

汉江上游水体表层沉积物重金属污染特征评价

宋凤敏, 岳晓丽, 刘智峰, 葛红光, 李琛, 赵佐平

引用本文:

宋凤敏, 岳晓丽, 刘智峰, 等. 汉江上游水体表层沉积物重金属污染特征评价[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1576–1584.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0143>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

夜郎湖表层沉积物重金属分布特征及生态风险评估

徐梦, 刘鸿雁, 罗凯, 崔俊丽, 刘艳萍, 李家飞

农业环境科学学报. 2017, 36(6): 1202–1209 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1179>

中山高平工业园区周边水体沉积物中重金属污染特征及生态风险评价

韩倩, 张丽娟, 胡国成, 于云江, 陈棉彪, 向明灯, 玉琳, 黄楚珊, 史亚丽

农业环境科学学报. 2015, 34(8): 1563–1568 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.08.019>

安庆沿江湖泊及长江安庆段沉积物重金属污染特征及生态风险评价

李法松, 韩铖, 林大松, 周葆华, 徐志兵, 余光明, 钮志远, 赵亿, 王淑媛

农业环境科学学报. 2017, 36(3): 574–582 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1325>

浙江姚江平原特大洪水滞留沉积物中重金属特征及磁诊断探讨

郑洁, 戴雪荣, 师育新, 吴紫阳, 席雅娟

农业环境科学学报. 2016(2): 364–371 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.02.022>

东北典型湖泊沉积物氮磷和重金属分布特征及其污染评价研究

刘丽娜, 马春子, 张靖天, 何卓识, 霍守亮, 席北斗

农业环境科学学报. 2018, 37(3): 520–529 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1131>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

宋凤敏, 岳晓丽, 刘智峰, 等. 汉江上游水体表层沉积物重金属污染特征评价[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1576–1584.

SONG Feng-min, YUE Xiao-li, LIU Zhi-feng, et al. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in surface sediments of the upper Hanjiang River, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(7): 1576–1584.



开放科学 OSID

汉江上游水体表层沉积物重金属污染特征评价

宋凤敏^{1,2}, 岳晓丽³, 刘智峰^{1,2}, 葛红光^{1,2}, 李琛^{1,2}, 赵佐平^{1,2}

(1. 陕西理工大学化学与环境科学学院, 陕西 汉中 723001; 2. 陕南秦巴山区生物资源综合开发协同创新中心, 陕西 汉中 723001; 3. 四川美术学院公共美术学院, 重庆 401331)

摘要: 为了探明汉江上游干流水体沉积物重金属污染特征及来源, 分析了汉江上游干流 33 个样点沉积物样品中 Cd、Pb、Cu、Zn、As、Cr 和 Ni 7 种重金属含量及分布特征, 并运用地累积指数法(I_{geo})和污染负荷指数法(PLI)评价沉积物中重金属的潜在生态风险。结果表明: 汉江上游干流水体表层沉积物中 Cd 含量超标较严重, 有 15 个样点含量超过土壤重金属的风险筛选值($0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 占总数的 45.45%, 其余 6 种金属: Cu、Zn、Pb、As、Cr 和 Ni 所有样点含量均低于风险筛选值。由地累积指数法和污染负荷指数法评价可知: Cd 是污染最严重的重金属, 达到极强污染水平, Cu、Ni 和 Cr 为中等污染水平, Pb、Zn 和 As 为无污染, 汉江上游沉积物重金属的综合污染指数为 0.79, 属于无污染等级。相关性分析和主成分分析表明, Cu、As 和 Cr 来源于本身岩石构成, Pb、Zn 和 Cd 主要来源于矿产开发和冶炼活动, Ni 的存在既有本身区域矿物质影响存在, 也有区域人为活动的贡献。汉江上游沉积物重金属总体生态污染风险较小, 但不能忽视 Cd 的潜在污染风险。

关键词: 沉积物; 重金属; 污染评价; 汉江上游

中图分类号: X824 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)07-1576-09 doi:10.11654/jaes.2020-0143

Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in surface sediments of the upper Hanjiang River, China

SONG Feng-min^{1,2}, YUE Xiao-li³, LIU Zhi-feng^{1,2}, GE Hong-guang^{1,2}, LI Chen^{1,2}, ZHAO Zuo-ping^{1,2}

(1. School of Chemistry and Environmental Science, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China; 2. Collaborative Innovation Center for Bioresource Comprehensive Development in the Qinling-Bashan Area, Hanzhong 723001, China; 3. School of Public Art, Sichuan Fine Arts Institute, Chongqing 401331, China)

Abstract: In order to investigate the pollution characteristics and sources of heavy metals, the concentrations and spatial variation characteristics of Cd, Pb, Cu, Zn, As, Cr, and Ni from 33 surface sediment samples of the upper Hanjiang River were discussed. Meanwhile, the potential ecological risks were evaluated using the geo-accumulation index(I_{geo}) and pollution load index(PLI). The results showed in the surface sediments Cd pollution was the most serious, with 15 sample points which were exceeded the risk screening values of heavy metals in soil, accounting for 45.45% of the total samples, while there were no sample points which exceeded the risk screening values for Pb, Cu, Zn, As, Cr and Ni. According to the I_{geo} , Cd was the most serious pollutant among the seven types of metals, reaching the high pollution level, followed by Cu, Ni, and Cr at medium pollution levels and Pb, Zn, and As at the pollution-free level. According to the PLI , the comprehensive pollution index of the heavy metals in the surface sediments of the upper Hanjiang River was 0.79, which belonged to the pollution-

收稿日期: 2020-02-10 录用日期: 2020-04-27

作者简介: 宋凤敏(1978—), 女, 陕西勉县人, 博士, 副教授, 主要从事土壤重金属污染研究。E-mail: sfm3297@163.com

基金项目: 陕西省自然科学基金面上项目(2018JM4028); 陕西省教育厅科研专项(18JK0171, 19JS012); 陕南秦巴山区生物资源综合开发协同创新中心项目(QBXT-Z(P)-18-2)

Project supported: The Key Science and Technology Program of Shaanxi Province, China(2018JM4028); The Scientific Research Foundation of the Education Department of Shaanxi Province(18JK0171, 19JS012); The Project of the Collaborative Innovation Centre of Shaanxi in China(QBXT-Z(P)-18-2)

free level. Correlation and principal component analyses indicated that As, Cu, and Cr mainly originated from natural sources; Pb, Zn, and Cd mainly originated from mineral exploitation activities and mineral-smelting sources; and Ni originated from a combination of these sources. There was a low ecological pollution risk of heavy metals in the surface sediments of the upper Hanjiang River, but the potential pollution risk of Cd cannot be ignored.

Keywords: sediment; heavy metal; pollution assessment; the upper Hanjiang River

重金属因在环境中不能降解且易生物蓄积而日益受到人们的重视和关注。重金属通过各种途径进入江河湖泊,由于其在水体中极易被颗粒物吸附而沉积于水体底质中,一般自然水体溶液中重金属含量很低,而在沉积物中浓度可高出水溶液中的数百倍,沉积物成为水体中重金属的蓄积库^[1-2]。水体中的重金属往往将沉积物作为最终的储存库和归宿,并且可与水相保持一定的动态平衡^[3]。当水环境条件变化时,蓄积在沉积物中的重金属通过生物转化或解吸而进入水溶液中,造成水体污染,还可能通过饮水或食物进入人体,危害人体健康。因此对水体沉积物中重金属的污染评价和污染来源解析及其迁移转化规律进行研究,具有重要的理论和现实意义,水体沉积物中重金属的研究也成为近年来水体环境污染问题研究的热点。

近年来,国内外学者采用不同的分析方法对江河、湖泊沉积物中重金属的分布及其来源做了探讨。Štěpánka等^[4]对捷克境内主要河流沉积物中重金属的分布特征进行了讨论分析。朱青青等^[5]对中国主要水系沉积物中重金属分布特征做了较全面分析阐述。Xu等^[6]对中国南部山区主要河流沉积物中重金属的污染特征及其来源做了分析探讨。Wang等^[7]对西江流域中上游沉积物中重金属污染做了生态风险评价。大批学者集中对长江不同段沉积物中重金属进行分析,翟婉盈等^[8]对采集的长江干流上、中、下游人口分布密集城市段长江沉积物样品进行了重金属进行分析,其他多位学者^[9-14]对长江的几大支流如赣江、湘江、岷江、沱江等水体沉积物中重金属污染分析均有相应的报道。

汉江作为长江最大的支流,因其上游水量充沛、水质较好,作为南水北调中线水源地,同时也是陕西省“引汉济渭”工程的水源地,在国家及省市饮水安全和生态可持续发展方面起着非常重要的作用。近年来关于汉江流域的生态环境保护以及水质评价的报道较多^[15-17],而对于汉江上游水体沉积物中重金属的研究报道却很少,仅赵佐平^[18]对汉江流域汉中段水体沉积物重金属状况做了分析,但是仅选取了4个样

点,且所测试重金属种类较少,无法系统全面代表汉江上游水体沉积物的重金属分布现状。

本研究通过对汉江上游干流近岸表层沉积物的重金属污染状况调查,分析7种重金属(Cu、Zn、Ni、Pb、Cd、Cr、As)在汉江上游沉积物中的分布,评价了汉江上游水体沉积物中重金属特征和生态风险,并利用主成分分析和相关性分析解析了沉积物中重金属的来源,旨在明确汉江上游水体沉积物重金属的污染现状,为确保汉江上游水质质量提供基础资料和理论研究基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

汉江发源于陕西汉中盆地西端的潘冢山,于湖北武汉汇入长江,整个流域位于30°08′~34°11′N、106°12′~114°14′E,流域涉及鄂、陕、豫、川、渝、甘6省市的20个地(市)区、78个县(市),干流河道全长1577 km,流域面积 $1.59 \times 10^5 \text{ km}^2$,其中湖北丹江口水库以上到汉江源头为汉江上游地区。在陕西省境内,汉江基本上自西向东流,干流从陕西安康市的潘冢山,自西而东流经勉县、汉中市、城固县、洋县、石泉县、汉阴县、紫阳县、安康市汉滨区、旬阳县,于白河县进入湖北省。本研究区域为汉江源头陕西省宁强县至丹江口水库的汉江上游干流区域。

1.2 样品的采集

本研究样品采集集中于2018年9月,从汉江源头宁强县潘冢山沿着干流向下到湖北省丹江口水库结束,选取已有国控监测断面和河流经过的人口密集区域,以及具有代表性的排污口附近的断面,采集近岸表层(0~10 cm)沉积物,同一采样断面取3个等量样混合而成,约1~2 kg。样品用聚乙烯塑料袋盛装,封口以防止污染,带回实验室低温保存。共采集沉积物样33个,其中除西乡县牧马河样点(10号样点)为支流样点外,其余均为汉江干流样点,陕西汉中及其县区境内分布样点为1~21号样点,安康市及其县区境内分布样点为22~29号,湖北省境内分布样点为30~33号样点。具体样点分布见图1。

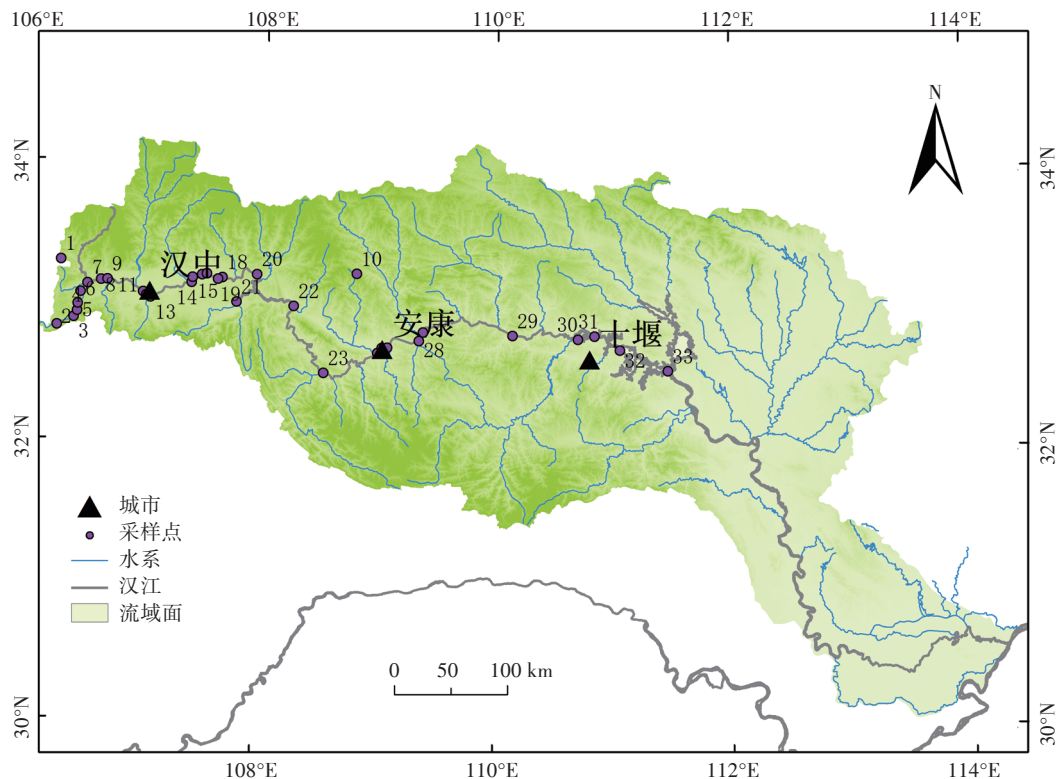


图1 汉江上游沉积物采样点

Figure 1 Sampling sections of sediment in the upstream of Hanjiang River

1.3 样品分析与数理统计

1.3.1 样品处理及测定

沉积物样品经自然风干后去除各种杂质,再经研磨处理后过100目(0.149 mm)尼龙筛,分装于塑料袋中密封以待测。

样品重金属测定:样品经 $\text{HNO}_3\text{--HClO}_4\text{--HF}$ 消解后,消解液中Cd和Pb采用石墨炉原子吸收分光光度计法测定(岛津,6900,日本),Ni、Cr、Cu、Zn和As采用电感耦合等离子体原子发射质谱仪(PE, ICP-MS, NexION 2000B, 美国)测定。为保证分析的准确性,分析过程以国家土壤一级标准物质GSS-7、GSS-11、GSS-13、GSS-15和GSS-28为质控标样,试验每个样品设置3个平行样,平行分析误差 $<5\%$,取平均值为结果。

1.3.2 数据处理与分析

用Excel 2017、Origin 8.5、SPSS 20等软件进行统计分析作图。应用地累积指数法和污染负荷指数法来分析汉江上游干流水体表层沉积物的重金属污染状况,通过相关性分析和主成分分析初步解析沉积物中重金属的来源。

地累积指数法(I_{geo})是评价沉积物污染状况最常

用的方法,本文使用传统的地累积指数法与刘子赫等^[19]提出的改进的地累积指数法综合对比评价沉积物中重金属,传统的地累积指数法用公式(1)直接计算出每个样点的地累积指数,改进的方法将所有样点中最大浓度与浓度平均值以内梅罗指数法引入地累积指数法公式中[公式(2)、公式(3)、公式(4)],总体评价每种重金属在整个区域的污染状况。

$$I_{\text{geo}} = \log_2(C_i/1.5B_i) \quad (1)$$

$$P_{\text{ave}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_i/1.5B_i) \quad (2)$$

$$P_{\text{max}} = C_{\text{max}}/1.5B_i \quad (3)$$

$$I_{\text{ngeo}} = \log_2 \sqrt{(P_{\text{ave}}^2 + P_{\text{max}}^2)/2} \quad (4)$$

式中: C_i 为重金属元素含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; B_i 为重金属元素背景值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,在本研究中分别取陕西省土壤重金属背景值^[20]和湖北省土壤重金属背景值,根据采样点所处的位置确定; P_{ave} 为 n 个采样点重金属浓度变化指数的平均值; P_{max} 为浓度最大的采样点重金属浓度变化指数; C_{max} 为重金属浓度最大值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; I_{geo} 为常规地累积指数, I_{ngeo} 为改进地累积指数。污染程度分级沿用传统方法,见表1。

污染负荷指数法(Pollution load index, PLI)是一

表1 沉积物中重金属的地累积指数与污染负荷指数
污染程度分类

Table 1 Contamination level of sediment by heavy metals
classified based on I_{geo} and PLI

项目 Item	污染系数范围 The range of pollution index	污染程度 The rank of pollution
I_{geo}	$I_{geo} < 0$	无污染
	$0 \leq I_{geo} < 1$	无-中污染
	$1 \leq I_{geo} < 2$	中污染
	$2 \leq I_{geo} < 3$	中-强污染
	$3 \leq I_{geo} < 4$	强污染
	$4 \leq I_{geo} < 5$	强-极强污染
PLI	$I_{geo} \geq 5$	极强污染
	$PLI \leq 1$	无污染
	$1 < PLI \leq 2$	中等污染
	$2 < PLI \leq 5$	强污染
	$PLI > 5$	极强污染

种比较全面综合的区域污染评价方法,能够比较直观地反映各金属对于污染的贡献权重^[21-22]。具体如公式(5)、公式(6)、公式(7):

$$PI_i = C_i / B_i \quad (5)$$

$$PLI_{\text{sample}} = (PI_1 \times PI_2 \times PI_3 \times \dots \times PI_n)^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

$$PLI_{\text{zone}} = (PLI_1 \times PLI_2 \times PLI_3 \times \dots \times PLI_m)^{\frac{1}{m}} \quad (7)$$

式中: C_i 、 B_i 与公式(1)相同; n 为被测元素的数量; m 为样点数; PLI_{sample} 为单个样点污染指数; PLI_{zone} 为区域污染指数。 PLI 污染级别分类见表1。

相关性分析和主成分分析都是基础的数学分析方法。相关性分析是指对两个或多个具备相关性的变量元素进行分析,从而衡量两个变量因素的相关密切程度。本研究通过相关性分析呈现7种重金属间相关程度,来说明其来源的关系,相关性越强说明来源越近。主成分分析是将多个变量通过线性变换以

选出较少个数重要变量的一种多元统计分析方法。本研究通过主成分分析进一步对重金属的污染来源进行确定。

2 结果与讨论

2.1 汉江上游干流水体沉积物中重金属分布特征分析

将汉江上游33个表层沉积物样品中的重金属含量与我国《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)^[23]中重金属的风险筛选值和风险管控值(取 $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$,其他)对比(表2),可以看出: Cd含量超过重金属风险筛选值($0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的样点有15个,占总数的45.45%,平均含量为 $0.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,和风险筛选值基本持平,最大值 $0.89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,在10号样点,是唯一支流样点——西乡牧马河点。该样点在西乡县城附近,受人为影响较严重。所有样点Cd含量均未超过重金属的风险管制值($3.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。其余6种金属Cu、Zn、Pb、As、Cr和Ni的浓度范围分别为12.45~74.81、29.98~77.24、2.59~27.66、3.99~8.16、5.81~127.92、16.17~73.18 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均未超过土壤风险筛选值。7种金属含量的变异系数(CV)大小顺序为Cr(78.87%)>Cd(70.05%)>Pb(58.0%)>Cu(48.26%)>Ni(44.92%)>Zn(15.63%)>As(9.61%)。Zn和As的CV较小,<20%,变异性低,说明其来源的一致性,Cu和Ni的CV在20%~50%之间,变异性中等,而Cr、Cd和Pb的CV较大,均大于50%,变异性高,说明其来源复杂且人为来源高于自然来源^[24]。

为了全面了解汉江上游干流沉积物中重金属污染状况,将本研究结果与长江干流及其7条主要支流沉积物中重金属的含量进行对比(表3)。由表3可以看出,湘江水体沉积物中Cu、Pb和As的含量在长江

表2 沉积物中重金属总量分析结果统计($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 2 The statistics of results of heavy metals in surface sediments of the upstream of Hanjiang River($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

元素 Elements	沉积物样品($n=33$) Sediment Samples					当地土壤重金属背景值 Local soil background		GB 15618—2018	
	最大值 Max	最小值 Min	均值 Avery	标准差 SD	变异系数 CV/%	陕西省 Shaanxi	湖北省 Hubei	筛选值 Screening values	管制值 Control values
Cu	74.81	12.45	28.64	13.82	48.26	20.4	23.4	100	—
Pb	27.66	2.59	7.47	4.33	58.00	21.2	26.7	120	200
Cd	0.89	0.05	0.31	0.22	70.05	0.1	0.1	0.3	3.0
Zn	77.24	29.98	62.12	9.71	15.63	68.0	71.8	250	—
Ni	73.18	16.17	38.51	17.30	44.92	28.6	30.5	100	—
As	8.16	3.99	6.39	0.61	9.61	11.1	12.3	30	120
Cr	127.92	5.81	29.25	23.39	78.87	51.9	66.9	200	1 000

表3 长江及主要支流河流表层沉积物重金属浓度对比(mg·kg⁻¹)

Table 3 Comparison of heavy metals in surface sediments from Yangtze River and its major tributaries(mg·kg⁻¹)

河流 Rivers	水体沉积物中重金属含量 Concentrations of heavy metals in sediments							数据来源 Data source
	Cu	Pb	Cd	Zn	Cr	Ni	As	
赣江	29.51	22.33	2.34	22.09	20.20	—	11.67	[9]
湘江	79.54	212.63	29.32	472.21	74.09	—	89.70	[10]
乌江	66.49	75.46	0.89	112.71	105.02	43.99	9.99	[11]
沅江	75.09	159.00	4.07	485.80	93.43	51.75	—	[12]
沱江	23.60	42.85	0.36	71.90	86.15	23.40	10.34	[13]
岷江	16.44	41.52	39.94	35.04	26.61	—	0.95	[14]
嘉陵江	20.32	18.59	0.25	55.91	47.32	23.58	7.12	[25]
长江	23	27	0.25	78	85	33	7.6	[25]
全国水系沉积物重金属平均值	21	25	0.13	68	58	—	9.1	[26]
汉江	28.64	7.47	0.31	62.12	29.65	38.51	6.40	本研究

注:—表示未有明确报道。
Note: —indicates no data.

干流和7条支流中均处于最高,Cd的含量(29.32 mg·kg⁻¹)仅低于浓度最高的岷江(39.94 mg·kg⁻¹),原因在于湘江流经区域的铅锌矿开采活动频繁^[10]。Cr(105.02 mg·kg⁻¹)在乌江沉积物中含量最高,Zn和Ni在沅江中含量最高,为485.80 mg·kg⁻¹和51.75 mg·kg⁻¹。本研究区域的汉江上游干流沉积物中重金属的平均含量均低于长江其他主要支流沉积物中的最高含量。但Cu(28.64 mg·kg⁻¹)、Ni(38.51 mg·kg⁻¹)和Cd(0.31 mg·kg⁻¹)的含量高于长江干流中Cu(23 mg·kg⁻¹)、Ni(33 mg·kg⁻¹)和Cd(0.25 mg·kg⁻¹)的浓度,同时Cu和Cd的平均浓度还高于全国水系沉积物重金属的平均值。

2.2 汉江上游干流水体沉积物中重金属污染风险评价
2.2.1 地累积指数法评价

采用两种地累积指数法对汉江上游干流7种重金属元素进行污染程度评价,评价统计结果见表4。可以看出,两种方法对于全部样点沉积物中Pb、Zn和As的评价结果相同,每个样点的地累积指数均小于0,为0级,无污染;Cr有1个异常样点污染等级为1级,其余样点均为0级,改进后的指数大于0,为0.18,属于1级,为无-中污染,Ni有9个样点污染等级为1级,占总样点数的27.27%,为无-中污染,剩余的24个样点均无污染,而改进的指数显示为0.80,为1级无-中污染等级;Cu有10个样点污染等级达到1级,为无-中污染,占总样点数的30.30%,剩余的23个样点均无污染,但改进指数为1.19,为2级中污染程度;Cd仅有5个样点地累积指数小于0,占总样点数的15.15%,16个样点达到1级,处于无-中污染程度数,8

个样点达到2级,处于中污染程度,有4个样点达到3级,具有中-强污染程度,改进指数为4.71,为5级,达到强-极强污染程度,这个评价结果与金属总量分布特征接近,呈现为总量超出标准值越多,污染样点越多,样点污染等级越高,污染越严重。同时比较两种地累积指数法,会发现改进后的地累积指数中,污染严重的元素整体权重会偏高,从而从整体上评价了某种元素对于整个研究区的污染状况,而传统的地累积指数法是将每个样点的污染状况体现出来。两种方法单独使用各有利弊,而将其结合应用可以对污染元素对于每个样点以及整个研究区的状态进行总体评价,是一种较好的评价方法。总体来看沉积物中Cd污染最为严重,其次是Cu、Ni和Cr,其余3种重金属无污染。

2.2.2 污染负荷指数法评价

污染负荷指数法可以直观反映重金属在不同区域的污染贡献程度。由图2可知,汉江上游干流33个样点中,仅有9个样点为中等污染,占总采样点的27.27%;剩余的24个样点PLI_{sample}值均小于1,为无污染点。在中等污染样点中,污染指数最高的点是2号样点,位于汉江源干流流经宁强县城外,其次是27号样点,位于旬阳吕河与汉江河交汇处,其余几个中污染的样点分别是6、10、12、21、23、25、26,这些样点均位于人为活动比较频繁的城镇周围,说明人为活动对水体沉积物重金属污染影响很大。

将污染指数公式套用在每个金属元素中,得到每个元素在整个研究区域的污染指数,以及整个汉江上游水体沉积物中重金属污染指数,如图3。由图可

表4 汉江上游沉积物中重金属的地累积污染等级统计

Table 4 The geo-accumulation index of heavy metals in surface sediment of the upstream of Hanjiang River

元素 Elements	原地累积指数统计 The statistics of initial geo-accumulation index							改进的地累积指数 The statistics of improved geo-accumulation index	
	最大值 Max	最小值 Min	均值 Mean	不同污染等级样点个数 Number of samples				I_{geo}	污染等级
				0级(<0)	1级(0~1)	2级(1~2)	3级(2~3)		
Cu	0.96	-1.74	-0.30	23	10	0	0	1.19	2级(中污染)
Pb	-0.69	-3.85	-2.34	33	0	0	0	-2.19	0级(无污染)
Cd	2.78	-1.43	0.82	5	16	8	4	4.71	5级(强-极强污染)
Zn	-0.40	-1.93	-0.77	33	0	0	0	-1.10	0级(无污染)
Ni	0.77	-3.77	-0.66	24	9	0	0	0.80	1级(无-中污染)
As	-1.03	-2.06	-1.42	33	0	0	0	-2.38	0级(无污染)
Cr	0.56	-4.97	-2.12	32	1	0	0	0.18	1级(无-中污染)

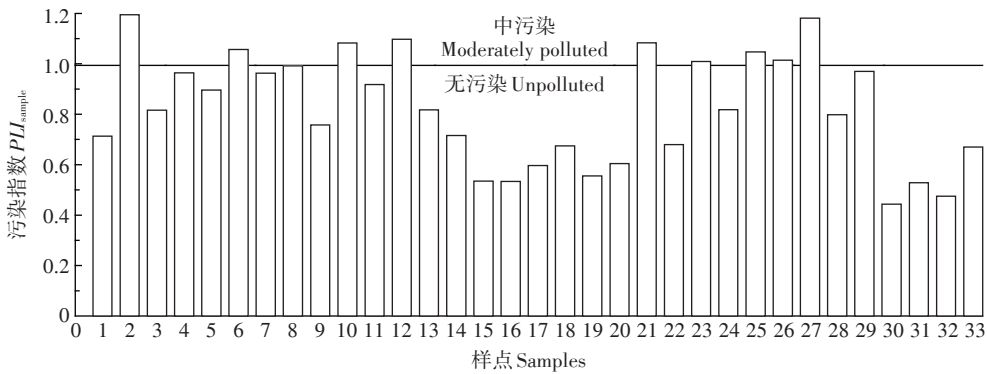


图2 汉江上游各样点沉积物中重金属污染负荷指数

Figure 2 PLI_{sample} of heavy metals in surface sediment of the upstream Hanjiang River

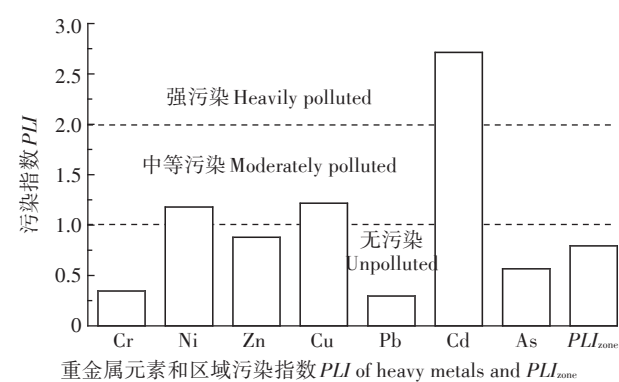


图3 汉江上游沉积物重金属元素污染负荷指数与区域污染指数

Figure 3 Pollution load index of heavy metals in surface sediments and the regional pollution index of upstream of Hanjiang River

知,Cd在整个区域的综合污染指数最大,为2.71,达到强污染,其次是Cu为1.22,Ni为1.18,均为中等污染程度,其余4种重金属污染指数均小于1,无污染。7种重金属对汉江上游沉积物产生的综合污染指数为0.79,小于1,表明汉江上游沉积物重金属综合污染

较轻微,基本处于无污染程度,局部出现污染升高,与Cd元素含量偏高有关。

2.3 汉江上游水体沉积物中重金属来源解析

2.3.1 沉积物中重金属的相关性分析

河流沉积物中的重金属可能有自然和人为来源,自然来源与沉积物所在地岩石的自然风化和侵蚀有关,也可能与大气降尘和降雨有关^[27];人为源来自居民生活废水和工业废水排放、农业种植的农药化肥等非点源污染。一般认为元素含量之间相关性越高,表明其来源越相近。

由表5得到汉江上游水体沉积物中重金属含量间相关性,Cr-Ni、Cr-Zn、Ni-Cu、Zn-Pb、Pb-Cd间具有显著相关性,表明这些重金属两者之间来源比较接近,同时,若同一种重金属和两种重金属均具有较显著相关性,但与之相关的两种重金属却不相关,说明该金属有两种来源,比如Cr与Ni和Zn均有显著相关性,而Ni与Zn无相关性,说明Cr的来源至少有两个,同样Pb与Cd和Zn也存在显著相关性,Cd与Zn无相

关性,也说明Pb的来源多样。

2.3.2 沉积物中重金属的主成分分析

为了更明确地探究沉积物中重金属的来源,将所研究重金属进行主成分分析,结果如表6所示,主成分提取到3个特征值>1的成分,前3个主成分可以解释总方差的67.618%,其特征值均大于1.0。旋转后的成分矩阵显示,第一主成分(PC1)中的Cu和As为主要成分,第二主成分(PC2)中的Pb、Zn和Cd为主要成分,第三主成分(PC3)中的Cr和Ni为主要成分。

结合重金属的相关性和主成分分析结果,分析汉江上游水体沉积物中重金属的来源。PC1占总方差的23.601%,Cu(0.876)和As(0.817)具有最高的载荷量,Ni(0.423)次之。这一结果与Cu和As在所有样点的浓度变化趋势一致,其在所有样点的浓度与土壤背景值接近,这说明在整个研究区域,As和Cu没有显著的人为贡献,以当地岩石风化为为主。PC2占总方差

的22.350%,以Pb(0.781)、Zn(0.679)、Cd(0.638)为主要载荷因子,Cr(0.140)较弱。Pb、Zn和Cd通常来自工业废水和矿物冶炼,考虑到研究区域的位置铅锌矿区较多,表明矿产开采和冶炼可能是Pb、Zn和Cd最重要的来源,同时本身岩石风化也可能是部分地区流域沉积物中3种重金属的来源。PC3占总方差的21.667%,Cr(0.923)和Ni(0.767)为主要载荷因子,Cr和Ni之间呈显著正相关,表明它们的来源高度一致,且从地累积指数判断,Cr基本无污染,可以推测Cr和Ni主要来源于自然岩石风化等天然源,但某些样点的Ni含量较高,可能是受到一定的人为影响,可能来自工业废水、农业活动、大气沉降等综合影响。

3 结论

(1)汉江上游干流沉积物中各重金属元素污染状况: Cd含量超标较严重,有15个样点含量超过土壤重金属的风险筛选值(0.3 mg·kg⁻¹),其余6种金属Cu、Zn、Pb、As、Cr和Ni所有样点含量均低于土壤风险筛选值。与长江及其主要支流河流沉积物相比,汉江上游干流沉积物中重金属平均含量均低于其他支流的最高含量,但Cu、Ni和Cd的含量高于长江干流中的平均含量。

(2)地累积指数评价分析显示,汉江上游干流沉积物中Cd污染最为严重,其次是Cu、Ni和Cr,Pb、Zn和As无污染。污染负荷指数法分析得出Cd在整个汉江上游干流区域的综合污染指数最大为2.71,达到强污染,其次是Cu为1.22,Ni为1.18,均为中等污染程度,其余4种重金属污染指数均小于1,无污染,7种

表5 汉江上游水体沉积物中重金属的相关性

Table 5 Correlation of heavy metals in surface sediments of the upstream of Hanjiang River

元素Element	Cr	Ni	Zn	Cu	Pb	Cd	As
Cr	1						
Ni	0.550**	1					
Zn	0.490**	0.036	1				
Cu	0.110	0.446**	0.387*	1			
Pb	0.019	-0.016	0.452**	0.071	1		
Cd	-0.086	-0.108	0.217	-0.054	0.577**	1	
As	-0.445*	0.095	0.098	0.236	0.059	0.002	1

注:**P<0.01,*P<0.05。
Note: **P<0.01,*P<0.05.

表6 汉江上游水体沉积物中重金属的主成分分析

Table 6 Principle component analysis for heavy metals in surface sediments of upstream of Hanjiang River

成分 Components	初始特征值 Initial eigenvalues			重金属 Heavy metals	旋转后的载荷量 Rotated component matrix		
	总特征值 Total	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累积方差贡献率 Cumulative variance contribution rate/%		PC1	PC2	PC3
1	2.080	29.716	29.716	Cr	-0.070	0.140	0.923
2	1.524	21.768	51.484	Ni	0.423	-0.107	0.767
3	1.129	16.134	67.618	Zn	0.083	0.679	0.168
4	0.802	11.461	79.079	Cu	0.876	-0.109	0.033
5	0.682	9.744	88.823	Cd	-0.119	0.638	-0.151
6	0.454	6.485	95.308	As	0.817	0.209	0.143
7	0.328	4.692	100.000	Pb	0.108	0.781	0.060
				特征值 Eigenvalues	1.652	1.564	1.571
				方差贡献率 Variance/%	23.601	22.350	21.667
				累积方差贡献率 Cumulative/%	23.601	45.951	67.618

重金属对整个汉江上游沉积物产生的综合污染指数为0.79,小于1,表明汉江上游沉积物重金属综合污染程度较低,生态污染风险较小,但不能忽视Cd的潜在污染风险。

(3)根据相关性分析和主成分分析结果推测,汉江上游干流水体表层沉积物中Pb、Zn和Cd含量主要受人类矿产开采和冶炼等活动的影响,来源于人为活动;Cu、As和Cr的存在来源于沉积物岩石成分,Ni的存在既有本身区域矿物质影响,也有区域人为活动的贡献。

参考文献:

- [1] 罗燕,秦延文,张雷,等. 大伙房水库表层沉积物重金属污染分析及评价[J]. 环境科学学报, 2011, 31(5): 987-995.
LUO Yan, QIN Yan-wen, ZHANG Lei, et al. Analysis and assessment of heavy metal pollution in surface sediments of the Dahuofang reservoir[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 31(5): 987-995.
- [2] 于霞,安艳玲,吴起鑫. 赤水河流域表层沉积物重金属的污染特征及生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2015, 35(5): 1400-1407.
YU Xia, AN Yan-ling, WU Qi-xin. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of Chishui River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(5): 1400-1407.
- [3] 韩倩,张丽娟,胡国成,等. 中山高平工业园区周边水体沉积物中重金属污染特征及生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(8): 1563-1568.
HAN Qian, ZHANG Li-juan, HU Guo-cheng, et al. Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of water bodies surrounding Gaoping industrial park of Zhongshan City[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(8): 1563-1568.
- [4] Štěpánka T, Diana H, Petr V, et al. Common flaws in the analysis of river sediments polluted by risk elements and how to avoid them: Case study in the Ploučnice River system, Czech Republic[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 11: 221-368.
- [5] 朱青青,王中良. 中国主要水系沉积物中重金属分布特征及来源分析[J]. 地球与环境, 2012, 40(3): 305-313.
ZHU Qing-qing, WANG Zhong-liang. Distribution characteristics and source analysis of heavy metals in sediments of the main river systems in China[J]. *Earth and Environment*, 2012, 40(3): 305-313.
- [6] Xu J Y, Xu L G, Zheng L L, et al. Distribution, risk assessment, and source analysis of heavy metals in sediment of rivers located in the hilly area of southern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19: 3608-3619.
- [7] Wang H B, Xu J M, Mario A G, et al. Arsenic concentration, speciation, and risk assessment in sediments of the Xijiang River basin, China[J]. *Environment Monitment Assess*, 2019, 191: 663-672.
- [8] 翟婉盈,欧阳雪姣,周伟,等. 长江干流近岸沉积物重金属的空间分布及风险评估[J]. 环境科学学报, 2017, 37(11): 4195-4201.
ZHAI Wan-ying, OUYANG Xue-jiao, ZHOU Wei, et al. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in the nearshore sediments in main stream of Yangtze River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(11): 4195-4201.
- [9] 石先罗,章卫. 赣江南昌段表层水和底泥中重金属污染状况及其风险评价[J]. 北京石油化工学院学报, 2017, 25(4): 42-44.
SHI Xian-luo, ZHANG Wei. Assessment of heavy metal pollution in surface water and sediment in the Nanchang section of Ganjiang River[J]. *Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology*, 2017, 25(4): 42-44.
- [10] 许友泽,刘锦军,成应向,等. 湘江底泥重金属污染特征与生态风险评价[J]. 环境化学, 2016, 35(1): 189-198.
XU You-ze, LIU Jin-jun, CHENG Ying-xiang, et al. Characteristics and ecological risk assessment of heavy metals contamination in sediments of the Xiangjiang River[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(1): 189-198.
- [11] 吴迪,陈浒,李存雄,等. 乌江流域沉积物重金属污染特征及生态危害评价[J]. 土壤通报, 2010, 41(5): 1180-1182.
WU Di, CHEN Hu, LI Cun-xiong, et al. Pollution of heavy metals in sediments and its evaluation of potential ecological harm in Wujiang River[J]. *Chinese Journal of Soil Science* 2010, 41(5): 1180-1182.
- [12] 方小红,彭渤,张坤,等. 沅江入湖河床沉积物重金属污染演化地球化学分析[J]. 环境科学学报, 2018, 38(7): 2586-2598.
FANG Xiao-hong, PENG Bo, ZHANG Kun, et al. Geochemical study on evolution of heavy-metal contamination developed in bed sediments from the Yuanjiang River inlet to Dongting Lake[J]. *China Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(7): 2586-2598.
- [13] 林清,施泽明,王新宇. 沱江流域上游水系沉积物重金属元素空间分布特征及环境质量评价[J]. 四川环境, 2016, 35(4): 30-35.
LIN Qing, SHI Ze-ming, WANG Xin-Yu. Distribution characteristics and environmental evaluation of heavy metals in sediments of upstream of Tuo Jiang River basin[J]. *Sichuan Environment*, 2016, 35(4): 30-35.
- [14] 乔飞,时瑶,秦延文,等. 岷江干流重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境工程技术学报, 2018, 8(6): 602-609.
QIAO Fei, SHI Yao, QIN Yan-wen, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in Minjiang River mainstream[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2018, 8(6): 602-609.
- [15] 李晓玲,吴波. 南水北调中线水源区汉江流域水环境容量研究[J]. 水土保持通报, 2009, 29(6): 221-224.
LI Xiao-ling, WU Bo. Water environment capacity of Han River in the middle line South-to-North Water Diversion Project[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(6): 221-224.
- [16] 王钦安,马耀峰. 南水北调中线工程陕南水源区水环境研究[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(1): 77-80.
WANG Qin-an, MA Yao-feng. Study on the water environment in source areas of southern Shaanxi for the Medium Route Project of the South-to-North Water Diversion[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2008, 19(1): 77-80.
- [17] 许策,李晔,束继年,等. 汉江流域荆门段面源污染负荷时空分布与污染现状评价[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 63-68.
XU Ce, LI Ye, SHU Ji-nian, et al. Spatial distribution and evaluation

- of non-point pollution source in Jingmen Region of Hanjiang watershed[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(4):63-68.
- [18] 赵佐平. 汉江上游汉中段河流表层沉积物重金属污染风险评价[J]. 水土保持通报, 2014, 34(5):15-16.
- ZHAO Zuo-ping. Risk Assessment of heavy metal pollution in surficial sediments from Hanjiang upstream section of Hanzhong City[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(5):15-16.
- [19] 刘子赫, 孟瑞红, 代辉祥, 等. 基于改进地累积指数法的沉积物重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(9):2157-2164.
- LIU Zi-he, MENG Rui-hong, DAI Hui-xiang, et al. Evaluation of heavy metals pollution in surface sediments using an improved geo-accumulation index method[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(9):2157-2164.
- [20] 宋凤敏, 张兴昌, 王彦民, 等. 汉江上游铁矿尾矿库区土壤重金属污染分析[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(9):1707-1714.
- SONG Feng-min, ZHANG Xing-chang, WANG Yan-min, et al. Heavy metal pollution in soils surrounding an iron tailings in upstream areas of Hanjiang River, Shaanxi Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(9):1707-1714.
- [21] Zhao H. Index models to evaluate the potential metal pollution contribution from wash off of road-deposited sediment[J]. *Water Research*, 2014, 59:71-79.
- [22] 熊燕, 宁增平, 刘意章, 等. 南盘江流域(云南段)水系沉积物中重金属含量分布特征及其污染状况评价[J]. 地球与环境, 2017, 45(2):171-178.
- XIONG Yan, NING Zeng-ping, LIU Yi-zhang, et al. Distribution and pollution evaluation of heavy metals in sediments in the Nanpan River Basin (Yunnan Section)[J]. *Earth and Environment*, 2017, 45(2):171-178.
- [23] 中华人民共和国环境保护部. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)(GB 15618—2018)[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2018.
- Environmental Protection Administration of China. Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land (GB 15618—2018)[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2018.
- [24] Karim Z, Qureshi B A, Mumtaz M. Geochemical baseline determination and pollution assessment of heavy metals in urban soils of Karachi, Pakistan[J]. *Ecological Indicate*, 2015, 48:358-364.
- [25] 张立诚, 余中盛, 章申, 等. 水环境化学元素研究[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1996.
- ZHANG Li-cheng, SHE Zhong-sheng, ZHANG Shen, et al. Study on the chemical elements of water environment[J]. Beijing: China Environmental Science Press, 1996.
- [26] 鄯明才, 迟清华. 中国东部地壳与岩石的化学组成[M]. 北京:科学出版社, 1997.
- YAN Ming-cai, CHI Qing-hua. The chemical composition of the crust and the rocks in the eastern China[M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [27] 胡晓芳, 王祖伟, 宋晓旭, 等. 于桥水库上游支流沉积物重金属含量及生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(6):1210-1218.
- HU Xiao-fang, WANG Zu-wei, SONG Xiao-xu, et al. Concentrations and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments from tributaries of Yuqiao Reservoir[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(6):1210-1218.