平顶山矿区丘陵坡地土壤重金属分布及污染特征

楚纯洁1,2,周金风3

(1.陕西师范大学旅游与环境学院,西安 710119; 2.平顶山学院资源与环境科学学院,河南 平顶山 467000; 3.南京大学化学化工学院,南京 210093)

摘要:对平顶山矿区周边丘陵坡地土壤进行采样,分析了Cu、Zn、Cr、Ni、Pb在不同海拔与矿区下风向不同距离处的分布特征及污染水平。结果表明:① 矿区丘陵坡地土壤存在不同程度的重金属累积,以Ni、Cr、Cu累积较重。② 五种元素均在矿区、坡底附近及近坡顶含量较高,而在矿区下风向以50m内含量最高,之后呈递减趋势。③ Cu、Cr、Pb随坡度减小而含量增大,Zn、Ni在坡度5°~15°时含量最大;土地利用对坡面土壤重金属的分布不产生明显影响,林地、草地、坡耕地之间重金属含量也无显著差别。④ 五种元素均在矿区附近产生污染,矿区以下存在Cu、Ni、Pb污染,而矿区以上只有Ni出现轻度污染;矿区下风向Cu、Ni污染且迁移距离较远,Cr、Pb仅在100m内出现轻度污染,Zn尚未达到污染水平。⑤ Ni、Cu、Pb以人为活动源为主,Cr和Zn以自然源为主。

关键词: 坡地土壤;重金属;土壤污染;丘陵;平顶山矿区 DOI: 10.11821/dlyj201407017

1 引言

煤炭是中国最主要的一次性能源,占一次性能源使用量的75%左右,这种短期难以 改变的能源格局使得煤炭开发活动中所面临的安全、环境问题更加严峻。土壤作为开放 的缓冲动力学体系,长期的外源性输入使得土壤污染以及相关的生态环境问题成为人们 关注的热点^[1],其中煤矿开采所引起的矿区土壤重金属污染现象已经成为现代土壤环境的 一个突出问题^[2]。中国煤炭型城市多达58个,在全国95个矿业城市中比重高达61%^[3]。 因此,加强对煤炭型城市矿区土壤重金属污染研究,对于此类城市的可持续发展具有迫 切的现实意义。

近年来国内外学者针对煤炭城市土壤重金属污染开展了大量研究,但大多集中于煤矸石的土壤环境效应^[4,5]、废弃地土壤重金属污染^[6,7]、复垦土壤重金属污染^{(8,9]}、煤矿区土壤生物效应^[10]等方面,而针对煤炭开采所引发的矿区土壤重金属污染研究则较少^[11-13],尤其是针对易发生风蚀水蚀地区的煤炭矿区的相关研究更是鲜见报道^[14]。平顶山矿区是中国重要的煤炭生产基地,由于主要分布于豫西伏牛山东段余脉的石质丘陵坡地,特殊的地理位置使得土壤环境长期受到煤炭开采与水蚀风蚀的深刻影响。煤矿粉尘的迁移沉降、煤矸石和采矿污泥、废水等的不合理处置,在地形因子作用下,使得重金属元素在矿区周边土壤中的迁移分布变得极为复杂。本文选取平顶山矿区周边的丘陵坡地,通过

收稿日期: 2013-11-16; 修订日期: 2014-04-05

基金项目:国家自然科学基金项目(40672108);河南省科技计划项目(122102310652);河南省教育厅科技研究重 点项目(12B210020)

作者简介: 楚纯洁(1978-), 男,河南叶县人,博士研究生,讲师,主要从事自然地理、生态环境演变及质量评价研究。E-mail: zzfccj@163.com

分析土壤重金属元素在不同海拔下沿坡面的变化及在矿区下风向不同距离处的迁移分 布,以揭示矿区丘陵坡地土壤重金属的迁移分布规律及污染风险,为土壤重金属污染的 综合防控与修复提供科学依据。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

研究区位于河南省平顶山市(33°08′~34°20′N、112°14′~113°45′E),境内分布有大面积石质丘陵。属典型的北亚热带向暖温带过渡的大陆性季风气候,6-8月份盛行南风或偏南风,其他月份以北风或偏北风为主,以NW风向最多,积累频率为13%,最大风速可达24 m/s。全年日照时数2000 h,年均气温14.7℃,无霜期223 d,年均降雨量759 mm。 土壤类型是南方的黄红壤土向北方的褐土过渡类型,土壤粗骨性比较突出,土壤厚度多在5~45 cm^{1/5}。

平顶山矿区建于1956年,分布于市区北部的丘陵南坡,共有大型矿井11对,东西绵延约30km,为中国重要的煤炭基地。矿区周边丘陵多属剥蚀侵蚀地形,地形切割破碎,土壤通透性差,极易形成地表径流。矿区人为水土流失严重,土壤年侵蚀模数由工矿占地前的1380t·km⁻²增加到3750t·km⁻²,最高达6500t·km⁻²。取样地点为平煤四矿所在的擂鼓台,位于市区西北6km处,海拔506m,山体由二叠系上统紫红色中厚层状中粗粒石英砂岩、粉砂岩、砂质页岩组成。

2.2 样品采集与处理

结合地形条件,以矿区为中心,依据不同海拔从 坡顶至坡底作为主轴线(A轴),按土地利用类型采 样。为确保样点能代表研究区域的特征,在每一海拔 高度的同一类型地块随机选择3个相隔至少50m的样 地,即为3个重复。在每个重复中,采用蛇形取样法 采集多点混合样,充分混合后为1个土样。取3个重复 样测试结果的平均值作为该海拔处样点的重金属含 量。另外考虑当地气候特点,以污染主导风向的下风 向为轴(B轴),分别在距矿区东南方向50m、 100m、200m、500m、1000m、1500m处(高差相 差较小)按蛇形取样法采集多点混合样,每1混合样 为1个土样。由于石质丘陵区土层浅薄,故只采集0~ 15 cm表层样,样地选取均避开道路。研究区地形及 样点分布如图1、表1。



图 1 研究区地形及采样点位分布 Fig. 1 The terrain in the study area and sampling sites

2.3 测试方法

土样在室温下自然风干后,拣去植物残体与石砾,磨细全部通过2 mm 尼龙筛,混 匀;然后按照多点取样约5 g,继续研磨,使之全部通过0.149 mm 土壤筛供实验分析用。

本研究测试重金属元素包括Cu、Zn、Cr、Ni、Pb等五种。其中Cu、Zn依据GB/T 17138-1997测定,Cr、Ni分别依据GB/T 17137-1997和GB/T 17139-1997测定,Pb依据 GB/T 17141-1997测定,所用仪器为日本岛津AA-6601F原子吸收分光光度计,用氘灯作 背景校正。为保证分析结果准确度,试剂全部采用优级纯,水为去离子水,分析过程中 加入标准物质ESS-4与样品同样处理和测定,实测含量均在参考值的允许范围内(表

样点		海拔(m)	炭(m) 距离(m) 地		坡向 坡度(°)		土地利用与优势植(作)物		
-	N1	450	-	坡顶	南向	32	荒草地,青蒿(Sweet Wormwood Herb)		
	N2	434	-	坡上	南向	40	荒草地,青蒿(Sweet Wormwood Herb)		
	N3	409	-	坡上	南向	20	人工林,刺槐(Robinia pseudoacacia L.)		
	N4	394	-	坡上	南向	20	荒草地,青蒿(Sweet Wormwood Herb)		
	N5	383	-	坡上	南向	14	坡耕地,玉米		
	N6	356	-	坡上	南向	50	荒草地,青蒿(Sweet Wormwood Herb)		
A轴	N7	293	-	坡中上	南向	12	坡耕地,花生		
	N8	246	-	坡下	南向	10	坡耕地,花生		
	N9	218	-	坡下	南向	5	矿工生活区草坪,野牛草(Buchloe dactyloides)		
	N16	183	-	坡下台地	南向	0	人工林,小叶杨(Populus simonii Carr)		
	N17	173	-	坡下台地	南向	0	人工林,小叶杨(Populus simonii Carr)		
	N18	163	-	坡下台地	南向	0	荒草地,冰草(Agropyron cristatum)		
	N19	154	-	坡底台地	南向	0	人工林,小叶杨(Populus simonii Carr)		
	N10	202	50	坡下台地	南向	0	人工林,小叶杨(Populus simonii Carr)		
B轴	N11	197	100	坡下台地	南向	3	坡耕地,玉米		
	N12	191	200	坡下台地	南向	4	坡耕地,玉米		
	N13	186	500	坡下台地	南向	3	坡耕地,玉米		
	N14	185	1000	坡下台地	南向	0	坡耕地,玉米		
	N15	182	1500	坡下台地	南向	0	坡耕地,玉米		

表1 研究区采样点位概况 Tab.1 Conditions of the sampling sites in the study area

2),每4个土样随机挑选1个做平行样(重复做3次),重复样相对偏差均小于10%,符 合精度要求^[16]。

表2 环境土壤标准物质褐土ESS-4元素测定结果

Tab. 2 Determination results of ESS-4: An environmental soils standard reference material for brown soil

元素	Cu	Zn	Cr	Ni	Pb
实测值(mg・kg ⁻¹)	27.18	67.36	68.92	31.67	21.60
参考含量(mg・kg ⁻¹)	26.3±1.7	69.1±3.5	70.4±4.9	32.8±1.7	22.6±1.7

2.4 土壤重金属污染评价

山地土壤重金属污染除要考虑人类活动源因素、环境地球化学背景值外,还应考虑 由于自然成岩作用可能会引起背景值变动的因素。地累积指数(Igeo)是1960年代晚期在欧 洲发展起来的广泛用于研究沉积物及其他物质中反映重金属污染程度的定量指标¹¹⁷,可 以有效弥补其他评价方法的不足¹¹⁸。该指数不仅可以反映重金属分布的自然变化特征, 也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。其计算公式¹¹⁷为:

$$I_{geo} = \log_2(C_n / 1.5B_n)$$
(1)

式中: C_n 为元素 n实测含量; B_n 为沉积岩中元素 n的地球化学背景值含量; 1.5为常数, 主要是考虑各地岩石的岩性差异可能会引起背景值的变动而取的系数。地累积指数分级 标准为: $I_{geo}<0$,表示无污染; $0 \le I_{geo}<1$,表示无污染到中度污染; $1 \le I_{geo}<2$,表示中度污 染; $2 \le I_{geo}<3$,表示中度污染到强污染; $3 \le I_{geo}<4$,表示强污染; $4 \le I_{geo}<5$,表示强污染到 极强度污染; Igeo≥5, 表示极强污染。

3 结果分析

3.1 土壤重金属含量特征

对土壤重金属含量进行分类统计,结果如表3。与依据母质母岩(砂页岩)划分的中国土壤元素背景值¹⁹⁹以及河南省土壤背景值¹²⁰相比,Cu、Cr、Ni和Pb平均含量均超过相应背景值,Zn平均含量低于背景值。进一步统计发现,Cu、Zn、Cr、Ni、Pb含量的母岩背景超标率分别为73.7%、15.8%、94.7%、100%、42.1%,河南背景超标率分别为84.2%、10.5%、84.2%、100%、57.9%,两者均表现为Ni超标率最高,其次为Cr和Cu,可见平顶山矿区丘陵坡地这三种元素的累积情况较为普遍,Pb部分样点超标,而Zn只有个别样点超标,说明Zn主要为自然源。但与国家土壤环境质量的Ⅱ级标准(6.5<pH<7.5)^[21]相比,Cu、Zn、Cr、Pb含量均不超标,Ni含量超标率高达72.2%,说明土壤Ni污染较突出,人为活动源可能是主要原因,这在其他研究中也有类似结果¹¹¹,反映了Ni在煤矿区污染具有一定普遍性。由此可见,平顶山矿区丘陵坡地土壤存在不同程度的重金属累积,这除了受自然成土母质影响外,还与矿区人为活动有关,因为煤炭开采过程中产生的煤矸石、废渣、粉煤灰等含有大量的金属硫化物,这些金属硫化物在空气中长期暴露,将其中的重金属毒害元素以不同途径释放到环境中,致使重金属元素在土壤中形成一定的积累^[22,3]。

从各元素沿轴线变化来看(表3), Cr和Ni含量无论沿坡面变化(A轴)还是随距离 变化(B轴)其变异均较小,说明Cr和Ni可能与地球化学成因有关。研究表明:土壤Cr 和Ni主要受成土母岩影响^[24]。平顶山矿区石质丘陵母岩多为粉砂岩、砂页岩,且下伏煤 层,极易受到风化剥蚀、水力冲蚀等自然因素及煤炭开采活动等人为因素影响,污染元 素通过淋滤入渗或大气沉降进入土壤。因此,地质成因与人为活动的共同作用使平顶山 矿区周边土壤Cr、Ni含量较高,这应该是其变异系数较小的主要原因,但在本研究中还 可能与Cr、Ni元素的迁移途径有关,具体下文进一步分析。相比之下,Cu、Zn、Pb含 量沿坡面变异较大,如Pb变异系数高达71.3%,而在矿区下风向变异则显著较小,这可

	T T T T T T T T T T T T T T T T T T T						
统计类型	统计项	Cu	Zn	Cr	Ni	Pb	
全部	平均值	34.29	54.86	72.33	58.24	33.90	
	变异系数(%)	37.2	49.5	14.2	18.7	71.2	
	变化范围(mg·kg ⁻¹)	18.12~61.98	35.19~155.43	46.03~92.58	39.06~73.33	8.48~88.02	
プロと地	平均值(mg·kg⁻¹)	32.68	56.79	71.97	57.00	37.51	
个 回 母 抜 (A 妯)	变异系数(%)	44.6	55.5	16.5	20.2	72.6	
(A抽)	变化范围(mg·kg⁻¹)	18.12~61.98	35.19~155.43	46.03~92.58	39.06~73.33	8.48~88.02	
て日に本	平均值(mg·kg⁻¹)	39.91	50.84	76.56	63.64	26.65	
个问距离 (P 抽)	变异系数(%)	9.5	13.8	11.3	14.8	34.5	
(D1田)	变化范围(mg·kg ⁻¹)	35.42~45.52	39.74~56.89	70.33~80.61	50.98~72.13	19.04~35.42	
母岩背景值(砂页岩) ^[19] (mg·kg ⁻¹)		21.8	63.8	55.5	22.7	24.7	
河南省背景值 ^[20] (mg·kg ⁻¹)		20.0	62.5	63.2	27.4	22.3	
土壤环境Ⅱ级标准 ^[21] (mg·kg ⁻¹)		≤100	≤250	≤200	≤50	≤300	

表3 土壤重金属含量描述性统计 Tab.3 Descriptive statistics for soil heavy metal contents

能是因为在地形条件影响下,土壤Cu、Zn、Pb元素沿坡面的迁移较为活跃。

3.2 不同地形因子条件下土壤重金属分布特征

3.2.1 不同海拔土壤重金属含量分布 土壤重金属含量沿坡面变化(A轴)如图2。结果 显示,各元素沿坡面分布既有共同之处,亦有局部差异,尤其Cu、Zn、Pb具有极为相似 的沿坡面变化规律(图2a),说明这三种元素具有相似的迁移特点。Cu、Zn、Cr和Pb含 量分别在接近坡顶附近(海拔383~434 m)和矿区及以下坡面形成高值区,坡上高值区 的平均含量分别为20.93 mg·kg⁻¹、40.58 mg·kg⁻¹、76.97 mg·kg⁻¹、20.72 mg·kg⁻¹, 而在矿区及以下高值区的平均含量则分别为46.43 mg · kg⁻¹、79.63 mg · kg⁻¹、77.86 mg·kg⁻¹、63.55 mg·kg⁻¹,其中矿区及以下坡面Cu、Zn、Pb含量明显高于坡上,而Cr 元素坡下含量仅略高于坡上。Cu、Zn、Cr、Pb在矿区及以下坡面的含量变化进一步表现 为矿区附近含量较高,但随海拔降低元素含量有一定增加,并在坡底附近(海拔154~ 163 m)出现不同程度峰值,尤其Pb在矿区以下坡面的累积尤为突出。Zn元素在矿工生 活区样点的含量明显高于其他样点,达到155.43 mg·kg⁻¹,这与以往有关城市居民区土 壤Zn污染较重的报道一致^[2],结合前述分析,说明Zn局部污染主要与矿区居民生活有 关,而生产活动对其累积影响较小。土壤Ni含量在近坡顶(海拔434 m)附近较高,自 此以下直至矿区先降后升,并在矿区达到最大值,最大含量73.33 mg·kg⁻¹,这与其他四 种元素相类似。矿区以下土壤Ni含量则随海拔降低而显著减小,但仍然明显高于背景含 量,且在近坡底(海拔163 m)附近亦出现了较小峰值(图2b)。





由以上分析可知, 土壤 Cr、Ni 沿坡面(A轴)的迁移分布与 Cu、Zn和Pb既有共性,也存在一定差异。在共性方面,各重金属沿坡面的迁移分布既受人为扰动的影响, 也受地形等自然条件影响。一方面受采煤、矸石堆积及运输过程中产生的废水、废渣及 粉煤灰等迁移、沉降、风化淋溶影响,在长期土壤侵蚀、坡面径流等侵蚀因子及坡面重 力沉降的影响下,矿区及以下坡面土壤出现一定程度的重金属累积。另一方面,各元素 在近坡顶附近出现高值则主要是受地形阻滞影响,矿区粉尘中污染元素随大气沉降而出 现一定程度的累积。在差异性方面,土壤Ni、Cr的迁移与采矿活动中大量产生的粉煤灰 性质有关。据已有研究,Ni、Cr元素在地表灰尘的污染迁移中往往具有相似的地球化学 行为,且以残渣态结合为主^[26]。席永慧等对比了粉煤灰、黏土、粉质黏土、膨润土对Ni 离子的吸附效应,结果表明粉煤灰对Ni离子的吸附能力远大于黏土和粉质黏土^[27],而Ni 元素很容易被吸附在粉煤灰或粉尘颗粒上迁移很远的距离^[28,29],同时燃煤废气和粉煤灰中 Cr含量也较高^[30],以致Ni、Cr在矿区及以上坡面甚至坡顶附近累积明显。因此,粉尘、 粉煤灰的大气传播与沉降可能是平顶山矿区周边丘陵坡地土壤Ni、Cr迁移分布的一种主 要途径。但Ni坡底含量明显比近坡顶及矿区低,说明Ni的坡面迁移可能主要以粉尘的大 气传播为主,Cr含量在矿区以下坡面的累积仅略高于近坡顶,可能是因为地形侵蚀因子 与粉尘的大气传播在坡面迁移中的作用相当。相比Cr、Ni元素,Cu、Zn和Pb在矿区及 以下坡面的累积明显大于坡顶,说明地形侵蚀因子可能是影响其分布的主要途径,粉尘 迁移作用则相对较弱。

3.2.2 不同坡度土壤重金属含量变化 坡度是影响元素迁移、分布的重要地形因子,根据国际地理学会地貌调查与制图委员会的坡度分级标准^[31],结合本研究进行分类统计(表4)。结果显示,Cu、Cr、Pb含量与坡度因子存在显著负相关,均表现为随坡度减小而增大。Zn与坡度因子也存在负相关,但并没有达到显著程度,主要表现在Zn最大含量并没有出现在缓坡或平地(0~5°),而是在坡度介于5°~15°的矿区,受矿区居民生活影响,Zn含量明显较高。土壤Ni含量与坡度因子没有明显相关性,主要表现在坡度0~5°之间的缓坡或平地Ni含量最小,但也明显高于背景含量。结合表1,坡度0~5°主要为坡下林地或耕地,而矿区及以上坡地虽然坡度较大,但Ni含量仍相对较高(图2b),这可能与前述分析的Ni元素的迁移特点有关。

表 4 不同坡度土壤重金属含量及与坡度的 Person 相关系数 Tab. 4 Soil heavy metal contents on different slopes and correlation coefficients between heavy metal contents and slopes

	Cu(mg \cdot kg ⁻¹)	$Zn(mg \cdot kg^{-1})$	$Cr(mg \cdot kg^{-1})$	Ni(mg \cdot kg ⁻¹)	$Pb(mg \cdot kg^{-1})$
>15	21.30	40.07	66.33	56.16	17.90
- 15	21.39	-0.07	60.55	55.10	17.50
5-15	33.51	68.08	68.51	67.25	29.67
0-5	43.32	64.47	80.37	49.65	63.40
相关系数	-0.635*	-0.478	-0.582*	0.149	-0.700^{**}

注: **为0.01水平(双侧)上显著相关, *为0.05水平(双侧)上显著相关。

3.2.3 不同坡位土地利用方式对土壤重金属含量的影响 图3为不同坡位条件下草地、林地及耕地三种类型土壤重金属含量对比。结果显示,三种用地类型土壤Cu、Zn和Pb含量均表现为坡上低于坡下,而Cr、Ni含量则表现为坡上与坡下接近。这一特点与前述各元素沿坡面的分布一致,说明本研究中土地利用方式对不同坡位土壤重金属的分布不产生明显影响。由图3可知,相同坡位的三种用地类型之间重金属含量无显著差别,其中坡耕地Cu、Zn和Pb含量相比其他类型略低,而Cr、Ni含量则相比其他类型略高,说明化肥农药的施用对耕地土壤Cr、Ni累积的贡献并不大。

3.3 矿区下风向不同距离处土壤重金属含量变化

矿区下风向(B轴)土壤重金属分布 如图4。结果显示,各重金属元素均在距 离矿区50m的范围内含量最高,之后随 距离增加,总体上呈递减趋势,说明矿区 下风向各重金属元素均受到了矿区人为扰 动影响,也印证了重金属元素在土壤中的 迁移距离与距污染源的距离成反比^[32]。不 同距离处Zn含量均低于背景值,进一步 说明Zn主要源于自然成土母质。Pb含量 在距离矿区200m之后就已低于背景值且





趋于稳定,说明Pb元素在矿区下风向的 迁移距离较近。不同距离处Cu、Cr、Ni 含量均高于背景值,可能与三种元素在 矿区下风向的迁移距离较远有关。

3.4 土壤重金属污染评价

由表3,各重金属母岩背景值与河南 省背景值相差不大,研究区各重金属相 比二种背景值的超标分析结果也基本一 致。由于平顶山矿区石质丘陵土层浅 薄,土壤重金属含量易受母岩的影响, 为进一步分析重金属受人为活动影响的





程度,以母岩背景值作为地球化学背景值进行地累积指数评价,结果如图5。由图5a可知,各重金属污染水平沿坡面变化(A轴)存在显著差异。矿区以上坡面土壤Ni元素*I*see 均介于0~1之间,污染程度较轻,其他四种元素*I*see均小于0,尚属清洁。由此可见,虽 然矿区以上坡面(尤其近坡顶附近)存在不同程度的重金属累积,但只有Ni出现了轻度 污染。矿区附近各重金属元素均已产生污染,其中Ni元素*I*see均大于1,达到中度污染水 平;Cu和Pb元素*I*see均介于0~1之间,达到轻度污染水平;Zn和Cr元素分别只有1个样 点达到轻度污染水平。矿区以下坡面各重金属污染水平也存在一定差异,其中Zn和Cr 元素*I*see小于0,尚未形成污染;Cu和Ni元素*I*see介于0~1之间,达到轻度污染水平;Pb 元素自矿区以下至坡底*I*see逐渐增大,由轻度污染加重到坡底的中度污染。

由图 5b 可知, 矿区下风向(B轴)不同距离处各重金属污染程度也存在较大差异。 不同距离处 Cu元素 *I_{geo}*均介于0~1,达到轻度污染水平。Ni元素在距离矿区 200 m 的范围 内 *I_{geo}*略大于1,达到中度污染水平,而在距离矿区 200 m 以外则为轻度污染。Cr 和 Pb 除 了在距离矿区 100 m 以内发生轻度污染外,其他距离处均属清洁。不同距离处 Zn 元素 *I_{geo}* 均小于0,尚未达到污染水平。

结合前述分析可判定,平顶山矿区丘陵坡地土壤基本不存Zn、Cr污染,以自然源为 主,Cr元素沿坡面及下风向的累积与其迁移途径有关。Ni、Cu、Pb为矿区主要污染元 素,以人为活动源为主,其累积污染与矿区人为活动及迁移途径存在较大关系。





4 结论

(1) 与母岩背景值和河南省背景值相比,平顶山矿区丘陵坡地土壤存在不同程度的 重金属累积,超标率由大到小依次为Ni、Cr、Cu、Pb、Zn,其中所有样点Ni含量均超 标,Zn只有矿区样点超标。

(2)不同海拔下,各重金属元素均在矿区、坡底附近及近坡顶含量较高,而在矿区 下风向均在距离矿区50m的范围内含量最高,其后随距离增大呈递减趋势。

(3) Cu、Cr、Pb含量随坡度减小而增大,Zn、Ni含量在坡度5°~15°时最大,分别与 矿区居民生活及元素的迁移特点有关。土地利用方式对不同坡位土壤重金属的分布不产 生明显影响,林地、草地、坡耕地之间重金属含量也无显著差别。

(4) 矿区附近,各重金属均出现了不同程度的污染;矿区以下坡面,Cu、Ni、Pb存 在普遍的轻-中度污染,而Zn、Cr尚未产生污染;矿区以上坡面,虽然各重金属均发生 了一定累积,但只有Ni出现了轻度污染。矿区下风向土壤Cu、Ni污染达到轻-中度水 平,Cr、Pb污染仅出现于距矿区100m范围内,Zn元素尚未达到污染水平。

(5)各重金属元素在不同海拔下及矿区下风向的迁移分布均受到了矿区人为扰动影响,但Ni、Cu、Pb以人为活动源为主,为矿区主要污染元素,Zn和Cr以自然源为主。

参考文献(References)

- Fergusson J E. The Heavy Metals: Chemistry, Environmental Impact and Health Effects. New York: Pergamon Press, 1990: 382-388.
- [2] Bhuiyan M A H, Parvez L, Islam M A, et al. Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh. Journal of Hazardous Materials, 2010, 173(1): 384-392.
- [3] 樊杰, 孙威, 傅小锋. 我国矿业城市持续发展的问题、成因与策略. 自然资源学报, 2005, 20(1): 68-77. [Fan Jie, Sun Wei, Fu Xiaofeng. Problems, reasons and strategies for sustainable development of mining cities in China. Journal of Natural Resources, 2005, 20(1): 68-77.]
- [4] 张锂, 韩国才, 陈慧, 等. 黄土高原煤矿区煤矸石中重金属对土壤污染的研究. 煤炭学报, 2008, 33(10): 1141-1146.
 [Zhang Li, Han Guocai, Chen Hui, et al. Study on heavy metal contaminants in soil coming from coal mining spoil in the Loess Plateau. Journal of China Coal Society, 2008, 33(10): 1141-1146.]
- [5] 闫宝环,李凯荣,时亚坤. 铜川市三里洞煤矸石堆积地风化土壤重金属污染及植物富集特征. 水土保持通报, 2012, 32
 (3): 47-50. [Yan Baohuan, Li Kairong, Shi Yakun. Heavy metal contamination of weathered soil and enrichment characteristics of plants at Sanlidong coal gangue site in Tongchuan City. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(3): 47-50.]
- [6] Yenilmez F, Kuter N, Emil M K, et al. Evaluation of pollution levels at an abandoned coal mine site in Turkey with the aid of GIS. International Journal of Coal Geology, 2011, 86(1): 12-19.
- [7] 孙贤斌, 李玉成. 淮南大通煤矿废弃地土壤重金属空间分布及变异特征. 地理科学, 2013, 33(10): 1238-1244. [Sun Xianbin, Li Yucheng. The spatial distribution of soil heavy metals and variation characteristics of Datong abandoned coal mine area in Huainan city. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(10): 1238-1244.]
- [8] 郑永红, 张治国, 姚多喜, 等. 煤矿复垦区土壤重金属含量时空分布及富集特征研究. 煤炭学报, 2013, 38(8): 1476-1483. [Zheng Yonghong, Zhang Zhiguo, Yao Duoxi, et al. Characteristics of temporal-spatial distribution and enrichment of heavy metals in coal mine reclaimed soil. Journal of China Coal Society, 2013, 38(8): 1476-1483.]
- [9] Wang J, Liu W, Yang R, et al. Assessment of the potential ecological risk of heavy metals in reclaimed soils at an opencast coal mine. Disaster Advances, 2013, 6: 366-377.
- [10] 郭星亮, 谷洁, 陈智学, 等. 铜川煤矿区重金属污染对土壤微生物群落代谢和酶活性的影响. 应用生态学报, 2012, 23 (3): 798-806. [Guo Xingliang, Gu Jie, Chen Zhixue, et al. Effects of heavy metals pollution on soil microbial communities metabolism and soil enzyme activities in coal mining area of Tongchuan, Shaanxi province of northwest China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(3): 798-806.]
- [11] Teixeira E, Ortiz L, Alves M, et al. Distribution of selected heavy metals in fluvial sediments of the coal mining region

of Baixo Jacuí, RS, Brazil. Environmental Geology, 2001, 41(1-2): 145-154.

- [12] Zhai M, Totolo O, Modisi M P, et al. Heavy metal distribution in soils near Palapye, Botswana: An evaluation of the environmental impact of coal mining and combustion on soils in a semi-arid region. Environmental Geochemistry and Health, 2009, 31(6): 759-777.
- [13] 朱岗辉, 孙璐, 廖晓勇, 等. 郴州工业场地重金属和PAHs复合污染特征及风险评价. 地理研究, 2012, 31(5): 831-839.
 [Zhu Ganghui, Sun Lu, Liao Xiaoyong, et al. Combined pollution of heavy metals and PAHs and its risk assessment in industrial sites of Chenzhou city. Geographical Research, 2012, 31(5): 831-839.]
- [14] 石占飞, 王力. 神木矿区土壤重金属含量特征及潜在风险评价. 农业环境科学学报, 2013, 32(6): 1150-1158. [Shi Zhanfei, Wang Li. Contents of soil heavy metals and evaluation on the potential pollution risk in Shenmu mining area. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(6): 1150-1158.]
- [15] 曾宪勤, 刘宝元, 刘瑛娜, 等. 北方石质山区坡面土壤厚度分布特征: 以北京市密云县为例. 地理研究, 2008, 27(6): 1281-1289. [Zeng Xianqin, Liu Baoyuan, Liu Yingna, et al. Soil depth distribution characteristics on the lithoidal mountainous slope of northern China: A case study of Miyun county, Beijing. Geographical Research, 2008, 27(6): 1281-1289.]
- [16] 中国环境监测总站,南京市环境监测中心站. HJ/T166 2004. 土壤环境监测技术规范. 北京:中国标准出版社, 2004. [Central Station of Environmental Monitoring of China, Central Station of Environmental Monitoring in Nanjing. HJ/T166 – 2004. Technical Standard for Soil Environmental Monitoring. Beijing: China Standard Press, 2004.]
- [17] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine river. Geojournal, 1969, 2(3): 108-118.
- [18] 周秀艳, 王恩德. 辽东湾潮间带底质重金属污染地累积指数评价. 安全与环境学报, 2004, 4(2): 22-24. [Zhou Xiuyan, Wang Ende. Method on how to apply index of geoaccumulation to evaluate heavy metal pollution as result of inter-tidal sediments in Liaodong bay. Journal of Safety and Environment, 2004, 4(2): 22-24.]
- [19] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值. 北京:中国环境科学出版社, 1990: 259-330. [Central Station of Environmental Monitoring of China. Background Values of Soil Elements in China. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 259-330.]
- [20] 邵丰收, 周皓韵. 河南省主要元素的土壤环境背景值. 河南农业, 1998, (10): 29. [Shao Fengshou, Zhou Haoyun. Soil environmental background values of main elements in Henan province. Agriculture of Henan, 1998, (10): 29.]
- [21] 夏家淇,蔡道基,夏增禄,等. GB15618-1995. 土壤环境质量标准. 北京: 中国标准出版社, 1995. [Xia Jiaqi, Cai Daoji, Xia Zenglu, et al. GB15618—1995. Soil Environmental Guality Standard. Beijing: China Standard Press, 1995.]
- [22] 陈三雄, 谢莉, 陈家栋, 等. 露天开采矿区土壤重金属污染状况评价. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2012, 36(3):
 59-63. [Chen Sanxiong, Xie Li, Chen Jiadong, et al. Evaluation on soil heavy metal pollution at Dabaoshan mine in Guangdong province. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2012, 36(3): 59-63.]
- [23] 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. 水土保持学报, 2007, 21(4): 189-192. [Zhang Mingliang, Wang Haixia. Characteristics on soil heavy metal pollution around coal mine waste piles. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(4): 189-192.]
- [24] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils. Environmental Pollution, 2001, 114: 313-324.
- [25] 吴新民, 潘根兴. 影响城市土壤重金属污染因子的关联度分析. 土壤学报, 2003, 40(6): 921-928. [Wu Xinmin, Pan Genxing. The correlation analysis between the content of heavy metals and the factors influencing the pollution of heavy metals in urban soils in Nanjing city. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(6): 921-928.]
- [26] 王济, 张一修, 高翔. 城市地表灰尘重金属研究进展及展望. 地理研究, 2012, 31(5): 821-830. [Wang Ji, Zhang Yixiu, Gao Xiang. The advances in research on heavy metals of the surface dust in urban areas. Geographical Research, 2012, 31(5): 821-830.]
- [27] 席永慧, 赵红, 胡中雄. 粉煤灰粘土粉质粘土膨润土对镍离子吸附试验研究. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 59-63. [Xi Yonghui, Zhao Hong, Hu Zhongxiong. Study on the adsorption of Ni²⁺ by fly ash, clay, silty clay and bentonite. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1): 59-63.]
- [28] 向丽, 李迎霞, 史江红, 等. 北京城区道路灰尘重金属和多环芳烃污染状况探析. 环境科学, 2010, 31(1): 159-167.
 [Xiang Li, Li Yingxia, Shi Jianghong, et al. Investigation of heavy metal and polycyclic aromatic hydrocarbons contamination in street dusts in urban Beijing. Environmental Science, 2010, 31(1): 159-167.]
- [29] Guney M, Onay T T, Copty N K. Impact of overland traffic on heavy metal levels in highway dust and soils of Istanbul, Turkey. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 164(1-4): 101-110.
- [30] 李学垣. 土壤化学. 北京: 高等教育出版社, 2001. [Li Xuegen. Soil Chemistry. Beijing: Higher Education Press, 2001.]

- [31] 李凤英,何小武,周春火.坡度影响土壤侵蚀研究进展.水土保持研究, 2008, 15(6): 229-231. [Li Fengying, He Xiaowu, Zhou Chunhuo. Advances in researches on slope gradient factor in soil erosion. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(6): 229-231.]
- [32] 刘桂建, 杨萍月, 王桂梁. 煤中微量元素在土壤环境中的迁移. 地球学报, 2000, 21(4): 423-427. [Liu Gguijian, Yang Pingyue, Wang Guiliang. The migration of trace and minor elements of coal in the soil environment. Acta Geoscientia Sinica, 2000, 21(4): 423-427.]

Distribution and pollution of soil heavy metals in hilly upland around Pingdingshan coal mining area

CHU Chunjie^{1,2}, ZHOU Jinfeng³

College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;
 College of Resources and Environmental Science, Pingdingshan University, Pingdingshan 467000, Henan,

China;

3. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: An attempt was made to investigate the influence of mining activities upon the hilly upland soil around Pingdingshan coal mining area. Topsoil samples were collected from this area. Subsequently, the contents of five heavy metals, including Cu, Zn, Cr, Ni and Pb, were determined by means of the standard analysis methods of soil chemical composition. We analyzed their distribution characteristics at different altitudes and at different distances off the wind direct from the mining area, and evaluated the conditions of soil heavy metal pollution by adopting geo-accumulation index. The results are shown as follows. 1) The accumulations of heavy metals mentioned above were different from each other at different extents in the hilly upland soil around Pingdingshan coal mining area, in which Ni was the most significant, followed by Cr, Cu and Pb in turn. 2) The higher concentrations of five heavy metals at different altitudes were found in the mining zone, near slope bottom and slope top respectively. On the other hand, the highest concentrations were found within a distance of 50 m off the wind direct from the mining area, and contents of five heavy metals decreased as the distance increase. 3) Contents of Cu, Cr and Pb increase with the slope reduction, while the lowest contents of Zn and Ni were found in soils of slope from 5° to 15° . However, land use patterns showed no effects on the distributions of heavy metals in the upland soil around Pingdingshan coal mining area. Moreover, the contents of five heavy metals between forest land, grassland and arable land were not significantly different. 4) Cu, Zn, Cr, Ni and Pb pollutions were all found in the mining zone, and Cu, Ni and Pb pollutions were also found on the slopes below the mining zone, yet soils in slopes above the mining zone were only lightly polluted by Ni. Cu and Ni were the main pollution elements in downwind direction, with light to intermediate pollutions at different distances. Cr and Pb showed light pollutions within a distance of 50 m off the wind. Otherwise, Zn still kept clean in downwind direction. 5) Ni, Cu and Pb contaminations in the hilly upland soil around Pingdingshan coal mining area were caused mainly by human activities. In contrast, Zn and Cr were chiefly from natural sources.

Key words: upland soil; heavy metal; soil pollution; hilly; Pingdingshan coal mining area