

彭模, 邓晓茜, 刘德勇, 等. 江苏近岸海域沉积物重金属污染特征与源解析[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(7): 1-11.

PENG Mo, DENG Xiaolian, LIU Deyong, et al. Characteristics and source analysis of heavy metals pollution in sediments of coastal zones in Jiangsu Province[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(7): 1-11.

江苏近岸海域沉积物重金属污染特征与源解析

彭模¹, 邓晓茜^{2*}, 刘德勇², 廖晨峰², 王婷², 王音璇², 王婕¹, 毛龙江²

(1 江苏省环境监测中心, 南京 210019; 2 南京信息工程大学海洋科学学院, 南京 210044)

摘要: 基于 2020 年江苏近岸海域表层沉积物中 7 种重金属 (Pb、Cr、As、Cu、Zn、Cd 和 Hg) 含量, 分析其污染特征并追溯其来源。结果表明, 江苏海域表层沉积物的平均粒径由北向南逐渐加粗, 除 Cr 外, 其他重金属平均含量均高于江苏海涂土壤环境背景值。2020 年, 江苏近岸海域整体处于轻度污染水平和轻微潜在生态风险水平。其中, Cd 处于重度污染水平和强潜在生态风险水平, 其他重金属元素处于轻度污染水平和轻微潜在生态风险水平。江苏海域中海州湾和长江口的重金属含量与污染程度均较高。在江苏近岸海域, 2020 年 Cd 和 Zn 的污染程度比 2013 年严重。重金属元素与平均粒径呈正相关, 与黏土之间的正相关性最高。来源分析结果表明, 重金属来源可分为交通运输与工业排放 (Pb 和 Zn)、农业生产活动和生活污水 (As 和 Cd)、成土母质和大气干湿沉降 (Cr 和 Hg)、养殖生产活动 (Cu) 4 类。与 APCS-MLR 模型相比, PMF 模型对江苏海域重金属的自然源的解释相对较差。APCS-MLR 模型结果指示, 这 4 类来源对重金属贡献率分别为 27.30%、35.55%、31.22% 和 5.93%。研究结果对保护江苏近岸海域生态环境和合理发展海洋经济具有重要意义。

关键词: 重金属; 污染特征; 源解析; 沉积物; 江苏近海

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.194

0 引言

近海区域是陆地与海洋的过渡关键地带, 密集的人类活动会导致沿岸生态环境变得脆弱敏感^[1]。沿海区域的社会经济快速发展和工农业活动强度的不断增加, 导致排入海域的污染物含量呈增加趋势, 具有生物毒性强、易积累和难降解特性的重金属被广泛关注, 其污染会对近岸海域生态环境造成严重威胁^[2-4]。重金属在海域的水体、生物、大气和沉积物中均存在污染, 其中, 沉积物是污染物最终

富集的介质, 也是其他环境介质的“源”^[3,5]。因此, 研究沉积物中重金属的污染特征有助于分析其对生态环境的影响。

江苏省作为中国经济发达的重要沿海省份之一, 海域资源丰富, 航运路线密集, 渔业生产活动日益增加, 渔业经济持续向好^[6-8]。江苏沿海城市的工业化和城镇化水平也在日益提升, 因此, 江苏海域生态环境保护与治理的压力日益严峻^[6,8]。已有研究表明, 2013 年江苏海域表层沉积物中重金属含量高于 2008 年, 其中, Cr 污染最严重, Hg 污染的生态风险水平最高。重金属主要来源于人类活动, 如工业生产活动、农业生产活动、交通排放和生活污水排放等^[9]。基于此, 近年来政府为控制重金属排放源, 持续提高环保技术水平和严格落实环保措施^[10-11]。因此, 持续监测江苏海域重金属含量对生态环境保护措施的提出和管理具有重要意义。本研究通过分析 2020 年江苏近岸海域表层沉积物中重金属的污染特征和生态风险水平, 追溯重金属元素 Pb、Cr、As、Cu、Zn、Cd 和 Hg 的来源, 为江苏海域重金

收稿日期: 2024-08-05

资助项目: 江苏省生态环境监测科研项目(2329, 24A04, 24A14, 24B04); 江苏省生态环境厅招标项目(JSZC-320000-JSSJ-G2022-0007); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX23_1324); 江苏省大学生创新创业项目(202410300023Z)

第一作者: 彭模(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋生态环境监测和保护方面的研究工作。E-mail: u235u235@139.com

* 通讯作者: 邓晓茜(1998—), 女, 在读博士, 主要从事海洋环境化学、海洋沉积环境方面的研究工作。E-mail: 1251621034@qq.com

属污染的长期监测和治理提供数据支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析

江苏省环境监测中心于2020年在江苏近岸海域采集未受扰动的0~1 cm的表层沉积物样品29个(图1)。样品采集、贮存和运输的标准均参考《海洋监测规范》^[12]第3部分。样品中重金属元素的

分析样品制备和浓度测定过程严格参考《海洋监测规范》^[12]第5部分,其中,Pb、Cr、Cu、Zn和Cd采用原子吸收法测定,As和Hg采用原子荧光法测定,实验分析的准确度、精确度和仪器测定检出限参考《海洋监测规范》^[12]。样品中粒度测定参考《海洋调查规范》^[13]第8部分的激光粒度法分析。江苏海域沿岸城市(连云港、盐城、南通)的土地利用类型主要是农业用地、城乡建设用地、草林用地和水域等(图1),人口密度为542人/km²^[14]。站点Y1—Y7属于连云港海域,站点Y8—Y19属于盐城海域,站点Y20—Y29属于南通海域。

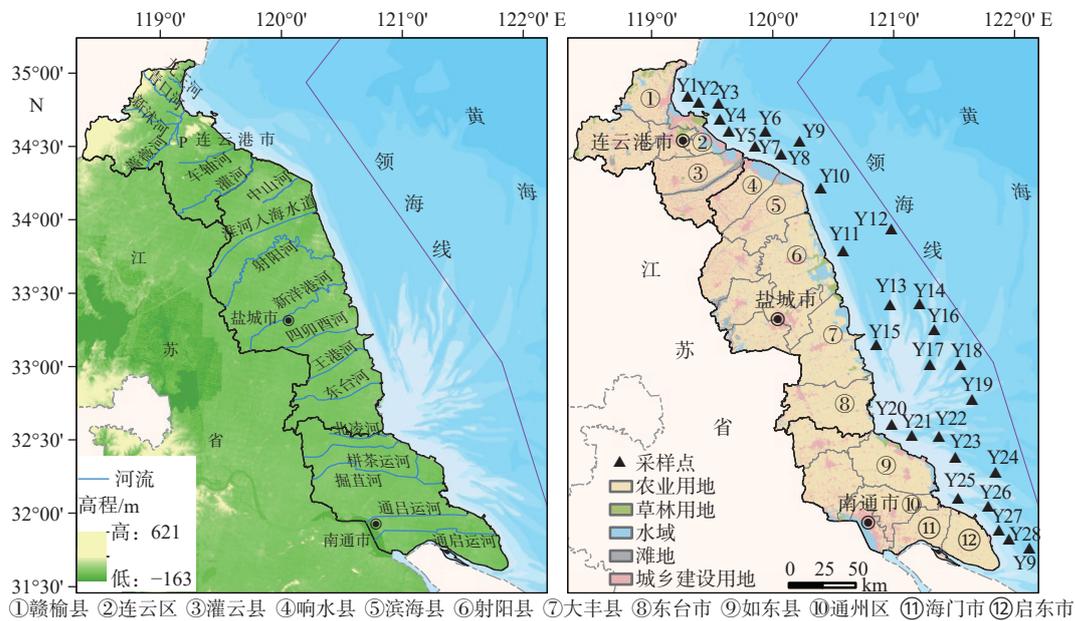


图1 江苏省近岸海域采样站点

Fig.1 Sampling stations in coastal zones of Jiangsu Province

1.2 数据处理方法

污染负荷指数法(pollution load index, PLI)^[15]和内梅罗综合污染指数法(nemerow multi-factor index, NI)^[16]均是基于每种污染物的污染指数(contamination factor, CF)来评估环境总体污染程

度的方法,CF为污染物实测值与背景值的比值,本文背景值选取江苏海涂土壤环境背景值^[17]。潜在生态风险指数法由HAKANSON提出,是基于重金属的毒性系数(E_r^i 、RI)^[18]来反映单种污染物或多种污染物对环境的潜在生态风险影响的方法^[19]。CF_i、PLI、NI、 E_r^i 和RI的等级分类见表1^[15-19]。

表1 重金属评价指标的等级划分

Table 1 Classification of evaluation indexes of heavy metals

CF	PLI	污染程度	NI	污染程度	E_r^i	单因子潜在生态风险程度	RI	综合潜在生态风险程度
≤1	≤1	清洁	≤0.7	清洁	≤40	轻微	≤150	轻微
1~2	1~2	轻度	0.7~1	警戒	40~80	中等	150~300	中等
2~3	2~3	中度	1~2	轻度	80~160	强	300~600	强
≥3	≥3	重度	2~3	中度	160~320	很强	≥600	很强
\	\	\	≥3	重度	≥320	极强	\	\

注:“\”为无数据。

本文重金属的来源分析方法采用多元统计分析(相关性分析和因子分析)、绝对因子分析-多元线性回归(APCS-MLR)模型和正矩阵因子分解(PMF)模型。APCS-MLR模型主要将绝对主成分因子得分(APCS)和多元线性回归(MLR)结合,定量计算每个源对每种元素的贡献率^[20-21]。PMF模型将样本数据的不确定度与实测数据结合,对单个点进行加权计算并定量分析因子贡献^[22-23]。

江苏近岸海域沉积物平均粒径均值为 5.12 Φ , 范围为 2.41 Φ ~7.70 Φ (图 3), 其中, 连云港海域、盐城海域和南通海域的平均粒径均值分别为 7.22 Φ 、4.61 Φ 和 4.26 Φ 。江苏海域的平均粒径分布显示从北向南逐渐变粗的趋势(图 3)。平均粒径通常与水动力条件成反比^[25], 说明连云港海域和盐城北部海域水动力条件较弱, 盐城南部和南通海域水动力条件较强, 其中, 连云港海州湾的水动力条件最弱。

2 结果与讨论

2.1 粒度分布特征

根据 FOLK 沉积物分类方法^[24], 2020 年江苏近岸海域表层沉积物可分为 5 类(图 2): M-泥、C-黏土、sC-砂质黏土、cS-黏土质砂、S-砂, 分别占江苏海域面积的 17.24%、27.59%、17.24%、24.14%、13.79%。连云港海域沉积物类型主要为 M-泥, 其次是 C-黏土和 sC-砂质黏土; 盐城海域沉积物类型主要为 C-黏土, 其次是 S-砂、cS-黏土质砂和 sC-砂质黏土; 南通海域沉积物类型主要为 cS-黏土质砂, 其次是 sC-砂质黏土、C-黏土和 S-砂, 说明江苏海域北部沉积较细粒沉积物, 南部沉积较粗粒沉积物。

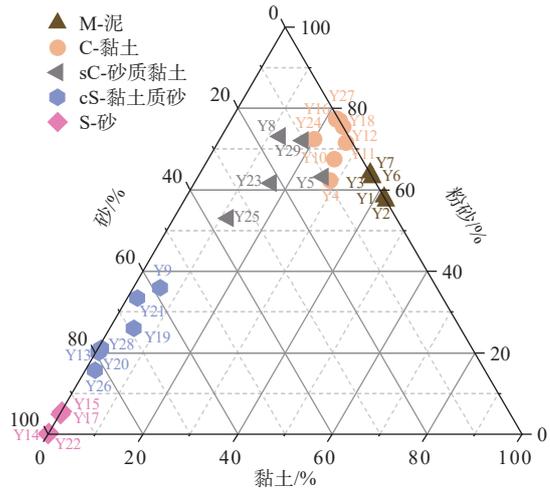


图 2 2020 年江苏近岸海域表层沉积物的三角形分类图
Fig.2 Ternary diagram of surface sediments in coastal zones of Jiangsu Province in 2020

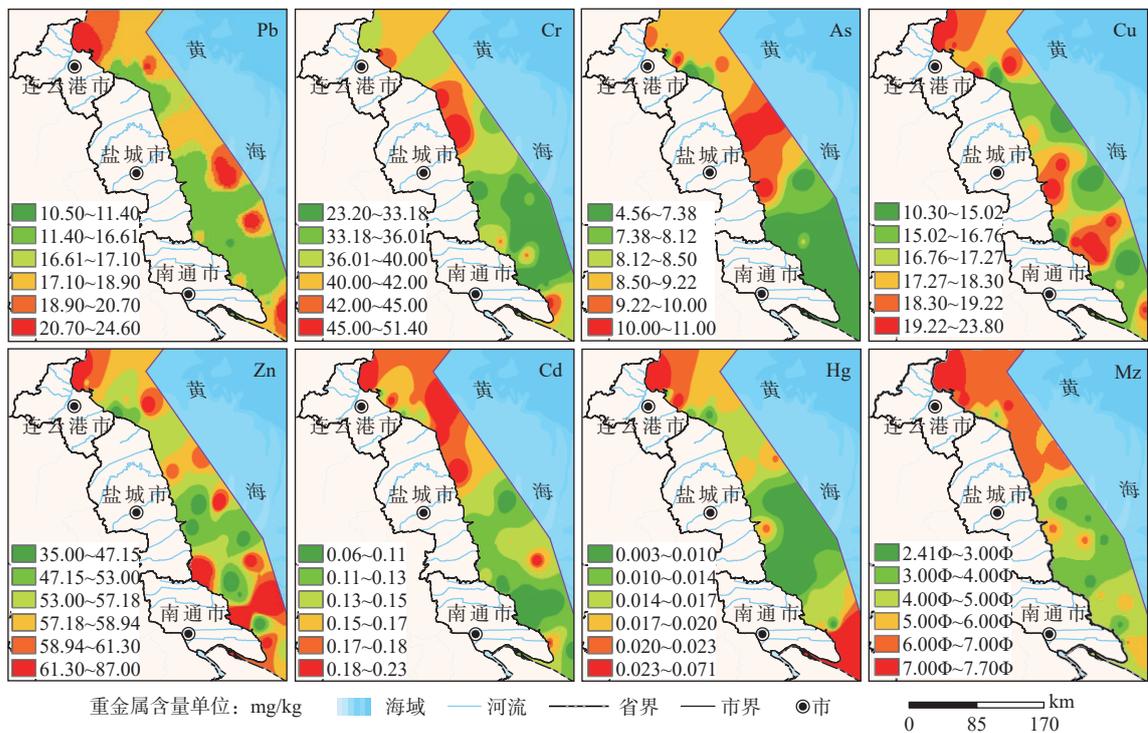


图 3 江苏近岸海域重金属含量和平均粒径的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of heavy metals and mean-grain-size in the sediments of coastal zones in Jiangsu Province

2.2 重金属空间分布

2020年江苏近岸海域表层沉积物中重金属 Pb、Cr、As、Cu、Zn、Cd 和 Hg 平均含量分别为 17.20、37.19、7.74、17.31、57.39、0.14 和 0.017 mg/kg(表 2), 均低于海洋 I 类沉积物标准(GB 18668—2002)。除 Cr 和 Hg 外,其他重金属的平均含量均超过江苏海涂土壤环境元素自然背景值^[17]。Pb、As、Cu、Zn、Cd 和 Hg 含量超过江苏海涂土壤环境元素自然背景值的站点比例分别为 93.10%、48.28%、82.76%、72.41%、100% 和 24.13%,这说明 2020 年江苏海域存在重金属污染,其中,Cd 对环境造成的污染最严

重。与 2013 年江苏近岸海域表层沉积物重金属平均含量^[9] 相比,重金属 Zn 和 Cd 平均含量呈增加趋势,说明近年来江苏近岸排放 Zn 和 Cd 对海域生态环境造成的影响愈加严峻。比较中国典型海域表层沉积物中重金属平均含量,发现东海^[26] 重金属平均含量最高,其次是渤海^[27] 和山东近岸^[28]。此外,2020 年江苏近岸海域表层沉积物中 Cr 和 Zn 平均含量均低于其他海域,Pb 和 Cd 平均含量高于山东近岸海域^[28],As 平均含量高于渤海^[27] 和南海北部^[29],Cu 和 Cd 平均含量高于南海北部^[29]。整体而言,相比中国其他海域,江苏近岸海域表层沉积物中重金属平均含量处于较低水平。

表 2 江苏海域与中国典型海域表层沉积物中重金属均值含量对比

Table 2 Comparison in average concentration of heavy metal in surface sediment of coastal zones in Jiangsu Province and typical sea in China

海域	采样年份	Pb	Cr	As	Cu	Zn	Cd	Hg
本研究	2021	16.61	36.01	7.38	16.76	57.18	0.13	0.017
江苏海域 ^[9]	2013	20.70	64.00	14.80	18.30	53.00	0.11	0.023
渤海 ^[27]	2018	21.21	50.36	6.58	25.26	63.49	0.15	0.026
山东近岸 ^[28]	2021	14.70	59.00	10.50	24.20	62.50	0.12	0.023
东海 ^[26]	2011	32.39	82.41	10.78	36.55	82.61	0.29	\
南海北部 ^[29]	2016	18.60	39.60	5.20	9.60	58.70	0.06	\

注:“\”为无数据。

2020 年江苏近岸海域沉积物中重金属在空间分布上存在差异性。根据江苏沿海三市河流分布(图 1),发现河口入海处重金属含量均较高,说明海域重金属可能主要来源于河流输入。Pb 和 Hg 在连云港海州湾和长江口区域含量均较高;As 在盐城射阳河口、新洋港河口和王港河口处含量最高;Cu 在连云港海州湾、连云港灌河口、盐城王港河口和南通栟茶运河处含量较高;Zn 在连云港海州湾、南通北凌河口、南通掘直河口和长江河口含量较高;Cd 在连云港和盐城北部海域含量最高(图 3)。综上,可发现重金属在海州湾和河流入海口处含量较高。对照平均粒径空间分布,海州湾沉积类型主要为 M-泥(图 2),平均粒径值大,水动力条件弱^[25],污染物极易在湾内富集^[30]。海州湾和长江口航运路线密集,船舶运输和海港码头作业均会输入重金属至海域中^[30-31]。此外,已有研究表明,河流是运输陆源物质(含污染物)进入海洋的重要通道^[32],今后环境监测中还需关注海州湾和河口区域重金属输出量及其对海域的影响。

2.3 重金属污染程度

2020 年,江苏近海表层沉积物中重金属的污染负荷指数(PLI)均值为 1.15,海域整体处于轻度污染,其中,17 个站点处于轻度污染,其他站点均属于清洁水平(图 4)。污染指数(CF)均值由高到低依次为 Cd(3.42,重度污染)、Pb(1.51,轻度污染)、Zn(1.22,轻度污染)、Cu(1.15,轻度污染)、As(1.05,轻度污染)、Hg(0.75,清洁水平)和 Cr(0.62,清洁水平)。根据污染指数结果(图 4),发现 Cr 在所有站点均属于清洁水平,这与 Cr 含量均低于背景值结果一致;Cd 在 17 个站点处于重度污染,10 个站点处于中度污染;Pb 在站点 Y4、Y15、Y19 和 Y29 处于中度污染;Hg 在站点 Y27 处于重度污染;其他站点的重金属均属于轻度污染水平或清洁水平。这与重金属含量空间分布结果一致。内梅罗综合污染指数(NI)结果显示,Cd 污染水平为重度(4.59),Hg 污染水平为中度(2.26),Pb、As、Cu 和 Zn 污染水平为轻度(1.86、1.29、1.39 和 1.56),Cr 污染水平

达到警戒程度(0.75)(图 4), 其中, Hg 的 NI 与 CF 结果不一致, 这可能与 Hg 的 CF 最大值有关, Hg 在站点 Y27 的 CF 值为 3.1, 使得 NI 结果偏高。根据江苏海涂土壤环境背景值^[17]分析 2013 年江苏近岸海域沉积物中重金属^[9]的 CF 均值和 NI 值, 发现 2020 年 Cd 和 Zn 的 CF 均值低于 2013 年的(2.69 和 1.12, 中度污染和轻度污染), 其他重金属的 CF 均值在 2020 年均低于 2013 年, 说明 Cd 和 Zn 的污染程度逐渐严重。比较 2013 年重金属的 NI 值, Cd 和 Hg 在 2020 的 NI 值高于 2013 年(4.36 和 2.00),

其他重金属在 2020 的 NI 值低于 2013 年, 其中, Cd 和 Hg 在 2013 和 2020 年均处于重度污染水平和中度污染水平, Pb、As 和 Cu 从 2013 年的中度污染水平转变为 2020 年的轻度污染水平, Zn 在 2013 和 2020 年均处于轻度污染水平, Cr 从 2013 年的轻度污染水平转变为 2020 年的警戒程度。这些说明近年来政府在江苏海域持续关注并控制重金属排放, 如环保政策的严格实施^[10-11]。2013 与 2020 年重金属污染程度比较结果指示, 需重点警惕 Cd 对生态环境的影响, 其次是 Hg 和 Zn。

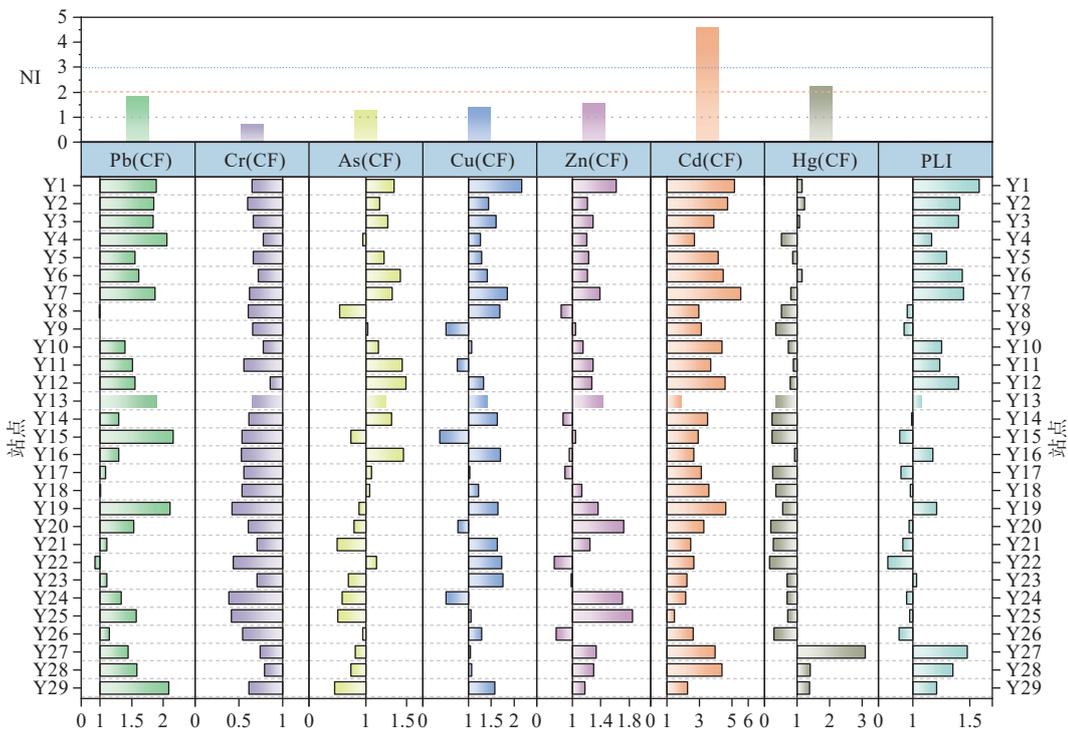


图 4 重金属元素的污染指数 (CF)、污染负荷指数 (PLI) 和内罗梅综合污染指数 (NI)

Fig.4 CF, PLI, and NI of heavy metals

根据 CF 结果发现江苏沿海城市海域中连云港海域重金属污染最严重, 其次是盐城海域。这些区域平均粒径值大, 水动力条件弱(图 3), 污染物易积累在沉积物中, 导致重金属富集^[25,30]。Cd 在连云港海域、盐城海域和南通海域的 CF 均值为 4.37、3.43 和 2.74, 分别属于重度污染、重度污染和中度污染。Cd 仅在连云港海域的站点 Y4 处于中度污染, 其他站点均属于重度污染, 其中灌河口处和海州湾内的站点污染指数最高, 分别高达 5.52 和 5.17, 属于重度污染。根据海域沉积物中 CF 均值结果, 所有海域沉积物中 Cr 和 Hg 属于清洁水平, 而南通海域还有 As 属于清洁水平, 说明南通海域沉积物中 As 输入较低。Hg 在连云港海域污染程度为轻

度, 在其他海域均属于清洁水平, 而长江口的站点 Y27 处于重度污染水平, 这与 Hg 排放方式有关。连云港海域沿岸和长江口沿岸有大量化工园区, 工业排放的 Hg 在大气中可被远距离传输, 并通过大气沉降积累在海域沉积物中^[30,33]。整体上, 江苏近岸海域中连云港海域与长江口处的重金属污染程度最高, 这些结果与重金属含量空间分布结果较为一致。

2020 年江苏近海沉积物中重金属单因子潜在生态风险均值结果显示, Cd 为强潜在生态风险水平, 其他重金属均 < 40, 为轻微潜在生态风险水平。根据江苏海涂土壤环境背景值^[17]分析 2013 年江苏近岸海域沉积物中重金属^[9]的潜在生态风险水平,

发现 Cd 和 Zn 在 2020 年的单因子潜在生态风险均值(102.56 和 1.22)高于 2013 年的(80.71 和 1.12), 其他重金属在 2020 年的潜在生态风险水平均低于 2013 年的, 这与 Cd 和 Zn 平均含量呈增加趋势一致, 进一步说明江苏沿海近年来 Cd 和 Zn 的排放量呈增加趋势。Cd 在站点 Y7 为很强潜在生态风险, 该站点位于灌河口, 这可能与河流输入有关^[32]。Cd 在 20 个站点为强潜在生态风险水平, 其余站点均为中等潜在生态风险水平(图 5), 其中连云港海域的潜在生态风险水平最高, 其次是盐城海域。

Hg 在站点 Y27 为强潜在生态风险水平, 在站点 Y1、Y2、Y3、Y6、Y28 和 Y29 为中等潜在生态风险水平, 其他站点的潜在生态风险均为轻微水平(图 5)。江苏近岸沉积物中重金属综合潜在生态风险指数均值为 158.91, 说明整体上研究区处于中等潜在生态风险水平; 其中处于中等潜在生态风险水平的站点有 12 个, 主要集中在受到人类活动强烈干扰的连云港海域、盐城北部海域和长江口(图 5)。这与 CF 结果基本一致, 指示政府应关注并控制重金属的人为排放, 尤其是重点控制 Cd 的来源。

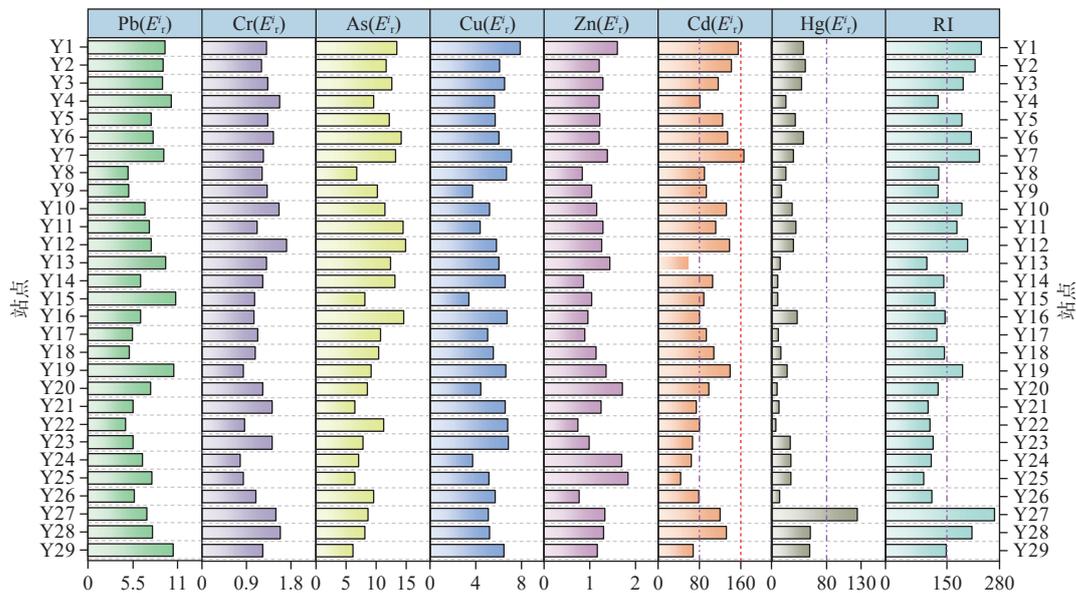


图 5 重金属元素的潜在生态风险水平

Fig.5 Potential ecological risk levels of heavy metals

2.4 重金属来源解析

相关性分析可反映污染物之间的关联性, 并有效辨识污染物来源的分类^[34]。2020 年江苏近海沉积物中重金属的 Pearson 相关性分析结果表明, Zn 与 Cr、As、Cu 是负相关, 其他重金属之间均为正相关(图 6a)。Pb 与 Zn 之间相关性最高(0.46), Cr、As、Hg 均与 Cd 的相关系数较高(0.37、0.54、0.35), Cu 与 As 之间相关性较高(0.26)。因此, Pb 与 Zn 具有同源性, Cr、As、Hg、Cd 和 Cu 可能具有同源性, 但仍需通过因子分析结果细分重金属来源分类。此外, 砂与重金属之间呈负相关, 粉砂和黏土与重金属之间均为正相关(图 6a)。除 Hg 外, 粉砂与重金属之间的正相关性弱于黏土, 这说明沉积物粒径越小, 对重金属的富集作用越强, 符合“粒度控制效应”规律^[25,35]。水动力条件弱时, 细粒物质大量沉积^[25], 解释了连云港海州湾重金属富集最严重的现

象。水动力条件强时, 细粒物质被搬运至其他区域, 粗粒物质易沉积^[25], 这也解释了江苏海域远离沿岸的海域也存在重金属富集的现象。因此, 研究区重金属元素分布及含量与粒度分布特征密切相关。

2020 年江苏近岸海域沉积物中重金属的因子分析结果显示 KMO 值为 0.61, 重金属可分为 4 类, 其累积方差贡献率达到 79.88%, 解释了大部分信息, 说明结果可靠(表 3)。因子载荷结果(图 6b)显示, 因子 1(PC1)高载荷元素主要为 Pb (0.82)和 Zn(0.85), 解释 31.48% 的方差贡献率; 因子 2(PC2)代表元素为 As 和 Cd, 载荷因子分别为 0.92 和 0.74, 方差贡献率为 22.61%; 因子 3(PC3)主要为 Cr 和 Hg, 载荷因子均为 0.80, 方差贡献率为 14.15%; 因子 4(PC4)代表元素是 Cu, 载荷因子均为 0.90, 方差解释量为 11.64%。因此, 江苏海域重金属污染可分为 4 类: Pb 与 Zn、As 与 Cd、Cr 与 Hg、Cu。

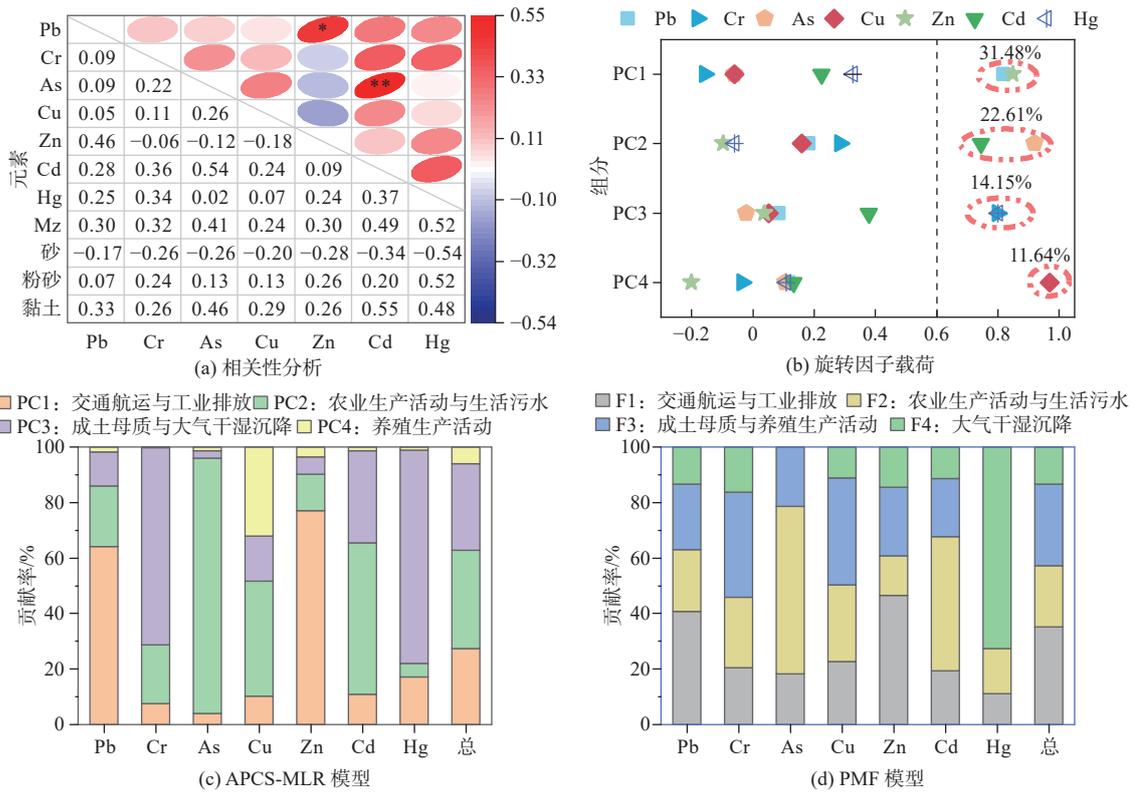


图 6 重金属元素与粒度参数的相关性分析热力图、旋转因子载荷、APCS-MLR 和 PMF 模型来源解析结果
 Fig.6 Thermogram of correlation analysis of heavy metal elements and particle size parameters, rotation factor load, and source analysis results of APCS-MLR and PMF models

表 3 江苏近岸海域表层沉积物中重金属因子分析结果
 Table 3 Factor analysis results of heavy metals in surface sediments of coastal zones in Jiangsu Province

因子	特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
1	2.20	31.48	31.48
2	1.58	22.61	54.09
3	0.99	14.15	68.24
4	0.82	11.64	79.88
5	0.60	8.60	88.48
6	0.45	6.49	94.97
7	0.35	5.03	100

相关性分析与因子分析结果只能定性辨别重金属来源数量与类型, 还需受体模型 (APCS-MLR 和 PMF 模型) 定量分析不同来源对江苏海域表层沉积物重金属的贡献率^[20-23]。APCS-MLR 模型结果中拟合度 (R^2) 值为 0.85~0.99, 指示模型结果具有较好效果。APCS-MLR 模型 (图 6c) 结果中重金属分类情况与因子分析一致。

Pb 和 Zn 对 PC1 贡献最高, 分别为 64.24% 和 77.02%。Pb 和 Zn 含量均值高于江苏海涂土壤环境元素自然背景值, 说明受人类活动影响。含 Pb

添加剂常会被加入汽油中, 尽管已有禁 Pb 政策, 但汽车尾气排放的 Pb 仍富集在土壤中^[21,36-37]。汽车存在大量镀锌组件且轮胎使用含锌的硬度添加剂, 因此, 交通尾气也是 Zn 的普遍来源^[36,38]。Pb 和 Zn 在连云港海州湾和长江口含量较高, 海州湾有船舶集中的赣榆港区, 长江口的船舶运输路线也很密集, 船舶的表层防污漆和燃油废气会产生 Pb 污染^[33], 这进一步证实 Pb 和 Zn 来源于交通运输。江苏沿岸城市有较为发达的钢铁工业、金属加工等制造业和很多大型火电厂, 多以煤炭为燃料^[34]。2020 年沿海 3 市的综合能源消费量为 0.31 亿 t 标准煤, 高于 2013 年 0.03 亿 t 标准煤^[14,39-40], 工业生产活动的煤炭燃烧也是 Pb 的重要来源。此外, 中石化、中石油等大型化工企业的污水排放会造成江苏沿海 Zn 污染^[41], 这指示工业排放也是 Pb 和 Zn 的主要来源。因子 1 (PC1) 可能来自于交通运输和工业排放。

PC2 代表重金属为 As 和 Cd, 对 PC2 的贡献为 91.98% 和 54.61%。Cd 通常是磷肥的主要添加元素, 研究报道中国磷肥中 Cd 含量为 0.6 mg/kg^[42]。江苏沿海 3 市的土地利用类型主要是农业用地 (图 1), 在 2020 年的农用化肥施用量为 99.79 万 t, 低于 2013 年的 111.78 万 t^[14,39-40], 化肥施用量在逐

渐减少,但土壤中仍存在 Cd 富集^[36]。As 作为农药和化肥的关键成分,现代农业生产活动中会过度使用农业化肥,其残留进入河流且输入至海域中^[36,43]。此外,生活中使用的洗涤剂往往也含有 As,这些进入水体,而后随河流入海沉降在海域表层沉积物中^[44]。因此,重金属 As 和 Cd 主要来源于农业生产活动和生活污水的混合源。

PC3 代表重金属为 Cr 和 Hg,其含量均值均低于江苏海涂土壤环境元素自然背景值,说明受人类活动影响较小。Cr 通常是中国土壤中含量较低的重金属,取决于成土母质含量,说明 Cr 主要来源于自然因素,即成土母质^[36,45]。Hg 含量空间分布指示,Hg 在部分站点的含量超过背景值且处于轻度—重度污染水平,说明在江苏海域部分区域存在人类活动影响。江苏沿岸有化工园区,石油化工易排放 Hg 到大气中,Hg 在大气中具有稳定性和远距离移动性,易通过大气干湿沉降进入海域^[33]。因此,PC3 主要反映成土母质和大气干湿沉降对重金属的影响。

PC4 代表元素为 Cu。养殖业生产活动中动物饲料通常含 Cu 添加剂,以促进动物生长和抗菌治疗^[36]。江苏海域分布较多海水养殖区,水产养殖过程中会投入大量饲料与药物,导致海域 Cu 含量上升^[43,46]。因此,Cu 多来源于养殖生产活动。

APCS-MLR 模型结果指示,PC1、PC2、PC3 和 PC4 分别代表交通运输与工业排放、农业生产活动与生活污水的混合源、成土母质与大气干湿沉降的混合源、养殖生产活动,其贡献率分别为 27.30%、35.55%、31.22% 和 5.93%(图 6c)。PMF 模型将重金属来源也分为 4 类,F1、F2、F3 和 F4 对重金属来源的贡献分别为 35.20%、22.00%、29.60% 和 13.30%。F1 对 Pb 和 Zn 的贡献率依然较高,分别为 40.80% 和 46.60%;F2 在 As 和 Cd 的贡献上较为显著,分别为 60.30% 和 48.40%;F2 对 Cr 和 Cu 的贡献较高,分别为 38.00% 和 38.50%;F4 对 Hg 的贡献更为突出,为 72.50%(图 6d)。APCS-MLR 模型和 PMF 模型对重金属来源分类的结果有一定差异性,这可能与 2 种模型在处理数据时采用的算法不同^[35]。结合 Cr 含量的空间分布与污染程度结果,Cr 在所有站点的含量均低于江苏海涂土壤环境元素自然背景值,其来源受人类活动影响较小,而 PMF 模型中 Cr 与 Cu 为一类,这说明 PMF 模型对自然源的解释相对较差,因此,江苏近岸海域表层沉积物中重金属的来源结果以 APCS-MLR 模型结果为主。

3 结论

(1)2020 年江苏近岸海域表层沉积物类型主要为 C-黏土和 cS-黏土质砂,沉积物颗粒从北向南逐渐变粗。沉积物中重金属仅 Cr 和 Hg 的平均含量低于江苏海涂土壤环境元素自然背景值。相较 2013 年,仅有 Cd 和 Zn 平均含量略微增加。江苏海域中水动力条件较弱的连云港海州湾重金属含量最高,需持续关注 and 监测。

(2)2020 年江苏近岸海域处于轻度污染水平和轻微潜在生态风险水平,其中,Cd 污染最严重,处于重度污染水平和强生态风险水平,其他重金属处于清洁—轻度污染水平和轻微生态风险水平。相较 2013 年,2020 年 Cd 和 Zn 的污染指数呈增加趋势,Hg 在海州湾和南通海域污染程度加重,需警惕 Cd、Zn 和 Hg 污染情况。

(3)相关性分析结果指示,Pb 与 Zn 呈正相关,Cr、As、Hg、Cd 和 Cu 呈正相关。重金属与砂呈负相关,与黏土的正相关性高于粉砂,说明重金属主要富集在细粒物质中,粒度是重金属分布及含量的控制因素之一。

(4)来源解析结果指示重金属来源可分为 4 类:Pb 和 Zn 由交通运输与工业排放的混合源控制(27.30%);As 和 Cd 来源于农业生产活动和生活污水(35.55%);Cr 和 Hg 来源于成土母岩和大气干湿沉降(31.22%);Cu 来源于养殖生产活动(5.93%)。APCS-MLR 模型对 2020 年江苏海域沉积物中重金属自然源的解释优于 PMF 模型。

参考文献:

- [1] 王颖,季小梅.中国海陆过渡带:海岸海洋环境特征与变化研究[J].地理科学,2011,31(2):129-135.
WANG Y,JI X M. Environmental characteristics and changes of coastal ocean as land-ocean transitional zone of China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(2): 129-135.
- [2] 俞慎和,历红波.沉积物再悬浮重金属释放机制研究进展[J].生态环境学报,2010,19(7):1724-1731.
YU S H,LI H B. Perspectives on the release of heavy metals via sediment resuspension[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(7): 1724-1731.
- [3] XU G, PEI S F, LIU J, et al. Surface sediment properties and heavy metal pollution assessment in the near-shore area, north Shandong Peninsula[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 95(1): 395-401.
- [4] SINGH U K, KUMAR B. Pathways of heavy metals contamin-

- ation and associated human health risk in Ajay River Basin, India[J]. *Chemosphere*, 2017, 174: 183-199.
- [5] SANTOS I R, SILVA-F E V, SCHAEFER C E G R, et al. Heavy metal contamination in coastal sediments and soils near the Brazilian Antarctic Station, King George Island[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 50(2): 185-194.
- [6] 丁言者. 江苏近岸海域水质变化特征研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2015.
- DING Y Z. Research on the variation characteristics of water quality in Jiangsu Coastal waters[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2015.
- [7] 江苏省统计局. 江苏省统计年鉴 [M]. 南京: 江苏省统计局, 2023.
- Jiangsu Provincial Bureau of Statistics. Jiangsu Statistical Yearbook[M]. Nanjing: Jiangsu Provincial Bureau of Statistics, 2023.
- [8] 涂春超. 江苏中部近岸海域表层沉积物重金属分布特征与污染评价 [D]. 南京: 南京师范大学, 2018.
- TU C C. Distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals in surface sediments from the coastal waters in central Jiangsu Province[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2018.
- [9] 郑江鹏, 矫新明, 方南娟, 等. 江苏近岸海域沉积物重金属来源及风险评价 [J]. *中国环境科学*, 2017, 37(4): 1514-1522.
- ZHENG J P, JIAO X M, FANG N J, et al. Sources and risk assessment of heavy metals in sediments in Jiangsu coastal areas[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(4): 1514-1522.
- [10] 江苏省人民代表大会常务委员会. 江苏省生态环境保护条例 [EB/OL].[2024-03-06]. https://www.jiangsu.gov.cn/art/2024/6/4/art_64752_11262865.html.
- Standing Committee of the Jiangsu Provincial People's Congress. Regulations on ecological and environmental protection of Jiangsu Province [EB/OL].[2024-03-06]. https://www.jiangsu.gov.cn/art/2024/6/4/art_64752_11262865.html.
- [11] 李纯毅, 崔正国, 白莹, 等. 循环水养殖系统重金属的分布特征及鱼体风险评估 [J]. *环境化学*, 2023, 42(3): 733-742.
- LI C Y, CUI Z G, BAI Y, et al. Distribution characteristics of heavy metals in recirculating aquaculture system and risk assessment of fish[J]. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(3): 733-742.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 17378.3—2007, 海洋监测规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB 17378.3—2007, Specification for Marine Monitoring[S]. Beijing: China Standards Press, 2007.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 12763.8—2007, 海洋调查规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB 12763.8—2007, Specifications for Oceanographic Survey [S]. Beijing: China Standards Press, 2007.
- [14] 连云港统计局. 连云港统计年鉴 [M]. 连云港: 连云港统计局, 2014-2021.
- Lianyungang Provincial Bureau of Statistics. Lianyungang Statistical Yearbook[M].Lianyungang: Lianyungang Provincial Bureau of Statistics, 2014-2021.
- [15] TOMLINSON D L, WILSON J G, HARRIS C R, et al. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index[J]. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 1980, 33(1/2/3/4): 566-575.
- [16] 陆书玉. 环境影响评价 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- LU S Y. Environmental Impact Assessment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.
- [17] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment-ological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001
- [18] 陈邦本, 胡蓉卿, 陈铭达. 江苏海涂土壤环境元素的自然背景值 [J]. *南京农业大学学报*, 1985, 3: 54-60.
- CHEN B B, HU R J, CHEN M D, et al. The natural background-values of environmental elements in the beach soils of Jiangsu Province[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1985, 3: 54-60.
- [19] 吕利云, 董树刚, 刘阳, 等. 南黄海近岸海域表层沉积物重金属分布特征及污染评价 [J]. *海洋湖沼通报*, 2013(4): 101-110.
- LYU L Y, DONG S G, LIU Y, et al. Distributions and pollution assessment of heavy metals in surface sediments in offshore area of South Yellow Sea[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2013(4): 101-110.
- [20] GHOLIZADEH M H, MELESSE A M, REDDI L. Water quality assessment and apportionment of pollution sources using APCS-MLR and PMF receptor modeling techniques in three major rivers of South Florida[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 566/567: 1552-1567.
- [21] CAI Y Q, MAO L J, DENG X Q, et al. Trace elements in surface sediments from Xinyanggang River of Jiangsu Province, China: spatial distribution, risk assessment and source appointment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2023, 187: 114550.
- [22] PAATERO P, TAPPER U. Positive matrix factorization: a non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values[J]. *Environmetrics*, 1994, 5: 111-126.
- [23] PAATERO P. Least squares formulation of robust non-negative factor analysis[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 1997, 37(1): 23-35.
- [24] FOLK R L. A review of grain-size parameters[J]. *Sedimentology*. 2010, 6: 73-93.
- [25] 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.
- MEI X, LI X J, MI B B, et al. Distribution regularity and sedimentary differentiation patterns of China seas surface sediments[J]. *Geology in China*, 2020, 47(5): 1447-1462.

- [26] 徐亚岩, 柏育材, 纪炜炜, 等. 中国近海沉积物中重金属的变化特征和生态风险评估 [J]. 海洋渔业, 2019, 41(6): 712-724.
XU Y Y, BAI Y C, JI W W, et al. Variation characteristics and evaluation of potential ecological risk of heavy metals in sediments of the coastal waters of China[J]. Marine Fisheries, 2019, 41(6): 712-724.
- [27] 许艳, 王秋璐, 曾容, 等. 渤海湾表层沉积物重金属污染状况及年际变化分析 [J]. 中国环境科学, 2022, 42(9): 4255-4263.
XU Y, WANG Q L, ZENG R, et al. Pollution status and annual variations of heavy metals in the surface sediments of Bohai Bay[J]. China Environmental Science, 2022, 42(9): 4255-4263.
- [28] 陶慧敏, 张娟, 张潇文, 等. 2021年山东近岸海域沉积物重金属分布特征及生态风险评估 [J]. 环境影响评价, 2023, 45(5): 22-28.
TAO H M, ZHANG J, ZHANG X W, et al. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Shandong coastal area in 2021[J]. Environmental Impact Assessment, 2023, 45(5): 22-28.
- [29] 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), 2022, 61(1): 139-150.
WANG Y M, WANG Y K, CHEN X H. Spatial pattern and provenance of heavy metal elements in the surface sediments in the northern South China Sea shelf[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2022, 61(1): 139-150.
- [30] 杜吉净, 毛龙江, 谭志海, 等. 海州湾岩芯沉积物重金属污染评价和来源分析 [J]. 海洋环境科学, 2016, 35(6): 814-821.
DU J J, MAO L J, TAN Z H, et al. Pollution evaluation and source identification of heavy metals in sediments from core in Haizhou Bay[J]. Marine Environmental Science, 2016, 35(6): 814-821.
- [31] 张建坤. 长江口及苏北沿岸重金属分布特征和生态风险评估 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.
ZHANG J K. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the Yangtze River Estuary and the northern Jiangsu Coast[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020.
- [32] WU Y L, WANG X H, YA M L, et al. Seasonal variation and spatial transport of polycyclic aromatic hydrocarbons in water of the subtropical Jiulong River watershed and estuary, Southeast China[J]. *Chemosphere*, 2019, 234: 215-223.
- [33] 孟昆, 徐敏, 徐文健, 等. 海州湾北部沉积物重金属来源解析及污染评价 [J]. 南京师大学报 (自然科学版), 2018, 41(2): 99-106.
MENG K, XU M, XU W J, et al. Sources apportionment and pollution assessment of heavy metals in the sediments of the northern Haizhou Bay in China[J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2018, 41(2): 99-106.
- [34] LIU L L, DONG C M, KONG M, et al. Insights into the long-term pollution trends and sources contributions in Lake Taihu, China using multi-statistic analyses models[J]. *Chemosphere*, 2020, 242: 125272.
- [35] 雷雁翔, 张斌, 吴治国, 等. 长岛北部海域表层沉积物重金属分布特征与风险评估及来源分析 [J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(3): 40-50.
LEI Y X, ZHANG B, WU Z G, et al. Spatial distribution of heavy metals in the surface sediments of Changdao Island and their sources and pollution assessment[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(3): 40-50.
- [36] 吕建树. 江苏典型海岸带土壤及沉积物重金属环境地球化学研究 [D]. 南京: 南京大学, 2015.
LYU J S. The environmental geochemistry of heavy metals in soils and sediments in typical regions of Jiangsu coastal zone, Eastern China[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.
- [37] NASRIN Y A, BEHANM K. Geochemical characteristics, partitioning, quantitative source apportionment, and ecological and health risk of heavy metals in sediments and water: a case study in Shadegan Wetland, Iran. *Marine Pollution Bulletin*[J]. 2019, 149: 110495.
- [38] YANG L X, CHENG S H, WANG X F, et al. Source identification and health impact of PM_{2.5} in a heavily polluted urban atmosphere in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 75: 265-269.
- [39] 盐城统计局. 盐城统计年鉴 [M]. 盐城: 盐城统计局, 2014-2021.
Yancheng Provincial Bureau of Statistics. Yancheng Statistical Yearbook[M]. Yancheng: Yancheng Provincial Bureau of Statistics, 2014-2021.
- [40] 南通统计局. 南通统计年鉴 [M]. 南通: 南通统计局, 2014-2021.
Nantong Provincial Bureau of Statistics. Nantong Statistical Yearbook[M]. Nantong: Nantong Provincial Bureau of Statistics, 2014-2021.
- [41] SONG X J, HE X R, CHEN B L, et al. Variations and ecological risk assessments of heavy metals in surface sediments from Guan River Estuary[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2013, 37(5): 25-32.
- [42] 鲁如坤, 时正元, 熊礼明. 我国磷矿磷肥中镉的含量及其对生态环境影响的评价 [J]. 土壤学报, 1992, 29(2): 150-157.
LU R K, SHI Z Y, XIONG L M. Cadmium contents of rock phosphates and phosphate fertilizers of China and their effects on the ecological environment[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1992, 29(2): 150-157.
- [43] 罗万次, 苏搏, 刘熊, 等. 广西北仑河口红树林保护区表层海水溶解态重金属时空分布及其影响因素 [J]. 海洋通报, 2014, 33(6): 668-675.
LUO W C, SU B, LIU X, et al. Spatial and temporal distributions and influence factors of the dissolved heavy metals in surface water in the mangrove reserve at the Beilun River Estuary in Guangxi[J]. *Marine Science Bulletin*, 2014, 33(6): 668-675.
- [44] ANGINO E E, MAGNUSON L M, WAUGH L M, et al. Arsenic in detergents: possible danger and pollution hazard [J]. *Science*. 1970, 168: 389-390.
- [45] GUO G H, LI K, ZHANG D G, et al. Quantitative source apportionment and associated driving factor identification for soil po-

- tential toxicity elements via combining receptor models, SOM, and geo-detector method[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 830: 154721.
- [46] 中国水产科学研究院(农业农村部渔业生态环境监测中心). 中国渔业生态环境状况公报 [R]. 北京: 农业部, 环境保护部,

2000-2015.

Chinese Academy of Fishery Sciences Fishery Eco-Environment Monitoring Center, MARA. Report on the State of the Fishery Eco-Environment in China[R]. Beijing: Ministry of Agriculture, Ministry of Environmental Protection, 2000-2015.

Characteristics and source analysis of heavy metals pollution in sediments of coastal zones in Jiangsu Province

PENG Mo¹, DENG Xiaoqian^{2*}, LIU Deyong², LIAO Chenfeng², WANG Ting²,
WANG Yinxuan², WANG Jie¹, MAO Longjiang²

(1 Provincial Environmental Monitoring Center, Nanjing 210019, China; 2 School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on the concentration of 7 heavy metals (Pb, Cr, As, Cu, Zn, Cd and Hg) in surface sediments of coastal zones in Jiangsu Province in 2020, we investigated the pollution characteristics and source apportionment. Results show that the average particle size in surface sediments of coastal zones in Jiangsu Province gradually thickened from north to south. The average concentrations of other heavy metals (exclusive of Cr) exceeded the background values of environmental elements in beach soils of Jiangsu Province. The coastal zones in Jiangsu Province in 2020 experienced light pollution and exhibited a slight level of potential ecological risk. Cd was at a level of severe pollution and strong potential ecological risk, while other heavy metals were at a level of mild pollution and slight potential ecological risk. High concentrations of heavy metals in sediments were observed in Haizhou Bay and the Yangtze River estuary. Compared with 2013, the pollution levels of Cd and Zn in coastal zones of Jiangsu Province were more severe in 2020. Heavy metal elements were positively correlated with the average particle size, with the strongest positive correlation with clay. Source apportionment study indicated that heavy metals were originated from four primary sources categories: 1. transportation, shipping, and industrial emissions (Pb and Zn); 2. agricultural production activities and domestic sewage (As and Cd); 3. soil parent material, atmospheric dry and wet deposition (Cr and Hg); and 4. aquaculture production activities (Cu). Compared with the APCS-MLR model, the PMF model demonstrated a relatively weaker explanatory power for the natural sources of heavy metals in the surface sediments of coastal zones of Jiangsu Province. The results of APCS-MLR model indicated that the contribution of the four identified source categories were 27.30%, 35.55%, 31.22%, and 5.93%, respectively. The results shall have important implications for the protection of the coastal ecological environment and the sustainable development in the marine economy of Jiangsu Province.

Key words: heavy metals; pollution characteristics; source analysis; sediments; coastal zones in Jiangsu Province.