

李玉梅, 李海鹏, 张连科, 等. 包头某铜厂周边土壤重金属分布特征及来源分析[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(7): 1321-1328.

LI Yu-mei, LI Hai-peng, ZHANG Lian-ke, et al. Distribution characteristics and source analysis of heavy metals in soil around a copper plant in Baotou, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(7): 1321-1328.

包头某铜厂周边土壤重金属分布特征及来源分析

李玉梅^{1,2}, 李海鹏¹, 张连科^{1*}, 樊健¹, 焦坤灵¹, 孙鹏^{1,2}

(1.内蒙古科技大学能源与环境学院, 内蒙古 包头 014010; 2.华中科技大学环境科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要:通过测定包头某铜厂周边4方向不同水平距离及深度处64个土壤样品中Cu、Cd、Pb、Zn、Mn、Cr 6种重金属含量,探讨其空间分布特征及可能来源。结果表明,铜厂周边土壤中6种重金属均已呈现不同程度的富集,其中Cu、Cd、Pb污染普遍且严重,且Cu受人为活动干扰最为强烈。6种重金属含量分布主要取决于其所在位置距铜厂的水平距离和土层深度,其中:0~20 cm表层土壤中重金属含量随水平距离增加呈现先增大后减小的规律,Pb、Cr和Cu、Zn、Mn分别在100 m和300 m处达到峰值;在距铜厂不同水平距离的样品中,各重金属含量均随土层深度增加而减小,但相距50 m处减小缓慢,100 m、300 m处减小迅速。土壤重金属来源解析表明,铜厂周边土壤中Cr、Cd、Cu来自复合污染源,Pb、Zn的外源污染主要来自交通源,Mn主要来自自然源。

关键词:铜厂;土壤;重金属污染;空间分布;来源分析

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)07-1321-08 doi:10.11654/jaes.2016.07.014

Distribution characteristics and source analysis of heavy metals in soil around a copper plant in Baotou, China

LI Yu-mei^{1,2}, LI Hai-peng¹, ZHANG Lian-ke^{1*}, FAN Jian¹, JIAO Kun-ling¹, SUN Peng^{1,2}

(1.School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 2.College of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Understanding spatial distribution and sources of soil heavy metals is critical to the control and remediation of soil heavy metal pollution. In this investigation, we collected 64 soil samples from 4 directions with different horizontal distances from a copper plant in Baotou, to analyze the spatial distribution characteristics and possible pollution sources of soil heavy metals. Six heavy metals (Cu, Cd, Pb, Zn, Mn, and Cr) were measured. Results showed that these heavy metals had different extents of accumulation in this area. Cu, Pb, and Cd pollution was common and serious due to human activities, with Cu being affected most by human activities. In addition, the distribution of six heavy metals was dependent on horizontal distance away from the copper plant and soil depth. Heavy metal content in surface soil (0 to 20 cm) first increased and then decreased as the horizontal distance increased. The content of Pb, Cr and Cu, Zn, Mn was the highest at 100 m and 300 m from the copper plant, respectively. All six heavy metals decreased with increasing soil depths. However, the rates of such decreases were low at the distance of 50 m, but high at 100 m and 300 m. Source analysis indicated that soil Cr, Cd, and Cu were resulted from compound pollution sources, while Pb and Zn from traffic sources, and Mn from natural sources.

Keywords: copper plant; soil; heavy metal pollution; spatial distribution; source analysis

收稿日期:2015-12-17

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金项目(2015MS0408)

作者简介:李玉梅(1978—),女,内蒙古赤峰人,博士生,副教授,主要从事土壤污染修复及水污染控制方面的研究。E-mail:lymhu@163.com

*通信作者:张连科 E-mail:lkzhang@imust.cn

随着工农业的快速发展和人口的急剧增加,工业“三废”中重金属的沉降、扩散、累积以及含重金属农药、磷肥的大量施用和汽车尾气的排放致使土壤重金属污染日趋严重^[1]。重金属在土壤中具有隐蔽性、滞后性、累积性和不可逆性,极难被治理^[2],且其可通过大气、水体或食物链直接或间接地进入人体,危害人类健康^[3],因此备受关注。

包头市现已发展成为以钢铁、装备制造、稀土、铝业和电力五大支柱产业为主的典型工业城市,工业生产形成的各种形态污染物严重威胁着包头的城市环境,部分工业企业周边土壤重金属污染问题尤为突出。尹伟等^[4]和白世强等^[5]分别对佛山和洛阳市的工业区及周边土壤进行研究,结果表明,工业活动已对周边土壤造成污染。然而,包头工业厂区周边重金属的污染现状、空间分布特征及来源解析等相关研究极为少见^[6]。本文通过测定包头市某铜厂4方向不同水平距离及深度处的Cu、Cd、Pb、Zn、Mn、Cr 6种重金属含量,分析其空间分布特征及可能的来源,以期为包头市工业区土壤环境污染防治和修复提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

包头市属于半干旱中温大陆性季风气候,常年主导风向为西北风,年均降水量在240~400 mm之间,年均气温7.2℃,年均风速1.2 m·s⁻¹,年日照数2 882.2 h。本研究对象位于距包头市区3 km处的某工业园区,北临南绕城公路,南靠某村庄,交通便利,目前已形成10万t铜冶炼、36万t制酸、20万t渣处理以及铜深加工项目组成的配套产业链。该铜厂产生的含大量重金属的废水、废渣、废气的排放和冶炼材料运输过程中散落的矿石威胁着厂区周围的环境及附近村民的健康。

1.2 样品采集

在对厂区周围地形、地貌及土地利用状况等因素充分调研的基础上,结合包头气象特点,以厂区边缘为起点,按东北(NE)、东南(SE)、西北(NW)、西南(SW)4方向,分别在距厂区50、100、300 m和500 m处采集0~5、5~20、20~40 cm和40~60 cm不同深度土层样品共64个(图1)。采样时避开外来土和新近扰动土层,每个样品均按20 m对角线采集5个点混匀后,用四分法反复取舍至1 kg左右装袋带回备用。

1.3 样品处理与分析

剔除土样中植物的根茎和沙砾等异物,置于室内

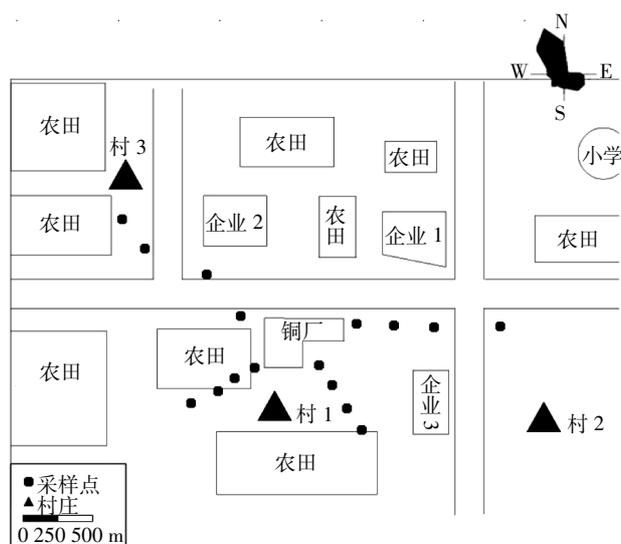


图1 研究区采样点示意图

Figure 1 Soil sampling sites in studied area

通风处自然阴干,经研磨过100目尼龙网筛后装袋备用。样品采集、混合、研磨、粉碎等过程均采用木质或玛瑙用具以避免人为干扰。经上述预处理的样品放入普乐MD8微波消解/萃取仪进行消解,使用Perkin Elmer AA800原子吸收光谱仪进行金属含量测定^[7]。

为保证实验结果的精确度和准确性,实验全程做空白样和平行样,并在测试过程中加入国家标准土壤参比物质(GSS-1)进行质量控制,各元素相对标准偏差均小于5%,且各金属元素的回收率为93.5%~107.8%,均在国家标准土壤质控值的允许范围内。

1.4 数据处理

采用单因子污染指数对铜厂周边土壤中的重金属进行污染评价,污染的严重程度以P值为依据,其分级为: $P \leq 1$ 无污染; $1 < P \leq 2$ 轻微污染; $2 < P \leq 3$ 中等污染; $P > 3$ 严重污染。利用SPSS19.0进行相关分析和主成分分析^[8-9],用以判别铜厂周边6种重金属的来源情况。

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量

对包头某铜厂周边各方向不同深度、不同水平距离的6种重金属含量总体进行统计分析,所得结果见表1。受测的6种重金属含量均值均已超过内蒙古土壤背景值,其单因子污染指数大小顺序为Cd>Cu>Pb>Zn>Mn>Cr, Cd单因子污染指数最高,其值为11.03,其次为Cu(5.92),单因子指数表明Cd和Cu均为严重污染。6种受测重金属的均值超标率大小顺序

表1 研究区域土壤重金属统计分析
Table 1 Statistical analysis of heavy metals in soils

重金属	最大值/ mg·kg ⁻¹	最小值/ mg·kg ⁻¹	平均值±标准差/ mg·kg ⁻¹	背景值*/ mg·kg ⁻¹	国家标准土壤 质控值/μg·g ⁻¹	单因子污染 指数P**	超标率/%	变异系数(CV)
Cu	592.00	10.00	74.488±15.661	12.90	21±2	5.92	82.7	1.52
Cd	0.91	0.24	0.426±0.019	0.04	4.3±0.4	11.03	100	0.31
Pb	90.75	15.81	43.728±2.338	15.00	98±6	2.92	100	0.39
Zn	135.69	23.00	60.408±3.356	48.60	680±25	1.24	63.5	0.40
Mn	774.69	262.81	493.838±14.010	446.00	1760±63	1.11	63.5	0.21
Cr	66.69	18.25	35.708±1.791	36.50	62±4	0.98	36.5	0.36

注:* 内蒙古土壤几何平均值;**P=平均值/背景值。

为 Pb=Cd>Cu>Zn=Mn>Cr, Pb、Cd 超标率均为 100%, Cu 为 82.7%, Cr 最低, 为 36.5%, 表明该厂区周边土壤重金属污染已很普遍。从表征人为因素对土壤重金属干扰程度的指标变异系数(CV)来看, Cu 的变异系数远远高于其他 5 种重金属达 1.52, 且远大于 0.36^[10], 属强变异, 即使是变异系数最小的 Mn, CV 也已超过弱变异的界限 0.15^[10], 表明该厂区周边重金属受人为影响较为严重, 尤其 Cu 受人类活动的干扰最为突出。

2.2 土壤重金属的空间分布

对 4 方向 6 种重金属在水平及垂直方向含量变化进行分析, 结果发现, 各元素含量的空间差异性主要与垂直深度及距铜厂的水平距离有关, 而与其所在

方位无关, 即风向对该区域土壤中重金属的空间分布无明显影响。这可能由于土壤中重金属的来源并不是单一点源污染所致。因此, 后续分析中, 距铜厂同距离各土层深度处金属含量均采用 4 方向均值加以表征。6 种重金属含量随距铜厂水平距离及土层深度的变化规律如图 2 所示, 距铜厂 100 m 处土壤中 6 种重金属的超标倍数随土层深度的变化见图 3。

图 2 表明, 6 种重金属含量随距铜厂水平距离的变化规律因重金属种类不同而异。0~5 cm 土层中各金属含量均在距铜厂 50 m 处最低, Cu、Cd、Mn 最大值出现在距铜厂 300 m 处, Pb、Cr、Zn 最大值出现在距铜厂 100 m 处。5~20 cm 土层中, Cu、Zn、Pb、Mn 在距铜厂 300 m 处出现最大值, 其中 Cu、Zn 均在 500 m

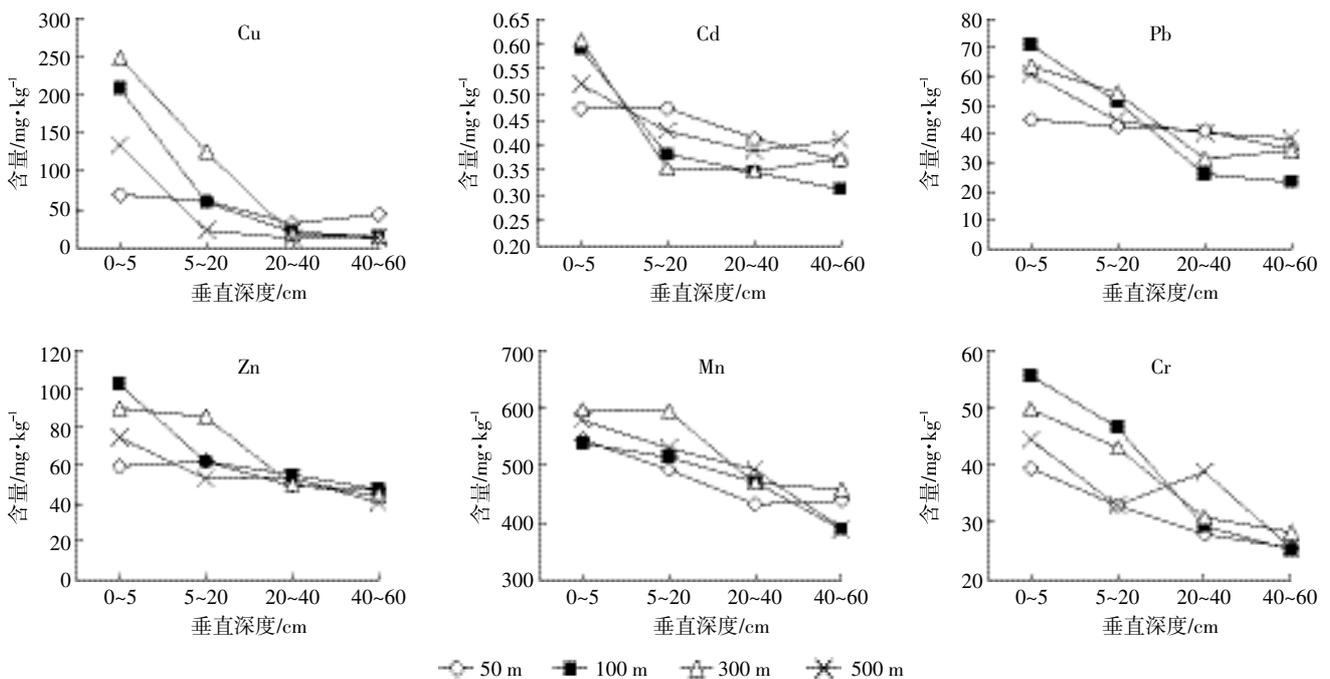


图2 不同深度土壤重金属含量变化

Figure 2 Variation of heavy metal content in soils around copper plant

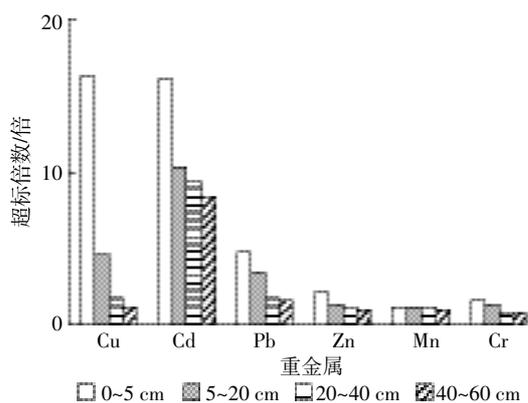


图3 距铜厂100 m处不同深度土壤重金属的超标倍数

Figure 3 Over-standard ratios of heavy metals in soil profile at 100 meters from copper plant

处含量最低,而Pb、Mn则在50 m处含量最低;Cr的最大值出现在100 m处,50 m处含量最低;Cd随水平距离的变化规律均异于其他元素,其最大值出现在距铜厂最近的50 m处,其次为500 m处,最小值则出现在距铜厂300 m处。20~40 cm和40~60 cm土层中各重金属含量随水平距离变化不明显,尤其是Cu、Zn、Cr在图2所示的40~60 cm土层中几乎归趋于一点,且其值与土壤背景值接近。可见,受测的6种重金属在0~5 cm的表层土和5~20 cm的亚表层土中含量总体呈现随距离增加先增大后减小的钟形变化趋势,即距铜厂100 m和300 m处土壤受重金属污染较重,而距铜厂50 m及500 m处污染较轻。因此初步推断,铜厂生产过程中废气的排放是造成其周边重金属富集的重要原因,南绕城公路密集的货车流量对研究区域土壤重金属的富集也可能有重要影响,而农业生产对重金属的富集尤其是Cd在铜厂周边土壤中的富集贡献也不容忽视。谢小进等^[11]研究发现,工业、农业及交通用地中土壤的重金属存在明显复合污染的特征,其中工业用地土壤重金属主要受到工业点污染源的影响。曹伟等^[12]按照点源和面源的划分方式研究土壤重金属污染的空间变化,结果表明,受点源污染影响的土壤重金属富集程度较高,其中固体污染源影响程度最高,其次是液体,气体最小,且随着距离加大,污染的影响逐渐变小。张玲等^[13]对公路沿线重金属污染情况的研究及李仰正等^[14]、谷蕾^[15]对高速公路两侧重金属污染情况的研究表明,道路两侧土壤中Pb主要来源于交通源,其含量在道路两侧随着距离增加出现峰值,然后逐步衰减,符合大气污染物中的高架连续点源扩散模式^[16]。本研究结果与前人研究的这一变化规律类似。

研究表明^[17-19],土壤重金属污染主要集中在0~20 cm的表层土和亚表层土,其纵向迁移能力较弱,与图2、图3一致。本研究中6种重金属含量在0~20 cm的表层和亚表层均明显高于其余两层,其中,Cu是6种元素中含量随深度下降最为显著的重金属,从0~5 cm的表层土至5~20 cm亚表层土,其含量下降了59.03%,而进一步至20~40 cm土层总降幅已达87.02%。由此可见,Cu的纵向迁移性很差。其余5种元素从0~5 cm表层土至40~60 cm较深土层,总纵向含量变化幅度大小顺序依次为:Pb(45.63%)>Zn(44.91%)>Cr(44.61%)>Cd(33.04%)>Mn(25.98%)。虽然5种元素变化幅度都不超过50%,但表层、亚表层土与深层土的重金属含量差异仍很明显:Pb在0~20 cm土层含量均高于背景值的3倍,已达到单因子污染指数评价法^[20]的重污染等级,在20~60 cm土层内含量在背景值的1~2倍之间,属中度污染;Zn、Mn和Cr在0~20 cm时处于单因子评价的轻微污染状态,土壤深度达到20~40 cm时含量已接近或低于土壤背景值,至40~60 cm土层后平均含量均在背景值以下,土壤已无污染态势;而Cd在0~60 cm土层内含量均高于背景值9.91倍以上。这一现象的产生可能有两个原因:其一是Cd在纵向具有较强的迁移性,故表层土受污染后,很容易迁移至更深层土壤,导致整个受测土层中Cd含量均很高;其二可能是该地区Cd的土壤背景值本身远高于内蒙古土壤背景值所致。与本研究结果类似,谷蕾^[15]发现,道路产生的线性污染中不同重金属元素的垂直分布存在明显差异,Cu、Pb、Cd和Zn主要累积在土壤剖面的上部,其含量均随土层深度增加而逐渐减少。马智宏等^[21]研究表明,Pb、Cu、Cd、Cr在90 cm以上土层中的垂直分布表现为随土层加深而减少,Pb、Cu、Cr均有在表面富集的趋势。因此认为,表层土壤是受人类活动干扰最为严重的土层,随着土层深度的增加,土壤污染物含量与其背景值逐渐接近。多数重金属在土壤中纵向迁移能力较差^[22],深层土壤重金属含量可一定程度反映当地重金属土壤背景值。

2.3 土壤重金属来源解析

土壤重金属主要来源于成土母质和人类活动,其中人类活动是导致土壤重金属污染的主要因素。一般而言,同一来源重金属之间存在着显著相关性,因此在对土壤重金属来源解析研究中,常采用相关分析判断各重金属间是否同源^[23]。

2.3.1 土壤重金属的相关分析

铜厂周边土壤中Cu、Cd、Pb、Zn、Mn和Cr含量的

相关分析结果见表2。

由表2可知,6种重金属之间均存在极为显著的相关关系($P < 0.01$),其中,Cu与除Mn以外的各金属相关系数均大于0.6,而Cd-Cr、Pb-Zn、Zn-Mn、Zn-Cr及Mn-Cr相关系数也超过了0.6。由此推断,本研究涉及的6种重金属极有可能同源或属复合污染。然而,前文对重金属空间分布特征的研究发现,6种重金属在铜厂周边水平及垂直方向的分布规律存在一定差异性,其中Cu沿土壤深度的含量变化最为明显,而Cd在距铜厂不同距离及不同深度处含量的变化也明显不同于其他金属。由此推断,铜厂周边土壤重金属的富集可能不仅仅是铜厂生产过程中“三废”的排放所致,其复合污染的可能性更大。因本研究中各重金属之间具有极为显著的相关性,可通过主成分分析对铜厂土壤重金属的污染来源进行探究。

表2 研究区土壤重金属含量的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between heavy metals in soil

元素	Cu	Cd	Pb	Zn	Mn	Cr
Cu	1					
Cd	0.714	1				
Pb	0.643	0.548	1			
Zn	0.805	0.590	0.661	1		
Mn	0.475	0.583	0.524	0.698	1	
Cr	0.690	0.755	0.417	0.602	0.648	1

注:以上数据均在0.01水平(双侧)上显著相关。

2.3.2 土壤重金属元素的主成分分析

主成分分析可将多个变量转化为少数几个综合指标(主成分)来反应原始数据的绝大多数信息,通过主成分中变量的负载及相互关联可推测重金属的可能来源^[24]。铜厂周边土壤中6种重金属主成分分析(PCA)结果见表3、表4及图4。

图4所示重金属间的距离反应了元素含量间的相关性。Cr和Cd、Pb和Zn显示出较强的相关性,而

表4 研究区土壤重金属含量主成分分析成分矩阵

Table 4 Factor loadings of principal component analysis for heavy metal concentrations in soil of studied area

重金属	初始因子载荷			旋转后因子载荷		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3
Cu	0.876	0.116	-0.360	0.676	0.671	0.059
Cd	0.845	-0.269	-0.227	0.819	0.332	0.237
Pb	0.756	0.542	0.004	0.173	0.883	0.237
Zn	0.879	0.231	0.112	0.386	0.699	0.448
Mn	0.785	-0.134	0.590	0.313	0.291	0.894
Cr	0.829	-0.461	-0.068	0.846	0.152	0.407

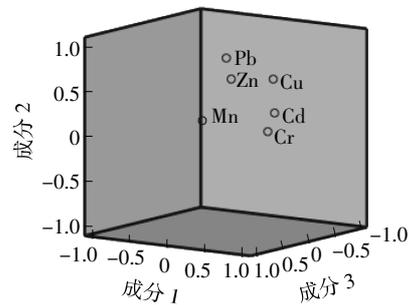


图4 主成分中重金属载荷

Figure 4 Heavy metal loads of principal components

Zn、Cd与Cu也具有一定相关性,Mn则显示出较强的异源性,但相对而言与Cr和Zn存在一定相关关系。由表3可知,6种重金属前3个主成分可反映总体88.979%的信息,且3个主成分的贡献率相差并不悬殊。第一主成分(F1)贡献率为35.356%,与Cr和Cd有较高的载荷,同时也包含了Cu的部分富集信息;第二主成分(F2)贡献率为32.279%,主要反映了Pb、Zn及Cu的部分富集信息;第三主成分(F3)贡献率为21.345%,主要反映Mn的富集信息,但Zn、Cr的贡献也不能忽略。

第一主成分主要源于Cd、Cr及Cu的部分贡献。我国自然土壤中Cd含量很低,一般为0.02~0.33 mg·

表3 研究区土壤重金属含量的主成分分析

Table 3 Principal component analysis for heavy metal concentrations in soil of studied area

主成分	初始特征值			提取后特征值			交换后特征值		
	特征值	解释方差/%	累积方差/%	特征值	解释方差/%	累积方差/%	特征值	解释方差/%	累积方差/%
1	4.129	68.818	68.818	4.129	68.818	68.818	2.121	35.356	35.356
2	0.663	11.056	79.873	0.663	11.056	79.873	1.937	32.279	67.635
3	0.546	9.106	88.979	0.546	9.106	88.979	1.281	21.345	88.979
4	0.373	6.211	95.190						
5	0.202	3.365	98.555						
6	0.087	1.445	100.000						

kg^{-1} ,内蒙地区 Cd 土壤背景值为 $0.037 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤 Cd 污染主要是人为源所致,包括有色金属开采及冶炼、化工、燃煤、灌溉、施肥等工矿业和农业活动。本研究中,Cd 超标率达 100%,超标倍数则近 10 倍甚至更高,但变异系数相对较小,为 0.31,且深层土壤中 Cd 含量也很高,而受测土样 pH 均在 8.1~8.5 之间,Cd 主要以氢氧化物形式存在,纵向迁移较困难。由此推测,该区域 Cd 污染可能源于铜厂生产中污染物的排放及自然因素共同作用的结果。早期研究^[25]认为 Cr 在土壤中的含量变化取决于岩石风化和侵蚀,而路远发等^[26]近年研究发现,人为活动的输入对 Cr 的含量也有一定影响。本研究中 Cr 虽然超标率仅为 36.5%,但变异系数达 0.36,已属强变异,其含量在空间分布并不均匀,0~5 cm 的表层土含量为 40~60 cm 深层土的 2.2 倍,说明人为活动对其已有一定影响。此外,Cu 对第一主成分也有一定贡献,Cu 虽超标率低于 Pb、Cd,但其含量变异性很大,变异系数达 1.52,表层土含量为深层土的 14.1 倍,且其含量在水平方向的分布符合大气污染物中的高架连续点源扩散模式^[19],而 Nicholason 等^[27]对威尔士地区的农业土壤重金属污染的研究表明,有 38%~48%的 Cu 来自大气沉降。综上推断,第一主成分反应了铜厂生产中废物尤其是废气的排放对周边土壤重金属的污染,同时,自然因素对其也有一定贡献,是包含工业污染源与自然源的复合型污染因子。

第二主成分主要反映 Pb、Zn 的富集,Cu 对该因子也有一定贡献。研究对象北邻南绕城公路,而 Pb 和 Zn 常被作为交通污染源的标识元素^[28]。汽车尾气排放、轮胎及车辆镀金部分磨损或燃料及润滑油的泄露都能释放一定量含有 Pb、Cu、Zn 等金属的有害气体和粉尘^[29]。路远发等^[26]对杭州市土壤中 Pb 进行同位素研究发现,Pb 主要受汽车尾气排放等因素影响。孟可等^[30]和张志红等^[31]经过调查统计发现,汽油中 Pb 含量为 $0.4 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,尾气中 Pb 达到 $20 \sim 50 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,怠速时可达 $0.571 \text{ mg} \cdot \text{min}^{-1}$,尾气中的重金属颗粒物会飘散在空气中或沉积在路面灰尘和路侧土壤中。因此,以 Pb、Zn 及部分 Cu 为主要贡献的第二主成分为交通因子,代表着元素来自交通源污染的部分。

第三主成分主要反映 Mn 的富集信息,也体现了部分 Zn、Cr 的影响。Mn 在受测的 6 种重金属中变异系数最小,其值仅为 0.21,虽有 63.7%的点位超标,但其含量与背景值相差不大,且表层土与深层土中 Mn 含量与内蒙背景值也极为接近。而同样变异性、超标

率及超标倍数相对较低的 Zn、Cr 与 Mn 呈现一定相关关系。因此,本研究认为以 Mn 的贡献为主,包含 Zn、Cr 部分信息的第三主成分为自然地质因子,代表着元素的单一自然来源部分。

3 结论

(1)包头某铜厂周边土壤中 Cu、Cd、Pb、Zn、Mn、Cr 6 种重金属均已呈现不同程度的富集。其中,Cd、Pb 超标率为 100%,达到了严重污染和中等污染程度;Cu 超标率为 82.7%,达到严重污染,受人类干扰最强烈;Mn 为轻微污染,是受测重金属中受人为因素影响最小的元素。

(2)6 种重金属含量分布主要取决于其所在位置距铜厂的水平距离和垂直深度,与风向无关。其中,0~20 cm 表层土壤中重金属含量随水平距离增加先增大后减小,Pb、Cr 和 Cu、Zn、Mn 分别在 100 m 和 300 m 处达到峰值;在不同水平距离的样品中,各重金属含量均随土层深度增加而减小,但 50 m 处减小缓慢,100、300 m 处减小迅速。

(3)铜厂周边土壤中,Cr、Cd 污染来自工业和自然因素形成的复合源;Pb、Zn 的外源污染主要来自交通源;Cu 则属于工业、交通及自然因素形成的复合污染;Mn 主要来自自然源。

参考文献:

- [1] 李荣华,沈 锋,李晓龙,等. 陕西某铅锌冶炼厂及周边农田重金属污染土壤的稳定化修复理论与实践[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(7): 1269-1276.
LI Rong-hua, SHEN Feng, LI Xiao-long, et al. Theoretical research and immobilization practice of heavy metal polluted soil in a closed lead-zinc smelter and surrounding farmland in Tongguan, Shaanxi[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(7): 1269-1276.
- [2] 邹建美,孙 江,戴 伟,等. 北京近郊耕作土壤重金属状况评价分析[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(1): 132-138.
ZOU Jian-mei, SUN Jiang, DAI Wei, et al. Evaluation and analysis of heavy metals in cultivated soils in the suburbs of Beijing[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2013, 35(1): 132-138.
- [3] 陈满怀. 土壤环境学[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 216-273.
CHEN Huai-man. Soil environmental science[M]. Beijing: Science Press, 2005: 216-273.
- [4] 尹 伟,卢 瑛,甘海华,等. 佛山市某工业区周边蔬菜地土壤重金属含量与评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3): 508-512.
YIN Wei, LU Ying, GAN Hai-hua, et al. Heavy metal concentrations and evaluation in soils around an industrial area in Foshan[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3): 508-512.
- [5] 白世强,卢升高. 洛阳市工业区及郊区土壤的重金属含量分析与评价[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 257-261.

- BAI Shi-qiang, LU Sheng-gao. Analysis and evaluation on concentration of heavy metals in soils of industrial area and suburb cropland of Luoyang City[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1): 257-261.
- [6] 郭伟,赵仁鑫,张君,等. 内蒙古包头铁矿区土壤重金属污染特征及评价[J]. *环境科学*, 2011, 10(32):3009-3105.
GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHANG Jun, et al. Distribution characteristic and assessment of soil heavy metal pollution in the iron mining of Baotou in Inner Mongolia[J]. *Environment Science*, 2011, 10(32): 3009-3105.
- [7] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000:205-228.
LU Ru-kun. Soil agricultural chemistry analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000:205-228.
- [8] 海米提·依米提, 祖皮艳木·买买提, 李建涛, 等. 焉耆盆地土壤重金属的污染及潜在生态风险评价[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(6): 1523-1530.
HAMID Yimit, ZULPIYA Mamat, LI Jian-tao, et al. Pollution and assessment of potential ecological hazards of heavy metals in the soils of Yanqi Basin[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(6): 1523-1530.
- [9] 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.
YAO Feng, BAO An-ming, GULI Jiapaer, et al. Soil heavy metal sources and pollution assessment in the coalfield of East Junggar Basin in Xinjiang[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(10): 1821-1828.
- [10] 吕建树, 张祖陆, 刘洋, 等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. *地理学报*, 2012, 67(7):971-984.
LÜ Jian-shu, ZHANG Zu-lu, LIU Yang, et al. Sources identification and hazardous risk delineation of heavy metals contamination in Rizhao City[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(7): 971-984.
- [11] 谢小进. 上海地区土壤重金属空间分布特征及其成因分析[D]. 上海: 上海师范大学, 2010.
XIE Xiao-jin. Discuss on spatial distribution and cause of soil heavy metals in Shanghai Area[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2010.
- [12] 曹伟, 周生路, 王国梁, 等. 长江三角洲典型区工业发展影响下土壤重金属空间变异特征[J]. *地理科学*, 2010, 30(2):283-289.
CAO Wei, ZHOU Sheng-lu, WANG Guo-liang, et al. Spatial variability characteristics of soil heavy metals due to industry development of typical regions in Changjiang River Delta of China[J]. *Scientia Geograph Sinica*, 2010, 30(2): 283-289.
- [13] 张玲, 夏畅斌, 陈平, 等. 公路沿线土壤重金属污染研究[J]. *湘潭师范学院学报(自然科学版)*, 2009, 31(1):124-127.
ZHANG Ling, XIA Chang-bin, CHEN Ping, et al. Research on soil heavy metal pollution along the road[J]. *Journal of Xiangtan Normal University(Natural Science Edition)*, 2009, 31(1): 124-127.
- [14] 李仰证. 高速公路路旁土壤重金属污染及林带防护效应分析: 以连霍高速中牟段为例[D]. 开封: 河南大学, 2007.
LI Yang-zheng. Analysis of forest protection effects and soil heavy metal pollution of highway roadside: In the middle of Lianhuo highway [D]. Kaifeng: Henan University, 2007.
- [15] 谷蕾. 高速公路不同通车时间对路旁土壤重金属污染的影响: 以连霍高速郑州-商丘段为例[D]. 开封: 河南大学, 2007.
GU Lei. Impact of variation of highway traffic on soil heavy metal pollution around roadside: Lianhuo highway from Zhengzhou to Shangqiu [D]. Kaifeng: Henan University, 2007.
- [16] 刘培桐, 薛纪渝, 王华东. 环境学概论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.
LIU Pei-tong, XUN Ji-yu, WANG Hua-dong. Introduction to environmental science[M]. Beijing: Higher Education Press, 1995.
- [17] Riba I, Del Valls T A, Forja J M, et al. Influence of the Aznalcóllar mining spill on the vertical distribution of heavy metals in sediments from the Guadalquivir estuary (S W Spain)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, 44(1): 39-47.
- [18] 白军红, 赵庆庆, 卢琼琼, 等. 白洋淀沼泽化区域土壤重金属含量的剖面分布特征: 以烧车淀为例[J]. *湿地科学*, 2013, 11(2):271-275.
BAI Jun-hong, ZHAO Qing-qing, LU Qiong-qiong, et al. Profile distribution of soil heavy metals in the paludification region of Baiyangdian Lake: A case study of Shaochedian Lake[J]. *Wetland Science*, 2013, 11(2): 271-275.
- [19] 周妍姿, 王钧, 曾辉, 等. 内蒙古土壤重金属的空间异质性及污染特征[J]. *生态环境学报* 2015, 24(8): 1381-1387.
ZHOU Yan-zi, WANG Jun, ZENG Hui, et al. Spatial characteristics of soil heavy metal pollution in Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Ecological Environment*, 2015, 24(8): 1381-1387.
- [20] 郭伟, 孙文慧, 赵仁鑫, 等. 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. *环境科学*, 2013, 34(4): 1561-1567.
GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, et al. Characteristic and evaluation of soil pollution by heavy metal in different functional zones of Hohhot[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(4): 1561-1567.
- [21] 马智宏, 王纪华, 陆安详, 等. 京郊不同剖面土壤重金属的分布与迁移[J]. *河北农业大学学报*, 2007, 30(6): 11-15.
MA Zhi-hong, WANG Ji-hua, LU An-xiang, et al. Distribution and transfer of main heavy metals in different soil section in Beijing Suburb [J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2007, 30(6): 11-15.
- [22] 项萌, 张国平, 李玲, 等. 广西铅锑矿冶炼区土壤剖面及孔隙水中重金属污染分布规律[J]. *环境科学*, 2012, 33(1):266-272.
XIANG Meng, ZHANG Guo-ping, LI Ling, et al. Characteristics of heavy metals in soil profile and pore water around Hechi antimony-lead smelter, Guangxi, China[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(1): 266-272.
- [23] Zou X, Zheng Z W, Zhang Z Y, et al. Temporal and spatial distribution and sources analyses of soil heavy metals in water level fluctuation zone of Xiaojiang Watershed in Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Hydrogeology*, 2012, 33(4): 33-39.
- [24] 胥焱, 王飞, 郭强, 等. 三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2014, 35(4): 1502-1508.
XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, et al. Transfer characteristic and source identification of soil heavy metals from water-level-fluctuating zone along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(4): 1502-1508.

- [25] 朱先芳, 唐磊, 季宏兵, 等. 北京北部水系沉积物中重金属的研究[J]. 环境科学学报, 2010, 30(12):2553-2562.
ZHU Xian-fang, TANG Lei, JI Hong-bing, et al. Analysis of heavy metals in sediments of the water system in the North of Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(12):2553-2562.
- [26] 路远发, 杨红梅, 周国华, 等. 杭州市土壤铅污染的铅同位素示踪研究[J]. 第四纪研究, 2005, 25(3):355-362.
LU Yuan-fa, YANG Hong-mei, ZHOU Guo-hua, et al. Lead isotopes in soil as a tracer of environment lead pollution in Hangzhou[J]. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(3):355-362.
- [27] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, et al. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales[J]. *The Science of the Total Environment*, 2003, 311:205-219.
- [28] 付传城, 王文勇, 潘剑君, 等. 城乡结合带土壤重金属时空变异特征与源解析:以南京市柘塘镇为例[J]. 土壤学报, 2014, 51(5):1066-1077.
FU Chuan-cheng, WANG Wen-yong, PAN Jian-jun, et al. Spatial temporal variation and source apportionment of soil heavy metals in peri-urban area: A case study of Zhetang Town Nanjing[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(5):1066-1077.
- [29] 郭广慧, 雷梅, 陈同斌, 等. 交通活动对公路两侧土壤和灰尘中重金属含量的影响[J]. 环境科学学报, 2008, 28(10):1937-1945.
GUO Guang-hui, LEI Mei, CHEN Tong-bin, et al. Effect of road traffic on heavy metals in road dusts and roadside soils[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(10):1937-1945.
- [30] 孟可, 张学林, 秦建业, 等. 我国大城市环境铅污染影响因素分析[J]. 环境科学学报, 1995, 15(2):135-141.
MENG Ke, ZHANG Xue-lin, QIN Jian-ye, et al. Analysis of factors affecting lead pollution in urban environment of China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1995, 15(2):135-141.
- [31] 张志红, 杨文敏. 汽油车排出颗粒物的化学组分分析[J]. 中国公共卫生, 2001, 17(7):623-624.
ZHANG Zhi-hong, YANG Wen-min. Analysis on chemical components in particulates of gasoline-fueled engine exhaust[J]. *China Public Health*, 2001, 17(7):623-624.