

doi: 10.12029/gc20230214002

刘春雷, 曹胜伟, 李亚松, 张媛静, 李剑锋, 李静, 洪炳义. 2025. 福建厦门湾底质沉积物重金属分布特征、来源及其对生态环境的影响[J]. 中国地质, 52(1): 232–245.

Liu Chunlei, Cao Shengwei, Li Yasong, Zhang Yuanjing, Li Jianfeng, Li Jing, Hong Bingyi. 2025. Distribution and sources of heavy metals in bottom sediments of the Xiamen Bay, Fujian Province and its effects on ecological environment[J]. Geology in China, 52(1): 232–245(in Chinese with English abstract).

福建厦门湾底质沉积物重金属分布特征、来源及其对生态环境的影响

刘春雷^{1,2,3}, 曹胜伟^{1,2}, 李亚松^{1,2}, 张媛静^{1,2}, 李剑锋^{1,2}, 李静³, 洪炳义⁴

(1. 福建省水循环与生态地质过程重点实验室, 福建 厦门 361000; 2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 3. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074; 4. 闽东南地质大队, 福建 泉州 362000)

摘要:【研究目的】厦门湾生态环境治理和厦门港口建设, 造成厦门湾重金属含量变化较大, 查明湾区重金属分布特征、演变及来源分析, 对厦门湾重金属污染防治与生态风险管控具有重要意义。【研究方法】本文测定了厦门湾 87 个海域底质表层沉积物中的 7 种重金属的含量, 分析了重金属分布特征、富集程度, 并利用因子分解及主成分分析法, 定量分析了重金属的主要来源。【研究结果】厦门湾西港区重金属 Cu(26.37 mg/kg)、Zn(122.58 mg/kg)、Cr(57.25 mg/kg) 含量最高, 九龙江口区 Pb(48.03 mg/kg)、Cd(0.25 mg/kg)、Hg(0.085 mg/kg)、As(9.35 mg/kg) 含量最高; 西港 Cu 超一类标准率最高, 达到 25%; 九龙江 Zn 超一类标准率次之, 为 20.69%。厦门湾重金属富集系数为 Cu(1.01)>Cr(0.99)>Cd(0.70)>Zn(0.64)>Pb(0.63)>As(0.48)>Hg(0.33)。Cu 表现为轻度富集, Cr 与本底值接近。【结论】厦门湾重金属的潜在来源中矿山冶炼贡献率为 36.16%、天然母岩风化 22.03%、农业与生活污水排放 21.98% 以及化石燃料燃烧 19.83%; Cu、Zn、Cd、Cr 主要来源矿山冶炼, As 来源分别为燃料燃烧贡献率为 85.76% 和农业面源污染 14.16%。Pb 和 Hg 主要受母岩风化所控制。沉积物重金属潜在生态风险中、重度风险区主要集中在九龙江河口及厦门港附近。

关键词: 重金属; 底质沉积物; PMF 源解析; 海岸带; 海洋地质调查工程; 厦门湾; 福建

创新点: 基于 PMF 源解析模型分析了重金属来源, 完成厦门湾沉积物重金属潜在生态风险评价, 并识别了生态风险主控因素。

中图分类号: X55 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)01-0232-14

Distribution and sources of heavy metals in bottom sediments of the Xiamen Bay, Fujian Province and its effects on ecological environment

LIU Chunlei^{1,2,3}, CAO Shengwei^{1,2}, LI Yasong^{1,2}, ZHANG Yuanjing^{1,2}, LI Jianfeng^{1,2}, LI Jing³, HONG Bingyi⁴

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Water Cycling and Eco-Geological Processes, Xiamen 361000, Fujian, China; 2. The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Science, Shijiazhuang 050061, Hebei,

收稿日期: 2023-02-14; 改回日期: 2023-11-09

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20221773)、国家重点研发计划(2022YFF1301301)、基本科研业务费项目(SK202315)联合资助。

作者简介: 刘春雷, 男, 1984 年生, 副研究员, 主要从事水文地质、海岸带地质研究; E-mail: chunleiliu-dn@163.com。

通信作者: 曹胜伟, 男, 1993 年生, 助理研究员, 主要从事海岸带环境和水文地球化学研究工作; E-mail: caoshengwei_hei@163.com。

China; 3. Faculty of Environment, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 4. Southeastern Fujian Geological Brigade, Quanzhou 362000, Fujian, China)

Abstract: This paper is the result of marine geological survey engineering.

[Objective] The heavy metal contents in the Xiamen Bay have been greatly changed due to the ecological management in the bay and the port construction in Xiamen City. Identifying the distributions, evolution, and sources of heavy metals in the bay is significant for the prevention and control of heavy metal pollution, as well as ecological risk management. **[Methods]** This study determined the contents of seven heavy metals in 87 surface samples from bottom sediments in the Xiamen Bay and the Jiulong River estuary, investigated the distributions and the degrees of enrichment of these heavy metals, and quantitatively analyzed the primary sources of these heavy metals using factor analysis and principal component analysis. **[Results]** The western Xiamen Bay displays the highest average mass contents of heavy metals Cu (26.37 mg/kg), Zn (122.58 mg/kg), and Cr (57.25 mg/kg). In contrast, the Jiulong River estuary exhibits the highest contents of Pb (48.03 mg/kg), Cd (0.25 mg/kg), Hg (0.085 mg/kg), and As (9.35 mg/kg). Cu in the western Xiamen Bay exhibits the highest over-limit ratio of up to 25%, followed by Zn (20.69%) in the Jiulong River. In the Xiamen Bay, the enrichment coefficients of heavy metals decrease in the order of Cu (1.01), Cr (0.99), Cd (0.70), Zn (0.64), Pb (0.63), As (0.48), Hg (0.33), indicating that Cu is moderately enriched, Cr approximate to their background values, and Hg is severely enriched. **[Conclusions]** The potential sources of the seven heavy metals in the Xiamen Bay include mine smelting, the weathering of natural parent rocks, the discharge of agricultural and domestic sewage, and fossil fuel combustion, which account for 36.16%, 22.03%, 21.98%, and 19.83%, respectively. Among these heavy metals, Cu, Zn, Cd, and Cr originate primarily from mine smelting, As from fuel combustion (85.76%) and agricultural non-point source pollution (14.16%), and Pb and Hg principally from the weathering of parent rocks. Zones with moderate and high ecological risks induced by heavy metals in sediments are concentrated in the Jiulong River estuary and the Xiamen Harbor.

Key words: heavy metal; bottom sediments; positive matrix factorization; coastal zone; marine geological survey engineering; Xiamen Bay; Fujian Province

Highlights: Based on the PMF model heavy metal sources were analyzed, the potential ecological risk assessment of sediment heavy metals in Xiamen Bay was completed, and the main controlling factors of ecological risk were identified.

About the first author: LIU Chunlei, male, born in 1984, associate researcher, mainly engaged in hydrogeology and coastal zone geology research; E-mail: chunleiliu-dn@163.com.

About the corresponding author: CAO Shengwei, male, born in 1993, assistant research fellow, engaged in coastal environment and hydrogeochemistry; E-mail: caoshengwei_hei@163.com.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No. DD20221773), National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFF1301301) and Basic Research Operating Expenses Program (No. SK202315).

1 引言

近岸海域是海陆交互作用的重要地带,也是人类活动最为活跃的地带,是人类活动产生的重金属等污染物质的重要聚积区。沉积物是水体的重要组成部分,沉积物中的重金属是水环境污染的指示剂,作为重金属的源和汇,沉积物对于水体中重金属的分布和变化具有重要影响(Liu et al., 2003; 海热提等, 2006; 牛红义等, 2006; Nishijima et al., 2015; 涂春霖等, 2023)。大多数重金属化合物为非降解型有毒物质,生态效应的浓缩和累积作用使其沿食物链被生物体吸收、富集,最终成为生命体积累和

慢性中毒的源头(陈松等, 1987; Chen et al., 2016)。同时,沉积物中重金属含量可以判断研究区受污染的程度,其含量分布可以追踪污染源,了解其扩散范围,甚至可以作为陆源物质的示踪元素。近年来国内外许多学者开展了河口及海湾底质沉积物环境质量的研究,并试图对沉积物中重金属的污染程度进行评价(王昕等, 2013; Ma et al., 2020)。

厦门湾位于台湾海峡西岸,闽南九龙江入海口附近。区内燕山期岩浆活动强烈且频繁形成多期次岩体,其中以早白垩世岩浆活动规模最大,湾区周边广泛分布花岗岩和凝灰岩,残积层、冲洪积层及海域底质沉积物物源均来自花岗岩和凝灰岩的

风化及迁移(图 1)。厦门湾是中国东南沿海对外贸易的重要口岸,厦门港的主要港区码头分布在厦门湾的南北两岸边。电子、机械为研究区两大支柱产业,合计产值占规模以上工业的 61.0%。为保护海洋生态环境,科学合理地利用海洋资源,2002 年以来,厦门湾西港、海东和同安湾逐步退出了水产养殖。重金属背景含量较高的火成岩分布及周边经济快速发展诱发的环境污染问题,使得厦门湾海域存在重金属污染的风险,因此,该地区沉积物重金属的来源分析与风险评价成为广大学者关注的重点。

沉积物是重金属等物质的吸附剂,同时又是释放源,20 世纪 80 年代开始陆续开展了九龙江口—厦门湾海域的重金属研究和来源探讨(张士三等, 1984),分析了重金属元素分布特征和污染来源(廖文卓等, 1983)。20 世纪 90 年代开展了厦门西海域和厦门—金门海域表层沉积物重金属的分布研究(陈松等, 1992; 刘琼玉等, 1995; 洪丽玉等, 2000)。2007—2008 年开展了九龙江口—厦门湾海域沉积物的重金属研究(李桂海, 2007; 李桂海等, 2007, 2008),分析了现代沉积环境及重金属元素潜在生态风险,2009 年完成的 908 专项“福建省近海海洋

综合调查与评价”汇总提炼了“海岸带、海岛、近岸与港湾、资源以及海域使用和社会经济基本情况”等调查的成果,对福建沿岸和港湾生态环境进行综合评价(陈坚, 2016)。近年来,厦门湾沉积物重金属污染研究集中于重金属污染物较重的九龙江河口和西港区,主要研究重金属空间分布特征、来源(何海星, 2014; 何海星等, 2014; 万瑞安等, 2019)、污染和生态风险评价(林彩等, 2011; 王伟力等, 2013; 于瑞莲等, 2013; 韩璐等, 2017; 李青生等, 2020)等方面。受湾区生态系统保护与修复和港口建设影响,湾区底质沉积物质量受人类活动影响日益加剧,湾区污染物分布特征和来源发生剧烈变化,已有研究成果无法全面客观地反映厦门湾重金属分布特征和来源,本文通过多元统计学方法,在综合分析厦门湾近岸海域沉积物重金属含量及分布规律的基础上,定量确定重金属潜在来源,以期为厦门湾重金属污染防治与生态风险管控提供科学依据。

2 材料与方法

2.1 研究区和样品采集

本次研究于 2021 年 6 月 5 日至 7 月 6 日在厦门湾使用抓斗式采样器采集厦门湾近岸海域底质

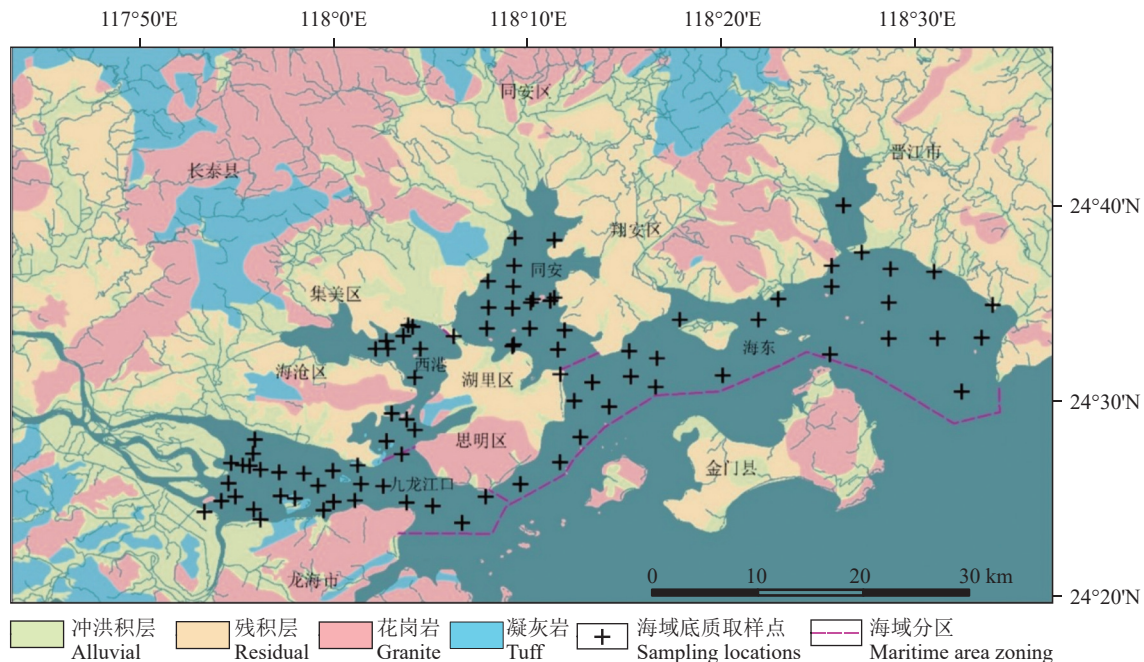


图 1 厦门湾区域地质概况及采样站位图

Fig. 1 Map of regional geological survey and sampling stations in Xiamen Bay

表层沉积物样品 87 组, 其中九龙江河口 29 组, 西港 12 组, 同安湾 18 组, 海东 28 组, 样品装入聚丙烯保鲜盒中密封保存。

2.2 重金属元素分析

粒度测量采用激光粒度分析法测定, 测试设备为 Mastersizer-2000 型激光粒度仪, 仪器测量范围为 0.02~2000 μm , 分辨率为 0.01 Φ , 重复测量的相对误差 <1% (刘祥奇等, 2020)。选取 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg 和 As 共 7 种重金属进行元素含量分析。使用 X 射线荧光光谱仪 (XRF) 测定 Cu、Pb 与 Zn 含量, 使用电感耦合等离子质谱仪 (ICP-MS, Perkin Elmer Elan II) 测定 Cr、Cd、As 与 Hg 含量 (毛欣等, 2021; 曹胜伟等, 2022)。通过 X 射线荧光光谱仪 (XRF, Axios PW4400) 测定了沉积物中 Al_2O_3 与 Fe_2O_3 的含量, 作为消除粒度效应并计算重金属元素富集系数的依据。各元素含量的测定使用平行样和标准物质 MRGeo08 与 OREAS-25a 确保样品分析的精确性, 各元素回收率在 80%~120%, 相对标准偏差均小于 10%, 符合质量控制标准。

2.3 数据分析方法

2.3.1 富集系数

富集系数可用于评价重金属污染程度 (Soto-Jiménez and Páez-Osuna, 2001), 并区分重金属潜在来源 (人为源和自然源) (Miao et al., 2020)。EF 相对大小指示对应元素含量受人类活动影响程度。参比元素一般选择表生过程中地球化学性质稳定性好, 不易迁移的化学元素。考虑福建沿海地区地壳主要岩性为燕山期花岗岩, 富含硅铝酸盐, 因此, 选择 Al 作为计算富集系数的参比元素。

$$EF = \left(\frac{C_x}{C_{Al}} \right)_{\text{Sample}} / \left(\frac{C_x}{C_{Al}} \right)_{\text{Baseline}} \quad (1)$$

式中 C_x 和 C_{Al} 分别代表重金属元素 x 与参比元素 Al 的实测含量, 下标 Sample 与 Baseline 分别代表相关元素含量在待测样品中的实测含量与区

域地质背景含量。厦门湾海域底质重金属背景值见表 1 (吕荣辉, 1987; 董炜峰等, 2018; 万瑞安等, 2019), 选择厦门本岛的花岗岩铝含量作为元素 Al 背景含量 (盛丹, 2012) (表 1)。

2.3.2 PMF 源解析模型

为了进一步分析九龙江近岸表层沉积物中重金属的污染来源, 运行 PMF 源解析模型 (Paatero, 1997; 刘胜然等, 2019; 沈宸宇等, 2022) 对厦门湾表层沉积物重金属的潜在来源进行了解析。

其原理 (式 2, 式 3) 是将由原始测试数据组成的矩阵 x_{ij} 分解成两个因子矩阵 g_{ik} 与 f_{kj} , 以及残差矩阵 ε_{ij} 。

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

x_{ij} 表示测试数据集中第 i 个样品中第 j 种重金属含量; g_{ik} 为来源 k 对样品 i 的贡献率 (源分担矩阵); f_{kj} 为来源 k 所输入的第 j 种重金属浓度值 (源成分谱矩阵); ε_{ij} 为随机误差矩阵。

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{\varepsilon_{ij}}{u_{ij}} \right)^2 \quad (3)$$

上式为 PMF 模型的目标函数, 模型通过多次迭代得到最小 Q 值, 式中 ε_{ij} 为随机误差, u_{ij} 为第 i 个样品中第 j 种元素的测试不确定度。

3 结果与讨论

3.1 近岸海域表层沉积物重金属空间分布特征

厦门湾表层沉积物重金属含量由大到小分别为 Zn (84.25 mg/kg) > Cr (49.06 mg/kg) > Pb (37.51 mg/kg) > Cu (20.36 mg/kg) > As (7.36 mg/kg) > Cd (0.13 mg/kg) > Hg (0.07 mg/kg)。依据《海洋沉积物质量》(GB 18668-2002), Cu 与 Zn 超沉积物一类标准率最高, 分别为 10.34% 与 12.64%。重金属元素分布图 (图 2) 显示九龙江河口区、西港港口区、同安湾西溪入海口和石井江入海口呈现重金属较为富集。

表 1 厦门海域沉积物重金属含量背景值

Table 1 Background value of heavy metals in sediments of the Xiamen Sea Area

海域	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Hg	As
西港	21.48	118.81	41.8	0.066	63.5	0.15	12.3
九龙江	20.0	125.9	65.6	0.237	38.7	0.15	12.3
海东	12.6	87.1	42.9	0.172	38.7	0.15	12.3
同安	15.1	91.6	45.0	0.197	38.7	0.15	12.3

注: 单位为 mg/kg。

研究海域各元素在西港区和九龙江河口质量含量相对较高,但站位间含量差异较大(表2)。西港区厦门港、后溪入海口和马銮湾重金属元素相对富集,Cu、Zn、Cr的平均质量含量全区最高,其中Cu含量超一类标准率最高,达到25%,其次是Zn超一类标准率为16.67%,Cr超一类标准率为

8.33%,其他重金属元素均未超一类标准。西港T08站点Zn含量为厦门湾区最高,达298 mg/kg;九龙江口湿地和入海口相对富集重金属元素,Pb、Cd、Hg、As含量最高,其中Zn含量超一类标准率最高,达到20.69%,其次为Cu、Pb、Cd,超一类标准率均为10.34%,Cr超一类标准率均为3.45%,其他

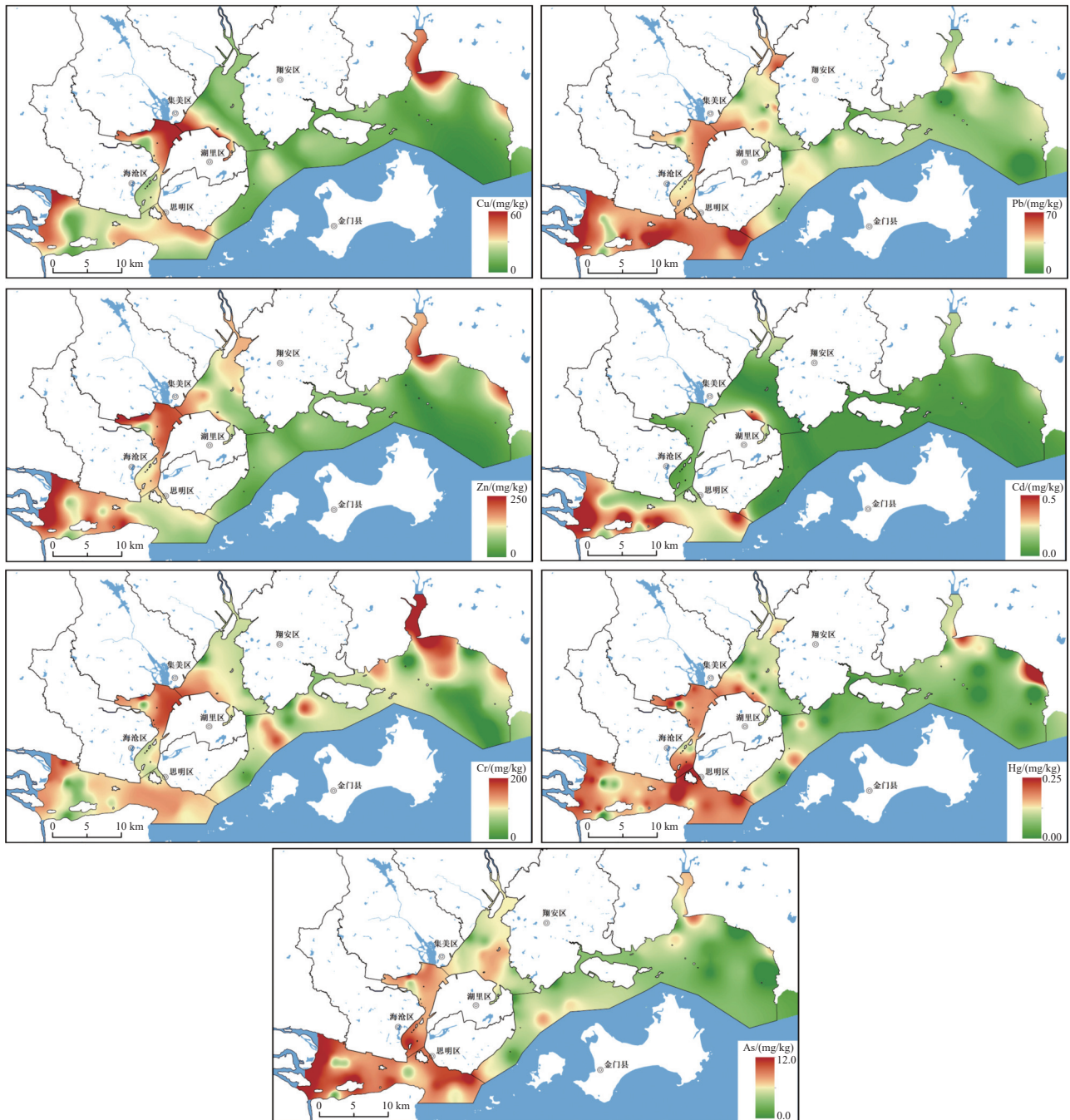


图2 厦门湾近岸海域表层沉积物不同重金属元素含量分布图
Fig.2 Distribution of heavy metals in surface sediments of offshore area in the Xiamen Bay

表 2 厦门湾表层沉积物重金属含量

Table 2 Contents of heavy metals in the surface sediments in the Xiamen Bay

区域	项目	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Hg	As
	一类标准值/(mg/kg)	35.0	60.0	150.0	0.50	80.0	0.20	20.0
西港	含量范围/(mg/kg)	6.0~52.8	18~49	42~298	BDL~0.26	12~99	0.007~0.131	3.94~11.2
	平均值/(mg/kg)	26.37	38.58	122.58	0.10	57.25	0.08	8.61
	变异系数/%	47.50	22.10	51.60	83.60	39.20	39.90	23.30
	超一类标准率/%	25.00	0.00	16.67	0.00	8.33	0.00	0.00
九龙江	含量范围/(mg/kg)	4.6~40.4	22~74	39~180	BDL~0.73	12~81	0.013~0.164	3.33~12.9
	平均值/(mg/kg)	24.45	48.03	107.41	0.25	50.76	0.085	9.35
	变异系数/%	36.80	26.20	39.50	71.50	33.20	37.80	27.70
	超一类标准率/%	10.34	10.34	20.69	10.34	3.45	0.00	0.00
海东	含量范围/(mg/kg)	BDL~65.4	BDL~47	BDL~203	BDL~0.21	BDL~202	BDL~0.235	0.48~9.58
	平均值/(mg/kg)	14.15	27.36	48.32	0.05	45.18	0.043	5.15
	变异系数/%	96.40	42.70	91.30	149.50	92.90	107.300	41.80
	超一类标准率/%	3.57	0.00	7.14	0.00	7.14	3.57	0.00
同安湾	含量范围/(mg/kg)	1.4~67.5	13~52	14~144	BDL~0.68	4~70	BDL~0.123	3.63~9.03
	平均值/(mg/kg)	19.44	35.61	77.28	0.10	46.89	0.058	6.76
	变异系数/%	81.10	30.60	43.30	174.40	35.30	50.200	21.50
	超一类标准率/%	11.11	0.00	0.00	5.56	0.00	0.00	0.00
厦门湾合计	含量范围/(mg/kg)	BDL~67.5	BDL~74	BDL~298	BDL~0.73	BDL~202	BDL~0.235	0.48~12.90
	平均值/(mg/kg)	20.36	37.51	84.25	0.13	49.06	0.065	7.36
	变异系数/%	65.40	37.60	62.20	122.20	57.00	62.000	37.90
	超一类标准率/%	10.34	3.45	12.64	4.6	4.6	1.15	0

重金属元素均未超一类标准。九龙江河口 T39 站点 Cd 含量为厦门湾区最高, 达 0.73 mg/kg, T40 站点 As 含量为厦门湾区最高, 达 12.9 mg/kg, H55 站点 Pb 含量为厦门湾区最高, 达 74.0 mg/kg; 海东地区重金属整体含量最低, 仅石井江河口区 T12 站点 Cr 含量为湾区最好, 达 202 mg/kg, 超二类标准, 围头湾 T09 站点 Hg 含量为厦门湾区最高, 达 0.235 mg/kg, 超一类标准; 同安湾重金属质量含量相对较低, 仅 Cu 和 Cd 存在超一类标准的现象, 且 T24 站点 Cu 含量为全区最高, 达 67.5 mg/kg, 其他重金属元素均未超一类标准。湾区底质沉积物中 Pb 和 As 元素含量的变异系数最小, 分别为 37.60% 和 37.90%, 表明 Pb 和 As 元素在全区含量分布相对稳定。毒性较强的 Cd 元素含量空间变异性最大, 湾区变异系数为 122.20%, 较其他重金属元素具有更强的空间变异性, 表明其在局部地区受到了某种潜在来源的强烈控制。厦门湾区重金属高值站点多分布于河流入海口和近岸滩涂区, 显示陆源物质对海域底质沉积物重金属含量影响强烈。

厦门湾底质沉积物重金属富集系数从大到小依次为 Cu (1.01) > Cr (0.99) > Cd (0.70) > Zn (0.64) > Pb (0.63) > As (0.48) > Hg (0.33)。Cu 表现为轻度富

集, Cr 与本底值接近, Cd、Zn、Pb、As 和 Hg 表现在底质沉积物中不富集的状态(图 3)。西港 Cd 富集系数最高, 达到 1.26, 其余重金属富集系数均小于 1。海东地区 Cr 富集系数为 1.24, Cu 富集系数为 1.22, 呈轻度富集状态, 其中南安市石井镇近岸海域富集系数达 5.21, 呈高度富集状态。九龙江河口和同安湾重金属富集系数均小于 1, 重金属均为不富集状态。

通过对各元素含量进行相关性分析, 可了解各元素之间随深度变化趋势的相似性, 能在一定程度上说明元素的来源是否一致, 是否受到人为输入的干扰(金阳等, 2024)。重金属元素、粒度、Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 间的 Pearson 相关性矩阵(表 3), Cu 和 Pb、Zn、Cr、Hg 具有强相关性 ($P < 0.01$, R^2 在 0.70~0.86), 说明这些元素可能有相似的来源。Zn 和 Cu、Pb、Hg、As 具有强相关性 ($P < 0.01$, R^2 在 0.70~0.86), 说明这些元素可能有相似的来源, 但 Pb 和 Cu、Zn 具有强相关性 ($P < 0.01$, R^2 分别为 0.70~0.71), 说明 Pb 和 Cu、Zn 具有相同的来源。As 仅与 Zn 具有强相关性, Cd 与其他重金属元素均为一般相关, 表明 Cd 的主要来源较其他重金属具有明显不同的来源途径。

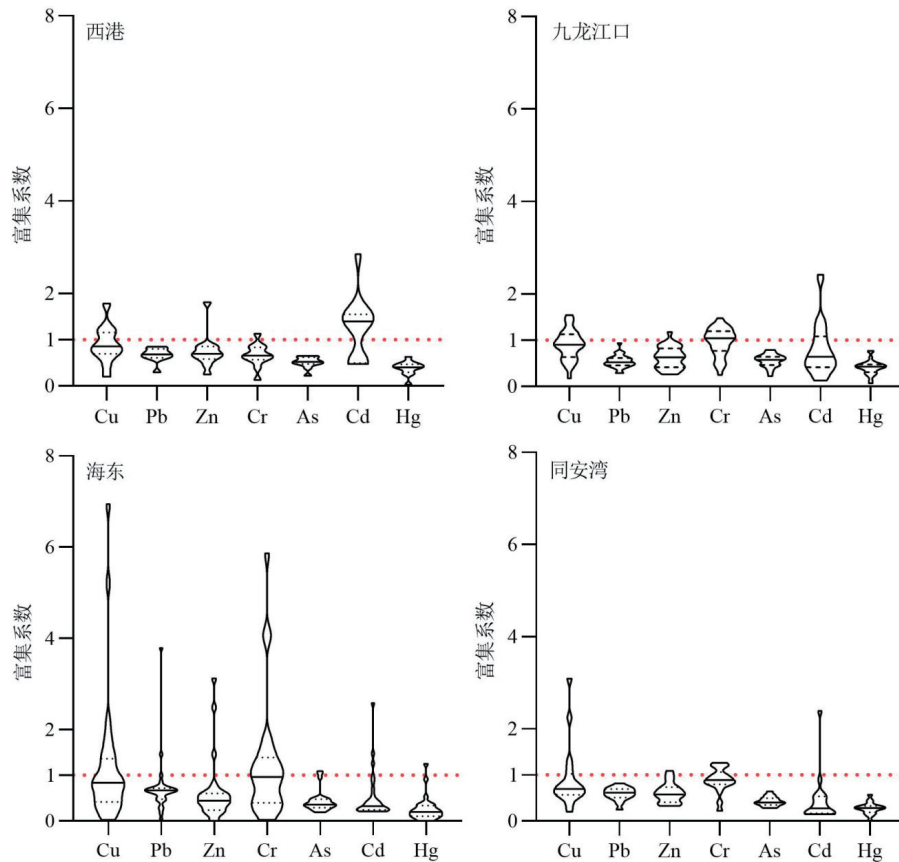


图 3 厦门湾沉积物重金属含量富集系数

Fig.3 Enrichment factors of heavy metals in the surface sediments in the Xiamen Bay

表 3 厦门湾近岸海域元素含量及粒度参数相关性分析

Table 3 Correlation analysis of element content and particle size parameters in the offshore marine areas of the Xiamen Bay

	平均粒径	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Hg	As	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
平均粒径	1.00									
Cu	0.18	1.00								
Pb	0.26*	0.70**	1.00							
Zn	0.13	0.86**	0.71**	1.00						
Cd	0.02	0.68**	0.68**	0.66**	1.00					
Cr	0.25*	0.72**	0.50**	0.60**	0.34**	1.00				
Hg	0.23*	0.71**	0.63**	0.70**	0.56**	0.48**	1.00			
As	0.24*	0.62**	0.67**	0.71**	0.61**	0.42**	0.68**	1.00		
Al ₂ O ₃	0.57**	0.41**	0.53**	0.48**	0.34**	0.36**	0.54**	0.61**	1.00	
Fe ₂ O ₃	0.60**	0.45**	0.51**	0.46**	0.32**	0.38**	0.57**	0.63**	0.89**	1.00

注：*表明相关性在 $P<0.05$ 水平下显著，**表明相关性在 $P<0.01$ 水平下显著。Al₂O₃和Fe₂O₃的单位为%，其余元素含量的单位为mg/kg，平均粒径的单位为 Φ 。

3.2 表层沉积物重金属演化分析

厦门湾历年底质沉积物重金属数据(董炜峰等, 2018; Fu et al., 2022)和本次样品测试结果显示, 湾区Cu含量高值区位于西港, 含量均超过区域背景值, 2014—2016年西港Cu平均含量最高为42.10 mg/kg, 其他地区Cu含量平均值均接近区域背景

值。Pb平均含量均接近背景值含量, 仅2004—2006年西港Pb平均含量为历年最高值, 达153.33 mg/kg, 超二类标准。Zn含量高值区主要分布于西港和九龙江河口区, 其中2007—2009年和2010—2013年九龙江河口Zn含量分别为170.2 mg/kg和206.71 mg/kg, 均高于区域Zn含量背景值, 超过一

类标准;其他时期 Zn 元素含量均接近区域沉积物背景值。Cd 含量高值区主要分布于西港和九龙江河口。其中西港 2007—2009 年沉积物中 Cd 平均含量为同期最高,高于区域背景值。其他时期 Cd 平均含量最高值均位于九龙江河口,仅 2014—2016 年低于区域背景值,海东和同安湾 Cd 平均含量均低于区域背景值。Cr 平均含量在 2007—2009 年呈现较低状态,2010—2021 年沉 Cr 含量呈上升趋势,其中西港 Cr 平均含量由 2007—2009 年的 5.50 mg/kg 持续增加到 2021 年的 57.25 mg/kg,九龙江河口区 2010—2021 年 Cr 元素平均含量均超区域背景值。海东和同安湾 2021 年 Cr 平均含量同样呈明显上升的趋势。厦门湾沉积物 Hg 含量平均值高值区分布较为分散,不同时期的西港、九龙江河口和同安湾均有高值区分布,Hg 平均含量均未超区域背景值。As 平均含量高值区分布较为集中,仅 2004—2006 年 As 元素高值区分布于西港,且超过区域背景值,其他时期均分布于九龙江河口,平均含量均未超区域背景值(图 4)。

对比分析历史研究数据,厦门湾各区域的表层沉积物重金属多年平均含量基本稳定。受采样站位的位置、采样时间、站位数等差异的影响,根据已有的数据量,部分元素的含量无法给出一个很客观的参考数据或年际变化规律等,但总体而言,九龙江口至西港海域一侧海域的重金属含量水平高于同安和海东地区,与厦门湾区各区域多年来的经济、环境等发展状况相符合。2021 年重金属含量呈现不同程度的下降趋势,厦门湾底质沉积物环境质量有所改善,但 Cr 含量呈现上升趋势,特别是西港地区在 2007—2021 年 Cr 含量呈持续上升趋势。西港地区 Cr 含量明显高于其他地区,海沧地区较多集成电路工厂和电光源厂是 Cr 的主要污染源(何海星, 2014),港口货船的压舱水或污水排放也可能是 Cr 的潜在来源(张海军等, 2021)。

3.3 表层沉积物重金属来源分析

由于厦门湾地处中国东南沿海地区,侵入岩广泛分布于湾区上游的低山丘陵区,其主要类型为黑云母花岗岩,是厦门湾沉积物的重要物源(刘用清, 1995)。九龙江为厦门湾最主要的入海通道,以其中上游的龙岩地区(马坑)和漳平地区(潘洛)为代表,上游铅锌与铁锰矿床开采,以及由此引发的水

土流失现象较为严重(林承奇等, 2015)。此外,各入海通道所在流域因农业活动所造成的非点源污染,以及陆域人类活动所造成的化石燃料排放,均对湾内沉积物重金属含量产生深刻影响(彭博等, 2021)。综合厦门湾地质背景与人类活动特征,本文将厦门湾沉积物重金属的潜在来源限定为矿山冶炼及工业污水、天然母岩风化、农业与生活污水排放以及化石燃料的燃烧。PMF 源解析结果(源成分谱矩阵)表明,上述四种主要来源对厦门湾沉积物重金属的贡献程度依次为 36.16%、22.03%、21.98% 以及 19.83%(表 4)。

Cr、Zn、Cd 以及 Cu 一般与矿山冶炼以及电镀行业有关。考虑到厦门湾各主要河流上游沿岸的采矿活动,以及近岸较为发达的电镀等轻工业,根据 PMF 解析结果,判断上述元素的主要来源为矿山冶炼,该来源对上述元素的贡献率分别为 65.08%、46.79%、74.22% 以及 49.14%(图 5)。

海洋沉积物中 As 一般与化石燃料燃烧有关,且随地表径流输入的陆域农业影响也是 As 的重要来源。解析也表明 As 有两种主要来源,结合厦门湾及九龙江流域上游产业结构,判断两种主要来源分别对应燃料燃烧与农业面源污染。该两种因素的贡献率分别为 85.76% 与 14.16%。

Pb 的含量主要受母岩风化所控制,未来可结合 Pb 同位素对沉积物潜在来源进行深入剖析。Hg 的含量较高、潜在生态风险较大,与本项目组 2020 年在泉州湾所得结论相同,源解析表明 Hg 的来源主要为母岩风化(61.31%),可能与区域地球化学异常有关,未来应对厦门湾沉积物中 Hg 的形态、分布以及生物地球化学过程展开深入研究。

3.4 近岸海域沉积物潜在生态风险评价

基于各元素相较于自然本地的富集程度,进一步使用潜在生态风险指数法(表 5),综合考虑沉积物中重金属的含量、分布以及重金属毒性,计算了厦门湾沉积物的潜在生态风险指数(RI),评价厦门湾沉积物潜在生态风险,识别导致生态风险的主控因素。

评价结果表明,各元素对生态环境所造成的潜在生态风险依次为 Cd > Hg > As > Ni > Pb > Cu > Cr > Zn,单指标达到中度风险的为 Cd。潜在生态风险指数平均值 105.35,表明整体上厦门湾沉积物

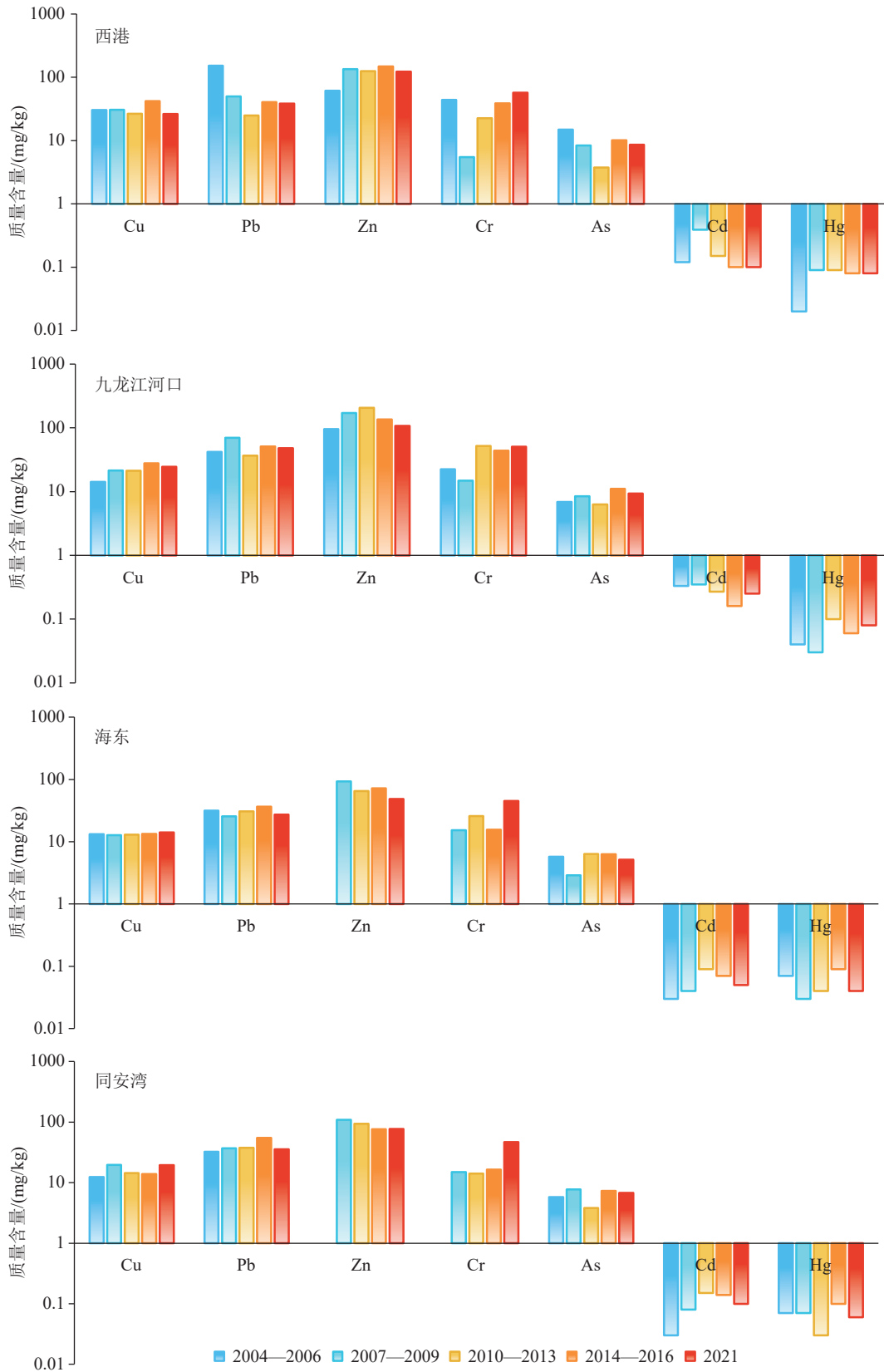


图 4 2004—2021 年厦门湾海域表层沉积物重金属含量图
Fig.4 Map of heavy metal content in surface sediment of the Xiamen Bay from 2004 to 2021

表 4 不同来源贡献率 PMF 模型解析结果
Table 4 Contribution of different potential sources calculated by PMF model

元素	因子贡献/%			
	矿山冶炼	母岩风化	农业与污水	化石燃料
Cr	65.08	18.89	1.43	14.61
Ni	32.30	27.30	28.90	11.50
Zn	46.76	0.00	53.24	0.00
As	0.00	0.09	14.16	85.76
Pb	21.84	50.18	14.59	13.39
Cu	49.14	7.28	24.80	18.78
Cd	74.22	11.17	0.00	14.61
Hg	0.00	61.31	38.69	0.00
综合贡献率/%	36.17	22.03	21.98	19.83

的潜在生态风险为轻度水平, 但空间差异明显, 局部地区可能达到中高风险(图 6)。通过计算各站位表层沉积物的潜在生态风险指数, 可以明显看出中风险以及重度风险区主要集中在九龙江河口区以及厦门港附近。虽然各重金属的分布模式和潜在来源均有所差异, 但对厦门湾生态环境造成最主要影响的输入源是九龙江的地表径流以及厦门港的港口航运。

4 结 论

(1) 厦门湾重金属含量在西港区和九龙江河口较高, 西港区 Cu(26.23 mg/kg)、Zn(122.58 mg/kg)、Cr(57.25 mg/kg) 的含量最高, 九龙江口区 Pb(48.03 mg/kg)、Cd(0.25 mg/kg)、Hg(0.08 mg/kg)、As(9.32 mg/kg) 含量最高, 仅海东区石井江入海口(T12)Cr 含量超二类标准, Zn 超一类标准率最高, 为 12.64%。湾区 Pb 和 As 元素含量分布相对稳定, Cd 含量空间变异性最大。

(2) 厦门湾重金属富集系数从大到小依次为 Cu(1.01) > Cr(0.99) > Cd(0.70) > Zn(0.64) > Pb(0.63) > As(0.48) > Hg(0.33)。Cu 表现为轻度富集, Cr 与本底值接近, Cd、Zn、Pb、As 和 Hg 表现在底质沉积物中不富集的状态。

(3) 近 20 年来湾区沉积物中大部分重金属含量在保持稳定的前提下, 底质沉积物环境质量有所改善, 但西港地区 Cr 含量呈现持续上升的趋势, 海东

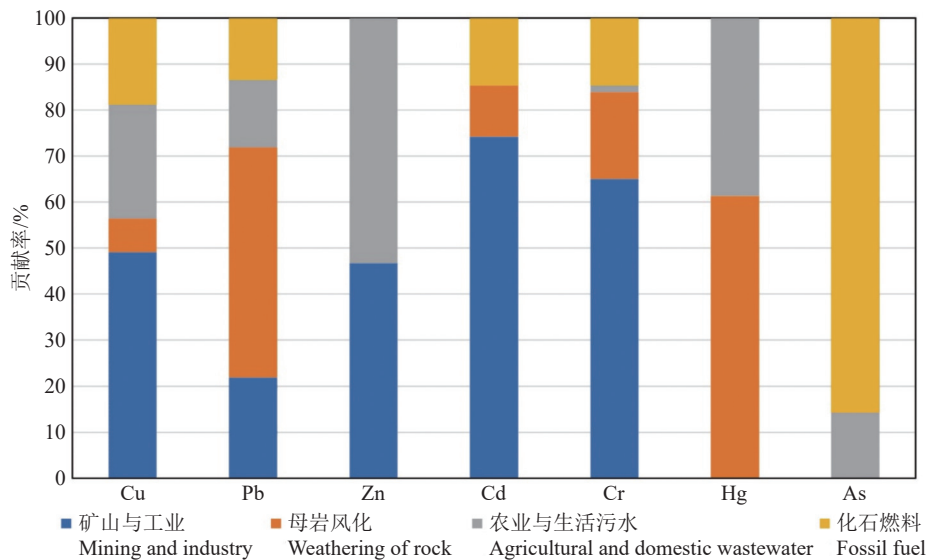


图 5 厦门湾表层沉积物重金属来源 PMF 源解析模型计算结果
Fig.5 Potential sources of heavy metals determined by PMF in surface sediments of the Xiamen Bay

表 5 各重金属背景值和毒性系数
Table 5 Background contents and toxicity index of heavy metals

指标值	Zn	Pb	Ni	Hg	Cu	Cr	Cd	As	Al
福建海岸带土壤背景值/(mg/kg)	83.6	39	17.4	0.063	22.4	40.7	0.06	6.38	9.79
重金属毒性系数	1	5	5	40	5	2	30	10	/
背景值(地壳)/(mg/kg)	63	18	21	0.009	17	44	0.075	2.8	7.49

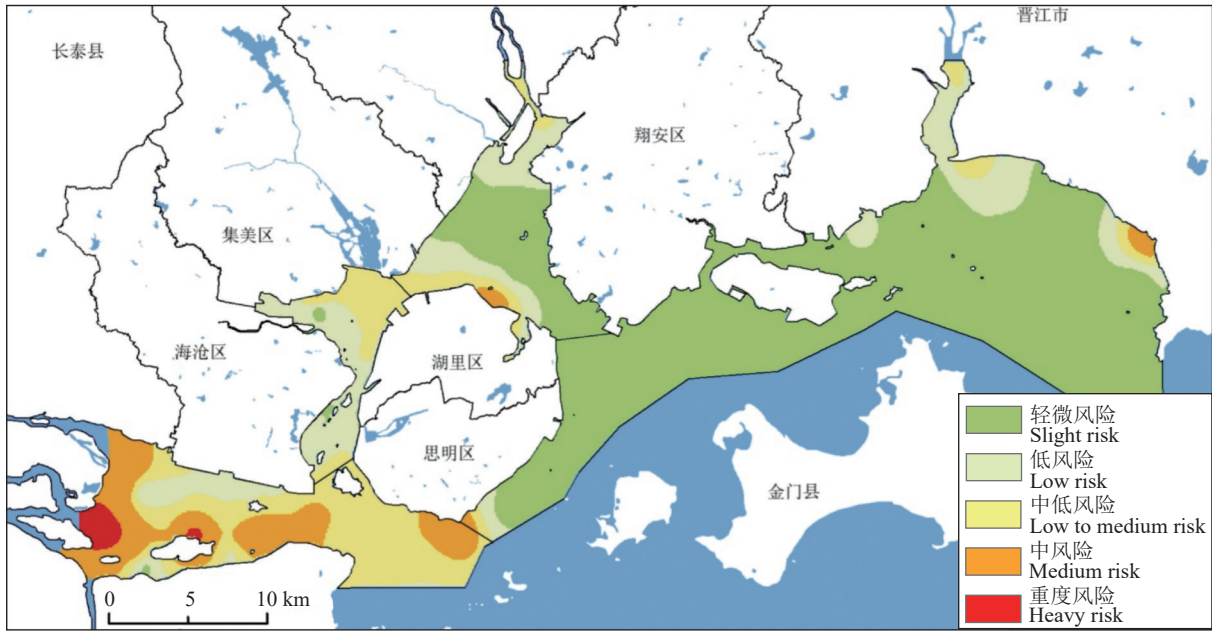


图6 厦门湾近岸海域表层沉积物潜在生态风险指数分布

Fig.6 Distribution of potential ecological index in surface sediments of offshore area in the Xiamen Bay

和同安湾地区 Cr 含量也呈现明显上升。

(4) 厦门湾重金属的潜在来源为矿山冶炼及工业污水贡献率为 36.16%、天然母岩风化 22.03%、农业与生活污水排放 21.98% 以及化石燃料的燃烧 19.83%，Cu、Zn、Cd、Cr 元素含量与矿山冶炼以及电镀行业有关。As 的来源分别为燃料燃烧贡献率为 85.76% 和农业面源污染 14.16%。Pb 和 Hg 的含量主要受母岩风化所控制。

(5) 沉积物潜在生态风险中风险以及重度风险区主要集中在九龙江河口区以及厦门港附近。各重金属的分布模式和潜在来源均有所差异，但对厦门湾生态环境造成最主要影响的输入源是九龙江的地表径流以及厦门港的港口航运。

References

- Cao Shengwei, Liu Chunlei, Li Yasong, Li Jing, Hao Qichen, Gao Jie, Dong Yan, Lu Chenming. 2022. Sources and ecological risk of heavy metals in the sediments of offshore area in Quanzhou Bay, Fujian Province[J]. *Geology in China*, 49(5): 1481-1496 (in Chinese with English abstract).
- Chen H Z, Wang J G, Chen J M, Lin H, Lin C. 2016. Assessment of heavy metal contamination in the surface sediments: A reexamination into the offshore environment in China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 113(1/2): 132-140.
- Chen Jian. 2016. General Report on Comprehensive Survey and

Evaluation of Offshore Marine in Fujian Province[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).

- Chen Song, Liao Wenzhuo, Xu Aiyu, Luo Bingkun. 1992. Chemical characteristics of surface sediment in West Xiamen Harbour[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 11(2): 131-137 (in Chinese with English abstract).
- Chen Song, Xu Aiyu, Luo Bingkun. 1987. Distribution and sources of heavy metals in sediments from the Xiamen harbour[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 6(2): 139-145 (in Chinese with English abstract).
- Dong Weifeng, Zhang Yu, Dai Guixiang, Su Rong, Yuan Chunwei, Liu Zhiyong. 2018. Spatial and temporal distribution and integrated ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediments from Xiamen Sea Area over past 40 years[J]. *Journal of Marine Sciences*, 36(3): 89-95 (in Chinese with English abstract).
- Fu S F, Wu H Y, Chen H Z, Cai X Q, Pan Xi, Wu Y B. 2022. Spatiotemporal variation of surface sediment quality in the Xiamen Sea Area, China[J]. *Journal of Environmental and Public Health*, (12): 1-8.
- Hai Reti, Xie Tao, Qi Fengxia. 2006. Characteristics of distribution of heavy metals and mineral matter in sediments of Bohai Bay in Tianjin's sea area[J]. *Environmental Science & Technology*, 29(6): 6-8,42,115 (in Chinese with English abstract).
- Han Lu, Yu Ruilian, Hu Gongren, Yang Qiuli, He Haixing. 2017. Speciation and pollution assessment of heavy metals in the core sediment of Western Xiamen Bay[J]. *Earth and Environment*, 45(3): 342-347 (in Chinese with English abstract).
- He Haixing, Yu Ruilian, Hu Gongren, Yu Weihe, Zhou Chufan. 2014. Pollution history and source of heavy metals in coastal sediments

- from Xiamen Western Bay[J]. *China Environmental Science*, 34(4): 1045–1051 (in Chinese with English abstract).
- He Haixing. 2014. Pollution of Heavy Metals and Pb–Sr Isotopic Implication in the Offshore Sediments from Xiamen Western Bay[D]. Quanzhou: Huaqiao University (in Chinese with English abstract).
- Hong Liyu, Chen Weiqi, Hong Huasheng, Xu Li, Wang Xinhong. 2000. Concentrations and distributions of Cu, Pb, Zn, Cd in surface sediments from Xiamen Jinmen sea area[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 19(4): 441–445 (in Chinese with English abstract).
- Jin Yang, Jiang Yuehua, Zhou Quanping, Wang Xiaolong, Zhang Hong, Mei Shijia, Chen Zi, Yang Hai, Lü Jinsong, Hou Lili, Qi Qiuju, Jia Zhengyang, Yang Hui. 2024. Characteristics and ecological risk assessment of sedimentary heavy metals from the Lower Mainstream of Yangtze River[J]. *Geology in China*, 51(1): 276–289 (in Chinese with English abstract).
- Li Guihai, Cao Zhimin, Lan Dongzhao, Xu Jiang, Guan Wei. 2008. Variation of depositional environment and accumulation of heavy metals in West Harbour, Xiamen[J]. *Earth Science*, 33(1): 124–130 (in Chinese with English abstract).
- Li Guihai. 2007. Environmental Geochemistry of Heavy Metals and Depositional Environment in Xiamen Seas[D]. Qingdao: Ocean University of China (in Chinese with English abstract).
- Li Guihai, Lan Dongzhao, Cao Zhimin, Xu Jiang, Wang Shanshan, Lan Binbin. 2007. Specificity and potential ecological risks of heavy metals in the sediments of the Xiamen Sea Area[J]. *Marine Science Bulletin*, 26(1): 67–72 (in Chinese with English abstract).
- Li Qingsheng, Wang Cui, Jiang Jinlong, Huang Jinliang, Wu Yaojian. 2020. Pollution characteristics and source apportionment of heavy metals in the surface sediments of the Jiulong River Estuary[J]. *Marine Sciences*, 44(12): 32–43 (in Chinese with English abstract).
- Liao Wenzhuo, Pan Jiezai, Chen Song. 1983. The distribution and behaviour of Cd, Cu, Pb, in the surface sediments of the Jiulong river mouth and Xiamen harbour[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2(1): 47–53 (in Chinese with English abstract).
- Lin Cai, Lin Hui, Chen Jinmin, Chen Weifen, Lin Libin, Ji Weidong. 2011. Pollution assessment of heavy metals in the sediment of Jiulong River Estuary[J]. *Marine Sciences*, 35(8): 11–17 (in Chinese with English abstract).
- Lin Chengqi, Hu Gongren, Yu Ruilian. 2015. Lead pollution and isotopic tracing in intertidal sediments of Jiulong River downstream[J]. *China Environmental Science*, 35(8): 2503–2510 (in Chinese with English abstract).
- Liu Qiongyu, Hong Huasheng, Hong Liyu. 1995. Distribution features and sources of Cu, Pb, Zn and Cd in Xiamen western sea sediments[J]. *Marine Science Bulletin*, 14(6): 46–52 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shengran, Wang Tiewu, Yang Jie, Meng Jing, He Bo, Zhao Hui, Xiao Rongbo. 2019. Source apportionment methods of soil heavy metals in typical urban units: An empirical study[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 39(4): 1278–1289 (in Chinese with English abstract).
- Liu W X, Li X D, Shen Z G, Wang D C, Wai O W H, Li Y S. 2003. Multivariate statistical study of heavy metal enrichment in sediments of the Pearl River Estuary[J]. *Environmental Pollution*, 121(3): 377–388.
- Liu Xiangqi, Song Lei, Wu Qilong, Li Guomin, Mao Xin. 2020. Application of the affinity propagation clustering algorithm based on grain-size distribution curve to discrimination of sedimentary environment—A case study in Baiyangdian area[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 40(1): 198–209 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongqing. 1995. Study and application of the soil environmental background values in Fujian coastal zone[J]. *Marine Environmental Science*, 14(2): 68–73.
- Lü Ronghui. 1987. Study on heavy metal pollution status in Xiamen Port waters—(II) Research on water quality, sediment and distribution characteristics of organisms in Xiamen Port waters[J]. *Marine Environmental Science*, 6(3): 1–8 (in Chinese).
- Ma R, Zhang B, Zhou X N. 2020. The effects of climate change and groundwater exploitation on the spatial and temporal variations of heavy metal content in maize in the Luan River catchment of China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 42(2): 1035–1052.
- Mao Xin, Liu Linjing, Song Lei, Jiang Gaolei, Li Junfeng, Li Changan. 2021. A 70 year sedimentary record of eco-environment changes in Baiyangdian Lake and its influencing factors[J]. *Earth Science*, 46(7): 2609–2620 (in Chinese with English abstract).
- Miao X Y, Hao Y P, Zhang F W, Zou S Z, Ye S Y, Xie Z Q. 2020. Correction to: Spatial distribution of heavy metals and their potential sources in the soil of Yellow River Delta: A traditional oil field in China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 42(2): 7–26.
- Nishijima W, Umehara A, Okuda T, Nakai S. 2015. Variations in macrobenthic community structures in relation to environmental variables in the Seto Inland Sea, Japan[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 92(1–2): 90–98.
- Niu Hongyi, Wu Qunhe, Chen Xingeng. 2006. Distribution characteristics and correlations of heavy metals in the surface sediments in Guangzhou section of the Pearl River[J]. *Ecology and Environment*, 15(5): 954–959 (in Chinese with English abstract).
- Paatero P. 1997. Least squares formulation of robust non-negative factor analysis[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 37(1): 23–35.
- Peng Bo, Wang Jilong, Tong Meng, Wu Bin, Liu Xiaoqiang, Niu Shujie, Lin Mudong, Zhang Huua, Li Maotian, Yu Junjie. 2021. Heavy metal deposition and its impact on ecological environment in Sanduao Bay of Fujian Province during the past century under the influence of human activities[J]. *Geology in China*, 48(6): 1759–1769 (in Chinese with English abstract).
- Shen Chenyu, Yan Yu, Yu Reilian, Hu Gongren, Cui Jianyong, Yan

- Yan, Huang Huanbin. 2022. APCS-MLR combined with PMF Model to analyze the source of metals in sediment of Xinglin Bay suburban watershed, Xiamen[J]. *Environmental Science*, 43(5): 2476-2488 (in Chinese with English abstract).
- Sheng Dan. 2012. Chronology and Geochemistry of Intermediate Dikes, Host Granitoids and Enclaves in the Xiamen—Zhangzhou Area[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Soto-Jiménez M, Páez-Osuna F. 2001. Cd, Cu, Pb, and Zn in lagoonal sediments from Mazatlán Harbor (SE Gulf of California): Bioavailability and geochemical fractioning[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 66(3): 350-356.
- Tu Chunlin, Yang Kun, He Chengzhong, Zhang Liankai, Li Bo, Wei Zong, Jiang Xin, Yang Minghua. 2023. Sources and risk assessment of heavy metals in sediments of small watersheds in typical coal mining areas of Eastern Yunnan[J]. *Geology in China*, 50(1): 206-221 (in Chinese with English abstract).
- Tang H J, Ke Z X, Yan M T, Wang W J, Nie H Y, Li B X, Zhang J P, Xu X R, Wang J. 2018. Concentrations, distribution, and ecological risk assessment of heavy metals in Daya Bay, China[J]. *Water*, 10(6): 780.
- Wan Rui'an, Han Lu, Yu Ruilian, Hu Gongren, Cui Jianyong, Yan Yan, Huang Huanbin. 2019. Determination of background values of heavy metals in coastal sediment of the Western Bay, Xiamen[J]. *Earth and Environment*, 47(3): 352-360 (in Chinese with English abstract).
- Wang Weili, Geng Anchao, Liu Huatai, Gao Aiguo. 2013. Distribution and potential ecological risk evaluation of heavy metals in the surface sediments from the Jiulongjiang River Estuary[J]. *Advances in Marine Science*, 27(4): 502-508 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xin, Qiao Shuqing, Gao Jingjing, Zhu Aimei, Bu Wenrui, Guo Jingtian. 2013. Distribution patterns of heavy metals in surface sediments and environmental quality assessment on the adjacent sea area of Xiaomai Island[J]. *Marine Science Bulletin*, 32(3): 287-295 (in Chinese with English abstract).
- Xia P, Meng X W Yin P, Cao Z M, Wang X Q. 2010. Eighty-year sedimentary record of heavy metal inputs in the intertidal sediments from the Nanliu River estuary, Beibu Gulf of South China Sea[J]. *Environmental Pollution*, 159(1): 92-99.
- Xu Q H, Ma W T, Chen W F. 1985. Application of factor analysis method in the study of sediment pollution in Xiamen Port[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 7(3): 306-312.
- Yu Ruilian, Yu Hewei, Hu Gongren, He Haixing, Lin Chengqi. 2013. Speciation and potential ecological risk of heavy metals in the surface sediments from upstream of Jiulong river estuary[J]. *Environmental Chemistry*, 32(12): 2321-2328 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Haijun, Shi Benning, Jiao Xueyao, Wu Hailun, Zhou Lin, Shen Xiaoxue, Li Ruili. 2021. Spatial distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in Shenzhen coastal areas[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 57(4): 679-690 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shisan, Huang Yankuan, Zeng Xianshi. 1984. Content distribution of heavy metal elements in Jiulongjiang estuary sediments at different grain levels[J]. *Environmental Science*, 5(3): 31-35 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹胜伟, 刘春雷, 李亚松, 李静, 郝奇琛, 高洁, 董岩, 陆晨明. 2022. 福建泉州湾近岸海域沉积物重金属来源分析与生态风险评价[J]. *中国地质*, 49(5): 1481-1496.
- 陈坚. 2016. 福建省近海海洋综合调查与评价总报告[M]. 北京: 科学出版社.
- 陈松, 廖文卓, 许爱玉, 骆炳坤. 1992. 厦门西港表层沉积物的化学特征[J]. *应用海洋学学报*, 11(2): 131-137.
- 陈松, 许爱玉, 骆炳坤. 1987. 厦门港湾表层沉积物中重金属的富集和来源探讨[J]. *应用海洋学报*, 6(2): 139-145.
- 董炜峰, 张瑜, 戴桂香, 苏荣, 袁春伟, 刘志勇. 2018. 近 40a 厦门海域表层沉积物重金属时空分布及综合生态风险评价[J]. *海洋学研究*, 36(3): 89-95.
- 海热提, 谢涛, 齐凤霞. 2006. 天津海域底质重金属分布与矿物质特征研究[J]. *环境科学与技术*, 29(6): 6-8, 42, 115.
- 韩璐, 于瑞莲, 胡恭任, 杨秋丽, 何海星. 2017. 厦门西港潮间带柱状沉积物重金属赋存形态与污染评价[J]. *地球与环境*, 45(3): 342-347.
- 何海星. 2014. 厦门西港近岸海域沉积物重金属污染及铅镉同位素示踪研究[D]. 泉州: 华侨大学.
- 何海星, 于瑞莲, 胡恭任, 余伟河, 周楚凡. 2014. 厦门西港近岸沉积物重金属污染历史及源解析[J]. *中国环境科学*, 34(4): 1045-1051.
- 洪丽玉, 陈伟琪, 洪华生, 徐立, 王新红. 2000. 厦门-金门海域表层沉积物中重金属铜铅锌镉的含量分布[J]. *应用海洋学学报*, 19(4): 441-445.
- 金阳, 姜月华, 周权平, 王晓龙, 张鸿, 梅世嘉, 陈孜, 杨海, 吕劲松, 侯莉莉, 齐秋菊, 贾正阳, 杨辉. 2024. 长江下游干流沉积物重金属特征及生态风险评价[J]. *中国地质*, 51(1): 276-289.
- 李桂海. 2007. 厦门海域现代沉积环境及重金属元素的环境地球化学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学.
- 李桂海, 曹志敏, 蓝东兆, 许江, 关伟. 2008. 厦门西港沉积环境变化及重金属的污染累积[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 33(1): 124-130.
- 李桂海, 蓝东兆, 曹志敏, 许江, 王珊珊, 蓝彬斌. 2007. 厦门海域沉积物中的重金属及其潜在生态风险[J]. *海洋通报*, 26(1): 67-72.
- 李青生, 王翠, 蒋金龙, 黄金良, 吴耀建. 2020. 九龙江口表层沉积物重金属的污染特征与来源分析[J]. *海洋科学*, 44(12): 32-43.
- 廖文卓, 潘皆再, 陈松. 1983. 九龙江口厦门港沉积物中镉、铜、铅的分布和行为[J]. *应用海洋学学报*, 2(1): 47-53.
- 林彩, 林辉, 陈金民, 陈维芬, 林力斌, 暨卫东. 2011. 九龙江河口沉积物重金属污染评价[J]. *海洋科学*, 35(8): 11-17.
- 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲. 2015. 福建九龙江下游潮间带沉积物铅污

- 染及同位素示踪[J]. *中国环境科学*, 35(8): 2503–2510.
- 刘琼玉, 洪华生, 洪丽玉. 1995. 厦门西海域表层沉积物重金属的分布特征及来源探讨[J]. *海洋通报*, 14(6): 46–52.
- 刘胜然, 王铁宇, 汤洁, 孟晶, 何博, 赵慧, 肖荣波. 2019. 典型城市单元的土壤重金属溯源方法与实证研究[J]. *生态学报*, 39(4): 1278–1289.
- 刘祥奇, 宋磊, 吴奇龙, 李国民, 毛欣. 2020. 基于粒度分布曲线的邻近传播聚类算法在沉积环境识别中的应用——以白洋淀地区为例[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 40(1): 198–209.
- 刘用清. 1995. 福建省海岸带土壤环境背景值研究及其应用[J]. *海洋环境科学*, 14(2): 68–73.
- 吕荣辉. 1987. 厦门港海域重金属污染状况研究—(II) 在厦门港海域水质、底质及生物体中分布特征的研究[J]. *海洋环境科学*, 6(3): 1–8.
- 毛欣, 刘林敬, 宋磊, 姜高磊, 李峻峰, 李长安. 2021. 白洋淀近 70 年生态环境演化过程及影响因素[J]. *地球科学*, 46(7): 2609–2620.
- 牛红义, 吴群河, 陈新庚. 2006. 珠江(广州河段)表层沉积物中重金属的分布特征及相关性研究[J]. *生态环境*, 15(5): 954–959.
- 彭博, 王继龙, 同萌, 武彬, 刘晓强, 牛淑杰, 林沐东, 张华, 李茂田, 于俊杰. 2021. 人类活动影响下福建三都澳近百年来重金属沉积记录及其对生态环境的影响[J]. *中国地质*, 48(6): 1759–1769.
- 沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌. 2022. APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源[J]. *环境科学*, 43(5): 2476–2488.
- 盛丹. 2012. 厦门—漳州地区白垩纪中性岩脉群、花岗岩类及其包体的年代学和地球化学[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 涂春霖, 杨坤, 和成忠, 张连凯, 李博, 魏总, 姜昕, 杨明花. 2023. 滇东典型煤矿区小流域沉积物重金属来源及风险评价[J]. *中国地质*, 50(1): 206–221.
- 万瑞安, 韩璐, 于瑞莲, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌. 2019. 厦门西港近岸沉积物中重金属元素背景值的确定[J]. *地球与环境*, 47(3): 352–360.
- 王伟力, 耿安朝, 刘花台, 高爱国. 2013. 九龙江口表层沉积物重金属分布及潜在生态风险评价[J]. *海洋科学进展*, 27(4): 502–508.
- 王昕, 乔淑卿, 高晶晶, 朱爱美, 卜文瑞, 郭敬天. 2013. 小麦岛附近海域表层沉积物重金属分布特征及环境评价[J]. *海洋通报*, 32(3): 287–295.
- 于瑞莲, 余伟河, 胡恭任, 何海星, 林承奇. 2013. 九龙江河口上游表层沉积物中重金属赋存形态及生态风险[J]. *环境化学*, 32(12): 2321–2328.
- 张海军, 史本宁, 焦学尧, 吴海轮, 周琳, 沈小雪, 李瑞利. 2021. 深圳近海环境重金属空间分布特征与风险评价[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 57(4): 679–690.
- 张士三, 黄衍宽, 曾石羨石. 1984. 九龙江口沉积物中重金属元素在不同粒径中的含量分配[J]. *环境科学*, 5(3): 31–35.