨海湿地生态退化等问题。相比于大型河流, 中小型河流河口在人为活动的影响下, 更容易出现海洋生态问题, 河口生态环境的保护十分重要。广西北部湾沿岸

多为中小河流, 河口常有滨海湿地、红树林等生态系统, 具有重要的生态价值。广西北海冯家江是北海唯一的内陆潮汐河流, 冯家江及江口东面海域是北海滨海国家湿地公园, 拥有 200 hm² 原生红树林、丰富的鸟类和鱼类资源。冯家江口西面海域为北海银滩, 具有较高的旅游观光价值^[6,7]。冯家江口及其周边海域旅游开发活动活跃, 人与海洋环境关系密切, 海洋生态环境质量对该区域的发展有着重要意义。冯家江流域水环境未进行治理之前, 大量未经处理的养殖

收稿日期: 2022-10-12

修回日期: 2022-12-01

* 广西科技基地和人才专项(2018AD19321)和北海市科技计划项目(北科合 202082022)资助。

【作者简介】

欧阳贤清(1989-), 男, 工程师, 主要从事海洋环境、海洋地质研究, E-mail: ouyangxq@mail2.sysu.edu.cn。

【**通信作者】

关瑶(1987-), 男, 副研究员, 主要从事海洋地质研究, E-mail: guanyao@mail2.sysu.edu.cn。

【引用本文】

欧阳贤清, 关瑶, 李小维, 等. 广西北海冯家江口及其邻近海域生态环境综合评价[J]. 广西科学, 2022, 29(6): 1044-1057.

OUYANG X Q, GUAN Y, LI X W, et al. Integrated Assessment of Ecological Environment of Fengjiajiang River Estuary and Its Adjacent Area in Beihai, Guangxi [J]. Guangxi Sciences, 2022, 29(6): 1044-1057.

废水、雨污水、农业废水等被直接排入冯家江中,使得冯家江及邻近海域生态系统承受巨大的环境压力,面临着水质恶化、生态退化和生产力下降等生态环境问题^[8]。2018年广西北海市开展冯家江流域水环境治理工作,治理效果和治理后研究区海洋生态环境质量是人们关注的重点,但在这方面一直缺乏科学数据作为支撑,因此有必要对冯家江口及其邻近海域生态环境进行综合性评价。

河口及其邻近海域同时受河流和海洋影响,生态系统组成复杂,其性质由该区域水文物理、地质、化学环境以及生物所决定^[9]。该区域的生态环境容易受人类活动影响,对其进行海洋生态环境综合评价具有一定复杂性。海洋生态环境评价是目前海洋研究的重要内容之一,随着对海洋环境评价方法的不断探索和研究,海洋环境评价方法也从单一指标评价发展到海洋生态环境综合评价。现在国外^[10-12]和国内^[13-15]采用的海洋生态环境综合评价模型均属于多参数评价体系,能够较全面地评估海域的生态环境质量。赖俊翔等^[16,17]曾采用《近岸海洋生态健康评价指南》中的方法对广西钦州湾和北仑河口近岸海域进行生态环境健康评价,结果表明广西钦州湾和北仑河口近岸海域均处于亚健康状态。目前关于北海冯家江及其周边海域生态环境质量的研究较少,在前人的调查研究中,通常只是采用单一指标对海区中的水质^[18]、沉积物^[19]或生物生态^[20]进行评价,未对海区生态环境进行综合评价。

本文结合前人对研究区海洋生态环境的调查研究和评价结果,采用指标体系法^[21,22],结合水环境、沉积物环境和生物生态3个方面构建三级评价模型,对研究区海洋生态环境进行综合评价,拟为冯家江河口生态保护、滨海湿地管理和区域旅游开发提供科学数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西北海银海区冯家江口及其邻近海域,地理坐标为 $109^{\circ}6' - 109^{\circ}14' E, 21^{\circ}22' - 21^{\circ}26' N$ 。研究区包含冯家江河口生态系统、湿地生态系统和红树林生态系统3种典型的近岸海洋生态系统。

该区域属海洋性季风气候,具有典型的亚热带特色。年平均气温 $22.6^{\circ}C$,年平均降水量 $1\ 832.6\ mm$,降雨主要集中在每年的5-9月,冯家江上游有鲤鱼地水库,在水库调节下,河流径流量季节变化较小。区域风向季节变化显著,冬季盛吹北风,夏季盛吹偏南风。研究区潮汐类型为不正规的全日潮。

1.2 样品及分析

样品来自国家海洋局北海海洋环境监测中心站2021年9月在广西北海冯家江口及其邻近海域开展的海洋环境质量调查,对研究区20个水质站位、10个沉积物站位、12个生态站位和3个潮间带断面(图1)进行样品采集和分析。水质要素包括海水温度、盐度、pH值、溶解氧、化学需氧量、硝酸盐、亚硝酸盐、铵盐、活性磷酸盐、石油类、汞、镉、铅、铜和锌等15项。沉积物要素包括石油类、有机碳、铜、铅、镉、锌和汞7项。生物生态调查内容包括浮游植物、大型浮游动物、大型底栖生物和潮间带生物。样品采集和分析均按《海洋监测规范》(GB 17378-2007)^[23]中的要求执行,其中浮游植物现场调查采用浅水Ⅲ型浮游生物网(网口面积 $0.1\ m^2$,网口直径 $37\ cm$,网长 $140\ cm$)由海底至海面作垂直拖网1次;浮游动物现场调查采用浅水Ⅰ型浮游生物网(网口面积 $0.2\ m^2$,网口直径 $50\ cm$,网长 $145\ cm$)由海底至海面垂直拖网1次;底栖生物现场调查采用开口面积为 $0.05\ m^2$ 的抓斗式采泥器采集,每站采样2次。

1.3 数据分析

1.3.1 水质要素评价

采用单因子标准指数法^[24]对海水中pH值、溶解氧、化学需氧量、无机氮、活性磷酸盐、石油类、汞、镉、铅、铜、锌等水质要素进行评价,根据研究区所在海洋功能区划管理要求,评价标准采用《海水水质标准》(GB 3097-1997)^[25]中的二类海水水质标准。重金属是影响水质的重要因素之一,利用重金属污染指数法^[22]对海水中的汞、镉、铅、铜、锌等5种重金属污染水平进行评价。为了解研究区海水水质要素的空间分布规律,采用Ocean Data View软件绘制海水温度、盐度、pH值、溶解氧、化学需氧量、无机氮、活性磷酸盐、石油类和重金属污染指数的空间分布图^[26]。

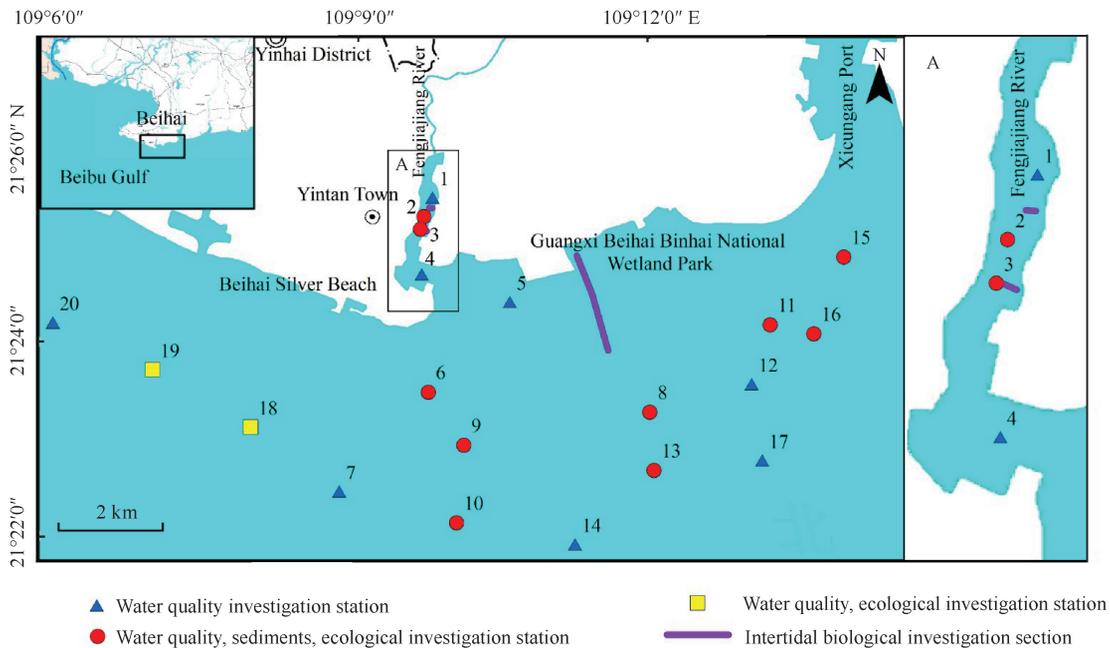


图1 研究区域及调查站位

Fig. 1 Study area and investigation stations

1.3.2 沉积物要素评价

采用单因子标准指数法对沉积物中的石油类、有机碳、汞、镉、铅、铜和锌进行评价,评价标准采用《海洋沉积物质量》(GB 18668-2002)^[27]中的一类海洋沉积物标准。另外,采用瑞典学者 Hankanson 提出的沉积物重金属潜在生态风险指数法^[28],对沉积物中5种重金属的潜在生态风险进行评价。潜在生态危害指数能反映沉积物中某一种重金属的生态危害污染程度,根据潜在生态危害系数法,先计算海区沉积物中的汞、镉、铅、铜和锌等5种重金属的潜在生态危害指数,然后再结合毒性系数计算出各调查站位沉积物中多种重金属的潜在生态风险指数(RIs)。重金属 RIs 反映的是研究区或调查站位多种重金属整体潜在生态危害程度。重金属 RIs 值越高,潜在生态风险越大。综合考虑前人研究中沉积物的采样范围与采样时间^[19,29,30],本文采用1988年在廉州湾和铁山港湾调查中的沉积物重金属平均值作为沉积物重金属背景参考值^[30]。沉积物重金属含量背景参考值和毒性系数见表1。

1.3.3 生物生态评价

研究区的浮游植物、浮游动物、底栖生物和潮间带生物评价采用生物多样性指数(H')进行分析,生物多样性指数(H')采用 Shannon-Wiener 多样性指数^[31]公式进行计算:

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

式中, H' 为生物多样性指数, s 为生物总种类数, P_i 为第*i*种生物的个体数与总个体数的比值。

生物多样性指数(H')适用于海区环境污染程度评价,当 H' 值为3-4时表示环境清洁, H' 值为2-3时表示环境受轻度污染, H' 值为1-2时表示环境受中度污染, H' 值<1时表示环境受严重污染^[32]。

表1 沉积物重金属含量背景参考值和毒性系数

Table 1 Background value and toxicity coefficient of ecological risk assessment for heavy metals in sediments

| 重金属 Heavy metal | 背景值($\times 10^6$) Background value ($\times 10^6$) | 毒性系数 Toxicity coefficient |
|--------------------|--|------------------------------|
| Hg | 0.102 | 40 |
| Cd | 0.3125 | 30 |
| Pb | 29.1 | 5 |
| Cu | 14.405 | 5 |
| Zn | 80.25 | 1 |

1.3.4 生态环境综合评价指标体系和模型

为了能够更加系统全面地评价研究区海洋生态环境质量现状,本文采用指标体系法对研究区进行综合评价。范海梅等^[22]曾采用指标体系法对长江口及其邻近海域生态环境进行综合评价,本文在其构建的三级评价标准体系的基础上,将溶解氧、化学需氧量

和有机碳纳入评价标准体系,对研究区海洋生态环境进行综合评价。构建的三级评价标准体系将评价指标分为目标层、准则层和指标层3层。目标层为水环境、沉积物环境和生物生态,准则层为选择的典型指标,指标层为调查中样品具体分析要素,各项指标见表2。构建指标体系模型的难处在于对指标进行分级和赋值评价,本文参考前人的相关研究成果^[22],确定准则层各项评价指标的标准值范围和对应的赋值(表2)。

对准则层指标进行赋值后,可以根据以下模型计算环境综合评价指数,确定海洋生态环境综合状况。评价模型如下:

$$E = \frac{W + S + B}{3},$$

表2 海域生态环境综合评价指标标准与赋值

Table 2 Standard and assignment value of integrated evaluation index of marine ecological environment

| 目标层 Target layer | 准则层 Criteria layer | 指标层 Index layer | 标准值范围 Range of standard values | 赋值 Assignment values | | |
|-------------------------------------|---|------------------------------|---|----------------------------------|------------|---|
| Marine water environment (MwENV) | Dissolved oxygen ^[25] (W ₁) | Dissolved oxygen (mg/L) | >6 | 4 | | |
| | | | 5-6 | 3 | | |
| | | | 4-5 | 2 | | |
| | | | <4 | 1 | | |
| | | | Chemical oxygen demand ^[25] (W ₂) | Chemical oxygen demand (mg/L) | <2 | 4 |
| | | | | | 2-3 | 3 |
| | 3-4 | 2 | | | | |
| | >4 | 1 | | | | |
| | Inorganic nitrogen (W ₃) | Inorganic nitrogen (mg/L) | | | <0.2 | 4 |
| | | | | | 0.20-0.35 | 3 |
| | | | 0.35-1.15 | 2 | | |
| | | | >1.15 | 1 | | |
| | | | Active phosphate (W ₄) | Active phosphate (mg/L) | <0.015 | 4 |
| | | | | | 0.015-0.03 | 3 |
| | 0.03-0.05 | 2 | | | | |
| | >0.05 | 1 | | | | |
| | Heavy metal pollution index (W ₅) | Hg,Cd,Pb,Cu,Zn | | | <0.1 | 4 |
| | | | | | 0.1-0.15 | 3 |
| | | | 0.15-0.20 | 2 | | |
| | | | >0.2 | 1 | | |
| | | | Oil (W ₆) | Oil (mg/L) | <0.01 | 4 |
| | | | | | 0.01-0.05 | 3 |
| | 0.05-0.10 | 2 | | | | |
| | >0.1 | 1 | | | | |

式中, E 为环境综合评价指数, W 为水环境指数,取溶解氧含量赋值(W_1)、化学需氧量赋值(W_2)、无机氮含量赋值(W_3)、活性磷酸盐含量赋值(W_4)、重金属污染指数赋值(W_5)和石油类含量赋值(W_6)的平均值; S 为沉积物环境指数,取沉积物的重金属生态风险指数赋值(S_1)、有机碳赋值(S_2)和石油类含量赋值(S_3)的平均值; B 为生物生态指数,取浮游植物生物多样性指数赋值(B_1)、浮游动物生物多样性指数赋值(B_2)、底栖生物生物多样性指数赋值(B_3)和潮间带生物生物多样性指数赋值(B_4)的平均值。根据得分进行环境评价,参考前人研究成果^[22],水环境指数、沉积物环境指数、生物生态指数和综合评价指数分级及环境评价见表3。评价指数的数值为1-4,数值越大环境质量越好。

续表

Continued table

| 目标层 Target layer | 准则层 Criteria layer | 指标层 Index layer | 标准值范围 Range of standard values | 赋值 Assignment values |
|---------------------------------|--|--|--------------------------------------|----------------------------|
| Sediment environment (SdENV) | Heavy metal ecology risk index (S ₁) | Hg, Cd, Pb, Cu, Zn | <30 | 4 |
| | | | 30-50 | 3 |
| | | | 50-70 | 2 |
| | | | >75 | 1 |
| | Organic carbon ^[33] (S ₂) | Organic carbon (%) | <1 | 4 |
| | | | 1-2 | 3 |
| | | | 2-3 | 2 |
| | | | >3 | 1 |
| | Oil (S ₃) | Oil ($\times 10^{-6}$) | <100 | 4 |
| | | | 100-200 | 3 |
| 200-300 | | | 2 | |
| >300 | | | 1 | |
| Biological ecology (BeCHA) | Biodiversity index | Phytoplankton (B ₁), zoo- plankton (B ₂), benthos (B ₃), intertidal creatures (B ₄) | >3 | 4 |
| | | | 2-3 | 3 |
| | | | 1-2 | 2 |
| | | | <1 | 1 |

表3 海域生态环境综合评价中目标层的分级与评价

Table 3 Grades and assessment of target layers for integrated evaluation of marine ecological environment

| 指标 Indices | 分级 Grades | 评价 Assessment |
|------------------------|--------------------|------------------|
| Indices of MwENV (W) | $W \leq 1.5$ | Poor |
| | $1.5 < W \leq 2.5$ | Medium |
| | $2.5 < W \leq 3.5$ | Good |
| | $W > 3.5$ | Excellent |
| Indices of SdENV (S) | $S \leq 1.5$ | Poor |
| | $1.5 < S \leq 2.5$ | Medium |
| | $2.5 < S \leq 3.5$ | Good |
| | $S > 3.5$ | Excellent |
| Indices of BeCHA (B) | $B \leq 1.5$ | Poor |
| | $1.5 < B \leq 2.5$ | Medium |
| | $2.5 < B \leq 3.5$ | Good |
| | $B > 3.5$ | Excellent |
| Integrated indices (E) | $E \leq 2.0$ | Poor |
| | $2.0 < E \leq 2.5$ | Medium |
| | $2.5 < E \leq 3.0$ | Good |
| | $E > 3.0$ | Excellent |

2 结果与分析

2.1 水质评价

研究区海水中的温度、盐度、pH值、溶解氧、化学需氧量、无机氮、活性磷酸盐、石油类和重金属调查结果见表4,各水质要素的空间分布见图2。由图2可知,研究区海水中的盐度、pH值和溶解氧由江口向外呈递增趋势,溶解氧在江口附近区域出现高值区。海水中化学需氧量、无机氮、活性磷酸盐和石油类含量由江口向外呈递减趋势,其中无机氮与活性磷酸盐在出江口处迅速下降。海水中重金属污染在冯家江口邻近海域较低,在东南面海区污染水平相对较高。由1,2,3,4,5,6,9,10号调查站位组成的断面能反映各水质要素由江口向外的变化趋势(图3),以5号站为界线,江口与邻近海域海水中各水质要素分布存在明显差异。

采用单因子标准指数法进行评价,结果见表4。研究区海水中pH值、化学需氧量、石油类、汞、镉、铅和铜均符合二类海水水质标准。溶解氧在冯家江口的1,2,3号站超出二类海水水质标准,其中2,3号站满足三类标准,1号站满足四类标准。无机氮和活性磷酸盐在1-4号站都超出二类海水水质标准,冯家

江口 4 个站中海水无机氮超出四类标准,活性磷酸盐在 1-3 号站超出四类标准,在 4 号站满足四类标准。锌在 17 号站超出二类海水水质标准,满足三类标准。综合来看,冯家江口水体中的溶解氧含量较低,无机氮和活性磷酸盐含量较高,冯家江口水体受地表水的影响较大,如果按照地表水的标准进行评价,则 1-4 号站均能满足地表水水质标准中的 IV 类标准。

采用重金属污染指数法进行评价,结果表明各站位海水重金属污染指数(0.07-0.32)较低,平均值为 0.15,研究区海水重金属污染水平低。

采用重金属污染指数法进行评价,结果表明各站位海水重金属污染指数(0.07-0.32)较低,平均值为 0.15,研究区海水重金属污染水平低。

表 4 研究区水环境质量调查及评价结果

Table 4 Investigation and evaluation results of water environment quality in the study area

| 项目 Items | 温度(°C) T(°C) | 盐度 S | pH 值 pH value | 溶解氧 (mg/L) DO (mg/L) | 化学 需氧量 (mg/L) COD (mg/L) | 无机氮 (μg/L) DIN (μg/L) | 活性 磷酸盐 (μg/L) PO ₄ -P (μg/L) | 石油类 (μg/L) O _w (μg/L) | 汞 (μg/L) Hg (μg/L) | 镉 (μg/L) Cd (μg/L) | 铅 (μg/L) Pb (μg/L) | 铜 (μg/L) Cu (μg/L) | 锌 (μg/L) Zn (μg/L) | 重金属污 染指数 C _f | |
|---|-----------------|---------|------------------|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|---|---|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------|
| Values | Minimum | 29.5 | 15.653 | 7.53 | 3.20 | 1.09 | 14.50 | 0.30 | 7.60 | 0.017 | 0.05 | 0.15 | 0.30 | 3.78 | 0.07 |
| | Maximum | 31.0 | 31.523 | 8.23 | 7.70 | 2.55 | 1 869.00 | 91.30 | 49.40 | 0.046 | 0.36 | 1.78 | 1.34 | 53.00 | 0.32 |
| | Average | 30.3 | 28.410 | 8.07 | 6.16 | 1.52 | 253.50 | 12.80 | 20.40 | 0.034 | 0.18 | 0.72 | 0.40 | 17.13 | 0.15 |
| Standard Indices (Class II standard) | Minimum | - | - | 0.35 | 0.13 | 0.36 | 0.05 | 0.01 | 0.15 | 0.090 | 0.01 | 0.03 | 0.03 | 0.08 | - |
| | Maximum | - | - | 0.82 | 1.56 | 0.85 | 6.23 | 3.04 | 0.99 | 0.230 | 0.07 | 0.36 | 0.13 | 1.06 | - |
| | Average | - | - | 0.71 | 0.65 | 0.51 | 0.84 | 0.43 | 0.41 | 0.170 | 0.04 | 0.14 | 0.04 | 0.34 | - |
| Excess rate (%) | - | - | 0 | 15 | 0 | 20 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | - |

Note: "-" represents a null value; calculations below the average of the detection limit are performed at half the detection limit

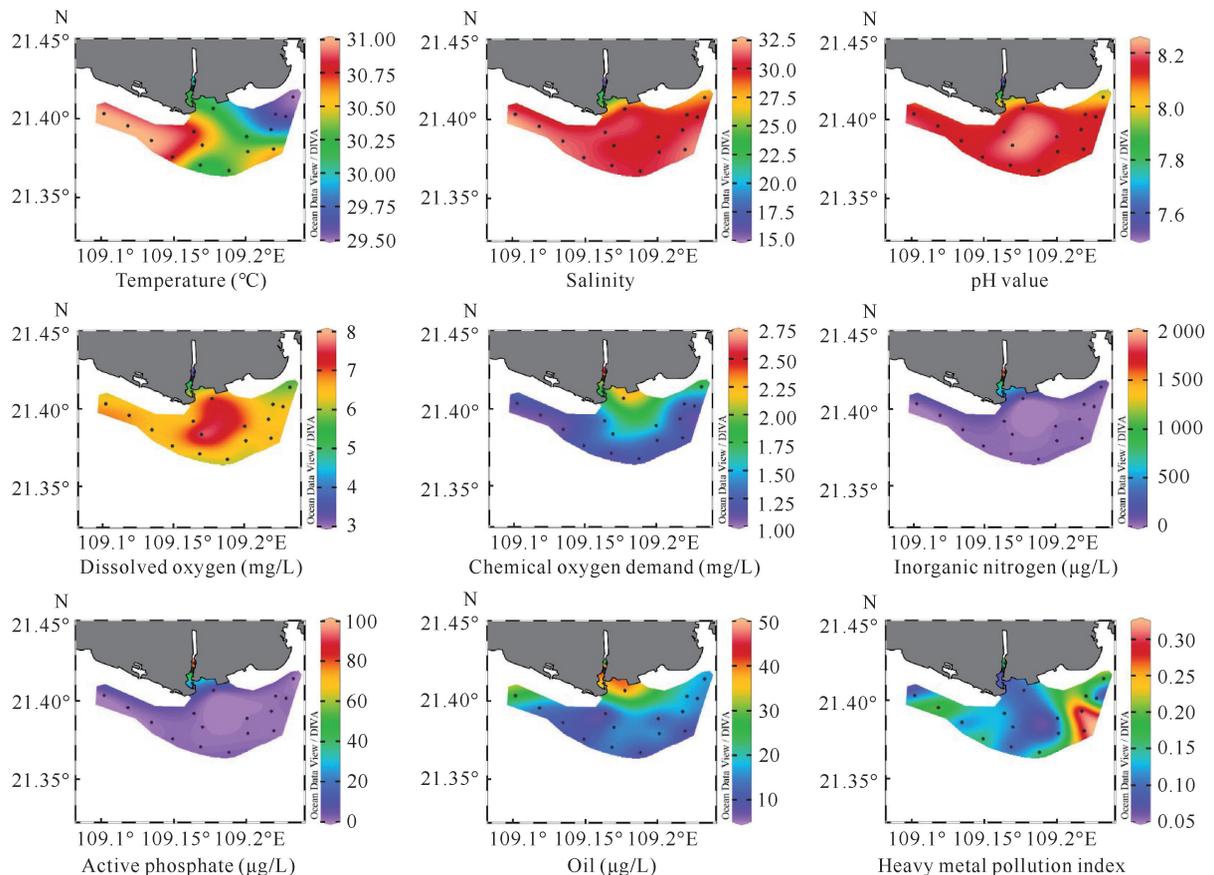


图 2 研究区海水水质要素空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of seawater quality elements in the study area

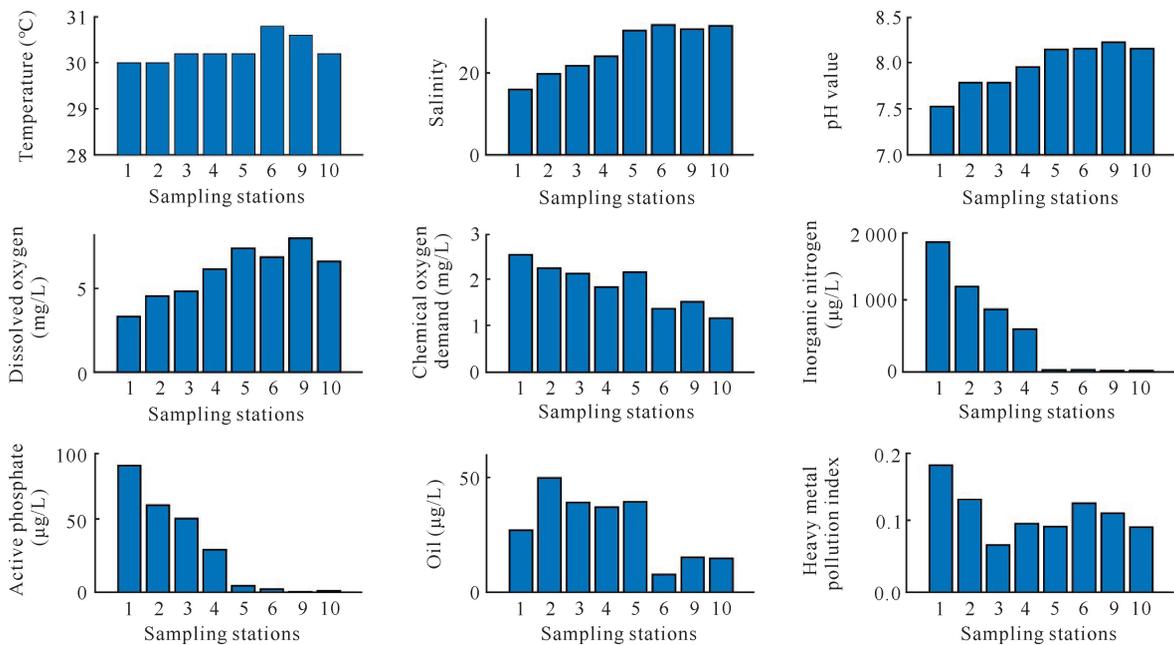


图3 研究区典型断面海水水质要素调查结果

Fig. 3 Investigation results of seawater quality elements of typical sections in the study area

2.2 沉积物环境质量评价

研究区沉积物中石油类、有机碳和重金属的含量不高,石油类和有机碳的平均含量分别为 121.3×10^{-6} 和 0.45% ,汞、镉、铅、铜和锌等重金属平均含量分别为 0.037×10^{-6} , 0.14×10^{-6} , 5.40×10^{-6} , 2.29×10^{-6} 和 17.8×10^{-6} 。单项标准指数法评价结果显示,沉积物中有机碳、石油类、铜、铅、锌、镉、汞等

表5 研究区沉积物调查及评价结果

Table 5 Investigation and evaluation results of sediment in the study area

| 项目 Items | | 汞 | 镉 | 铅 | 铜 | 锌 | 石油类 | 有机碳 | 重金属 生态风险 指数 RIs |
|--|-----------------|--|--|--|--|--|---|-------------------|-----------------------|
| | | ($\times 10^{-6}$) Hg ($\times 10^{-6}$) | ($\times 10^{-6}$) Cd ($\times 10^{-6}$) | ($\times 10^{-6}$) Pb ($\times 10^{-6}$) | ($\times 10^{-6}$) Cu ($\times 10^{-6}$) | ($\times 10^{-6}$) Zn ($\times 10^{-6}$) | ($\times 10^{-6}$) O_2 ($\times 10^{-6}$) | (%) SOC (%) | |
| Values | Minimum | 0.026 | 0.04 | 1.05 | 0.25 | 3.0 | 19.1 | 0.08 | - |
| | Maximum | 0.042 | 0.35 | 11.80 | 10.80 | 54.9 | 288.0 | 0.80 | - |
| | Average | 0.037 | 0.14 | 5.40 | 2.29 | 17.8 | 121.3 | 0.45 | - |
| Standard indices (Class I standard) | Minimum | 0.13 | 0.08 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.04 | - |
| | Maximum | 0.21 | 0.70 | 0.20 | 0.31 | 0.37 | 0.58 | 0.40 | - |
| | Average | 0.19 | 0.27 | 0.09 | 0.07 | 0.12 | 0.24 | 0.22 | - |
| | Excess rate (%) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - |
| Potential ecological hazard indices | Minimum | 10.20 | 3.84 | 0.18 | 0.09 | 0.04 | - | - | 14.34 |
| | Maximum | 16.47 | 33.60 | 2.03 | 3.75 | 0.68 | - | - | 56.53 |
| | Average | 14.51 | 13.15 | 0.93 | 0.80 | 0.22 | - | - | 29.61 |

Note: "-" represents a null value

2.3 生物生态评价

研究区生物调查统计结果见表6,浮游植物、浮游动物、底栖生物和潮间带生物的种类数、密度和生

评价指标均符合一类海洋沉积物标准(表5)。沉积物中的重金属潜在生态危害污染程度分析结果表明,铜、铅、锌、镉、汞等5种重金属的潜在生态危害指数均远小于40,生态潜在危害指数 $Hg > Cd > Pb > Cu > Zn$ 。海区各调查站点的重金属 RIs 值为14.34-56.53,平均值为29.61,研究区沉积物重金属潜在生态风险低。

物量在各调查站点的变化范围比较大。海区浮游植物密度较大,平均密度为 297.34×10^6 cells/ m^3 ;浮游动物平均密度为205 ind./ m^3 ,平均生物量为188.5

mg/m³;底栖生物平均密度为 513.6 ind./m²,平均生物量为 198.86 g/m²;潮间带生物平均密度为 860.4 ind./m²,平均生物量为 352.50 g/m²。海区浮游植物和浮游动物的多样性指数平均值分别为 2.31 和 2.28,指示海洋环境为轻度污染,海区底栖生物和潮间带生物的生物多样性指数平均值分别为 1.77 和 1.97,指示海洋环境为中度污染。

从各个调查站位的生物分布来看,冯家江口及其邻近海域存在一定的差异,具体见图 4。位于冯家江口 2 号和 3 号站的浮游植物种类数分别为 6 种和 9 种,密度分别为 48.32×10^6 cells/m³ 和 13.4×10^6 cells/m³,远低于研究区的平均值 18 种和 297.34×10^6 cells/m³。2 号和 3 号站的浮游动物种类数分别

为 1 种和 2 种,密度分别为 10 ind./m³ 和 20 ind./m³,也远低于研究区的平均值 9 种和 205 ind./m³。浮游动物的种类数、密度和生物量分布由江口向外呈递增趋势(图 4)。底栖生物分布与浮游植物和浮游动物不同,江口和邻近海域底栖生物的种类没有明显差异,而密度和生物量江口明显高于邻近海域。潮间带生物的种类数、密度和生物量分布与底栖生物相似,具有江口高于邻近海域的特征。冯家江口 2 号和 3 号站浮游动物的生物多样性指数较低,分别仅有 0 和 1,与邻近海域差异较大。浮游植物、底栖生物和潮间带生物的生物多样性指数在江口和邻近海域差别不大(表 6,图 4)。

表 6 研究区生物生态调查结果及生物多样性指数

Table 6 Ecological investigation results and the biodiversity index in the study area

| 生物类型 Biological type | | 种类数 Number of species | 密度 Density | 生物量 Biomass | 生物多样性指数 Biodiversity indices | 污染程度 Degree of pollution |
|-------------------------|----------------|--------------------------|--|---------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| Phytoplankton | Range | 6 - 36 | 13.04 - 736.82 ($\times 10^6$ cells/m ³) | - | 1.22 - 2.98 | |
| | Average values | 18 | 297.34 ($\times 10^6$ cells/m ³) | - | 2.31 | Slight pollution |
| Zooplankton | Range | 1 - 17 | 10 - 562 (ind./m ³) | 60.3 - 521.8 (mg/m ³) | 0 - 3.65 | |
| | Average values | 9 | 205 (ind./m ³) | 188.5 (mg/m ³) | 2.28 | Slight pollution |
| Benthos | Range | 2 - 12 | 20 - 2 420 (ind./m ²) | 2.50 - 605.79 (g/m ²) | 0.90 - 2.87 | |
| | Average values | 7 | 513.6 (ind./m ²) | 198.86 (g/m ²) | 1.77 | Moderate pollution |
| Intertidal creatures | Range | 4 - 16 | 84 - 1 640 (ind./m ²) | 33.04 - 774.32 (g/m ²) | 1.12 - 2.59 | |
| | Average values | 11 | 860.4 (ind./m ²) | 352.50 (g/m ²) | 1.97 | Moderate pollution |

Note: "-" represents a null value

2.4 生态环境综合评价

对研究区各调查站位的准则层指标进行赋值和综合评价,结果见表 7。由赋值结果可知,在水环境方面,冯家江口的 2 号和 3 号站位中的溶解氧、化学需氧量、无机氮和活性磷酸盐的赋值结果明显低于其他站位;在沉积物环境方面,2 号和 3 号站沉积物中重金属的潜在生态风险指数赋值低于其他站位;在生物生态方面,2 号和 3 号的浮游动物多样性指数赋值低于其他站位。其他指标赋值结果在江口和邻近海域没有明显差异。

研究区的水环境指数为 3.5,水环境良,其中溶解氧、化学需氧量、活性磷酸盐赋值结果为 4,无机氮、重金属污染指数和油类赋值结果为 3。研究区的沉积物环境指数为 3.7,沉积物环境优,其中重金属潜在生态风险指数和有机碳的赋值结果为 4,石油类的赋值结果为 3。研究区的生物生态指数为 2.5,生物生态环境中等,其中浮游植物和浮游动物的多样性指数赋值为 3,底栖生物和潮间带生物多样性指数赋值仅为 2,相对较低。研究区的生态环境综合评价指数为 3.2,海区生态环境质量为优。

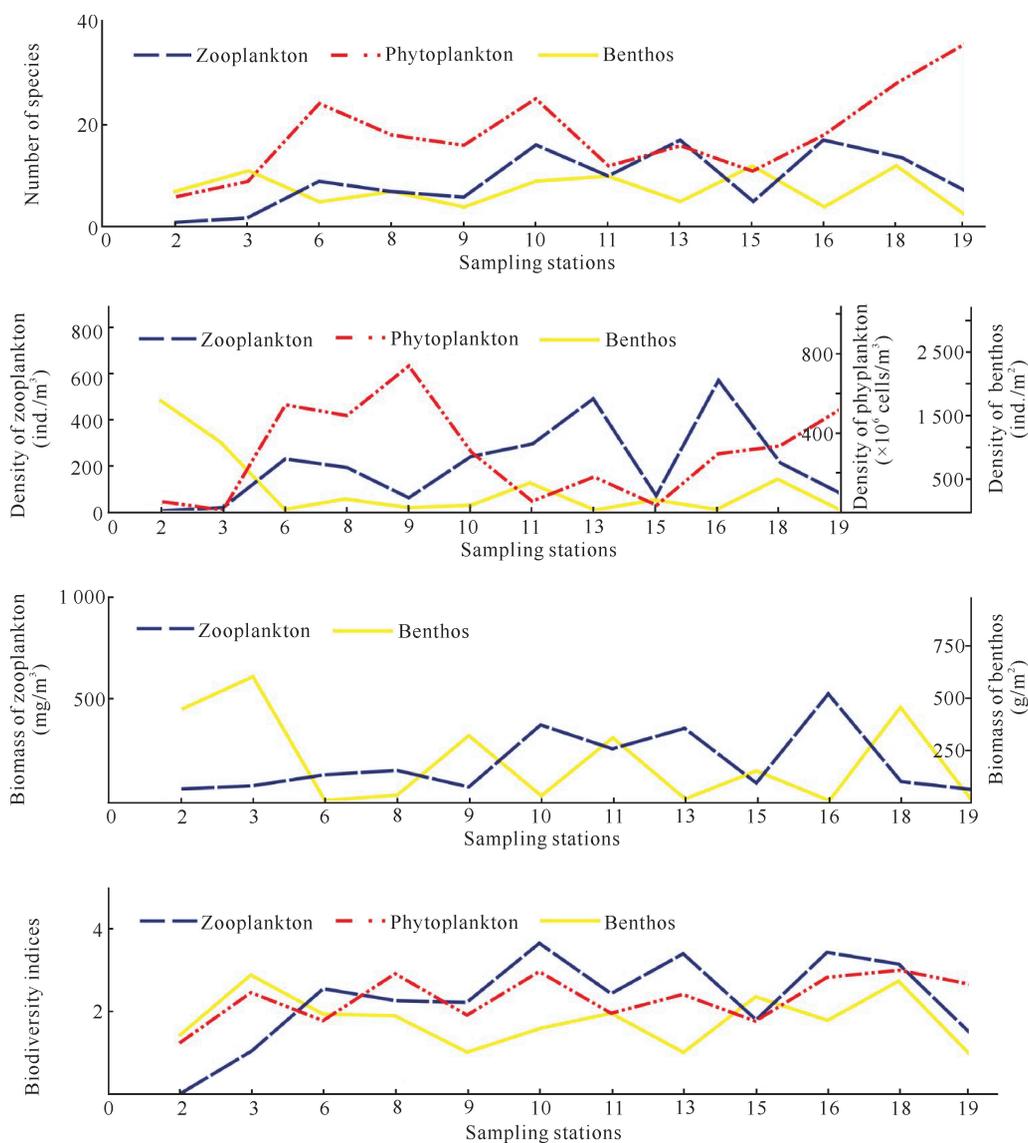


图4 研究区各站位生物种类数、密度、生物量和生物多样性指数

Fig. 4 Biological species number, density, biomass and biodiversity index of each station in the study area

表7 研究区各评价指标赋值及综合评价结果

Table 7 Evaluation index assignment and integrated evaluation results in the study area

| 站点 Stations | 水环境 Water environment | | | | | | | 沉积物环境 Sediment environment | | | | 生物生态环境 Biological ecology environment | | | | 综合评价指数 Integrated indices E | 评价结果 Result of evaluation | |
|----------------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|-------------------------------|----------------|----------------|-----|--|----------------|----------------|----------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------|
| | W ₁ | W ₂ | W ₃ | W ₄ | W ₅ | W ₆ | W | S ₁ | S ₂ | S ₃ | S | B ₁ | B ₂ | B ₃ | B ₄ | | | B |
| 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2.2 | 2 | 4 | 4 | 3.3 | 2 | 1 | 2 | - | 1.7 | 2.4 | Medium |
| 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 3 | 2.3 | 3 | 4 | 3 | 3.3 | 3 | 2 | 3 | - | 2.7 | 2.8 | Good |
| 6 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3.8 | 4 | 4 | 3 | 3.7 | 2 | 3 | 2 | - | 2.3 | 3.3 | Excellent |
| 8 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3.7 | 4 | 4 | 4 | 4.0 | 3 | 3 | 2 | - | 2.7 | 3.4 | Excellent |
| 9 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3.7 | 4 | 4 | 3 | 3.7 | 2 | 3 | 2 | - | 2.3 | 3.2 | Excellent |
| 10 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3.7 | 3 | 4 | 2 | 3.0 | 3 | 4 | 2 | - | 3.0 | 3.2 | Excellent |
| 11 | 4 | 4 | 4 | 4 | 2 | 3 | 3.5 | 4 | 4 | 4 | 4.0 | 2 | 3 | 2 | - | 2.3 | 3.3 | Excellent |
| 13 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3.7 | 4 | 4 | 4 | 4.0 | 3 | 4 | 2 | - | 3.0 | 3.6 | Excellent |

续表

Continued table

| 站位 Stations | 水环境 Water environment | | | | | | | 沉积物环境 Sediment environment | | | | 生物生态环境 Biological ecology environment | | | | | 综合评价指数 Integrated indices E | 评价结果 Result of evaluation |
|----------------|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|----------------------------------|----------------|----------------|-----|---|----------------|----------------|----------------|-----|--------------------------------------|---------------------------------|
| | W ₁ | W ₂ | W ₃ | W ₄ | W ₅ | W ₆ | W | S ₁ | S ₂ | S ₃ | S | B ₁ | B ₂ | B ₃ | B ₄ | B | | |
| 15 | 3 | 4 | 4 | 4 | 2 | 3 | 3.3 | 4 | 4 | 3 | 3.7 | 2 | 2 | 3 | - | 2.3 | 3.1 | Excellent |
| 16 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3.7 | 4 | 4 | 3 | 3.7 | 3 | 4 | 2 | - | 3.0 | 3.4 | Excellent |
| Total | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3.5 | 4 | 4 | 3 | 3.7 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2.5 | 3.2 | Excellent |

Note: "-" represents a null value

综合评价结果显示,位于冯家江口的2号和3号站的生态环境综合评价指数较低,分别仅有2.4和2.8,生态环境质量分别为中等和良好。邻近海域的生态环境综合指数均大于3,生态环境质量为优。各调查站位的水环境指数(Indices of MwENV)、沉积物环境指数(Indices of SdENV)、生物生态指数(Indices of BeCHA)和综合评价指数(Integrated indices)见图5。其中2号站和3号站的水环境指数都较低,2号站的生物生态指数较低,2号、3号和6号站的综合评价指数有明显的递增趋势,表明由冯家江口向外生态环境质量逐渐变好。

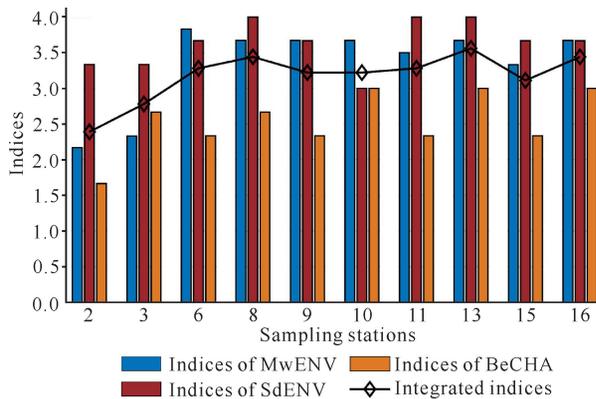


图5 调查站位评价指数直方图

Fig. 5 Histogram of evaluation index of sampling stations

3 讨论

3.1 水环境和沉积物环境影响因素分析

广西北海冯家江口及其邻近海域水环境总体评价为良好,冯家江口水环境污染相对严重,超标的水质要素主要有溶解氧、无机氮和活性磷酸盐。与2016年海区环境质量调查结果^[18]相比,2021年研究区海水中无机氮的超标率由30%降到20%,石油类超标率由60%降到0,化学需氧量超标率由25%降为0,研究海区经过治理后水环境质量得到改善。

冯家江属于潮汐河流,所在流域过去排污情况严

重。得益于2018年冯家江水环境治理工程,大量的排污口和养殖排水被整治清理,冯家江口海水中的石油类和化学需氧量含量明显降低。受城镇生活污染物、人畜粪便及农业生产中化肥施用等影响,冯家江流域地表径流的氮磷营养盐含量较高^[34],地表径流将较多的氮磷营养盐带入冯家江中,导致冯家江口的无机氮和活性磷酸盐超标。研究区1-4号站位于冯家江口,该区域受河流和潮汐的共同影响,由江口向外水体交换能力逐渐增强。地表径流带来的无机氮和活性磷酸盐被不断稀释,因此由江口向外呈现逐渐降低趋势(图3)。

冯家江口海水中溶解氧、无机氮和活性磷酸盐在部分站位超出四类海水水质标准,但这种超标现象影响范围较小,溶解氧、无机氮和活性磷酸盐含量在出江口位置迅速恢复到正常水平,邻近海域的各项水质要素均能满足二类海水水质标准,因此研究区整体水环境仍为良好。

沉积物是持久性有机污染物、石油类和重金属主要的汇,沉积物若受到污染将会对海区的浮游生物、底栖生物乃至红树林生态系统产生不利影响。本文的分析结果表明研究区的沉积物环境处于优良状态,调查结果显示沉积物中有机碳、石油类、铜、铅、锌、镉、汞含量均较低,这与前人的研究结果^[19]相同,冯家江口及其邻近海域沉积物仍保持清洁状态,重金属潜在生态风险低。

3.2 生物多样性影响因素分析

由于淡水和陆源物质的注入,河口及其邻近水域形成了独特的河口类型海洋生态系统。一般情况下河口区生物的种类组成较为复杂,多样性指数较高,不过冯家江口及其邻近海域的生物多样性指数并不高(表6)。调查结果显示研究区的浮游植物和浮游动物的生物多样性整体处于中等水平,而底栖生物和潮间带生物的生物多样性整体处于较低水平。

生物多样性与海洋环境中的水质、沉积物质量关

系密切,环境污染会对海区的生物多样性造成不利影响。环境对生物多样性的影响主要是对敏感种的影响,当环境受到污染,不耐污种会消失,耐污种大量繁殖,导致种类单一,个体数量较多,生物多样性下降^[35]。研究海区的大型底栖生物优势种为珠带拟蟹守螺(*Cerithidea cingulata*)和斜肋齿蜷(*Sermyla riqueti*),潮间带生物的优势种为斜肋齿蜷、珠带拟蟹守螺、奥莱彩螺(*Clithon oualaniensis*)和毛掌活额寄居蟹(*Diogenes penicillatus*),耐污种的优势明显,这与该海区2017年的调查结果^[20]相似。冯家江流域经过治理后,水环境和沉积物环境质量得到改善,但是大型底栖生物和潮间带生物种群结构仍以耐污种为主,生物多样性仍未得到恢复。这可能与底栖生物对环境的敏感性较低有关,因为对环境变化不敏感,底栖生物种群结构变化可能滞后。底栖生物多样性指数较低的情况在北部湾近岸海域较为常见,庞碧剑等^[36]研究发现北部湾近岸海域底栖生物多样性指数平均值仅为1.32,如果采用底栖生物的多样性指数进行污染评价,污染程度评价结果会比用浮游植物多样性指数作出的评价结果污染程度更严重,因此认为底栖生物多样性指数不适于用来评价像北部湾这样较为清洁的海域。

海区浮游植物和浮游动物的生物多样性整体处于中等水平,与邻近海域相比,冯家江口浮游植物和浮游动物都具有种类少、密度低的特征(图4)。浮游动物在江口内外的分布差异特征更加明显,江口浮游动物生物多样性指数也明显低于邻近海域。研究区浮游植物和浮游动物没有明显的优势种,冯家江口也未出现耐污种(指示环境受到污染)。冯家江口海水中的盐度、pH值、营养盐、溶解氧等要素变化较大(图3)。浮游动物对这种环境变化反应较为敏感,表现为种类数、密度和生物多样性指数由河口向外呈递增的趋势,这种分布特征与北部湾浮游动物的空间分布规律一致^[37]。

3.3 综合评价结果与主要影响因素分析

广西北海冯家江口及其邻近海域生态环境综合评价结果整体为优,其中冯家江口海洋生态环境质量相对较差,由江口向外生态环境质量呈逐渐变好趋势。冯家江口海水溶解氧含量较低,无机氮和活性磷酸盐含量高,浮游动物生物多样性较低,导致江口海洋生态环境综合评价结果只达到中等或良好水平。

为了研究影响海区综合生态环境质量的主要因素,本文对海水温度、pH值、盐度、溶解氧、化学需氧量、无机氮、活性磷酸盐、重金属污染指数、石油类,沉积物中的重金属风险指数、有机碳、石油类,生物生态中的浮游植物生物多样性指数、浮游动物生物多样性指数、底栖生物生物多样性指数之间的相关性进行分析,结果见表8。

相关性分析结果显示各评价指标之间具有较强的相关性。由表8可知海水中化学需氧量、无机氮和活性磷酸盐三者相互之间具有显著的正相关性,化学需氧量、无机氮和活性磷酸盐分别与pH值、盐度和溶解氧具有显著的负相关性。无机氮和活性磷酸盐由地表径流带入海区,化学需氧量能反映水体中还原性物质的污染程度,三者具有显著正相关性,说明地表径流也将部分还原性物质带到海区。无机氮和活性磷酸盐由河口向邻近海域逐渐扩散,浓度逐渐降低,而在河口位置海水由于地表水的注入,pH值和盐度由邻近海域向河口也呈现逐渐降低趋势,因此海水中的无机氮、活性磷酸盐分别与pH值、盐度具有显著的负相关性。海水中还原性物质含量越高,则需要消耗越多的溶解氧,使得水体中溶解氧降低,因此海水中化学需氧量与溶解氧具有一定的负相关性。

相关性分析结果显示浮游动物的生物多样性指数与海水中的化学需氧量、无机氮、活性磷酸盐和石油类具有显著负相关性,与海水的盐度和pH值具有显著正相关性,与溶解氧和浮游植物多样性指数具有正相关性,这表明浮游动物的多样性可能受多种因素影响。营养盐可能是影响浮游动物生物多样性的因素之一,入海河流通常会携带大量的营养盐入海,使得河口区富营养化程度较高,对近岸海域生态系统产生一定影响^[38]。冯家江口海水营养盐含量较高,改变了河口水生生物的生境,一定程度导致浮游动物种类、密度和生物多样性指数降低^[39,40]。河口浮游动物群落结构会受到温度、盐度、食物和动物摄食等因素的影响,盐度是决定浮游动物分布的关键性因素之一^[41]。本文中冯家江口浮游动物生物多样性指数较低,江口海水中的盐度、pH值、溶解氧等水环境因子也可能是浮游动物生物多样性降低的影响因素。与浮游动物不同,浮游植物和底栖生物多样性指数与各评价指标均不存在相关性,这也说明了浮游植物和底栖生物对河流引起的生境变化反应不敏感。

表 8 评价指标的相关性分析

Table 8 Correlation analysis of evaluation indicators

| | 温度 T | pH 值 pH value | 盐度 S | 溶解氧 DO | 化学需 氧量 COD | 无机氮 DIN | 活性磷 酸盐 PO ₄ -P | 重金属 污染指数 C _f | 石油类 O _w | 重金属风 险指数 RIs | 有机碳 SOC | 石油类 O _s | 浮游植 物生物 多样性 指数 H' ₁ | 浮游动 物生物 多样性 指数 H' ₂ | 底栖生 物生物 多样性 指数 H' ₃ |
|--------------------|---------|------------------|---------|-----------|------------------|------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------|--------------------|------------|-----------------------|--|--|--|
| T | 1 | 0.25 | 0.15 | 0.35 | -0.04 | -0.05 | -0.02 | -0.50 | -0.19 | -0.01 | 0.17 | 0.14 | -0.02 | 0.08 | -0.34 |
| pH value | | 1 | 0.96** | 0.96** | -0.88** | -0.93** | -0.92** | 0.04 | -0.92** | -0.74* | -0.53 | 0.23 | 0.41 | 0.82** | -0.48 |
| S | | | 1 | 0.88** | -0.94** | -0.98** | -0.98** | 0.11 | -0.98** | -0.83** | -0.57 | 0.23 | 0.44 | 0.89** | -0.33 |
| DO | | | | 1 | -0.73* | -0.87** | -0.86** | 0.00 | -0.87** | -0.70* | -0.51 | 0.25 | 0.33 | 0.68* | -0.46 |
| COD | | | | | 1 | 0.91** | 0.89** | -0.09 | 0.86** | 0.73* | 0.54 | -0.20 | -0.49 | -0.96** | 0.36 |
| DIN | | | | | | 1 | 1.00** | -0.18 | 0.98** | 0.86** | 0.62 | -0.21 | -0.44 | -0.86** | 0.24 |
| PO ₄ -P | | | | | | | 1 | -0.25 | 0.97** | 0.85** | 0.62 | -0.21 | -0.39 | -0.83** | 0.28 |
| C _f | | | | | | | | 1 | -0.13 | -0.17 | -0.24 | -0.15 | -0.60 | -0.15 | 0.04 |
| O _w | | | | | | | | | 1 | 0.86** | 0.52 | -0.24 | -0.41 | -0.82** | 0.19 |
| RIs | | | | | | | | | | 1 | 0.81** | 0.22 | -0.36 | -0.69 | 0.03 |
| OC | | | | | | | | | | | 1 | 0.54 | -0.18 | -0.49 | 0.26 |
| O _s | | | | | | | | | | | | 1 | 0.21 | 0.25 | 0.01 |
| H' ₁ | | | | | | | | | | | | | 1 | 0.67* | 0.10 |
| H' ₂ | | | | | | | | | | | | | | 1 | -0.31 |
| H' ₃ | | | | | | | | | | | | | | | 1 |

Note: ** indicates significant correlation at $P < 0.01$ level, * indicates correlation at $P < 0.05$ level, $n = 10$

相关性分析结果还显示海水中的石油类、沉积物重金属生态风险指数与海水中的化学需氧量、无机氮和活性磷酸盐具有正相关性,与海水中的 pH 值、盐度和溶解氧具有负相关性。这说明研究区海水中的石油类和沉积物中的重金属也可能受地表径流的影响。

综合来看,冯家江口及其邻近海域生态环境质量整体为优,但在河口位置海水仍存在水体富营养化和缺氧的风险,河口水生生物多样性也处于中低水平。冯家江口生态保护需要重视河口营养盐的输入控制和海洋生物多样性的恢复。

4 结论

(1)广西北海冯家江口及其邻近海域整体水环境良好。冯家江口海水中溶解氧含量较低,无机氮和活性磷酸盐含量较高,个别站位超出四类海水水质标准,邻近海域海水水质均能满足二类海水水质标准。沉积物环境为优,沉积物中有机碳、石油类和重金属指标都符合一类海洋沉积物标准,其中重金属含量低,潜在生态风险较低。

(2)海区浮游植物和浮游动物多样性处于中等水平,底栖生物和潮间带生物的生物多样性处于较低水平。与其他类型生物相比,浮游动物对水环境变化反应较为敏感,冯家江口的浮游动物生物多样性较差。

(3)综合评价结果表明,海区生态环境质量整体为优,其中冯家江口的生态环境质量相对较差,由江口向外呈逐渐向好趋势。

(4)冯家江口水体中溶解氧含量较低,无机氮、活性磷酸盐含量较高,浮游动物多样性较差,导致江口海洋生态环境综合评价结果相对较差,只达到中等或良好水平。

参考文献

- [1] 高宇,黄晓荣,张婷婷,等. 中国滨海河口海湾湿地生态系统研究进展——以长江口为例[J]. 湿地科学与管理, 2016,12(4):59-63.
- [2] GLIBERT P M, CAI W J, HALL E R, et al. Stressing over the complexities of multiple stressors in marine and estuarine systems [J]. Ocean-Land-Atmosphere Research, 2022, 2022: 1-27.
- [3] 王艳,王彪,卢士强,等. 长江口生态环境问题及保护修复策略研究[J]. 环境保护, 2022, 50(11): 44-47.
- [4] 刘鹏霞,邵晓静,时俊,等. 长江口-杭州湾区域生态环境问题与综合治理途径——以上海市为例[J]. 环境保护, 2022, 50(19): 45-51.
- [5] 张凌,江志坚,黄小平. 粤港澳大湾区大气、水环境及滨海湿地的保护研究[J]. 环境科学与管理, 2022, 47(11): 160-165.
- [6] 沈满洪,毛狄. 海洋生态系统服务价值评估研究综述[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 2255-2265.
- [7] 吴彬,李岳霖,赵青瑛,等. 广西北部湾滨海湿地生态系

- 统服务价值评价及其影响因素研究[J]. 生态经济, 2020, 36(9): 151-157.
- [8] 王广军, 许靖诗, 杨淞, 等. 北海市冯家江水质监测与评价[J]. 山东林业科技, 2019, 49(2): 48-50.
- [9] DAY J W, CRUMP B C, KEMP W M, et al. Estuarine ecology [M]. New York: A John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [10] HALPERN B S, LONGO C, HARDY D, et al. An index to assess the health and benefits of the global ocean [J]. Nature, 2012, 488(7413): 615-620.
- [11] USEPA. National coastal condition report (EPA-620/R-01/005) [R]. Washington D. C: U. S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development/Office of Water, 2001: 1-204.
- [12] European Community. Directive 2000/ 60/ EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000: Establishing a framework for community action in the field of waters policy [R]. Berlin: Secretary of European Community, 2000.
- [13] 王保栋, 韩彬. 近岸生态环境质量综合评价方法及其应用[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(3): 400-404.
- [14] 李延峰, 宋秀贤, 李虎, 等. 山东半岛蓝色经济区海域生态环境综合评价[J]. 环境科学研究, 2014, 27(5): 560-566.
- [15] 王印红, 魏兰. 基于功效系数法的海洋生态环境评价研究——以胶州湾海洋生态环境为例[J]. 中国海洋大学学报(社会科学版), 2020(6): 16-25.
- [16] 赖俊翔, 许铭本, 张荣灿, 等. 广西钦州湾海域生态健康评价与分析[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(3): 102-108.
- [17] 赖俊翔, 许铭本, 姜发军, 等. 北仑河口近岸海域生态健康分析与评价[J]. 广西科学, 2014, 21(1): 77-83.
- [18] 戎思敏. 冯家江入海口邻近海域水质情况对比分析和评价[J]. 科学技术创新, 2020(31): 1-3.
- [19] 夏鹏, 孟宪伟, 印萍, 等. 广西北海潮间带沉积物中重金属的污染状况及其潜在生态危害[J]. 海洋科学进展, 2008(4): 471-477.
- [20] 刘士龙, 秦旭东, 王广军, 等. 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, 2019, 17(3): 352-358.
- [21] 赵志江, 崔丽娟, 朱利, 等. 指标体系法在我国湿地生态系统健康评价研究中的应用进展[J]. 湿地科学与管理, 2018, 14(4): 9-13.
- [22] 范海梅, 蒋晓山, 纪焕红, 等. 长江口及其邻近海域生态环境综合评价[J]. 生态学报, 2019, 39(13): 4660-4675.
- [23] 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.
- [24] 环境保护部. 环境影响评价技术导则 地表水环境: HJ 2.3 - 2018 [S]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
- [25] 国家环境保护局, 国家海洋局. 海水水质标准: GB 3097 - 1997 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [26] SCHLITZER R. Ocean data view [Z]. odv. awi. de, 2020.
- [27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 海洋沉积物质量: GB 18668 - 2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [28] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [29] 廉雪琼, 王运芳, 陈群英. 广西近岸海域海水和沉积物及生物体中的重金属[J]. 海洋环境科学, 2001(2): 59-62.
- [30] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志 第十二分册 广西海湾[M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 24-95.
- [31] SHANNON C E, WEAVER W. The mathematical theory of communication [M]. Urbana: University of Illinois Press, 1949.
- [32] 李永祺, 丁美丽. 海洋污染生物学[M]. 北京: 海洋出版社, 1991.
- [33] 卓燕星. 北部湾沉积物生源物质和重金属的地球化学和指示的环境变化研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2019.
- [34] 陈雯, 余绍文, 张宏鑫, 等. 冯家江流域水体中氮的空间分布特征[J]. 中国地质调查, 2021, 8(1): 51-59.
- [35] 卜少伟, 姜伟, 梅鹏蔚, 等. 基于底栖动物指数法的湖泊生态系统健康评价研究进展[J]. 环境保护与循环经济, 2016, 36(10): 49-52.
- [36] 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.
- [37] 庞碧剑, 蓝文陆, 黎明民, 等. 北部湾近岸海域浮游动物群落结构特征及季节变化[J]. 生态学报, 2019, 39(19): 7014-7024.
- [38] 劳齐斌, 刘国强, 申友利, 等. 北部湾入海河流营养盐的分布特征及入海通量研究[J]. 海洋学报, 2020, 42(12): 93-100.
- [39] LAPRISE R, DODSON J J. Environmental variability as a factor controlling spatial patterns in distribution and species diversity of zooplankton in the St. Lawrence Estuary [J]. Marine Ecology Progress Series, 1994, 107: 67-81.
- [40] 杨志, 叶金清, 杨青, 等. 辽河口海域浮游动物多样性及对河口环境的指示[J]. 海洋环境科学, 2020, 39(1): 25-30.
- [41] 杨宇峰, 王庆, 陈菊芳, 等. 河口浮游动物生态学研究进展[J]. 生态学报, 2006(2): 576-585.

Integrated Assessment of Ecological Environment of Fengjiajiang River Estuary and Its Adjacent Area in Beihai, Guangxi

OUYANG Xianqing¹, GUAN Yao^{2**}, LI Xiaowei¹, PEI Mufeng¹

(1. Beihai Marine Environment Monitoring Center Station, State Oceanic Administration of China, Beihai, Guangxi, 536000, China;

2. Key Laboratory of Tropical Marine Ecosystem and Bioresource, Ministry of Natural Resources, Fourth Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Beihai, Guangxi, 536000, China)

Abstract: Estuarine ecosystems are open, susceptible and fragile, and it is important to protect the estuarine ecosystems. There are mangrove wetlands and beach landscapes in Fengjiajiang River Estuary and its adjacent area, which have high ecological service value and are easily affected by human activities. In order to evaluate the status of the marine ecological environment and identify the main influencing factors in the Fengjiajiang River Estuary and its adjacent area, this paper analyzes the results of the marine environmental quality survey in the study area in September 2021, constructs a three-level evaluation standard system, and adopts the index system method to integrated evaluate the marine ecological environment of the study area. The results show that the marine ecological environment of the study area was excellent. The marine ecological environment of the adjacent area was excellent. But affected by the content of dissolved oxygen, inorganic nitrogen and active phosphate in seawater and the diversity of zooplankton, the marine ecological environment of Fengjiajiang River Estuary only reached moderate or good level. To protect the ecological environment of the Fengjiajiang River Estuary, attention should be paid to controlling the input of nutrients in the estuary and restoring marine biodiversity.

Key words: estuarine ecosystem; Fengjiajiang River of Beihai; marine ecological environment; index system method; integrated valuation

责任编辑:陆媛峰



微信公众号投稿更便捷

联系电话:0771-2503923

邮箱:gxkx@gxas.cn

投稿系统网址:<http://gxkx.ijournal.cn/gxkx/ch>