

洛河洛阳段沉积物重金属空间分布及潜在生态风险

刘德鸿, 石兆勇

(河南科技大学 农学院, 河南 洛阳 471000)

摘要:为明晰洛河洛阳段沉积物重金属分布、风险及来源,以洛河洛阳段为研究对象,采集入城区段、主城区段和出城区段13个点位的表层沉积物,分析重金属(Pb、Cd、Cr、Mo、Cu和Zn)的空间分特征,并利用地累积指数(I_{geo})法、潜在生态风险指数(RI)法和主成分分析等方法评价重金属污染程度、潜在生态风险及来源解析,结果显示:洛河洛阳段沉积物重金属平均质量分数Pb($42.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、Cd($2.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、Cr($76.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、Mo($9.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、Cu($35.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)及Zn($145.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)分别为黄河流域河南段重金属元素土壤背景值的1.7、14.2、1.1、13.7、1.5和2.2倍。Pb、Cr和Cu质量分数均表现为入城区段显著高于出城区段,Cd、Mo和Zn表现为主城区段显著高于出城区段,这6种重金属质量分数在入城区段与主城区段间无显著差异。入城区段和主城区段多数点位的Cd为偏重污染程度及以上,Mo为中度污染或偏重污染程度,其余为轻度或低污染程度。源解析显示,Pb、Cd、Mo、Cu和Zn主要为人为源,Cr以自然源为主。潜在生态风险指数法结果显示,入城区段点位达到强生态危害水平(Ⅲ级)及以上,主城区段所有点位均达到很强生态危害水平(Ⅳ级),出城区段所有点位均达到强生态危害水平(Ⅲ级),其中,Cd对RI的贡献最大,占比64.10%,其次是Mo(32.67%)。洛阳市应重点关注由钼产业可能引起的环境风险,并进一步降低Cd污染水平,方能降低洛河沉积物重金属的污染及潜在生态风险。

关键词:洛河;洛阳段;沉积物;重金属;潜在生态风险

中图分类号:X522

文献标志码:A

文章编号:1000-2367(2025)01-0057-09

在城市形成和发展中,河流是一个关键的资源和环境载体,同时作为城市生态系统的重要构成要素,在城市生态建设、拓展城市发展空间方面发挥了巨大作用^[1]。然而,随着城镇化进程的持续推进,城市河流环境质量恶化的风险也在不断加大^[2-4]。对城市河流污染状况的调查及生态风险评价已引起国内外学者的广泛关注。

城市河流由于流经区域复杂、市区内小流域环境相对封闭、水体更新缓慢等原因,更易于污染物在沉积物中蓄积,进而导致更为严重的污染^[5]。在各类污染物中,重金属因其毒性大、来源广泛和不可生物降解性而备受关注^[6-7]。研究发现,城市工业活动^[8]、城市建设^[9]和交通运输等人类活动产生的含有重金属的污水及粉尘,可通过地表径流^[10]或大气沉降^[11]进入河流,最终使重金属蓄积在沉积物中。此外,城市各功能区分布的空间差异,对城市河流沉积物重金属的空间分布也会造成一定影响,多数河流流经城市,尤其是工业集中区后,沉积物重金属污染更为严重^[12-13]。目前,我国很多城市河道沉积物中重金属污染问题突出,由此引起的环境风险普遍较高^[1-5]。沉积物不仅是重金属的汇,也是其潜在释放源。当水环境条件发生变化时,这些积累的重金属会再次释放,进而导致更严重的二次污染,将对水生生态系统产生持续影响,最终威胁人类健康。

收稿日期:2024-03-11;**修回日期:**2024-06-07.

基金项目:国家自然科学基金(32171620);河南科技大学博士人才基金(13480093).

作者简介(通信作者):刘德鸿(1979—),男,河南南阳人,河南科技大学讲师,博士,主要从事土壤、沉积物生态环境方面的研究,E-mail:l66dehong@126.com.

引用本文:刘德鸿,石兆勇.洛河洛阳段沉积物重金属空间分布及潜在生态风险[J].河南师范大学学报(自然科学版),2025,53(1):57-65.(Liu Dehong, Shi Zhaoyong. Spatial distribution and ecological risk of heavy metals in the sediments of the Luoyang section of the Luohe River[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2025, 53(1): 57-65. DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2024.03.11.0004.)

洛河是黄河支流之一,洛河发源于陕西省蓝田县境华山南麓,流经洛南县、卢氏县、洛阳市,于巩义市北入黄河。随着洛阳市区规模的不断扩大,洛河流经市区段长度已达 60 km 以上,市区小流域内有涧河和瀍河汇入,工矿企业众多,工业活动频繁,重金属污染严重^[14-16],尤其是,洛阳作为拥有亚洲第一钼矿资源的老牌重工业城市,由传统重工业及钼相关产业可能引起的重金属污染及环境风险理应引起重视,而有关洛河洛阳段沉积物重金属污染状况及风险评价的研究仍鲜见报道。为此,本文以洛河洛阳市区段为研究对象,分析沉积物重金属空间分布特征,并评估重金属对环境造成的生态风险,探讨重金属来源,这对于城市发展和规划、城市河道综合整治乃至黄河流域生态保护和高质量发展具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及样品采集与处理

洛阳市位于河南省西部,地处东经 111°08′至 112°59′、北纬 35°05′至 33°35′之间,暖温带南缘向北亚热带过渡地带,年平均气温 14.2 °C,降雨量 546 mm。洛河在洛阳市偃师区与伊河交汇,经巩义市注入黄河。本研究选取西至宜阳与洛阳交界处,东至位于偃师区的伊洛河交汇处这一段河道,设置 13 个采样点。根据点位分布区域结合研究目的,将这些点位作如下划分。入市区段(S1, S2):该区域位于宜阳与洛阳市区交界处,河流周边分布有农田、村庄、轴承产业园、机械类公司等。主城区段(S3~S9):贯穿整个洛阳主城区,途径涧西区、西工区、老城区、瀍河回族区、洛龙区,区间内依次有防洪渠、涧河、瀍河汇入,防洪渠和涧河主要流经涧西区,该区域为洛阳市老重工业区,有中国一拖、中铝洛铜、中信重工等大型重工业企业。瀍河流经区域以居民区为主。出城区段(S10~S13):主要位于洛阳市偃师区,最后与伊河交汇,河流周边分布生态公园、农田等。具体点位如图 1 所示。采样时间为 2022 年 10 月,用 GPS 定位采样点位置,在每一样点区域用不锈钢抓斗式采样器采集表层(0~5 cm)沉积物样品 3 个,共 39 个样品,装入自封袋。带回实验室在阴凉处自然风干,去除杂质,然后将每个样点所采集的 3 个样品均匀混合为 1 个样品,最终得到 13 个样品,玛瑙研钵研磨后过 100 目尼龙筛,装袋待测。

1.2 重金属测定

沉积物中重金属总量分析采用 HF-HClO₄-HNO₃ 法进行消解^[7], Agilent 5110VDV ICP-OES 等离子体发射光谱仪测定。为保证精度,利用国家标准土壤样品(GSS-2)进行质量控制,回收率控制在 85%~105%之间,所有样品分析均重复 3 次,取平均值。

1.3 重金属污染评价方法

1.3.1 地累积指数法

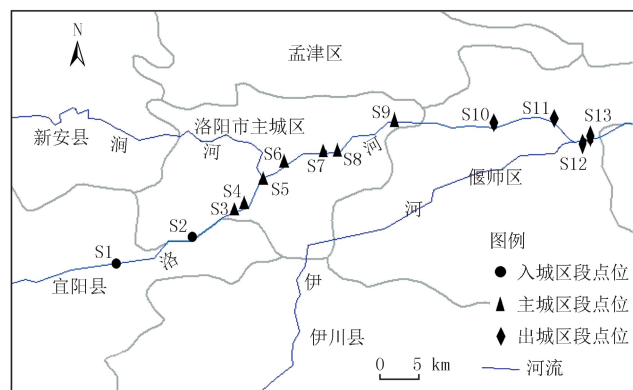
该指数不但能反映出重金属分布的自然变化特征,而且还可以方便快捷地判定人为活动

对环境的影响,是用来反映沉积物中重金属富集程度的常用指标,应用广泛^[7],具体计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / (KB_i)],$$

式中, I_{geo} 为地累积指数; C_i 为重金属 i 在沉积物中的实测值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); B_i 为黄河流域河南段重金属 i 土壤背景值^[17] ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); K 是考虑各地岩石差异可能引起背景值变化而取的系数,通常取值 1.5。

本方法按污染程度具体分为以下几个等级:无污染 ($I_{geo} \leq 0$)、轻度污染 ($0 < I_{geo} \leq 1$)、偏中度污染 ($1 < I_{geo} \leq 2$)、中度污染 ($2 < I_{geo} \leq 3$)、偏重度污染 ($3 < I_{geo} \leq 4$)、重度污染 ($4 < I_{geo} \leq 5$) 及严重污染 ($I_{geo} > 5$)。



注:审图号为GS(2022)1873,底图无修改。

图1 采样点位图

Fig. 1 Location of sampling sites in the study region

1.3.2 潜在生态风险指数评价

瑞典学者 Hakanson 的潜在生态危害指数法,反映了沉积物中单一污染物对环境的影响,也反映了多种污染物对环境的综合效应,是综合反映重金属对生态环境影响潜力的指标^[1].具体计算公式如下:

单一重金属污染系数(C_i^i):

$$C_i^i = C_i / C_n^i.$$

单一重金属潜在生态危害指数(E_r^i):

$$E_r^i = T_r^i \times C_i^i.$$

多种重金属综合潜在生态危害指数(RI):

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i,$$

上述式中, C_i 是河流沉积物重金属 i 的实测值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), C_n^i 是计算重金属 i 需要的参比值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),本研究选择参比值为黄河流域河南段土壤背景值^[17]. T_r^i 是毒性系数,参考相关文献^[18-20]分别确定为:30(Cd)、2(Cr)、5(Cu)、1(Zn)、5(Pb)、18(Mo).根据 E_r^i 和 RI 值区分不同程度的生态危害水平(表 1).

表 1 潜在生态风险评估指标与等级划分

Tab. 1 Potential ecological risk assessment indicators and classification

C_i^i	污染程度	E_r^i	RI	危害程度
$C_i^i < 1$	清洁 I	$E_r^i < 40$	$RI < 150$	轻微生态危害(I级)
$1 \leq C_i^i < 3$	低污染 II	$40 \leq E_r^i < 80$	$150 \leq RI < 300$	中等生态危害(II级)
$3 \leq C_i^i < 6$	中污染 III	$80 \leq E_r^i < 160$	$300 \leq RI < 600$	强生态危害(III级)
$6 \leq C_i^i < 9$	较高污染 IV	$160 \leq E_r^i < 320$	$RI \geq 600$	很强生态危害(IV级)
$C_i^i \geq 9$	高污染 V	$E_r^i \geq 320$	—	极强生态危害(V级)

1.4 数据处理

利用 Excel 和 SPSS 24.0 等统计软件对数据进行统计分析,ArcGIS 10.2 绘制采样点位图,Excel 和 Origin 2021 制图.

2 结果与分析

2.1 沉积物重金属含量特征

由表 2 可知,洛河洛阳段沉积物重金属平均值水平均高于黄河流域河南段土壤背景值,其中平均值最高的元素为 Zn($145.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),其后依次是 Cr($76.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、Pb($42.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、Cu($35.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、Mo($9.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和 Cd($2.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).Pb、Cd、Cr、Mo、Cu 和 Zn 平均值分别为背景值的 1.7、14.2、1.1、13.7、1.5 和 2.2 倍,超背景值点位占比分别为 92.3%、100%、61.5%、100%、69.2%和 84.6%.Cd 和 Mo 达高污染程度,平均污染系数(C_i^i)分别为 14.19 和 13.69, Pb(1.67)、Cr(1.11)、Cu(1.45)及 Zn(2.16)均为低污染程度.变异系数最大的是 Zn(0.91),其次是 Cu(0.64),再次是 Mo(0.52),显示这些元素含量空间分布不均匀,离散性相对较大.

2.2 沉积物重金属空间分布特征

从不同区段来看(图 2),沉积物中 Pb 平均值(质量分数 w)在入城区段、主城区段和出城区段分别为 53.54 、 46.20 和 $31.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Cr 分别为 89.50 、 78.58 和 $67.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Cu 分别为 43.18 、 40.26 和 $22.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均表现为 $w(\text{入城区段}) > w(\text{主城区段}) > w(\text{出城区段})$,入城区段均显著高于出城区段.沉积物中 Cd 平均质量分数在入城区段、主城区段和出城区段分别为 2.37 、 3.00 和 $1.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Mo 分别为 7.32 、 11.60 和 $6.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Zn 分别为 86.48 、 200.31 和 $79.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均表现为 $w(\text{主城区段}) > w(\text{入城区段}) > w(\text{出城区段})$,主城区段均显著高于出城区段.整体看,这 6 种重金属含量空间分布表现为入城区段和主城区段整体高于出城区段.入城区段是原有的城乡结合部和现代新兴工业的发展区,主城区中存在老工业基地涧西区,这均可能是重金属的来源区域,且涧河流经涧西老工业区后汇入洛河,以上因素均可

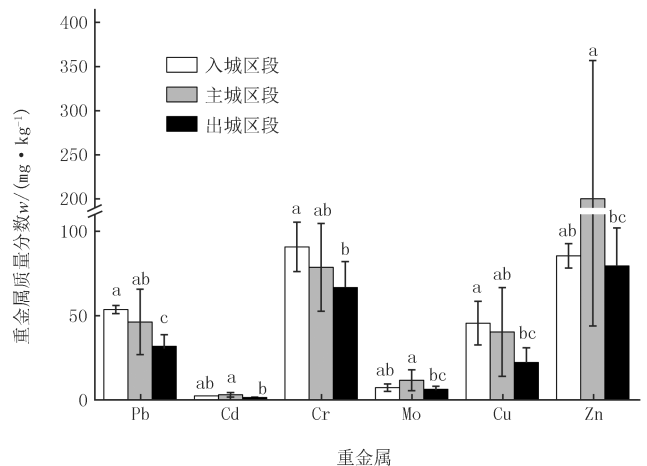
导致该区域河道沉积物重金属质量分数维持在较高水平.出城区河段周边主要为农田种植区,重金属质量分数有降低的趋势.

表 2 沉积物重金属质量分数(w)特征

Tab. 2 Characteristics of heavy metal mass fraction (w) in sediments		mg · kg ⁻¹					
河段	点位	Pb	Cd	Cr	Mo	Cu	Zn
入城区段	S1	53.55	2.30	94.07	6.74	54.73	81.10
	S2	53.54	2.44	85.63	7.91	31.63	91.86
主城区段	S3	48.42	4.08	62.26	6.92	28.23	343.59
	S4	90.03	2.87	83.07	17.11	30.98	138.58
	S5	40.90	2.59	65.72	15.22	31.43	109.45
	S6	29.95	2.53	60.74	7.17	37.54	94.91
	S7	36.75	1.18	70.49	20.00	102.00	513.76
	S8	36.24	2.44	122.32	8.17	28.89	95.71
	S9	41.09	5.29	85.43	6.57	22.77	106.14
出城区段	S10	39.36	1.98	73.94	5.14	17.33	72.43
	S11	27.72	1.17	74.99	4.69	20.70	65.98
	S12	23.34	1.23	51.49	6.99	14.75	63.04
	S13	36.80	1.25	68.99	8.36	35.95	116.22
最小值		23.34	1.17	51.49	4.69	14.75	63.04
最大值		90.03	5.29	122.32	20.00	102.00	513.76
平均值		42.90	2.41	76.86	9.31	35.15	145.60
背景值		25.73	0.17	69.03	0.68	24.18	67.36
变异系数		0.39	0.50	0.23	0.52	0.64	0.91
平均污染系数(C_i^t)		1.67	14.19	1.11	13.69	1.45	2.16

2.3 沉积物重金属地累积指数及生态风险评价

如图 3(a)所示,洛河洛阳段沉积物 Pb、Cd、Cr、Mo、Cu 和 Zn 地累积指数 (I_{geo}) 均值分别为 0.07、3.09、-0.46、3.04、-0.23 和 0.20.其中,富集程度最高的为 Cd,其次是 Mo,达到偏重污染水平,Pb 和 Zn 处于轻度污染水平,Cr 和 Cu 处于无污染水平,主城区段 Mo、Zn 污染水平整体高于入城区段和出城区段,其余重金属除个别点位外并没有明显差异.潜在生态风险指数(图 3(b))显示,主城区段所有点位均达到很强生态危害水平(Ⅳ级),出城区段所有点位均为强生态危害水平(Ⅲ级),整体污染程度由大到小为主城区、入城区、出城区.各重金属元素对 RI 平均贡献占比(E_i^t/RI)分别为:Pb(1.34%)、Cd(64.10%)、Cr(0.38%)、Mo(32.67%)、Cu(1.19%)



注:用Duncan's multiple range test进行不同区域样本间差异性显著性分析,标有不同小写字母者表示区域间差异显著($P < 0.05$);标有相同小写字母者表示区域间差异不显著($P > 0.05$).

图2 沉积物重金属质量分数均值空间分布

Fig.2 Spatial distribution of heavy metal mass fraction in sediments

和 Zn(0.33%),其中 Cd 的贡献最大,其次是 Mo,两者合计贡献占比达 96.77%。上述结果表明,洛河洛阳段沉积物 Cd 和 Mo 污染最为严重,是主要污染因子,并由此导致高的潜在生态风险(Ⅲ级及以上),应予以重视。

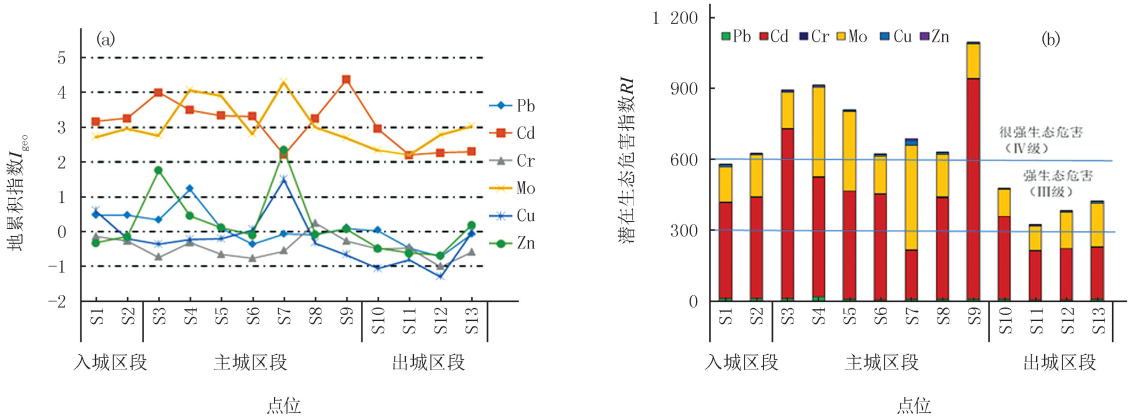
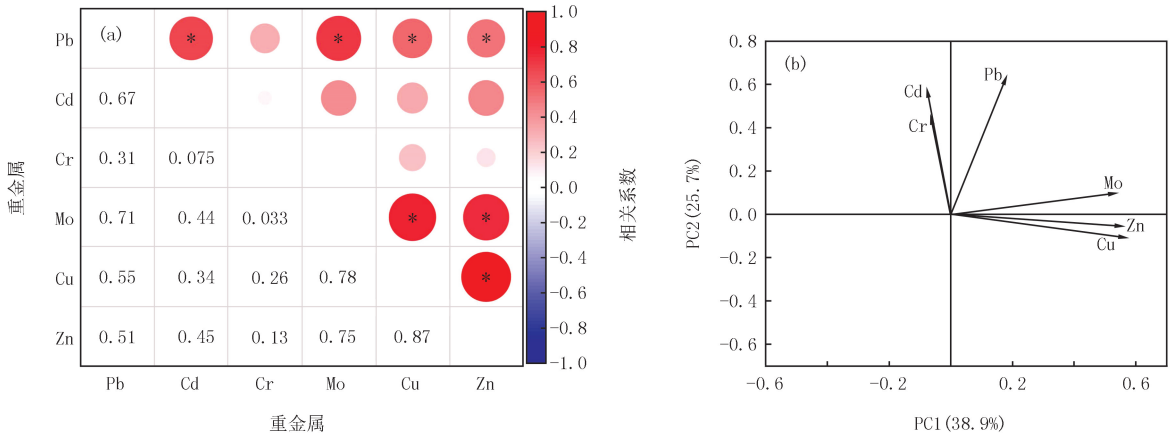


图3 地累积指数(a)和潜在生态风险评价指数(b)

Fig.3 Geo-accumulation index(a) and potential ecological risk index(b) of heavy metals in sediments

2.4 沉积物重金属来源解析

相关性分析结果显示(图 4(a)),Mo 与 Cu、Zn 及 Pb 显著相关($P < 0.05$),Cd 与 Pb 显著相关($P < 0.05$),Cr 与 Mo、Cu、Zn、Pb、Cd 均不相关。重金属主成分载荷(图 4(b))结果显示,主成分 1 中 Mo(0.544)、Zn(0.569)和 Cu(0.580)均具有较高载荷,且相互之间呈显著相关关系($P < 0.05$),表明它们极有可能来源一致。Cd(0.587)、Pb(0.646)和 Cr(0.462)同为主成分 2,均具有较高载荷,Cd 和 Pb 之间显著相关,可能来源相近。综上,结合表 2 和图 3 可以判断,Mo、Cu 和 Zn 可能同源,Cd 和 Pb 可能同源,而 Cr 可能来源于自然因素。



注:图(a)中*表示 $P < 0.05$ 显著水平(双尾),圆圈大小及颜色深浅共同代表相关系数大小,右侧数字轴为比例尺,蓝色代表负相关,红色代表正相关,颜色深浅代表相关系数大小。

图4 重金属相关性分析(a)及主成分载荷(b)

Fig.4 Correlation analysis(a) and principal component analysis loading pot(b) of heavy metals in sediments

3 讨论

沉积物中重金属主要来源于流域内的工农业生产过程,包括工业废水、农业退水、城市地表径流及大气沉降等。现有研究发现,城市河流沉积物中多数重金属含量超过当地土壤背景值,污染严重(表 3)。比较国内

外部分城市河流沉积物重金属含量发现(表 3),洛阳市洛河沉积物重金属含量整体低于所报道城市河流,Cd 含量与南京秦淮河相当,略高于天津北运河,所有元素含量远低于开封城市河流,城市间差异很大,这主要与城市工业布局和河流流经区域的土地利用状况有关^[5,26].高污染高耗能产业由主城区外迁,有助于城市环境的改善,洛阳市主城区除涧西区老工业区因历史原因依然保留外,目前新建工业企业多数都集中在位于市区西部宜阳至市区之间及洛阳高新技术开发区,本研究中 S1、S2、S3 和 S4 位于该区域,沉积物重金属均有不同程度积累(表 2、图 3).可能为该区域的工业生产活动所致,该区域目前拥有中航锂电(洛阳)产业园、格力电器(洛阳有限公司)及洛阳金鹭硬质合金工具有限公司等众多大中小型工业企业,锂电池的生产、空调电路板的生产和硬质合金工具的制造,都可能向环境中排放含有 Cd、Pb 以及 Mo 的废弃物或粉尘,且该区域早期是洛阳市区的城乡结合部^[14],河道两岸分布着大面积农田,含 Cd 肥料的施用^[2]及交通物流运输带来的 Pb 也可能通过大气沉降^[11]、地表径流^[10,30]进入水体而富集在沉积物中,进而导致较高的重金属污染水平.主城区段内重金属元素除 S7 的 Zn($513.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和 S9 的 Cd($5.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)明显高于其他点位外,其余点位及各元素间并没有明显差异,整体看与入市区段点位无显著差异.这表明,洛阳主城区老工业区的生产活动、更高强度的商业活动及密集的居民生活等并没有明显导致沉积物重金属污染的进一步恶化,这可能得益于洛阳市近些年对传统产业结构的优化升级,以及洛河洛阳段两岸生态环境的改善,与本课题组早期对该区域的相关研究结果^[12]相比,沉积物重金属含量水平,除 Zn 以外,其余元素均显著下降,符合上述推断.出市区段主要位于主城区东出口至偃师区(偃师市于 2021 年撤县划区)之间,该区域内以农业生产为主,沉积物重金属含量与入市区和主城区相比有下降趋势,并整体低于以上区域,这也与相关研究结果^[1,29]一致.目前,Mo 可能由于地壳中含量较低或毒性风险较低而被研究者忽视,LI 等^[20]研究认为,包括 Mo 在内的多种易被忽略的重金属对水生生态系统仍具有潜在威胁.当前,包括 Mo 在内的重金属研究多集中于矿区土壤中^[18,30],毛香菊等^[31]对内蒙古钼矿区土壤重金属污染研究发现,矿区土壤各重金属元素之间均呈极显著相关,具有高度的同源性,推测主要来自钼矿的开采.洛阳地区栾川县现有亚洲排名第一的钼矿资源,区域内钼矿开采、冶炼及下游相关产业众多,加之主城区内众多重工业企业的生产活动,均可能导致 Mo、Cu 和 Zn 及其他伴生重金属进入水、土壤等环境.

表 3 国内外部分城市河流沉积物重金属质量分数(τ_w)Tab. 3 Heavy metals mass fraction (τ_w) in river sediments of some cities at home and abroad $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

城市/河流	Pb	Cd	Cr	Cu	Zn	Mo
设拉子/霍什克河 ^[21]	121.01	1.23	181.87	42.25	64.81	—
德里/亚穆纳河 ^[22]	76	4.5	394	275	561	—
瓦拉纳西/恒河 ^[23]	26.7	1.7	69.9	29.8	67.8	—
河内/苏栗河 ^[24]	67.1	4.4	107.9	87.7	477.9	—
兰州/黄河 ^[25]	58.16	—	190.29	102.45	315.28	—
宁波/富春江 ^[7]	49.4	1.2	86.7	106.1	1 122.9	—
沈阳/细河 ^[26]	21.88	2.88	35.55	45.25	205.68	—
重庆/清水溪 ^[27]	42.99	0.24	86.43	78.21	198.71	—
巢湖/城市河道 ^[28]	49.46	—	102.03	79.44	206.07	—
开封/城市河流 ^[5]	115.34	24.51	67.86	290.65	1 936.95	—
北京/北运河 ^[1]	34.11	0.41	47.31	55.31	212.05	—
天津/北运河 ^[29]	29.62	0.23	70.72	31.35	115.70	—
南京/秦淮河 ^[2]	33.39	0.61	79.92	44.71	149	—
常宁/湘江(松柏段) ^[20]	—	—	—	—	—	45.35
洛阳/洛河(本研究)	42.90	2.41	76.86	35.15	145.60	9.31

城市雨水径流携带重金属进入水体可能是导致河流沉积物重金属富集的重要原因之一^[10],本课题组早期对洛阳市不同功能区地表灰尘重金属的研究显示^[14-15],工业区地表灰尘中重金属含量远超土壤背景值,均达到高污染程度,且远高于本研究中沉积物重金属含量,因此,地表灰尘中的重金属可能被雨水径流携带,进入河道,进而导致河道沉积物中重金属元素的富集,后续可针对城市地表径流的研究进一步解析城市河道沉积物重金属的来源及贡献.由于城市河道流经区域复杂,且受自然因素影响较大,诸如丰水期上游支流远距离的携带,市区段各级橡胶坝拦截下的沉降,这都可能导致市区段河道沉积物重金属的蓄积,因此,完全阐明其来源仍存在诸多困难.

当前,洛阳市处于快速发展期,传统重工业正逐步完成产业升级,城市环境进一步提升,尤其是近年来洛阳市大力推进海绵城市建设,可实现对雨水的吸附、渗透、净化,减少地表径流对水体的污染,这均有助于城市河道水环境质量的改善.下一步,洛阳市应重点关注由钼产业可能引起的环境风险,并进一步降低 Cd 污染水平,方能降低洛河沉积物重金属的污染水平及潜在生态风险.

4 结 论

(1)洛河洛阳段沉积物重金属平均质量分数均超背景值,其中以 Cd 和 Mo 污染最为严重,分别为背景值的 14.2 和 13.7 倍,Cr、Cu、Pb 和 Zn 为背景值的 1.1~2.2 倍.入市区段和主城区段沉积物中重金属值无明显差异,且均高于出市区段.与其他城市河流相比,洛河洛阳段沉积物重金属含量整体处于较低水平.

(2)地累积指数和潜在生态风险指数评价结果显示,富集程度最高的为 Cd,其次是 Mo,均达到偏重污染程度.洛河洛阳段沉积物整体处于强生态风险及以上,这主要是由 Cd 和 Mo 引起.

(3)重金属污染源分析结果显示,Pb、Cd、Mo、Cu 和 Zn 以人为输入为主,推测主要来源于农业种植、交通运输及工业活动.Cr 以自然源为主.

参 考 文 献

- [1] ZHANG Y Q, LIU S L, CHENG F Y, et al. Spatial distribution of metals and associated risks in surface sediments along a typical urban river gradient in the Beijing Region[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2018, 74(1): 80-91.
- [2] WU P B, YIN A J, YANG X H, et al. Distribution and source identification of heavy metals in the sediments of a river flowing an urbanization gradient, Eastern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(21): 745.
- [3] 葛思敏,李雪,刘承友,等.清漯河许昌段表层沉积物中营养盐及重金属污染特征分析[J].河南师范大学学报(自然科学版),2021,49(2): 107-117.
GE S M, LI X, LIU C Y, et al. Temporal and spatial changes in sediment nutrients and heavy metals of Qingyi River of Xuchang city[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2021, 49(2): 107-117.
- [4] 苏海民,孙朋,张勇.宿州市沱河城市景观河流重金属富集及污染评价[J].河南师范大学学报(自然科学版),2021,49(2):118-124.
SU H M, SUN P, ZHANG Y. Enrichment and contamination evaluation of heavy metal of urban landscape river of Tuo River in Suzhou city[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2021, 49(2): 118-124.
- [5] 王洪涛,张俊华,丁少峰,等.开封城市河流表层沉积物重金属分布、污染来源及风险评估[J].环境科学学报,2016,36(12):4520-4530.
WANG H T, ZHANG J H, DING S F, et al. Distribution characteristics, sources identification and risk assessment of heavy metals in surface sediments of urban rivers in Kaifeng[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(12): 4520-4530.
- [6] 史文昌,兰明国,侯邑,等.基于正定因子矩阵的南滇池湿地沉积物重金属来源解析及潜在生态风险评价[J].环境污染与防治,2023, 45(1):92-96.
SHI W C, LAN M G, HOU Y, et al. Source apportionment and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments of South-Dianchi wetland based on positive matrix factorization[J]. Environmental Pollution & Control, 2023, 45(1): 92-96.
- [7] LIU M J, WANG Z Q, WANG J, et al. Heavy metal(loid) risk assessment and nutrient characteristics of sediments from an urban river in Ningbo, China[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(10): 864.
- [8] 陈慧,赵鑫宇,常帅,等.华北平原典型城市(石家庄)地下水重金属污染源解析与健康风险评估[J].环境科学,2023,44(9):4884-4895.
CHEN H, ZHAO X Y, CHANG S, et al. Source analysis and health risk assessment of heavy metals in the groundwater of Shijiazhuang, a typical city in North China Plain[J]. Environmental Science, 2023, 44(9): 4884-4895.
- [9] 安江梅朵,张瑞卿,郭广慧,等.北京市城市公园土壤铅累积特征、来源及健康风险[J].环境科学,2023,44(11):6287-6296.
AN J M D, ZHANG R Q, GUO G H, et al. Accumulation characteristics, sources, and health risks of soil lead of urban parks in Beijing[J].

- Environmental Science, 2023, 44(11): 6287-6296.
- [10] 陈月芳, 郭静, 郭思语, 等. 常州武南河表水中重金属污染评价及来源解析[J]. 环境科学学报, 2024, 44(3): 157-166.
CHEN Y F, GUO J, GUO S Y, et al. Pollution assessment and source analysis of heavy metals in the Wunan River, Changzhou[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024, 44(3): 157-166.
- [11] 胡冠钊, 乔少博, 王驹, 等. 广州市南沙区高新沙水库大气干湿沉降重金属含量、沉降通量特征分析及其对水库水质的影响[J]. 环境科学学报, 2022, 42(10): 120-128.
HU G Z, QIAO S B, WANG J, et al. Heavy metal contents and deposition fluxes in atmospheric dry and wet deposition of Gaoxinsha Reservoir in Nansha District, Guangzhou and the impact on water quality[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(10): 120-128.
- [12] 刘德鸿, 寇太记, 王发园, 等. 洛阳城市河流底质重金属污染及潜在生态风险[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2012, 33(6): 87-90.
LIU D H, KOU T J, WANG F Y, et al. Heavy metal pollution in river sediment from Luoyang City and its potential ecological risk[J]. Journal of Henan University of Science & Technology(Natural Science), 2012, 33(6): 87-90.
- [13] 陈志凡, 徐薇, 化艳旭, 等. 开封城市河流底泥重金属积累生态风险评价及同位素源解析[J]. 环境科学学报, 2020, 40(4): 1321-1330.
CHEN Z F, XU W, HUA Y X, et al. Ecological risk assessment and isotope source analysis of heavy metals accumulated in sediments of Kaifeng urban rivers[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(4): 1321-1330.
- [14] 刘德鸿, 王发园, 周文利, 等. 洛阳市不同功能区道路灰尘重金属污染及潜在生态风险[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 253-259.
LIU D H, WANG F Y, ZHOU W L, et al. Heavy metal pollution in street dusts from different functional zones of Luoyang City and its potential ecological risk[J]. Environmental Science, 2012, 33(1): 253-259.
- [15] 刘德鸿, 王发园, 寇太记. 洛阳市不同功能区地表灰尘重金属的粒径分布特征[J]. 生态环境学报, 2012, 21(4): 700-705.
LIU D H, WANG F Y, KOU T J. Particle size distribution of heavy metals in surface dusts from different functional zones of Luoyang city[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(4): 700-705.
- [16] 刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 等. 河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境科学, 2016, 37(6): 2322-2328.
LIU Y N, ZHU S F, WEI X F, et al. Assessment and pollution characteristics of heavy metals in soil of different functional areas in Luoyang[J]. Environmental Science, 2016, 37(6): 2322-2328.
- [17] 盛奇, 王恒旭, 胡永华, 等. 黄河流域河南段土壤背景值与基准值研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(18): 8647-8650.
SHENG Q, WANG H X, HU Y H, et al. Study on soil background value and reference value in Henan section of Yellow River[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(18): 8647-8650.
- [18] SUN Y Q, XIAO K, WANG X D, et al. Evaluating the distribution and potential ecological risks of heavy metal in coal gangue[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021, 28(15): 18604-18615.
- [19] HUA C Y, ZHOU G Z, YIN X, et al. Assessment of heavy metal in coal gangue: distribution, leaching characteristic and potential ecological risk[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(32): 32321-32331.
- [20] LI H, YANG J Q, YE B, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of 11 unheeded metals in sediments of the Chinese Xiangjiang River[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2019, 41(3): 1459-1472.
- [21] SALATI S, MOORE F. Assessment of heavy metal concentration in the Khoshk River water and sediment, Shiraz, Southwest Iran[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 164(1/2/3/4): 677-689.
- [22] SINGH M. Heavy metal pollution in freshly deposited sediments of the Yamuna River (the Ganges River tributary): a case study from Delhi and Agra urban centres, India[J]. Environmental Geology, 2001, 40(6): 664-671.
- [23] PANDEY J, SINGH R. Heavy metals in sediments of Ganga river; up- and downstream urban influences[J]. Applied Water Science, 2017, 7(4): 1669-1678.
- [24] THUONG N T, YONEDA M, IKEGAMI M, et al. Source discrimination of heavy metals in sediment and water of To Lich River in Hanoi City using multivariate statistical approaches[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(10): 8065-8075.
- [25] WANG B, XIA D S, YU Y, et al. Magnetic properties of river sediments and their relationship with heavy metals and organic matter in the urban area in Lanzhou, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 70(2): 605-614.
- [26] LIU D P, WANG J, YU H B, et al. Evaluating ecological risks and tracking potential factors influencing heavy metals in sediments in an urban river[J]. Environmental Sciences Europe, 2021, 33(1): 42.
- [27] 王超, 贾伯阳, 黄焱, 等. 典型山地城市河流沉积物重金属生态风险评价及来源解析[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(11): 2526-2535.
WANG C, JIA B Y, HUANG Y, et al. Ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in river sediments of a typical mountainous city[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(11): 2526-2535.
- [28] 李飞鹏, 陈玲, 张海平, 等. 巢湖市河流表层沉积物重金属污染和风险评估[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(12): 1852-1856.
LI F P, CHEN L, ZHANG H P, et al. Heavy metal pollution in surface sediment of urban river in Chaohu City and its risk assessment[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2012, 40(12): 1852-1856.
- [29] LI W Y, ZHANG W Q, SHAN B Q, et al. Risk assessment of heavy metals in suspended particulate matter in a typical urban river[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29(31): 46649-46664.

- [30] NEMATOLLAHI M J, KESHAVARZI B, ZAREMOAIEDI F, et al. Ecological-health risk assessment and bioavailability of potentially toxic elements (PTEs) in soil and plant around a copper smelter[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(10): 639.
- [31] 毛香菊, 肖芳, 马亚梦, 等. 内蒙古草原某铜钼矿区土壤重金属污染潜在生态危害评价[J]. 矿产保护与利用, 2016, 36(2): 54-57.
- MAO X J, XIAO F, MA Y M, et al. Evaluation on potential ecological risk of heavy metals in soils of copper-molybdenum mine region in Inner Mongolia[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2016, 36(2): 54-57.

Spatial distribution and ecological risk of heavy metals in the sediments of the Luoyang section of the Luohe River

Liu Dehong, Shi Zhaoyong

(Agricultural College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, China)

Abstract: In order to clarify the distribution, risks, and sources of heavy metals in the sediments of the Luoyang section of the Luohe River, surface sediments were collected from 13 sites located in the upstream urban area, the main urban area, and the downstream urban area. Spatial distribution characteristics of heavy metals (Pb, Cd, Cr, Mo, Cu, and Zn) were analyzed. The geoaccumulation index (I_{geo}), potential ecological risk index (RI), and principal component analysis were used to evaluate the pollution level, potential ecological risks, and identify the sources of heavy metals. The results showed that the average mass fraction of heavy metal in the sediments, Pb ($42.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), Cd ($2.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), Cr ($76.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), Mo ($9.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), Cu ($35.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) and Zn ($145.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) were 1.7, 14.2, 1.1, 13.7, 1.5, and 2.2 times of the soil background values of heavy metals in Henan section of the Yellow River Basin, respectively. The contents of Pb, Cr and Cu in sediments in the upstream urban area were significantly higher than those in the downstream urban area, the contents of Cd, Mo, and Zn in the main urban area were significantly higher than those in the downstream urban area. There was no significant difference between the upstream urban area and the main urban area. In the upstream urban area and the main urban area, the Cd pollution level at most sites reaches moderate to severe, while Mo pollution is moderate to severe, and the rest are mild or low. Source analysis indicates that Pb, Cd, Mo, Cu, and Zn mainly originate from anthropogenic sources, while Cr is primarily a natural source. The RI results showed that the sites in the upstream urban area have reached a strong ecological hazard level (Grade III) or above, all sites in the main urban area have reached a very strong ecological risk level (Grade IV), while all sites in the downstream urban area were at a strong ecological risk level (Grade III). Among them, Cd contributes the most (64.10%) to the RI , followed by Mo (32.67%). Luoyang City should focus on environmental risks potentially caused by the molybdenum industry and further reduce Cd pollution levels to mitigate heavy metal pollution and potential ecological risks in the Luohe River sediments.

Keywords: Luohe River; Luoyang section; sediment; heavy metal; potential ecological risk

[责任编辑 赵晓华 刘洋]