

doi: 10.12029/gc20220508

曹胜伟, 刘春雷, 李亚松, 李静, 郝奇琛, 高婕, 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.

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).

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

曹胜伟^{1,2}, 刘春雷¹, 李亚松^{1,2}, 李静³, 郝奇琛¹, 高婕⁴, 董岩¹, 陆晨明¹

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 福建省水循环与生态地质过程重点实验室, 福建 厦门 361021; 3. 中国地质大学环境学院, 湖北 武汉 430078; 4. 福建省地质调查研究院, 福建 福州 350013)

摘要:【研究目的】受重金属含量影响, 泉州湾表层沉积物环境质量面临巨大生态风险, 然而重金属含量影响因素及潜在来源研究相对薄弱。【研究方法】通过采集泉州湾近岸海域表层沉积物样品, 以元素含量及粒度分析归纳出重金属分布特征、富集程度为基础, 使用 Hakanson 生态风险指数法识别湾内沉积物潜在生态风险程度, 并进一步通过正定矩阵因子分解法及主成分分析, 定量分析不同重金属主要来源。【研究结果】在晋江与洛阳江交汇处出现沉积物粒度低值区, 易于重金属富集, 表层沉积物重金属富集程度为 $Hg > As > Cd > Pb > Zn > Cu > Cr > Ni$ 。湾内沉积物整体处于中度生态风险状态, Cd 对生态风险贡献程度最高 (37.90%), 其次为 Hg (29.38%)。Cr 与 Ni 主要源于母岩风化, Cu 与 Zn、Pb 受母岩风化影响及矿山冶炼的共同影响, Cd 与 As 分别主要源自近岸污水排放与燃料燃烧, 而 Hg 的来源较为复杂。研究区表层重金属主要来源依次为矿山冶炼、母岩风化、污水排放以及燃料燃烧, 贡献率依次为 33.95%, 31.16%, 22.26% 与 12.21%。【结论】陆域物质随地表径流的输送对泉州湾表层沉积物生态环境质量造成了巨大风险, 未来需要特别加强对不同介质中 Hg 的归趋及环境行为研究。

关键词:海水; 重金属; 源解析; 正定矩阵因子; 生态风险; 地质调查工程; 泉州湾; 福建

创新点: (1) 基于沉积物粒度分析与 GIS 分析相结合的方法, 分析泉州湾近岸海域表层沉积物重金属分布影响因素; (2) 使用 PMF 等多元统计方法定量确定泉州湾近岸海域表层沉积物的主要来源, 为中国东南沿海典型河口区沉积物环境质量研究提供方法上的参考依据。

中图分类号: X55; X826 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)05-1481-16

Sources and ecological risk of heavy metals in the sediments of offshore area in Quanzhou Bay, Fujian Province

CAO Shengwei^{1,2}, LIU Chunlei¹, LI Yasong^{1,2}, LI Jing³, HAO Qichen¹,
GAO Jie⁴, DONG Yan¹, LU Chenming¹

收稿日期: 2021-12-29; 改回日期: 2022-02-16

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20190303) 及中央级科研院所基本科研业务费专项 (SK202114) 联合资助。

作者简介: 曹胜伟, 男, 1993 年生, 硕士, 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。

通讯作者: 刘春雷, 男, 1984 年生, 硕士, 助理研究员, 主要从事水文地质和地热地质研究工作; E-mail: chunleiliu-dn@163.com。

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory of Water Cycling and Eco-Geological Processes, Xiamen 361021, Fujian, China; 3. School of Environment Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430078, Hubei, China; 4. Fujian Institute of Geological Survey, Fuzhou 350013, Fujian, China)

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

[Objective] The environmental quality of surface sediments in Quanzhou Bay faces great ecological risks caused by heavy metals, but the researches focused on the influencing factors and potential sources were relatively weak. **[Methods]** By collecting surface sediment samples in offshore area of Quanzhou Bay, the distribution characteristics and enrichment degree of heavy metals were summarized based on element and grain size analysis, and the potential ecological risk was assessed using Hakanson method in study area. Positive definite matrix factor analysis (PMF) and principal component analysis (PCA) were further used to apportion the sources of heavy metals contamination. **[Results]** Grain size of surface sediments was low at the converging area of Jin river and Luoyang river, which were prone to enrich heavy metals. The order of surface sediments heavy metals enrichment factors was $Hg > As > Cd > Pb > Zn > Cu > Cr > Ni$. Overall ecological risk of surface sediments in Quanzhou Bay was moderate, and contribution of Cd to potential ecological risk was the highest (37.90%), followed by Hg (29.38%). Cr and Ni were mainly from rock weathering. Besides rock weathering, Cu, Zn and Pb were strongly affected by mining smelting. Cd and As were contributed by sewage disposal and fuel combustion, respectively. However, the sources of Hg were relatively complicated. Main sources of heavy metals in study area were mining smelting, rock weathering, sewage disposal and fuel combustion, and the contribution of them were 33.95%, 31.16%, 22.26% and 12.21%, respectively. **[Conclusions]** The transport of land substances with surface water runoff was the main cause for the ecological risk of surface sediments in Quanzhou Bay, and furthermore it is necessary to strength the research on the fate and environmental behavior of Hg in different media in the future.

Key words: sea water; heavy metal; source apportionment; positive matrix factorization; ecological risk; geological survey engineering; Quanzhou Bay; Fujian Province

Highlights: (1) Grain size and GIS analyses were combined and used to determine the factors affecting the distribution of heavy metals in surface sediments of Quanzhou Bay; (2) Multivariate statistical methods, such as PMF, were used to quantitatively determine the main sources of heavy metals in surface sediments of Quanzhou Bay, which provided a methodological reference for future study of sediment environmental quality in typical estuarine areas along the southeastern coast of China.

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

About the corresponding author: LIU Chunlei, male, born in 1984, master, assistant researcher, engaged in hydrogeology and geothermic; E-mail: chunleiliu-dn@163.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (NO.DD20190303) and Basic Research Funds for National Research Institutes(NO.SK202114).

1 引 言

重金属污染因其固有的毒性、广泛的来源、不可降解性以及持久性而备受关注(Wang et al., 2013),进入水体的重金属通过复杂的物理化学过程在河口沉积而造成重金属积累。海岸带与河口地处海陆交互地带,是全球变化和人类活动响应敏感的生态系统类型之一(饶清华等,2018),地质条件复杂,随着沿海地区工业化、城镇化程度快速提升,土地、水、岸线资源供需矛盾趋紧,局部地区出

现水土污染、湿地退化等环境问题(印萍等,2017;徐凉慧等,2018)。重金属元素以地表径流、大气沉降等形式进入滨海水生系统,在沉积物中富集,这部分稳定下来的重金属又有可能通过一系列物理化学反应,再次进入水体,造成“二次污染”(林承奇等,2020)。重金属进入海洋环境后,可与有机质、铁锰氧化物、硫化物和黏土共存,进而可通过食物链形成潜在的生物毒性(Hao et al., 2011;段晓勇等,2016),经生物吸收、富集最终通过食物链进入人体,对人体健康构成威胁(Wu et al., 2018;李军等,

2020)。

河口湿地重金属污染因当地经济发展、污染源和地理条件而异(Pan et al., 2012),陆域径流是重金属输入近海环境的主要途径之一,在此过程中伴随着农业肥料施用、矿山冶炼以及污水排放所产生的重金属进入河流,最终被带入河口地区。河口地区沉积物粒度分布的集中趋势可反映沉积介质的平均动能(刘昆等,2018),受沉积环境,特别是细粒沉积物和有机碳含量的影响(Ma et al., 2020;张倩,2020),重金属在水动力较弱的泥质沉积区出现富集,从而具有较高的生态风险(Xia et al., 2011)。河口地区兼具物质来源的复杂性及理化性质的梯度性,为解析该地区重金属的分布规律和潜在来源造成一定困难。精确判断河口地区重金属潜在来源,并科学评价重金属污染程度及其潜在生态风险水平,对保障湿地生态安全以及生态系统稳定性具有重要意义(李富等,2019;谢文平,2020)。

泉州湾地处晋江与洛阳江河口交汇区,区域人口与产业密集,经济发展迅猛(刘冰星等,2015)。近年来,随着湾内跨海大桥、填海造地以及入海河流上游水利工程的兴建(陈彬等,2004;汤军建等,2011;刘豫,2018),极大程度改变了陆域向近岸海域的物质输送模式,泉州湾不断淤浅导致岸线形态剧烈变化并使得近岸水体与沉积物环境质量不断下降(刘冰星等,2015)。目前对泉州湾沉积物重金属污染的研究主要集中在空间分布和评价等方面,而结合多元统计手段,综合考虑粒度特征示踪重金属来源的研究较为少见。因此本研究拟通过多元统计学方法,在综合分析泉州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并进行生态风险评价,以期对泉州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 研究区概况

研究区为福建东南沿海的泉州湾(118°38'03"~118°48'50"E, 24°45'50"~24°53'15"N),总面积约247.50 km²(图1)。泉州湾以惠安县秀涂村及石狮市石湖村为界,分为内湾与外湾,湾口向东敞开,为典型的构造湾与河口湾(谭芳林等,2010)。湾区年平均气温20.4℃,年平均降水量为1151 mm,全年

降水主要集中在6—8月,占全年总降水量的44%(游惠明等,2019;Liu et al., 2021)。湾内波浪作用相对较小,以潮流作用为主(王爱军等,2007)。湾区位于晋江与洛阳江交汇处,其中晋江为福建省第三大河,其污染物年入海量可达 4.7×10^3 t,其中各类重金属可达200 t(于瑞莲等,2008;泉州市海洋与渔业局,2011)。湾内潮间带宽度大,具有南北2条水道和多个口门,南水道位于马头山与小坠岛之间为湾内主航道(官宝聪等,2010),而北水道由于多年来的淤积作用通航能力有限。湿地内主要植被为互花米草(*Spartina alterniflora*)和红树林,红树林主要种类为桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、白骨壤(*Avicennia marina*)和秋茄(*Kandelia candai*)3类,近年来由于互花米草入侵、湾区内水动力条件下降以及工业与生活污水大量排放,对湾内海水与沉积物环境质量造成了巨大威胁(于瑞莲等,2013;Liu et al., 2022),湾内海域水质等级常年处于劣四类和四类,且富营养化等级以重度和中度为主(泉州市海洋与渔业局,2018)。

2.2 样品采集与测试

于2020年7月1日至7月12日,使用抓斗式采样器采集近岸海域底质样品45个(图1)。使用木勺刮取沉积物样品并装入聚丙烯保鲜盒中密封保存。

样品送回实验室后,分别进行粒度分析与元素含量测量。粒度标准采用Udden-Wentworth法的 Φ 值标准,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,2020)。粒度分析于中国地质科学院第四纪年代学与水文地质演变重点实验室完成。

选取Cr、Ni、Zn、Pb、Cu、Cd、Hg,以及As,共8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(段晓勇等,2016;Yu et al., 2021),使用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS, Perkin Elmer Elan II)测定Cr、Ni、Cd、As与Hg含量(游惠明等,2019)。除参与评价的8种重金属元素外,通过X射线荧光光谱仪(XRF, Axios PW4400)测定了沉积物中SiO₂、Al₂O₃与Fe₂O₃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(王爱军等,2007)。各元素含量的测定使用

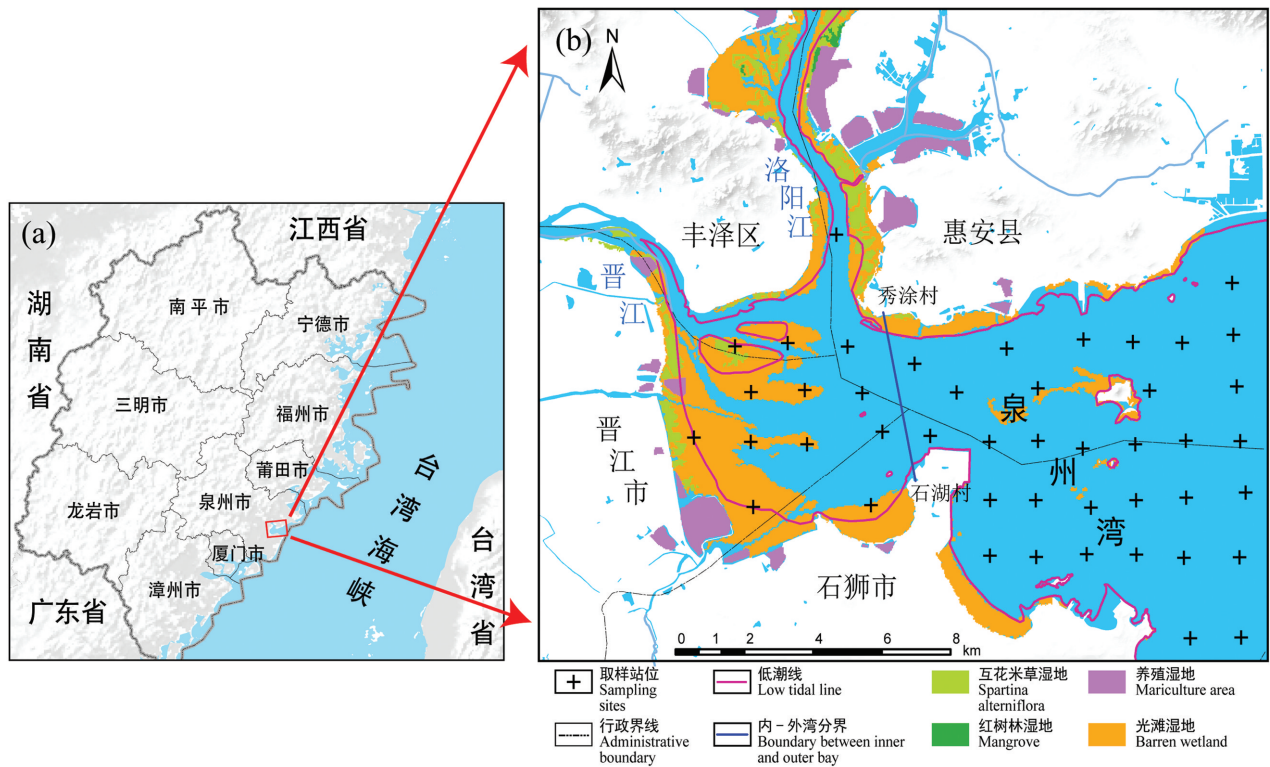


图1 研究区范围及采样点示意图
 Fig.1 Location of study area and distribution of the sampling sites

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 沉积物重金属污染程度与风险评价

潜在生态风险指数法由 Hakanson 提出,该方法考虑沉积物中重金属含量、污染物种类、毒性水平和水体对金属污染的敏感性等 4 个影响,广泛应用于国内外土壤与沉积物中重金属的环境质量及风险评价(Hakanson, 1980)。具体计算公式为:

$$C_f^i = C^i / C_n^i \tag{1}$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \tag{2}$$

$$RI = \sum E_r^i \tag{3}$$

式中 C_f^i 为单个金属污染系数, C^i 为测试样品中重金属元素 i 的实测含量, C_n^i 为重金属元素 i 的背景含量值,本研究采用福建省海岸带土壤环境背景值(刘用清, 1995); T_r^i 为各重金属的毒性系数, E_r^i 为单个金属的潜在生态风险系数, RI 为沉积物中多种重金属的潜在危害指数。各数值选取依据、潜在生态风险评价和危害等级划分标准见表 1 和表 2。表 2 中分级标准根据参与评价的重金属种类(王伟等,

2018;李富等, 2019)以及研究区已有研究成果(李桂海, 2007;李云海等, 2010)修改了分级标准,以便于评价结果的对比分析。

$$EF = \left(\frac{C_x}{C_{Al}} \right)_{\text{sample}} / \left(\frac{C_x}{C_{Al}} \right)_{\text{Baseline}} \tag{4}$$

富集系数可用于评价重金属污染程度(Soto et al., 2001),并区分重金属潜在来源(人为源和自然源)(Hu et al., 2013;Miao et al., 2020), EF 的相对大小指示对应元素含量受人类活动的影响程度(表 2),其计算公式为式(4)。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地壳中的背景含量。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,如 Al、Li、Fe、Sc(陈明等, 2015)。考虑福建沿海地区地壳主要岩性为燕山期黑云母花岗岩(熊绍柏等, 1991),富含硅铝酸盐,因此选择 Al 作为富集系数计算的参比元素。富集系数法中参评元素背景含量(表 1)依据中国东部地壳元素丰度(刘用清, 1995)。

表1 各重金属背景值和毒性系数

Table 1 Background contents and toxicity index of heavy metals

指标值	Zn	Pb	Ni	Hg	Cu	Cr	Cd	As	Al
C_n' /(mg/kg)	83.6	39	17.4	0.063	22.4	40.7	0.06	6.38	9.79
T_i'	1	5	5	40	5	2	30	10	/
背景值(地壳)	63	18	21	0.009	17	44	0.075	2.8	7.49

2.4 PMF 源解析计算

PMF是Paatero开发的一种受体模型,为美国环境保护署(US EPA)推荐使用的源解析方法之一(Paatero, 1997; 刘胜然等, 2019)。其原理(式(5), 式(6))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} 。

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + \varepsilon_{ij} \quad (5)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{\varepsilon_{ij}}{u_{ij}} \right)^2 \quad (6)$$

式(5)中, 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。式(6)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。

2.5 数据分析与统计

分别使用Microsoft Excel与SPSS 26进行数据的初步整理与多元统计分析,使用EPA PMF 5.0进行沉积物重金属来源分析。利用Surfer 16与ArcGIS 10.6的地统计学模块绘制泉州湾近岸海域各指标的平面分布图,使用Origin 2017绘制统计结果图件。

3 分析结果

3.1 近岸海域沉积物粒度分布特征

研究区表层沉积物类型包括砂、粉砂质砂、砂

质粉砂和粉砂(图2,表3)。其中粉砂为表层沉积物的主要组分,平均含量为(61.06±20.89)%,对泉州湾近岸海域表层沉积物的分类起到了控制作用。黏土与砂平均含量较为接近,分别为19.01%与20.89%,但砂含量标准差大于黏土,且在小坠岛一大坠岛东侧以及石湖村以东海域出现局部高值区,而在其余海域含量较少。黏土含量则由内湾向外湾有规律地逐渐降低,且在砂含量较高区最低。

研究区沉积物平均粒径为(6.02±1.43)Φ,受砂含量分布影响(图2),表层沉积物在大小坠岛以及石湖村以东较粗,周边逐渐变细。其他地区均以粒径6Φ以上细粒沉积物为主,在晋江河口区表层沉积物平均粒径可达7.10Φ,与该河口区及晋江市沿岸分布有大块的滩涂现象相符。根据平均粒径及不同粒度等级沉积物百分含量的分布情况,内湾水动力条件明显更弱,粒径偏细,分选性较好;而向外湾方向,局部沉积物粒径较粗,分选性较差。

3.2 近岸海域表层沉积物重金属含量

研究区沉积物各重金属元素平均含量从大到小依次为Zn(124.92×10⁻⁶±58.97×10⁻⁶)>Cr(52.34×10⁻⁶±20.67×10⁻⁶)>Pb(36.94×10⁻⁶±19.14×10⁻⁶)>Cu(24.37×10⁻⁶±14.47×10⁻⁶)>Ni(23.34×10⁻⁶±9.18×10⁻⁶)>As(22.97×10⁻⁶±3.87×10⁻⁶)>Cd(0.17×10⁻⁶±0.22×10⁻⁶)>Hg(0.08×10⁻⁶±0.08×10⁻⁶)。各元素含量的变异系数则与平均含量之间呈现相反趋势,平均含量较高的元素分布趋于稳定,而平均含量最低、毒性较强的Cd与Hg相较于其余重金属元素显示出更强的空间变异性(表4)。根据中国海洋沉积物质量标准(国家海洋局国家海洋环境监测中心,2002),泉州湾近岸海域沉积物8种重金属元素超一类标准率依次为As(84.44%)>Zn(24.44%)>Cu(17.78%)>Pb(8.89%)>Cd(8.33%)=Hg(8.33%)>Cr(4.44%)。Hg与Cd超一类标准率较低而空间变异性较高,表明此两种元素在湾内局部

表2 富集系数与潜在生态风险评价分级标准

Table 2 Grading standard of enrichment factor and potential ecological risk index

E_i' 范围	单因子生态风险程度	RI 范围	潜在生态风险程度	EF 范围	富集程度
$E_i' < 40$	低值	$RI < 150$	低度	$1.5 \leq EF < 3$	轻微
$40 \leq E_i' < 80$	中等	$150 \leq RI < 300$	中度	$3 \leq EF < 5$	中度
$80 \leq E_i' < 160$	较重	$300 \leq RI < 600$	重度	$5 \leq EF < 10$	较强
$160 \leq E_i' < 320$	重	$RI \geq 600$	严重	$10 \leq EF < 25$	强
$E_i' \geq 320$	严重	-	-	$25 \leq EF < 50$	极强

表3 泉州湾近岸海域粒度参数分布范围
Table 3 Statistics of grain size in the offshore area of Quanzhou Bay

	N	最小值	最大值	平均值	标准差
黏土/%	45	0.71	30.51	19.01	7.20
粉砂/%	45	4.58	79.88	61.06	20.89
砂/%	45	1.31	94.71	19.93	26.70
平均粒径/ Φ	45	1.08	7.25	6.02	1.43

地区受到了某种潜在来源的强烈控制。而变异系数较小的元素,如As与Zn,超沉积物一类标准率最高,表明在泉州湾近岸海域的水动力条件下,As与Zn的迁移能力最强,其含量受到天然背景与人类活动双重影响。

Cd与Zn、Pb具有强相关性($P < 0.05$, R^2 分别为0.92与0.95),Cu同样与Zn、Pb具有强相关性(R^2 分

别为0.80与0.72),但相比之下,Cd与Cu之间相关性一般($R^2=0.62$)。由此可知,Cd、Cu、Zn与Pb受两种不同来源模式所控制。Ni与Cr具有强相关性($R^2=0.92, P < 0.01$),说明这两种元素可能具有相同来源。对于As与Hg,在 $P < 0.01$ 显著性水平下,As仅与Zn存在一般相关性($R^2=0.535$),而Hg尽管与Cr具有一般相关性($R^2=0.545$),但相关性并不显著(表5)。As和Hg与其他重金属元素的相关性分析结果表明,这两种元素可能具有较为独特的来源途径,显著区别于其余元素。

泉州湾近岸海域表层沉积物中各重金属富集程度计算结果表明, Hg (9.34) > As (8.29) > Cd (2.15) > Pb (1.90) > Zn (1.83) > Cu (1.27) > Cr (1.09) > Ni (1.02)(图3)。Hg与As呈较强至强富集状态,Cd、Pb与Zn呈轻微至中度富集状态,而对于

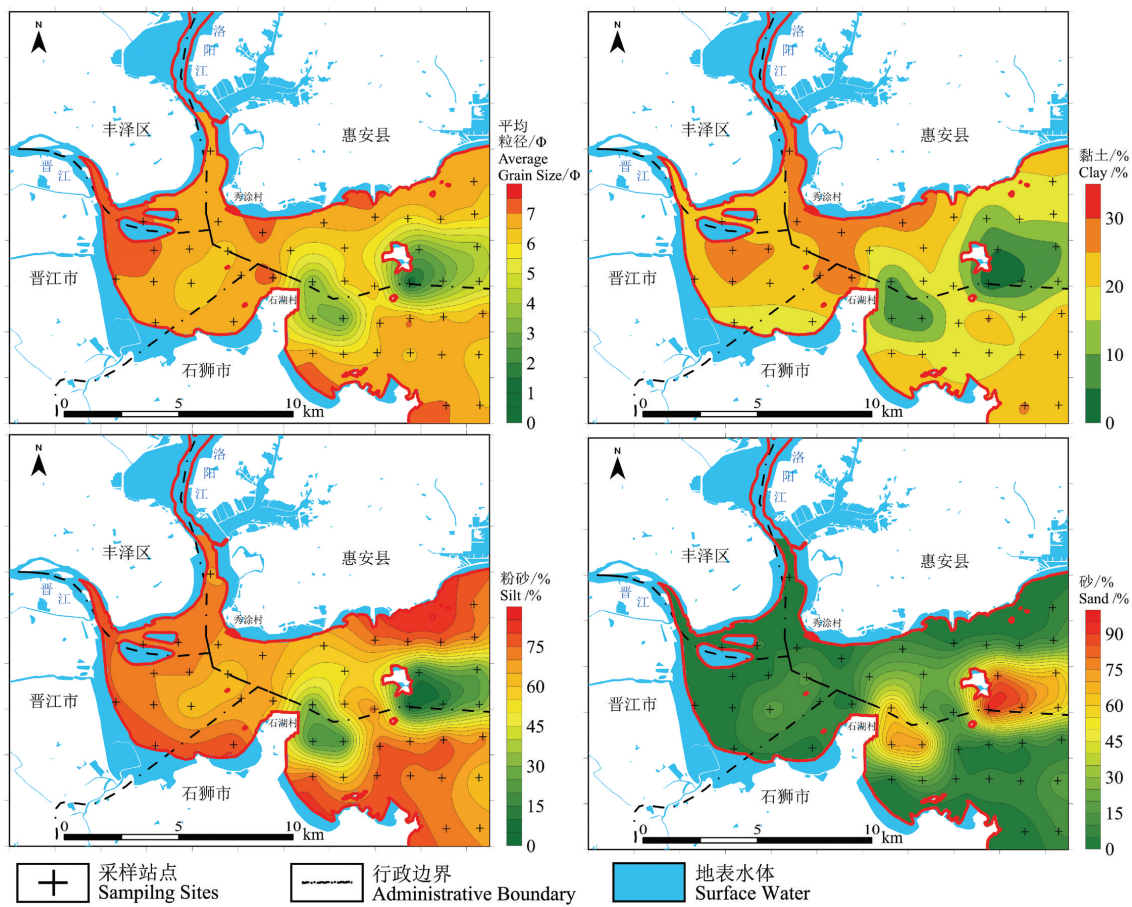


图2 泉州湾近岸海域表层沉积物平均粒径及不同粒径组分(黏土、粉砂、砂)百分含量分布图
Fig.2 Distribution of average grain size and percentage content of clay, silt and sand of surface sediments in the offshore area of Quanzhou Bay

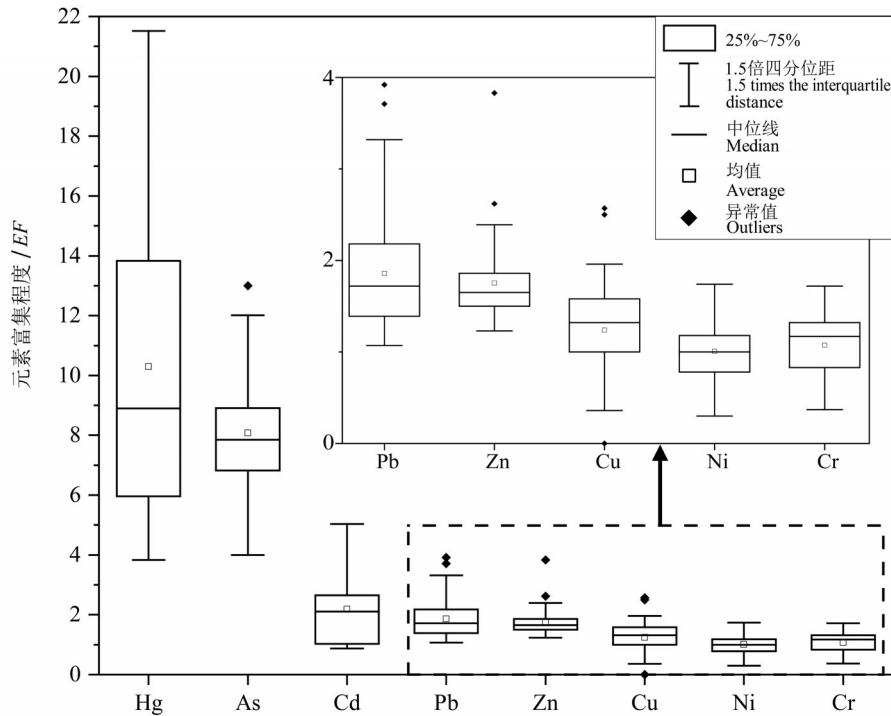


图3 泉州湾近岸海域表层沉积物不同重金属富集程度

Fig.3 Enrichment factors of eight heavy metals of surface sediments in Quanzhou Bay

Cu、Cr与Ni则为不富集或轻微富集状态。

3.3 近岸海域表层沉积物重金属空间分布特征

根据泉州湾近岸海域表层沉积物重金属含量,绘制不同元素含量分布图(图4)。重金属含量分布模式可分为四类,第一类: Cd,其含量自湾内向湾外逐步下降,且高值区均位于洛阳江河口。第二类: Hg,其与Cd含量分布相反,向泉州湾东南方向表层沉积物Hg含量出现递增趋势,并在湾内其余地区含量分布相对稳定。第三类: Cu、Zn与Pb,三者含量高值区恰好出现在内湾与外湾连接线(秀涂—石湖)处。第四类: Ni、As与Cr,三者除在石湖以东和

大小坠岛一带出现含量低值区,其余海域含量差异不明显。由于Ni、Cr与砂含量之间较强的负相关性以及与沉积物粒度 Φ 之间具有最强的正相关性(表5),可推断出粒度分布对Ni、Cr含量起到了控制作用,对As含量分布也有一定影响。

4 讨论

4.1 近岸海域沉积物重金属富集程度及影响因素

泉州湾近岸海域沉积物重金属含量达到重度富集程度的元素为As与Hg,其中As是研究区内富集程度最高的重金属(图3)。其原因一方面是由于

表4 泉州湾表层沉积物重金属含量

Table 4 Contents of heavy metals of surface sediments in Quanzhou Bay

项目	Cr	Ni	Zn	As	Pb	Cu	Cd	Hg
范围/(mg/kg)	7.97~86.97	4.37~46.1	41.11~390.15	9.07~29.61	10.19~108.64	ND~67.29	ND~0.73	0.01~0.33
平均值/(mg/kg)	52.34	23.34	124.92	22.97	36.94	24.37	0.17	0.08
标准差/(mg/kg)	20.67	9.18	58.97	3.87	19.14	14.47	0.22	0.08
变异系数/%	39.49	39.34	47.21	16.84	51.81	59.38	130.1	99.81
一类标准/(mg/kg)	80	/	150	20	60	35	0.5	0.2
二类标准/(mg/kg)	150	/	350	65	130	100	1.5	0.5
超一类标准率/%	4.44	/	24.44	84.44	8.89	17.78	8.33	8.33

注: (1)/表明在中国沉积物质量标准(GB18668-2002)中,无相关分级标准。(2)ND表示元素在对应样品中未检出。

表5 泉州湾近岸海域元素含量及粒度参数相关性分析

Table 5 Pearson correlation coefficients of different heavy metal contents and grain sizes parameters

	黏土	粉砂	砂土	平均粒径	Cr	Ni	Zn	As	Pb	Cu	Cd	Hg	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
黏土	1														
粉砂	0.75**	1													
砂土	-0.85**	-0.98**	1												
平均粒径	0.90**	0.95**	-0.98**	1											
Cr	0.64**	0.87**	-0.85**	0.82**	1										
Ni	0.63**	0.85**	-0.83**	0.81**	0.92**	1									
Zn	0.66**	0.45**	-0.53**	0.56**	0.32*	0.40**	1								
As	0.43**	0.25	-0.31*	0.35*	0.21	0.22	0.54**	1							
Pb	0.59**	0.27	-0.37*	0.41**	0.16	0.23	0.92**	0.53**	1						
Cu	0.64**	0.55**	-0.60**	0.62**	0.59**	0.64**	0.80**	0.57**	0.72**	1					
Cd	0.55	0.27	-0.36	0.39	-0.07	-0.05	0.92**	0.35	0.95**	0.62*	1				
Hg	0.43	0.38	-0.41	0.43	0.55	0.53	0.06	-0.10	-0.04	0.31	-0.13	1			
SiO ₂	-0.76**	-0.79**	0.82**	-0.83**	-0.74**	-0.76**	-0.60**	-0.08	-0.49**	-0.57**	-0.48	-0.41	1		
Al ₂ O ₃	0.83**	0.77**	-0.82**	0.82**	0.68**	0.68**	0.81**	0.52**	0.73**	0.79**	0.71*	0.21	-0.77**	1	
Fe ₂ O ₃	0.65**	0.58**	-0.63**	0.68**	0.67**	0.62**	0.55**	0.39**	0.56**	0.67**	0.35	0.49	-0.64**	0.67**	1

注:上标*表明相关性在 $P<0.05$ 水平下显著,上标**表明相关性在 $P<0.01$ 水平下显著。

化石燃料的使用与排放,已有研究指出交通要道附近土壤中As浓度明显偏高(Miao et al., 2020),泉州湾陆域发达的产业活动及交通运输造成大量能源消耗及尾气排放,最终随大气沉降及地表径流输入海域,且对于湾内海域,南水道为泉州湾主要航道(李朝新等,2008),港区过往船只燃料使用及“跑冒滴漏”导致As在南水道附近的石湖港区以及大小坠岛东部出现局部强富集区。另一方面As迁移能力较强,进一步使其在湾内沉积物中普遍富集。Hg富集程度仅次于As,其富集程度向湾外逐渐增强(图5),表明Hg主要源自研究区南部海域。Hg的含量与各粒度参数、重金属元素以及常量元素之间(Al、Fe、Si)均无显著相关性(表5),表明Hg的来源与其余重金属显著不同,或在来源相似条件下经历了更为复杂的生物地球化学过程,使得Hg的分布模式更为复杂。

Cd的富集程度仅次于As与Hg,与Cu、Pb和Zn均属研究区内轻度富集的重金属元素,但Cd毒性系数仅次于Hg,是一种生态风险较高的重金属元素。Cd富集系数从湾内向湾外显著下降,已有研究表明晋江与洛阳江入海交汇区悬砂浓度较高(孟希等,2014),Cd含量与悬砂含量分布趋势相近,这说明近岸沉积物中Cd极可能来源于晋江与洛阳江沿岸工业污水排放(李云海等,2010)。

对于Cu、Pb与Zn,其相对富集区在湾内呈散点状分布,在一定程度上也受入海河流水质输送的影响。晋江流域主要土壤类型为以花岗岩为母质的南园属红壤与河田属红壤(徐劲林等,2009),红壤中富含的铁锰氧化物易于Cu、Pb与Zn的赋存(杨霞等,2016;陈能汪等,2018),该形态赋存的重金属具有较强的化学活性与迁移潜力。另一方面,晋江中上游矿产资源丰富,主要有铅锌矿、铁锰矿、金矿、煤矿、花岗岩和高岭土矿等,采矿“三废”随径流进入晋江水系,进而造成河口区重金属的积累(刘宗成,2013;于瑞莲等,2015)。

因此该三种轻度富集的重金属除受自然条件影响外,也与晋江中上游地区矿山冶炼有一定关联(于瑞莲,2009)。Cu、Pb与Zn的含量在南北向上于秀涂—石湖连接线处出现高值条带,而东西向则由晋江、洛阳江入海口向湾外逐渐递减(图4),此三种元素在 $P<0.01$ 条件下与黏土含量具有较强正相关性(表5),综合粒度分析结果,此三种元素倾向于富集在较细沉积物中,其含量分布一方面受与人类活动有关的物质输送的影响,另一方面也与泉州湾内湾与外湾迥异的水动力条件有关,是地表径流与海洋潮流共同作用的结果。

Cr与Ni为富集程度最低的两种元素,相较于其他元素,这两种元素与SiO₂具有最强的负相关性

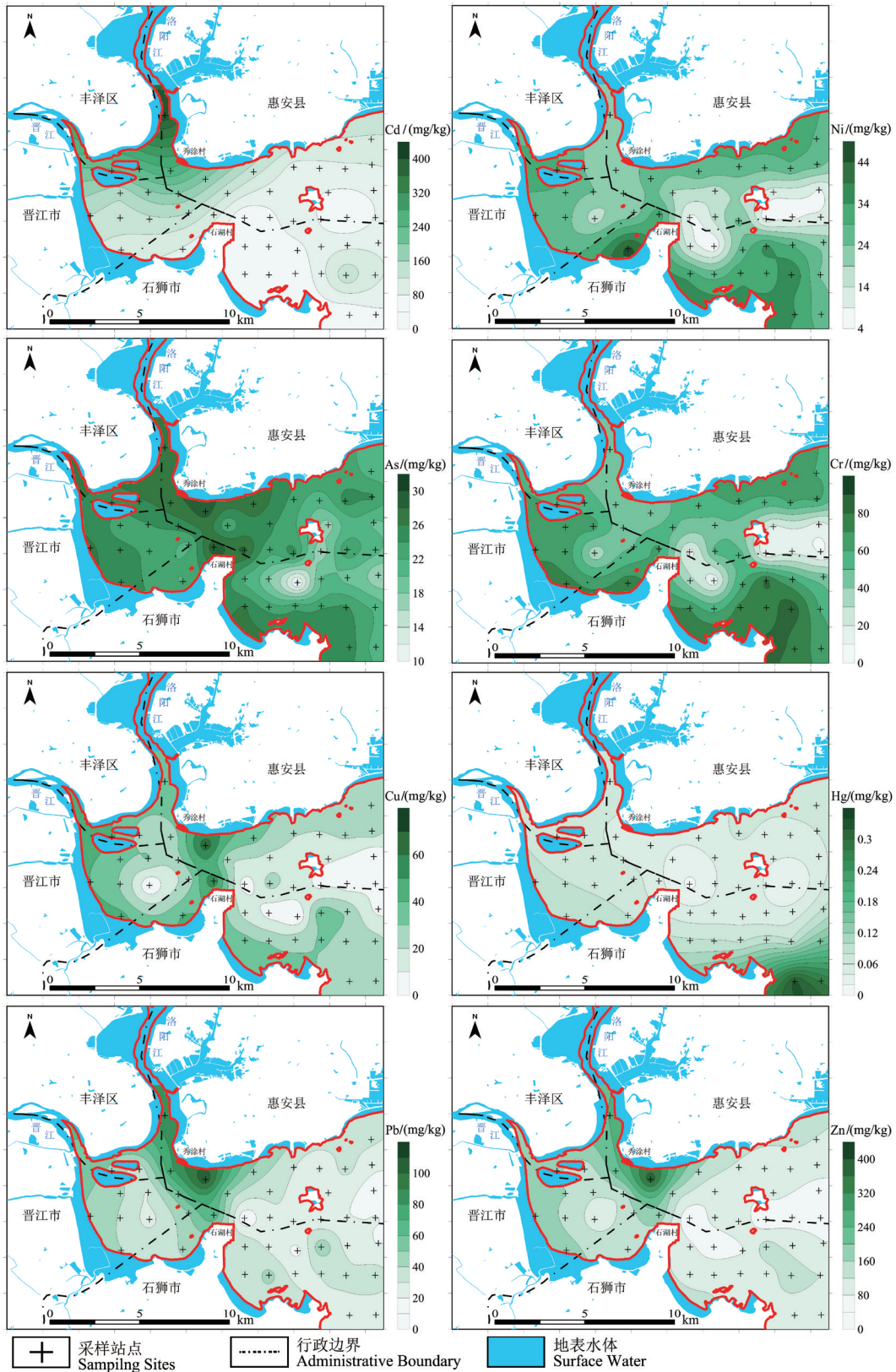


图4 泉州湾近岸海域表层沉积物不同重金属元素含量分布图
Fig.4 Distribution of heavy metals of surface sediments in the offshore area of Quanzhou Bay

(表5)。由于SiO₂含量越高,通常指示沉积物中粗颗粒物含量越高(Belousova, 2006),因此可基本判断Cr、Ni与天然矿物风化密切相关(Hu et al., 2013),该两种元素倾向于在细颗粒沉积物中富集,因此母质的风化程度越高,Cr与Ni含量越高。

4.2 近岸海域沉积物潜在生态风险评价

潜在生态风险评价结果显示,研究区表层沉积物重金属潜在生态风险主要是由Cd、Hg及As这三种元素所引起(图6),三者贡献率分别为37.90%、29.38%与20.57%。仅Cd与Hg的单元素生态风险指数均值大于40(表6),表明此两种元素的生态风险达到中等水平;其余元素均低于40,为较低的生态风险。

泉州湾近岸海域表层沉积物中8种重金属的综合潜在风险指数平均值为177.08(表6),湾内表层沉积物整体具有中度的潜在生态风险。对于主要来源为矿山冶炼及母岩风化的Zn、Pb、Ni、Cu及Cr,

其单元元素潜在生态风险系数的均值与标准差均小于10,表明相应元素的污染程度较低。对于单元元素潜在生态风险程度较高的两种元素,Cd在毒性系数小于Hg的情况下(表1),对综合潜在生态风险的贡献程度反而较Hg更大。

重金属潜在生态危害程度自湾内向湾外呈显著下降(图7),RI>300的重度生态风险区主要位于晋江与洛阳江沿岸以及两江汇聚的河口地区。根据重金属来源分析,以Cd为代表的陆域污染物随地表径流向海域的排放,是威胁当前泉州湾近岸海域生态环境的主要因素。此外,由于湾内水动力条件较弱所导致的细颗粒沉积物分布模式,以Cd为代表的重金属被细粒沉积物吸附在河口附近迅速沉降(李云海等, 2010),而这种影响由于水动力条件的增强向湾外迅速减弱。而在泉州湾的东南部,RI值有所上升,这一方面是由于南部的几个采样站位中

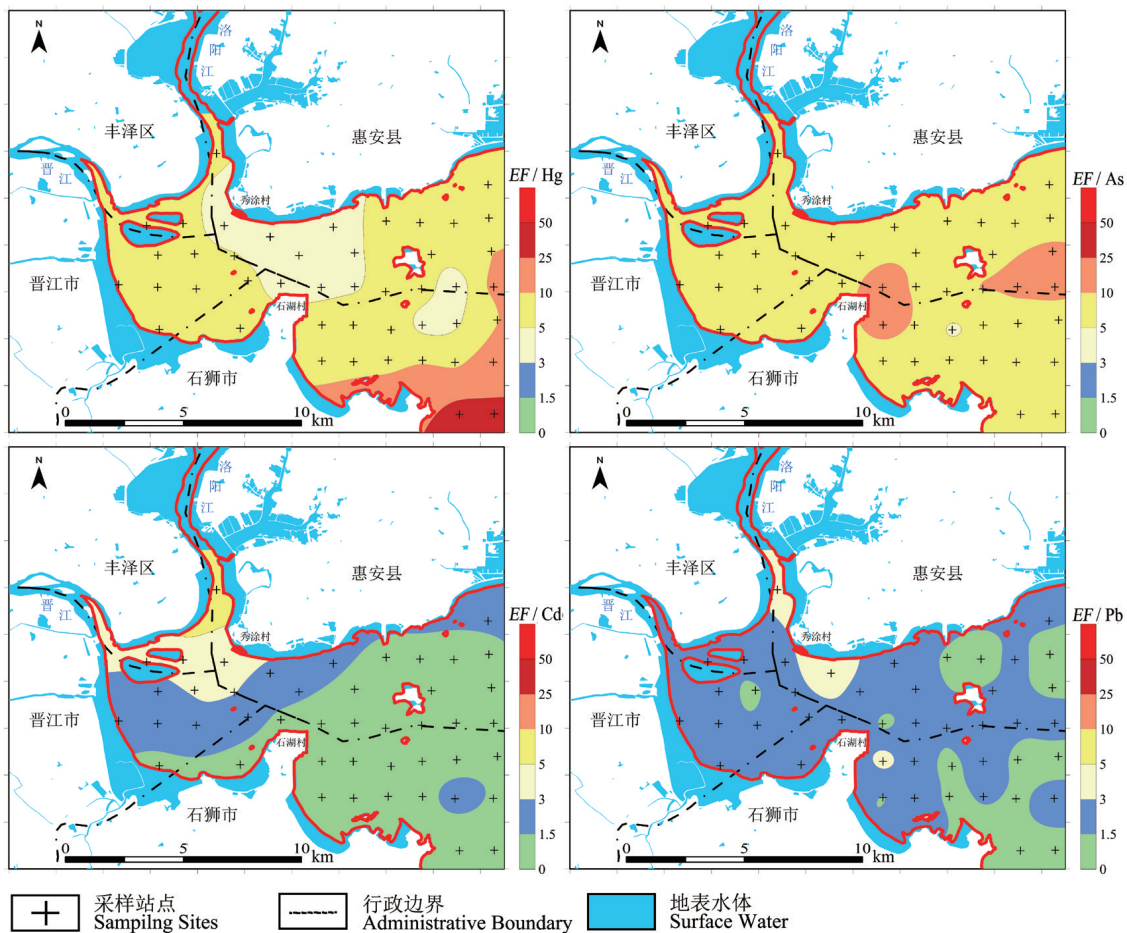


图5 泉州湾近岸海域表层沉积物典型元素富集程度分布图

Fig.5 Distribution of typical heavy metals enrichment factor of surface sediments in the offshore area of Quanzhou Bay

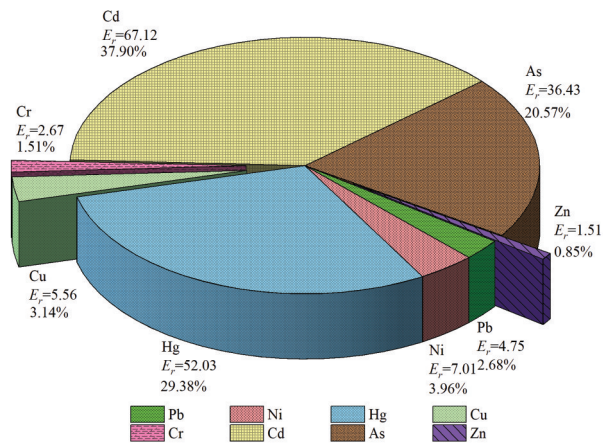


图6 不同元素对潜在生态风险指数贡献程度
Fig.6 Contribution of different heavy metals to potential ecological risk

Hg含量较高,另一方面也表明泉州湾的南部海域,即石狮市的祥芝湾以及晋江市的深沪湾,表层沉积物可能具有更严重的污染与生态风险,未来需要开展进一步的调查研究工作。

4.3 近岸海域沉积物重金属来源分析

根据晋江流域的地质背景与产业特点,将沉积

表6 潜在生态风险指数法评价结果描述性统计
Table 6 Descriptive statistics of potential ecological risk index

	E_r								RI
	Zn	Pb	Ni	Hg	Cu	Cr	Cd	As	
最小值	0.51	1.40	1.30	9.40	0.08	0.40	0.00	14.63	57.78
最大值	4.60	13.78	13.20	205.98	14.74	4.26	364.76	45.95	484.21
平均值	1.51	4.75	7.01	52.03	5.56	2.67	67.12	36.43	177.08
标准差	0.59	2.08	2.14	39.12	2.40	0.83	68.19	4.45	78.02

物重金属潜在来源设置为4种,运行PMF源解析模型(表7)。解析结果与重金属富集程度的分布模式具有较好一致性。沉积物中Cd主要来源于近岸污水排放,贡献率达86.35%。Cr与Ni主要来源于母岩风化,贡献率分别为63.90%与59.36%,其次受到矿山冶炼的影响,贡献率约为29%(图8)。Cu则主要受矿山冶炼的影响,贡献率达91.67%。Pb、Zn与As受不同来源复合影响,其中Pb主要受矿山冶炼的影响(46.11%),其次分别受燃料燃烧(24.13%)与污水排放(20.86%)的影响。4种潜在来源对Zn与As的影响较为接近,两种元素的主要来源分别为矿山冶炼(36.77%)与燃料燃烧(31.04%),此结果表明除As外,Zn也是泉州湾近岸海域中迁移能力较强

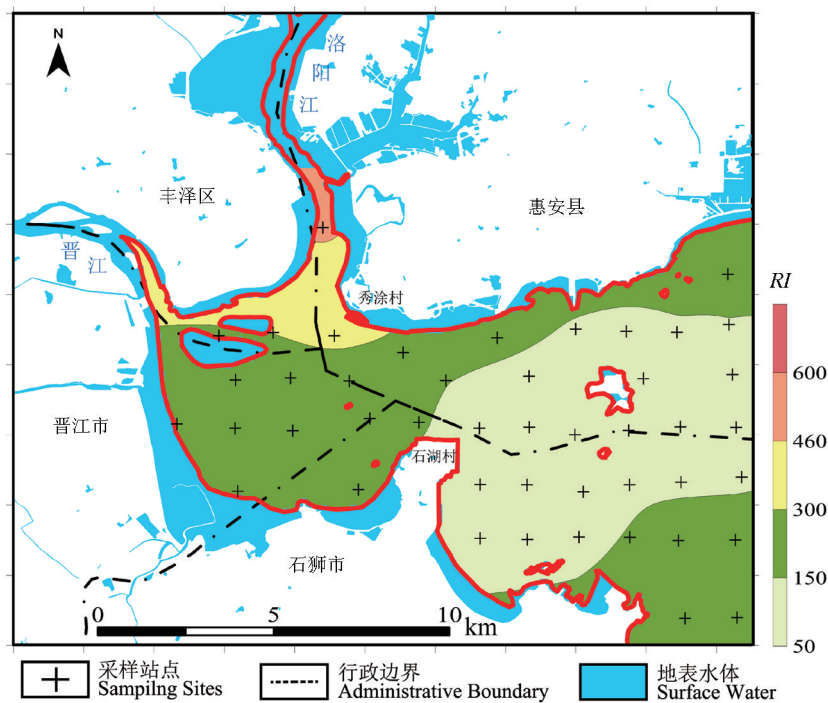


图7 泉州湾近岸海域浅层沉积物生态风险指数分布图
Fig. 7 Distribution of potential ecological index in the offshore area of Quanzhou Bay

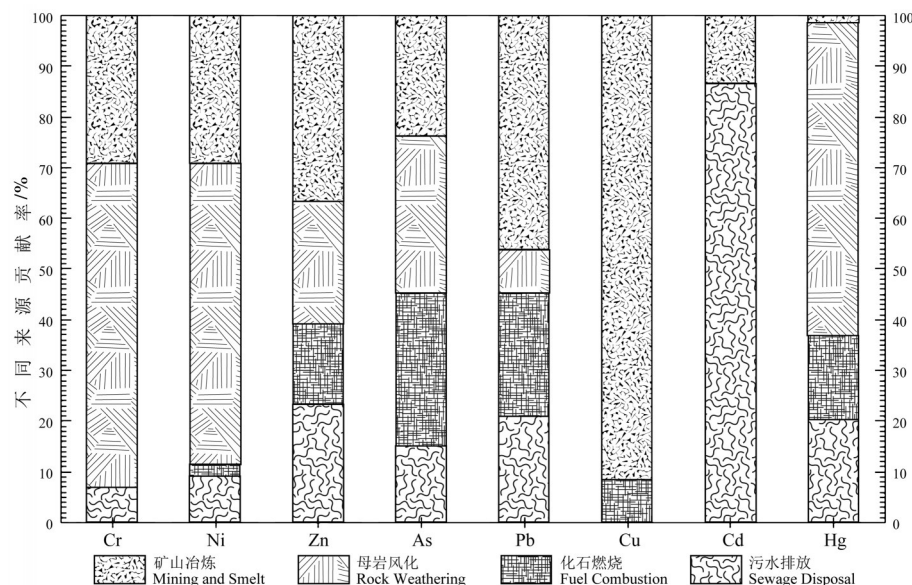


图8 各重金属潜在来源PMF源解析模型计算结果
Fig.8 Potential sources of heavy metals determined by PMF

表7 不同来源贡献率PMF模型解析结果
Table 7 Contribution of different potential sources calculated by PMF

元素	潜在来源/%			
	矿山冶炼	天然来源	化石燃料	污水排放
Cr	29.19	63.90	/	6.91
Ni	29.14	59.36	2.38	9.12
Zn	36.77	24.14	15.83	23.26
As	23.68	30.34	31.04	14.93
Pb	46.11	8.89	24.13	20.86
Cu	91.67	/	8.33	/
Cd	13.65	/	/	86.35
Hg	1.44	61.91	16.65	20
综合贡献率	33.96	31.16	12.21	22.68

表8 泉州湾近岸海域表层沉积物重金属主成分分析结果
Table 8 PCA of heavy metals in surficial sediments in the offshore area of Quanzhou Bay

元素	主成分			
	1	2	3	4
Cd	0.887			
Pb	0.879			
Zn	0.849			
Ni		0.954		
Cr		0.941		
Cu	0.525	0.628	0.452	
As			0.919	
Hg				0.964
特征值	3.995	1.95	0.737	0.627
贡献率/%	49.93	24.37	9.22	7.84
累计贡献率/%	49.93	74.30	83.52	91.36

注:使用最大方差法对因子载荷进行旋转。

的元素。对于Hg,PMF源解析结果表明其含量同样受多种来源复合影响,且最主要来源为母岩风化。考虑到Hg与其他元素之间显著不同的分布及富集模式,此结论需经PCA等方法进一步验证。

对泉州湾近岸海域表层沉积物重金属含量进行PCA,KMO为0.765,Bartlett检验值<0.001,表明数据集适合进行主成分分析。为与PMF源解析计算结果相对应,选取4种主成分。经最大方差旋转后,前4种主成分的方差贡献率分别为49.93%、24.37%、9.22%与7.84%,累计方差贡献率为91.36%。

主成分1上具有较大载荷的重金属元素为Cd、Pb与Zn(表8),综合前述分析结果,Cd、Pb与Zn主

要来源于陆域矿山冶炼及近岸污水排放,因此主成分1可表征由于陆域人类活动所造成的物质输送。Ni与Cr在主成分2上具有较大载荷,前述分析结果表明Ni与Cr主要赋存于细粒沉积物中且富集程度轻微,因此主成分2对应母岩风化对沉积物重金属的物质输送。As在主成分3上具有较大载荷,因此主成分3对应化石燃料的使用及排放。对于Cu与Hg,Cu在主成分1-3上均具有一定的载荷,但载荷量均小于0.65。而Hg仅在主成分4上具有较大载荷,但主成分4的特征根仅为0.627,方差贡献率仅

为7.84%。对比PMF与PCA分析结果,虽然后者不能很好解释Cu与Hg的潜在来源,但PCA的分析结果验证了Hg来源的复杂性,并且结果大部分与PMF一致,证明了PMF结果的可靠性。重金属来源分析需要结合多种溯源手段与统计学方法,在需要对每种重金属元素来源进行定量分析时,PMF可能是优于PCA的一种分析方法。

5 结 论

(1)泉州湾表层沉积物以粉砂为主。在晋江与洛阳江两江汇聚区以及秀涂—大坠岛北侧沉积物粒径较细,湾内沉积物的分布模式直接影响重金属元素的富集及潜在生态风险,使入海河流河口区以及两江汇聚区潜在生态风险程度较高。

(2)泉州湾表层沉积物潜在生态风险整体处于中度水平,Cd对生态风险指数的贡献显著大于其余参评元素,陆域污染物排放以及湾内日益下降的水动力条件对近岸海域生态环境造成了严重威胁。

(3)泉州湾表层沉积物重金属整体处于轻度富集状态,As、Hg与Cd达到了中度富集水平。PMF源解析模型表明,重金属不同潜在来源综合贡献率依次为矿山冶炼(33.96%),母岩风化(31.16%),污水排放(22.68%)以及燃料燃烧(12.21%)。PMF源解析与PCA的联合运用与相互验证可以得到重金属潜在来源的可靠结论。

(4)泉州湾表层沉积物中Hg分布模式显著不同于其余元素,Hg可能具有更为复杂的来源,并经历了更为复杂的生物地球化学过程。未来需要对泉州湾Hg的赋存形态,及其在不同粒径沉积物中的含量进行深入研究,并进一步研究其在植物体、生物体中的含量,评估其对湾内生态系统的影响效应。

References

Belousova N I. 2006. Oxalate-soluble compounds of Al, Fe, and Si in soils of cold humid regions as a function of weathering[J]. *Eurasian Soil Science*, 39(1): 1-11.

Chen Bin, Wang Jinkeng, Zhang Yusheng, Tang Sengming, Lin Jinghong, Zheng Fengwu, Zhang Jiwei. 2004. Impact of reclamation activities on marine environment in Quanzhou Bay [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 23(2):192-198 (in Chinese with English abstract).

Chen Ming, Cai Qingyun, Xu Hui, Zhao Ling, Zhao Yonghong. 2015. Research progress of risk assessment of heavy metals pollution in

water body sediments [J]. *Ecology and Environment Sciences*, (6): 1069-1074 (in Chinese with English abstract).

Chen Nengwang, Wang Deli, Lu Ting, Wang Fenfang, Jiang Yan, Lin Guohui, Zhuang Mazhan. 2018. Manganese pollution in the Jiulong River watershed: Sources and transformation [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 38(8):2955-2964 (in Chinese with English abstract).

Cheng Xiaohui, Deng Jingsong. 2019. Comparison of pretreatment methods in determination of 12 metal elements in soil by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Chemical Analysis and Meterage*, 28(4):115-118 (in Chinese with English abstract).

Duan Xiaoyong, Yin Ping, Liu Jinqing, Zhang Daolai, Cao Ke, Gao Fei, Chen Xiaoying. 2016. Heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of Luan River estuary: Distributions, sources and ecological risk assessments [J]. *China Environmental Science*, 36(4):1198-1206 (in Chinese with English abstract).

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. 2002. Marine Sediment Quality [S]. 243-244, 8 (in Chinese).

Guan Baocong, Lei Huanyan, Lin Binghuang, Liu Haoran, Shi Yuezhong, Lin Jianning. 2010. Elemental characteristics and geochemical significance of surface sediments in Quanzhou Bay [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 29(1): 58-65 (in Chinese with English abstract).

Hakanson L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 14(8): 975-1001.

Hao Wu, Ding Zhenhua, Liu Yang, Liu Jinling, Yan Haiyu, Pan Jiayong, Li Liuqiang, Lin Huina, Lin Guanghui, Lu Haoliang. 2011. Methylmercury and sulfate-reducing bacteria in mangrove sediments from Jiulong River Estuary, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 23(1):14-21.

Hu Yuanan, Liu Xueping, Bai Jinmei, Shih Kaimin, Zeng Eddy Y, Cheng Hefa. 2013. Assessing heavy metal pollution in the surface soils of a region that had undergone three decades of intense industrialization and urbanization[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(9): 6150-6159.

Li Chaixin, Liu Miaoguang, Liu Zhenxia, Hu Zejian, Bian Shuhua, Diao Shaobo. 2008. Sediment transport and Changes in scour and silting in the Quanzhou Bay [J]. *Advances in Marine Science*, (1): 26-34 (in Chinese with English abstract).

Li Fu, Liu Yingnan, Guo Dianfan, Qi Xingtian, Zang Shuying, Ni Hongwei. 2019. Distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in the sediment of the Songjiang wetland in Harbin City [J]. *Research of Environmental Sciences*, 32 (11):1869-1878 (in Chinese with English abstract).

Li Guihai. 2007. Environmental Geochemistry of Heavy Metals and

- Depositional Environment in Xiamen Seas [D]. Qingdao: China Ocean University, 1–107 (in Chinese with English abstract).
- Li Jun, Zou Shengzhang, Liang Yongping, Lin Yongsheng, Zhou Changsong, Zhao Yi. 2020. Metal distributions and human health risk assessments on waters in the Huixian Karst wetland, China [J]. *Environmental Science*, 41(11): 4948–4957 (in Chinese with English abstract).
- Li Yunhai, Chen Jian, Huang Caibin, Wang Aijun, Li Dongyi. 2010. Distribution patterns of heavy metals in surface sediments of the Quanzhou Bay and environmental quality assessment [J]. *Environmental Science*, 31(4): 931–938 (in Chinese with English abstract).
- Lin Chengqi, Chen Fenghua, Hu Gongren, Yu Ruilian, Huang Huabin. 2020. Source apportionment of heavy metals in surface sediments of the Jiulong River Estuary based on positive matrix factorization [J]. *Earth and Environment*, 48(4): 443–451 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bingxing, Yu Ruilian, Hu Gongren, Zhang Liling. 2015. Distribution and transfer of heavy metals in the mangrove wetland of Quanzhou Bay estuary[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 34(4): 1136–1142 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chunlei, Zheng Jianhua, Li Zhenghong, Li Yasong, Hao Qichen, Li Jianfeng. 2021. Analysis on the situation and countermeasures of water resources supply and demand in the cities of small and medium-sized river basins along southeast coast of China—Taking Xiamen City as an example [J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 9(4): 350–358.
- Liu Kun, Sun Yongguang, Qi Yue, Wang Weiwei, Yuan Xiutang, Fu Yuanbin, Li Peiying. 2018. The spatial differentiation and spatial correlation analysis with TC and TN of grain size in intertidal sediments [J]. *Marine Environmental Science*, 37(1): 95–100, 150 (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 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 Yaci, Wu Lin, Shi Guowei, Cao Shengwei, Li Yasong. 2022. Characteristics and sources of microplastic pollution in the water and sediments of the Jinjiang River Basin, Fujian Province, China [J]. *China Geology*, 5: 429–438.
- Liu Yongqing. 1995. Study and application of the soil environmental background values in Fujian coastal zone [J]. *Marine Environmental Science*, (2): 68–73 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yu. 2018. Spatial Temporal Distribution and Environmental Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Quanzhou Shanmei Reservoir and Quanzhou Bay [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 1–157 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zongcheng. 2013. Present situation and treatment suggestions of mining geological environment in Quanzhou City, Fujian Province [J]. *Energy and Environment*, (5): 80–81 (in Chinese with English abstract).
- Ma Rong, Zhang Bin, Zhou Xiaoni. 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*, 27(1): 1035–52.
- Meng Xi, Chang Fangqiang, Lin Congmou. 2014. Study on the evolution characteristics and control factors of scouring and silting in Quanzhou Bay [J]. *Journal of Natural Disasters*, 23(5):185–191 (in Chinese with English abstract).
- Miao Xiongyi, Hao Yupei, Zhang, Fawang, Zou Shengzhang, Ye Siyuan, Xie Zhouqing. 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): 709–709.
- Paatero P. 1997. Least squares formulation of robust non-negative factor analysis[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 37(1): 23–35.
- Pan Ke, Wang Wenxiong. 2012. Trace metal contamination in estuarine and coastal environments in China[J]. *Science of the Total Environment*, 421/422: 3–16.
- Quanzhou Ocean and Fisheries Bureau. 2011. Quanzhou Marine Environment Situation Bulletin [R]. Quanzhou Ocean and Fisheries Bureau, 1–27 (in Chinese).
- Quanzhou Ocean and Fisheries Bureau. 2018. Quanzhou marine environment situation Bulletin [R]. Quanzhou Ocean and Fisheries Bureau, 1–22 (in Chinese).
- Rao Qinghua, Li Jiabing, Hu Minjie, Xie Rongrong, Zhang Xiangyu, Qiu Yu. 2018. Effect of enrichment of nitrogen and sulfate load on N₂O fluxes from tidal flat wetland in the subtropical estuary [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 38(5): 2045–2054 (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]. *B. Environ. Contam. Tox.*, 66(3): 350–6.
- Tan Fanglin, Ye Gongfu, Cui Lijuan, Zhang Lihua, Luo Meijuan, Sun Zhitong, Lin Jie, Luo Cailian, Le Tongchao, Huang Li, Lin Yongyuan. 2010. Site type classification of mangrove in Quanzhou Estuary wetlands [J]. *Wetland Science*, 8(4):366–370 (in Chinese

- with English abstract).
- Tang Junjian, Chen Chuhan, Wen Shenghui. 2011. Numerical simulation of tidal current field of Quanzhou Bay sea crossing bridge [C]//Proceedings of the 15th China Offshore Engineering Symposium. Taiyuan, 978–985 (in Chinese with English abstract).
- Wang Aijun, Chen Jian, Li Dongyi, Zhuo Zhiqiang. 2007. Spatial variations of carbon and nitrogen in coastal wetland sediments of Quanzhou Bay in China [J]. *Environmental Science*, (10):2361–2368 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shuailong, Xu Xiangrong, Sun Yuxin, Liu Jinling, Li Huabin. 2013. Heavy metal pollution in coastal areas of South China: A review [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 76(1): 7–15.
- Wang Wei, Gu Xiaoyuan, Zhao Hui, Ding Xigui, Ye Siyuan, Xiao Nan, Yu Jianfeng, Li Jinpeng. 2018. Distribution and environment assessment of heavy metals in sediments of the Zhifu Bay [J]. *Marine Sciences*, 42(7):3–11 (in Chinese with English abstract).
- Wu Wei, Wu Ping, Yang Fang, Sun Danling, Zhang Dexing, Zhou, Yikai. 2018. Assessment of heavy metal pollution and human health risks in urban soils around an electronics manufacturing facility[J]. *Science of The Total Environment*, 630: 53–61.
- Xia Peng, Meng Xianwei, Yin Ping, Cao Zhimin, Wang Xiangqin. 2011. 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.
- Xia Peng, Meng Xianwei, Feng Aiping, Yin Ping, Zhang Jun, Wang Xiangqin. 2012. Geochemical characteristics of heavy metals in coastal sediments from the northern Beibu Gulf (SW China): The background levels and recent contamination [J]. *Environmental Earth Sciences*, 66(5): 1337–44.
- Xie Wenping, Chen Zheng, Zhu Xinping, Zheng Guangming, Cai Zexian, Zhang Liang, Li Ziqing. 2020. Occurrence form and pollution evaluation of heavy metals in fish pond in Pearl River network area[J]. *Environmental Science & Technology*, 43(S1): 176–182 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Shaobo, Jin Dongmin, Sun Kezhong, Zou Yisheng, Fan Xubang, Du Xiaogang. 1991. Some characteristics of deep structure of the Zhangzhou geothermal field and it's neighbourhood in the Fujian Province [J]. *Acta Geophysica Sinica*, (1):55–63 (in Chinese with English abstract).
- Xu Jinglin, Cha Xuan. 2009. Soil erosion risk assessment based on the research of impact factors: Taking Anxi County as an example [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 11(5):577–584 (in Chinese with English abstract).
- Xu Lianghui, Li Jialin, Li Weifang, Zhao Si, Yuan Qixiang, Wang Mingyue, Yang Lei, Lu Xuezhong. 2014. Progress in impact of human activities on coastal resource and environment [J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 37(3): 124–131 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xia, Peng Bo, Wu Yaqi, Zhang Kun, Kuang Xiaoliang, Wu Beijuan, Tan Changyin, Tu Xianglin. 2016. Geochemical study on heavy-metal contamination developed in river-bank sediments at the Xiangtan section of the Xiangjiang River, Hunan Province, China [J]. *Geochimica*, 45(1):62–76 (in Chinese with English abstract).
- Yin Ping, Lin Liangjun, Chen Bin, Xiao Guoqiang, Cao Ke, Yang Jilong, Li Meina, Duan Xiaoyong, Qiu Jiandong, Hu Yunzhuang, Wang Lei, Sun Xiaoming. 2017. Coastal zone geo-resources and geo-environment in China [J]. *Geology in China*, 44(5): 842–856 (in Chinese with English abstract).
- You Huiming, Han Jianliang, Pan Dezhao, Xie Huicheng, Le Tongchao, Ma Jianbin, Huang Sizhong, Tan Fanglin. 2019. Dynamic evaluation and driving forces of ecosystem services in Quanzhou Bay estuary wetland, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 30(12):4286–4292 (in Chinese with English abstract).
- Yu Linsong, Liu Hongbo, Wan Fang, Hu Zunfang, Luo Huaidong, Zhang Xiuwen. 2021. Geochemical records of the sediments and their significance in Dongping Lake Area, the lower reach of Yellow River, North China [J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 9(2): 140–151.
- Yu Ruilian, Wang Li Juan, Hu GongRen, Zhao Yuanhui. 2008. Speciation and potential ecological risk of heavy metals in sediments from tidal reaches of the Jinjiang River [J]. *Earth and Environment*, (2): 113–118 (in Chinese with English abstract).
- Yu Ruilian. 2009. *Environmental Geochemistry of Heavy Metals in the Intertidal Sediments from Quanzhou Bay, Fujian Province* [D]. Changchun: Northeast Normal University, 57–58 (in Chinese with English abstract).
- Yu Ruilian, Hu Gongren, Zhao Jinxiu, Han Zhong. 2013. Distribution, transfer and stock of heavy metals in *Kandelia candel* mangrove situated in Quanzhou bay Wetland, southeast coast of China [J]. *Environmental Chemistry*, (1): 125–131 (in Chinese with English abstract).
- Yu Ruilian, Zhang Weifang, Hu Gongren, Zhang Chenchen, Wang Xiaoming. 2015. Pollution history and source analysis of heavy metals in sediments from Jinjiang River Estuary [J]. *Research of Environmental Sciences*, 28(6): 907–914 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qian. 2020. *The Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals and Rare Earth Elements in Soils from the Earth's Critical Zone Observation: A Study on Puding Area in Guizhou Province and Jiulongjiang River Catchment in Fujian Province, China* [D]. China University of Geosciences (Beijing), 1–113 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈彬, 王金坑, 张玉生, 唐森铭, 林景宏, 郑凤武, 张继伟. 2004. 泉州湾围海工程对海洋环境的影响[J]. *台湾海峡*, 23(2): 192–198.
- 陈明, 蔡青云, 徐慧, 赵玲, 赵永红. 2015. 水体沉积物重金属污染风险

- 评价研究进展[J]. 生态环境学报, 24(6): 1069-1074.
- 陈能汪, 王德利, 鲁婷, 王芬芳, 姜艳, 林国辉, 庄马展. 2018. 九龙江流域地表水锰的污染来源和迁移转化机制[J]. 环境科学学报, 38(8): 2955-2964.
- 程小会, 邓敬颂. 2019. ICP-MS法测定土壤中12种金属元素时的样品前处理方法[J]. 化学分析计量, 28(4): 115-118.
- 段晓勇, 印萍, 刘金庆, 张道来, 曹珂, 高飞, 陈小英. 2016. 滦河口表层沉积物中重金属和多环芳烃的分布、来源及风险评估[J]. 中国环境科学, 36(4): 1198-1206.
- 官宝聪, 雷怀彦, 林炳煌, 柳浩然, 史跃中, 林建宁. 2010. 泉州湾表层沉积物元素特征及其地球化学意义[J]. 台湾海峡, 29(1): 58-65.
- 国家海洋局国家海洋环境监测中心. 2002. 海洋沉积物质量: GB 18668-2002[S].
- 李朝新, 刘焱光, 刘振夏, 胡泽建, 边淑华, 刁少波. 2008. 泉州湾泥沙运移与冲淤变化[J]. 海洋科学进展, (1): 26-34.
- 李富, 刘赢男, 郭殿凡, 齐兴田, 臧淑英, 倪红伟. 2019. 哈尔滨松江湿地重金属空间分布及潜在生态风险评估[J]. 环境科学研究, 32(11): 1869-1878.
- 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, 1-107.
- 李军, 邹胜章, 梁永平, 林永生, 周长松, 赵一. 2020. 会仙岩溶湿地水体金属元素分布与健康风险评估[J]. 环境科学, 41(11): 4948-4957.
- 李云海, 陈坚, 黄财宾, 王爱军, 李东义. 2010. 泉州湾沉积物重金属分布特征及环境质量评价[J]. 环境科学, 31(4): 931-938.
- 林承奇, 陈枫桦, 胡恭任, 于瑞莲, 黄华斌. 2020. 基于PMF模型解析九龙江河口表层沉积物重金属来源[J]. 地球与环境, 48(4): 443-451.
- 刘冰星, 于瑞莲, 胡恭任, 张丽玲. 2015. 泉州湾河口红树林湿地重金属的分布与迁移[J]. 生态学杂志, 34(4): 1136-1142.
- 刘昆, 孙永光, 齐玥, 王伟伟, 袁秀堂, 付元宾, 李培英. 2018. 潮间带沉积物粒度空间分异及其与TC、TN的空间相关性分析[J]. 海洋环境科学, 37(1): 95-100, 150.
- 刘胜然, 王铁宇, 汤洁, 孟磊, 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, (2): 68-73.
- 刘豫. 2018. 泉州山美水库、泉州湾沉积物中多溴二苯醚的时空分布和环境风险评估[D]. 泉州: 华侨大学, 1-157.
- 刘宗成. 2013. 福建省泉州市矿山开采地质环境现状与治理建议[J]. 能源与环境, (5): 80-81.
- 孟希, 常方强, 林从谋. 2014. 泉州湾冲淤演化特征及控制因素研究[J]. 自然灾害学报, 23(5): 185-191.
- 泉州市海洋与渔业局. 2011. 2011年泉州市海洋环境状况公报[R]. 1-27.
- 泉州市海洋与渔业局. 2018. 2018年泉州市海洋环境状况公报[R]. 1-22.
- 饶清华, 李家兵, 胡敏杰, 谢蓉蓉, 张祥雨, 邱宇. 2018. 亚热带河口潮滩湿地N₂O排放对氮硫增强输入的响应[J]. 环境科学学报, 38(5): 2045-2054.
- 谭芳林, 叶功富, 崔丽娟, 张立华, 罗美娟, 孙志同, 林捷, 罗彩莲, 乐通潮, 黄丽, 林永源. 2010. 泉州湾河口湿地红树林立地类型划分[J]. 湿地科学, 8(4): 366-370.
- 汤军健, 陈楚汉, 温生辉. 2011. 泉州湾跨海大桥潮流场数值模拟[C]. 第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集, 太原. 978-985.
- 王爱军, 陈坚, 李东义, 卓志强. 2007. 泉州湾海岸湿地沉积物C、N的空间变化[J]. 环境科学, (10): 2361-2368.
- 王伟, 顾效源, 赵辉, 丁喜桂, 叶思源, 肖楠, 于剑峰, 李金鹏. 2018. 山东芝罘湾表层沉积物重金属含量与环境质量评价[J]. 海洋科学, 42(7): 3-11.
- 谢文平, 陈政, 朱新平, 郑光明, 蔡贤贤, 张亮, 李子晴. 2020. 珠江河网区鱼塘重金属赋存形态及污染评价[J]. 环境科学与技术, 43(S1): 176-182.
- 熊绍柏, 金东敏, 孙克忠, 邹以生, 樊叙邦, 杜小刚. 1991. 福建漳州地热田及其邻近地区的地壳深部构造特征[J]. 地球物理学报, (1): 55-63.
- 徐劲林, 查轩. 2009. 土壤侵蚀危险度的计算与影响因子分析——以福建安溪红壤水土流失区为例[J]. 地球信息科学学报, 11(5): 577-584.
- 徐谅慧, 李加林, 李伟芳, 赵斯, 袁麒麟, 王明月, 杨磊, 卢雪珠. 2014. 人类活动对海岸带资源环境的影响研究综述[J]. 南京师大学报(自然科学版), 37(3): 124-131.
- 杨霞, 彭渤, 吴雅霁, 张坤, 匡晓亮, 吴蓓娟, 谭长银, 涂湘林. 2016. 湘江湘潭段河岸沉积物重金属污染地球化学分析[J]. 地球化学, 45(1): 62-76.
- 印萍, 林良俊, 陈斌, 肖国强, 曹珂, 杨吉龙, 李梅娜, 段晓勇, 仇建东, 胡云壮, 王磊, 孙晓明. 2017. 中国海岸带地质资源与环境评价研究[J]. 中国地质, 44(5): 842-856.
- 游惠明, 韩建亮, 潘德灼, 谢会成, 乐通潮, 马键斌, 黄思忠, 谭芳林. 2019. 泉州湾河口湿地生态系统服务价值的动态评价及驱动力分析[J]. 应用生态学报, 30(12): 4286-4292.
- 于瑞莲, 王荔娟, 胡恭任, 赵元慧. 2008. 晋江感潮河段沉积物重金属赋存形态及潜在生态风险[J]. 地球与环境, (2): 113-118.
- 于瑞莲. 2009. 泉州湾潮间带沉积物中重金属元素的环境地球化学研究[D]. 长春: 东北师范大学, 57-58.
- 于瑞莲, 胡恭任, 赵金秀, 韩仲. 2013. 泉州湾河口湿地秋茄红树林中重金属的分布、迁移和储量[J]. 环境化学, (1): 125-131.
- 于瑞莲, 张伟芳, 胡恭任, 张晨晨, 王晓明. 2015. 晋江河口沉积物重金属污染历史与来源[J]. 环境科学研究, 28(6): 907-914.
- 张倩. 2020. 地球关键带土壤中重金属和稀土元素分布及生态风险评估[D]. 中国地质大学(北京), 2-3.