

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

卢岚岚¹, 刘桂建¹, 王兴明², 王 婕¹

(1. 中国科学技术大学地球与空间科学学院, 安徽合肥 230026;
2. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽淮南 232001)

摘要: 有害微量元素在煤炭开采和加工利用过程中会释放、迁移并富集到周围土壤中。以安徽淮南顾桥矿为例, 采集了矸石山附近不同距离的土壤表层样品及剖面样品, 使用电感耦合等离子体-光学发射光谱(ICP-OES)测试了土壤中 Zn, Pb, Cd, Ni, Cr, Cu 的浓度, 并探讨了它们的分布特征和生态风险。除采用地累积指数法及生态风险评价法外, 将地累积指数法和内梅罗综合指数法结合, 用以评价受污染地区多种微量元素综合污染情况。结果表明: 土壤中 Zn, Pb, Cd, Ni, Cr, Cu 浓度随距矸石山距离增加而降低, 随土壤深度变化趋势不显著; 除 Cd 外, 其余元素均未造成潜在污染。

关键词: 微量元素; 土壤; 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.0253-2778.2014.02.007

引用格式: Lu Lanlan, Liu Guijian, Wang Xingming, et al. Distribution and ecological risk assessment of trace elements in mining soil in Guqiao Coal Mine, Huainan Coalfield[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014, 44(2): 119-127.

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.

Distribution and ecological risk assessment of trace elements in mining soil in Guqiao Coal Mine, Huainan Coalfield

LU Lanlan¹, LIU Guijian¹, WANG Xingming², WANG Jie¹

(1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
2. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Environmental-sensitive trace elements would be released, migrate and be enriched in the surrounding soil environment during the process of coal mining and utilization. Soil samples from the surface and profiles were collected at different distances to the coal gangue pile of Guqiao Coal Mine and the concentrations of Zn, Pb, Cd, Ni, Cr and Cu were determined by inductively coupled plasma-optical emission spectrometry (ICP-OES). The distribution and enrichment were accordingly investigated and the ecological risk was assessed as well. In addition to using geoaccumulation index and ecological risk index, geoaccumulation index and Nemerow index were combined to evaluate the contamination of trace elements

收稿日期: 2013-07-01; 修回日期: 2013-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(41173032), 国家科技支撑计划项目(1012BAC10B02), 淮南矿业集团科技创新项目资助。

作者简介: 卢岚岚, 女, 1990年生, 硕士生。研究方向: 环境科学。E-mail: ll822@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 刘桂建, 教授。E-mail: lgj@ustc.edu.cn

in this area. Results show that concentrations of Zn, Pb, Cd, Ni, Cr and Cu in soils decrease with increasing distance, but change little with increasing depth. The soil is not contaminated by the trace elements except Cd.

Key words: trace elements; soil; distribution characteristic; ecological risk assessment

0 引言

煤炭是我国的主要能源,但在煤炭的开采、堆放和洗选过程中,某些有害物质,如微量元素及 PAHs 等,特别是微量元素会在液体介质淋溶和淋滤作用下发生迁移,并渗入到周围的土壤和水系中,而富集的微量元素甚至可能会沿食物链进入人体,进而对人体健康造成危害^[1-5]. 因此,研究煤矿区土壤中微量元素对矿区环境保护具有重要意义. 顾桥煤矿位于安徽省中北部,含有近 10 亿吨可开采煤层. 随着煤炭资源的开采和利用,矿区煤矸石与粉煤灰大量产生并长期堆存、堆放,这不仅侵占大量农田,而且会对局部区域空气、水质、土壤、植被造成一定程度的污染与破坏^[6-7].

本研究依据我国土壤环境质量标准,参照煤中环境意义微量元素划分^[8-10],对 Zn, Pb, Cd, Ni, Cr 和 Cu 等重金属在煤矿区土壤环境中的行为及富集特征进行分析,将地累积指数法和内梅罗综合指数法结合,同时把单因子指数换成地累积指数,得到一种可反映各采样点的多种重金属污染综合地累积指数和某种重金属的地区综合地累积指数的新的综合指数^[11],对矿区土壤重金属污染程度和潜在生态危害进行评价,以期对顾桥矿区土壤合理利用、生态风险预警等提供科学参考.

1 样品采集与测试

1.1 样品的采集与预处理

分别在矿区矸石山顶、腰、底(距地面 0.5 m)上采集样品. 采样深度在 20 cm,每个样品由 5 个子样混合而成,四分法至 1 kg 左右. 共采集矸石样 9 个.

以矸石山为起点向周围辐射两条样线,每条样线按不同距离设置 8 个样点(L1 上样点为 G1~G8,处于下风向;L2 上样点为 G9~G16,与风向基本垂直),样点距离矸石山分别为 1, 10, 50, 100, 300, 600, 900, 1 200 m.

表层土壤样品采集深度为 0~20 cm,多个子样混成一样,四分法缩分约 1 kg. 在 G1~G16 这 16 个样点分别采集土壤剖面样品,采集深度为 0~20 cm,

20~40 cm, 40~60 cm, 60~80 cm, 80~100 cm.

样品采集后迅速送到实验室,经自然干燥、磨细、混匀、装瓶.

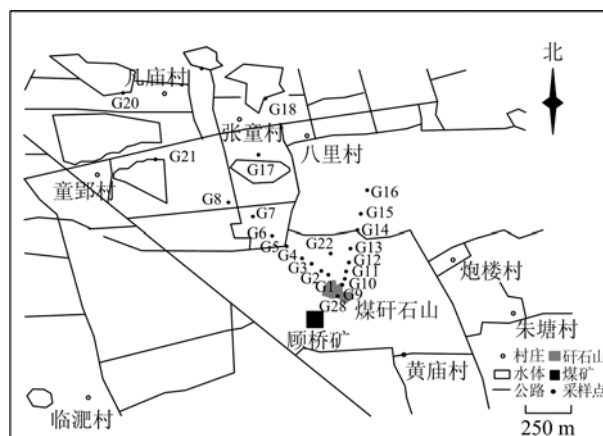


图 1 顾桥矿区采样点图

Fig. 1 The sketch map of Guqiao Coal Mine showing the locations of sampling points

1.2 样品测试

1.2.1 分析方法

矸石及土壤采用王水-高氯酸法消解. 消解液中 Zn, Pb, Cd, Ni, Cr, Cu 浓度采用 ICP-OES (Optima 2100DV Optima 500) 测定. 测定条件如下: 射频功率 1 300 W, 等离子气 15 L/min, 辅助气 0.2 L/min, 气体压力为 357.0 kPa, 雾化气 0.8 L/min; 试样流量 1.5 mL/min; 积分时间 1~5 s; 读数延迟 50 s^[12-13]. 土壤有机质、pH、电导率、总氮、总磷、总钾测试均按常规方法进行^[14].

1.2.2 质量控制

空白样和标样(GBW07403(GSS-3))与样品一起进行消解处理和测试. 土壤标样中 Zn, Pb, Cd, Ni, Cr, Cu 的回收率分别为 95.09%~99.65%, 92.56%~98.89%, 92.71%~96.32%, 91.73%~100.20%, 91.28%~97.34%, 97.07%~102.51%.

1.3 污染评价方法

土壤中微量元素污染的评价一般采用的方法有地累积指数法^[15-16]、单因子指数法与内梅罗综合指数法^[17-18]联用以及生态风险指数法^[19]等. 地累积指数不仅反映了重金属分布的自然变化特征,而且可

以判别人为活动对环境的影响,是区分人为活动影响的重要参数,因此得到了广泛的应用,但它只能给出各采样点某种重金属的污染指数,无法给出各采样点的多种微量元素污染综合指数和某种微量元素的地区综合指数. 而内梅罗综合指数法在计算出各元素因子污染指数的基础上再得出多因子的综合污染指数,可用来评价受污染地区的微量元素综合污染水平. 因此,将地累积指数法和内梅罗综合指数法结合,将单因子指数换成地累积指数,得到一种新的综合指数,可反映受污染地区各采样点的多种微量元素污染综合指数和某种微量元素的地区综合指数^[11].

地累积指数法的表达式如下:

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / (1.5 \cdot BE_i)]$$

式中, C_i 为样品中元素 i 的浓度; BE_i 为元素 i 的地球化学背景浓度; 1.5 为常数, 是考虑到由于成岩作用可能会引起背景值的变动. 在研究某地区沉积物中微量元素的地累积指数时, 应以该区沉积物自身背景值作为计算地质累积指数的地球化学背景值^[20-21]. 文中 I_{geo} 是根据淮南市土壤背景值^[22] 的计算结果. 本文采用的地累积指数可分为以下几个级别, 具体见表 1.

表 1 地累积指数分级与污染程度之间的相互关系

Tab. 1 The correlations between the I_{geo} classification and pollution degree

地累积指数 I_{geo}	地累积指数分级	污染程度
$I_{geo} \geq 5$	6	极重污染
$4 \leq I_{geo} < 5$	5	重污染-极重污染
$3 \leq I_{geo} < 4$	4	重污染
$2 \leq I_{geo} < 3$	3	中污染-重污染
$1 \leq I_{geo} < 2$	2	中污染
$0 \leq I_{geo} < 1$	1	无污染-中污染
$I_{geo} < 0$	0	无污染

新的综合指数法的计算公式如下:

$$|P_{geo}| = \sqrt{\frac{(I_{ij})_{ave}^2 + (I_{ij})_{max}^2}{2}}$$

$$I_{综} = \sqrt{\frac{(I_{ij})_{ave}^2 + (I_{ij})_{max}^2}{2}}$$

表 4 C_i, E_i 和 RI 对应的污染程度

Tab. 4 The pollution levels corresponding to C_i, E_i and RI

污染系数 (C_i)	单个元素污染分级	潜在生态风险系数 E_i	单个污染物生态风险程度	潜在生态风险指数 RI	总的潜在生态风险程度
$C_i < 1$	轻度污染	$E_i < 40$	轻度污染	$RI < 150$	轻度污染
$1 \leq C_i < 3$	中度污染	$40 \leq E_i < 80$	中度污染	$150 \leq RI < 300$	中度污染
$3 \leq C_i < 6$	重污染	$80 \leq E_i < 160$	重污染	$300 \leq RI < 600$	重度污染
$C_i \geq 6$	很重污染	$160 \leq E_i < 320$	很重污染	$RI \geq 600$	很重污染
		$E_i \geq 320$	极重污染		

式中, i 为元素种类, j 为样品数 ($j = 1, 2, 3, \dots, 80$); P_{geo} 为第 i 种污染元素的综合污染指数, 正负与元素地累积指数相同; $I_{综}$ 为第 j 个样品的综合污染地累积指数; I_{ave} 为地累积指数算术平均值; I_{max} 为地累积指数最大值.

新的综合指数法是在地累积指数的基础上进行了内梅罗指数的计算, 因此本评价分级标准在地累积指数分级标准的基础上进行了调整(表 2).

表 2 新的综合污染指数污染程度分级

Tab. 2 The classification of the pollution levels of integrated pollution indices

等级划分	综合污染指数	意义
0	$P < 0$	无污染
1	$0 \leq P < 0.5$	轻污染
2	$0.5 \leq P < 1$	轻污染至中污染
3	$1 \leq P < 2$	中污染
4	$2 \leq P < 3$	中污染至强污染
5	$3 \leq P < 4$	强污染
6	$4 \leq P < 5$	强污染至极强污染
7	$5 \leq P$	极强污染

生态风险指数法(RI)的计算公式如下:

$$C_i^i = C_s^i / C_n^i$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_i^i$$

$$RI = \sum_1^n E_r^i$$

式中, C_i^i 为某一微量元素的污染系数; C_s^i 为样品中元素 i 的浓度; C_n^i 为计算所需的参照值, 取淮南市土壤背景值; T_r^i 为微量元素 i 的毒性系数, 反映了其毒性水平和生物对其污染的敏感程度; E_r^i 为微量元素 i 的潜在生态风险系数; RI 为综合潜在生态风险指数. T_r^i 见表 3^[23], C_i^i, E_r^i 和 RI 值相对应的污染程度及潜在生态风险程度见表 4.

表 3 各重金属的毒性系数

Tab. 3 The toxicity indices of selected heavy metals

	Zn	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni
T_r^i	1	5	30	2	5	5

2 结果与讨论

2.1 矿区土壤中微量元素的分布

2.1.1 土壤中微量元素的含量

Zn, Pb, Cd, Ni, Cr 和 Cu 为一般反映土壤污染程度的理想指标^[24]. 顾桥矿区矸石及矸石山周围表层及剖面土壤中微量元素总量的部分测试结果见表 6. 表 6 表明, 微量元素在矿区土壤中含量变化范围较大. 相对于淮南市土壤背景值及土壤环境质量标准, Cd 含量较高, 平均值为 0.145 mg/kg, 变化范围为 0.063~0.660 mg/kg, 超淮南市土壤背景值 5%~1 000%, 其余元素 Zn, Pb, Cr, Cu, Ni 均值低于淮南市土壤背景值, 少量样品测试值高于淮南市土壤背景值. 矸石中除 Cd 和 Cr 外, 其余元素含量均低于淮南市土壤背景值, 而土壤中 Zn, Cd, Ni 的含量均超过矸石中含量, 推测矸石中这些微量元素

的释放可能造成了它们在土壤中的富集. 煤矿土壤中元素平均含量均在土壤一级标准范围之内. 土壤环境质量二级标准为保障农业生产、维护人体健康的土壤限制值. 可见, 矿区土壤重金属污染尚不严重, 但须引起重视. Cd 的含量与王兴明等^[25] 研究结果相符, 而低于邵群^[26]、崔农鹏等^[27] 的研究. 推测本次土壤样品采自原始农田土壤, 且顾桥矿为新矿区, 微量元素污染积累不明显.

由表 7, 有机质和 Zn, Cd 含量呈显著正相关关系, 相关系数分别为 0.22, 0.26; 电导率 (electrical conductivity, EC) 和 Zn, Pb, Cd 含量存在极显著正相关关系, 相关系数分别是 0.41, 0.47, 0.58; 总磷, Zn 和 Cd 含量呈显著正相关关系; 总磷也与 Zn, Cd 含量呈显著正相关关系, 相关系数分别为 0.31, 0.24; 总氮与各微量元素都没有相关关系; 而总钾和所有微量元素含量都呈极显著正相关关系. 说明矿区

表 5 矸石山周边土壤的化学性质^[28]

Tab. 5 Some chemical properties of the soils sampled near coal waste piles

有机质/%	pH	电导率/(10^{-4} S · m ⁻¹)	总氮/(mg · kg ⁻¹)	总磷/(mg · kg ⁻¹)	总钾/(mg · kg ⁻¹)
0.7	7.23	230.22	1158.32	1545.5	6.98
(0.46~1.24)	(5.97~8.05)	(177.31~445.30)	(14.05~3386.07)	(1088.33~1950.24)	(4.72~9.63)

表 6 矿区土壤及矸石中微量元素的含量

Tab. 6 The contents of trace elements in soils and coal residue in Guqiao Coal Mine area

	Zn	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni
土壤中平均含量/(mg · kg ⁻¹)	28.51	8.75	0.15	43.88	18.31	20.04
范围/(mg · kg ⁻¹)	14.01~57.12	BDL~24.42	0.06~0.66	20.65~74.45	8.95~34.8	10.28~38.84
标准差	6.52	2.89	0.07	8.95	3.8	4.4
变异系数	0.23	0.33	0.51	0.2	0.21	0.22
矸石中平均含量/(mg · kg ⁻¹)	21.97	17.13	0.15	84.92	20.68	15.78
淮南土壤背景值/(mg · kg ⁻¹)	80.81	30.47	0.06	64.93	24.16	25.74
国家土壤标准一级/(mg · kg ⁻¹)	100	35	0.2	90	35	40
国家土壤标准二级/(mg · kg ⁻¹)	250	300	0.3	200	100	50
国家土壤标准三级/(mg · kg ⁻¹)	500	500	1	300	400	200

表 7 土壤微量元素和土壤理化指标的相关性分析

Tab. 7 Correlation analysis between the contents of trace elements in soil and the physical-chemical properties of soil

	Zn	Pb	Cd	Ni	Cr	Cu
有机质	0.22*	0.15	0.26*	-0.1	-0.14	-0.18
PH	0.08	-0.08	-0.15	-0.05	-0.25*	-0.11
EC	0.41**	0.47**	0.58**	0	-0.13	-0.08
总氮	0.1	0.05	0.08	0.04	0.04	0.01
总磷	0.31**	0.05	0.24*	-0.14	-0.1	-0.23*
总钾	0.80**	0.38**	0.33**	0.88**	0.64**	0.83**

【注】 * 为 0.05 水平上显著相关; ** 为 0.01 水平上极显著相关.

微量元素与总钾关系最为密切,其次是有机质和 EC.

土壤中微量元素和土壤理化性质间的关系复杂,如 Zn, Cd 含量与土壤 pH、有机质、EC、总钾的相关性显著,反映了上述理化指标是影响 Zn 和 Cd 富集的主要因素^[29]. Pb 与土壤 EC、总钾含量呈显著相关. Cu 除了与总钾含量有关,与土壤中总磷含量呈显著负相关. Ni 和 Cr 除了与总钾含量有关,与土壤其他理化性质无显著相关关系.

2.1.2 微量元素随深度变化趋势

Zn, Pb 和 Cd 随土壤深度变化趋势相似,表层(0~20 cm)土壤中 Zn, Pb, Cd 浓度要明显高于深

层. 有研究表明,土壤表层 Zn 淋滤向下迁移,而生物聚集作用使 Zn 回归至表层^[30]; Cd 在土壤中具有有限向下移动能力,即在表土层长期保留的性质,且具有较高有效性^[31]. 而 Ni 的浓度却在 80~100 cm 达最大值(图 2), Ni 和 Cu 随土壤深度变化趋势相似. 相关分析表明, Ni, Cu 与土壤深度间呈极显著正相关关系($\gamma_{Ni-深度} = 0.734$, $\gamma_{Cu-深度} = 0.811$), Pb, Cd 随土壤深度变化关系呈极显著负相关($\gamma_{Pb-深度} = -0.967 * *$, $\gamma_{Cd-深度} = -0.797$), 而 Zn 与土壤深度呈显著的负相关($\gamma_{Zn-深度} = -0.304$), Cr 的含量与土壤深度间无相关关系($\gamma_{Cr-深度} = 0.05$). 此结果与

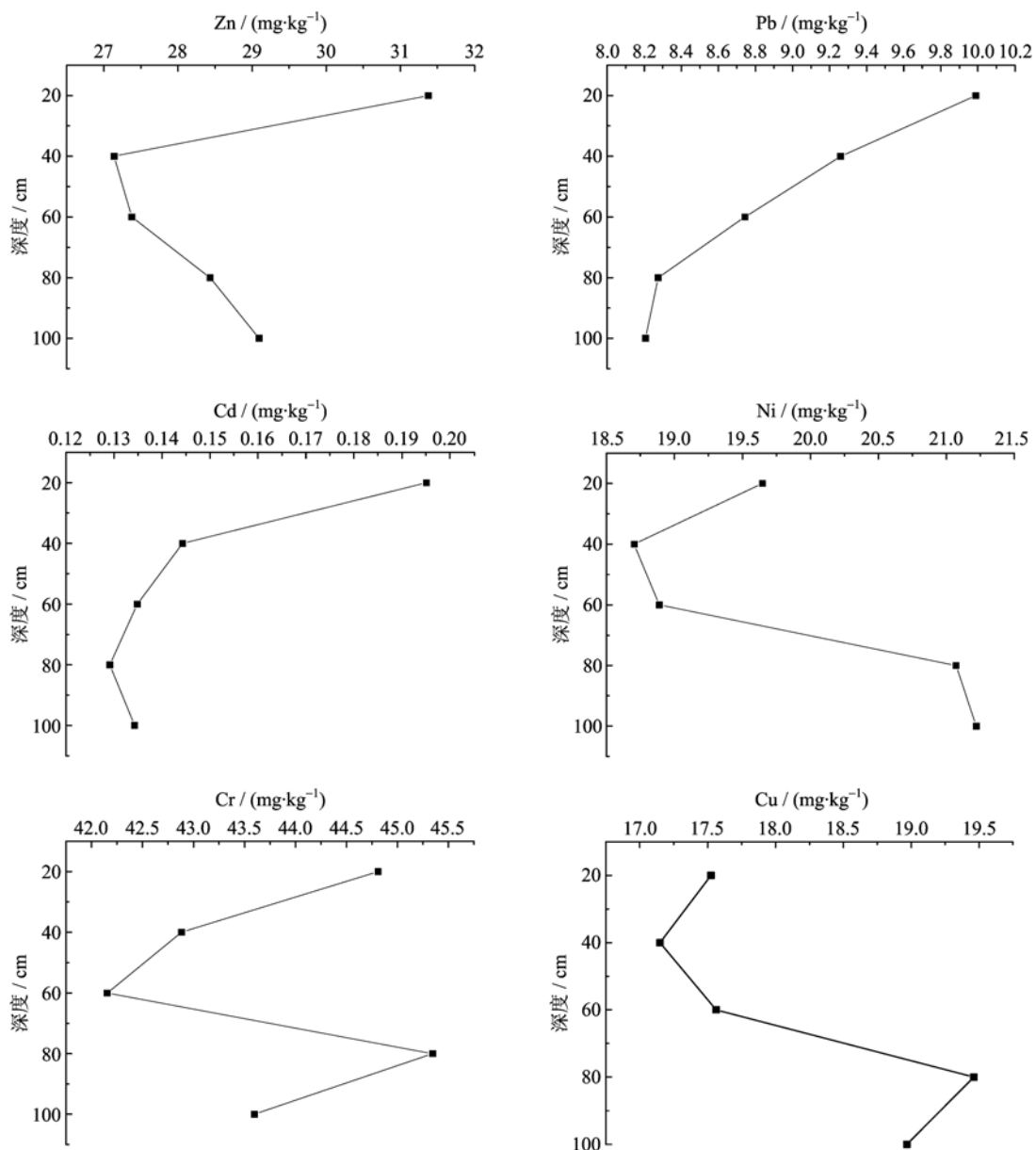


图 2 微量元素在不同深度土壤中的分布

Fig. 2 The distribution of trace elements in different depths of soil profile

前文所得的土壤中微量元素与有机质的相关关系十分相近,推测可能是农田的表层耕作土中所含有机质含量较多,而 Zn,Pb,Cd 在弱碱性的土壤中易与土壤有机质络合或螯合^[32].因此,在煤矿区土壤中重金属元素的分布特征与重金属各自的赋存迁移特性及煤矿区土壤的性质有关.

2.1.3 微量元素在水平距离上的分布规律

煤矿区矸石堆对周边土壤中微量元素含量存在一定的影响.研究表明,随着距矸石堆越远,土壤中微量元素含量逐渐减小^[25,33-34].但本研究中(图 3),表层土壤(0~20 cm)中的 Zn,Cd,Ni,Cr,Cu 均在样线 L1 上 10 m(除 Pb 在 100 m)处达最大值,之后有

所降低,而在样线 L2 上各元素含量先在短距离内缓慢降低,随后逐渐上升,均在 900 m 达最大值.一般情况下,煤矸石在堆放和运输过程中,在淋溶和淋滤作用下,煤矸石中微量元素析出,并在水力作用下渗透到矸石山附近土壤中,进而发生迁移,且与矸石山距离越大,周边土壤中重金属含量可能逐渐降低^[35-36].而由表 8 相关分析表明,土壤表层中 Zn,Pb,Cd,Ni,Cr 和 Cu 在样线 L1 上与距离呈负相关关系($P < 0.05$),即它们在土壤中的浓度在样线 L1 上随距离的增加而减少,与一般规律相符.而在样线 L2 上与距离呈正相关关系($P < 0.05$),即它们在土壤中的浓度在样线 L2 上随着距离的增大反而最终

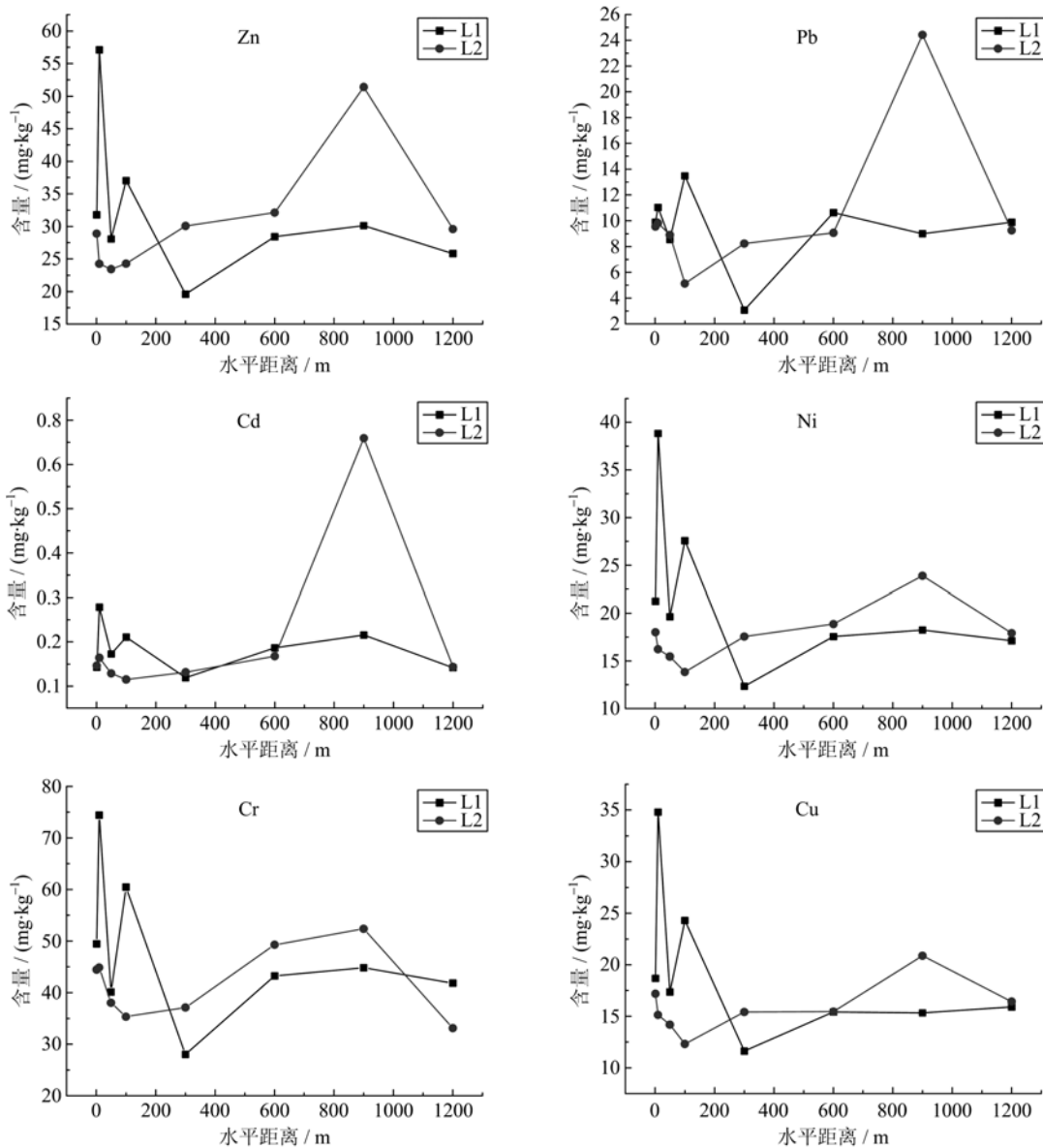


图 3 表层土壤(0~20 cm)中 Zn,Pb,Cd,Ni,Cr 和 Cu 含量随距离变化关系

Fig. 3 Relationship between the contents of Zn,Pb,Cd,Ni,Cr and Cu in surface soil (0~20 cm) and the distances

增加. 原因可能是 L2 与风向垂直, 受其影响较小, 而在其水平较远距离处(900 m 左右)存在另一个微量元素污染点源.

表 8 表层土壤(0~20 cm)中 As, Zn, Pb, Cd, Ni, Cr, Cu 含量和矸石山距离之间的相关关系

Tab. 8 Correlation matrix of concentrations of heavy metals in surface soil (0~20 cm) and the distances

	Zn	Pb	Cd	Ni	Cr	Cu
L1	-0.42	-0.07	-0.22	-0.49	-0.39	-0.49
L2	0.61	0.47	0.46	0.62	0.06	0.54

2.2 土壤中微量元素的风险评价

2.2.1 地累积指数法评价结果

由表 9, 由于该矿区土壤中 Zn, Pb, Ni, Cr 和 Cu 的 I_{geo} 均为负值, 说明在顾桥矿区土壤无 Zn, Pb, Ni, Cr 和 Cu 污染. 而 Cd 的 I_{geo} 在 0~1 之间, 说明顾桥矿区土壤产生 Cd 轻微污染. 重金属的地累积指数大小顺序为 $Cd > Ni > Cu > Cr > Zn > Pb$.

表 9 土壤微量元素风险评价结果

Tab. 9 The results of risk assessment of the trace elements in soil

	Zn	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	综合
I_{geo}	-2.03	-2.39	0.688	-1.15	-0.99	-0.95	0.99
I_{max}	-1.085	-0.9	2.87	-0.39	-0.06	0.01	-
I_{ave}	-2.12	-2.42	0.59	-1.18	-1.01	-0.98	-
P_{geo}	-1.69	-1.83	2.07	-0.88	-0.72	-0.69	-
C_i^r	0.35	0.29	2.42	0.68	0.76	0.78	-
E_{tr}^r	0.35	1.45	72.5	1.35	3.79	3.89	83.33

2.2.2 新的综合指数法评价结果

由表 9, 所有样点样品的综合地累积指数的平均值为 0.99, 属于轻污染-中污染级别. 各元素的综合地累积指数不超过等级 2, 以 Cd 的污染最为严重. 各元素污染顺序为 $Cd > Ni > Cu > Cr > Zn > Pb$.

2.2.3 生态风险指数法评价结果

潜在生态风险指数法考虑到不同微量元素的毒性差异及环境对微量元素污染的敏感程度. 由表 9, Cd 的 C_i^r 在 1~3 间, 属中度污染. Cd 的潜在生态风险参数超过 40, 说明顾桥矿土壤中 Cd 属于中度污染, 而 Zn, Pb, Ni, Cr 和 Cu 的潜在生态风险参数均小于 40, 说明 Zn, Pb, Ni, Cr 和 Cu 均未产生显著风险. 各元素对 RI 的贡献率大小排序为 $Cd > Ni > Cu > Pb > Cr > Zn$, 这与以上两种评价方法的排序皆不完全相同, 但贡献率排名前三的元素皆相同. 通过潜在生态风险参数数值分析, RI 小于 150, 说明 Zn,

Pb, Cd, Ni, Cr 和 Cu 对顾桥矿区土壤造成的污染属轻度污染级别.

3 结论

(I) 煤矸石山周边土壤中微量元素含量差异较大. Cd 含量较高, 为 0.063~0.660 mg/kg, 超淮南市土壤背景值 5%~1000%, 但其含量还在土壤一级标准范围之内. 其余元素均值低于淮南市土壤背景值. Zn, Cd 的含量与土壤基本理化性质关系密切.

(II) 土壤中微量元素随土壤深度变化趋势不显著. 土壤中 Zn, Pb 和 Cd 表层(0~20 cm)浓度高于底层(80~100 cm).

(III) 在 L1 上, 随着与矸石山距离的增加, 遵循自然沉降规律, 土壤表层中微量元素含量呈不规则减少的趋势. 而在 L2 上, 随着与矸石山距离的增加, 土壤表层中微量元素含量都有一种逐渐上升的趋势. Zn, Pb, Cd, Ni, Cr 和 Cu 在土壤中浓度最高值都出现在距矸石山一定距离处, 推测原因可能是在较远处存在另一重金属污染点源.

(IV) 地累积指数法评价结果表明, Zn, Pb, Ni, Cr 和 Cu 在顾桥矿区属无污染级别, Cd 属无污染-中污染级别. 新的综合指数法结果表明, Cd 污染最严重. 而生态风险指数法评价结果表明, 顾桥矿区存在 Cd 的潜在生态风险, 其他六种微量元素均未产生显著风险. RI 小于 150, 表明 Zn, Pb, Cd, Ni, Cr 和 Cu 在顾桥矿区土壤中污染属轻度. 几种评价方法结果均表明, 顾桥矿土壤中 Cd 已出现轻度污染, 需引起重视.

参考文献 (References)

- [1] Zhang M K, Ke Z X. Heavy metals, phosphorus and some other elements in urban soils of Hangzhou City, China[J]. Pedosphere, 2004, 14(2):177-185.
- [2] Zhang M K, Wang M Q, Liu X M, et al. Characterization of soil quality under vegetable production along an urban-rural gradient [J]. Pedosphere, 2003, 13(2):173-180.
- [3] Meng Zhaofu, Xu Chengze, Zhang Zengqiang, et al. Assessment of combined pollution of heavy metals in soils [J]. Agricultural Environmental Protection, 1999, 18(2):87-91.
孟昭福, 薛澄泽, 张增强, 等. 土壤中重金属复合污染的表征[J]. 农业环境保护, 1999, 18(2):87-91.
- [4] Clemente R, Walker D J, Roig A, et al. Heavy metal

- bioavailability in a soil affected by mineral sulphides contamination following the mine spillage at Aznalcóllar (Spain) [J]. *Biodegradation*, 2003, 14(3):199-205.
- [5] Liu Jingjing, Wang Ruwei, Liu Guijian, et al. Concentrations, distributions, and source of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil of Luling Coal Mine in Huaibei [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2010, 40(7):661-666.
刘静静, 王儒威, 刘桂建, 等. 淮北芦岭矿区土壤中PAHs的分布特征及分析[J]. *中国科学技术大学学报*, 2010, 40(7):661-666.
- [6] Xing Qinqin, Jiao Huafu, Yin Le. Study on the sustainable development of ecological environment in coal-dependent cities: A case study of Huainan City [J]. *World Regional Studies*, 2006, 15(2):54-60.
邢琴琴, 焦华富, 尹乐. 煤炭城市生态环境可持续发展研究: 以淮南市为例[J]. *世界地理研究*, 2006, 15(2):54-60.
- [7] Wang Jie, Liu Guijian, Fang Ting, et al. Assessment of pollution characteristics of heavy metals in the sediments of Huaihe River (Anhui Section) by pollution load index [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2013, 43(2):97-103.
王婕, 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.
- [8] Liu Guijian, Peng Zicheng, Wang Guiliang, et al. Study on trace elements in coal [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(1):53-62.
刘桂建, 彭子成, 王桂梁, 等. 煤中微量元素研究进展[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(1):53-62.
- [9] Swain D J. *Trace Elements in Coal* [M]. Butterworths, 1990.
- [10] Tang Xiuyi, Huang Wenhui. Trace elements of coal and its significances on research [J]. *Coal Geology of China*, 2002, 14(Z1):1-4.
唐修义, 黄文辉. 煤中微量元素及其研究意义[J]. *中国煤田地质*, 2002, 14(Z1):1-4.
- [11] Liu Yanjun, Tang Qingxin, Bai Zhenhua, et al. The research of heavy metals pollution in soil based on the connection of geoaccumulation index and Nemer index [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(20):174-178.
刘衍君, 汤庆新, 白振华, 等. 基于地质累积与内梅罗指数的耕地重金属污染研究[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(20):174-178.
- [12] Sun Yong, Yang Gang, Zhang Jinping, et al. Analysis of trace elements in corn stover by ICP - AES [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, 27(2):371-373.
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.
- [13] Li Shunjiang, Yang Linsheng, Wang Wuyi, et al. Determination of trace elements in drinking water of Kashin-Beck disease (KBD) affected and non-affected areas in Tibet by ICP - AES [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, 27(3):585-588.
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.
- [14] 中国科学院南京土壤研究所. *土壤理化分析* [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [15] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water research*, 1980, 14(8):975-1001.
- [16] Li Shaosheng. Application of index of geoaccumulation for pollution of heavy metals and fluorine in Yima Mining areas [J]. *Henan Science*, 2011, 29(5):614-618.
李绍生. 地质累积指数法在义马矿区土壤重金属及氟污染评价中的应用[J]. *河南科学*, 2011, 29(5):614-618.
- [17] Cheng J L, Shi Z, Zhu Y W. Assessment and mapping of environmental quality in agricultural soils of Zhejiang Province, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19:50-54.
- [18] Deng Qin, Wu Di, Qin Fanxin, et al. Survey and evaluation of heavy metal contents in Pb-Zn area [J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2010, 28(8):34-37.
邓琴, 吴迪, 秦樊鑫, 等. 铅锌矿区土壤重金属含量的调查与评价[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 28(8):34-37.
- [19] Xiong Jun, Wang Fei, Mei Pengsen, et al. Ecological risk assessment of heavy metal pollution in soils from the fluctuation belt of Xiangxi River in the Three Gorges Reservoir [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(11):1318-1324.
熊俊, 王飞, 梅朋森, 等. 三峡库区香溪河消落区土壤重金属生态风险评价[J]. *环境科学研究*, 2011, 24(11):1318-1324.
- [20] Teng Yanguo, Tuo Xianguo, Ni Shijun, et al. Applying geo-accumulation index to assess heavy metal pollution in sediment: Influence of different geochemical background [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 25(2):7-9.
滕彦国, 庾先国, 倪师军, 等. 应用地质累积指数评价沉积物中重金属污染: 选择地球化学背景的影响[J]. *环境科学与技术*, 2002, 25(2):7-9.

- [21] Li Juanjuan, Ma Jintao, Chu Xiujuan, et al. Application of index of geo-accumulation and enrichment factor in safety assessment of heavy-metal contamination in soil of copper refining [J]. *Journal of China Safety Science*, 2006, 16(12): 135-139.
李娟娟, 马金涛, 楚秀娟, 等. 应用地积累指数法和富集因子法对铜矿区土壤重金属污染的安全评价[J]. *中国安全科学学报*, 2006, 16(12): 135-139.
- [22] Yang Xiaoyong, Sun Liguang, Zhang Zhaofeng, et al. General study on soil pollution in Huainan Area, Anhui province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1995, 6(4): 37-43.
杨晓勇, 孙立广, 张兆峰, 等. 安徽淮南地区土壤污染综合研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1995, 6(4): 37-43.
- [23] Xu Zhengqi, Ni Shijun, Tuo Xianguo, et al. The calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the assessment by potential ecology risk index method [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(2): 112-115.
徐争启, 倪师军, 庾先国, 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.
- [24] Alloway B J. Heavy metal in soils [M]. London: Blackie Academic & Professional, 1990.
- [25] Wang Xingming, Dong Zhongbing, Liu Guijian, et al. Distribution characteristics of Zn, Pb, Cd, Cu in soil and crops around Xinzhuangzi Coal Mine waste rock pile [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2012, 42(1): 17-25.
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.
- [26] Shao Qun. The impact of heavy metals transfer from coal waste rock to soil in Xinzhuangzi subsidence area [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2007, 35(6): 34-36.
邵群. 新庄孜矿塌陷区煤矸石中重金属迁移对覆土影响[J]. *煤田地质与勘探*, 2007, 35(6): 34-36.
- [27] Cui Longpeng, Bai Jianfeng, Shi Yonghong, et al. Heavy metals in soil contaminated by coal mining activity [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(6): 896-904.
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.
- [28] Wang Xingming, Liu Guijian, Dong Zhongbin, et al. The characteristics of heavy metal accumulation in earthworms in the vicinities of the coal waste rock piles in Huainan [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(7): 1 219-1 226.
王兴明, 刘桂建, 董众兵, 等. 淮南煤矸石山周边土壤中蚯蚓对重金属的富集特征[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(7): 1 219-1 226.
- [29] Ye Huaxiang, Zhang Sichong, Xin Rui, et al. A study on soil heavy metals and its physical and chemical property of the vegetable plots in Harbin suburb [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(02): 162-166.
叶华香, 张思冲, 辛蕊, 等. 哈尔滨市郊菜地土壤重金属及土壤理化性质[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(02): 162-166.
- [30] 王云, 魏复盛, 杨国志, 等. 土壤元素环境化学 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.
- [31] Kuo S. Cd buffering capacity and accumulation in swiss chard in some sludge-amended soils [J]. *Soil Science Society America Journal*, 1990, 54: 86-91.
- [32] Lei Ming, Liao Bohan, Qin Pufen, et al. Fraction distributions and availability of Pb, Cd, Cu, and Zn in contaminated soils around mine [J]. *Ecological Environment*, 2007, 16(3): 807-811.
雷鸣, 廖柏寒, 秦普丰, 等. 矿区污染土壤 Pb, Cd, Cu 和 Zn 的形态分布及其生物活性的研究[J]. *生态环境*, 2007, 16(3): 807-811.
- [33] Li Dongyan, Fang Yuanyuan, Ren Yufen, et al. Analysis of heavy metal pollution in vicinity soil of coal gangue dump: Taking Zhongmacun Mine of Jiaozuo as an example [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2004, 32(5): 15-17.
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.
- [34] Zhang Mingliang, Wang Haixia. Characteristics on soil heavy metal pollution around coal mine waste piles [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(4): 189-192.
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.
- [35] Dang Z, Liu C Q, Haigh M J. Mobility of heavy metals associated with the natural weathering of coal mine spoils [J]. *Environmental Pollution*, 2002, 118(3): 419-426.
- [36] Song Wen, He Tianrong, Pan Lusheng. Distribution of mercury species in the soils from weathered coal mine spoils and crops in Shuicheng, Guizhou Province, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(7): 1 326-1 332.
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*, 2010, 29(7): 1 326-1 332.