

DOI: 10.3724/j.1007-6336.2025-0070

海南岛南部重点海湾表层沉积物重金属空间分布及来源分析

刘佳楠, 龙军桥, 黄 诚, 陈松平, 辛 卓, 邢景峰,
郭泽俊, 沈 洁, 颜 历, 胡 旋

(中国地质局海口海洋地质调查中心, 海南 海口 571127)

摘 要: 本文基于海南岛南部重点海湾表层沉积物中重金属的数据, 分析了重金属在不同海湾的污染特征及潜在来源。结果显示, Cr、Cu、Zn、Pb、As、Cd 和 Hg 的平均浓度分别为 42.55 mg/kg、8.83 mg/kg、53.38 mg/kg、22.34 mg/kg、3.80 mg/kg、0.043 mg/kg 和 0.009 mg/kg, 均低于一类海洋沉积物质量标准。污染评价显示, 研究区域为无污染-低污染状态, 总体污染程度指数 (P_{sum}) 介于 0.31 至 2.44 之间; 综合潜在生态危害指数 (E_{RI}) 为 2.14 至 17.01; 地累积指数 (I_{geo}) 结果显示 2 个站位为偏中度污染, 其余均为无污染-低污染程度。推测 Cr、Cu、Zn、Pb、Hg 以自然来源为主, 但仍受人类活动影响; Cd 除了自然来源外, 主要来源于船舶的防腐材料和海上游乐设施; As 主要来源于人工海水养殖和农业活动中的化肥等。

关键词: 海南岛海湾; 表层沉积物; 重金属; 来源分析

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2026)03-0391-11

Spatial distribution and source analysis of heavy metals in surface sediments of key bays in the southern Hainan Island

Liu Jianan, Long Junqiao, Huang Cheng, Chen Songping, Xin Zhuo,
Xing Jingfeng, Guo Zejun, Shen Jie, Yan Li, Hu Xuan

(Haikou Marine Geological Survey Center, China Geological Survey, Haikou 571127, China)

Abstract: Based on the results of heavy metal elements in surface sediments of key bays in the southern Hainan Island, this study explores the pollution characteristics and potential sources in different bays. The results showed that the average concentrations of Cr, Cu, Zn, Pb, As, Cd and Hg were 42.55 mg/kg, 8.83 mg/kg, 53.38 mg/kg, 22.34 mg/kg, 3.80 mg/kg, 0.043 mg/kg and 0.009 mg/kg, respectively, all below the standards for Class I marine sediments. The pollution assessment indicates that the study area is in a state of non-polluted to low-polluted. The overall pollution index (P_{sum}) ranges from 0.31 to 2.44, the comprehensive potential ecological hazard index (E_{RI}) is between 2.14 and 17.01. The geoaccumulation index (I_{geo}) shows that two stations are moderately polluted, and the rest are at non-polluted to low-pollution levels. It is speculated that Cr, Cu, Zn, Pb and Hg mainly come from natural sources, but they are still affected by human activities. In addition to natural sources, Cd mainly comes from anti-corrosion materials of ships and offshore amusement facilities. The As mainly comes from artificial seawater aquaculture and chemical fertilizers in agricultural

收稿日期: 2025-04-11, 修订日期: 2025-06-26

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20242841, DD20220992)

作者简介: 刘佳楠 (1998—), 女, 陕西榆林人, 助理工程师, 主要从事海洋地质调查工作, E-mail: liujnan@126.com

通信作者: 陈松平 (1981—), 男, 湖南株洲人, 高级工程师, 主要从事海洋地质调查工作, E-mail: 75649186@qq.com

activities.

Key words: Hainan Island bays; surface sediments; heavy metals; pollution assessment

目前,国内外学者就重金属在不同环境中的富集特征、污染评价及来源开展了大量研究,探讨了重金属对微生物、动植物和人类健康的影响^[1-3]。重金属作为典型的累积性污染物,具有毒性危害大、难降解、易蓄积等特点,是海洋环境污染的主要问题之一^[4]。近年来,随着近海区域经济的快速发展,农业、工业、旅游业等人类活动产生的大量重金属污染物随生活污水、船舶废水、工业废水等进入海洋,重金属等有毒有害物质不仅会污染水体,而且会通过参与食物链循环的方式在生物体内积累,破坏其生理代谢活动,进而影响海域生态环境,最终经过食物链的传递和放大危害人体健康^[5-7]。

近岸海湾作为海陆交互作用的关键区域,是陆源重金属元素排放入海的重要归宿之一^[8]。重金属通过吸附、絮凝、沉降等物化作用以颗粒物的形式转移至沉积物中赋存,在特定的水文和沉积环境条件下,沉积物中的重金属又会解吸并重新释放至上覆水中,造成水体“二次污染”^[5,8]。同时,表层沉积物中的重金属具有监测敏感度高、稳定性好、易采集等特点,比海水和生物体更能反映区域海洋环境质量状况和趋势,是海洋生态环境研究的重要内容^[4]。围绕海南岛海域,已有学者就海口湾^[8]、三亚湾^[5]、海南港口海域^[9]的表层沉积物重金属展开研究。前人通过地累积指数法、潜在生态危害指数法、综合污染指数法、内梅罗综合污染指数法等对重金属元素污染程度进行评价,结果表明,海南岛海域整体重金属污染程度较低^[5,8-10];通过 Pearson 相关性分析、主成分分析法(PCA)、聚类分析、富集因子(EF)、正定矩阵因子分解法(PMF)^[5,8-11]等方法进行了重金属源解析,结果表明,海南岛海域重金属污染主要来源于河流输入的陆源剥蚀、沿岸的海水养殖、城镇工业生产、居民生活污水、农业施药、船舶燃油燃烧和船舶尾气排放等。但前人多以海南岛北部海域^[8]、东部海域^[9]及整个南海^[12]为研究对象,对海南岛南部近岸海湾表层沉积物中重金属的调查研究不够深入。

本文对海南岛南部重点海湾表层沉积物中重金属元素开展研究。通过地累积指数(I_{geo})和潜在生态危害指数(P_{sum} 和 E_{RI})进行研究区域重金属污染评价,判别重金属污染程度。同时,集成历史文献资料和研究海域使用规划现状^[13],通过 Pearson 相关性分析、富集因子和主成分分析法探讨区域内重金属污染来源,为海南岛周边的海域环境管理、生态保护修复与决策、海洋生态环境保护提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集

研究区域位于海南岛南部近海海域(108°55'55"E—109°47'35"E、18°10'30"N—18°20'24"N)。2022年6月24日至7月8日采集表层沉积物样品86个(表1)。本次采样严格遵循《海洋监测规范 第2部分:数据处理与分析质量控制》(GB 17378.2—2007)^[14]和《海洋调查规范 第8部分:海洋地质地球物理调查》(GB/T 12763.8—2007)^[15],采用1 km×1 km网格为基准布设,覆盖水深2~45 m的区域,且采样站位覆盖了目标海岛及周边区域,同时对可能的来源点加密采样,确保了采样分布的代表性和覆盖性。样品采集、储存遵循《海洋监测规范 第3部分:样品采集、储存与运输》(GB 17378.3—2007)^[16],使用抓斗采集0~5 cm表层沉积物,每个样品取样重量不少于1 kg,并将采集好的沉积物样品放入聚乙烯密封袋中,冷藏(4℃)密封保存。将样品带回实验室后进行自然风干,用2 mm的尼龙筛网过筛,去除样品杂质后,保存在干燥通风环境中备用。于2022年11月14日至2023年7月17日在中国地质调查局海口海洋地质调查中心分析测试实验室进行检测。

1.2 样品测试

1.2.1 粒度分析

粒度分析主要参照《海洋调查规范 第8部分:海洋地质地球物理调查》(GB/T 12763.8—2007)^[15]中的筛析法和激光法。将样品烘干后

表 1 表层样品采样站位
Tab.1 Sampling stations for surface sediments

站位	东经(E)	北纬(W)	站位	东经(E)	北纬(W)	站位	东经(E)	北纬(W)
YZB01	18.338 536°	108.936 552°	HtB08	18.235 467°	109.243 566°	SYB22	18.229 83°	109.421 683°
YZB02	18.324 701°	108.937 206°	HtB09	18.276 088°	109.257 251°	SYB23	18.216 039°	109.421 742°
YZB03	18.311 406°	108.937 251°	HtB10	18.262 288°	109.257°	SYB24	18.202 811°	109.422 077°
YZB04	18.338 825°	108.950 764°	HtB11	18.248 892°	109.257 6°	SYB03B	18.229 005°	109.343 882°
YZB05	18.324 728°	108.943 912°	HtB12	18.235 292°	109.257 714°	SYB04B	18.215 706°	109.386 439°
YZB07	18.311 343°	108.951 317°	HtB13	18.276 454°	109.271 414°	SYB05B	18.230 015°	109.400 431°
YZB08	18.338 805°	108.965 183°	HtB14	18.262 512°	109.271 746°	YLB01	18.210 026°	109.624 112°
YZB09	18.324 903°	108.965 297°	HtB15	18.235 731°	109.271 68°	YLB02	18.196 679°	109.624 564°
YZB10	18.311 425°	108.965 639°	SYB01	18.215 552°	109.343 716°	YLB03	18.182 967°	109.624 456°
YZB11	18.339 052°	108.978 933°	SYB02	18.256 747°	109.350 834°	YLB04	18.210 394°	109.632 071°
YZB12	18.325 295°	108.979 627°	SYB03	18.250 755°	109.348 335°	YLB05	18.196 681°	109.631 867°
YZB13	18.311 768°	108.979 663°	SYB04	18.227 059°	109.349 631°	YLB06	18.183 334°	109.631 685°
YZB14	18.338 868°	108.985 898°	SYB05	18.215 82°	109.351 098°	YLB07	18.223 903°	109.638 498°
YZB15	18.338 944°	108.993 652°	SYB06	18.256 605°	109.364 621°	YLB08	18.223 747°	109.645 83°
YZB16	18.325 696°	108.994 558°	SYB07	18.215 773°	109.365 066°	YLB09	18.210 338°	109.645 983°
YZB17	18.311 623°	108.993 789°	SYB08	8.256 569°	109.378 856°	YLB10	18.196 958°	109.645 979°
YZB18	18.339 31°	109.000 715°	SYB09	18.243 043°	109.379 181°	YLB11	18.223 817°	109.652 821°
YZB19	18.325 464°	109.000 833°	SYB10	18.215 824°	109.379 742°	YLB12	18.196 795°	109.652 806°
YZB20	18.312 006°	109.000 729°	SYB11	18.202 191°	109.379 612°	HTB01	18.326 099°	109.741 241°
YZB01B	18.311 37°	108.944 154°	SYB12	18.256 663°	109.393 247°	HTB02	18.312 845°	109.741 273°
YZB02B	18.338 919°	108.972 119°	SYB13	18.243 229°	109.393 738°	HTB03	18.299 13°	109.741 515°
YZB03B	18.311 671°	108.972 484°	SYB14	18.229 698°	109.393 332°	HTB04	18.312 581°	109.748 675°
HtB01	18.275 82°	109.228 894°	SYB15	18.215 951°	109.393 584°	HTB05	18.326 41°	109.755 817°
HtB02	18.262 013°	109.229 015°	SYB16	18.202 256°	109.393 625°	HTB06	18.299 165°	109.755 837°
HtB03	18.248 877°	109.229 222°	SYB17	18.256 976°	109.407 131°	HTB07	18.326 482°	109.769 584°
HtB04	18.234 684°	109.229 185°	SYB18	18.243 355°	109.407 514°	HTB09	18.299 444°	109.770 185°
HtB05	18.275 887°	109.243 093°	SYB19	18.229 716°	109.407 489°	HTB10	18.326 616°	109.783 869°
HtB06	18.262 427°	109.243 356°	SYB20	18.213 795°	109.406 121°	HTB12	18.299 444°	109.783 929°
HtB07	18.248 849°	109.243 314°	SYB21	18.202 755°	109.407 772°			

注: YZB-崖州湾; HtB-红塘湾; SYB-三亚湾; YLB-亚龙湾; HTB-海棠湾

移入烘箱,于 105 ℃ 恒温 3 h,再置于干燥器中 15 ~ 20 min,取出后在感量 0.0001 g 的天平上称重。向样品中加入蒸馏水、Na₆(PO₃)₆ 浸泡分散。粒径>0.063 mm 的样品用筛析法;粒径<0.063 mm 的样品使用激光粒度仪(PSA 1190 LD)进行粒度分析,粒度划分标准采用尤登-温德华氏等比制 Φ 值粒级标准。

1.2.2 重金属元素测试

样品中 Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 元素参照《海底

沉积物化学分析方法》(GB/T 20260—2006)^[17] 中的方法 10 “微量、痕量成分分析 电感耦合等离子体质谱法”进行测定。样品经硝酸、氢氟酸和高氯酸密闭分解,在坩埚中蒸发除去氢氟酸,用盐酸加热溶解盐类,并转化为硝酸介质。样品分解后冷却至室温,在 50 mL 容量瓶中定容后与标准系列一同在电感耦合等离子体质谱仪(iCAPQ)中测定元素含量,测定范围为 0.02 ~ 10000 μg/g。

样品中 As 和 Hg 分别参照《海底沉积物化学分析方法》(GB/T 20260—2006)^[17] 中的方法 11: 砷量、铋量、铈量的测定 氢化物-原子荧光光谱法和 方法 12: 汞量的测定 冷蒸汽-原子荧光光谱法进行测定。As 测定需将样品经王水沸水浴分解, 加入硫脲-碘化钾溶液使砷还原为三价, 在酸性介质中用硼氢化钾使砷转化为氢化物, 放置至澄清, 取澄清液待测; Hg 测定需将样品经王水沸水浴分解, 加入高锰酸钾溶液, 使硒和碲氧化成六价以消除干扰, 加入草酸稀释摇匀, 放置至澄清, 取澄清液待测。As 和 Hg 含量使用双通

道原子荧光光度计(AFS-8530)测定, 测定范围分别为 0.2 ~ 20 μg/g 和 10 ng/g ~ 10 μg/g。

随同试样设置 4 个空白试验, 空白值小于检出限。随机抽取 20 件样品通过密码编号做双份平行样测试。结果显示, Cu、Cd、Hg 元素分别有 2 个、16 个、6 个样品低于检出限, RD 变化较大(表 2)。同时, 利用国家海洋沉积物一级标准物质 GBW07314(近海)、GBW07333(黄海)、GBW07335(海洋)、GBW07336(海洋)和国家水系沉积物标准物质 GBW07364 作为质控样品。

表 2 平行样测试结果(mg·kg⁻¹)
Tab.2 Results of parallel sample tests (mg·kg⁻¹)

检测物质	元素						
	Cr	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Hg
测试值范围	6.14 ~ 65.32	0 ~ 14.42	3.87 ~ 81.06	8.84 ~ 35.07	0.059 ~ 0.12	1.04 ~ 8.40	0.004 ~ 0.025
随机密码样品							
均值	39.92	8.71	48.82	21.25	0.082	3.83	0.015
RD/%	-10.1 ~ 14.0	-21.0 ~ 22.8	-6.1 ~ 21.6	-15.9 ~ 2.3	-47.7 ~ -3.5	-15.2 ~ 5.6	-15.6 ~ 18.8

1.3 评价方法

1.3.1 潜在生态危害指数

潜在生态危害指数是瑞典学者 Hakanson^[18] 建立的应用于表层沉积物中重金属污染评价的方法, 不仅可以反映每种污染物的影响, 而且揭示了多种污染物的综合环境影响, 计算公式如下:

$$P_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^n C_f^i = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_n^i} \quad (1)$$

$$E_{\text{RI}} = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_f^i \quad (2)$$

式中: C_i 为重金属 i 的实测浓度; C_n^i 为重金属 i 的评价参比值; C_f^i 为重金属 i 的单因子污染指数; P_{sum} 为总体污染程度指数; T_r^i 为重金属 i 的毒性响应系数; E_r^i 为重金属 i 的潜在生态危害指数; E_{RI} 为综合潜在生态危害指数。 T_r^i 、 C_n^i 和污染等级划分参照丁喜桂等的成果^[19]。

1.3.2 地累积指数

地累积指数(I_{geo})由德国海德堡大学沉积物研究所的 Müller^[20] 提出, 是一种研究水体表层沉积物重金属污染评价的定量指标, 计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2(C_i/kB_i) \quad (3)$$

式中: C_i 为重金属 i 的实测浓度; B_i 为重金属 i 的地球化学背景值, 文中采用重金属含量的均值; k 为考虑到成岩作用可能会引起的背景值的变动而设定的常数, 一般为 1.5。根据 I_{geo} 数值的大小, 可以将表层沉积物中的重金属污染程度分为 7 个等级^[21]。

2 结果与讨论

2.1 沉积物粒度

受“粒控效应”影响, 重金属元素会随沉积物粒度变化而有规律地变化, 大多数重金属元素的高背景及高值分布于细粒沉积物区, 低背景及低值分布于粗粒沉积物区^[22]。研究海域表层沉积物可以分为七类(图 1), 分别是砂、粉砂质砂、砂质粉砂、粉砂、砂质砾、砾质砂和含砾砂。研究区域优势粒级组分是粉砂, 含量达 51.16%; 其次为砂质粉砂, 含量达 18.60%; 粉砂质砂、砂、含砾砂含量均为 9.30%; 砂质砾、砾质砂含量均为 1.16%; 沉积物平均粒径为 0.13 ~ 6.79 Φ, 平均粒径均值为 4.60 Φ。王喻鸣等^[10] 发现, 在南海北部海域的表层沉积物整体呈现出自北向南或自西

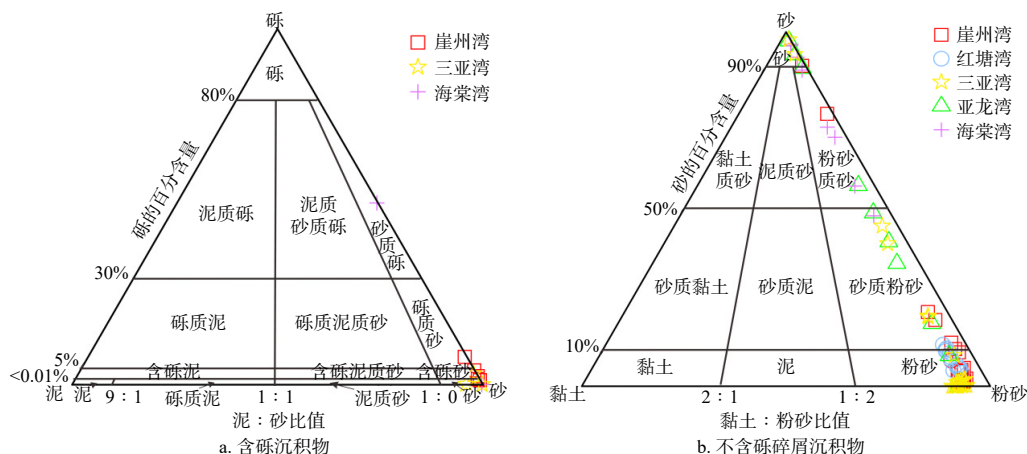


图1 表层沉积物类型三角形分类图解

Fig. 1 Triangle diagram for the type of surface sediments

向东由砂质向淤泥质过渡的分布格局, 本文研究区域的粒度空间分布贴合该结论。

2.2 重金属含量

在研究区域采集的 86 个站位的样品中, Cu、Zn、Cd 和 Hg 分别有 13 个、5 个、46 个和 24 个站位测试的数据低于检出限, 对应检出限分别为 0.8 mg/kg、3.73 mg/kg、0.0467 mg/kg 和 0.003 mg/kg。根据《海洋监测规范 第 2 部分: 数据处理与分析质量控制》(GB 17378.2—2007)^[14], 低于检出限的站位, 如果检出率占样品频数的 1/2 以上 (包括 1/2) 则以检出限值的 1/2 量参加统计计算; 如果不足 1/2 则以检出限值的 1/4 量参加统计计算。通过四分位距法的数据上限 ($Q_3+1.5\times IQR$)、下限 ($Q_1-1.5\times IQR$), 确定了研究区域 86 个站位中共有 9 个站位元素值异常, 其中 Pb 异常的站位为 YZB05、YZB08、YLB07、HTB02、HTB04, As 异常的站位为 YZB01、YZB15, Cd 异常的站位为 YZB18, Hg 异常的站位为 SYB01。根据剔除后的数据, 形成重金属元素特征值统计表 (表 3)。所有站位重金属含量均低于一类海洋沉积物质量标准 (GB 18668—2002)^[23]。Cr、Cu、Zn 和 Pb 含量为红塘湾>三亚湾>崖州湾>亚龙湾>海棠湾, 崖州湾区域 As、Cd 和 Hg 具有明显高值点, Cr 较其他元素更趋近一类沉积物质量标准, 整体上, 崖州湾、红塘湾和三亚湾重金属含量明显高于亚龙湾和海棠湾。

研究区域表层沉积物中重金属含量与国内

外其他海域的对比见表 3。研究区域重金属平均含量较海南岛东部陆架、中国浅海明显偏低。本文中的三亚湾区域重金属含量和贾磊^[5]、刘建波等^[6]的研究结果基本一致, 多数重金属含量小于前人结果。与海口湾、琼州海峡西口区、台湾海峡和广西北部湾相比, 研究区域重金属含量较为接近。研究区域 Cu、Pb 和 Cd 含量低于南海海域, Cr 和 Zn 含量高于南海海域。研究区域重金属平均含量均低于印度 Bengal 海湾和西班牙 Cádiz 海湾。海南岛南部重点海湾重金属平均含量低于相邻国家海域。

2.3 重金属污染评价

2.3.1 潜在生态危害指数

区域内 77 个站位的 $C_f^i < 1$ 、 $P_{\text{sum}} < 8$ 、 $E_r^i < 40$ 且 $E_{\text{RI}} < 150$ (表 4), 5 个海湾的 C_f^i 、 P_{sum} 、 E_r^i 和 E_{RI} 评价结果显示研究区域均为低污染程度。Hg 和 Cd 是生物的非必需元素, 毒性水平较高的 As、Cd 和 Hg 元素在研究区域为低危害程度, 但 As 较其他元素在研究区域内对生态的危害更大。崖州湾、红塘湾和三亚湾的 P_{sum} 和 E_{RI} 高值面积较亚龙湾、海棠湾更大, 崖州湾、红塘湾和三亚湾的潜在生态危害程度较亚龙湾、海棠湾更高。

2.3.2 地累积指数

地累积指数评价结果如图 2 所示。 $-4.201 \leq I_{\text{geo}}(\text{Cr}) \leq 0.123$, 均值为 -0.997, 80 个站位为无污染, 6 个站位为轻度污染, 占比分别为 93.02%、

表 3 重金属元素特征值统计($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Tab.3 The statistical characteristics of heavy metal elements($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

调查区域	重金属	Cr	Cu	Zn	Pb	As	Cd	Hg	总站位数
	一类 $\leq^*$	80.00	35.00	150.00	60.00	20.00	0.50	0.20	
本文研究区域	崖州湾	最小值	4.33	0.40	1.87	9.09	3.12	0.023	22
		最大值	67.00	24.70	90.50	35.40	8.53	0.123	
		平均值	43.17	9.30	53.85	21.68	5.21	0.056	
		标准差	24.35	6.14	32.82	6.99	1.85	0.033	
	红塘湾	最小值	44.50	9.22	55.30	21.70	3.27	0.012	15
		最大值	60.60	12.30	73.40	26.10	7.46	0.080	
		平均值	53.19	11.02	65.16	24.31	4.60	0.026	
		标准差	4.67	0.88	4.87	1.26	1.41	0.024	
	三亚湾	最小值	4.92	0.40	5.26	9.21	1.87	0.023	27
		最大值	69.50	14.90	86.50	32.00	7.95	0.128	
		平均值	49.06	10.04	60.96	23.37	3.54	0.046	
		标准差	21.56	4.83	27.48	6.07	1.98	0.025	
	亚龙湾	最小值	5.89	0.40	1.87	8.66	0.45	0.023	12
		最大值	62.80	21.50	137.00	32.00	2.86	0.082	
		平均值	25.20	5.03	33.50	18.87	2.43	0.037	
		标准差	21.57	6.48	38.61	7.21	0.72	0.024	
	海棠湾	最小值	3.47	0.20	1.87	9.03	1.07	0.012	10
		最大值	39.60	7.92	53.80	23.70	6.55	0.087	
		平均值	13.67	1.90	16.66	15.64	2.96	0.026	
		标准差	12.21	2.89	17.12	5.63	1.98	0.031	
	汇总	平均值	42.55	8.83	53.38	22.34	3.80	0.043	86
		标准差	22.44	5.47	30.45	6.24	2.04	0.029	
前人研究区域	海南岛东部陆架 ^[24]	平均值	57.30	29.40	81.40	19.20	7.60	0.19	29
	中国浅海 ^[22]	平均值	60.00	15.00	65.00	20.00	7.70	0.065	95
	海南三亚湾 ^[5]	平均值	43.84	12.77	60.11	21.11	7.05	0.067	73
	海南三亚湾 ^[6]	平均值	—	12.08	66.77	32.57	1.822	0.067	10
	海口湾 ^[8]	平均值	41.50	14.10	63.70	27.10	12.79	0.06	70
	琼州海峡西口区 ^[25]	平均值	41.30	11.00	48.20	21.60	8.39	0.078	30
	台湾海峡 ^[26]	平均值	38.7	10.2	51.7	18.3	7.5	—	187
	广西北部湾 ^[27]	平均值	38.63	14.95	49.91	20.06	9.03	0.088	75
	南海 ^[28]	平均值	19.90	9.00	45.00	22.60	—	0.70	52
	印度Bengal海湾 ^[29]	平均值	75.02	677.8	60.39	—	—	5.24	26
	西班牙Cádiz海湾 ^[30]	平均值	62.9	43.5	124	30.3	—	0.24	12

注: *《海洋沉积物质量》(GB 18668—2002)^[23]中一类质量标准, 如 $\text{Cr}\leq 80.00\text{ mg/kg}$; “—” 为无数据

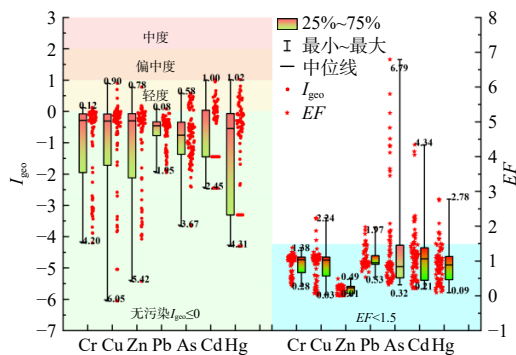
6.98%。 $-6.049\leq I_{\text{geo}}(\text{Cu})\leq 0.899$, 均值为 -1.364 , 0.775, 均值为 -1.147 , 76 个站位为无污染, 10 个
74 个站位为无污染, 12 个站位为轻度污染, 占 站位为轻度污染, 占比分别为 88.37%、11.63%。
占比分别为 86.05%、13.95%。 $-5.424\leq I_{\text{geo}}(\text{Zn})\leq -1.952\leq I_{\text{geo}}(\text{Pb})\leq 0.079$, 均值为 -0.656 , 80 个站

表4 重金属污染系数和潜在生态危害结果

Tab.4 The results of pollution coefficient and potential ecological hazard of heavy metals

重金属	C_f^i							P_{sum}	综合污染指数
	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb	Hg	As		
最小值	0.05	0.004	0.011	0.012	0.124	0.003	0.031	0.31	低
最大值	0.77	0.43	0.783	0.128	0.457	0.112	0.569	2.44	
平均值	0.481	0.177	0.311	0.043	0.316	0.038	0.258	1.62	
重金属	E_r^i							E_{RI}	综合潜在生态危害指数
	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb	Hg	As		
最小值	0.10	0.02	0.011	0.351	0.619	0.112	0.31	2.14	低
最大值	1.54	2.15	0.783	3.84	2.286	4.48	5.69	17.01	
平均值	0.96	0.88	0.311	1.276	1.581	1.519	2.58	9.12	

位为无污染, 1个站位为轻度污染, 占比分别为 98.77%、1.23%。 $-3.665 \leq I_{\text{geo}}(\text{As}) \leq 0.58$, 均值为 -0.808 , 66个站位为无污染, 18个站位为轻度污染, 占比分别为 78.57%、21.43%。 $-2.451 \leq I_{\text{geo}}(\text{Cd}) \leq 1.001$, 均值为 -0.958 , 62个站位为无污染, 22个站位为轻度污染, 1个站位(SYB04)为偏中度污染, 占比分别为 92.94%、5.88%、1.18%。 $-4.306 \leq I_{\text{geo}}(\text{Hg}) \leq 1.016$, 均值为 -1.237 , 66个站位为无污染, 18个站位为轻度污染, 1个站位(YZB12)为偏中度污染, 占比分别为 77.65%、21.17%、1.18%。综合可知: (1)研究区域内 86个站位的重金属元素污染程度不高, 为无污染—轻度污染; (2)7种重金属按均值评价的污染等级为 $\text{Pb} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Cr} > \text{Zn} > \text{Hg} > \text{Cu}$; (3)Cd和Hg各有1个站位为偏中度污染, 崖州湾和三亚湾相对另外3个海湾受到的污染程度较高。结合前人研究成果^[4-6, 8, 31]发现, As和Hg各有1个站位为偏中度污染, 属于需要重点关注的重金属元素。

图2 I_{geo} 和 EF Fig. 2 I_{geo} and EF plots

整体上, 海南岛周边海域处于无污染—中度污染水平。海南岛南部海湾重金属污染程度较周边海域低, As、Hg和Cd元素为潜在生态风险因子, 需要加强监测和预警, 避免对海洋生态环境造成更大的危害。

2.4 重金属来源分析

2.4.1 富集因子分析

为初步确定研究区域的重金属是自然来源还是人为来源, 对数据进行富集因子(EF)分析(图2)。研究选取受人为干扰效应不明显的地壳来源元素Al为参比元素, 其标准化公式为 $EF = \frac{C_i/C_{Al}}{B_i/B_{Al}}$, 分别代表样品*i*和Al的浓度及背景参考值, 背景值选用测试元素的均值 10.12 mg/kg 。表层沉积物中重金属元素的 $EF < 1.5$ 且 $I_{\text{geo}} \leq 0$ 表示重金属元素完全来源于地壳的贡献^[5, 31]。Cr、Cu、Zn、Pb、As、Cd和Hg分别有 91.86%、84.88%、88.37%、91.13%、71.40%、65.88%和 77.64%的站位符合 $EF < 1.5$ 且 $I_{\text{geo}} \leq 0$; Cr和Zn所有站位的 $EF < 1.5$; Cu、Pb和Hg 90%以上的站位 $EF < 1.5$; 所有站位的 EF 、 I_{geo} 平均值符合 $EF < 1.5$ 且 $I_{\text{geo}} \leq 0$ 。研究区域Cr、Cu、Zn、Pb和Hg主要是土壤或岩石风化后借由河流或大气输入的自然来源的物质, 局部存在受人类活动影响的站位, As和Cd元素较其他元素受人类活动影响更大。

2.4.2 Pearson相关性分析

重金属元素的相关性分析能反映其相似的物质来源或相似的沉积物输送和积聚过程。

Al₂O₃ 一般为陆源碎屑的风化产物,多赋存于黏土矿物中,其稳定的性质和明显的“粒度控制效应”可作为陆源的指示标志^[5]。沉积物中有机碳(OC)、总氮(TN)和粒度参数均是表征沉积环境性质、类型的重要指标^[8]。将表层沉积物重金属、粒度、Al₂O₃、OC 和 TN 数据标准化处理后进行 Pearson 相关性分析(图 3)。结果显示:(1)Al₂O₃-泥、Al₂O₃-粉砂具有极显著正相关关系,Al₂O₃-砂具有极显著负相关关系,Al₂O₃-砾具有弱显著负相关关系,Al₂O₃ 和粒度间的相关性验证了区域内沉积物为陆源输入。(2)Cr、Cu、Zn、Pb、Al₂O₃、OC、TN、泥、粉砂两两要素之间均为极显著正相关关系(0.8≤r<1.0),Cr、Cu、Zn、Pb 与砂为显著负相关关系(0.6≤r<0.8),与砾为弱显著负相关关系(0.2≤r<0.4),Cr、Cu、Zn、Pb 元素在该研究区域具有相似的来源且和陆源物质输入过程具有极显著正相关关系。(3)Hg 与 Cr、Cu、Zn、Pb、Al₂O₃、OC、TN、泥、粉砂之间均为显著正相关关系且相关系数均大于 0.7,Hg 与砂存在显著负相关关系,与砾为弱显著负相关关系。Hg 和 Cr、Cu、Zn、Pb 元素在

该研究区域也具有相似的来源,但 Hg 和 Cr、Cu、Zn 的来源相似度较 Pb 低。(4)Cd 与 Cr、Cu、Zn、Pb、Al₂O₃、OC、TN、泥、粉砂为弱显著正相关关系,Cd 与 Hg 为弱显著正相关关系,Cd 与砂为弱显著负相关关系,Cd 与砾无显著负相关关系。Cd 同 Cr、Cu、Zn、Pb、Hg 具有相似来源,但相似程度较低。(5)As 仅与 OC 和 TN 存在弱显著负相关关系,As 具有单独的来源。

2.4.3 主成分分析及重金属来源分析

表 5 为前人关于邻近区域重金属元素来源的研究结果。近岸重金属除了自然输入之外,其他主要来源包括工业活动、交通运输(船舶活动产生的物质)、水产养殖活动、农业种植活动和旅游活动(旅游设施运行产生的物质)。Cr、Cu、Zn 和 Pb 在沿海区域的来源极为相似,大多来源于工业活动和交通运输;As 在自然环境中存在极少,主要用于农药和化肥中;Cd 和 Hg 的来源更为多样,上述活动中均可能产生。

根据《三亚市海域使用详细规划》^[13]可知 5 个海湾的规划利用现状。根据夏小明^[34]、梅西等^[35]研究成果可知,南海北部陆架物质来源以北部珠江、韩江和西部红河等短源性河流运输物质以及近岸基岩风化、岛屿剥蚀作用产物为主,少量为东沙群岛海底冲刷剥蚀物,南海陆架区主要为沉积陆源碎屑物质。受东亚季风驱动,南海表层洋流将携带的河流沉积物输送至远源区,南海北部陆坡区存在 NE-SW 向的深水低流搬运沉积作用,使南海北部地区的陆源物质大致沿陆坡等深线形成东北向西南方向的高沉积速率堆积体。论文研究区域位于南海北部大陆边缘,水深小于 200 m,宽度为 100~200 km,等深线基本为西南至东北走向,由海岸带地貌(潮间带-水下堆积台地)过渡为陆架地貌(倾斜的陆架

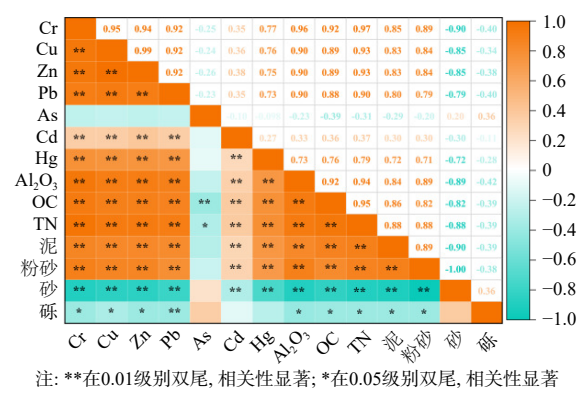


图 3 表层沉积物 Pearson 相关性分析

Fig. 3 Pearson correlations analysis of surface sediments

表 5 邻近区域重金属元素来源		
Tab.5 Statistics of input channels for heavy metal elements		
研究区	重金属输入通道	来源
广东吴川近岸海域	Pb(船舶尾气); Cu、Zn(船舶); Cd(船舶防腐材料); Hg、Cd、Cu、Zn(生活污水、旅游设施、养殖饲料); Cr、Hg、As(海水养殖、农业活动)	[32]
海口湾海域	Cu、Pb、Cd、Zn、Cr、Hg(工业活动、人类城市活动、母岩风化产物)	[8]
广西北部湾	Zn、Cu、Cd(陆源岩石风化); As(农药残留、网箱养殖、工业生产); Hg(燃煤、石油化工、金属冶炼、农业活动)	[27]
珠江口海域	Zn和Hg(工业生产排放废水); Pb(交通运输业); Cu(农业活动)	[33]

侵蚀-堆积平原)。本研究区域水下地形较为平缓,处于南海北部陆架区域,物源以短源性河流运输物质及近岸岩基风化、岛屿剥蚀作用产物为主。

主成分分析法采用数学降维或特征提取方法,将原来众多的且具有一定相关性的原始变量进行线性变换,提取出数目较少且彼此间互不相关的重要变量,用 Kaiser 标准化的正交旋转法使用较少的、有代表性的因子来解释众多变量的主要信息,并推测有关污染源信息^[11]。本研究按照主成分筛选标准“特征值>1 且累积方差贡献率 $\geq 50\%$ ”的要求,符合统计学规范。为了进一步探讨重金属的来源,将数据进行标准化处理后进行主成分分析,以判断研究区域重金属的主要来源和贡献率。同时对数据进行 KMO 和 Bartlett 球度检验(KMO=0.83>0.5, Bartlett 球度检验显著性水平 $p=0<0.05$),以确保其适合进行 PCA 分析,并按照初始特征值>1 的原则提取主成分,绘制主成分载荷因子图(图 4)。根据主成分分析的结果,共识别出 3 个主成分(PCs),分别占总方差的 71.826%、8.259%、6.286%,累计方差贡献率为 86.371%(表 6)。

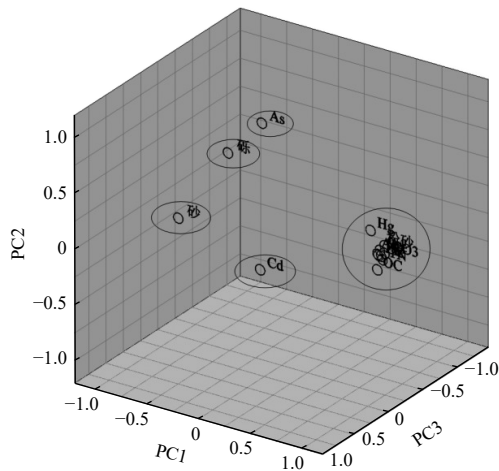


图 4 主成分载荷因子

Fig. 4 Principal component loading factors

结合前人研究成果及本文 EF、Pearson 相关性分析和 PCA 结果,推测得到:(1)PC1 解释了 71.826% 的方差变异, Cr、Cu、Zn、Pb、Hg、 Al_2O_3 、OC、TN、泥和粉砂在该成分具有较高的正载荷(>0.809), Cd 具有较低的正载荷, As、砂

表 6 主成分分析结果

Tab.6 Results of principal component analysis

重金属	PC1	PC2	PC3
Cr	0.977	0.052	-0.029
Cu	0.955	0.085	0.005
Zn	0.956	0.05	0.029
Pb	0.928	0.043	0
As	-0.302	0.821	-0.169
Cd	0.389	0.117	0.893
Hg	0.809	0.193	-0.078
Al_2O_3	0.958	0.038	-0.056
OC	0.949	-0.078	0.034
TN	0.978	0.008	0.004
泥	0.911	-0.012	-0.081
粉砂	0.924	0.072	-0.109
砂	-0.927	-0.086	0.106
砾	-0.443	0.629	0.111
特征值	10.056	1.156	0.88
方差贡献率/%	71.826	8.259	6.286
累计方差贡献率/%	71.826	80.085	86.371

和砾均具有较低的负载荷。PC1 成分代表自然来源,包括河流或大气输入的近岸基岩风化、岛屿剥蚀产物,以及由东亚季风驱动的表层洋流携带的珠江、韩江、红河等河流输入的自然产物。Cr、Cu、Zn、Pb、Hg、 Al_2O_3 、OC、TN、泥和粉砂在 PC1 中具有较高的正载荷且具有极高的相关性,前人研究成果及 EF、Pearson 相关性分析显示, Cr、Cu、Zn、Pb、Hg 主要来源相似且为陆源。同时, OC 的高正载荷表明有机质对沉积物重金属的络合和解吸过程具有重要作用,泥和粉砂的高正载荷、砂的高负载荷,说明沉积物中各粒级组分的组成结构也是造成重金属分布格局的重要驱动因素。(2)PC2 解释了 8.259% 的方差变异, As 在该成分中具有较高的正载荷(0.821), Cr、Cu、Zn、Pb、Cd、Hg、 Al_2O_3 、TN、粉砂和砾均具有较低的正载荷, OC、泥和砂均具有较低的负载荷。PC2 成分代表海水养殖和农业活动化肥来源。As 元素在该成分中具有较高的正载荷, As 元素主要来源于农业和养殖业的农药和化肥,同时, Pearson 相关性分析表明 As 元素的主要来源方式与其他元素均不同。崖州

湾、三亚湾和海棠湾均存在海水养殖活动, As在这3个海湾的含量均较高。(3)PC3解释了6.286%的方差变异, Cd在该成分中具有较高的正载荷(0.893), Cu、Zn、OC、TN、砂和砾均具有较低的正载荷, Cr、As、Hg、 Al_2O_3 、泥和粉砂均具有较低的负载荷。PC3成分代表海上游乐设施和船舶交通运输来源。Cd元素在该成分具有较高的正载荷, Cd元素主要来源于船舶的防腐材料和海上旅游设施等, 同时, Pearson相关性分析表明, Cd和Cr、Cu、Zn、Pb、Hg具有相似来源, 推测Cd除海上游乐设施和船舶交通运输来源外, 部分为自然来源。崖州湾、红塘湾和海棠湾均设有游乐场用海, 红塘湾和三亚湾设有海上观光用海、海上活动类用海, 各海岛和近岸区域之间设有行船航线, 海岛上设有船舶补给码头。亚龙湾区域的野薯岛虽然为生态保护区用海规划, 但作为军港时有军舰出入。同时, As、Cd与OC的弱相关关系表明其在沉积物中以残渣态为主相, 分布受工业和城市排污过程的影响较小。

3 结论

(1)研究区域表层沉积物中重金属含量均符合一类质量标准, 评价结果为无污染—低污染。崖州湾、红塘湾和三亚湾等近岸旅游业、工业发达区域的重金属含量明显较高, 随着未来旅游业的发展可能会引起污染加重的情况。因此, 崖州湾、红塘湾和三亚湾需要进一步加强污染防治工作, 控制入海污染物总量; 亚龙湾和海棠湾要继续维持生态红线内用海现状, 坚持海洋资源低密度开发路线。

(2)推测研究区域Cr、Cu、Zn、Pb、Hg的主要来源为通过河流或大气输入的近岸基岩风化、岛屿剥蚀产物以及由东亚季风驱动的表层洋流携带的河流输入的自然来源的产物。同时, 以上元素的含量受人类活动(生活污水、海上游乐设施、船舶运行、锚定、维修过程和港口码头工程建设活动)影响。Cd主要来源于船舶的防腐材料和海上游乐设施。As主要来源于人工海水养殖和农业活动中的化肥等。As、Hg和Cd元素为潜在生态风险因子, 需要加强监测和预警, 避免对海洋生态环境造成更大的危害。

参考文献:

- [1] Puari A T, Anandika A, Apriani I I, et al. Contamination level of heavy metals and assessment of the ecologic risk in the surface water and sediments of Batanghari river Dharmasraya, Indonesia[J]. *Journal of Ecological Engineering*, 2025, 26(4): 182-197.
- [2] Tanjung R H R, Indrayani E, Agamawan L P I, et al. Ecological and human health risks assessment related to heavy metals in surface sediments and some fish species in Lake Sentani, Indonesia[J]. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2025, 11: 101148.
- [3] Gao Q J, Wang N, Xiang L H, et al. Distribution and pollution assessment of heavy metals in seawater, surface sediments and marine organisms in Lianyungang offshore, China[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2025, 84: 104111.
- [4] 刘丽华. 福建省西南近岸海域表层沉积物重金属污染特征与风险评价[J]. *海洋环境科学*, 2022, 41(2): 200-207.
- [5] 贾磊, 刘文涛, 唐得昊, 等. 三亚湾及周边海域表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(12): 22-31.
- [6] 刘建波, 刘洁, 陈春华, 等. 三亚湾表层沉积物中重金属污染特征及生态风险评价[J]. *环境科学与管理*, 2012, 37(7): 106-109.
- [7] Gopal V, Krishnamurthy R R, Vignesh R, et al. Assessment of heavy metal contamination in the surface sediments of the Vedaranyam coast, Southern India[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2023, 65: 103081.
- [8] 许欣, 蔡钰灿, 史华明, 等. 海口湾海域表层沉积物重金属空间分布特征及其生态风险评价[J]. *海洋环境科学*, 2023, 42(4): 493-501.
- [9] 邢孔敏, 陈石泉, 蔡泽富, 等. 海南东寨港表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J]. *海洋科学进展*, 2018, 36(3): 478-488.
- [10] 王喻鸣, 王玉琨, 陈晓宏. 南海北部海域表层沉积物重金属含量分布及来源[J]. *中山大学学报(自然科学版)(中英文)*, 2022, 61(1): 139-150.
- [11] 匡荟芬, 胡春华, 吴根林, 等. 结合主成分分析法(PCA)和正定矩阵因子分解法(PMF)的鄱阳湖丰水期表层沉积物重金属源解析[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(4): 964-976.
- [12] 张远辉, 杜俊民. 南海表层沉积物中主要污染物的环境背景值[J]. *海洋学报*, 2005, 27(4): 161-166.
- [13] 三亚市自然资源和规划局. 三亚市海域使用详细规划[EB/OL]. (2023-05-29)[2024-03-01]. <https://zgj.sanya.gov.cn/zgjsite/tzgg/202305/ccb0cb873db54e6c8fce2472951fd749.shtml>.
- [14] GB 17378.2—2007 海洋监测规范 第2部分: 数据处理与分析质量控制[S].
- [15] GB/T 12763.8—2007 海洋调查规范 第8部分: 海洋地质地

- 球物理调查[S].
- [16] GB 17378.3—2007 海洋监测规范 第3部分: 样品采集、储存与运输[S].
- [17] GB/T 20260—2006 海底沉积物化学分析方法[S].
- [18] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [19] 丁喜桂, 叶思源, 高宗军. 近海沉积物重金属污染评价方法[J]. *海洋地质动态*, 2005, 21(8): 31-36.
- [20] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geojournal*, 1969, 2: 108-118.
- [21] 闭文妮, 洪 鸣, 彭梦微, 等. 2005-2020 年广西近岸海域表层沉积物重金属含量特征及风险评价[J]. *海洋环境科学*, 2022, 41(3): 416-422, 429.
- [22] 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [23] GB 18668—2002 海洋沉积物质量[S].
- [24] 徐方建, 闫慧梅, 田 旭, 等. 海南岛东部陆架表层沉积物重金属污染评价[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(5): 1530-1539.
- [25] 韦政全, 林章金, 陈丹丹, 等. 浅谈海南岛周边海域表层沉积物重金属污染现状与评价[J]. *工业微生物*, 2023, 53(2): 76-79.
- [26] Zhai B, Liu Z Q, Wang X C, et al. Assessment of heavy metal contamination in surface sediments in the western Taiwan Strait[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 159: 111492.
- [27] 邹 瑜, 罗 冲, 池 江, 等. 广西北部湾海岸带沉积物重金属生态风险评价与来源识别[J/OL]. *现代地质*, 1-13[2025-03-10]. <https://doi.org/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2025.015>.
- [28] Zhu L M, Xu J, Wang F, et al. An assessment of selected heavy metal contamination in the surface sediments from the South China Sea before 1998[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, 108(1): 1-14.
- [29] Raju K, Vijayaraghavan K, Seshachalam S, et al. Impact of anthropogenic input on physicochemical parameters and trace metals in marine surface sediments of bay of Bengal off Chennai, India[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 177(1/2/3/4): 95-114.
- [30] Rodríguez-barroso M R, García-morales J L, Coello Oviedo M D, et al. An assessment of heavy metal contamination in surface sediment using statistical analysis[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 163(1/2/3/4): 489-501.
- [31] Xu F J, Hu B Q, Yuan S Q, et al. Heavy metals in surface sediments of the continental shelf of the South Yellow Sea and East China Sea: Sources, distribution and contamination[J]. *CATENA*, 2018, 160: 194-200.
- [32] 赵明杰, 孙志佳, 闫兴国, 等. 广东吴川近岸海域表层海水重金属含量及生态风险分析[J]. *海洋地质前沿*, 2023, 39(1): 70-76.
- [33] 赵淑雯, 苏琼源, 黄亮亮, 等. 广西典型海湾表层沉积物重金属赋存形态及潜在生态风险[J]. *海洋环境科学*, 2025, 44(1): 35-46.
- [34] 夏小明. 海南省海洋资源环境状况[M]. 北京: 海洋出版社, 2015.
- [35] 梅 西, 李学杰, 密蓓蓓, 等. 中国海域表层沉积物分布规律及沉积分异模式[J]. *中国地质*, 2020, 47(5): 1447-1462.

(本文编辑: 曲丽梅)