

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.15.012

黄河兰州段城市河道重金属污染特征及健康风险评价

李军^{1,2}, 焦亮², 李开明¹, 臧飞³, 台喜生¹, 周发元¹,
脱新颖¹, 杨云钦¹

(1. 兰州城市学院 城市环境学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 西北师范大学 甘肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 兰州大学 草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020)

摘要: 为揭示黄河流域城市河道表层沉积物重金属污染特征及其人体健康风险,选择黄河兰州段城市河道表层沉积物为研究对象,分析其Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg和Pb的含量特征。通过污染因子指数法、污染程度指数法、污染负荷指数法和沉积物质量基准法,评价了沉积物重金属污染程度和潜在生物毒性,并利用健康风险评价模型评估重金属人体健康风险。结果表明,表层沉积物的Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg、Pb含量平均值分别为306.60、115.71、23.84、58.63、9.03、0.70、0.09、55.90 mg/kg,除Cu、Zn和Hg的污染程度相对较轻之外,其他重金属的污染较为严重,Cr和Ni对河道生物具有毒害效应,综合污染程度较高。沉积物重金属对成人和儿童不存在非致癌健康风险,但存在可接受的致癌健康风险,且整体上表现为儿童的暴露风险高于成人,需加强对儿童健康的监护。

关键词: 黄河流域; 城市河道表层沉积物; 重金属; 健康风险评价

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)15-0081-08

Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metal Contamination from Urban River Surface Sediments in the Lanzhou Reach of the Yellow River

LI Jun^{1,2}, JIAO Liang², LI Kai-ming¹, ZANG Fei³, TAI Xi-sheng¹,
ZHOU Fa-yuan¹, TUO Xin-ying¹, YANG Yun-qin¹

(1. College of Urban Environment, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Province Key Laboratory of Resource Environment and Sustainable Development of Oasis, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 3. College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China)

Abstract: To reveal the contamination characteristics and health risk of heavy metals in the urban river surface sediments from the Yellow River basin, the present study determined the concentrations of 8 heavy metal elements (Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg and Pb) in the urban river surface sediments from the Lanzhou reach of the Yellow River. The contamination factor, contamination degree, pollution load index, and sediment quality guidelines were employed to assess the contamination status and ecotoxicological risk of heavy metals in the sediments, and human health risk was evaluated based on the USEPA health

基金项目: 甘肃省科技计划项目(21JR1RA319); 甘肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室开放课题(GORS202102); 甘肃省高等学校科研项目(2023A-116)

通信作者: 焦亮 E-mail: jiaoliang@nwnu.edu.cn

risk assessment models. The results indicated that the mean contents of Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg and Pb were 306.60 mg/kg, 115.71 mg/kg, 23.84 mg/kg, 58.63 mg/kg, 9.03 mg/kg, 0.70 mg/kg, 0.09 mg/kg and 55.90 mg/kg, respectively. The contamination levels of Cu, Zn and Hg were low to moderate, while the contamination levels of Cr, Ni, As, Cd and Pb were considerable to very high contamination. Cr and Ni in the sediment posed adverse biological effects according to the sediment quality guideline, and the total contamination degree of the heavy metal was between considerable degree and very high degree. Health risk assessment indicated that heavy metal elements in the sediments did not pose a non-carcinogenic threat to children and adults, but posed an acceptable carcinogenic risk. Children are at greater risk than adults when exposed to heavy metals, and thus more attention should be paid to children's health.

Key words: Yellow River basin; urban river surface sediments; heavy metal; health risk assessment

随着城市化进程的高速推进和不断深入,高强度人类活动造成的重金属污染已成为全球面临的重要环境污染问题之一。特别是城市河道重金属污染问题,已成为影响城市生态安全和水资源可持续利用的主要制约因素^[1]。重金属污染具有累积性、隐蔽性、滞后性和潜在的生物毒性,进入水体且蓄积于表层沉积物的重金属出现污染不仅威胁城市水生态安全^[2],而且可通过手口摄入和皮肤接触的暴露途径及食物链进入人体,进而影响人类健康^[3]。因此,评价当前城市化进程影响下的城市河道沉积物重金属污染特征及其健康风险,对保障城市水生态安全和保护人群健康具有重要意义。

黄河是兰州市居民生活用水和工农业用水的重要来源,也是黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略重点关注区域。黄河兰州段沿线分布有各类企业工业超过2 000家^[4],沿岸人口密集,强烈的人类活动导致黄河兰州段水资源供需矛盾突出,水体重金属污染日益严峻。近年来,众多学者对黄河兰州段水质和水生态安全状况^[5-6]、生物多样性与生态修复^[7]、耕地土壤重金属污染评价与溯源^[8-9]、沉积物重金属污染分布特征与来源^[4,10]等已有广泛而深入的研究,发现城市河流水体、耕地和沉积物重金属污染受沿岸人类活动影响显著。但在环境健康问题日益凸显且备受关注的今天,有关黄河流域兰州段城市河道沉积物重金属暴露风险下的定量人体健康风险评估却鲜有研究。

为此,以黄河兰州段城市河道表层沉积物为研究对象,在测定和分析重金属(Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg和Pb)含量特征的基础上,分别利用沉积物

污染指数法和沉积物质量基准法评价重金属的污染程度和生物毒性,并采用美国环境保护署推荐的健康风险评价模型定量评估重金属污染的人群健康风险,以期为黄河兰州段城市河道生态环境风险的精准管控和水生态安全保障提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河兰州段西起西柳沟,东至桑园峡,全长152 km。其中城市河道自西向东流贯兰州市西固、安宁、七里河和城关主城区(见图1),全长45 km,河床宽度为30~2 000 m。研究区地处干旱、半干旱气候地带,属温带大陆性气候,年平均气温为10.3℃,降水集中在6月—9月,年平均降水量为324.8 mm。多年监测数据显示,黄河兰州段水量稳定,水质状况良好,属于Ⅱ类水质类别。



图1 黄河兰州段采样点分布示意

Fig.1 Distribution of sampling sites in the Lanzhou reach of the Yellow River

1.2 样品采集与测定

基于黄河兰州段城市河道的流经情况,在现场踏勘和考虑入河排污口、支流汇入、跨河大桥、河流码头等受人类干扰影响因素的基础上,自深安黄河大桥至雁滩黄河大桥均匀设置46个采样点(见图

1)。于 2021 年 7 月使用抓斗式采样器采集 0~10 cm 的表层沉积物样品,装入聚乙烯塑料自封袋密封备用,每个样品均由采样点附近 25~50 m 区域内的 3~4 个子样品混合而成。

将采集的样品运回实验室,先置于阴凉通风处,再经自然风干、剔除杂物、研钵研磨和过 100 目尼龙筛等前处理后,采用氢氟酸-硝酸-高氯酸混酸消解法处理沉积物样品,使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Thermo X Series 2, 美国)测定 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 的含量,相应的检出限为 0.4、1.0、0.2、2.0、0.02 和 2.0 mg/kg。As 和 Hg 的测定是经王水水浴消解后,利用原子荧光光谱仪(XGY-1011A)完成,检出限分别为 0.2 和 0.005 mg/kg。测定过程中加入水系沉积物标准物质(GBW 07362)、随机抽取的 10% 平行样和空白样进行质量控制,标准物质各元素的回收率在 91%~112% 之间,分析误差在 10% 以内。实验所用试剂均为优级纯,实验用水为超纯水。

1.3 重金属污染评价方法

1.3.1 污染因子指数法

污染因子指数(CF)法是一种广泛用于评价沉积物中单个重金属污染程度的方法^[11],本研究中 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg 和 Pb 的背景值分别取为 22、15、30、60、1.9、0.13、0.08 和 15 mg/kg^[12]。当 $CF < 1$ 、 $1 \leq CF < 3$ 、 $3 \leq CF < 6$ 、 $CF \geq 6$ 时分别表示轻度、中度、重度和严重污染。

1.3.2 污染程度指数法和污染负荷指数法

多手段和多方法的相互验证有助于提高重金属污染评价结果的精确性和可靠性,分别利用可反映多种重金属元素对环境污染贡献程度的污染程度指数法和污染负荷指数法来评价研究区沉积物重金属的综合污染水平。其中,污染程度指数(C_d)的计算见文献^[11], $C_d < 8$ 、 $8 \leq C_d < 16$ 、 $16 \leq C_d < 32$ 、 $C_d \geq 32$ 分别表示轻度、中度、重度和严重污染;污染负荷指数(PLI)的计算见文献^[13],当 $PLI \leq 1$ 、 $1 < PLI \leq 2$ 、 $2 < PLI \leq 3$ 、 $PLI > 3$ 时分别表示无、轻度、中度和重度污染。

1.3.3 沉积物质量基准法

沉积物质量基准法(SQGs)是以临界效应浓度(TEL)和可能效应浓度(PEL)为评价指标的方法,已广泛应用于评估各类沉积物重金属对水体生物的毒害效应^[14]。当沉积物重金属含量小于 TEL 时,表

示对生物无影响;当沉积物重金属含量大于 PEL 时,表示对生物的毒害效应频繁发生;当沉积物重金属含量介于 TEL 和 PEL 之间时,则表示对生物的毒害效应偶尔发生^[15]。

1.4 重金属健康风险评价方法

采用美国国家环境保护署(USEPA)健康风险评价模型^[16],对黄河兰州段城市河道沿岸活动的成人和儿童进行健康风险评价。基于重金属元素的致癌性特征,健康风险评价模型分为致癌健康风险评价模型和非致癌健康风险评价模型,分别采用非致癌风险指数(HI)和致癌风险(CR)表征。若 $HI \leq 1$,认为不存在健康风险或风险较小;当 $1 < HI \leq 10$ 时,则存在非致癌健康风险;若 $HI > 10$,认为存在慢性中毒。若 $CR < 10^{-6}$,表明不存在致癌风险或风险较小;当 $10^{-6} \leq CR < 10^{-4}$ 时,表明是可接受的正常致癌风险;若 $CR \geq 10^{-4}$,表明存在较高的致癌风险。

1.5 数据统计分析与图件制作

采用 Excel 2019 进行数据的整理与分析,包括重金属的描述性统计、污染评价及健康风险评价计算。使用 ArcGIS 10.7 软件绘制研究区位置与采样点分布图,利用 Origin 2021 进行其他图件的绘制。

2 结果与讨论

2.1 重金属含量特征

黄河兰州段城市河道表层沉积物重金属含量统计结果如表 1 所示。

表 1 河道表层沉积物重金属描述性统计结果

Tab.1 Statistics of heavy metals in the urban river surface sediments $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

项目	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
最大值	443.20	172.70	210.00	166.00	13.60	1.73	1.840	111.20
最小值	20.42	7.53	15.20	37.70	6.82	0.08	0.009	5.95
平均值	306.60	115.71	23.84	58.63	9.03	0.70	0.090	55.90
标准差	74.83	32.10	28.20	19.70	1.77	0.23	0.160	14.85

沉积物中不同重金属的含量差异变化较大,与甘肃省土壤环境背景值相比,研究区沉积物中 8 种重金属含量超过其背景值的样点占比为: Pb(97.8%)>Cr(95.6%)=Ni(95.6%)=Cd(95.6%)>Hg(71.7%)>Zn(17.4%)>Cu(15.2%)>As(4.4%)。与

中国水系沉积物背景值^[17]相比,超过该背景值的样点占比为:Cr(97.8%)=Pb(97.8%)>Ni(95.6%)=Cd(95.6%)>Hg(39.0%)>As(37.0%)>Cu(34.8%)>Zn(23.9%)。相较于上地壳金属浓度^[18],研究区沉积物重金属Cr、Cd、As、Ni和Pb富集明显,分别是上地壳的8.76、7.00、6.02、5.79和2.80倍,其余元素富集不明显。以上特征表明研究区沉积物8种重金属存在不同程度的超标现象,以Cr、Ni、Cd和Pb的累积尤为显著。

研究区表层沉积物Cr、Ni、Cu、Zn、Cd和Pb等6种元素的含量均值均高于黄河下游尾间河段沉积物中相应元素含量均值^[19],特别是Cr、Ni和Pb含量均值高于5倍以上。与黄河上游甘肃段^[20]和青海段^[21]的沉积物重金属含量均值相比,均表现为Cr、Ni和Pb含量均值高,Cu、Zn和Cd含量均值低的现象。相较于黄河中下游河南段沉积物重金属的含量均值^[22],亦表现为研究区沉积物As、Cr、Ni和Pb的含量均值高,而Cu、Zn和Cd含量均值低的特征,说明研究区重金属As、Cr、Ni和Pb的富集受人类活动影响明显。变异系数(CV)是一种衡量重金属元素含量空间变异程度的统计量,可分为弱变异($CV < 20\%$)、中等变异($20\% \leq CV < 50\%$)、强变异($50\% \leq CV < 100\%$)和超强变异($CV \geq 100\%$)^[23]。经分析,研究区沉积物重金属变异程度由大到小依次为Hg(184%)、Cu(118%)、Zn(33%)、Cd(32%)、Ni(28%)、Pb(27%)、Cr(24%)和As(20%),即Cu和Hg呈现出强烈的空间变异性,而其余元素空间分布差异程度也较高。工业“三废”的排放和煤炭化石燃料的燃烧是造成Cu和Hg污染的重要原因^[24],研究区沉积物重金属空间变异性大小极有可能与沿岸景区商业化程度和沿线工业企业“三废”排放等点源污染大小有关^[2,4]。

此外,沉积物重金属空间变化除了受河道宽度变化影响之外,还受到沿岸交通活动、生活污水和工业废水排放的影响^[2]。这与开封城市河流表层沉积物重金属元素沿河空间分布变化特征的影响因素相一致^[25]。同处西北干旱-半干旱区且同纬度的湟水河流域西宁段表层沉积物Hg、Cr、Cu、Zn、Cd五种重金属含量空间变化也与沿岸分布的制造业、养殖业和化工厂废水的排放有关^[26]。总体而言,除河流水动力强弱引起重金属在沉积物表层蓄积量的差异之外,城市河流沿岸人类活动的类型和强度在

空间分布上的不同决定了城市河道表层沉积物重金属含量的差异。

2.2 重金属污染评价

2.2.1 污染因子指数评价

黄河兰州段城市河道表层沉积物重金属CF的平均值排序为:Cr>Ni>Cd>As>Pb>Zn>Hg>Cu(见图2)。其中,Cu、Zn和Hg总体上处于轻度-中度污染状态,但仍有4.4%的采样点Hg分别为重度和严重污染。虽然As、Cd和Pb的CF平均值分别为4.76、5.35和3.72,属于重度污染,但仍有10.9%、23.9%和4.4%的研究点达到了严重污染等级。此外,所有样点的Cr和超过90%样点的Ni处于严重污染状态。总体而言,除了Cu、Zn和Hg的污染程度相对较轻外,Cr、Ni、As、Cd和Pb的污染较为严重,特别是Cr、Ni和Cd污染。

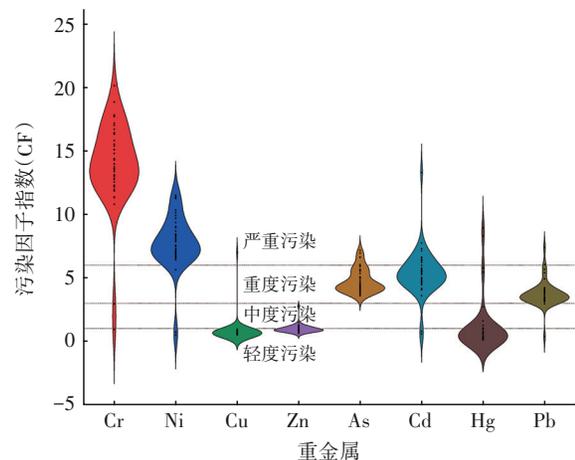


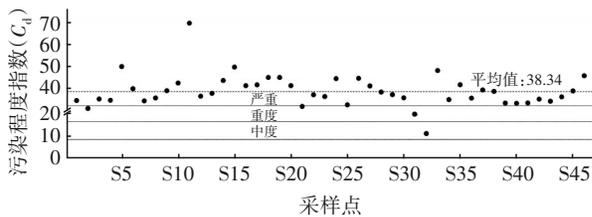
图2 河道表层沉积物重金属污染因子指数评价结果
Fig.2 CF for evaluating heavy metals in the urban river surface sediments

已有研究表明,研究区沉积物重金属Cr、Ni和Cd主要受工业“三废”的排放、农药化肥的施用、交通运输及生活和商业废水等人类活动的影响^[2,5]。西固段、安宁段、七里河段和城关段分布有众多工业企业^[4],而上游的西宁和永登等地在农业生产过程中施用农药化肥^[8]。特别是近年来黄河兰州段沿岸两侧客运码头星罗棋布,水上巴士交通航行繁忙,旅游观光的黄河风情线商业化程度日益加剧。随着工业废水、农田废水和生活污水流向黄河,强烈的人类活动势必引起河道沉积物中Cr、Ni和Cd的富集超标,并对城市河道生物产生毒害效应。此外,研究区地处黄土高原,植被覆盖率低,黄土比较

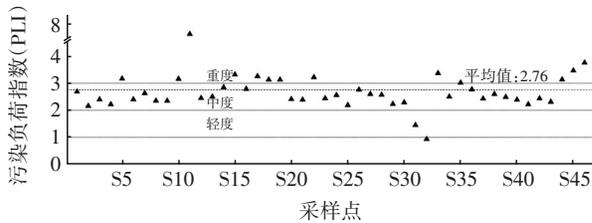
疏松但富含 Cr 元素,土壤侵蚀将大量淤积泥沙搬运至黄河沉积物中,进一步加剧了 Cr 的富集。

2.2.2 污染程度指数和污染负荷指数评价

黄河兰州段城市河道表层沉积物重金属 C_d 值分布于 10.66~69.22 之间,平均值为 38.34,属于严重污染,见图 3(a)。从整个研究样点来看,河道沉积物总体上处于严重-重度污染状态,重金属污染风险程度较高。从各研究点位而言,分别有 91.3% 和 6.5% 的研究样点 C_d 值介于 32.41~69.22 和 19.36~31.67 之间,对应于严重污染和重度污染等级。其中样点 S11 和 S33 的 C_d 值最大,分别为 69.22 和 51.59,表现为严重污染特征,而样点 S32 的 C_d 值最小,为 10.66,处于中度污染状态。



a. 污染程度指数评价结果



b. 污染负荷指数评价结果

图 3 研究区河道表层沉积物重金属污染程度指数与污染负荷指数

Fig.3 C_d and PLI for evaluating heavy metals in the urban river surface sediments

如图 3(b)所示,污染负荷指数评价结果与污染程度指数评价结果基本一致,PLI 值介于 0.93~7.63 之间,平均值为 2.76,为中度污染。基于 PLI 值的污染等级划分标准可知,分别有 67.4% 和 28.2% 的研究样点处于中度和重度污染状态,仅有 2.2% 的样点为轻度污染和无污染。具体而言,S11 和 S46 的 PLI 值最大,分别为 7.63 和 4.50,表现为重度污染特征,而 S32 的 PLI 值最小,为 0.93,处于清洁状态。

综上所述,河道沉积物重金属污染风险程度较高,特别是在水动力较弱的河道拐弯(S46)或由窄变宽处(S11)污染较为严重。这是由于其径流量较小,污染物易沉积,而在河道平直水域,水流较快,

污染物不易沉积。其他污染相对较为严重的水域,则与沿岸分布有商业化园区、入河排污口、码头和工业企业等有关。例如,S11、S44、S45 和 S46 附近设有城市生活排水口和排污口,S5、S15 和 S33 周边为银滩湿地公园、金牛街码头和中山桥商业区。频繁的人类活动导致重金属来源丰富,引起累积总量超过水体自净能力,致使污染产生。因此,在推进城市化进程中需进一步强化绿色发展理念,合理规划沿岸商业布局,严格控制入河污染物排放,对减缓河道沉积物重金属污染至关重要。

2.2.3 沉积物质量基准法评价

表层沉积物质量评价结果显示,分别有 97.8%、97.8% 和 89.1% 的研究样点沉积物 Cu、Zn 和 Hg 含量低于 TEL,表现为低毒性状态,对河道生物无有害影响(见图 4)。同时,所有样点的 As 及 95.6% 和 82.6% 的研究样点 Pb 和 Cd 含量高于 TEL,却低于 PEL,表现为轻度毒性水平,说明这些重金属偶尔会对河道生物产生毒性效应,存在一定的生态风险。此外,还有 95.6% 的研究样点沉积物 Cr 和 Ni 含量高于 PEL,表现为高毒性特征,说明这两种元素会频繁对河道生物产生毒性效应,存在生态风险。

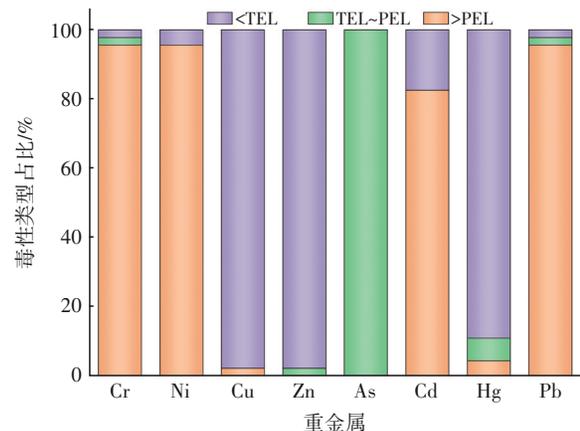


图 4 河道表层沉积物重金属污染程度指数

Fig.4 PLI for evaluating heavy metals in the urban river surface sediments

沉积物质量评价结果与污染因子指数评价结果相一致,即黄河兰州段城市河道表层沉积物的主要污染元素为 Cr 和 Ni,对河道生态环境具有危害性。As、Pb 和 Cd 存在一定的潜在生态风险,而 Cu、Zn 和 Hg 几乎无明显毒性效应。因此,需要密切关注 Cr 和 Ni 对城市河道生物产生的毒害效应。

2.3 重金属健康风险评价

沉积物重金属经手口摄入和皮肤接触的暴露途径下对成人和儿童的非致癌健康风险评价结果见表 2。从暴露途径来看,单个重金属对成人和儿童的非致癌日均暴露量均表现为:手口摄入>皮肤接触,表明手口摄入是非致癌重金属暴露风险的主要途径。从重金属非致癌健康风险概率角度而言,在手口摄入的暴露途径下,各重金属对成人和儿童的非致癌风险商(HQ)均表现为:Pb>As>Ni>Cd>Cu>Hg>Cr>Zn;在皮肤接触的暴露途径下,对成人和儿童的非致癌风险商(HQ)均表现为:Pb>As>Cd>Ni>Hg>Cu>Zn>Cr。对综合非致癌健康风险指数(HI)而言,不同重金属而对成人和儿童的非致癌健康风险排序为:Pb>As>Ni>Cd>Cu>Hg>Cr>Zn。这表明 Pb 是导致沉积物非致癌健康风险的首要元素。此外,成人和儿童的非致癌 HQ 和 HI 均小于风险阈值 1,说明黄河兰州段城市河道表层沉积物重金属对人体健康尚不存在非致癌风险。

表 2 研究区沉积物重金属的非致癌健康风险评价

Tab.2 Non-carcinogenic health risk assessment of heavy metals from the surface sediments

重金属	HQ _{手口}		HQ _{皮肤}		HI	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
Cr	3.19×10 ⁻⁴	2.61×10 ⁻³	1.01×10 ⁻¹⁰	6.59×10 ⁻¹⁰	3.19×10 ⁻⁴	2.61×10 ⁻³
Ni	9.04×10 ⁻³	7.04×10 ⁻²	1.17×10 ⁻⁴	7.67×10 ⁻⁴	9.16×10 ⁻³	7.48×10 ⁻²
Cu	9.31×10 ⁻⁴	7.62×10 ⁻³	1.09×10 ⁻⁵	7.11×10 ⁻⁵	9.42×10 ⁻⁴	7.69×10 ⁻³
Zn	3.05×10 ⁻⁴	2.50×10 ⁻³	5.34×10 ⁻⁶	3.50×10 ⁻⁵	3.10×10 ⁻⁴	2.54×10 ⁻³
As	4.70×10 ⁻²	3.85×10 ⁻¹	4.01×10 ⁻⁴	2.63×10 ⁻³	4.74×10 ⁻²	3.88×10 ⁻¹
Cd	1.09×10 ⁻³	8.90×10 ⁻³	3.80×10 ⁻⁴	2.49×10 ⁻³	1.47×10 ⁻³	1.14×10 ⁻²
Hg	4.51×10 ⁻⁴	3.69×10 ⁻³	2.26×10 ⁻⁵	1.48×10 ⁻⁴	4.74×10 ⁻⁴	3.84×10 ⁻³
Pb	6.24×10 ⁻²	5.11×10 ⁻¹	5.82×10 ⁻⁴	3.81×10 ⁻³	6.30×10 ⁻²	5.15×10 ⁻¹

从暴露途径来看,手口摄入仍是研究区致癌重金属暴露风险的主要途径(见表 3)。从重金属致癌健康风险概率角度而言,成人和儿童的致癌风险(CR)值均小于 10⁻⁴,对人体存在可接受的致癌风

险;致癌元素经手口摄入和皮肤接触途径下对成人和儿童的危害程度大小分别为:As>Pb>Cd 和 As>Cd,表明 As 是引起致癌健康风险的主要因子。从综合致癌风险系数(TCR)来看,儿童和成人的 TCR 平均值分别为 2.55×10⁻⁶和 6.28×10⁻⁶,表明研究区沉积物重金属对人体存在可接受的致癌风险。

表 3 研究区沉积物重金属的致癌健康风险评价

Tab.3 Carcinogenic health risk assessment of heavy metals from the surface sediments

重金属	CR _{手口}		CR _{皮肤}		TCR	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
As	6.04×10 ⁻⁶	1.48×10 ⁻⁵	3.85×10 ⁻⁹	8.83×10 ⁻⁸	6.04×10 ⁻⁶	1.49×10 ⁻⁵
Cd	5.59×10 ⁻⁷	1.37×10 ⁻⁶	2.86×10 ⁻⁹	5.62×10 ⁻⁹	5.62×10 ⁻⁷	1.38×10 ⁻⁶
Pb	1.05×10 ⁻⁶	2.57×10 ⁻⁶	—	—	1.05×10 ⁻⁶	2.57×10 ⁻⁶

综上可知,研究区沉积物重金属虽然总体上对成人和儿童不存在非致癌和致癌健康风险,但由于儿童身体各组织器官尚处于发育阶段,免疫力较低以及其独特的行为方式对单位质量污染物的作用更为敏感,更容易接触到沉积物重金属的污染,尤其是在河边玩耍和嬉戏过程中更容易摄入含重金属的沉积物微粒而增加暴露风险。所以,在手口摄入和皮肤接触的暴露途径下,沉积物重金属对成人和儿童的非致癌 HQ 和 HI 及 CR 和 TCR 均表现为儿童高于成人,这也与前人研究结果相一致^[27]。此外,特别值得注意的是 Pb 和 As 分别是研究区引起沉积物非致癌和致癌健康风险的首要元素,然而 Pb 和 As 并非是沉积物主要的重金属污染元素。这或与重金属污染的滞后性和隐蔽性有关,已有研究证实黄河水灌溉的兰州市耕地表层土壤 As 对成人和儿童有致癌健康风险^[9]。因此,相关部门还需加强对河道沿岸可能污染物排放的监管与修复,对沉积物重金属复合污染可能引起的人体健康进行预先管控。

3 结论

① 研究区表层沉积物重金属除 Zn、Cu 和 As 之外,Pb、Cr、Ni、Cd 和 Hg 的平均含量均高于甘肃省土壤环境背景值和中国水系沉积物背景值。沉积物中 8 种重金属均存在不同程度的超标现象,且含量空间差异较为显著。

② 污染因子指数、污染程度指数和污染负荷

指数分析表明,研究区沉积物重金属污染以 Cr、Ni 和 Cd 为主,其次是 As 和 Pb, Cu、Zn 和 Hg 的污染程度相对较轻。沉积物质量基准法进一步印证了污染指数评价结果,研究区需重点关注 Cr 和 Ni 对城市河道生物产生的毒害效应。

③ 沉积物 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg 和 Pb 对成人和儿童的 HQ 和 HI 值均小于 1,不存在非致癌健康风险。As、Cd 和 Pb 对成人和儿童的 CR 值和 TCR 平均值均小于 10^{-4} ,存在可接受的致癌风险。此外,儿童的非致癌和致癌风险均高于成人。因此,儿童在河岸边活动时,需注意沉积物污染物的防范。

参考文献:

- [1] 胡明,薛娇,严玉林,等.北京市特征河流沉积物重金属污染评价与来源解析[J].中国给水排水,2021,37(23):73-81.
HU Ming, XUE Jiao, YAN Yulin, *et al.* Assessment and trace back to source of heavy metal pollution in typical river sediments in Beijing [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(23): 73-81 (in Chinese).
- [2] 李军,李旭,李开明,等.黄河兰州段城市河道表层沉积物重金属空间分布特征及来源解析[J].环境科学,2023,44(5):155-166.
LI Jun, LI Xu, LI Kaiming, *et al.* Spatial distribution characteristics and source analysis of heavy metals in urban river surface sediments from the Lanzhou reach of the Yellow River [J]. Environmental Science, 2023, 44(5): 155-166 (in Chinese).
- [3] VAROL M, KARAKAYA G, SÜNBÜL M R. Spatiotemporal variations, health risks, pollution status and possible sources of dissolved trace metals in the Karasu River, Turkey [J]. Environmental Research, 2021, 202: 111733.
- [4] 李雪迎,杨曦,乔琦,等.黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征[J].环境科学,2022,43(5):2459-2466.
LI Xueying, YANG Xi, QIAO Qi, *et al.* Emission characteristics of industrial water pollutants in Gansu section of the Yellow River basin [J]. Environmental Science, 2022, 43(5): 2459-2466 (in Chinese).
- [5] 赵夏婷,李珊,王兆炜,等.黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析[J].环境科学,2018,39(9):4105-4113.
ZHAO Xiating, LI Shan, WANG Zhaowei, *et al.* Composition, spatial distribution characteristics and source analysis of chromophoric dissolved organic matter in the Lanzhou reach of the Yellow River [J]. Environmental Science, 2018, 39(9): 4105-4113 (in Chinese).
- [6] 解伟峰,李家科,李莹,等.黄河流域水体沉积物中新兴污染物研究进展[J].环境科学与技术,2022,45(1):227-236.
XIE Weifeng, LI Jiake, LI Ying, *et al.* Research progress of emerging pollutants in sediments of the Yellow River basin [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 45(1): 227-236 (in Chinese).
- [7] 陈召松,安蓓,王子旺,等.黄河兰州段鱼类多样性与保护[J].生物多样性,2021,29(12):1658-1672.
CHEN Zhaosong, AN Bei, WANG Ziwan, *et al.* Fish diversity and conservation in the Lanzhou reach of the Yellow River [J]. Biodiversity Science, 2021, 29(12): 1658-1672 (in Chinese).
- [8] CHAI L, WANG Y H, WANG X, *et al.* Pollution characteristics, spatial distributions, and source apportionment of heavy metals in cultivated soil in Lanzhou, China [J]. Ecological Indicators, 2021, 125: 107507.
- [9] 张利瑞,彭鑫波,马延龙,等.兰州市耕地“五毒”重金属的风险评价与归因分析[J].环境科学,2022,43(9):4767-4778.
ZHANG Lirui, PENG Xinbo, MA Yanlong, *et al.* Risk assessment and attribution analysis of “five toxic” heavy metals in cultivated land in Lanzhou [J]. Environmental Science, 2022, 43(9): 4767-4778 (in Chinese).
- [10] 李莹,李家科,解伟峰,等.黄河流域沉积物重金属污染评估及源解析[J].环境科学与技术,2022,45(7):96-104.
LI Ying, LI Jiake, XIE Weifeng, *et al.* Assessment and source analysis of heavy metal pollution in sediments of the Yellow River basin [J]. Environmental Science, 2022, 45(7): 96-104 (in Chinese).
- [11] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [12] TUREKIAN K K, WEDEPOHL K H. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust [J]. Geological Society of America Bulletin, 1961, 72: 175-192.
- [13] 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: 566–572.
- [14] MACDONALD D D, CARR R S, CALDER F D, *et al.* Development and evaluation of sediment quality guidelines for Florida coastal waters [J]. *Ecotoxicology*, 1996, 5: 253–278.
- [15] 张杰, 郭西亚, 曾野, 等. 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估 [J]. *环境科学*, 2019, 40(5): 2202–2210.
ZHANG Jie, GUO Xiya, ZENG Ye, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in river sediments from Lake Taihu basin [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(5): 2202–2210 (in Chinese).
- [16] USEPA. Risk Assessment Guidance for Superfund. Human Health Evaluation Manual (Part A) [R]. Washington: Office of Emergency and Remedial Response, 1989.
- [17] 史长义, 梁萌, 冯斌. 中国水系沉积物39种元素系列背景值 [J]. *地球科学*, 2016, 41(2): 234–251.
SHI Changyi, LIANG Meng, FENG Bin. Average background values of 39 chemical elements in stream sediments of China [J]. *Earth Science*, 2016, 41(2): 234–251 (in Chinese).
- [18] ARMSTRONG R L, TAYLOR S R, TARNEY J. The composition and evolution of the continental crust: rare earth element evidence from sedimentary rocks: discussion [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 1981, 301: 398–399.
- [19] 黎静, 孙志高, 孙万龙, 等. 黄河尾闾河段和河口区沉积物中重金属污染及潜在生态毒性风险评价 [J]. *湿地科学*, 2018, 16(3): 407–416.
LI Jing, SUN Zhigao, SUN Wanlong, *et al.* Assessment of pollution and potential ecotoxicity risk for heavy metals in sediments in the tail reach and estuary of the Yellow River [J]. *Wetland Science*, 2018, 16(3): 407–416 (in Chinese).
- [20] SHANG Z, REN J, TAO L, *et al.* Assessment of heavy metals in surface sediments from Gansu section of Yellow River, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187: 79.
- [21] REN J, SHANG Z, TAO L, *et al.* Multivariate analysis and heavy metals pollution evaluation in Yellow River surface sediments [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2015, 24(3): 1041–1048.
- [22] YAN N, LIU W B, XIE H T, *et al.* Distribution and assessment of heavy metals in the surface sediment of Yellow River, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 39: 45–51.
- [23] NIU S P, GAO L M, WANG X. Characterization of contamination levels of heavy metals in agricultural soils using geochemical baseline concentrations [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(4): 1697–1707.
- [24] JIA X, FU T, HU B, *et al.* Identification of the potential risk areas for soil heavy metal pollution based on the source-sink theory [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 393: 122424.
- [25] 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 Hongtao, ZHANG Junhua, DING Shaofeng, *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 (in Chinese).
- [26] 徐双贵, 杨莎, 秦西伟, 等. 湟水河流域西宁段河流表层沉积物重金属空间分布及生态风险评估 [J]. *地球与环境*, 2021, 49(5): 561–569.
XU Shuangui, YANG Sha, QIN Xiwei, *et al.* Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments from Xining section of the Huangshui River basin [J]. *Earth and Environment*, 2021, 49(5): 561–569 (in Chinese).
- [27] HEIDARI M, DARIJANI T, ALIPOUR V. Heavy metal pollution of road dust in a city and its highly polluted suburb; quantitative source apportionment and source-specific ecological and health risk assessment [J]. *Chemosphere*, 2021, 273: 129656.

作者简介: 李军(1984–), 男, 甘肃瓜州人, 博士, 副教授, 主要研究方向为沉积物重金属污染与评价。

E-mail: lijunrock@126.com

收稿日期: 2023-03-09

修回日期: 2023-04-13

(编辑: 李德强)