

# 淮南矿区土壤中6种典型微量元素的 空间分布特征及其生态风险评价

魏勇<sup>1</sup>, 周春财<sup>2</sup>, 王婕<sup>2</sup>, 范支束<sup>1</sup>, 刘桂建<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学技术大学公共事务学院, 安徽合肥 230026; 2. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026)

**摘要:**煤矸石在地表长时间大量堆积会释放微量元素,并迁移到周围土壤中引起污染.以淮南矿区土壤为研究对象,采集不同开采年限矿区(新庄孜矿、潘一矿和顾桥矿)土壤和矸石样品,采用电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)测定土壤和矸石中6种元素Cd, Cr, Cu, Ni, Pb和Zn的含量,探讨微量元素的分布特征、污染程度和生态风险.结果表明:6种元素的含量水平横向分布趋势特征不明显,但不同开采年限矿区土壤中6种元素的含量呈现出老矿>中年矿>新矿的特点;6种元素只有Cd元素含量超过土壤背景值;单项污染指数评价表明,只有Cd元素在新庄孜矿呈现轻微污染,在潘一矿和顾桥矿呈现轻度污染;迭加指数评价表明,3个矿区的土壤污染等级均为中度污染;潜在生态风险指数评价表明,淮南矿区土壤中Cd元素具有相当大的潜在生态风险,3个矿区的土壤均具有中等生态风险.

**关键词:**淮南矿区;土壤;微量元素;空间分布特征;生态风险评价

**中图分类号:**X833 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.0253-2778.2017.05.006

**引用格式:**魏勇,周春财,王婕,等.淮南矿区土壤中6种典型微量元素的分布特征及其生态风险评价[J].中国科学技术大学学报,2017,47(5):413-420.

WEI Yong, ZHOU Chuncai, WANG Jie, et al. Distribution and ecological risk assessment of 6 typical trace elements in mining soils in Huainan coalfield[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2017,47(5):413-420.

## Distribution and ecological risk assessment of 6 typical trace elements in mining soils in Huainan coalfield

WEI Yong<sup>1</sup>, ZHOU Chuncai<sup>2</sup>, WANG Jie<sup>2</sup>, FAN Zhijian<sup>1</sup>, LIU Guijian<sup>1,2</sup>

(1. School of Public Affairs, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Accumulation of coal gangue can release trace elements into the surroundings, causing severe soil pollution. To assess the soil deterioration and environmental contamination by trace elements under the coal mining activities, soil and coal gangue samples were collected from 3 different mines (Xinzhuangzi, Panyi, Guqiao) in Huainan city, Anhui Province, China. Concentrations of trace elements (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn) were determined using an inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES). The results show that Cd is the only one element that exceeded the soil background of Huainan. There are no obvious characteristics for horizontal trace metal distributions. The oldest mine presented the

收稿日期:2016-08-15;修回日期:2016-11-25

基金项目:安徽省国土资源科技项目(2015-K-13),安徽省省级环境保护科研项目(2014-005)资助.

作者简介:魏勇,男,1981年生,博士生.研究方向:环境保护管理. E-mail: ywei2013@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:刘桂建,博士/教授. E-mail: lgj@ustc.edu.cn

worst contamination for the time effect (old mine > middle aged mine > new mine). The soil pollution assessment using individual pollution index suggests that Cd presents light pollution in Xinzhuanzi Mine, and minor pollution in Panyi and Guqiao Mine. The three mines all present moderate pollution risk evaluated using superimposed indices. Potential ecological risk index indicates that Cd element poses a considerable potential ecological risk, and the soil of the three mining areas has medium ecological risk.

**Key words:** Huainan coalfield; soil; trace element; spatial distribution; ecological risk assessment

## 0 引言

煤炭资源开采给经济社会发展提供动力的同时,也伴随着土地的占用、破坏和环境污染。2008 年全国矿山占用破坏土地 1.74 万 km<sup>2</sup>[1],2010 年全国矿业开采占用破坏土地面积达 2.48 万 km<sup>2</sup>[2],仅 3 年时间全国矿产开采占用和破坏的土地面积就增长了 43%。有统计数据表明,尾矿堆放占全国矿山占用破坏土地总面积的 53.25% [1],尾矿堆放是当前矿山占用破坏土地的主要形式。煤炭开采过程中产生的大量副产品煤矸石是煤矿区占用破坏土地的主要物质,煤矸石中含有多种有害或潜在有害的微量元素 [3]。由于降雨引起矸石山的淋溶水径流以及风力作用引起的矸石山表层的粉尘飘散等因素,都会起到搬运矸石组成物质的作用 [4,5],因此会导致采煤矿区土壤中微量元素含量超标等有害物质污染 [6-7]。

淮南矿区作为我国重要的煤炭资源基地,为我国东部地区经济社会发展做出了重要贡献。然而,淮南矿区煤炭的长期高负荷开采已造成数十座不同规模矸石山的堆积,对周边土壤农业活动的安全开展和农产品安全保障造成巨大的挑战。本文系统研究了淮南矿区土壤中 Cd, Cu, Cr, Ni, Pb 和 Zn 等微量元素的含量及空间分布特征。运用单项污染指数法、迭加指数法和潜在生态风险指数法对矿区土壤中微量元素的综合污染程度和潜在生态危害进行评价,以期对淮南矿区土壤综合利用、环境风险预警提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

淮南矿区位于中国安徽省中北部,地处长江三角洲腹地、淮河之滨,其煤炭开采历史已超过 1 个世纪。淮南矿区是国家发展改革委正式批复的 13 个亿吨级煤炭能源基地之一的两淮亿吨级大型煤电基地的重要组成部分,其煤炭的远景储量和探明储量两项指标都在两淮矿区总量中占有较大比例。淮南市

煤炭产能巨大,2015 年原煤产量达 8198 万吨,近 15 年以年均 10.11% 的速度快速增长 [8-9]。煤矿开采的同时也产生了大量的煤矸石堆积 [10]。淮南矿区以井工方式长时间对煤矿进行超负荷开采,该地区土地的占用、破坏情况十分严重,挤占了大量耕地面积,并引发一系列的生态环境问题 [11]。因此,选择淮南矿区作为矿区土壤中微量元素的含量空间分布特征分析、污染状况评价与生态风险评价的研究区域,具有一定的典型性和代表性。

### 1.2 样品采集与制备方法

为研究矸石排放压占土地可能导致的土壤中微量元素含量超标污染,本研究选择淮南矿区在开采年限方面具有老、中、新代表性的新庄孜矿(1947 年建成)、潘一矿(1983 年建成)、顾桥矿(2007 年建成)矿区内矸石山及其周边的土壤进行样品采集与测试 [12]。

由于研究区涉及 3 个矿区,地质情况均较为复杂,矿区周边河、湖、池塘等水系与地表径流连通网路纵横交叉,因此确定风向为土壤样品采样布点的主要考虑影响因素。土壤样品的采集布点首先在矸石山下风向及其垂直风向确定 2 条样线,沿 2 条样线在距离矸石山 1, 10, 50, 100, 300, 600, 900 和 1200 m 位置确定 16 个采样点,分别在各采样点 0~20 cm, 20~40 cm, 40~60 cm, 60~80 cm 和 80~100 cm 深度采集土壤剖面样品。在每个采样点的 5 个采样深度均使用五点法采集 5 个土壤样品,混合为 1 个样品,用四分法至 1 kg。每矿采集 80 个样品,合计 240 个土壤样。矸石样品分别在煤矿矸石山顶、中部和底部进行采集,采样深度为 20 cm。每矿布设 9 个采样点,共 27 个。在每个采样点采集 5 个平行样品,实验室混合,四分法至 1 kg。

### 1.3 土壤中微量元素测定方法

本研究采用王水-高氯酸法对矸石样品、土壤样品进行消解,并用电感耦合等离子体原子发射光谱 ICP-AES (Optima 2100DV Optima500) 测定消解液中微量元素含量 [13-15]。空白样和标样 (GBW07403 (GSS-3)) 与矸石和土壤样品使用相同方法消解和

测定,土壤标样 Cd,Cr,Cu,Ni,Pb 和 Zn 的回收率分别为 92.71%~96.32%,91.28%~97.34%,

97.07%~102.51%,91.73%~100.20%,92.56%~98.89%和 95.09%~99.65%。

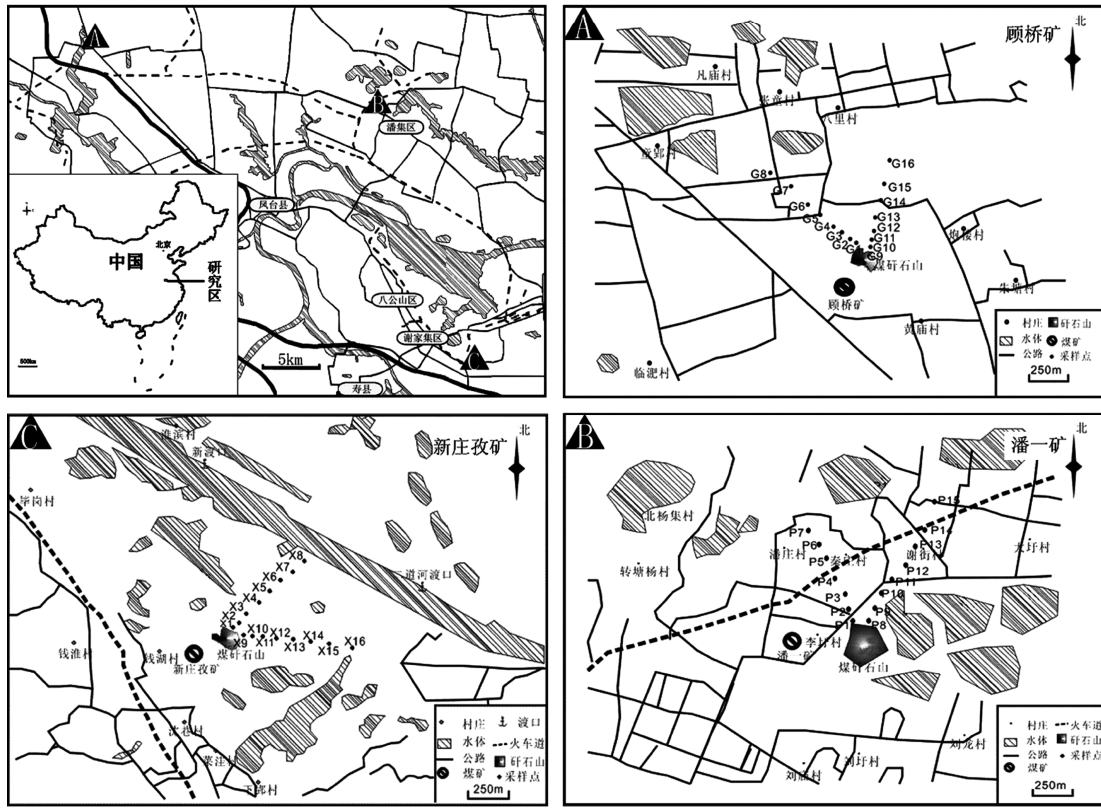


图 1 矿区采样点图

Fig.1 Sketch map of the coal mine showing the locations of sampling points

1.4 土壤中微量元素污染评价方法

采用单项污染指数法、迭加指数法和潜在生态风险指数法对矿区土壤中微量元素污染进行评价。

(I)单项污染指数法是评价单项污染物对土壤环境质量影响的基本方法,其计算式为

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

式中,  $P$  代表土壤中某单项污染物的单项污染指数;  $C_i$  代表采样点土壤中污染物  $i$  的实测浓度;  $S_i$  代表污染物  $i$  的评价标准或参考值。

单项污染指数法的污染程度分级标准为:  $p \leq 1$  评级为 I 级(无污染),  $1 < p \leq 2$  为 II 级(轻微污染),  $2 < p \leq 3$  为 III 级(轻度污染),  $3 < p \leq 5$  为 IV 级(中度污染),  $p > 5$  为 V 级(重度污染)。

(II)迭加指数法是以土壤中各污染物的污染分指数叠加作为土壤指数,其计算式为

$$p = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{S_i} \quad (i=1,2,\dots,n) \tag{2}$$

式中,  $p$  代表土壤污染指数;  $C_i$  代表土壤中第  $i$  种

污染物的实测浓度;  $S_i$  代表土壤中第  $i$  种污染物的评价标准;  $n$  代表参加评价的土壤中的污染物种数。

迭加指数法的污染程度分级标准为:  $p < 1.0$  评级为未受污染,  $p$  值在  $1.0 \sim 2.5$  之间评级为轻度污染,  $p$  值在  $2.5 \sim 7.0$  之间评级为中度污染,  $p > 7.0$  评级为重度污染。

(III)Hakanson 的潜在生态风险指数法是目前应用较为广泛的定量评价微量元素生态风险的方法<sup>[16]</sup>,其计算式为

$$RI = \sum_{i=1}^8 Er^i = \sum_{i=1}^8 Tr^i \times C_f^i \quad (i=1,2,\dots,8) \tag{3}$$

$$C_f^i = \frac{\bar{C}_{i-1}}{C_n^i} \tag{4}$$

式中,  $RI$  表示多种污染物的综合潜在生态风险指数;  $Er^i$  为第  $i$  种污染物的潜在生态风险系数;  $Tr^i$  表示第  $i$  种污染物的毒性系数;  $C_f^i$  表示第  $i$  种污染物的污染系数,  $\bar{C}_{i-1}$  表示覆盖研究区的至少 5 个样本的第  $i$  种污染物含量均值,  $C_n^i$  表示第  $i$  种污染物的工业化前的参考值。

### 1.5 数据处理方法

本研究使用 SPSS 22 对实验样品的检测数据进行描述性统计、相关分析和差异性检验,使用 OriginLab 8 制作微量元素含量空间分布曲线图,采用单项污染指数法、迭加指数法和潜在生态风险指数法的标准计算公式及评价标准对矿区土壤中微量元素含量超标污染进行评价。

## 2 结果与讨论

### 2.1 矿区土壤理化性质与微量元素含量特征

表 1 是不同开采年限矿区(新庄孜矿、潘一矿和顾桥矿)土壤的理化性质,由表 1 可见,3 个矿区土壤

的 pH 值、EC 值、有机质含量、总磷含量和总氮含量存在一定的差异,方差分析结果表明,在 pH 值、EC 值和有机质含量的比较中  $p$  值均小于 0.01,表明矿区间土壤的化学性质存在显著差异, Tukey 的事后检验程序表明,新庄孜矿的 pH 值、EC 值和有机质含量分别高于潘一矿和顾桥矿,潘一矿和顾桥矿的 pH 值、EC 值和有机质含量值没有显著差异,土壤的总氮比较中  $p$  值小于 0.05,表明矿区间土壤的总氮含量存在显著差异,新庄孜矿的总氮值显著高于潘一矿,但顾桥矿的总氮与潘一矿、新庄孜矿没有显著差异,土壤的总磷比较中  $p$  值大于 0.05,表明 3 个矿区间土壤的总磷含量没有显著差异。

表 1 矸石山周边土壤的化学性质

Tab.1 Chemical properties of the soils sampled near the coal waste piles

	pH	EC/( $10^{-4}$ s · m <sup>-1</sup> )	有机质/%	总磷/(mg · kg <sup>-1</sup> )	总氮/(mg · kg <sup>-1</sup> )
新庄孜矿	8.13 (7.24~9.76)	365.23 (219.82~860.00)	6.21 (2.26~24.05)	329.19 (12.44~1011.72)	1281.31 (525.78~4948.42)
潘一矿	6.88 (5.57~9.45)	264.61 (137.26~602.64)	3.82 (2.50~6.81)	191.88 (29.62~667.97)	824.73 (366.51~1505.10)
顾桥矿	6.68 (5.30~8.12)	234.68 (131.89~409.63)	3.97 (0.81~9.28)	258.32 (19.16~716.69)	1203.24 (331.74~5297.06)

表 2 是不同开采年限矿区(新庄孜矿、潘一矿和顾桥矿)土壤及矸石中微量元素含量,由表 2 可知, Cd 元素在 3 个矿区矸石和土壤中的含量均高于淮南土壤背景值; Cr 元素在 3 个矿区土壤中的含量均低于淮南土壤背景值,新庄孜矿和顾桥矿矸石中 Cr 元素的含量高于淮南土壤背景值; Cu 元素在 3 个矿区土壤中的含量均低于淮南土壤背景值,矸石中 Cu 元素的含量均高于淮南土壤背景值; Ni 和 Pb 元素在矸石和土壤中的含量均低于淮南土壤背景值; Zn 元素在 3 个矿区土壤中的含量均低于淮南土壤背景值,仅顾桥矿矸石中 Zn 元素含量高于淮南土壤背

景值。总地看,除 Cd 外的其他 5 种元素在土壤中的含量均低于土壤背景值。

比较矸石与土壤中微量元素的含量发现,矸石样品中的微量元素含量高于附近土壤样品中的含量,进一步对矸石样品与土壤样品中的微量元素含量水平进行  $t$  检验发现,除了顾桥矿的 Cd 元素,新庄孜、潘一矿和顾桥矿的 Ni 元素外,其他土壤中微量元素的含量水平均显著低于所在矿区矸石中的含量,由此判断,矿区土壤存在一定程度的微量元素含量超标污染风险,且土壤中的微量元素可能部分来自矸石山。

表 2 矿区土壤及矸石中微量元素的含量(单位:mg · kg<sup>-1</sup>)

Tab.2 The contents of trace elements in soils and coal residue in the coal mine area(unit:mg · kg<sup>-1</sup>)

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
土壤中平均含量	0.11	42.59	23.08	20.78	14.31	40.96
新庄孜矿						
范围	ND~0.31	24.29~65.37	12.23~51.14	11.28~35.13	1.96~24.63	25.5~65.08
标准差	0.07	8.04	6.69	4.83	4.17	8.49
变异系数	0.61	0.19	0.29	0.23	0.29	0.21
矸石中平均含量	0.14	71.80	33.59	18.56	20.48	45.55

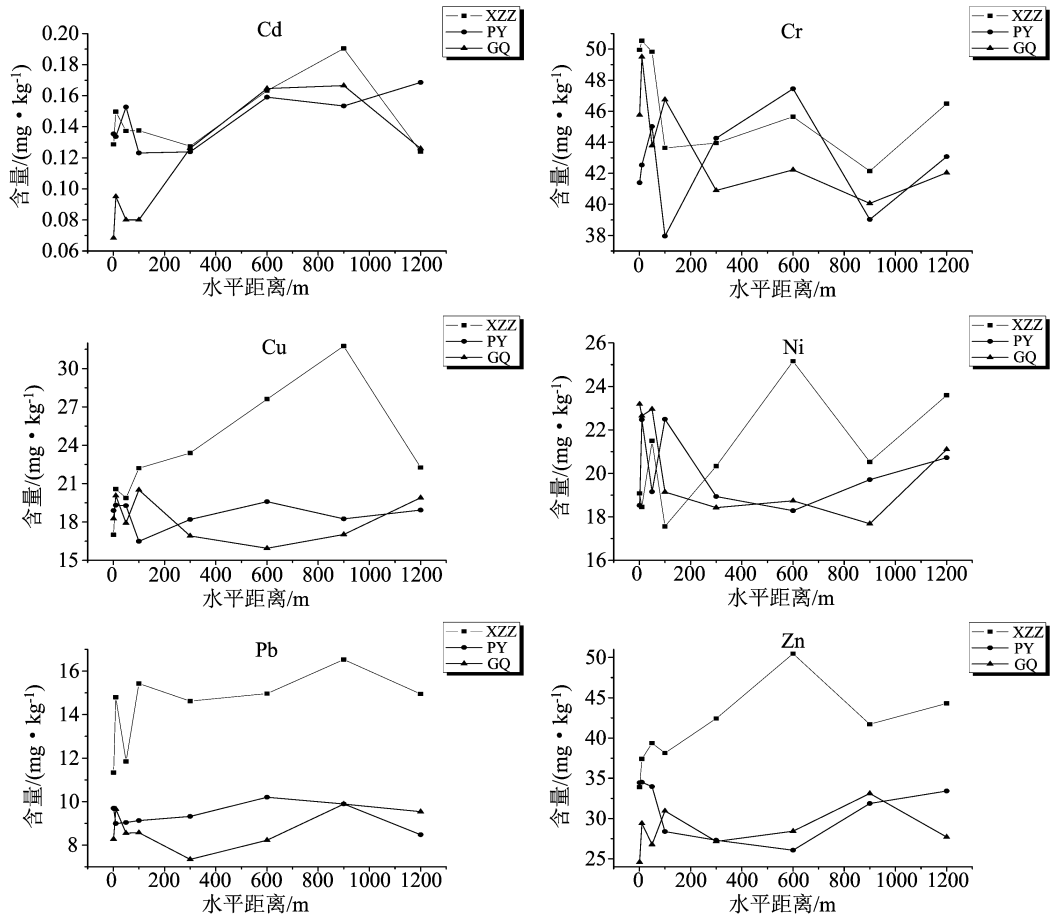
续表 2

		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
潘一矿	土壤中平均含量	0.14	46.52	18.60	20.45	9.40	31.10
	范围	0.08~0.24	30.41~62.47	11.79~33.04	11.17~27.60	0.14~20.18	18.15~44.52
	标准差	0.03	6.45	3.50	4.00	2.41	5.56
	变异系数	0.24	0.14	0.19	0.20	0.27	0.18
	矸石中平均含量	0.22	41.75	38.80	16.69	17.19	33.15
顾桥矿	土壤中平均含量	0.14	43.88	18.31	20.04	8.77	28.51
	范围	0.06~0.66	20.65~74.45	8.95~34.80	10.28~38.84	ND~24.42	14.01~57.12
	标准差	0.07	8.95	3.80	4.40	2.84	6.52
	变异系数	0.51	0.20	0.21	0.22	0.32	0.23
	矸石中平均含量	0.14	91.17	33.01	20.11	24.95	98.89
淮南土壤背景值 <sup>[17]</sup>		0.06	64.93	24.16	25.74	30.47	80.81

2.2 矿区土壤中微量元素的空间分布特征

图 2 是不同开采年限矿区(新庄孜矿、潘一矿和顾桥矿)土壤微量元素的空间分布情况.由图 2 可见,不同开采年限矿区(新庄孜矿、潘一矿和顾桥矿)土壤微量元素含量在水平距离的变化规律不尽相同.Cd,Cu 和 Zn 在距离矸石山较近的位置含量较低,随着距离的增加含量水平逐渐增大,且中间存在

一定的波动;Cr 和 Ni 元素在距离矸石山较近的位置含量较高,随着距离的增加含量水平逐渐减小,且中间存在一定的波动;Pb 含量基本不随矸石山距离的变化而变化.从元素含量水平分布特征看,6 种微量元素在 3 个矿区土壤中的含量均为老矿>中年矿>新矿,微量元素含量可能受到煤矿的开采时长因素的影响.



XZZ-新庄孜矿; PY-潘一矿; GQ-顾桥矿

图 2 土壤中微量元素含量随距离变化关系

Fig.2 Relationship between the contents of elements in soil and the distances

煤矸石在淋溶和淋滤作用下,其中的微量元素析出并渗透到矸石山附近土壤中,导致煤矸石中的微量元素迁移<sup>[18-19]</sup>.虽然有研究表明伴随相对矸石山距离的增加微量元素在土壤中的含量趋于减小<sup>[20-21]</sup>,但在本研究中矸石山周边土壤中微量元素的含量随距离变化曲线线性特征并不明显,表明矸石山周边土壤的微量元素污染成因较为复杂,可能与矿区内存在其他污染源、局部地形地貌、周边复杂的煤炭和矸石运输路网、风力对矿区粉尘的定向飘散作用等综合影响有关<sup>[22-23]</sup>.

2.3 矿区土壤中微量元素的污染特征与风险评价

(I) 矿区土壤中微量元素的单因子污染评价

以淮南土壤背景值作为评价参考值,计算得出 3 个矿区土壤中各微量元素的单项污染指数见表 3. 由表 3 可见,根据土壤污染程度分级标准,3 个矿区的土壤中只有 Cd 元素达到不同程度的污染,在新庄孜矿的污染水平达到 II 级,在潘一矿和顾桥矿的污染水平达到 III 级,其他 5 种微量元素的单项污染指数均属于无污染等级.Niu 等<sup>[24-25]</sup>在对淮南矿区复垦土壤微量元素的研究中,指出矿区复垦土壤未受到 Cu, Zn 元素污染,而 Cd 元素产生了中等到严重污染,与本文研究结果相似.

表 3 矿区土壤的单项污染指数

Tab.3 Individual pollution index of soil in the coal mine area

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
新庄孜矿	1.83	0.66	0.96	0.81	0.47	0.51
潘一矿	2.33	0.72	0.77	0.79	0.31	0.38
顾桥矿	2.33	0.68	0.76	0.78	0.29	0.35

(II) 矿区土壤迭加指数法污染评价

以淮南土壤背景值作为污染物的评价标准,计

表 5 潜在生态风险指数修正分级标准

Tab.5 Adjust the classification standard of potential ecological risk index

$C_f^i$	$C_d = \sum C_f^i$	$Er^i$	RI
$C_f^i < 1$ 低污染系数	$C_d < 5$ 低污染程度	$Er^i < 25$ 低潜在生态风险	$RI < 50$ 低生态风险
$1 \leq C_f^i < 3$ 中度污染系数	$5 \leq C_d < 10$ 中等污染程度	$25 \leq Er^i < 50$ 中等潜在生态风险	$50 \leq RI < 100$ 中等生态风险
$3 \leq C_f^i < 6$ 相当大的污染系数	$10 \leq C_d < 20$ 相当大的污染程度	$50 \leq Er^i < 100$ 相当大的潜在生态风险	$100 \leq RI < 300$ 相当大的生态风险
$C_f^i \geq 6$ 非常高的污染系数	$C_d \geq 20$ 非常高的污染程度	$100 \leq Er^i < 200$ 高潜在生态风险	$RI \geq 300$ 非常高的生态风险
		$Er^i \geq 200$ 非常高的潜在生态风险	

算得出 3 个矿区土壤中微量元素的污染迭加指数见表 4. 由表 4 可见,不同矿区土壤污染程度为:新庄孜矿 > 潘一矿 > 顾桥矿 (即:老矿 > 中年矿 > 新矿),可见矿区土壤污染具有时间累积效应.老矿的迭加指数最高,因此老矿区的微量元素污染是需要优先控制的,同时需要预防伴随时间的推移进一步加重新矿和中年矿的污染.根据迭加指数对土壤质量的分级标准,3 个矿区的土壤均受到了中度污染.Halim 等<sup>[26]</sup>与 Liu 等<sup>[27]</sup>也发现采矿活动对矿区土壤造成了一定程度的污染.

表 4 矿区土壤的迭加指数

Tab.4 The superimpose indices of soil in the coal mine area

矿区	迭加指数 $p$
新庄孜矿	5.31
潘一矿	5.23
顾桥矿	5.19

(III) 矿区土壤中微量元素潜在生态风险评价

由于本研究测试的微量元素与 Håkanson 在设计潜在生态风险指数法时选用的 8 种污染物存在差异,因此需对参数进行必要的调整.关于  $Tr^i$  的修正,毒性系数受到“丰度原则”和“释放效应”的影响,按照 Håkanson 说明的毒性系数计算方法,确定 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn 毒性系数分别为 30, 2, 5, 5, 5, 1<sup>[28]</sup>;关于  $C_n^i$  的修正,Håkanson 选用了污染物工业化前的水平作为参考值,由于相关数据的缺失,有学者选用国家土壤环境质量标准作为参考值,但国家土壤环境质量标准无法反映不同区域的差异性<sup>[29]</sup>,因此本文选用淮南土壤背景值作为参考值;由于选用的污染因子的种类和数量的差异,需要对相应的污染程度、潜在生态风险和生态风险评价等级进行调整<sup>[30]</sup>(表 5).

使用潜在生态风险指数法分别对新庄孜矿、潘一矿和顾桥矿3个矿区土壤中微量元素的潜在生态风险进行评价,结果见表6.由表6可见Cd元素在3个矿区的污染系数 $C_f^i$ 均大于1,达到中度污染水平;Cd元素在3个矿区的潜在生态风险系数 $Er^i$ 均大于50,评价等级为相当大潜在生态风险;其他5种元素的污染系数 $C_f^i$ 均小于1,潜在生态风险系数

$Er^i$ 均小于25,评价等级为低污染系数和低潜在生态风险.3个矿区的污染程度 $C_d$ 均大于5,综合潜在生态风险指数 $RI$ 均大于50,说明3个矿区的土壤均为中等污染程度,具有中等生态风险.因此,Cd元素的污染问题在老矿、中年矿、新矿都应当引起重视,矿区土壤治理过程中应将Cd作为优先控制的微量元素之一<sup>[31]</sup>.

表6 矿区土壤潜在生态风险指数

Tab.6 Potential ecological risk index of soil in the coal mine area

		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	$C_d$	$RI$
新庄孜矿	$C_f^i$	1.83	0.66	0.96	0.81	0.47	0.51	5.23	67.98
	$Er^i$	55.00	1.31	4.78	4.04	2.35	0.51		
潘一矿	$C_f^i$	2.33	0.72	0.77	0.79	0.31	0.38	5.31	81.18
	$Er^i$	70.00	1.43	3.85	3.97	1.54	0.38		
顾桥矿	$C_f^i$	2.33	0.68	0.76	0.78	0.29	0.35	5.19	80.83
	$Er^i$	70.00	1.35	3.79	3.89	1.44	0.35		

### 3 结论

(I)淮南矿区土壤中Cd, Cr, Cu, Ni, Pb和Zn元素的含量均低于重点区域土壤污染评价参考值,除Cd元素外,其他5种元素在土壤中的含量均低于土壤背景值.矸石中的微量元素含量均高于土壤.

(II)Cd, Cr, Cu, Ni, Pb和Zn元素的含量水平横向分布趋势特征不明显.Cd, Cr, Cu, Ni, Pb和Zn元素在土壤中的含量呈现出老矿>中年矿>新矿,说明矿区土壤的污染具有时间累积效应.

(III)以淮南土壤背景值作为评价参照标准,使用3种方法对矿区土壤进行评价.单项污染指数法评价结论为Cd元素在新庄孜矿造成了轻微污染,在潘一矿和顾桥矿造成了轻度污染,其他5种微量元素的单项污染指数均属于无污染等级;迭加指数法评价结论为3个矿区的土壤污染等级均为中度污染;潜在生态风险指数法评价结论为矿区土壤中的Cd元素具有相当大的潜在生态风险,其他5种微量元素属于低潜在生态风险,3个矿区的土壤均具有中等生态风险.

#### 参考文献(References)

[1] 中华人民共和国国家统计局. 各地区矿山环境保护情况(2008年)[EB/OL]. [2016-07-15]. [http://www.stats.gov.cn/zjtj/ztsj/hjtjzl/2008/201006/t20100613\\_70527.html](http://www.stats.gov.cn/zjtj/ztsj/hjtjzl/2008/201006/t20100613_70527.html).

[2] 中华人民共和国国家统计局. 各地区矿山环境保护情况(2010年)[EB/OL]. [2016-07-15]. [http://www.stats.gov.cn/zjtj/ztsj/hjtjzl/2010/201112/t20111227\\_72473.html](http://www.stats.gov.cn/zjtj/ztsj/hjtjzl/2010/201112/t20111227_72473.html).

[3] 卢岚岚, 刘桂建, 王兴明, 等. 淮南顾桥矿土壤环境中微量元素的分布及其生态风险评价[J]. 中国科学技术大学学报, 2014, 44(2): 119-127.

[4] PANDEY B, AGRAWAL M, SINGH S. Ecological risk assessment of soil contamination by trace elements around coal mining area [J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(1): 159-168.

[5] REZA S K, BARUAH U, SINGH S K, et al. Geostatistical and multivariate analysis of soil heavy metal contamination near coal mining area, Northeastern India[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(9): 5425-5433.

[6] DANG Z, LIU C J, HAIGH M J. Mobility of heavy metals associated with the natural weathering of coal mine spoils [J]. Environmental Pollution, 2002, 118(3): 419-426.

[7] 郑刘根, 丁帅帅, 刘丛丛, 等. 不同类型煤矸石中环境敏感性微量元素淋滤特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 57(2): 703-710.

[8] 淮南市统计局. 淮南市2015年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. [2016-07-15]. <http://tjj.huainan.gov.cn/15642284/18956927.html>.

[9] 淮南市统计局. 2015年淮南统计年鉴[EB/OL]. (2016-05-22)[2016-07-15]. <http://tjj.huainan.gov.cn/15642315/19614315.html>.

[10] 淮南文明网. 淮南市煤场和散状物料堆场整治工作进

- 入攻坚阶段 [EB/OL]. (2015-05-28) [2016-07-15].  
[http://ahhn.wenming.cn/cscj/201505/t20150528\\_1750771.htm](http://ahhn.wenming.cn/cscj/201505/t20150528_1750771.htm).
- [11] 李保杰, 顾和和, 纪亚洲. 矿区土地复垦景观格局变化和生态效应[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 251-256.
- [12] 王兴明, 董众兵, 刘桂建, 等. Zn, Pb, Cd, Cu 在淮南新庄孜煤矿矸石山附近土壤和作物中分布特征[J]. 中国科学技术大学学报, 2012, 42(1): 17-25.
- [13] MOOR C, LYMBERPOULOU T, DIETRICH V J. Determination of heavy metals in soils, sediments and geological materials by ICP-AES and ICP-MS [J]. *Microchimica Acta*, 2001, 136(3): 123-128.
- [14] 孙勇, 杨刚, 张金平, 等. ICP-AES 法测定玉米秸秆中的微量元素含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(2): 371-373.
- [15] 李顺江, 杨林生, 王五一, 等. ICP-AES 法测定西藏大骨节病区及非病区饮用水中的微量元素[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(3): 585-588.
- [16] HÅKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14: 975-1001.
- [17] 崔龙鹏, 白建峰, 史永红, 等. 采矿活动对煤矿区土壤中重金属污染研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(6): 896-904.
- [18] DANG Z, LIU C, HAIGH M J. Mobility of heavy metals associated with the natural weathering of coal mine spoils [J]. *Environmental Pollution*, 2002, 118(3): 419-426.
- [19] 宋文, 何天容, 潘鲁生. 贵州水城煤矸石风化土壤-农作物系统中汞分布规律研究[J]. 农业环境科学学报(自然科学版), 2010, 29(7): 1326-1332.
- [20] 李东艳, 方元元, 任玉芬, 等. 煤矸石堆周围土壤重金属污染特征分析——以焦作市中马村矿为例[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(5): 15-17.
- [21] 张明亮, 王海霞. 煤矿区矸石山周边土壤重金属污染特征与规律[J]. 水土保持学报, 2007, 21(4): 189-192.
- [22] 姚峰, 包安明, 古丽·加帕尔, 等. 新疆准东煤田土壤重金属来源与污染评价[J]. 中国环境科学, 2013, 33(10): 1821-1828.
- [23] 刘巍, 杨建军, 汪君, 等. 准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1938-1945.
- [24] NIU S, GAO L, ZHAO J. Distribution and risk assessment of heavy metals in the Xinzhuangzi reclamation soil from the Huainan coal mining area, China [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2015, 21(4): 900-912.
- [25] NIU S, GAO L, ZHAO J. Risk Analysis of metals in soil from a restored coal mining area [J]. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 2015, 95(2): 183-187.
- [26] HALIM M A, MAJUMDER R K, ZAMAN M N. Paddy soil heavy metal contamination and uptake in rice plants from the adjacent area of Barapukuria coal mine, northwest Bangladesh [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8(6): 3391-3401.
- [27] LIU G, TAO L, LIU X, et al. Heavy metal speciation and pollution of agricultural soils along Jishui River in non-ferrous metal mine area in Jiangxi Province, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 132: 156-163.
- [28] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 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.
- [29] 赵沁娜, 徐启新, 杨凯. 潜在生态危害指数法在典型污染行业土壤污染评价中的应用[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2005, 1: 111-116.
- [30] ZHANG J, DENG H, WANG D, et al. Toxic heavy metal contamination and risk assessment of street dust in small towns of Shanghai suburban area, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(1): 323-332.
- [31] LI Z, MA Z, VAN DER KUIJP T J, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468: 843-853.