

# 小秦岭太峪水系沉积物重金属污染生态危害评价

张江华, 王葵颖, 徐友宁, 吴耀国, 陈华清

ZHANG Jianghua, WANG Kuiying, XU Youning, WU Yaoguo, CHEN Huaqing

西北工业大学应用化学系, 陕西 西安 710072

Department of Applied Chemistry, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China

**摘要:**以金矿开发影响的黄河二级支流太峪水系沉积物为研究对象,沿河采集 16 个表层沉积物样品,分层采集垂向剖面 10 件水库沉积物样品,测定了样品中重金属元素 Hg、Pb、Cd、Cr、As、Cu 和 Zn 的含量,采用 Hakanson 潜在生态指数法和 Tomlinson 污染负荷指数法评价重金属元素污染程度和潜在生态风险。结果表明,矿业活动是太峪水系沉积物重金属元素污染的主要因素;变异系数、富集系数和最高污染系数均反映 Hg、Pb、Cd 是太峪水系沉积物的特征污染重金属元素,Cr 和 As 的质量分数接近地区背景值;太峪水系表层沉积物受到重金属元素的极强污染,山区段污染较山外更严重;整个流域的 Hg、Pb、Cd 具有很强的潜在生态危害,Cr、As、Zn 的潜在生态危害轻微;太峪水系沉积物垂向各层沉积物都受到重金属元素的极强污染,生态问题以 Hg、Pb、Cd 的潜在生态危害为主,其污染和生态危害程度都高于流向上的沉积物。潜在生态危害指数评价突出了不同元素的毒性和危害程度,而污染负荷指数法侧重于样本空间上的污染程度,二者互补使用有利于实际问题的全面评价。

**关键词:**重金属;潜在生态危害指数;污染负荷指数;金矿区;水系沉积物

**中图分类号:**P641 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2018)12-2224-09

**Zhang J H, Wang K Y, Xu Y N, Wu Y G, Chen H Q. Ecological hazard assessment of heavy metal pollution in sediments of Taiyu water system in Xiaoqingling. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(12):2224-2232**

**Abstract:** On the basis of the sediments of Taiyu River, a secondary tributary of the Yellow River affected by the gold mine development, 16 surface sediment samples were collected along the river and 10 reservoir sediment samples in vertical section were collected in layers. The values of heavy metals Hg, Pb, Cd, Cr, As, Cu and Zn in the Taiyu River sediments were determined. The Hakanson potential ecological index method and the Tomlinson pollution load index method were used to evaluate the degree of heavy metal pollution and potential ecological risk. The results show that the mining activities are the main factors of heavy metal pollution in the sediments of Taiyu River system. The coefficient of variation, enrichment coefficient and maximum pollution coefficient all show that heavy metals are the characteristic elements of Hg, Pb and Cd in the sediments of Taiyu water system, and the mass fraction of Cr and As is close to the background value of the region. The surface sediments of Taiyu water system are affected by extremely heavy pollution of heavy metals, and are more seriously polluted in the mountain section than in other areas. Hg, Pb and Cd in the whole basin have strong potential ecological risk, and the potential ecological risk of Cr, As and Zn is slight. Sediments are extremely polluted by heavy metals. The ecological problems are mainly the potential ecological hazards of Hg, Pb and Cd, and their pollution and ecological damage are all higher than deposits along the flow. The evaluation of potential ecological risk index highlights the toxic and harmful levels of different elements, the Pollution Load Index focuses on the degree of contamination of the sample space, and the complementary use of both is conducive to a comprehensive evaluation of practical problems.

**Key words:** heavy metals; potential ecological risk index; pollution load index; gold mining area; sediment of water

收稿日期:2018-01-10;修订日期:2018-06-20

资助项目:中国地质调查局项目《秦岭及宁东矿产资源集中开采区地质环境调查》(编号:DD20160336)、《青海矿业开发地质环境效应调查》(编号:1212011220224)、科技部重点研发计划《矿山开采与地质环境监测评价防治标准研究》(编号:2017YFF0206803)和自然资源部行业科研专项《矿集区地球化学环境累积效应及预警研究》(编号:20111020)

作者简介:张江华(1979-),男,在读博士生,教授级高工,从事矿山地质环境研究与治理工作。E-mail: 53235266@qq.com

通讯作者:吴耀国(1967-),男,博士,教授,从事水-土壤污染过程及修复研究。E-mail: wuygal@nwpu.edu.cn

河流是重要的地表水资源,河水及沉积物质量的好坏直接或间接地影响其排入水体的环境质量<sup>[1-3]</sup>。由于水体中重金属污染物不易溶解,大部分会迅速地结合到悬浮物和沉积物中,而结合到悬浮物中的重金属当负荷超过搬运能力时,最终也转入沉积物中,导致沉积物中重金属元素含量远高于相应水相中的质量分数,且稳定性高,故沉积物中重金属元素的分布情况可以反映所在流域的污染状况<sup>[4-5]</sup>。而沉积物中重金属在一定的条件下会重新释放到上覆水中,容易造成水体二次污染,对水环境及其生态系统具有较大的危害<sup>[6-8]</sup>,所以水系沉积物重金属污染评价是地表水环境污染的研究重点和当前研究热点之一<sup>[9-12]</sup>。

太峪河是黄河(陕豫接壤段)南岸一条二级水系,不仅承担着沿岸大量基本农田的灌溉任务,而且中上游的太要水库曾经是下游十余万居民的饮用水源。但太峪河全程流经小秦岭金矿开发区,上游河段发现多处石英脉型金矿的开采活动,中下游分布众多作坊式浮选、氰化提金点和尾矿渣场。因此,评价矿业活动对太峪水系沉积物产生的环境污染危害和潜在生态风险,既可为太峪流域乃至小秦岭金矿带的环境污染防治提供技术参考,也对黄河水质安全保护具有重要的现实意义。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

太峪河发源于潼关金矿开采(山)区,沟口地理坐标北纬 34°28'17"、东经 110°17'49"。山内太峪主沟呈北北东向,长约 14.8km,流域面积 26.37km<sup>2</sup>,纵坡降 9.41%,海拔 650~1650m。峪道整体呈“U”形谷,沟底宽 30~80m,山坡坡角 35°以上。出山口有人工修筑的太要水库。出山后约 6km 与善车峪河汇流成寺底河,又经 3.6km 后在三河口汇入双桥河,最后于河南省豫灵镇南城子村注入黄河,全长 34.3km。

太峪河上游山区为森林水源涵养区,针阔叶混交次生林、灌木林及天然牧草发育,植被覆盖度 76.9%;区内发育太古宙深变质的黑云斜长片麻岩夹斜长角闪片麻岩,为金矿开采区,以含金石英脉为开采对象,以井工开采为主要工艺,造成采矿废渣遍布山坡、沟谷。出山后,太峪河流域的中下游主要为农业生产区,主要发育山前冲洪积斜塬、黄

土沟壑残塬、黄河冲积平原等地形地貌,矿业布局上属于金矿的浮选和氰化区,历史上部分河段沿河存在众多的“三小”(“小浮选”、“小氰化”、“小汞碾”)活动,将大量含重金属元素的氰化渣、汞碾渣倒入河道,改变了河水水质和底泥自然组成与结构。

### 1.2 样品采集与测试

沿河流方向、按照 1 个/2km 的间距,采集太峪水系沉积物样品,各支流汇集点和污染源下方加密控制,共采集 16 件样品(图 1)。采样深度 0~20cm,采集的样品以水分较低的淤泥为主,将水分挤压排出后,装入广口瓶内密封,标明编号、地点、时间、采样人等采集信息,填写“水系沉积物样品采集表”,记录采样点地理、地形、水文、污染源等。

多年的河流沉积在太峪水库形成了厚达数米的淤泥。为了解不同深度沉积物重金属的分布特征,在水库进水口侧面淤泥层开挖一个深 170cm 的垂向剖面;受矿业活动影响,该剖面分层现象显著,根据颜色、成分、颗粒的不同,对 0~165cm 的淤泥,

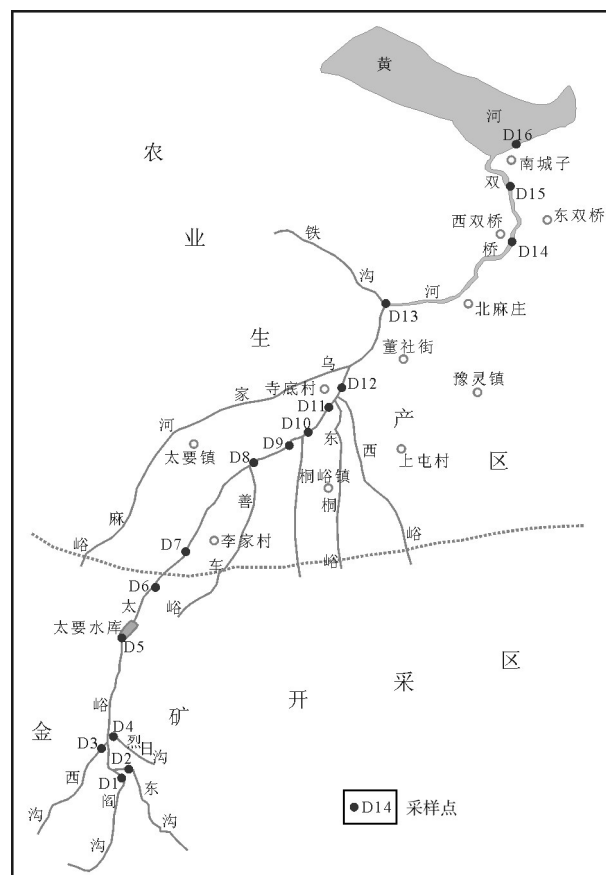


图 1 样品采集示意图

Fig. 1 Diagrammatic map showing sample collection

从上至下分层采集10件沉积物样品。

为了对比评价金矿开采对河流底泥重金属富集的影响,在邻区(华阴市)无矿业影响流域(背景区)采集4件河流底泥,将其重金属元素平均值作为评价对照值。

水系沉积物样品风干后,用高铝钵粉碎,搅拌均匀,使样品的粒度达到 $d=0.097\text{mm}$ ( $<200$ 目)。称取1~2g样品于光滑瓷坩埚中灼烧1~2h后,用氢氟酸、高氯酸分解,制备成5%的盐酸溶液,利用原子吸收分光光度计测定Cu、Pb、Cr、Zn质量分数,其中Cu、Pb用原子吸收背景校正测定;吸取部分溶液,在硫酸-硫酸钠溶液中测定Cr;将溶液稀释5倍,测定Zn。称取0.25g样品用盐酸、硝酸分解,制备成2%的硝酸溶液,直接进样,用ZEEMAN/5000型原子吸收分光光度计测定Cd含量。称取一定量的样品用稀王水在水浴上加热分解,在王水介质中,以空气作载气,产生的汞原子蒸气经无水氯化钙干燥管导入测汞仪吸收管中,在253.7nm处进行冷原子吸收测定,记录峰值吸光度。使用仪器为AFS-230E(原子荧光)测定Hg的质量分数。称取0.1~1g样品用王水分解,吸取部分清液,用硫脲-抗坏血酸作预还原剂,使五价砷还原为三价,再用硼氢化钾还原生成氢化物,然后使用WFY-3型无色散原子荧光仪测定As含量。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 潜在生态危害指数法

采用Lars Hakanson潜在生态危害指数法对水系沉积物重金属的生态危害进行了评价。潜在生态危害指数集中反映了表层底泥重金属的含量、种类、毒性水平,以及水体对重金属污染的敏感性等<sup>[13-14]</sup>。Hakanson<sup>[13]</sup>认为,影响潜在生态危害指数的因素有:①表层沉积物重金属的浓度,即潜在生态危害指数值应随重金属污染程度的加重而加重;②重金属污染的种类数,即受多种重金属污染物的沉积物的潜在生态危害指数,应高于只受少数几种重金属污染的沉积物;③重金属的毒性水平,即毒性高的重金属对潜在生态危害指数的数值有较大的贡献;④生态对重金属污染的敏感性,即对重金属污染敏感性大的水体应有较高的潜在生态危害指数值。

以Lars Hakanson提出的现代工业化前正常颗粒沉积物中重金属元素的最高背景值为参比值,根

据潜在生态危害指数法,讨论人类活动对研究区生态的影响。现代工业化前颗粒沉积物重金属的背景值见表1。

首先,计算太峪河流域各监测点沉积物重金属的富集系数:

$$C_r^i = C_m^i / C_n^i$$

式中: $C_m^i$ 为沉积物金属浓度的实测值; $C_n^i$ 为计算所需的参比值; $C_r^i$ 为重金属的富集系数。

某一区域底泥中第*i*种金属的潜在生态危害系数 $E_r^i$ 及底泥中多种重金属的潜在生态危害指数 $R_i$ 可分别表示为:

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_r^i$$

$$R_i = \sum_{i=1}^n E_r^i$$

式中: $T_r^i$ 为重金属*i*的毒性系数,反映其毒性水平和生物对其污染的敏感程度; $C_r^i$ 为富集系数。常见几种重金属的毒性系数和生态危害程度的划分标准见表1、表2

#### 1.3.2 污染负荷指数法

采用Tomlinson等提出的污染负荷指数(Pollution Load Index, PLI)法对重金属污染进行评价,该指数法由评价区域所包含的多种重金属成分共同构成,直观地反映多种重金属对环境污染的贡献及其在时间、空间上的变化趋势<sup>[15-16]</sup>。计算方法如下:

(1)某一点的PLI值计算方法

$$C_{Pi} = C_i / C_{0i}$$

式中, $C_{Pi}$ 为重金属*i*的最高污染系数; $C_i$ 为沉积

表1 重金属背景参考值和毒性系数

Table 1 The background reference and toxicity coefficients of heavy metals

元素	Hg	Pb	Cd	Cr	As	Cu	Zn
$C_0/(mg \cdot kg^{-1})$	0.25	25	0.50	60	15	30	80
毒性响应系数	40	5	30	2	10	5	1

表2 潜在生态风险指数( $R_i$ )分级标准

Table 2 Graduation standard of  $R_i$

生态危害系数( $E_r^i$ )或指数( $R_i$ )	生态危害程度
$E_r^i < 40$ 或 $R_i < 150$	轻微
$40 \leq E_r^i < 80$ 或 $150 \leq R_i < 300$	中等
$80 \leq E_r^i < 160$ 或 $300 \leq R_i < 600$	强
$160 \leq E_r^i < 320$ 或 $R_i > 600$	很强



物中重金属元素*i*的实测值; $C_{0i}$ 为重金属元素*i*的背景值(对照值)。

$$PLI = \sqrt[n]{C_{F1} \times C_{F2} \times C_{F3} \times \dots \times C_{Fn}}$$

式中:PLI为某点的污染负荷指数;*n*为参加评价的重金属类数。

(2)某一区(流)域的PLI值计算方法

$$PLI_{area} = \sqrt[n]{PL_1 \times PL_2 \times PL_3 \times \dots \times PL_n}$$

式中: $PLI_{area}$ 为某区(流)域的污染负荷指数;*n*为该区(流)域所包含的采样点个数。污染负荷指数一般分为4个等级(表3)。

污染负荷指数法中一般多采用全球页岩平均值作为沉积物中重金属元素背景值。本文为突出矿业活动的影响,采用邻区对照区沉积物重金属元素平均值作为评价标准<sup>[17]</sup>(表4)。

## 2 结 果

### 2.1 水系沉积物重金属元素含量

#### 2.1.1 流向上重金属元素含量

沿太峪河从源头到入黄(河)口对其水系沉积物进行采样和测试,其重金属元素含量特征见表5。

从重金属质量分数平均值看,太峪河流沉积物中元素含量排序为:Pb>Zn>Cu>Hg>Cr>Cd>As,Pb、Zn含量显著高于其他元素,是最主要的重金属元素。Pb含量在588~21825mg/kg之间,平均值5008.44mg/kg;Zn含量处于85~9000mg/kg之间,平均值为1888.63mg/kg。变异系数反映了总体样本中单个采样点的平均变异程度,一定区域内重金属元素含量的变异大小,可以反映该区域内重金属元素的分布和污染程度差异。太峪水系沉积物中Cd、Hg、Zn和Pb的变异系数均大于1,表明这几种元素在沉积物中的分布差别较大,可能是主要的污染元素。

空间上,从源头至出山口,河流底泥中Hg、Pb、Cd、Cu、Zn五种元素含量及其变化呈明显的规律性(图2):各点重金属元素含量变化具有低-高-低的特点;在西沟,底泥中Hg、Pb、Zn均达到最大值,经太峪水库沉淀后,至出山口各重

表3 污染负荷指数等级划分

Table 3 The rank partition of pollution load index

PLI值	<1	1~2	2~3	≥3
污染等级	0	I	II	III
污染程度	无污染	中等污染	强污染	极强污染

表4 重金属元素对照值

Table 4 The contrast values of heavy metal elements

元素	Hg	Pb	Cd	Cr	As	Cu	Zn
对照值	0.27	47.58	0.28	79.25	15.6	28.45	91.2

金属元素含量均趋于最小值,说明水库起到了截污作用。河流出山谷后,底泥中重金属元素含量明显回升(庄头村),而后趋于缓和,到豫灵镇西双桥一带再次出现富集,随后汇入黄河,浓度降低。结合农业生产区普遍的“三小”浮选提金及其废渣分布,发现太峪(山外段)水系沉积物重金属元素的2次富集均由矿业活动影响增强引起。

#### 2.1.2 垂向上重金属元素含量

重金属元素质量分数在水库上下游出现较大变化,说明太峪水库具有截污作用,重金属元素在此可能呈现累积趋势。表6列出了太要水库沉积物垂向分层样品的重金属元素测试结果。

从表6可以看出,太要水库沉积物中依然是Pb、

表5 太峪水系沉积物重金属元素含量

Table 5 The content of heavy metals in the sediments of Taiyu River

	mg/kg						
元素	Hg	Pb	Cd	Cr	As	Cu	Zn
范围	0.68~245	588~21825	0.71~89.6	17.8~96.4	0.88~10.1	53.3~1675	85~9000
平均值	42.21	5008.44	17.66	47.44	3.94	492.82	1888.63
标准差	66.8	6458.81	28.45	23.76	3.29	485.47	2981.77
变异系数	1.58	1.29	1.61	0.50	0.83	0.99	1.58

表6 太要水库沉积物剖面重金属元素含量

Table 6 The content of heavy metals in the sediments of Taiyao reservoir

	mg/kg						
元素	Hg	Pb	Cd	Cr	As	Cu	Zn
范围	3.85~278	1130~25100	4.2~101.8	15.1~50.6	0.78~4.16	83~1530	1550~10625
平均值	90.995	10160	46.62	28.81	2.262	789.3	4995
标准差	80.42	7323.85	30.64	11.90	0.93	445.10	3092.84
变异系数	0.88	0.72	0.66	0.41	0.41	0.56	0.62
垂向/横向	2.16	2.03	2.64	0.61	0.57	1.60	2.64

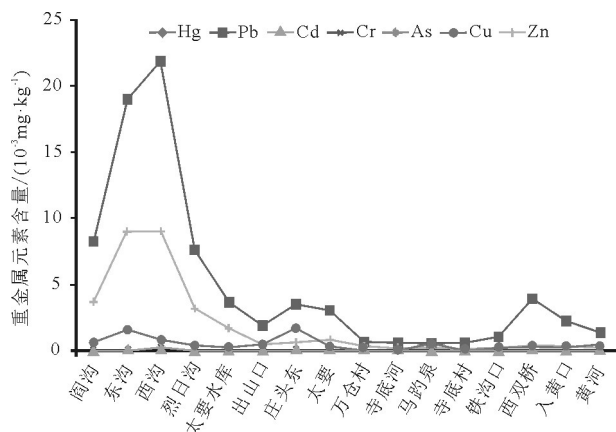


图2 太峪水系沉积物重金属元素含量变化

Fig. 2 The content trends of heavy metals in the sediments of Taiyu River

Zn平均含量最高,元素排序也与横向上基本一致,只是水库沉积物中的Cd超过了Cr的含量;而且水库沉积物Hg、Pb、Cd、Cu、Zn的平均含量均明显高于河流横断面沉积物的值,分别是后者的1.6~2.64倍,再次说明水库对水系沉积物重金属具有明显的截污作用。

对比不同层位各元素的含量发现,Pb、Hg、Cd、Cu和Zn含量在16~30cm、35~46cm、77~84cm、122~150cm出现了4次高峰,且其峰值随深度的增加而降低。结合不同层位的物理成分判断,可能是上部沉积物以矿浆泥为主,而下部淤泥以河流的自然冲洪积物为主。反映近几十年矿业开发对环境造成显著的影响。

## 2.2 潜在生态危害指数评价

### 2.2.1 流向上水系沉积物的生态危害

采用潜在生态危害指数法,计算出水系沉积物重金属元素的富集系数(表7)。

从富集系数看,整个太峪河流域除As外,其余重金属元素均不同程度地受到现代工业化进程的影响,在水系沉积物中均存在富集。其中Hg、Pb富集最明显,最小的也为工业化前的2.72倍。Cd、Cu和Zn在河流底泥中的富集较显著,分别平均富集35.31、16.43、23.61倍;Cr在个别监测点出现轻微富集,整体上重金属元素变化较小,表现原生地球化学背景值。

在地域上,整条太峪水系沉积物重金属元素均

表7 太峪水系沉积物重金属元素富集系数

Table 7 The concentration factor of heavy metals in the sediments of Taiyu River

位置	Hg	Pb	Cd	Cr	As	Cu	Zn
阎沟	130.40	330.00	57.00	0.64	0.13	19.93	46.25
东沟	572.00	758.00	179.20	1.61	0.22	52.50	112.50
西沟	980.00	873.00	166.20	1.04	0.07	29.17	112.50
烈日沟	408.00	306.00	61.20	0.30	0.15	14.67	39.38
太要水库	163.20	150.00	33.20	1.05	0.31	9.83	21.88
出山口	130.40	77.20	10.44	0.92	0.09	11.00	6.88
庄头东	44.80	140.20	8.80	0.54	0.21	55.83	7.43
太要镇北	40.80	123.60	17.00	0.48	0.35	13.53	10.31
万仓村	2.72	28.76	10.88	0.57	0.06	2.69	4.61
寺底河	22.28	24.40	1.80	1.19	0.07	1.78	1.51
马驹泉	17.20	23.52	2.44	0.52	0.09	11.73	1.06
寺底村	18.20	24.76	1.42	0.49	0.08	3.20	2.06
铁沟口	36.56	42.20	2.44	0.95	0.58	7.00	1.86
西双桥	48.80	158.20	5.20	0.49	0.48	9.03	4.38
入黄口	45.20	92.00	5.80	0.41	0.67	10.67	3.44
黄河	40.80	53.56	2.00	1.48	0.65	10.27	1.69
平均值	168.84	200.34	35.31	0.79	0.26	16.43	23.61

存在富集现象,并且山区流域水系沉积物重金属元素富集程度明显强于山外平原河段。说明现代工业化进程对研究区原生地球化学背景的改变是普遍的,山区密集的矿业活动造成的影响显著,而山外的元素富集来源于现代化农业生产的长期影响,其程度不及矿业活动,进一步阐明了矿业活动是区内主要的污染因素。

在已知富集系数的基础上,参照不同重金属元素的毒性系数,以现代工业化前沉积物中重金属元素最高背景值为参照计算潜在生态危害系数和指数,结合表2,分单元素潜在生态危害系数和多元素潜在生态危害指数评价重金属元素生态危害程度(表8)。

从潜在生态危害系数看,Hg、Pb、Cd对生态系统的潜在危害达到了很强级别,平均值分别超过生态危害系数最高临界值的21.1、3.13和3.31倍,尤其Hg的最小潜在生态危害系数( $E_i = 108.8$ )也达到了强危害程度,Cu对生态系统的潜在危害程度强,Cr、As、Zn三种元素的潜在生态危害程度轻微,尚未对太峪水系生态系统造成威胁。观察太峪水系沉积物的潜在生态危害指数发现,除太要镇万仓村重金

表 8 太峪水系沉积物重金属元素潜在生态危害系数( $E_i$ )和指数( $R_i$ )  
Table 8 Potential ecological harm index and factor of heavy metals in the sediments of Taiyu River

位置	$E_i$							$R_i$	等级
	Hg	Pb	Cd	Cr	As	Cu	Zn		
阎沟	5216	1650	1710	1.28	1.3	99.65	46.25	8724.48	很强
东沟	22880	3790	5376	3.22	2.2	262.5	112.5	32426.42	很强
西沟	39200	4365	4986	2.08	0.7	145.85	112.5	48812.13	很强
烈日沟	16320	1530	1836	0.6	1.5	73.35	39.38	19800.83	很强
太要水库	6528	750	996	2.1	3.1	49.15	21.88	8350.23	很强
出山口	5216	386	313.2	1.84	0.9	55	6.88	5979.82	很强
庄头东	1792	701	264	1.08	2.1	279.15	7.43	3046.76	很强
太要镇北	1632	618	510	0.96	3.5	67.65	10.31	2842.42	很强
万仓村	108.8	143.8	326.4	1.14	0.6	13.45	4.61	598.80	强
寺底河	891.2	122	54	2.38	0.7	8.9	1.51	1080.69	很强
马跑泉	688	117.6	73.2	1.04	0.9	58.65	1.06	940.45	很强
寺底村	728	123.8	42.6	0.98	0.8	16	2.06	914.24	很强
铁沟口	1462.4	211	73.2	1.9	5.8	35	1.86	1791.16	很强
西双桥	1952	791	156	0.98	4.8	45.15	4.38	2954.31	很强
入黄口	1808	460	174	0.82	6.7	53.35	3.44	2506.31	很强
黄河	1632	267.8	60	2.96	6.5	51.35	1.69	2022.30	很强
平均值	6753.4	1001.69	1059.41	1.59	2.63	82.13	23.61	-	-
等级	很强	很强	很强	轻微	轻微	强	轻微	-	-

属元素危害程度为强外,其余河段重金属元素复合污染对生态系统的危害均达到最高级别。分析认为,Hg、Pb、Cd的潜在生态危害造成了整条水系生态的恶化,即太峪河的生态问题就是这3种元素的复合污染。

2.2.2 垂向上水系沉积物的生态危害

表9列出太要水库沉积物中重金属元素的富集系数,分析发现Cr和As元素在不同深度的沉积物中均未出现富集现象。而Hg、Pb、Cd、Cu和Zn的富集系数平均值均高于20,Hg和Pb的富集系数达到100以上,在水库中出现显著的富集。对比太峪河流向上沉积物重金属元素的富集系数,水库沉积物中重金属元素之间出现了更大的分异现象,即污染元素富集程度更高,非污染元素的质量分数更接近背景参比值。

太要水库沉积物中重金属元素的潜在危害系数说明(表10),除Zn的潜在危害等级达到中等,强于流向沉积物中Zn的轻微级外,垂向上其他重金属元素的潜在生态危害与流向上生态危害等级基本一致,但 $E_i$ 的数值明显高于流向上的危害系数,说明水库沉积物各元素的潜在危害强于流向上表

层沉积物的生态危害。剖面上各个层位的潜在生态危害指数均达到最高的很强等级,进一步反映出水库的截污作用和更大的潜在生态风险。

2.3 污染负荷指数法评价

2.3.1 流向上水系沉积物重金属的污染负荷

基于污染负荷指数法,计算得到各重金属元素最高污染系数及污染负荷指数见表11。太峪流域水系沉积物的PLI值为6.49,说明太峪流域整体上受到极强的污染;山区段太峪河PLI值为15.9,区域和各点的污染程度均达到极强;山外段太峪河PLI值为3.79,区域上达到极强污染程度,但3个点污染程度为强,1个点污染为中等。对比山区内、外河段,虽然 $PLI_{area}$ 值均大于3,但山外 $PLI_{area}$ 只有山区值的1/4,且 $PLI_{point}$ 值也明显低于山区值,说明山外水系沉积物重金属元素的污染负荷轻于山区。

从最高污染系数看,Hg、Pb的系数平均值达到100以上,Cd的系数平均值大于50,Cu和Zn的平均系数高于10,

而Cr、As系数基本小于1,说明Hg、Pb、Cd、Cu和Zn是太峪水系沉积物中的特征污染因子。

2.3.2 垂向上水系沉积物重金属元素的污染负荷

污染负荷指数评价结果表明(表12),垂向上太

表 9 太要水库沉积物重金属元素富集系数  
Table 9 The concentration factor of heavy metals in the sediments of Taiyao reservoir

深度/cm	Hg	Pb	Cd	Cr	As	Cu	Zn
0~8	371.2	334	70.4	0.84	0.28	18.67	41.25
18~16	315.6	408	106.4	0.42	0.17	28.33	79.69
16~30	1112	1004	203.6	0.37	0.21	51.00	132.81
30~35	282	388.4	65.4	0.25	0.16	31.67	36.56
35~46	624	738	185	0.45	0.16	40.67	118.75
46~77	90.8	113.2	43.8	0.35	0.14	11.67	28.75
77~84	282	355.6	106.4	0.41	0.10	31.33	67.19
84~122	78.8	149.6	49.4	0.31	0.10	12.00	32.81
122~150	468	528	93.6	0.74	0.14	35.00	67.19
150~165	15.4	45.2	8.4	0.66	0.05	2.77	19.38
均值	363.98	406.4	93.24	0.48	0.15	26.31	62.44

表10 太要水库沉积物重金属元素潜在生态危害系数和指数  
Table 10 Potential ecological harm index and factor of heavy metals  
in the sediments of Taiyao reservoir

深度/cm	$E_i$							$R_i$	等级
	Hg	Pb	Cd	Cr	As	Cu	Zn		
0~8	14848	1670	2112	1.69	2.77	93.33	41.25	18769.04	很强
18~16	12624	2040	3192	0.84	1.73	141.67	79.69	18079.93	很强
16~30	44480	5020	6108	0.73	2.08	255.00	132.81	55998.62	很强
30~35	11280	1942	1962	0.50	1.56	158.33	36.56	15380.96	很强
35~46	24960	3690	5550	0.89	1.56	203.33	118.75	34524.53	很强
46~77	3632	566	1314	0.71	1.39	58.33	28.75	5601.18	很强
77~84	11280	1778	3192	0.82	1.04	156.67	67.19	16475.71	很强
84~122	3152	748	1482	0.62	1.04	60.00	32.81	5476.47	很强
122~150	18720	2640	2808	1.48	1.39	175.00	67.19	24413.06	很强
150~165	616	226	252	1.32	0.52	13.83	19.38	1129.05	很强
平均值	14559.2	2032	2797.2	0.96	1.51	131.55	62.44	-	-
等级	很强	很强	很强	轻微	轻微	强	中等	-	-

要水库沉积物从上至下重金属元素污染程度都属于极强,污染等级都达到Ⅲ级。PLI<sub>point</sub>值范围为3.49~33.31,相差9.54倍;最大值出现在剖面上的16~30cm,最小值出现在剖面底部。从垂向剖面整

体看,50cm以上沉积物重金属元素污染高于50cm之下沉积物。各重金属元素的最高污染系数,反映Hg、Pb、Cd污染最高,平均污染系数超过100,Zn平均污染系数高于50,Cu系数的平均值超过20,Cr和

表11 太峪水系沉积物重金属元素最高污染系数和污染负荷指数  
Table 11 The highest pollution factor and pollution load index of heavy  
metals in the sediments of Taiyu River

位置	$C_{Fi}$							PLI (点)	污染 程度	PLI (面)	PLI (区域)
	Hg	Pb	Cd	Cr	As	Cu	Zn				
阎沟	120.74	173.39	101.79	0.48	0.12	21.02	40.57	14.02	极强	15.9	6.49
东沟	529.63	398.28	320.00	1.22	0.21	55.36	98.68	36.93	极强		
西沟	907.41	458.70	296.79	0.78	0.07	30.76	98.68	29.58	极强		
烈日沟	377.78	160.78	109.29	0.22	0.14	15.47	34.54	14.13	极强		
太要水库	151.11	78.81	59.29	0.79	0.30	10.37	19.19	11.90	极强	3.79	
出山口	120.74	40.56	18.64	0.70	0.09	11.60	6.03	6.28	极强		
庄头东	41.48	73.67	15.71	0.41	0.20	58.88	6.51	7.63	极强	3.79	
太要镇北	37.78	64.94	30.36	0.36	0.34	14.27	9.05	7.36	极强		
万仓村	2.52	15.11	19.43	0.43	0.06	2.84	4.05	2.14	强		
寺底河	20.63	12.82	3.21	0.90	0.07	1.87	1.33	2.00	强		
马趵泉	15.93	12.36	4.36	0.39	0.09	12.37	0.93	2.31	强		
寺底村	16.85	13.01	2.54	0.37	0.07	3.37	1.81	1.91	中等		
铁沟口	33.85	22.17	4.36	0.72	0.56	7.38	1.63	3.98	极强		
西双桥	45.19	83.12	9.29	0.37	0.46	9.53	3.84	5.78	极强		
入黄口	41.85	48.34	10.36	0.31	0.65	11.25	3.02	5.44	极强		
黄河	37.78	28.14	3.57	1.12	0.63	10.83	1.48	4.59	极强		
平均值	156.33	105.26	63.06	0.60	0.25	17.32	20.71				



表 12 太要水库沉积物重金属元素最高污染系数和污染负荷指数  
Table 12 The highest pollution factor and pollution load index  
of heavy metals in the sediments of Taiyao reservoir

深度/cm	$C_{Fi}$							PLI (点)	污染 程度	PLI (面)
	Hg	Pb	Cd	Cr	As	Cu	Zn			
0~8	343.70	175.49	125.71	0.64	0.27	19.68	36.18	19.08	极强	
18~16	292.22	214.38	190.00	0.32	0.17	29.88	69.90	20.09	极强	
16~30	1029.63	527.53	363.57	0.28	0.20	53.78	116.50	35.31	极强	
30~35	261.11	204.08	116.79	0.19	0.15	33.39	32.07	15.23	极强	
35~46	577.78	387.77	330.36	0.34	0.15	42.88	104.17	28.87	极强	
46~77	84.07	59.48	78.21	0.27	0.13	12.30	25.22	8.87	极强	15.21
77~84	261.11	186.84	190.00	0.31	0.10	33.04	58.94	17.77	极强	
84~122	72.96	78.60	88.21	0.23	0.10	12.65	28.78	8.86	极强	
122~150	433.33	277.43	167.14	0.56	0.13	36.91	58.94	22.87	极强	
150~165	14.26	23.75	15.00	0.50	0.05	2.92	17.00	3.49	极强	
平均值	337.02	213.54	166.50	0.36	0.15	27.74	54.77			

As 平均污染系数小于 1, 因此 Hg、Pb、Cd、Cu 和 Zn 是水库沉积物垂向剖面上的特征污染元素。

### 3 讨论

结合研究区含金石英脉型金矿选矿尾渣中的重金属含量, 分析河流底泥中重金属元素含量特征(表 13)发现, 底泥中重金属元素含量与尾矿渣中重金属元素含量变化趋势完全一致, 反映河流底泥重金属元素与尾矿渣具同源性。前人研究发现, 潼关地区 Hg 元素地球化学背景较低, 认为河流、土壤、大气环境介质中 Hg 元素主要来源于混汞法、小汞碾提金过程中添加的金属汞, 太峪河流底泥的 Hg 主要来源于矿业活动排至河流的尾渣, Pb、Cd、Cu、Zn 元素除来自金矿石及其围岩的释放外, 受矿业活动影响较大<sup>[18-19]</sup>。

对比 2 种方法的评价结果发现, 流向上, 富集系数和最高污染指数系数一致确定了 Hg、Pb 是太峪水系沉积物影响最明显的重金属元素, 筛选出沉积

物的特征污染因子; 潜在生态危害指数和负荷污染指数均反映出水系沉积物垂向上重金属元素的危害高于流向上沉积物重金属元素的影响, 这是 2 种方法的一致性。另一方面, 因为潜在生态危害系数划分有等级区间, 所以能区分不同重金属元素的危害程度, 而污染负荷指数更强调样本位置(层位)、区域或流域等空间上污染程度的厘定。

潜在生态危害指数法把污染物与其生物毒性联系起来, 通过毒性系数强调了重金属元素对环境产生的生态效应, 量化了单元素的贡献和多种污染物的综合效应; 在考虑重金属元素赋存、迁移、转化规律和区域背景值差异的基础上, 消除了区域差异和异常污染的影响, 但也弱化了局部空间影响程度的评价。污染负荷指数法侧重评价某一点(区域)的沉积物重金属元素综合污染程度和区域综合污染程度, 由评价区域所包含的多种重金属元素共同构成, 使用求积统计法, 对各点的污染程度进行分级, 并筛选对环境污染贡献最大的元素, 同时避免污染指数加和关系造成的误差, 但该方法没有考虑不同污染源引起的背景差别。将 2 种方法结合使用, 能更好地评价和反映水系沉积物重金属元素的影响。

### 4 结论

(1) 矿业活动是太峪水系沉积物重金

表 13 河流底泥及尾矿渣中重金属元素平均含量及其比值  
Table 13 The average content of heavy metals in river sediments  
and tailings slag and its ratio

	Hg	Pb	Cd	Cr	As	Cu
底泥中平均含量 A/(mg·kg <sup>-1</sup> )	42.21	5008.44	17.66	47.44	3.94	492.82
尾矿渣中平均含量 B/(mg·kg <sup>-1</sup> )	55.49	2034.15	2.26	30.55	2.68	393.4
A/B	0.76	2.46	7.81	1.55	1.47	1.25



属元素污染的主要原因;变异系数、富集系数和最高污染系数均反映Hg、Pb、Cd是太峪水系沉积物的特征污染重金属元素。

(2)太峪水系表层沉积物受到重金属元素的极强污染,山区段污染较山外更严重;整个流域的Hg、Pb、Cd具有很强的潜在生态危害,Cr、As、Zn的潜在生态危害轻微。太峪水系沉积物垂向各层沉积物都受到重金属元素的极强污染,生态问题以Hg、Pb、Cd的潜在生态危害为主,其污染和生态危害程度都高于流向上的沉积物。

(3)潜在生态危害指数评价突出了不同元素的毒性和危害程度,而污染负荷指数法侧重于样本空间上的污染程度,二者互补使用有利于实际问题的全面评价。

**致谢:**野外采样和调查得到中国地质调查局西安地质调查中心乔冈博士、柯海玲和刘瑞平高级工程师的热忱帮助,在此表示衷心的感谢。

## 参考文献

- [1]Suresh G, Ramasamy V, Sundarajan M, et al. Spatial and vertical distributions of heavy metals and their potential toxicity levels in various beach sediments from high-background-radiation area, Kerala, India[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 91(1): 389-400.
- [2]Shah B A, Shah A V, Mistry C B, et al. Assessment of heavy metals in sediments near Hazira industrial zone at Tapti River Estuary, Surat, India[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 69(7): 2365-2376.
- [3]张洪, 林超, 雷沛, 等. 海河流域河流富营养化程度总体评估[J]. 环境科学学报, 2015, 35(8): 2336-2344.
- [4]Kim B S M, Salaroli A B, Ferreina P A L, et al. Spatial distribution and enrichment assessment of heavy metals in surface sediments from Baixada Santista, Southeastern Brazil[J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 103(1/2): 333-338.
- [5]Ma X L, Zuo H, Tian M J, et al. Assessment of heavy metals contamination in sediments from three adjacent regions of the Yellow River using metal chemical fractions and multivariate analysis techniques[J]. Chemosphere, 2016, 144: 264-272.
- [6]Cho J, Hyun S, Han J H, et al. Historical trend in heavy metal pollution in core sediments from the Masan Bay, Korea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 95(1): 427-432.
- [7]Salem Z B, Capelli N, Laffray X, et al. Seasonal variation of heavy metals in water, sediment and roach tissues in a landfill draining system pond(Etuefont, France) [J]. Ecological Engineering, 2014, 69: 25-37.
- [8]张菊, 陈明文, 鲁长娟, 等. 东平湖表层沉积物重金属形态分布特征及环境风险评价[J]. 生态环境学报, 2017, 26(5): 850-856.
- [9]白晓龙, 顾卫兵, 杨春和, 等. 通启运河通州段表层底泥重金属污染评价[J]. 工业安全与环保, 2017, 43(3): 103-106.
- [10]李璇琼, 李永树, 卢正. 矿产资源开发的重金属分布特征研究——以雅砻江流域某铜矿区为例[J]. 矿产保护与利用, 2016, 3: 56-63.
- [11]王洪涛, 张俊华, 张天宁, 等. 开封惠济河水系底泥重金属污染与潜在生态风险评价[J]. 环境化学, 2016, 35(8): 1567-1576.
- [12]张江华, 王葵颖, 赵阿宁, 等. 小秦岭金矿区水系沉积物重金属特征研究[J]. 中国地质, 2013, 40(2): 636-642.
- [13]Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sediment logical approach[J]. Water Research, 1980, 14: 975-1001.
- [14]徐争启, 倪师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数法评级中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112-115.
- [15]王婧, 刘桂建, 方婷, 等. 基于污染负荷指数法评价淮河(安徽段)底泥中重金属污染研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2013, 43(2): 97-103.
- [16]高健磊, 王静. 两种河道底泥重金属污染生态危害评价方法比较研究[J]. 环境工程, 2013, 31(2): 119-121.
- [17]范晓婷, 蒋艳雪, 崔斌, 等. 富集因子法中参比元素的选取方法——以元江底泥中重金属污染评价为例[J]. 环境科学学报, 2016, 36(10): 3795-3803.
- [18]张江华, 杨梅忠, 徐友宁, 等. 金矿区水系沉积物重金属含量影响分析[J]. 黄金, 2008, 29(1): 49-51.
- [19]徐友宁, 张江华. 陕西潼关金矿区太峪河底泥重金属元素的含量及污染评价[J]. 中国地质, 2008, 27(8): 1261-1271.