DOI:10. 19826/j. cnki. 1009-3850. 2020. 08003

刘家峡水库西南部水域表层沉积物重金属污染评价

刘 翔[1,2,3], 郭建明[1,2*], 樊海龙[1,2,3], 张生银[1,2],
张顺存[1,2], 雷天柱[1,2], 王建丰[4]

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省油气资源研究重点实验室/中国科学院油气资源研究重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要:为了研究刘家峡水库西南部水域表层沉积物中重金属的污染状况,对采集的55个表层沉积物样品中的6种重金属元素Cr、Cd、Ni、Cu、Zn和Pb的含量进行测试,其平均含量分别为77. 03μg/g、0. 16μg/g、33. 53μg/g、32. 09μg/g、291. 77μg/g、22. 44μg/g。在研究表层沉积物重金属含量空间分布的基础上,运用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法、地累积指数法、潜在生态风险指数法,综合判断水库的受污染程度并对其潜在生态风险进行评估。6种元素的地累积指数排序依次为:Zn > Cu > Cd > Ni > Pb > Cr;潜在生态风险系数排序依次为:Cd > Cu > Pb > Zn > Ni > Cr;各区域重金属污染程度或潜在生态风险水平依次为黄河主河道 > 大夏河河口 > 黄河横剖面。综合4种方法的评价结果,认为对刘家峡水库西南部表层沉积物重金属污染及潜在生态风险评价贡献率较高的重金属污染因子是Zn、Cu和Cd;综合相关性分析与主成分分析,认为研究区沉积物重金属污染主要来源于两个方面:(1)Zn、Cu主要来源于生活污染或工业污染;(2)Cd主要来源于工农业活动产生的污染。

关 键 词:表层沉积物;重金属;污染程度;风险评价;刘家峡水库

中图分类号:P595;P66 **文献标识码**:A

引言

重金属具有较强的毒性,且具有持久性和富集性,是重要的污染物。重金属可影响土壤微生物区系、生态物种和微生物过程,对生物体和生态环境有极大的危害性[1-3]。河流沉积物通常被看作水体重金属元素的源或汇,温度、pH、溶解氧等条件的改变可使其中的重金属元素释放到水体,同时还能聚集水体中的微量元素[4],使流域原有的水质发生变化,严重者可能产生重金属污染[5]。因此,流域沉积物重金属污染被认为是我国水环境研究的重要问题之一,也是环境评价、环境污染机制研究的关键所在[3, 6]。目前,全世界已经对土壤重金属污染问题高度重视[7, 8],并逐步建立了各种土壤污染的评价方法[9-11],如富集系数法[12, 13]、地累积指数法[14]、潜在生态危害指数法[15]、单因子指数法[16]、内梅罗综合指数法[17]等。然而,至目前为止,对表层沉积物和水体中重金属元素如何进行合理准确地分析和评估还没有成熟的方法和统一的标准[18]。

水库作为灌溉、防洪、养殖或城市水源地等的重要水体,库区及周边环境水体的生态环境一直受到人们的广泛关注[19],人工水库的重金属污染情况也引起众多学者的高度重视[20-23]。研究表明,密云水库及上游潮河和白马关流域土壤及沉积物中均存在Cd污染[21],红枫水库、漳泽水库表层沉积物也存在不同程度的Cd、Hg污染[22, 23]。刘家峡水库作为我国自行设计建造的大型水电工程,自1979年建成蓄水以来,为我国西北地区的经济建设和社会发

收稿日期: 2019-10-14; **改回日期**: 2019-12-06
作者简介: 刘翔(1995—),男,硕士研究生,构造地质学专业。E-mail:liuxiang171@mails. ucas. ac. cn
通讯作者: 郭建明(1973—),男,博士,副研究员,主要研究方向为活动构造。E-mail:gjm2001@yahoo. com
资助项目: 刘家峡水库泥沙淤积(编号:Y728JJ1GJM)、三维构造建模与恢复(编号:Y624YL1GJM)联合资助。

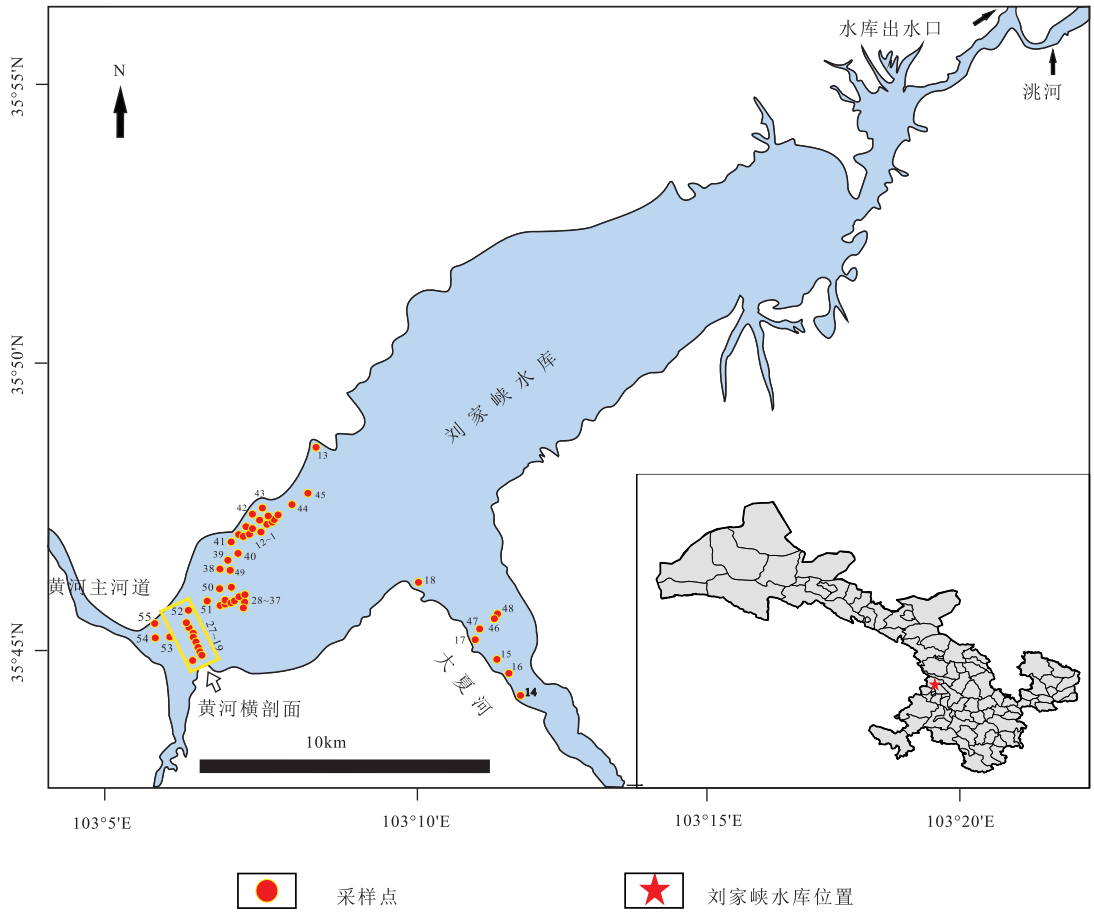

图 1 刘家峡水库平面位置及采样点分布情况

Fig. 1 The location of Liujiaxia Reservoir and the distribution of sampling points

展做出了巨大的贡献,作为黄河上游重要生态屏障为改善甘肃青海两省生态环境发挥了重要作用。近年来,由于水库上游水体携带的大量沉积物使得水库中泥沙常年淤积,导致库区容量减少了近 15 亿立方米[24-26],使刘家峡水电站和下游群众的生命财产安全受到严重威胁;同时,水库容纳了上游工业废水、矿区沉积物等污染物质,对库区人民的生活造成了巨大威胁。因此,研究刘家峡水库沉积物中重金属的分布情况、探讨污染物来源对生态评价及环境治理有重要意义[27]。目前对于刘家峡水库污染情况的研究主要集中在流域自然环境、水体与农田的相互影响、水土保持情况等方面[25, 26, 28],而对水库沉积物这一污染源的分析研究较少。王建丰[29]等对刘家峡水库表层沉积物微量元素的特征进行了分析,但未对其污染情况进行探究。基于此,本文对刘家峡水库西南部河流入库口及河流横剖面等区域表层近代沉积物进行了沉积物重金属含量的测试,选择单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法、地累积指数法、潜在生态风险指数法,综合判断水库的污染程度和存在的生态风险。通过对沉积物重金属的污染评价和沉积物重金属来源分析,为区域环境治理及流域水资源保护提供依据。

1 区域地质背景

刘家峡水库位于甘肃省西南部黄河上游干流河道上(图 1),海拔 2100m,水库正常水位 1735m,湖岸线长 55km,水面最宽处 6km,水域面积达 130km^2,为典型的湖泊型水库。水库设计库容 57 亿 m^3,有效库容 41.5 亿 m^3[24]。水库河段多年平均流量 877 m^3/s,最大水头 114 m。刘家峡水库以大夏河、洮河及黄河为入库水源,输沙量分别为 399 万吨、2860 万吨和 4070 万吨[30],水泄于下游盐锅峡水库。区内地质构造复杂,新构造运动活跃,自中更新世以来,伴随着青藏高原强烈隆升,黄河河口下切加强,为滑坡等地质灾害的主要发生地[31-33]。

区内广泛出露下白垩统河口群及古近纪以来内陆河、内陆湖泊的粉红色砂岩及泥岩[34, 35],第四纪沉积物厚度大,水库沉积物来源广泛,是区域环境评价和研究的复杂地带。

2　样品采集及分析方法

在水库西南部水域(35.7442° ~ 35.8093° N, 103.0885° ~103.1992°E)用箱式取样器进行了表层沉积物的采样(图 1)。因黄河与大夏河为水库的主要入库河流,故采样点集中在河流入库口、黄河横剖面及水库近岸处,共采集表层沉积物样品 55 个。

实验处理方法如下:(1)将采集的样品烘干并研磨至 200 目以下,装入聚四氟乙烯干燥袋中保存;(2)取 20 ~30 mg 样品放入 Teflon 密闭容器中,用少量超纯水湿润后加入 1 ml HF 和 HNO_3,并超声 20 min;(3)超声完毕后放入不锈钢罐中置于 190 ℃烘箱中消解 24 h;(4)取出消解完成的样品在 150 ℃电热板上蒸至近干,之后加入 1 ml HNO_3用于去除样品中剩余的 HF;(5)待 HF 去除完毕后加入 2 ml HNO_3与 3 ml 超纯水后保存在 150 ℃烘箱 24 h;(6)最后将样品移至 PET 瓶,加入超纯水定容至 40 ~50 ml 待上机测试。微量元素在中国科学院兰州油气资源研究中心公共测试中心甘肃省重点实验室通过电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)进行测定。测试样品之前首先对仪器进行测试条件的最佳化以监控测试精度与准确度,然后对曲线用测定的标准空白溶液和标准溶液进行拟合矫正。每隔 8 个被测样品溶液做一次质量监控样,从而达到样品分析合理,分析中使用国家标样(GSR-5、GSR-6、GSR-9)、空白样进行校正。对元素分析时进行了重复分析与标样分析,分析元素的相对误差小于 10 %,故结果可靠。此外,对实验结果的标准差系数进行计算以指示各重金属元素在研究区的分散程度,并应用 MATLAB、Origin、SPSS 等软件对相应结果进行分析及图表绘制,等值线图由 MATLAB 根据线性插值绘制。

3　分析结果

3.1　重金属含量及其平面分布特征

通过对表层沉积物的分析测试,得出各采样点重金属元素浓度并对各重金属元素含量特征进行统计(表 1)。Cr 在研究区的含量变化范围为 47.07 ~123.36 μg/g,平均含量为 77.03 μg/g;Cd 在研究区的含量变化范围为 0.09 ~0.79 μg/g,平均含量为 0.16 μg/g;Ni 在研究区的含量变化范围为 19.24 ~ 50.94 μg/g,平均含量为 33.53 μg/g;Cu 在研究区的含量变化范围为 17.06 ~45.37 μg/g,平均含量为 32.09 μg/g;Zn 在研究区的含量变化范围为 178.71 ~450.60 μg/g,平均含量为 291.77 μg/g;Pb 在研究区的含量变化范围为 15.94 ~29.75 μg/g,平均含量为 22.44 μg/g。其中,Zn 在 6 种重金属元素中丰度最高,Cd 最低。

表 1　刘家峡水库表层沉积物重金属含量(μg/g)统计表

Table 1　Summary of heavy metal concentrations (μg/g) in surface sediments of Liujiaxia Reservoir

参数	重金属(μg/g)					
	Cr	Cd	Ni	Cu	Zn	Pb
最小值	47.07	0.09	19.24	17.06	178.71	15.94
最大值	123.36	0.79	50.94	45.37	450.60	29.75
平均值	77.03	0.16	33.53	32.09	291.77	22.44
中值	77.63	0.15	34.37	33.43	274.96	22.39
标准差系数	0.17	0.55	0.20	0.22	0.21	0.14

从表 1 可以看出,除 Cd 元素外,其它 5 种元素 Cr、Ni、Cu、Zn、Pb 的标准差系数介于 0.14 ~0.22 之间,反映这 5 种元素分散度较低,表明研究区表层沉积物中各元素分布相对较均匀。将研究区 Cr、Cd、Ni、Cu、Zn、Pb 这 6 种元素的含量与淡水沉积物重金属质量基准[36]进行比较,除 Zn 元素的含量中值超过其在淡水沉积物重金属质量基准中值外,Cr、Cd、Ni、Cu 和 Pb 元素的含量中值均小于各自的淡水沉积物重金属质量基准中值。通过比较结果可以判断,研究区内 Zn 元素存在一定污染情况,但其它 5 种重金属的污染情况及污染程度则无法准确判断,还需进一步研究评价。

表层沉积物中重金属的空间分布如图 2 所示。重金属元素 Cr、Cd、Ni、Cu、Zn、Pb 的分布特征基本相似,均表现为河流入库区域含量较高,且水流流速较快的黄河主河道和大夏河河口区域重金属元素含量高于水流流速较小的黄河横剖面。低值区主要分布在研究区的中部,总体特征表现为近河口、近岸区域重金属含量高于水库远岸及中部地区。呈现这种分布特征主要与区域水流流速、流量及沉积物输送量有关,所以推测该区域重金属元素主要为各河口水体所携带。

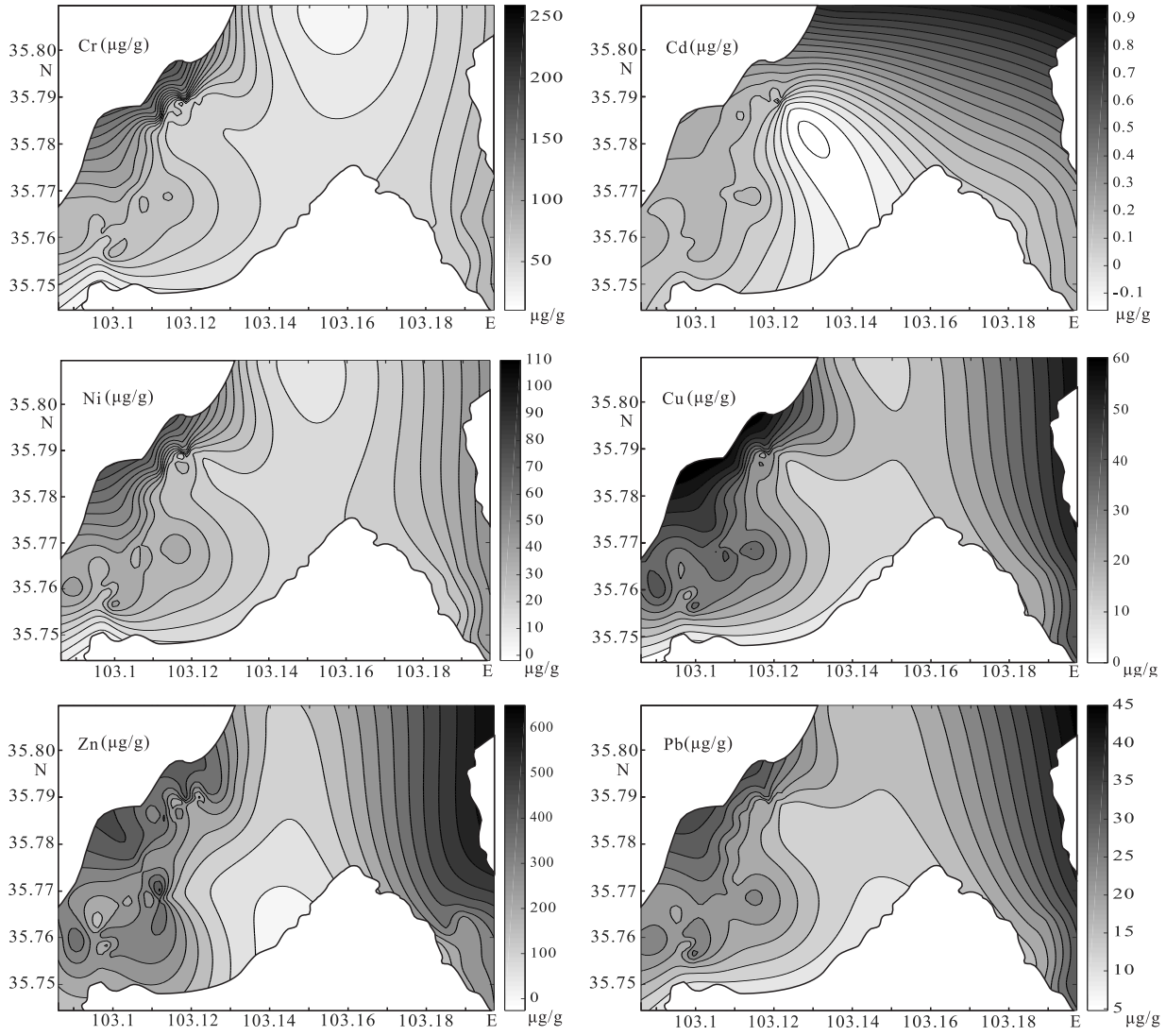

图 2 研究区表层沉积物重金属分布特征

Fig. 2 Distribution of heavy metal contents in surface sediments in studied area

3.2 重金属污染评价

3.2.1 单因子污染指数法

单因子污染指数法通过各指标的评价标准对其进行分析评价,该方法原理简单、计算量小,容易对评价样本与评价标准的比值关系作出清晰的判断,进而了解研究区的主要污染因子及污染情况[16, 37]。计算方法如下所示:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \tag{1}$$

式中 C_i为沉积物中元素 i 的实际测量值,S_i为沉积物中元素 i 的背景值,采用《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)中的一级标准),单因子指数污染分级标准见表 2[33]。

表 2 单因子指数污染分级标准

Table 2 Single factor index pollution classification standard

P_i	$P_i \leqslant 1$	$1 < P_i \leqslant 2$	$2 < P_i \leqslant 3$	$P_i > 3$
污染水平	非污染	轻污染	中污染	重污染

按照公式及相应背景值对研究区重金属元素进行单因子污染指数的计算,得出各采样点单因子污染指数。4 种重金属元素 Cr、Cd、Ni、Cu 的单因子污染指数分别介于 0.52 ~ 1.37、0.47 ~ 1.33、0.48 ~ 1.27、0.49 ~ 1.30 之间,平均值分别为 0.86、0.82、0.84、0.92,稍低于 1,总体上单因子污染程度为非污染,但在部分采样点(采样点 21、28、33、37 ~ 42、48 ~ 51、53 ~ 55)单因子污染指数大于 1,污染程

度表现为轻度污染。Pb 的单因子污染指数最小值为 0.46,最大值为 0.85,平均值为 0.64,均小于 1,表明其在研究区单因子污染程度为非污染;Zn 的单因子污染指数最大值为 4.51,最小值为 1.79,平均值为 2.92,单因子污染程度总体上表现为中污染程度,主要分布在黄河主河道、大夏河主河道和黄河横剖面区域的部分采样点(采样点 4、7、9、21、28、30~32、34~36、38~42、44、46、48、49)则达到了重污染程度。研究区沉积物中主要的重金属污染因子为 Zn,其重金属影响因子的顺序为:Zn > Cu > Cr > Ni > Cd > Pb。

3.2.2　内梅罗综合污染指数法

单因子污染指数法很难全面地反映研究区沉积物的污染情况,而内梅罗综合污染指数法的优势在于将单因子污染指数的平均值和最大值列入计算范围,突出了污染较重的重金属污染物的作用,对于描述多个因子所造成的污染状况的能力更强[16, 38-40]。内梅罗综合污染指数的计算方法如下:

$$P_{综}=\sqrt{\left(\frac{\overline{P}^2+P_{imax}{}^2}{2}\right)} \qquad (2)$$

式中 P_{imax} 为第 i 采样点土壤重金属污染物的单因子污染指数中的最大值,$\overline{P}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}P_i$ 为单因子指数的平均值,评价分级标准见表 3[39]。

表 3　内梅罗综合指数污染分级标准

Table 3　Nemero comprehensive index pollution classification standard

污染等级	污染指数	污染程度	污染水平
1	$P_{综}\leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P_{综}\leq 1.0$	警戒线	尚清洁
3	$1.0 < P_{综}\leq 2.0$	轻微污染	土壤和作物受轻微污染
4	$2.0 < P_{综}\leq 3.0$	中度污染	土壤和作物污染较明显
5	$P_{综} > 3.0$	重度污染	土壤和作物污染较严重

通过计算得出各采样点内梅罗综合系数,并绘制内梅罗综合指数等值线图(图 3)。研究区采样点的内梅罗综合系数介于 1.38~3.34 之间,平均值为 2.22,变异系数为 20%。内梅罗综合污染程度总体上表现为中度污染,部分采样点污染程度为轻微污染,个别采样点(7 号、31 号)污染程度为重度污染。从图 3 可知道,研究区内内梅罗综合指数高值点主要位于黄河主河道、大夏河河口区域,低值区域主要位于水库中部及远岸区域,总体特征表现为近河口、近岸区域内沉积物重金属元素的内梅罗综合污染指数高于水库远岸及中部区域。

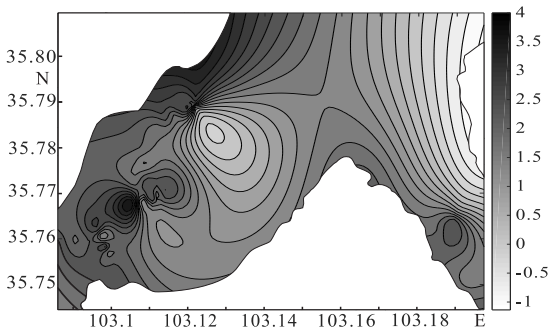

图 3　研究区表层沉积物重金属内梅罗综合指数(P 综)空间展布

Fig. 3　Spatial distribution of the Nemero comprehensive indices of heavy metals in surface sediments in studied area

3.2.3　地累积指数法

地累积指数法(Index of Geo-accumulation, I_{geo})是德国科学家 Muller 在 1969 年提出的一种评估土壤、沉积物重金属污染情况的定量指标。这种方法综合了自然地质过程造成背景值的影响以及人为活动对重金属污染的影响,近年来被广泛应用于评估人为造成的重金属污染[14, 39-42]。其计算公式为:

$$I_{geo}=\log_2[Ci_s/(k\times Ci_n)] \qquad (3)$$

式中:k 为考虑造岩运动可能引起背景值变动而加入的常数,一般取 1.5,Ci_s 为样品中元素 i 的实际浓度;Ci_n 为计算所用的背景值[43](表 4),采用工

表 4　重金属背景值(Ci_n)

Table 4　Reference values (Ci_n) of heavy metals

参数	Cr	Cd	Ni	Cu	Zn	Pb
Ci_n(μg/g)	60	0.077	20	13	40	15

表 5　重金属地累积指数及对应的污染程度

Table 5　Geoaccumulation indices (I_{geo}) of heavy metals and corresponding pollution levels

重金属污染等级	地累积指数 I_{geo}	污染程度
1	$I_{geo}\leq 0$	无污染
2	$0 < I_{geo}\leq 1$	轻微污染
3	$1 < I_{geo}\leq 2$	中度污染
4	$2 < I_{geo}\leq 3$	中强污染
5	$3 < I_{geo}\leq 4$	强污染
6	$4 < I_{geo}\leq 5$	很强污染
7	$I_{geo} > 5$	极强污染

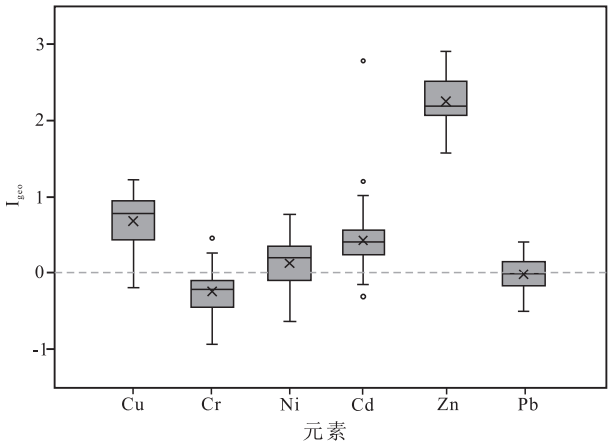

图 4 各重金属地累积指数箱型图

Fig. 4 Box-plots of the geoaccumulation index (I_{geo}) for heavy metals

业化之前沉积物重金属背景值;地累积指数污染分级标准见表 5[21, 44]。

结合各重金属背景值,对研究区重金属地累积指数进行计算和统计(图 4)。结果显示,研究区地累积指数最高的重金属元素为 Zn 元素,介于 1.57 ~2.91,平均值为 2.25,总体上污染等级达到 4 级,污染程度表现为中强度污染;Ni、Cd、Cu 的地累积指数总体上介于 0 ~1 之间,污染等级为 2 级,污染程度表现为轻微污染;Cr、Pb 的地累积指数相对最小,分别介于-0.94 ~0.45、-0.50 ~0.40 之间,除部分采样点表现为轻微污染外,总体污染程度为无污染。研究区重金属地累积指数污染程度顺序为 Zn > Cu > Cd > Ni > Pb > Cr。

3.2.4 潜在生态风险指数评价

本文采用瑞典科学家 Hakanson[15] 提出的潜在生态风险指数法(The potential ecological risk index),此方法运用沉积学原理对土壤或沉积物中重金属污染进行定量评价,综合考虑了重金属元素的毒性差异、区域背景值差异,多元素协同作用及环境对重金属污染敏感性等因素,从而消除了不同区域和异源污染造成的误差影响,因此在环境风险评价中得到了广泛应用[20, 27, 45-48]。根据该方法,研究区表层沉积物中第 i 种重金属的潜在生态风险系数(Ei_r)及该区域沉积物中重金属的潜在风险指数(RI)的计算方法如下:

$$Ei_r = Ti_r\, Ci_f \tag{4}$$

$$RI = \sum_{i=1}^{n} Ti_r\, Ci_f = \sum_{i=1}^{n} Ti_r \frac{Ci_s}{Ci_n} \tag{5}$$

式中: Ci_f 为重金属 i 的单因子污染系数; Ci_s 为重金属 i 的实测浓度, Ci_n 为重金属 i 的背景值; Ti_r 为重金属 i 的毒性系数,Cr、Cd、Ni、Cu、Zn、Pb 的毒性系数[49]分别为 2、30、5、5、1、5。Ei_r 和 RI 值相对应的污染程度及潜在生态风险程度的评价标准见表 6[45, 48, 49],计算所采用的背景值为工业化以前沉积物中重金属的背景值(表 4),计算结果见表 7。

表 6 重金属 Ei_r 和 RI 值评价标准

Table 6 Evaluation criteria of heavy metals Ei_r and RI

评价指标	污染程度				
	轻微	中等	强	很强	极强
Ei_r	Ei_r <40	40≤ Ei_r <80	80≤ Ei_r <160	160≤ Ei_r <320	Ei_r ≥320
RI	RI <120	120≤RI <240	240≤RI <480	RI≥480	

表 7 研究区表层沉积物重金属潜在生态风险系数和潜在生态风险指数统计表

Table 7 Summary of ecological risk coefficient and risk index of heavy metals in surface sediments in studied area

参数	Ei_r						RI
	Cr	Cd	Ni	Cu	Zn	Pb	
最小值	1.57	36.27	4.81	6.56	4.47	5.31	63.05
最大值	4.11	309.42	12.73	17.45	11.27	9.92	334.58
平均值	2.57	64.27	8.38	12.34	7.29	7.48	102.33
中值	2.59	59.47	8.59	12.86	6.87	7.46	100.61

研究区表层沉积物中各重金属元素的潜在生态风险排序为 Cd > Cu > Pb > Zn > Ni > Cr。其中 Cd 的污染程度达到了中等潜在生态危害水平($\overline{Ei_r}$ = 64.27),从各采样点来看,有 52 个采样点的潜在生

态危害系数为中等水平,另外 1 号($\overline{Ei_r}$ =90.96)和 2 号($\overline{Ei_r}$ =103.76)采样点的潜在生态危害系数污染程度达到了强生态危害水平,13 号采样点($\overline{Ei_r}$ = 309.42)更是达到了很强生态危害水平。此外的 5 种重金属元素 Cr、Ni、Cu、Zn 和 Pb 的潜在生态危害系数污染程度均为最低水平,表现为轻微生态危害。

从多元素综合的潜在生态风险指数(RI)评价结果来看,除 13 号采样点(RI = 334.58)的潜在生态风险指数等级达到强生态危害,其它采样点均为轻微生态危害水平,不过其中的 1、2、15、33、39 和 49 号采样点的 RI 值也较高,污染程度接近中等生态危害水平。根据研究区表层沉积物重金属潜在生态风险指数空间展布图(图 5)所示,RI 高值区主要集中在研究区西部及东部的河口区域,潜在生态风险指数由近岸区域向水库中心区域逐渐减小。

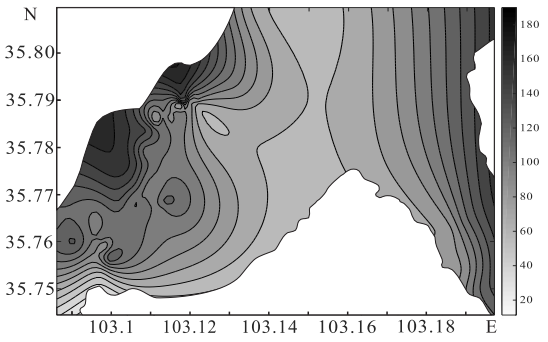

图 5　研究区表层沉积物重金属潜在生态风险指数(RI)空间展布

Fig. 5　Spatial distribution of the ecological risk indices of heavy metals in surface sediments in studied area

4　讨论

4.1　沉积物重金属污染评价

本文综合多种评价方法对研究区表层沉积物重金属污染情况进行了研究。结果表明,6 种金属元素单因子污染指数排序依次为:Zn > Cu > Cr > Ni > Cd > Pb;地累积指数排序依次为:Zn > Cu > Cd > Ni > Pb > Cr;潜在生态风险系数排序为:Cd > Cu > Pb > Zn > Ni > Cr。

单因子污染指数法和地累积指数法两种评价结果显示,富集或污染程度最高的元素均为 Zn 和 Cu,但其它元素的排序有所不同。这是由于单因子指数法是简单地通过评价样本与评价标准的比值关系来判断重金属因子的污染情况[16],而地累积指数法还考虑了人为污染因素以及自然成岩作用对背景值的影响[44]。另外,由于潜在生态风险系数法综合考虑了重金属元素的毒性、敏感性以及重金属元素区域背景值的差异等众多因素的特点,其评价结果与单因子污染指数及地累积指数两种方法的评价结果有较大差别:具体表现为 Cd 元素因其较高的毒性系数(30),潜在生态风险污染程度最终显示为中等生态危害水平,而在单因子污染指数法和地累积指数法评价结果中污染程度最高的 Zn 元素,因其毒性系数(1)极低,与除 Cd 外的 4 种重金属元素(Cu、Pb、Ni、Cr)潜在生态风险污染程度均表现为轻微生态危害。

由于评价参数和计算方法的不同,各评价方法给出了不尽相同的评价结果,但从整体来看,Zn、Cu 和 Cd 3 种重金属在这些评价结果中排序靠前且均表现出一定的污染程度,这 3 种重金属无论从含量、污染程度,或是其存在的潜在生态危害,都不能被忽视。

4.2　沉积物重金属来源分析

有学者研究表明[4, 50],人工水域沉积物中重金属浓度的变化原因主要来自于人类的各种活动以及地球化学过程。重金属元素之间的关系可以为重金属来源提供重要的信息[29, 51],具有显著相关性的重金属元素可能具有相同的来源或地球化学过程[52-54]。利用 SPSS 软件对研究区表层沉积物中 6 种重金属元素进行 Pearson 相关性分析(表 8)。分析结果显示:5 种重金属元素 Cu、Cr、Ni、Zn、Pb 呈显著正相关(P <0.01),表明这些重金属元素的来源、迁移等过程相似;Cd 与其它 5 种重金属之间的相关性不显著,表明 Cd 可能与其它重金属的来源不一致。

利用主成分分析法对研究区重金属的来源进一步分析,并对分析结果进行投影(图 8)。通过方差最大正交旋转,得到特征值 >1 的主成分有 2 个。主成分 1 的方差贡献率为 65.572 %,主成分 2 的方差贡献率为 17.056 %,这 2 个主成分的累计贡献率为 82.628 %,能解释绝大多数重金属的来源差异。

主成分 1 中具有较高正荷载(>0.61)的重金属元素为 Cu、Cr、Ni、Zn、Pb,其中在研究区内存在一定重金属污染的 Cu、Zn 荷载分别为 0.966 和 0.609。本研究区内 Cu、Zn 这 2 种重金属元素在黄河入库区域浓度较其它区域更高(图 2),故黄河对

表 8 研究区表层沉积物重金属的 Pearson 相关性分析

Table 8 Pearson correlation coefficient of heavy metals in surface sediments in studied area

重金属	Cu	Cr	Ni	Zn	Cd	Pb
Cu	1					
Cr	0.885**	1				
Ni	0.951**	0.927**	1			
Zn	0.550**	0.459**	0.502**	1		
Cd	-0.084	-0.103	-0.075	-0.180	1	
Pb	0.823**	0.717**	0.835**	0.495**	-0.058	1

注:** 表示在 0.01 水平上显著相关(双侧)

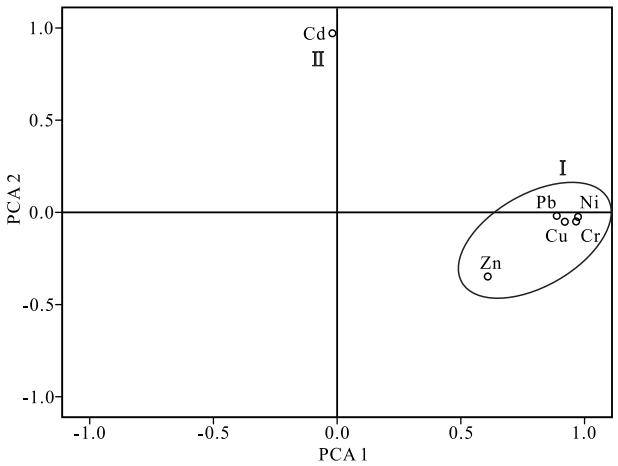

图 6 研究区表层沉积物重金属主成分投影图

Fig. 6 Projection map of the principal component analysis of heavy metals in surface sediments of study area

这两种重金属输入量贡献较大。黄河上游流域矿产的开采、电镀工业的发展以及一些煤厂、钢厂等工业排污汇入河流系统最终进入水库[55],此外水库养殖业与旅游业所造成的污染也不可忽视,如水库中船只的燃油渗漏和船体防腐蚀涂料等都会产生污染[22]。因此推测主成分 1 代表的是生活、工业污水和废料污染的影响。

主成分 2 中,Cd 占主要的荷载(0.971)。研究区内 Cd 元素浓度高值区主要集中在两河流入库区域。除采矿、金属冶炼和电镀等工业输入外,黄河和大夏河上游地区城镇中食品、纺织、印刷等轻工业所产生的废水废料,农业活动中农药、化肥使用[56, 57]所产生的污染也占输入的很大比例。因此推测主成分 2 主要受工农业活动的影响。

5 结论

(1)刘家峡水库表层沉积物重金属 Cr、Cd、Ni、Cu、Zn、Pb 平均含量依次为 77.03μg/g、0.16μg/g、33.53μg/g、32.09μg/g、291.77μg/g、22.44μg/g。空间分布特征显示,沉积物重金属含量大小依次为黄河主河道区域 > 大夏河河口区域 > 黄河横剖面区域。

(2)单因子指数法与地累积指数法评价结果显示,Zn、Cu 两种重金属在研究区内污染程度高于其它 4 种重金属元素 Cd、Ni、Cr 和 Pb,且 Zn 的污染程度最高,在这两种评价结果中均达到中等以上的污染程度。此外,Cd 在潜在生态风险系数评价中污染程度达到中等潜在生态危害水平,应受到重视。

(3)表层沉积物重金属来源分析结果显示:Cu、Zn 主要来源于采矿、工厂、水库养殖业和旅游业等产生的生活污染或工业污染;Cd 主要来源于由工业产生的废水废料和农药、化肥产生的农业污染等工农业活动。

参考文献:

[1] Dean J R , Elom N I , Entwistle J A . Use of simulated epithelial lung fluid in assessing the human health risk of Pb in urban street dust[J]. ence of the Total Environment, 2017, 579:387 - 395.

[2] Jinbo Lin, Fang Zhang, Yixiong Lei. Dietary intake and urinary level of cadmium and breast cancer risk: A meta-analysis [J]. Cancer epidemiology, 2016, 42:101 - 107.

[3] 尹春艳,于一尊,唐晓燕,等. 湘江三角洲沉积物元素重金属污染地球化学特征[J]. 江西科学, 2010, 28(2): 210 - 215.

[4] 杜臣昌,刘恩峰,羊向东,等. 巢湖沉积物重金属富集特征与人为污染评价[J]. 湖泊科学, 2012, 24(1): 59 - 66.

[5] 林秋奇,韩博平. 水库生态系统特征研究及其在水库水质管理中的应用[J]. 生态学报, 2001,21 (6): 1034 - 1040.

[6] 张志锋,王燕,韩庚辰,等. 北部湾沉积物中重金属元素的地球化学特征及物源初探[J]. 海洋学报(中文版), 2013, 35(2): 72 - 81.

[7] Xiangdong Li, Siu-lan Lee, Sze-chung Wong, et al. The study of metal contamination in urban soils of Hong Kong using a GIS-based

approach[J]. Environmental Pollution,2003,129(1):0 - 124.
[8] Chaosheng Zhang. Using multivariate analyses and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland [J]. Environmental Pollution, 2005, 142(3):1 - 511.
[9] E Singovszka,M Balintova. Enrichment Factor and Geo-Accumulation Index of Trace Metals in Sediments in the River Hornad, Slovakia [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 222(1)012023.
[10] 丁喜桂,叶思源,高宗军. 近海沉积物重金属污染评价方法[J]. 海洋地质动态, 2005, 21(8): 31 - 36.
[11] 金路,初凤友,赵建如,等 南海西北部浅海沉积物重金属污染的综合评价[J]. 海洋学研究, 2011, 29(2): 24 - 34.
[12] Mora A, Jumbo-Flores D, González-Merizalde, Max, et al. Heavy Metal Enrichment Factors in Fluvial Sediments of an Amazonian Basin Impacted by Gold Mining [J]. Bulletin of environmental contamination and toxicology, 2019.
[13] 赵庆令,李清彩,谢江坤,等. 应用富集系数法和地累积指数法研究济宁南部区域土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 岩矿测试, 2015, 34(1):129 - 137.
[14] KrzysztofLoska, Danuta Wiechula, Irena Korus. Metal contamination of farming soils affected by industry [J]. Environment International,2004,30(2).
[15] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975 - 1001.
[16] 唐功政,刘国栋,高润青,等. 利用单因子污染指数与内梅罗综合指数进行土壤重金属污染程度评级[J]. 科技风, 2019, (13): 125 - 126.
[17] 祝宾红. 内梅罗污染指数法综合评价堆龙曲水质现状研究[J]. 西藏科技,2018,(2):31 - 34.
[18] 王宏. 东洞庭湖湿地土壤重金属的分布特征及风险评价[D]. 湖南:湖南师范大学, 2012.
[19] 陈怡凝,潘珊珊,周永潮,等. 玉环湖水库底泥重金属污染及生态风险评估[J]. 科技通报, 2018, 34(5): 244 - 250.
[20] 匡帅,保琦蓓,康得军,等. 典型小型水库表层沉积物重金属分布特征及生态风险[J]. 湖泊科学, 2018, 30(2): 336 - 348.
[21] 潘丽波,乌日罕,王磊,等. 北京市密云水库上游土壤和沉积物重金属污染程度及风险评价[J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(3): 261 - 268.
[22] 张茜,冯民权,郝晓燕. 漳泽水库沉积物重金属污染特征与生态风险评价[J]. 环境工程, 2019, 37(1): 11 - 17.
[23] 何应,李秋华,唐黎,等. 贵州红枫水库沉积物重金属污染评价及来源分析[J]. 生态学杂志, 2019, 38(03): 799 - 809.
[24] 权浩渤. 刘家峡水库生态安全调查与评估研究[D]. 兰州:兰州大学, 2019.
[25] 郭家麟,张绍堂. 刘家峡水库坝前泥沙淤积过程及现状[J]. 大坝与安全, 1993, (4): 25 - 26.
[26] 郭家麟,张晓华,胡建成,等. 刘家峡水库排沙规律及效果分析[J]. 人民黄河, 2015, 37(4): 6 - 9.
[27] 徐刚,刘健,孔祥淮. 南黄海西部陆架区表层沉积物重金属污染评价[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(2): 181 - 185.
[28] 管东红,马正学,陈明霞,等. 刘家峡水库水环境质量生物学评价研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(Z1): 325 - 327
[29] 王建丰,雷天柱,张生银,等 刘家峡水库表层沉积物微量元素地球化学特征[J]. 沉积与特提斯地质, 2018, 38(03): 51 - 61.
[30] 许伟. 龙羊峡、刘家峡河段梯级水库联合运用相关问题研究[D]. 北京:清华大学, 2015.
[31] 王士天,李渝生,苏道刚,等. 黄河龙羊峡电站区域构造稳定性的工程地质研究[J]. 地质科学, 1988, (4): 361 - 372.
[32] 郭小花. 龙羊峡—刘家峡河段巨型滑坡堵河事件与黄河演化之间的关系[D]. 西安:长安大学, 2017.
[33] 郭小花. 黄河上游龙羊峡 - 刘家峡河段巨型滑坡光释光测年[D]. 兰州:兰州大学, 2012.
[34] 张海峰,林启祥,张智勇,等. 兰州—民和盆地下白垩统河口群沉积序列及沉积相研究[J]. 地质科技情报, 2003, 22(4): 21 - 26.
[35] 李麒麟,颉贵琴,周玲琦,等. 兰州 - 民和盆地河口群层序地层格架特征及盆地演化[J]. 沉积与特提斯地质, 2002, 22(4): 73 - 78.
[36] 陈静生,王立新,洪松,等. 各国水体沉积物重金属质量基准的差异及原因分析[J]. 环境化学, 2001, 20(5): 417 - 424.
[37] 李翠田,王淑红,于红兵,等. 珠江口海域表层沉积物中重金属含量分布特征及其环境质量评价[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(5): 535 - 538.
[38] O. Morton-Bermea, E. Hernández-Álvarez, G. González-Hernández, et al. Assessment of heavy metal pollution in urban topsoils from the metropolitan area of Mexico City [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2009, 101(3): 218 - 224.
[39] Zhang P, Qin C, Hong Xet al. Risk assessment and source analysis of soil heavy metal pollution from lower reaches of Yellow River irrigation in China [J]. The Science of The Total Environment, 2018, 633:1136 - 1147.
[40] 郭笑笑,刘丛强,朱兆洲,等. 土壤重金属污染评价方法[J]. 生态学杂志, 2011, 30(5): 889 - 896.
[41] 范拴喜,甘卓亭,李美娟,等. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(17): 310 - 315.
[42] Dotaniya M. L, Meena V D, Rajendiran S, et al. Geo-Accumulation Indices of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Kanpur, India Under Long Term Irrigation of Tannery Effluent [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2016, 98(5):1 - 6.
[43] 赵一阳,鄢明才. 黄河、长江、中国浅海沉积物化学元素丰度比较[J]. 科学通报, 1992, 37(13): 1202 - 1204.
[44] 杨倩,鲁新川,殷建国,等. 甘肃嘉峪关市表层土壤重金属空间分布与评价[J/OL]. 沉积学报: 1-12 [2019-07-05]. https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.048.
[45] 滕德强,吕颂辉,郭福星,等. 长江口及其邻近海域表层沉积物中重金属分布和潜在生态危害评价[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(2): 11 - 19.

[46] 王荦,孙野青,贾宏亮,等. 辽宁省大凌河口沉积物重金属污染及生态风险评价[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(1): 28-32.
[47] 程岩,刘月,李富祥,等. 鸭绿江口及毗邻浅海沉积物重金属富集特征与潜在生态风险比较[J]. 环境科学研究, 2011, 24(5): 516-525.
[48] 唐银健. Hakanson 指数法评价水体沉积物重金属生态风险的应用进展[J]. 环境科学导刊, 2008, 27(3): 66-68.
[49] 徐争启,倪师军,庹先国,等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112-115.
[50] 刘青枰,邓时强,赵元艺,等. 西藏尕尔勤矿床区域性土壤重金属元素地球化学特征及来源解析[J]. 地球学报, 2018, 39(4): 481-490.
[51] Guanghui Guo, Fengchang Wu, Fazhi Xie, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in urban soils from southwest China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(3): 410-418
[52] 刘成,邵世光,范成新,等. 巢湖重污染汇流湾区沉积物重金属污染特征及风险评价[J]. 中国环境科学, 2014, 34(4): 1031-1037.
[53] Dragos G. Zaharescu, Peter S. Hooda, Antonio P. Soler, et al. Trace metals and their source in the catchment of the high altitude Lake Respomuso, Central Pyrenees [J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(11): 3546-3553
[54] 朱伟,边博,阮爱东. 镇江城市道路沉积物中重金属污染的来源分析[J]. 环境科学, 2007, (7): 1584-1589.
[55] 蓝巧娟,吴彦,闫彬,等. 三峡库区(万州段)消落区沉积物重金属污染评价及来源分析[J]. 环境工程, 2018, 36(8): 193-197.
[56] 周军,高凤杰,张宝杰,等. 松花江表层沉积物有毒重金属污染的潜在生物毒性风险评价[J]. 环境科学学报, 2014, 34(10): 2701-2708.
[57] Finn Pedersen, Estelle Bjørnestad, Helle Vang Andersen, et al. Characterization of sediments from Copenhagen Harbour by use of biotests [J]. Waterence & Technology, 1998, 37(6-7): 233-240.

Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments of Southwest Liujiaxia Reservoir, Gansu

Liu Xiang[1,2,3], Guo Jianming[1,2*], Fan Hailong[1,2,3], Zhang Shengyin[1,2], Zhang Shuncun[1,2], Lei Tianzhu[1,2], Wang Jianfeng[4]

(1. *Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Science, Lanzhou* 730000, *China*; 2. *Key Laboratory of Petroleum Resources, Gansu Province, Lanzhou* 730000, *China*; 3. *University of Chinese Academy of Science, Beijing* 100049, *China*; 4. *State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guangzhou* 510640, *China*)

Abstract: Liujiaxia reservoir is located in the upper reaches of the Yellow River in southwest Gansu province. As a large-scale hydropower project, Liujiaxia reservoir has played a great role in economic and social developments of Gansu and Qinghai provinces since it was built in 1974. In order to study the heavy metal pollution in surface sediments of southwest Liujiaxia reservoir, the contents of six metal elements such as Cr, Cd, Ni, Cu, Zn and Pb were measured by inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS) for 55 surface sediment samples from Liujiaxia reservoir. The results show the average concentrations of Cr, Cd, Ni, Cu, Zn and Pb were 77.03μg/g, 0.16μg/g, 33.53μg/g, 32.09μg/g, 291.77μg/g and 22.44μg/g, respectively. Based on comprehensive analyses of the spatial distribution of heavy metal content in surface sediments, the single factor pollution index, Nemero comprehensive index, geoaccumulation index and potential ecological risk index, the pollution degrees of the studied area and its potential ecological risk were evaluated. The pollution levels of the geoaccumulation index were in the order of Zn > Cu > Cd > Ni > Pb > Cr, the potential ecological risk were in the order of Cd > Cu > Pb > Zn > Ni > Cr. The pollution levels of heavy metal were in the order of the main channel of Yellow River > the estuary of Daxia River > the cross section of Yellow River. Zn, Cu and Cd were the most important pollutional factors in surface sediments in southwest Liujiaxia reservoir. Comprehensive correlation analysis and principal component analysis showed that Zn and Cu mainly come from domestic or industrial pollution while Cd mainly comes from pollution caused by industrial and agricultural activities.

Key words: surface sediments; heavy metals; pollution levels; risk assessment; Liujiaxia Reservoir