

张涵, 王芝麟, 邹彬, 等. 黄土高原北洛河沉积物生态风险解析[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(2): 332-341. ZHANG H, WANG Z L, ZOU B, et al. Ecological risk assessment of sediments in Beiluo River, Loess Plateau[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(2): 332-341. (in Chinese)

黄土高原北洛河沉积物生态风险解析

张涵¹, 王芝麟¹, 邹彬¹, 郭季璞², 陈文武³, 田雨露³, 郭家骅³

(1. 国网陕西省电力公司, 西安 710048; 2. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 西安 710100;
3. 西北大学城市与环境学院陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127)

摘要:以黄土高原的典型工业污染河流北洛河为研究对象,测定其干支流 17 个采样点沉积物中的 8 种重金属(Hg、As、Cd、Cr、Cu、Pb、Ni、Zn)质量分数,结合描述性统计结果对重金属的空间分布特征进行分析。进一步利用地累积指数法、内梅罗综合污染指数法和潜在生态风险指数法分析重金属的污染程度与生态风险,利用 PMF 模型和相关性分析进行来源解析。结果表明:北洛河上游沉积物中重金属的平均质量分数高于中下游,As、Cd 和 Zn 的均值分别为背景值的 1.26、1.28 和 1.41 倍,Zn、Hg、Cd、Pb、As 和 Cu 的变异系数大于 30%,为高度变异水平。地累积指数法与内梅罗综合污染指数法显示,北洛河上游 B₁ 处和下游 B₁₃ 处沉积物中重金属污染处于中高水平;潜在生态风险指数法显示,单一元素污染危害程度依次为 Cd > Hg > As > Cu > Ni > Pb > Zn > Cr,整体来看,Cd 和 Hg 的潜在生态危害较大,中游 B₁₀ 和下游 B₁₃ 存在中等生态风险,其余点位均为轻微生态风险。来源解析表明,北洛河沉积物中重金属的 3 个来源分别为交通污染源(30.74%)、煤炭石油类工业污染源(35.51%)及农业活动和自然母质的混合来源(33.75%)。研究成果可为北洛河沉积物重金属污染的科学治理及流域生态管理提供理论参考。

关键词:北洛河;沉积物;重金属;空间分布;生态风险评价;污染源

中图分类号:TV212.5; X52 **文献标志码:**A **DOI:**10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0034

重金属具有来源广泛、抗分解性强、残留时间长及毒性强等特点,其污染已经成为全球最具有挑战性的问题之一^[1-2]。近年来重金属污染问题愈发严重,对生态环境造成不良影响^[3-4]。重金属通过污水排放、大气沉降等途径进入河流,进而吸附于沉积物中,且部分重金属会在环境发生变化的情况下从沉积物中再次释放到水体中,对水体造成二次污染,沉积物既是重金属的汇,又是重金属的源,是判别水体污染现状的一个重要指标^[5-6]。因此,研究河流沉积物中重金属污染问题对河流生态健康具有重要意义。

Zhang 等^[7]对黄土高原王岭沟流域附近不同土地利用类型土壤中重金属进行监测,发现农田土壤中重金属含量最高,且金属 Cr 和 As 含量受人类活

动影响最大;Wang 等^[8]对神木市煤场土壤中 8 种重金属进行风险评估,发现金属 Hg 处于较高生态风险。然而,目前黄土高原重金属研究主要集中在土壤污染,而对于河流及沉积物中重金属污染调查相对较少。北洛河是黄土高原上的一条典型河流,中上游附近煤炭和石油资源丰富,工业发达^[9];下游属关中盆地,土壤肥沃,农业发展较为迅速,农药和化肥等农业用品被大量投入使用^[10],对其生态系统造成一定威胁^[11]。目前,有关该流域污染方面的研究主要集中于对指示生物(如浮游动物)的监测、石油类污染物(如多环芳烃)的分布调查等方面^[12-13],而有关于重金属的空间分布和污染评价的相关研究较少。

本研究以北洛河沉积物为研究对象,在干支流

收稿日期:2022-11-19 修回日期:2023-03-08 网络出版时间:2023-04-13

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20230412.1038.012.html

基金项目:国家自然科学基金青年项目(42201109);陕西省国际科技合作计划重点项目(2023-GHZD-30);陕西省青年千人计划(334041900007)

作者简介:张涵(1986—),男,陕西临潼人,高级工程师,主要从事环境无机污染物风险评估研究。E-mail:283100344@qq.com

通信作者:郭家骅(1989—),男,陕西渭南人,教授,博士,主要从事环境地理学研究。E-mail:jiahua_guo@nwu.edu.cn

上选取 17 个采样点,测量沉积物中 8 种重金属的质量分数,对沉积物中重金属的空间分布特征进行分析,并通过多种评价方法对重金属污染程度及生态风险进行评价,以明确北洛河沉积物中重金属的污染状况,同时基于正定因子矩阵模型(positive matrix factorization, PMF)和 Pearson 相关性分析对重金属进行源解析,以期为北洛河流域的污染治理及水生生态健康管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

北洛河(34°57'N~37°17'N, 107°34'E~110°01'E)位于我国西北部,是渭河的一级支流、黄河的二级支流,为附近的农业活动和工业发展提供水源,其发源于陕西省定边县的草梁山,河道全长 680.3 km,流域面积约为 26 900 km²,海拔跨度为 297~1 886 m^[9,13]。该区域属温带大陆性半干旱气候带,年平均降雨量为 510~540 mm,降水空间分布差异显著,且主要集中在夏季(6—9 月,67%),年平均气温为 7.5 °C^[14]。

1.2 样品采集与分析

本研究采样时间为 2021 年 6 月,采样点位于北洛河干流及部分支流上,共布设 17 个采样点,见图 1。在每个采样点 1 m² 附近,利用抓斗采泥器随机采集 3 个表层沉积物(0~10 cm)子样本,其颜色均偏黄色,较为均匀,将其充分混合后装入密封袋。样品带回实验室后自然风干,对样品中较大杂物进行剔除,再研磨过 100 目尼龙筛。将处理好的样品送至苏伊士环境检测技术(上海)有限公司北京分公司对 8 种重金属进行测定。样品测定采用国标《土壤和沉积物汞、砷、硒、铋、锑的测定》(HJ 680—2013)微波消解-原子荧光法测定沉积物中汞(Hg)的质量分数,采用国标《土壤和沉积物 12 种金属元素的测定》(HJ 803—2016)中王水提取-电感耦合等离子体质谱法测定沉积物中砷(As)、镉(Cd)、铬(Cr)、铜(Cu)、铅(Pb)、镍(Ni)和锌(Zn)的质量分数。

1.3 评价方法

1.3.1 重金属污染评价

为了能够综合、全面地了解研究区域内重金属污染程度,采用地累积指数法和内梅罗综合污染指数法进行污染评价。地累积指数法由德国学者 Muller 在 1979 年所提出,针对环境中单一重金属元素的污染程度进行评价^[15-18],其表达式见式(1);内梅罗指数法是当前应用较为广泛的评价方法之一,

该方法可反映重金属总浓度对环境的影响程度^[19],其表达式见式(2)、(3)。

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left(\frac{C_n}{K \times B_n} \right) \quad (1)$$

式中: C_n 为样品中测量的重金属 n 的质量分数, mg/kg; B_n 为重金属 n 的陕西土壤背景值, mg/kg; K 为修正指数,一般取 1.5。地累积指数 I_{geo} 分级标准^[20-21]为: $I_{\text{geo}} < 0$ 时,无污染; $0 \leq I_{\text{geo}} < 1$ 时,轻度污染; $1 \leq I_{\text{geo}} < 2$ 时,中度污染; $2 \leq I_{\text{geo}} < 3$ 时,重度污染; $I_{\text{geo}} \geq 3$ 时,严重污染。

$$P_i = \frac{C_i}{C_0} \quad (2)$$

$$P_N = \sqrt{\frac{(P_i)_{\text{max}}^2 + (\bar{P}_i)^2}{2}} \quad (3)$$

式中: P_i 为重金属 i 的污染指数; C_i 为样品中测量的重金属 i 的质量分数, mg/kg; C_0 为地球化学背景值, mg/kg; P_N 为综合污染指数,其分级标准^[22]如下: $P_N \leq 0.7$ 时,安全; $0.7 < P_N \leq 1.0$ 时,警戒; $1.0 < P_N \leq 2.0$ 时,轻度污染; $2.0 < P_N \leq 3.0$ 时,中度污染; $P_N > 3.0$ 时,重度污染。

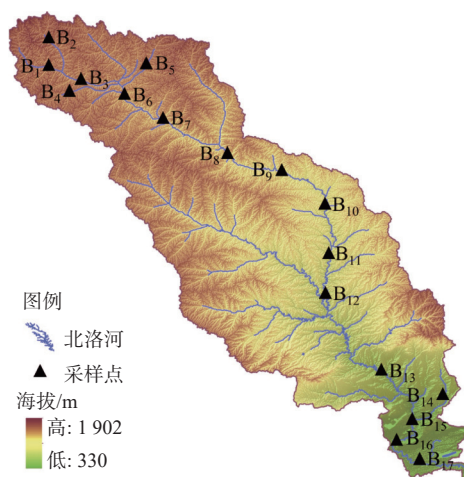


图 1 北洛河沉积物采样点分布

Fig. 1 Sampling map of sediments in the Beiluo River

1.3.2 潜在生态风险评价

潜在生态风险指数法是由瑞典学者 Hakanson 在 1980 年提出的,该方法将重金属污染与生态环境、毒性联系起来,综合反映沉积物中重金属对环境的影响,其计算公式为

$$C_{f,i} = C_i / C_{n,i} \quad (4)$$

$$E_{r,i} = T_{r,i} \times C_{f,i} \quad (5)$$

$$R_i = \sum_{i=1}^n E_{r,i} \quad (6)$$

式中: C_{ti} 为重金属 i 的污染指数; C_i 为样品中测量的重金属 i 的质量分数, mg/kg; $C_{n,i}$ 为重金属 i 的地球化学背景值, mg/kg; $E_{r,i}$ 为单项潜在生态风险指数; $T_{r,i}$ 为毒性系数, 8 种重金属毒性系数按大小排序为 $Hg=40 > Cd=30 > As=10 > Ni=Pb=Cu=5 > Cr=2 > Zn=1$ ^[23-25]; R_1 为综合潜在生态风险指数, 其分级标准^[26]如下: $E_{r,i} < 40$ 或 $R_1 < 150$ 时, 轻微生态风险; $40 \leq E_{r,i} < 80$ 或 $150 \leq R_1 < 300$ 时, 中生态风险; $80 \leq E_{r,i} < 160$ 或 $300 \leq R_1 < 600$ 时, 强生态风险; $160 \leq E_{r,i} < 320$ 或 $600 \leq R_1 < 1200$ 时, 很强生态风险; $E_{r,i} \geq 320$ 或 $R_1 \geq 1200$ 时, 极强生态风险。

1.4 沉积物重金属污染源解析方法

采用美国环保署(EPA)推出的 PMF 5.0 对北洛河沉积物重金属污染源进行解析。Paatero 和 Tappe 于 1994 年提出 PMF 模型, 是一种强大而有用的多元因素分析方法, 已被广泛用于量化排放源对环境中污染物水平的贡献^[27], 其计算公式为

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij} \quad (7)$$

式中: X_{ij} 为样品 i 中重金属 j 的质量分数; g_{ik} 为样品 i 对污染源 k 的贡献; f_{kj} 为第 k 类源中重金属 j 的占比; e_{ij} 为残差矩阵。PMF 模型通过将目标函数 Q 最小化, 从而计算出 e_{ij} ^[28], 目标函数 Q 计算公式为

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (e_{ij}/U_{ij})^2 \quad (8)$$

式中: U_{ij} 为第 i 个样品中第 j 个重金属的不确定度^[29], 计算公式为

$$U_{ij} = 5/6 \times L_{MD} \quad C \leq L_{MD} \quad (9)$$

$$U_{ij} = \sqrt{(E_F \times C)^2 + (0.5 \times L_{MD})^2} \quad C > L_{MD} \quad (10)$$

式中: E_F 为误差分数; C 为重金属质量分数; L_{MD} 为方法检出限。

2 结果与讨论

2.1 北洛河沉积物重金属质量分数

北洛河沉积物中重金属的质量分数分布结果(图 2)显示, 各采样点重金属的质量分数变化较大, 其中, Zn 的质量分数显著高于其他重金属。空间分布上, 除金属 Zn 外, 其他重金属质量分数变化趋势较为相似, 上游($B_1 \sim B_6$)重金属的平均质量分数高于中游($B_7 \sim B_{12}$)及下游($B_{13} \sim B_{17}$), 且重金属总质量分

数最高点出现在上游 B_1 (448.46 mg/kg), 其次为下游 B_{13} (323.43 mg/kg), 表明这些点位重金属的外源输入量较高, 受到较大污染和影响。

对北洛河沉积物重金属质量分数进行统计分析, 得出 Hg、As、Cd、Cr、Cu、Pb、Ni 和 Zn 等 8 种沉积物重金属元素质量分数的最大值、最小值、平均值、标准偏差以及变异系数(见表 1)。结果表明, 部分重金属质量分数高于陕西土壤背景值, 其中, As、Cd 和 Zn 的平均质量分数分别为各自陕西土壤背景值的 1.26、1.28 和 1.41 倍。变异系数可在一定程度上反映重金属的空间异质性, 通常情况下, 变异系数与人类活动干扰程度呈正相关关系: 当其值小于 10% 时, 呈现出较弱变异性; 当其值介于 10%~30% 时, 属于中等变异; 当其值大于 30% 时, 呈现出高度变异^[30-32]。本研究中, 8 种重金属的变异系数大小排序为 $Zn(68.21\%) > Hg(51.78\%) > Cd(49.65\%) > Pb(41.61\%) > As(31.82\%) > Cu(30.77\%) > Ni(23.89\%) > Cr$ 。Hg、Cd、Pb、As 和 Cu 呈现出高度变异, Ni 和 Cr 属于中等变异, 表明北洛河沉积物中重金属质量分数在一定程度上受到人类活动的干扰。中重金属质量分数在一定程度上受到人类活动的干扰。

2.2 北洛河沉积物重金属污染评价

图 3 为北洛河沉积物重金属的地累积指数评价结果, 显示大部分重金属 $I_{geo} < 0$, 属于无污染水平, 而 Cd 和 Zn 在部分采样点处存在中度污染。在空间分布上, 上游 B_1 处 Zn(1.71)存在中度污染, B_2 处 Zn(0.16)以及 B_4 处 Cd(0.09)和 Zn(0.11)存在轻度污染, 中游 B_{10} 处 As(0.14)、Cd(0.57)、Zn(0.13)以及 B_{12} 处 Hg(0.15)存在轻度污染, 下游 B_{13} 处 Cd(1.04)存在中度污染, 且 B_{13} 处 As(0.77)、Cu(0.19)、Zn(0.41)以及 B_{14} 处 Cd(0.18)存在轻度污染。

由研究区内梅罗综合污染指数评价结果(图 4)可知, 内梅罗综合污染指数变化范围为 0.74~3.64, 均值为 1.37, 其中, 介于 1~2 的样本数量最多, 占总样本数的 58.82%, 表明研究区污染状况总体呈轻度污染, 且研究区内全部采样点内梅罗综合污染指数均超过了安全值。在空间分布上, 上游 B_1 (3.64)处污染严重, 呈重度污染, B_2 、 B_3 、 B_4 及 B_6 处呈轻度污染, B_5 处为警戒; 中游除 B_{11} 为警戒外, 其余样点均呈轻度污染; 下游 B_{13} (2.53)处存在中度污染, B_{14} 呈轻度污染, $B_{15} \sim B_{17}$ 均为警戒, 整体来看, 内梅罗综合污染指数大小排序为上游 > 下游 > 中游。

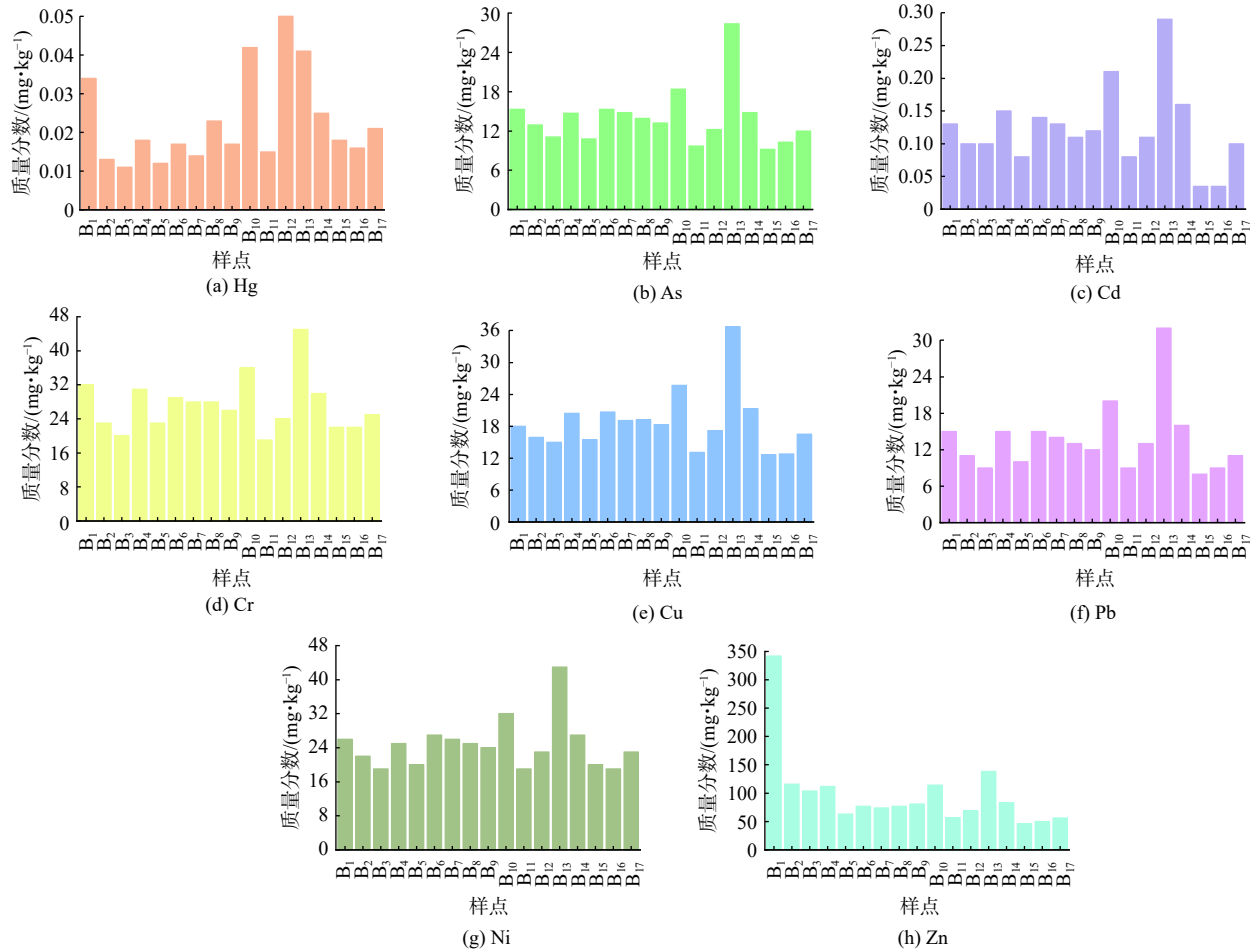


图2 北洛河沉积物中重金属分布

Fig. 2 Distribution of heavy metals in sediments of the Beiluo River

表1 北洛河沉积物中重金属质量分数描述性统计

Tab. 1 Descriptive statistical analysis of heavy metals in sediments of Beiluo River

重金属	质量分数/(mg·kg ⁻¹)			标准差/(mg·kg ⁻¹)	变异系数/%	陕西土壤背景值/(mg·kg ⁻¹) ^[18]
	最小值	最大值	平均值			
Hg	0.01	0.05	0.02	0.01	51.78	0.03
As	9.20	28.40	13.94	4.44	31.82	11.1
Cd	0.04	0.29	0.12	0.06	49.65	0.094
Cr	19.00	45.00	27.24	6.47	23.74	62.5
Cu	12.60	36.70	18.71	5.76	30.77	21.4
Pb	8.00	32.00	13.65	5.68	41.61	21.4
Ni	19.00	43.00	24.71	5.90	23.89	28.8
Zn	46.00	342.00	97.59	68.21	69.89	69.4

采用地累积指数法与内梅罗综合污染指数法进行北洛河沉积物重金属污染评价,总体来看,北洛河重金属污染水平处于中等偏下水平,且上游B₁与下游B₁₃处受到污染较为严重。北洛河上游工业发达,在过去几十年中该区域的工业不断发展,导致污染物的大量排放^[9,13],对流域环境

造成影响。北洛河下游为关中平原,土地肥沃平坦,农业发达^[10]。以往研究表明,化肥尤其是磷肥的施用会加剧土壤Cd污染,杀虫剂和除草剂的大量使用会导致土壤As含量上升^[33-34],再通过土壤侵蚀作用进入水体中并吸附于沉积物中,并造成污染。

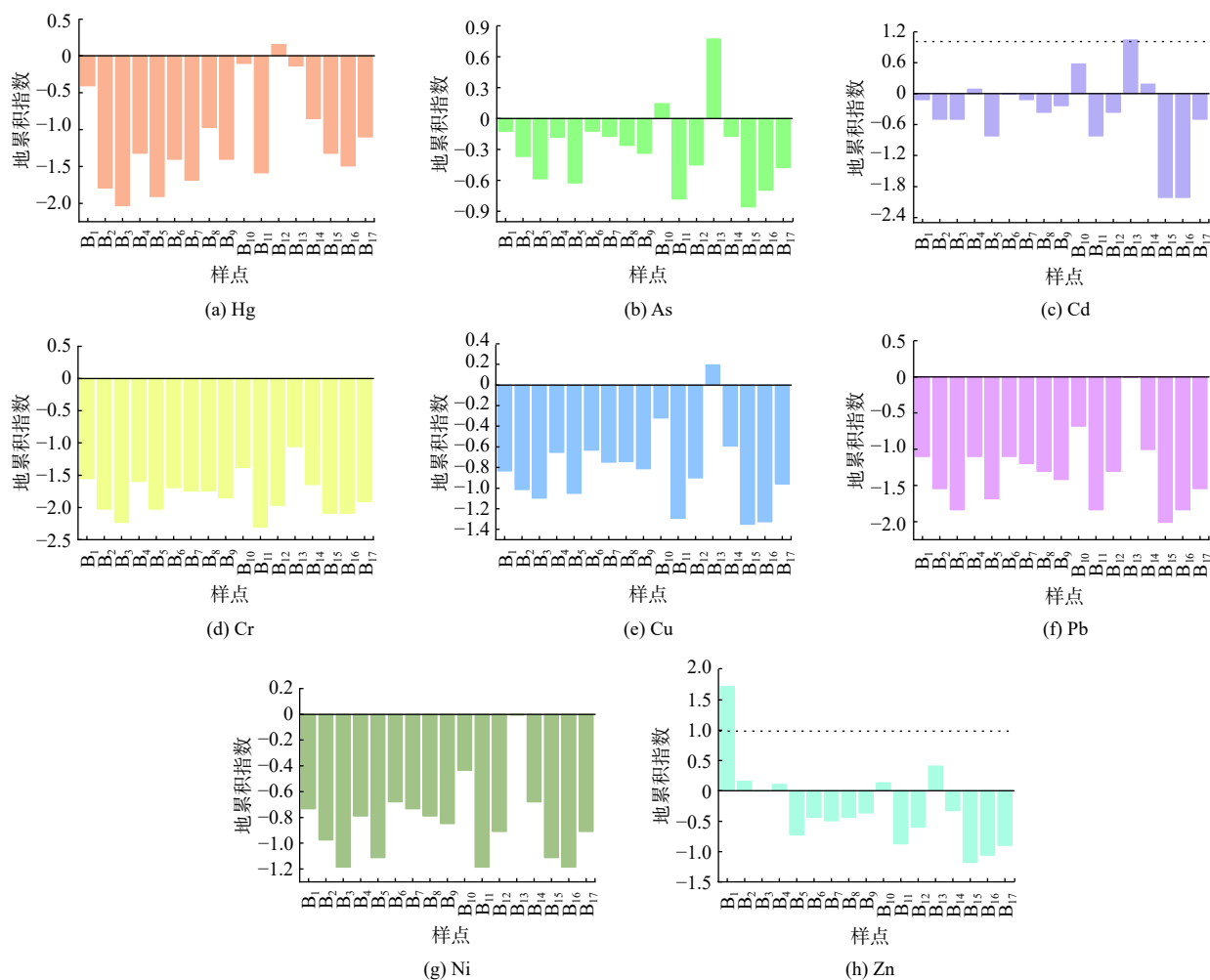


图 3 北洛河沉积物重金属地累积指数评价结果

Fig. 3 Geoaccumulation index of heavy metal in sediments of the Beiluo River

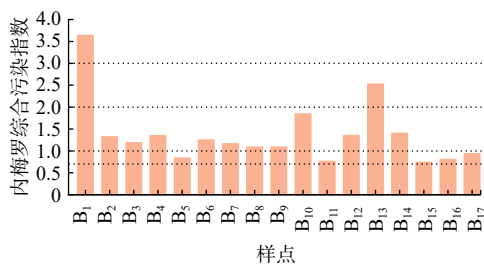


图 4 北洛河沉积物重金属内梅罗污染指数评价结果

Fig. 4 Nemerow pollution index of heavy metal in sediments of the Beiluo River

2.3 北洛河沉积物重金属潜在生态风险

图 5 为北洛河沉积物重金属的潜在生态风险评价结果, 其 $E_{r,i}$ 均值大小依次为 Cd(39.05) > Hg(30.37) > As(12.56) > Cu(4.37) > Ni(4.29) > Pb(3.19) > Zn(1.41) > Cr(0.87)。在空间分布上, 上游 B₁ 处 Hg(45.33)、Cd(41.49), B₄ 处及 B₆ 处 Cd(44.68) 存在轻微生态风险; 中游 B₁₀ 处 Hg(56.00)、Cd(67.02) 以及 B₁₂ 处 Hg(66.67) 存在轻微生态风险; 下游 B₁₃ 处 Cd(92.55) 存在中生态风险, 且 B₁₃ 处 Hg(54.67) 以及 B₁₄ 处

Cd(51.06) 存在轻微生态风险。其中, Cd 和 Hg 的潜在生态危害相较于其他重金属更高, 这主要有以下两点原因: 第一, 相比于其他重金属, Cd(30) 和 Hg(40) 的毒性系数更高, 对潜在生态风险影响越大; 第二, Cd 的平均质量分数高于陕西土壤背景值的 1.28 倍, 这表明其污染情况更为严重, Hg 的平均质量分数虽未超过陕西土壤背景值, 但其变异系数为 51.78%, 仅次于 Zn(68.21%), 表明其受人类活动干扰影响较大。北洛河沉积物重金属的综合潜在生态风险评价结果中发现 R_i 值变化范围为 51.60 ~ 199.75, 均值为 96.09, 除中游 B₁₀(158.63) 及下游 B₁₃(199.75) 处存在中生态风险外, 其余样点均为轻微生态风险, 整体状况良好。

2.4 北洛河沉积物重金属污染源解析

北洛河沉积物中各因子对重金属质量分数的贡献率及各污染源因子占比见图 6。由 PMF 分析结果可知, 因子 1 占总贡献率的 30.74%, Zn 在因子 1 中的贡献率(73.59%)最高, 为因子 1 的代表元素 [图 6(a), (d)], 由相关性分析可知, Zn 与其他 7 种金

属之间并无显著相关性(表2)。在通常情况下,轮胎磨损时可以产生含Zn较高的颗粒物,Zn可作为交通污染的标志元素^[28,35]。本研究中,Zn的质量分数显著高于其他重金属,且上游高于中下游(图2),

这是由于上游经济发展迅速,交通发达,对Zn的影响更为显著;同时,Zn的变异系数(68.21%)也显著高于其他重金属(表1),表明其质量分数受到人类活动的干扰与影响。因此,因子1定义为交通污染源。

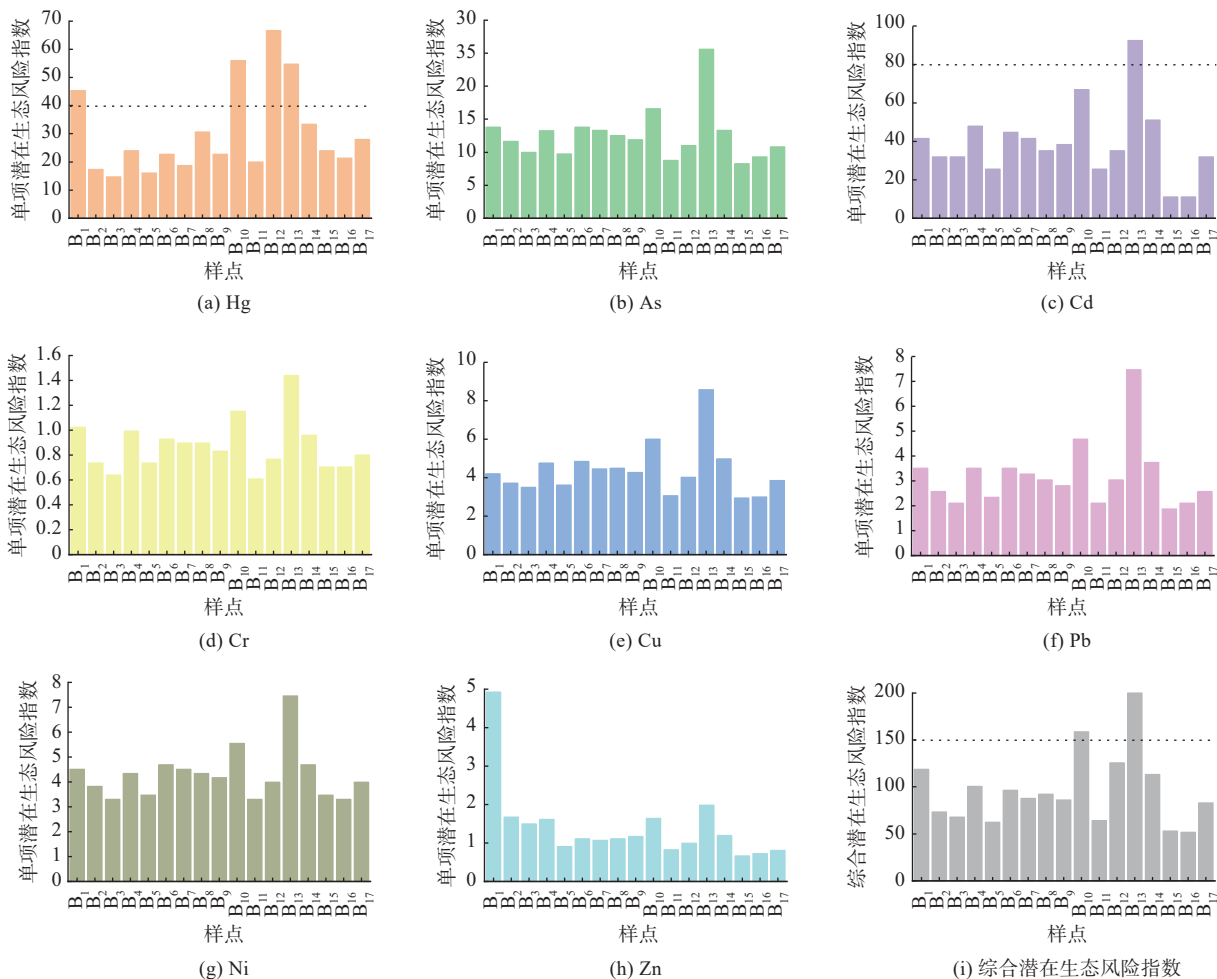


图5 北洛河沉积物重金属潜在生态风险指数评价结果

Fig. 5 Potential ecological risk index of heavy metal in sediments of the Beiluo River

因子2主要由Hg(69.68%)、Pb(33.55%)、Cd(32.71%)及Cu(30.60%)组成,占总贡献率的35.51%[图6(b),(d)],且相关性分析表明,Hg与Pb呈极显著相关,与Cd、Cu呈显著相关(表2)。以往研究表明,煤炭和石油燃烧时所产生的废弃物中含有大量Hg,从而进入环境中^[36-38],Pb和Cu通常为煤矿开采冶炼过程及化石燃料燃烧的主要产物^[39],Cd会通过工厂排放的烟尘沉降于土壤或水体中^[40]。北洛河流域附近为重要的能源基地,上游煤炭石油资源丰富,工业发达,加剧了水体及沉积物的重金属污染^[12]。因此,因子2定义为煤炭石油类工业污染源。

因子3主要由Cu(47.25%)、As(45.63%)及Ni(45.52%)组成,占总贡献率的33.75%[图6(c),(d)],同时在相关性上,Cu、As和Ni之间相关系数均大于0.950,

具有极显著相关性(表2)。在生产农药过程中会使用大量Cu以CuSO₄形式制造果树杀虫剂^[41],As通常被用于农业的农药或除草剂,同时,有研究^[42-43]证实家畜粪便和肥料也是As的潜在来源,北洛河下游农业发达,对Cu和As在环境中的累积有很大影响。Ni的变异系数(23.89%)较低,不受人类活动的干扰与影响,且在空间上分布比较均匀,空间异质性低,因此Ni主要来源于自然母质^[44]。综上,因子3定义为农业活动和自然母质的混合源。

北洛河沉积物中重金属的3个来源因子按贡献率降序排列为因子2(35.51%)>因子3(33.75%)>因子1(30.74%),显然,本研究的沉积物受煤炭石油类工业污染的影响最大,其次为农业活动和自然母质。总的来说,北洛河的重金属污染主要由工业和农业

活动所造成,特别是上游 B₁ 及下游 B₁₃ 处。因此,应从根本上实施一系列有效措施来防治研究区内

的沉积物重金属污染,特别是对涉及重金属污染的工业企业、农药化肥的使用及畜禽养殖的监督管理。

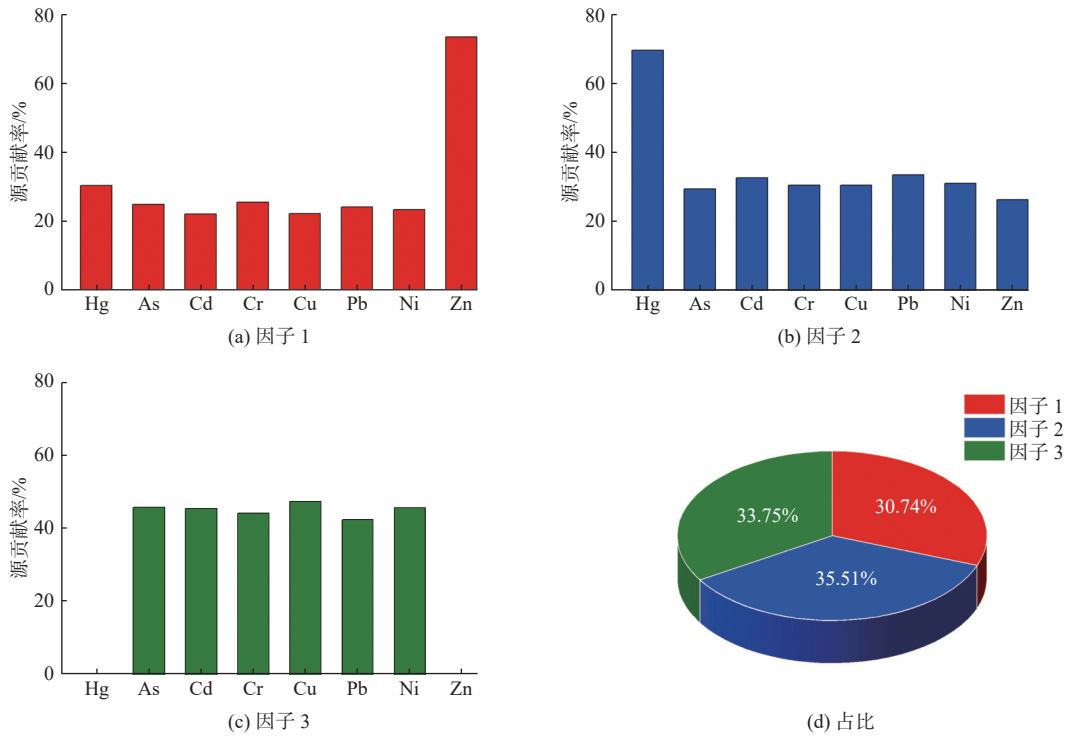


图 6 各因子对重金属质量分数的贡献率及各污染源因子占比

Fig. 6 Contribution rate of each factor to heavy metals and proportion of each pollution source factor

表 2 北洛河沉积物重金属的相关性分析

Tab. 2 Pearson correlation analysis results of heavy metals in sediments of the Beiluo River

重金属	Hg	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Ni	Zn
Hg	1.000							
As	0.556*	1.000						
Cd	0.576*	0.953**	1.000					
Cr	0.604*	0.956**	0.924**	1.000				
Cu	0.572*	0.984**	0.972**	0.952**	1.000			
Pb	0.626**	0.990**	0.958**	0.961**	0.988**	1.000		
Ni	0.609**	0.986**	0.951**	0.970**	0.986**	0.989**	1.000	
Zn	0.343	0.360	0.336	0.432	0.254	0.330	0.313	1.000

注: P < 0.05(*)表示显著相关; P < 0.01(**)表示极显著相关。

3 结论和建议

地累积指数和内梅罗综合污染指数结果显示,上游 B₁ 和下游 B₁₃ 处重金属污染处于中高水平;潜在生态风险指数结果显示, Cd 和 Hg 的潜在生态危害较大,中游 B₁₀ 和下游 B₁₃ 处存在中等生态风险,流域整体处于轻微生态风险。

基于 PMF 模型和相关性分析对北洛河沉积物中重金属进行来源解析,结果表明,8 种重金属来源可能分为三大类:交通污染源、煤炭石油类工业污

染源及农业活动和自然母质的混合源。

基于本研究结果,建议对北洛河流域进行污染等级区域划分,重点关注上游 B₁ 处、中游 B₁₀ 及下游 B₁₃ 处的重金属污染情况,加强控制流域内重金属的输入,采取一定措施对涉及重金属污染的相关行业进行监管与治理,以消除沉积物中重金属的污染。同时建议今后相关研究应深入揭示沉积物不同粒径对重金属富集特征的影响,为沉积物重金属污染预测及流域整体生态保护提供更全面的基础资料。

参考文献:

- [1] ZHOU X, WANG Y P, SONG Z G. Heavy metal contamination and ecological risk assessments in urban mangrove sediments in Zhanjiang Bay, South China[J]. *ACS Omega*, 2022, 7(24): 21306-21316. DOI: 10.1021/acsomega.2c02516.
- [2] SUTHAR S, NEMA A K, CHABUKDHARA M, et al. Assessment of metals in water and sediments of Hindon River, India: impact of industrial and urban discharges[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 171(1-3): 1088-1095. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.06.109.
- [3] BILGIN A, KONANÇ M U. Evaluation of surface water quality and heavy metal pollution of Coruh River Basin (Turkey) by multivariate statistical methods[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(12): 1-18. DOI: 10.1007/s12665-016-5821-0.
- [4] 杨磊, 张松, 何平, 等. 镉污染底泥电动修复影响因素研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(5): 102-107, 121. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2018.0130.
- [5] GUI L, PENG S C, CHEN T H, et al. Evaluation of sediment-associated heavy metal pollution in Chaohu Lake, Eastern China[J]. *Water Resources*, 2019, 46(4): 614-623. DOI: 10.1134/S0097807819040122.
- [6] 张昀保, 吴劲. 海河流域典型区域重金属沉积物生态风险研究[J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2022, 20(3): 544-551. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0055.
- [7] ZHANG Y, ZHANG X, BI Z L, et al. The impact of land use changes and erosion process on heavy metal distribution in the hilly area of the Loess Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 718: 137305. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137305.
- [8] WANG N, LUO Y, LIU Z, et al. Spatial distribution characteristics and evaluation of soil pollution in coal mining area of Loess Plateau in Northern Shaanxi[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 16440. DOI: 10.1038/s41598-022-20865-6.
- [9] ZHANG Y X, CHENG D D, LEI Y L, et al. Spatiotemporal distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of a typical river located in the Loess Plateau, China: Influence of human activities and land-use changes[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424: 127744. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127744.
- [10] 张琳琳, 徐春燕, 张俊, 等. 陕西省北洛河水质状况及供水能力分析[J]. *陕西水利*, 2021(1): 109-110, 114. DOI: 10.16747/j.cnki.cn61-1109/tv.2021.01.036.
- [11] WANG D, MA J, LI H, et al. Concentration and potential ecological risk of PAHs in different layers of soil in the petroleum-contaminated areas of the Loess Plateau, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(8): 1785. DOI: 10.3390/ijerph15081785.
- [12] SUN H T, CHEN Q Q, CHEN W W, et al. Assessment of biological community in riparian zone contaminated by PAHs: Linking source apportionment to biodiversity[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 851: 158121. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158121.
- [13] 白海锋, 孔飞鹤, 王怡睿, 等. 北洛河流域浮游动物群落结构时空特征及其与环境因子相关性[J]. *大连海洋大学学报*, 2021, 36(5): 785-795. DOI: 10.16535/j.cnki.dlhyxb.2021-047.
- [14] 王萌萌, 魏占民, 张瑞强, 等. 北洛河流域TOP-MODEL模型基流分割定量评估[J]. *人民黄河*, 2020, 42(4): 19-24. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2020.04.004.
- [15] 王永刚, 伍娟丽, 王旭, 等. 北京市中心城河流表层沉积物重金属污染评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(6): 74-80, 107. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.06.011.
- [16] CAO J, XIE C Y, HOU Z R. Ecological evaluation of heavy metal pollution in the soil of Pb-Zn mines[J]. *Ecotoxicology*, 2022, 31(2): 259-270. DOI: 10.1007/s10646-021-02505-3.
- [17] AMIN B, ISMAIL A, ARSHAD A, et al. Anthropogenic impacts on heavy metal concentrations in the coastal sediments of Dumai, Indonesia[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 148(1): 291-305. DOI: 10.1007/s10661-008-0159-z.
- [18] 黄悦, 张风宝, 杨明义, 等. 渭河陕西段沉积物中重金属污染综合评价[J]. *人民黄河*, 2021, 43(12): 80-85, 99. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2021.12.016.
- [19] ZHANG H X, CAI A Z, WANG X J, et al. Risk assessment and source apportionment of heavy metals in soils from Handan city[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(20): 9615. DOI: 10.3390/app11209615.
- [20] LIU R M, MEN C, LIU Y Y, et al. Spatial distribution and pollution evaluation of heavy metals in Yangtze estuary sediment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 110(1): 564-571. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2016.05.060.
- [21] 庞阔, 李敏, 刘璐, 等. 基于蒙特卡洛模拟与PMF模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析[J]. *环境科学*, 2022, 43(8): 4008-4017. DOI: 10.13227/j.hjcx.202111172.
- [22] 黄志伟, 李文静, 李伟杰, 等. 东江流域土壤重金属污染特征及潜在风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(3): 504-515. DOI: 10.11654/jaes.2021-1291.
- [23] CHAI L Y, LI H, YANG Z H, et al. Heavy metals

- and metalloids in the surface sediments of the Xiangjiang River, Hunan, China: Distribution, contamination, and ecological risk assessment[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(1): 874-885. DOI: [10.1007/s11356-016-7872-x](https://doi.org/10.1007/s11356-016-7872-x).
- [24] 孟婉, 刘扬, 朱士江, 等. 洞庭湖流域沉积物重金属分布特征及其生态风险[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(4): 739-749, 767.
- [25] PEJMAN A, BIDHENDI G N, ARDESTANI M, et al. A new index for assessing heavy metals contamination in sediments: A case study[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 58: 365-373. DOI: [10.1016/j.ecolind.2015.06.012](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.06.012).
- [26] 夏子书, 白一茹, 王幼奇, 等. 基于PMF模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析[J]. *环境科学*, 2022, 43(1): 432-441. DOI: [10.13227/j.hjcx.202105128](https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202105128).
- [27] 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(2): 111-126. DOI: [10.1002/env.3170050203](https://doi.org/10.1002/env.3170050203).
- [28] WANG S, CAI L M, WEN H H, et al. Spatial distribution and source apportionment of heavy metals in soil from a typical county-level city of Guangdong Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 655: 92-101. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.11.244](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.244).
- [29] 陈明, 王琳玲, 曹柳, 等. 基于PMF模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析[J/OL]. *环境科学*, 2022: 1-14. DOI: [10.13227/j.hjcx.202208046](https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202208046)
- [30] 辛佳桢, 李明秋, 马守臣, 等. 南水北调中线工程焦作段滨河地带土壤重金属污染风险评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(6): 109-118. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0161](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0161).
- [31] 罗成科, 毕江涛, 肖国举, 等. 宁东基地不同工业园区周边土壤重金属污染特征及其评价[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(7): 1221-1227. DOI: [10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.07.019](https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.07.019).
- [32] PHIL-EZE P O. Variability of soil properties related to vegetation cover in a tropical rainforest landscape[J]. *Journal of Geography and Regional Planning*, 2010, 3(7): 177.
- [33] WANG C R, HUANG Y C, ZHANG C B, et al. Inhibition effects of long-term calcium-magnesium phosphate fertilizer application on Cd uptake in rice: Regulation of the iron-nitrogen coupling cycle driven by the soil microbial community[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 416: 125916. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2021.125916](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125916).
- [34] 邱乐丰, 祝锦霞, 潘艺, 等. 非粮化利用下耕地土壤重金属分布特征、生态风险和来源解析[J/OL]. *环境科学*, 2022: 1-18. DOI: [10.13227/j.hjcx.202206190](https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202206190)
- [35] 黄界颖, 单平, 伍震威, 等. 典型燃煤电厂周边土壤汞的形态分布及污染源解析[J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(7): 10-17. DOI: [10.3969/j.issn.1003-6504.2016.07.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-6504.2016.07.003).
- [36] 云利萍, 李政红. 包头市地下水重金属污染分布特征及来源[J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(5): 81-85. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.05.019](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.05.019).
- [37] ZHANG L, WONG M H. Environmental mercury contamination in China: Sources and impacts[J]. *Environment International*, 2007, 33(1): 108-121. DOI: [10.1016/j.envint.2006.06.022](https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.06.022).
- [38] TIAN H Z, WANG Y, XUE Z G, et al. Trend and characteristics of atmospheric emissions of Hg, As, and Se from coal combustion in China, 1980-2007[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(23): 11905-11919. DOI: [10.5194/acp-10-11905-2010](https://doi.org/10.5194/acp-10-11905-2010).
- [39] HE B, YUN Z J, SHI J B, et al. Research progress of heavy metal pollution in China: Sources, analytical methods, status, and toxicity[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(2): 134-140. DOI: [10.1007/s11434-012-5541-0](https://doi.org/10.1007/s11434-012-5541-0).
- [40] DENG M H, ZHU Y W, SHAO K, et al. Metals source apportionment in farmland soil and the prediction of metal transfer in the soil-rice-human chain[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 260: 110092. DOI: [10.1016/j.jenvman.2020.110092](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110092).
- [41] LUO L, MA Y B, ZHANG S Z, et al. An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(8): 2524-2530. DOI: [10.1016/j.jenvman.2009.01.011](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.01.011).
- [42] GUAN Q Y, ZHAO R, PAN N H, et al. Source apportionment of heavy metals in farmland soil of Wuwei, China: Comparison of three receptor models[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 237: 117792. DOI: [10.1016/j.jclepro.2019.117792](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117792).
- [43] LI H X, XU L, FENG N N, et al. Occurrence, risk assessment, and source of heavy metals in Liaohe River protected area from the watershed of Bohai Sea, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 169: 112489. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2021.112489](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112489).
- [44] XIE F Y, YU M C, YUAN Q K, et al. Spatial distribution, pollution assessment, and source identification of heavy metals in the Yellow River[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 436: 129309. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2022.129309](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129309).

Ecological risk assessment of sediments in Beiluo River, Loess Plateau

ZHANG Han¹, WANG Zhilin¹, ZOU Bin¹, GUO Jipu², CHEN Wenwu³, TIAN Yulu³, GUO Jiahua³

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710048, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710100, China; 3. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: With the rapid development of industrialization and urbanization, the wide spread of heavy metal pollution in river sediments is posing a threat to the ecological security. As a typical river on the Loess Plateau, the pollution of Beiluo River is becoming increasingly prominent, whereas no attempt has been made to systematically evaluate the spatial distribution of heavy metals in the watershed. Therefore, the monitoring and analysis of typical heavy metals in sediments of Beiluo River is of great significance to the ecological health of the basin.

In June 2021, sediments were sampled from 17 sites in the main and tributaries of the Beiluo River. The spatial distribution of eight heavy metals (Hg, As, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn) was determined by microwave digestion-atomic fluorescence spectrometry and Aqua regia extraction-inductively coupled plasma mass spectrometry, followed by evaluating the degree of heavy metal pollution and the ecological risk assessment using geoaccumulation index, Nemerow pollution index, and potential ecological risk index, respectively. The source apportionment was conducted using Positive Matrix Factorization (PMF) model and Pearson correlation analysis.

The distribution characteristics of heavy metals showed that the content of heavy metals in each sampling site varied greatly. In particular, the content of Zn was significantly higher than that of other heavy metals. The highest content of total heavy metals appeared in the upstream B₁ (448.46 mg/kg), followed by the downstream B₁₃ (323.43 mg/kg). Some heavy metal contents were higher than the heavy metal background values of Shaanxi Province. The order of coefficient of variation was as follows: Zn (68.21%) > Hg (51.78%) > Cd (49.65%) > Pb (41.61%) > As (31.82%) > Cu (30.77%) > Ni (23.89%) > Cr (23.74%). In the matter of ecological risk assessment, the geoaccumulation index analyses showed that the accumulative conditions of Cd and Zn were moderately polluted, and most of the other heavy metals were at the pollution-free level. The Nemerow pollution index ranged from 0.74 to 3.64, with an average value of 1.37, and the values of more than half of the sites were within 1 to 2, indicating that the overall pollution in the study area was slightly polluted. The mean values of individual potential ecological risk indexes were: Cd (39.05) > Hg (30.37) > As (12.56) > Cu (4.37) > Ni (4.29) > Pb (3.19) > Zn (1.41) > Cr (0.87). The comprehensive ecological risk index (R_1) values ranged from 51.60 to 199.75, with an average of 96.09. In addition to the intermediate ecological risk at B₁₀ (158.63) in the middle reaches and B₁₃ (199.75) in the lower reaches, risks in all the other sites were low.

Conclusions: (1) The results of geoaccumulation index and Nemerow pollution index show that the heavy metal pollution in the upstream B₁ and downstream B₁₃ are ranged from the medium to high levels. According to the results of potential ecological risk index, Cd and Hg in the Beiluo River may pose a threat to the ecosystem. In addition to the ecological risks in the middle stream B₁₀ and the downstream B₁₃ that are classified as moderate, the whole basin has slight potential ecological risks. (2) Based on the PMF model and correlation analysis, the sources of heavy metals in the sediments of Beiluo River were analyzed. The results showed that the sources of eight heavy metals could be divided into three categories: traffic pollution sources, coal and oil industrial pollution sources, and mixed sources of agricultural activities and natural parent materials. (3) Based on the results of this study, it is suggested to divide the pollution levels of the Beiluo River basin into regions, focusing on the heavy metal pollution at B₁ in the upper reaches and B₁₃ in the lower reaches, especially reducing the input of metal Zn and Hg in the river basin, and taking certain measures to supervise and control related industries involved in heavy metal pollution, so as to eliminate the pollution of heavy metals in the sediments. In future studies, the enrichment characteristics of heavy metals in sediments with different grain sizes will be revealed to provide more comprehensive scientific data for the prediction of heavy metal pollution in sediments and the overall ecological protection of the basin.

Key words: Beiluo River; sediment; heavy metal; spatial distribution; ecological risk assessment; pollution source