

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2023070601

CSTR:32061.14.hjhx.2023070601

王宇晨, 李鹏, 张洋, 等. 沮河流域河岸带土壤重金属污染评价及来源分析[J]. 环境化学, 2024, 43(12): 4167-4181.

WANG Yuchen, LI Peng, ZHANG Yang, et al. Evaluation and source analysis of heavy metal pollution in riparian soil in Jue River Basin[J]. Environmental Chemistry, 2024, 43 (12): 4167-4181.

## 沮河流域河岸带土壤重金属污染评价及来源分析\*

王宇晨<sup>1</sup> 李鹏<sup>1,2</sup>\*\* 张洋<sup>3</sup> 王博<sup>4</sup> 于国强<sup>5</sup> 张国军<sup>6</sup>  
孟永霞<sup>1</sup> 涂龙杰<sup>1</sup> 刘家亮<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安, 710048; 2. 旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室, 西安, 710048; 3. 西安国际港务区基层工作部, 西安, 710026; 4. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 西安, 710000; 5. 中国地质调查局西安地质调查中心, 西安, 710054; 6. 宁夏回族自治区水土保持监测总站, 银川, 750002)

**摘要** 为了解沮河流域(黄陵段)河岸带土壤重金属特征,在沮河流域(黄陵段)河岸带采集了12个样带共计84个土壤样品,分析了8种重金属(砷(As)、镉(Cd)、铬(Cr)、铜(Cu)、汞(Hg)、铅(Pb)、镍(Ni)和锌(Zn))的含量状况及分布特征,利用单因子指数法、内梅罗综合指数法和地累积指数法对重金属污染程度进行评价,采用潜在生态风险指数法评价研究区生态风险程度,综合Pearson相关性分析和主成分分析法,定性分析8种重金属的来源.结果表明,沮河流域(黄陵段)河岸带土壤中,Pb、Cu、Zn、Ni和As存在轻微富集现象,Cd和Hg的污染最为严重,平均值为 $0.134\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.066\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,点位超标率分别达到了100%和58.3%.Pb、Cd、Zn、Cu和Hg等元素的含量在空间上分布相似,即从上游到下游为先递增后递减的趋势,而Ni和Cr两种元素的含量却呈现先递减后递增的趋势.As元素的含量从上游到下游一直呈递减趋势.3种典型土地利用河岸带的重金属横向分布规律呈现出一定的相似性,均呈现出随着高程的降低先增加后减小的趋势.坡度和径流是影响重金属迁移的重要因素.污染评价和生态风险评价表明,Cd和Hg两种重金属元素存在较高的污染等级,分别达到了Ⅲ级和V级,Cd和Hg两种重金属元素的潜在生态风险较高,其中Cd为Ⅳ级,Hg为V级.相关性分析和主成分分析结果表明,As、Pb、Cd、Cu和Zn主要受农业生产、交通运输、工业生产的影响,为人为源;Cr和Ni的污染源主要为自然源,如地质活动和成土母质;Hg的主要来源为大气沉降.

**关键词** 沮河流域, 河岸带, 土壤重金属, 污染评价, 来源解析.

中图分类号 X-1; O6 文献标识码 A

## Evaluation and source analysis of heavy metal pollution in riparian soil in Jue River Basin

WANG Yuchen<sup>1</sup> LI Peng<sup>1,2</sup>\*\* ZHANG Yang<sup>3</sup> WANG Bo<sup>4</sup> YU Guoqiang<sup>5</sup>  
ZHANG Guojun<sup>6</sup> MENG Yongxia<sup>1</sup> TU Longjie<sup>1</sup> LIU Jialiang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an, 710048, China; 2. State Forestry and Grassland Administration Key Laboratory of Eco-hydrology and Disaster Prevention in Arid Areas, Xi'an, 710048, China; 3. Grassroots Work Department of Xi'an International Port Area, Xi'an, 710026, China; 4. Xi'an Mineral Resources Survey Center, China Geological Survey, Xi'an, 710000, China; 5. Xi'an Geological Survey Center, China Geological Survey, Xi'an, 710054, China; 6. Soil and Water Conservation Monitoring Station of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan, 750002, China)

2023年7月6日收稿(Received: July 6, 2023).

\* 国家自然科学基金(U214320057, 52009103, U2243240, 42177346)和陕西省重点研发计划(2023-ZDLSF-65)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (U214320057, 52009103, U2243240, 42177346) and the Key Research and Development Program of Shaanxi Province (2023-ZDLSF-65).

\*\* 通信联系人 Corresponding author, E-mail: lipeng74@163.com

**Abstract** To understand the characteristics of heavy metals in the riparian zone of Juhe River Basin (Huangling Section), a total of 84 soil samples were collected from 12 transects in the riparian zone of Juhe River Basin (Huangling Section). The content status and distribution characteristics of eight heavy metals (Arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr), copper (Cu), mercury (Hg), lead (Pb), nickel (Ni), and zinc (Zn)) were analyzed. The degree of heavy metal pollution was evaluated using the single factor index method, Nemerro composite index method, and geo-accumulation index method. The potential ecological risk index method was used to assess the ecological risk in the study area. Pearson correlation analysis and principal component analysis were employed to qualitatively analyze the sources of the eight heavy metals. The results showed that Pb, Cu, Zn, Ni, and As were slightly enriched in the riparian soil of Juhe River Basin (Huangling section), while Cd and Hg exhibited the most serious pollution, with exceedance rates of 100% and 58.3% respectively. The spatial distribution of Pb, Cd, Zn, Cu, and Hg showed an increasing trend from upstream to downstream, followed by a decrease, while the content of Ni and Cr decreased first and then increased. The content of As elements decreased from upstream to downstream. The horizontal distribution of heavy metals in the three typical land use riparian zones showed a certain similarity, and all showed a trend of first increasing and then decreasing with the decrease of elevation. Slope and runoff are important factors affecting heavy metal migration. Pollution evaluation and ecological risk assessment showed that the two heavy metal elements of Cd and Hg had high pollution levels, reaching grade III and V, respectively, and the potential ecological risks of Cd and Hg were higher, among which Cd was grade IV and Hg was grade V. The correlation analysis and principal component analysis revealed that As, Pb, Cd, Cu, and Zn were primarily influenced by agricultural production, transportation, and industrial activities, indicating anthropogenic sources. The pollution sources of Cr and Ni were mainly natural, such as geological activities and soil parent materials, while atmospheric deposition was the main source of Hg.

**Keywords** Juhe River basin, riparian zone, soil heavy metals, pollution evaluation, source resolution.

土壤是农业生产和人类赖以生存的基础,也是人类食物与生态环境安全的保障<sup>[1]</sup>.土壤中的重金属具有残留时间长、隐蔽性强、毒性大等特点,并且其可能通过食物链、呼吸吸入、皮肤接触等多种途径间接被人体吸收,对人体健康和生态安全形成威胁.

河岸带是介于陆地与河流之间的过渡地带,承担着河流上、下游之间,地表上、下层之间等多维度的物质与能量迁移和转换功能<sup>[2]</sup>,河岸带生态系统既可能是土壤侵蚀对河流的“源”,也可能是土地利用转换对河流的“汇”.极易受到工业活动、交通运输、地表径流、农业耕作、垃圾堆放和旅游等人类活动的影响,它们均会向环境中释放出大量的重金属,造成河岸带土壤重金属污染,破坏河岸带生态系统平衡,使得河岸带生态系统退化和景观价值功能降低<sup>[3-4]</sup>.

河岸带是河流水体或高地重金属的主要汇集地,对重金属污染尤为敏感<sup>[5-6]</sup>.因此,在这些生态敏感区域中重金属污染问题日益受到关注<sup>[7]</sup>.Diane等<sup>[8]</sup>分析了加拿大南部两条主要河流的河岸带和农业区土壤中元素Pb的分布,发现河岸带土壤中Pb的浓度几乎是农业区的12倍.张杰等<sup>[9]</sup>以太湖流域内为研究对象,通过多元统计分析发现Pb、As和Cu主要受到农业废水和生活污水的影响,Ni、Cu、Cr和Zn受到金属冶炼工业的影响,Hg主要来源于化石的燃放.赵士杰等<sup>[10]</sup>以贵阳市某矿厂周边坡耕地为研究对象,探讨了雨强、坡度对重金属元素迁移的促进作用,结果表明在相同雨强下,颗粒态重金属含量随坡度的增大呈先增大后减小的变化趋势,即存在临界坡度.杜晓丽等<sup>[11]</sup>采用下渗柱试验,对进水速度、pH值等对胶体携带重金属迁移行为的影响做了研究,结果表明进水流速越大,其促进重金属离子迁移的能力越强.胡杰等<sup>[12]</sup>以太原市汾河为研究对象,通过相关性分析和主成分分析对河岸带重金属进行了定性分析.结果表明Zn、Pb和Cd具有同源性,主要受交通运输、农业生产活动和矿业活动等人为源的影响;Hg和Cu来源相似,污染源为工业生产.陆晨遨等<sup>[13]</sup>以呼伦贝尔城郊河岸带和河流沉积物为研究对象,结果表明河岸带的重金属污染程度总体高于河流.

目前,有多种重金属污染评价的方法,常用的有单因子指数法、内梅罗综合指数法、地累积指数法、潜在生态风险指数法.单因子指数法简单易懂,计算简单,但只突出了污染最为严重的重金属元素,削弱了其他重金属元素的影响.内梅罗综合指数法体现出来了多种污染物的综合效应,但有时在评价中由于一些异常点而夸大或削弱一些重金属元素的影响.地累积指数法让重金属的污染级别直观的展现出来,但有时会受到自然成岩作用的影响.潜在生态风险指数法将重金属元素的环境毒性差异引入,对以上3种方法有很好地弥补作用,让重金属元素的生物毒性和相对贡献的比例更好地体现<sup>[14]</sup>.

目前对西北地区资源型城市周边流域河岸带重金属研究较少,尤其是缺少西北地区河岸带重金属的迁移与来源的研究.本文以西北地区资源型城市周边流域河岸带重金属为研究对象,研究了沮河流域(黄陵段)的河岸带重金属分布特征、迁移影响因素、污染现状及来源.以为沮河在黄陵县境内的河岸带土壤重金属的管控和防治提供可借鉴的依据.

## 1 材料与方法(Materials and methods)

### 1.1 研究区概况

沮河,发源于陕甘边界的子午岭上的柏林庄,自西向东横跨陕西省黄陵县境,流经黄陵县上矸子农场和双龙、店头、康崖底、桥山至龙首乡的县河口入北洛河,是黄河的三级支流.沮河在陕西省黄陵县境内全长 128 km,流域面积 2420.4 km<sup>2</sup>.沮河有淤泥河和清河等 5 条较大的支流,长度都在 10 km 以上,属季节性河流.沮河地处内陆,属中温带大陆性季风气候区.年平均气温 9.4 ℃,年最高气温 39.4 ℃,最低气温零下 21.4 ℃;年平均降水量 596.3 mm,年最大降水量 1037.2 mm,年最小降水量 306.0 mm.

### 1.2 采样点布设

针对采样点位的代表性和科学性,结合沮河流域(黄陵段)的水文地质条件、支流汇水及污染源分布状况,将流域划分为上、中、下游三个部分,沿河流方向纵向布设 12 个采样带.流域上游地区植被茂盛,中游地区工矿企业众多,下游乡村城镇众多,在上中下游分别布置了 4 个采样带;其中林地设置 4 条采样带(第 1、3、4、7 采样带),草地设置 4 条采样带(第 2、8、10、12 采样带),玉米地设置 3 条采样带(第 5、6、11 采样带),菜地设置了 1 条采样带(第 9 采样带).每条采样带沿河岸带横向布设 7 个点,从水陆交界线的底泥到河岸带周围的林地、草地和耕地均设点位,7 个点根据河岸带宽度等距离布置.共计采集土壤样品 84 个,所有土壤样品的采集均在 2022 年 10 月份完成.采样带和采样点的布设见图 1,其中图 1(a)为 12 条采样带沿河流方向的分布,图 1(b)为采样带中 7 个采样点的布设.

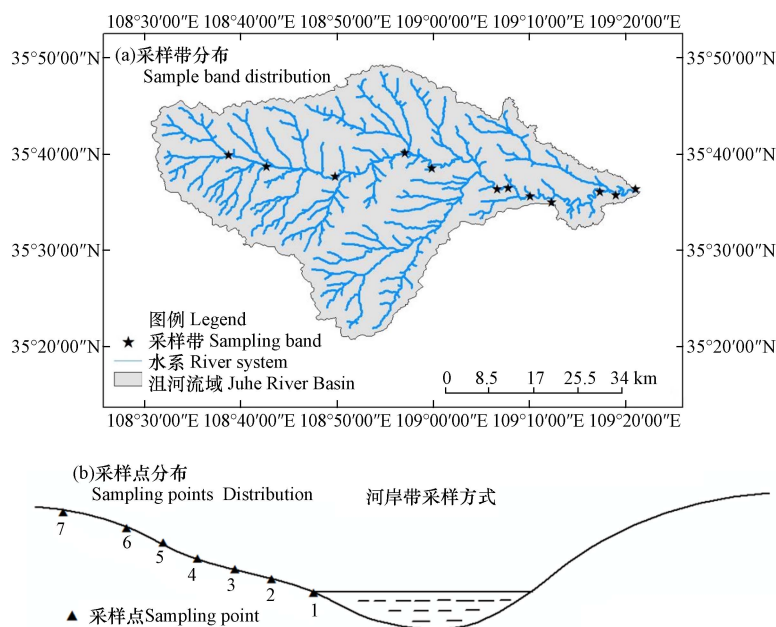


图 1 采样带与采样点分布图

Fig.1 Sampling band and sampling point distribution map

### 1.3 土壤样品的采集

根据《土壤环境监测技术规范》(HJ/T1662004)的相关要求,在采集每个点位的土壤样品时,采用梅花点法采集 0—20 cm 河岸带表层土壤样品,将每个点位的 5 点样品等量混合后,去除碎石、植物根系等杂物,利用四分法保留 0.5 kg 土壤样品并装入聚乙烯密封袋内.每个采样带采集完成后,用 GPS 记录实地坐标.样品经晾晒风干、碾碎后过 100 目的尼龙筛.

### 1.4 土壤样品的测定

土壤 pH 的测定参照《土壤 pH 的测定》(NY-T1377-2007)的测定方法,按土液比 1:2.5 搅拌 30 min 并静置 1 h 后用 pH 计测定.重金属测定实验于 2023 年 3 月 21 日至 4 月 12 日在西北旱区生态水利国家重点实验室进行,使用 HNO<sub>3</sub>—HClO<sub>4</sub>—HF 消解 8 种土壤重金属<sup>[15]</sup>,使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP—OES Optima 8000 型,美国 PerkinElmer 公司)测定 Cu、Zn、Cr、Cd、Pb、Ni 等 6 种重金属,使用原子荧光光度计(AFS—933 型,北京吉天仪器有限公司)测定 As、Hg 两种重金属<sup>[16]</sup>.

### 1.5 重金属污染评价

#### 1.5.1 单因子指数法

采用单因子指数法对研究区重金属污染程度进行单元素评价,单因子污染指数计算公式为:

$$p_i = \frac{c_i}{s_i} \quad (1)$$

式中,  $p_i$  为单因子污染指数;  $c_i$  为污染物实测值;  $s_i$  为污染物的评价标准,以陕西省土壤环境背景值作为评价标准<sup>[12,17]</sup>.

#### 1.5.2 内梅罗综合指数法

内梅罗综合污染指数反映多种污染物的综合污染水平,其计算公式为:

$$p_n = \sqrt{\frac{p_{\max}^2 + p_{\text{ave}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中,  $p_n$  为综合污染指数;  $p_{\max}^2$ 、 $p_{\text{ave}}^2$  分别为单因子污染指数中的最大值以及众单因子污染指数的算术平均值.

单因子及内梅罗综合污染指数的分级原则见表 1.

表 1 单因子及内梅罗综合污染指数的分级原则

Table 1 Grading principle of single-factor and Nemerro composite pollution index

单因子指数( $p_i$ )	污染程度 Pollution degree	综合污染指( $p_n$ )	污染程度 Pollution degree
<1.0	无污染	<0.7	无污染
1.0—2.0	警戒值	0.7—1.0	警戒值
2.0—3.0	轻度污染	1.0—2.0	轻度污染
3.0—5.0	中度污染	2.0—3.0	中度污染
>5.0	重度污染	>3.0	重度污染

#### 1.5.3 地累积指数法

采用德国学者 MULLER G<sup>[18]</sup> 提出的地累积指数法对研究区表层土壤重金属污染程度进行评价,该方法既考虑了自然地质运动过程对背景值的影响,又考虑了人为活动对重金属污染的影响,其计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left[ \frac{c_i}{k \times s_i} \right] \quad (3)$$

式中,  $I_{\text{geo}}$  为重金属的地累积指数,  $c_i$  为重金属的实测值,  $s_i$  为重金属  $i$  的评价标准,以陕西省土壤环境背景值作为评价标准<sup>[12,17]</sup>,  $k$  为消除各地岩石差异可能引起背景值的变化而采用的系数,一般为 1.5<sup>[19]</sup>.地累积指数污染等级划分如表 2 所示.

表 2 地累积指数污染等级划分

Table 2 Classification of geo-accumulation index pollution levels

地累积指数( $I_{geo}$ )	污染程度 Pollution degree	污染等级 Pollution level
$I_{geo} \ll 0$	无	I
$0 < I_{geo} \ll 1$	轻度	II
$1 < I_{geo} \ll 2$	中度	III
$2 < I_{geo} \ll 3$	中度—重度	IV
$3 < I_{geo} \ll 4$	重度	V
$4 < I_{geo} \ll 5$	重度—极度	VI
$I_{geo} > 5$	极度	VII

#### 1.5.4 潜在生态风险指数法

采用 Hakanson<sup>[20]</sup>(1980)潜在生态危害指数法评价研究区土壤重金属生态风险,该方法根据重金属性质及环境行为特点,从沉积学角度对土壤或沉积物中重金属污染进行评价,考虑土壤重金属含量的同时,将重金属的生态效应、环境效应与毒理学联系在一起.其计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n T_i \times \frac{C_i}{B_i} \quad (4)$$

式中,  $C_i$  为土壤中某重金属的实测值;  $B_i$  为某重金属评价标准,以陕西省土壤环境背景值作为评价标准<sup>[12,17]</sup>,  $E_i$  为单项重金属潜在生态风险指数;  $T_i$  为某重金属的毒性响应参数,各重金属毒性系数见表 3; RI 为总的潜在生态风险指数.根据  $E_i$  和 RI,将单因子潜在生态危害和总潜在生态危害进行分级,分级标准见表 4.

表 3 各重金属毒性系数表

Table 3 Table of toxicity coefficients of each heavy metal

元素 Element	Zn	Cr	Cu	Pb	Ni	As	Cd	Hg
毒性系数	1	2	5	5	5	10	30	40

表 4 潜在生态风险指数分级划分

Table 4 Grading of potential ecological risk index

单项潜在生态 风险指数 $E_i$	生态危害程度 Ecological harm degree	生态危害等级 Ecological hazard level	综合潜在生态 风险指数 RI	生态危害程度 Ecological harm degree	生态危害等级 Ecological hazard level
$E_i < 40$	轻微	I	$RI < 150$	轻微	I
$40 \leq E_i < 80$	中等	II	$150 \leq RI < 300$	中等	II
$80 \leq E_i < 160$	强	III	$300 \leq RI < 600$	强	III
$160 \leq E_i < 320$	很强	IV	$600 \leq RI < 1200$	很强	IV
$E_i \geq 320$	极强危害	V	$RI \geq 1200$	极强危害	V

#### 1.6 数据处理与分析

采用 SPSS 26.0 对重金属含量、相关性和主成分进行统计和分析,用 Origin 2022 绘制沮河底泥重金属空间分布图、不同土地利用重金属含量分布图和污染评价结果图,用 ArcGIS 10.2 绘制研究区和采样点布置图.

## 2 结果与讨论(Results and discussion)

### 2.1 重金属含量

沮河流域(黄陵段)河岸带土壤重金属含量见表 5.本次实验测得沮河流域(黄陵段)的表层土壤

PH 的平均值为 8.1, 呈碱性. 表层土壤的重金属含量最大值由小到大的排列顺序为 Cd(0.291 mg·kg<sup>-1</sup>) < Hg(0.773 mg·kg<sup>-1</sup>) < As(13.669 mg·kg<sup>-1</sup>) < Cu(24.714 mg·kg<sup>-1</sup>) < Pb(28.022 mg·kg<sup>-1</sup>) < Ni(32.834 mg·kg<sup>-1</sup>) < Cr(62.379 mg·kg<sup>-1</sup>) < Zn(86.795 mg·kg<sup>-1</sup>). 与陕西省土壤背景值相比, Cd、Pb、Cu、Zn、Ni、As 和 Hg 的最大值均大于陕西省土壤背景值, 点位超标率分别为 100%、7.1%、2.4%、5.9%、1.2%、2.4% 和 58.3%. 与农用地土壤污染风险筛选值相比, Cr、Cd、Pb、Cu、Zn、Ni、As 和 Hg 最大值均小于农用地土壤污染风险筛选值. 这些结果表明, 沮河流域(黄陵段)河岸带土壤重金属污染风险不高, 但仍有一定程度的富集现象.

表 5 沮河流域河岸带重金属含量统计分析表

Table 5 Statistical analysis table of heavy metal content in riparian zone of Jue River basin

重金属 Heavy metals	平均值/ (mg·kg <sup>-1</sup> ) Average	最大值/ (mg·kg <sup>-1</sup> ) Maximum	最小值/ (mg·kg <sup>-1</sup> ) Minimum	标准差 Standard deviation	变异系数/% RSD	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	陕西省背景值/ (mg·kg <sup>-1</sup> ) Background value	点位超标率/% Exceeding standard rate	农用地土壤污染 风险筛选值 (pH>7.5) / (mg·kg <sup>-1</sup> ) Filter values
Cr	49.316	62.379	34.589	5.595	11.3	-0.491	0.119	62.5	0	250
Cd	0.134	0.291	0.101	0.024	18.6	3.382	20.936	0.094	100	0.6
Pb	18.627	28.022	15.282	2.210	11.9	1.655	4.946	21.4	7.1	170
Cu	15.563	24.714	10.051	2.720	17.4	0.409	0.696	21.4	2.4	100
Zn	43.274	86.795	15.233	15.072	34.8	0.680	0.777	69.4	5.9	300
Ni	18.767	32.834	9.818	4.182	22.3	-0.037	0.568	28.8	1.2	190
As	8.057	13.669	4.801	1.561	19.9	0.533	1.008	11.2	2.4	25
Hg	0.066	0.773	0.012	0.101	315.9	4.857	29.862	0.03	58.3	3.4

变异系数是表征样品变异程度的重要尺度, 能在一定程度上反映样品受人为影响的程度<sup>[21]</sup>, 变异系数越大表明重金属空间分布越不均匀, 变异系数 CV<0.10 为弱变异, 0.10 ≤ CV<0.30 为中等变异, CV ≥ 0.30 为强变异. 从表 5 可以看出, 8 种重金属的变异程度为 Cr<Pb<Cu<Cd<As<Ni<Zn<Hg, 均属于中等以上变异. 其中, Zn 和 Hg 为强变异, 特别是 Hg 的变异系数达到了强变异阈值的十倍以上. 表明 8 种重金属的离散程度较高, 空间分布不均匀, 在不同点位的含量差异很大, 尤其是 Zn 和 Hg 受工业、交通和化肥施用等人为活动影响较大.

## 2.2 沮河底泥重金属沿程变化规律

表 6 是沮河流域(黄陵段)底泥土壤重金属含量沿程变化统计表. 整体上看, 8 种重金属的含量分布具有一定的规律性和相似性. Pb、Cd、Zn、Cu 和 Hg 元素的含量纵向分布相似, 从上游到中游为递增趋势, 从中游到下游为递减趋势. Ni 和 Cr 元素的含量纵向分布则与 Pb、Cd、Zn、Cu 和 Hg 元素相反, 从上游到中游为递减趋势, 从中游到下游为递增趋势. As 元素的含量纵向分布从上游到下游一直呈递减趋势.

表 6 底泥重金属含量变化统计表

Table 6 Statistical table of changes in heavy metal content of sediment

	上游/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Upstream	中游/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Midstream	下游/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Downstream
Cr	最大值	56.439	60.614
	平均值	51.783	49.924
	最小值	44.190	37.818
	标准差	6.632	7.982
Cd	最大值	0.142	0.145
	平均值	0.134	0.165
	最小值	0.124	0.113
	标准差	0.009	0.072

续表 6

	上游/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Upstream	中游/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Midstream	下游/(mg·kg <sup>-1</sup> ) Downstream	
Pb	最大值	18.054	28.022	20.181
	平均值	18.021	20.296	18.447
	最小值	18.001	16.805	17.142
	标准差	0.029	4.490	1.269
Cu	最大值	21.730	16.626	17.405
	平均值	17.440	17.474	15.932
	最小值	14.081	13.615	15.245
	标准差	3.909	4.225	1.030
Zn	最大值	56.298	86.031	56.220
	平均值	45.474	59.755	46.900
	最小值	35.284	39.613	35.826
	标准差	10.521	18.110	9.351
Ni	最大值	23.543	19.774	20.153
	平均值	21.275	18.436	19.394
	最小值	18.716	11.644	18.656
	标准差	2.427	3.950	0.844
As	最大值	9.398	11.754	8.696
	平均值	8.243	8.059	8.004
	最小值	6.826	4.801	7.429
	标准差	1.306	2.482	0.522
Hg	最大值	0.047	0.267	0.213
	平均值	0.032	0.150	0.084
	最小值	0.022	0.055	0.022
	标准差	0.013	0.089	0.088

从沮河流域(黄陵段)底泥土壤重金属含量沿程变化统计表可以看出, 8 种重金属沿河分布规律呈现出一定的相似性, 总体上从上游到中游为递增趋势, 从中游到下游为递减趋势. 这与梁丽娥等<sup>[22]</sup>在延河流域对沿岸重金属的空间分布研究结果相似: 沿程上各重金属总体呈现中游高于上游和下游的规律. Ni 和 Cr 元素则呈现出上游高于中游和下游的规律, 这可能与上游植被茂盛且人类活动影响小, 而 Ni 和 Cr 元素主要来源于地质活动和成土母质有关.

图 2 是沮河流域(黄陵段)三种典型土地利用河岸带的重金属含量随高程的变化图. 从图 2 中可以看出, 耕地的河岸带中 Zn、Pb、Cd、Ni、Cu 等 5 种重金属含量随着高程的降低均呈现出先增加后减小的趋势, 并且 8 种重金属的含量均在高程为 3.5 m 时出现最大值. 从图 2 中也可以看出, 草地的河岸带中 Cr、Zn、Hg、Ni、Cu 等 5 种重金属的含量随着高程的降低均呈现出先增加后减小的趋势, 除 As 外其余重金属的含量均在高程为 0.9 m 时出现最大值. 从图 2 中也可以看出, 林地的河岸带中 Cr、Zn、Hg、Ni、Cu、As 等 6 种重金属的含量随着高程的降低均呈现出先增加后减小的趋势, 除 Cd 外其余重金属的含量均在高程为 0.9 m 时出现最大值.

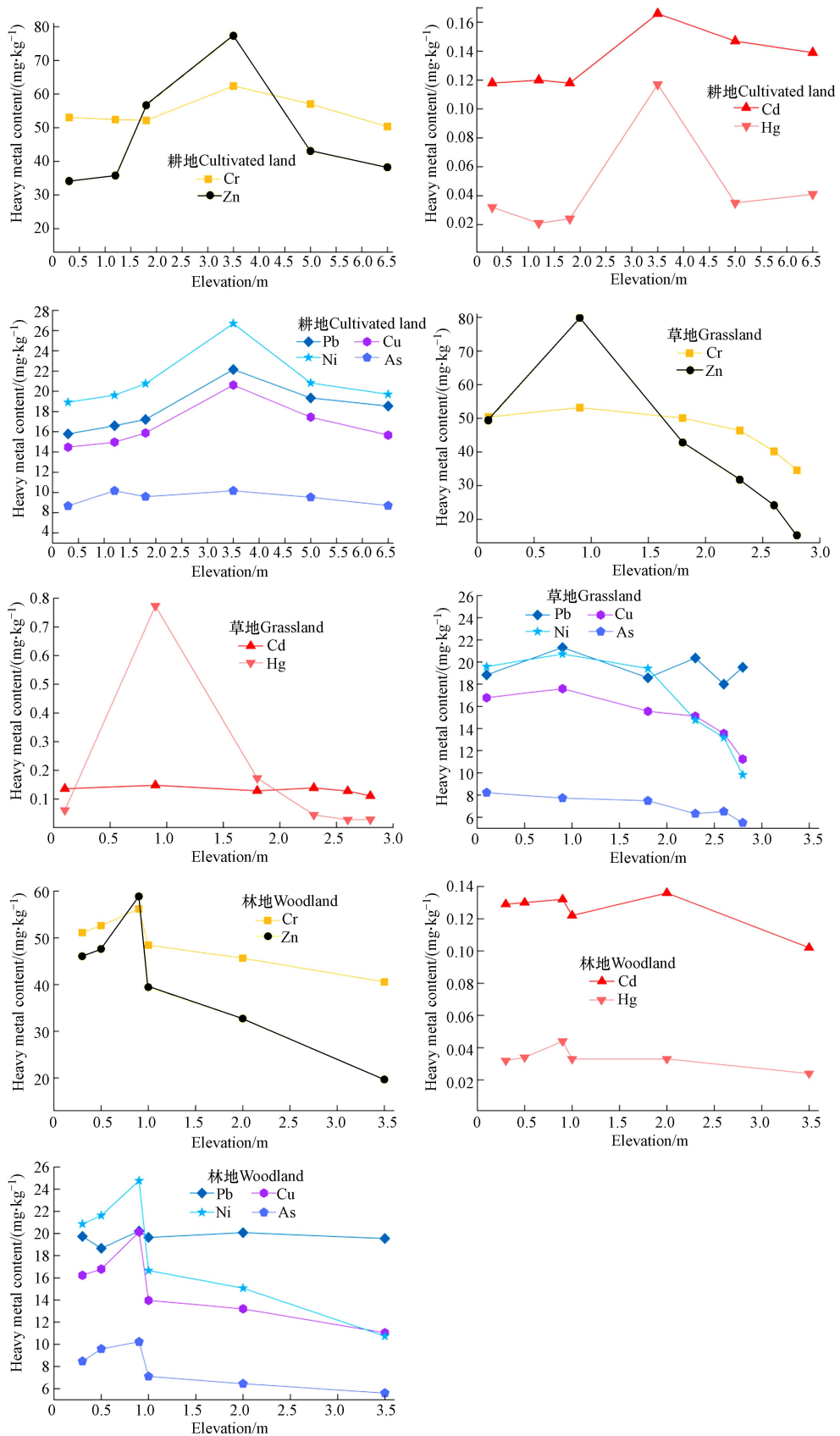


图2 不同土地利用重金属含量分布

Fig.2 Distribution of heavy metal content in different land uses

从沮河流域(黄陵段)3种典型土地利用河岸带的重金属含量随高程的变化图中可以看出,3种典型土地利用河岸带的重金属横向分布规律呈现出一定的相似性,均呈现出随着高程的降低先增加后减



小的趋势,这与苏正安等<sup>[23]</sup>利用<sup>137</sup>Cs法研究的坡耕地土壤侵蚀对有机碳迁移的影响结果相似:从整个纵断面分布看,SOC面积浓度呈先增加后减小再增加的趋势.3种典型土地利用河岸带的坡度随着高程的变化也发生的变化,使得重金属的含量在河岸带不同部位的含量明显不同.在坡度大的部位重金属含量少,在坡度小的部位重金属含量大.这与赵士杰<sup>[10]</sup>研究的喀斯特地区坡耕地土壤侵蚀对重金属元素迁移的影响机制结果相似:在相同雨强下,颗粒态重金属含量随坡度的增大呈先增大后减小的变化趋势,即存在临界坡度.径流也是影响重金属迁移的重要影响因素,径流流速越大,重金属迁移的含量越多<sup>[11]</sup>.3种典型土地利用河岸带地形条件相似,在陡坡径流流速快,重金属的迁移能力强,含量降低;在缓坡部分径流流速慢,重金属的迁移能力弱,含量升高.因此,在3种典型土地利用河岸带的重金属含量随高程的变化图中,由于在河岸带中间部位出现了极缓坡或平台造成了8种重金属含量的激增.

### 2.3 重金属污染评价

#### 2.3.1 单因子指数与内梅罗综合指数评价

通过计算可得,8种重金属的单因子指数的平均值为: $Zn(0.624) < Ni(0.652) < As(0.719) < Cu(0.727) < Cr(0.789) < Pb(0.870) < Cd(1.422) < Hg(2.197)$ .由图3可知,Cr元素存在警戒值,Pb、Cu、Zn、Ni、As等5种重金属均存在一定程度的轻度污染,Cd元素属于轻度污染-中度污染,Hg元素污染程度较高,存在7.2%的中度污染,重度污染达到了9.5%.

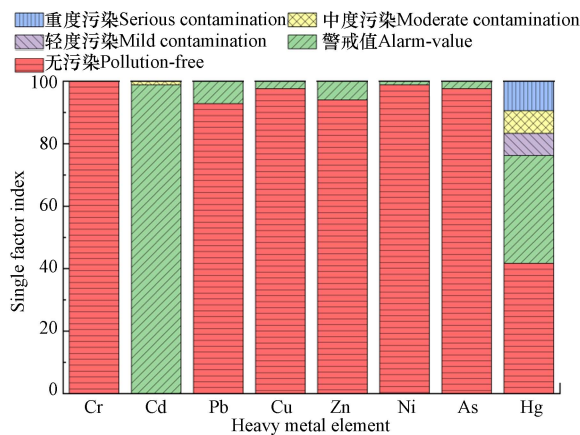


图3 单因子指数

Fig.3 single factor index

由图4可知,8种重金属的内梅罗综合指数为: $Cr(0.900) < Ni(0.929) < Cu(0.965) < Zn(0.988) < As(1.002) < Pb(1.112) < Cd(2.409) < Hg(4.01)$ .8种重金属均达到警戒值,其中Pb和As元素达到了轻度污染,Cd元素达到了中度污染,Hg元素达到了重度污染,表明沮河流域(黄陵段)河岸带土壤存在一定程度的重金属污染,尤其是Cd元素和Hg元素.

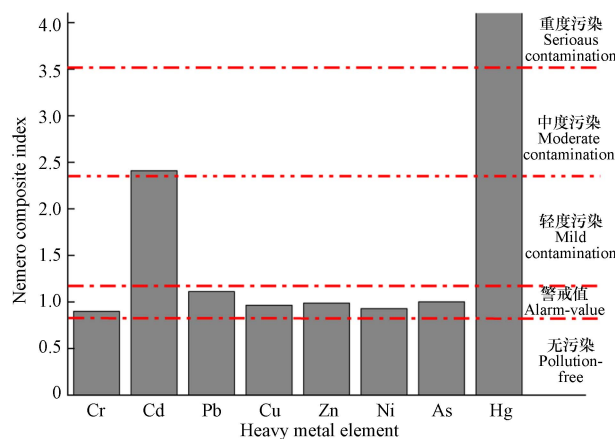


图4 内梅罗综合指数

Fig.4 Nemero Composite Index

### 2.3.2 地累积指数评价

从表 7 可知, 8 种重金属的地累积指数评价结果为: Cr(-1.439—0.588)、Cd(-0.481—1.045)、Pb(-1.071—0.196)、Cu(-1.675—0.377)、Zn(-2.773—0.262)、Ni(-2.138—0.396)、As(-1.807—0.298)、Hg(-1.907—4.102)。其中 Cr、Pb、Cu、Zn、Ni 和 As 等 6 种重金属元素的地累积指数均小于 0, Cd 和 Hg 两种金属元素的地累积指数分别有 27.4% 和 29.7% 的点位大于 0。以上结果表明, Cd 和 Hg 两种重金属元素均存在一定的污染水平。

表 7 地累积指数统计表

Table 7 Statistical table of geo-accumulation index

重金属 Heavy metals	最大值 Maximum	平均值 Average	最小值 Minimum
Cr	-0.588	-0.937	-1.439
Cd	1.045	-0.095	-0.481
Pb	-0.196	-0.793	-1.071
Cu	-0.377	-1.067	-1.675
Zn	-0.262	-1.354	-2.773
Ni	-0.396	-1.241	-2.138
As	-0.298	-1.085	-1.807
Hg	4.102	-0.098	-1.907

由图 5 可知, Cr、Pb、Cu、Zn、Ni 和 As 等 6 种重金属元素污染等级均为 I 级。Cd 元素污染等级为 I 级的点位占比为 72.6%, 污染等级为 II 级的点位占比为 1.2%, 污染等级为 III 级的点位占比为 26.2%。Hg 元素污染等级为 I 级的点位占比为 70.3%, 污染等级为 II 级的点位占比为 13.1%, 污染等级为 III 级的点位占比为 8.3%, 污染等级为 IV 级的点位占比为 7.1%, 污染等级为 V 级的点位占比为 1.2%。

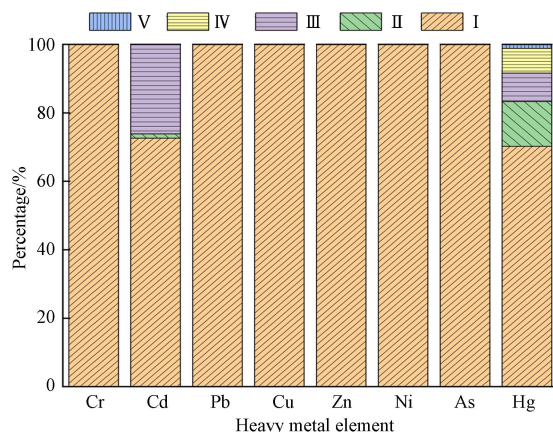


图 5 重金属污染等级占比

Fig.5 Proportion of heavy metal pollution level

### 2.3.3 潜在生态风险指数评价

由表 8 可知, 8 种重金属的单项重金属潜在生态风险指数为: Cr(1.107—1.996), Cd(32.234—92.872), Pb(3.571—6.547), Cu(2.348—5.774), Zn(0.219—1.251), Ni(1.705—5.700), As(4.287—12.204), Hg(16.000—1030.667); 8 种重金属的平均单项重金属潜在生态风险指数为: Zn(0.624) < Cr(1.578) < Ni(3.258) < Cu(3.636) < Pb(4.352) < As(7.194) < Cd(422.667) < Hg(87.889)。与表 3 的潜在生态风险指数分级划分相比, 其中 Cr、Pb、Cu、Zn、Ni 和 As 等 6 种重金属元素的生态危害程度均为轻微危害。Cd 元素 36.9% 的点位生态危害程度为轻微危害, 61.9% 的点位生态危害程度为中等危害, 1.2% 的点位生态危害程度为强危害。Hg 元素 38.1% 的点位生态危害程度为轻微危害, 36.9% 的点位生态危害程度为中等危害, 14.3% 的点位生态危害程度为强危害, 5.9% 的点位生态危害程度为很强危害, 4.8% 的点位生态危害程度为极强危害。以上结果表明, 研究区的超标重金属元素为 Cd 和 Hg, 对研究区的生态环境和人体

健康存在一定程度的危害. 研究区 8 种重金属的总潜在生态风险指数平均值为 1587.575, 各样点的重金属总潜在风险指数为 52.377—7382.677, 生态危害程度为极强危害.

表 8 重金属单项潜在生态风险指数统计表

Table 8 Statistical table of heavy metal single potential ecological risk index

重金属 Heavy metals	最大值 Maximum	平均值 Average	最小值 Minimum
Cr	1.107	1.578	1.996
Cd	32.234	42.667	92.872
Pb	3.571	4.352	6.547
Cu	2.348	3.636	5.774
Zn	0.219	0.624	1.251
Ni	1.705	3.258	5.700
As	4.287	7.194	12.204
Hg	16.000	87.889	1030.667

#### 2.4 重金属来源解析

母岩自然风化与人为活动共同造成了土壤表层重金属超标. 对研究区河岸带表层土壤进行 Pearson 相关性分析. 由表 9 可知, As、Cr、Ni 等 3 种元素显著相关, 说明具有相似的污染源; Pb、Cd、Cu 和 Zn 等 4 种元素显著相关, 说明具有相似的污染源; Hg 和 Zn 两种元素显著相关, 说明具有相似的污染源.

表 9 研究区表层土壤重金属含量相关性

Table 9 Correlation of heavy metal content in surface soil of the study area

	Cr	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	As	Hg
Cr	1							
Cd	0.503	1						
Pb	0.367	0.692**	1					
Cu	0.858	0.679**	0.522**	1				
Zn	0.664	0.575**	0.468**	0.759**	1			
Ni	0.862*	0.397	0.366	0.839	0.667	1		
As	0.839*	0.415	0.171	0.748	0.555	0.763*	1	
Hg	0.118	0.136	0.220	0.146	0.418**	0.083	0.007	1

注: \*\*表示  $P < 0.01$  水平性显著相关性显著, \*表示  $P < 0.05$  水平性显著相关性显著.

为了进一步分析重金属的来源, 利用 SPSS 26.0 对数据进行主成分分析. 主成分分析通过降维的方式将多个变量归结为相互独立的综合因子, 分析识别环境中污染物的来源<sup>[24]</sup>. 对 8 种重金属数据进行 KMO 检验和 Bartlett 球形检验, 其中 KMO 为 0.815,  $P$  小于 0.05, 说明 8 种重金属数据适合做主成分分析<sup>[25]</sup>. 在经过最大方差法旋转之后, 可以得到 8 种重金属的最大方差贡献率, 如表 10 所示, 提取了 3 个主成分因子, 累积贡献率达到了 87.47%, 可以解释 8 种重金属原始数据的大部分信息. 其中, 第一主成分的方差贡献率为 46.59%, 第二主成分的方差贡献率为 25.69%, 第三主成分的方差贡献率为 15.19%.

表 10 重金属特征值和累积贡献率

Table 10 Characteristic values and cumulative contribution rates of heavy metals

成分 Ingredient	初始特征值 Initial eigenvalue			提取载荷平方和 Extract the sum of squared loads			旋转载荷平方和 Rotating load sum of squares		
	总计 Total	方差 百分比/%	累积 /%	总计 Total	方差 百分比/%	累积 /%	总计 Total	方差 百分比/%	累积 /%
1	4.75	59.43	59.43	4.75	59.43	59.43	3.73	46.59	46.59
2	1.30	16.28	75.72	1.30	16.28	75.72	2.06	25.69	72.28

续表 10

成分 Ingredient	初始特征值 Initial eigenvalue			提取载荷平方和 Extract the sum of squared loads			旋转载荷平方和 Rotating load sum of squares		
	总计 Total	方差 百分比/%	累积 /%	总计 Total	方差 百分比/%	累积 /%	总计 Total	方差 百分比 /%	累积/%
3	0.94	11.75	87.47	0.94	11.75	87.47	1.22	15.19	87.47
4	0.36	4.52	92.00						
5	0.29	3.59	95.59						
6	0.16	1.98	97.57						
7	0.11	1.34	98.91						
8	0.09	1.09	100.00						

从表 11 可知, 第一主成分因子中有较大荷载的重金属元素为 As、Pb、Cd、Cu 和 Zn, 分别为 0.921、0.909、0.854、0.825、0.642. 第二主成分因子中有较大荷载的重金属元素为 Cr 和 Ni, 分别为 0.918 和 0.903. 第三主成分因子中有较大荷载的重金属元素为 Hg, 为 0.976.

表 11 重金属主成分因子荷载

Table 11 Principal component factor load of heavy metals

元素 Element	主成分1 (46.59%)	主成分2(25.69%)	主成分3 (15.19%)
As	0.921	0.068	-0.047
Pb	0.909	0.126	0.138
Cd	0.854	0.334	0.036
Cu	0.825	0.474	0.098
Zn	0.642	0.408	0.471
Cr	0.241	0.918	0.069
Ni	0.197	0.903	0.063
Hg	0.012	0.086	0.976

土壤母质与人类活动通常是土壤表层重金属富集的驱动因素. 从主成分分析的结果可知, 第一主成分因子中有较大荷载的重金属元素为 As、Pb、Cd、Cu 和 Zn. Zn 和 Cu 元素通常作为家畜饲料微量元素的添加剂, 但由于其大部分不会被家畜吸收, 因而伴随着有机肥在农业生产活动中的大量使用, 进而进入到土壤中造成 Zn 和 Cu 元素的富集. 研究区河岸带周围有大量的耕地, 由于频繁的农业生产活动, 造成了研究区土壤中 Zn 和 Cu 元素的富集. As 元素的主要来源为化石燃料的燃烧<sup>[26]</sup>. 研究区多个发电厂的生产过程中, 产生的大量废气和汽车尾气通过大气的干湿沉降会进入土壤, 造成了研究区 As 元素的富集, Pb 元素的重要来源为汽车尾气排放, 虽然含铅汽油早已不再使用, 但是汽车尾气对于土壤中 Pb 元素的累积影响依然存在<sup>[27]</sup>. 化肥的使用同样也造成了大量的 Pb 元素在表层土壤的累积. 研究区矿产资源丰富, 大量的煤炭资源通过汽车运向外界, 并且耕地广泛分布, 因而大量的汽车尾气排放和化肥的使用造成了研究区 Pb 元素的富集. Cd 元素是重要的的农业污染因子之一, 在耕地中大量施用磷肥会造成表层土壤中 Cd 元素的积累<sup>[28]</sup>. 研究区靠近水源, 便于农业灌溉, 大量的农业用地分布在河岸带周围, 因此研究区 Cd 元素的富集主要由大量磷肥的使用和耕地附近含 Cd 元素的灌溉用水造成. 因此, 可以认为第一主成分主要指农业生产、交通运输、工业生产, 为人为源.

第二主成分因子中有较大荷载的重金属元素为 Cr 和 Ni. Cr 元素的来源与其他金属元素的来源不同, 有研究表明<sup>[29-30]</sup>, Cr 元素的主要来源为地质活动和成土母质, 受人类生产活动的影响较小. 研究区 Cr 元素的污染等级和危害等级都为 I 级, 并且 Cr 元素的含量未超过陕西省土壤背景值, 因此研究区的 Cr 元素主要受地质活动和成土母质的影响. 岩石的风化作用同样也会造成土壤中 Ni 元素的富集. 因此, 可以认为第二主成分主要指地质活动和成土母质, 为自然源.

第三主成分因子中有较大荷载的重金属元素为 Hg. Hg 元素的主要来源为燃煤排放, 并且 Hg 元素

在大气中有较强的可移动性和稳定性,在适宜的气压条件下,Hg元素可以在大气中存在6个月到24个月<sup>[31]</sup>。研究区矿产资源丰富,煤炭的地质储量28.82亿t,可采储量21.80亿t,在开采冶炼、火力发电过程产生的大量工业废气在进入大气后,过大气的干湿沉降会进入土壤,造成Hg元素在表层土壤的累积。因此,可以认为第三主成分主要指大气沉降。

### 2.5 重金属污染治理措施

沮河流域(黄陵段)河岸带土壤重金属存在一定程度的污染,也存在一定程度的生态潜在风险。因此,需要对沮河流域(黄陵段)河岸带土壤重金属污染采取治理措施。在上游地区,可以采取生物措施对重金属污染进行治理。生物措施中包含了微生物修复和植物修复两种,可以在上游地区种植狗尾草、旱柳等对重金属的富集转移能力强和耐受性高的植物<sup>[32]</sup>。在中游地区,可以采用物理修复措施对重金属污染进行治理,例如:客土法、深耕、热解吸法等。在下游地区,可以采用农业修复措施对重金属污染进行治理,一方面倡导在农业生产过程中减少农药的使用,另一方面就是合理使用化肥<sup>[33]</sup>。

## 3 结论(Conclusion)

1)沮河流域(黄陵段)河岸带表层土壤质量整体良好,但存在一定的富集现象。Cd和Hg的污染最为严重,Pb、Cu、Zn、Ni和As的存在轻微富集现象,Cr未出现富集。除Zn和Hg属于强变异之外,其余6种重金属均为中等变异。

2)3种典型土地利用河岸带的重金属横向分布规律呈现出随着高程的降低先增加后减小的趋势。坡度和径流是影响重金属迁移的重要因素。

3)8种重金属的污染评价结果表明,研究区的Pb和Hg重金属元素存在较高的污染等级,Cd和Hg元素的潜在生态风险较高,应加强监测。

4)沮河流域(黄陵段)河岸带表层土壤重金属来源分为3类:(a)As、Pb、Cd、Cu和Zn主要受农业生产、交通运输、工业生产的影响,为人为源。(b)Cr和Ni的污染源主要为自然源,例如:地质活动和成土母质。(c)Hg的主要来源为大气沉降。

### 参考文献 (References)

- [1] DROBNIK T, GREINER L, KELLER A, et al. Soil quality indicators - From soil functions to ecosystem services[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 94: 151-169.
- [2] 李冬林,金雅琴,张纪林,等. 秦淮河河岸带典型区域土壤重金属污染分析与评价[J]. *浙江林学院学报*, 2008, 25(2): 228-234. LI D L, JIN Y Q, ZHANG J L, et al. Heavy metal soil pollution in the Qinhuai River riparian zone[J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2008, 25(2): 228-234 (in Chinese).
- [3] 张凤凤,李土生,卢剑波. 河岸带净化水质及其生态功能与恢复研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(增刊2): 459-464. ZHANG F F, LI T S, LU J B. Purification ecological and restoration functions of riparian zone[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Sup 2): 459-464.
- [4] 李睿华,管运涛,何苗,等. 河岸荆三棱带改善河水水质的中试研究[J]. *环境科学*, 2007, 28(6): 1198-1203. LI R H, GUAN Y T, HE M, et al. Pilot-scale study on riparian Scirpus yagara ohw zone improving water quality of River[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(6): 1198-1203 (in Chinese).
- [5] YE C, LI S Y, ZHANG Y L, et al. Assessing soil heavy metal pollution in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 191(1/2/3): 366-372.
- [6] BAI J H, JIA J, ZHANG G L, et al. Spatial and temporal dynamics of heavy metal pollution and source identification in sediment cores from the short-term flooding riparian wetlands in a Chinese delta[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 219: 379-388.
- [7] ROMIC D, ROMIC M, ZOVKO M, et al. Trace metals in the coastal soils developed from estuarine floodplain sediments in the Croatian Mediterranean region[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2012, 34(4): 399-416.
- [8] SAINT-LAURENT D, HÄHNI M, ST-LAURENT J, et al. Comparative assessment of soil contamination by lead and heavy metals in riparian and agricultural areas (southern Québec, Canada)[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2010, 7(8): 3100-3114.
- [9] 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 J, GUO X Y, ZENG Y, 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.
- [10] 赵士杰. 喀斯特地区坡耕地土壤侵蚀对重金属元素迁移的影响机制 [D]. 贵州: 贵州师范大学, 2021.  
ZHAO S J. The influence mechanism of soil erosion on the migration of heavy metal elements on slope farmland in karst area[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2021 (in Chinese).
- [11] 杜晓丽, 梁卉, 闫鑫瑞, 等. 城市地表径流胶体对重金属下渗迁移行为的影响 [J]. *水资源保护*, 2021, 37(1): 118-123,131.  
DU X L, LIANG H, YAN X R, et al. Effects of urban surface runoff colloid on infiltration and migration behavior of heavy metals[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(1): 118-123,131.
- [12] 胡杰, 赵心语, 王婷婷, 等. 太原市汾河河岸带重金属分布特征、评价与来源解析 [J]. *环境科学*, 2022, 43(5): 2500-2509.  
HU J, ZHAO X Y, WANG T T, et al. Distribution characteristics, evaluation, and source analysis of heavy metals in soils of Fenhe riparian zone in Taiyuan city[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(5): 2500-2509.
- [13] 陆晨遨, 曹郁, 夏宇欣, 等. 呼伦贝尔市城郊河岸带土壤与河流沉积物重金属污染现状分析 [J]. *地球环境学报*, 2023, 14,(1): 110-120.  
LU LU CHEN'AO, CAO Y, XIA Y X, et al. Analysis on the current heavy metal pollution situation in the riparian zone and river in the suburbs and urbans of Hulun Buir[J]. *Journal of Earth environment*, 2023, 14,(1): 110-120.
- [14] 陈伯扬. 重金属污染评价及方法对比: 以福建浅海沉积物为例 [J]. *地质与资源*, 2008, 17(3): 213-218,228.  
CHEN B Y. AAssessment of heavy metal pollution and method comparison: A case study of the shallow-sea sediments in Fujian[J]. *Geology and Resources*, 2008, 17(3): 213-218,228 (in Chinese).
- [15] BAI J H, HUANG L B, YAN D H, et al. Contamination characteristics of heavy metals in wetland soils along a tidal ditch of the Yellow River Estuary, China[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2011, 25(5): 671-676.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.  
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000(in Chinese).
- [17] 张军, 董洁, 梁青芳, 等. 宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析 [J]. *环境科学*, 2019, 40(8): 3774-3784.  
ZHANG J, DONG J, LIANG Q F, et al. Heavy metal pollution characteristics and influencing factors in Baoji urban soils[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(8): 3774-3784 (in Chinese).
- [18] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *GeoJournal*, 1969, 2: 108-118.
- [19] JI Y Q, FENG Y C, Wu J H, et al. Using geoaccumulation index to study source profiles of soil dust in China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(5): 571-578.
- [20] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [21] 杨之江, 陈效民, 景峰, 等. 基于 GIS 和地统计学的稻田土壤养分与重金属空间变异 [J]. *应用生态学报*, 2018, 29(6): 1893-1901.  
YANG Z J, CHEN X M, JING F, et al. Spatial variability of nutrients and heavy metals in paddy field soils based on GIS and Geostatistics[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(6): 1893-1901 (in Chinese).
- [22] 梁丽娥, 苟祎卓. 延河沿岸土壤重金属空间分布与生态风险评价 [J]. *延安大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(4): 25-29.  
LIANG L, GOU Y Z. Spatial distribution of heavy metals and potential ecological risk along the bank of Yanhe river[J]. *Journal of Yan'an University (Natural Science Edition)*, 2022, 41(4): 25-29 (in Chinese).
- [23] 苏正安, 李艳, 熊东红, 等. 龙门山地震带坡耕地土壤侵蚀对有机碳迁移的影响 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(3): 118-124.  
SU Zheng'an, LI Y, XIONG D H, et al. Effect of soil erosion in slope cultivated land of Longmenshan earthquake zone on lateral movement of soil organism carbon[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(3): 118-124 (in Chinese).
- [24] 杨彦, 李良忠, 于云江, 等. 基于统计分析的太湖流域某市农业活动区重金属污染特征及来源 [J]. *环境科学研究*, 2012, 25(12): 1319-1327  
YANG Y, LI L Z, YU Y J, et al. Analysis of heavy metals distribution characteristics and sources based on agricultural region statistics of Taihu Lake basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(12): 1319-1327 (in Chinese).
- [25] FACCHINELLI A, SACCHI E, MALLEEN L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils[J]. *Environmental Pollution*, 2001, 114(3): 313-324.
- [26] 李伟, 孙晶, 熊健, 等. 西藏拉鲁湿地表层土壤重金属分布特征和风险评价 [J]. *环境科学与技术*, 2023, 46(1): 92-100.  
LI W, SUN J, XIONG J, et al. Distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in the surface soil of lhaluwetland, Tibet[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 46(1): 92-100 (in Chinese).
- [27] 于元赫, 吕建树, 王亚梦. 黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布 [J]. *环境科学*, 2018, 39(6): 2865-2874.  
YU Y H, LV Jianshu, WANG Y M. Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(6): 2865-2874.
- [28] 张爱国, 魏兴萍. 西南典型岩溶槽谷土壤重金属污染与来源解析 [J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(12): 166-176.  
ZHANG A G, WEI X P. Pollution and Source Analysis of Heavy Metals in Soils of Typical Karst Troughs in Southwestern China[J].

- Environmental science& technology, 2020, 43(12): 166-176 (in Chinese).
- [29] 周艳, 陈槁, 邓绍坡, 等. 西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价 [J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2884-2892.  
ZHOU Y, CHEN Q, DENG S P, et al. Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China[J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2884-2892 (in Chinese).
- [30] FAN S X, WANG X D, LEI J, et al. Spatial distribution and source identification of heavy metals in a typical Pb/Zn smelter in an arid area of northwest China[J]. *Human and Ecological Risk Assessment:an International Journal*, 2019, 25(7): 1661-1687.
- [31] 郭晓东, 孙岐发, 赵勇胜, 等. 珲春盆地农田重金属分布特征及源解析 [J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(9): 1875-1883.  
GUO X D, SUN Q F, ZHAO Y S, et al. Distribution and sources of heavy metals in the farmland soil of the Hunchun basin of Jilin Province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(9): 1875-1883 (in Chinese).
- [32] 张晓薇, 王恩德, 吴瑶. 辽阳弓长岭铁矿区优势植物的重金属耐性评价 [J]. 金属矿山, 2018(2): 172-178.  
ZHANG X W, WANG E D, WU Y. Tolerance evaluation of advantage plants to heavy metal in Liaoyang Gongchangling Iron Mine[J]. Metal Mine, 2018(2): 172-178 (in Chinese).
- [33] 许艺. 土壤重金属污染的治理措施研究 [J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(12): 160-162.  
XU Y. Research on treatment measures of heavy metal pollution in soil[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021, 39(12): 160-162 (in Chinese).