

中南大型有色金属冶炼厂周边农田土壤重金属污染特征研究^①

曹雪莹^{1,2}, 张莎娜¹, 谭长银¹, 胡鹏杰^{2*}, 崔旭², 周通², 吴龙华², 骆永明²

(1 湖南师范大学资源与环境科学学院, 长沙 410081; 2 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008)

摘要:以中南地区某大型有色金属冶炼厂周边耕地为对象, 采集 0~20 cm 表层土壤, 测定其基本性质及重金属浓度, 分析了重金属元素间及重金属污染程度与距冶炼厂远近的相关关系, 以判别研究区土壤重金属污染来源及空间分布规律。结果表明, 研究区土壤呈酸性, 土壤重金属污染以 Cd 为主, 与当地土壤环境背景值和国家土壤环境质量二级标准相比, 超标率分别达 60.9%、86.1%。Cu、Zn、Cr、Ni 等元素的污染较轻, Pb 则未超标。内梅罗综合污染指数法对水田土壤重金属的风险评价显示该区属于安全的点位仅占 8.7%, 农产品生产存在较高风险。单因素方差分析显示旱地与水田土壤重金属浓度差异不显著, 说明耕作方式不是造成该区重金属分布差异的主要原因。土壤 Cd 与 Pb、Zn 浓度显著相关, 且与距冶炼厂的距离呈显著负相关, 指数和幂函数均能很好地拟合重金属浓度随距离变化的分布模式, 说明三者可能均来源于冶炼厂的降尘污染。

关键词: 铅锌冶炼; 土壤重金属; 变异特征; 风险评价

中图分类号: X50; X53

土壤是地球上各种人为和自然污染物的汇, 世界上大部分污染物最终滞留在土壤中^[1]。而土壤作为农产品的产地, 其环境质量直接关系到农产品的产量和质量, 因耕地土壤受重金属污染带来的农产品安全及与其相关的土壤环境质量评价研究日渐被关注和重视^[2-4]。冶炼厂是其周边耕地土壤重金属的重要污染源, 其生产过程中排放的大量有毒有害物质可通过污水灌溉、废渣渗滤和大气沉降等途径进入土壤, 致使周边耕地受到不同程度的重金属污染^[5]。有关冶炼生产引起耕地土壤重金属污染的研究显示, 其周边耕地土壤均受到不同程度的 Cd、Pb、Cu、Zn 等的污染^[6-11], 这些区域已成为农产品安全生产的高风险区。已有文献多以主要影响区为研究对象, 鲜有对全方位、影响范围及污染程度等方面的综合报道。

本文拟以中南某铅锌冶炼厂周边耕地表层土壤为对象, 以冶炼厂为中心, 结合当地主风向, 从不同方向辐射采样, 调查土壤基本性质及重金属污染状况, 判别研究区重金属污染来源, 并用函数拟合土壤重金属随距离变化的分布模式, 旨在为重金属污染耕地尤其是粮食主产区的土壤环境质量安全评价提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中南地区某市主要河流的中下游。该区属亚热带季风气候, 冬季多西北风, 夏季多东南风, 年平均气温 16℃~18℃, 适宜多种农作物生长, 是该省有名的粮食高产区和国家重要的商品粮基地。作为全国典型大型有色金属冶炼厂之一, 始建于 20 世纪 50 年代的该厂占地 173 万 m², 以生产铅、锌及其合金产品为主, 并综合回收铜、金、银、镉、铟、铋等十余种稀有有色金属。在过去几十年的生产过程中, 该厂通过工业“三废”向周边环境排出了大量的重金属污染物, 对周边环境和人群健康产生了一定影响。有报道称, 冶炼厂周围的蔬菜受到 Cd、Pb 和 Zn 的严重污染; 另有文献报道, 该厂在 2003 年排放 Hg、As、Cd 和 Pb 等有毒重金属 34 t, 占全市有毒重金属排放量的 90% 以上, 土壤、大气和水体中的 As 污染也正威胁着作物生产和人类的健康^[12-13]。可见, 该冶炼厂周边耕地土壤重金属污染现已成为十分严重的环境问题。

1.2 样品采集与处理

经过实地考察, 在综合考虑研究区主导风向及耕

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA06A204)和环保公益性行业科研专项(201109056)资助。

* 通讯作者(pjhu@issas.ac.cn)

作者简介: 曹雪莹(1988—), 女, 湖南郴州人, 硕士研究生, 主要从事土壤重金属污染与修复研究。E-mail: 455567072@qq.com

地分布特征的基础上,以冶炼厂为中心,从西北、西南和东南 3 个方向做带状辐射调查,每间隔一定距离设置一个采样点。因部分地区以水塘、建筑物或林地为主,因而实际共采集耕地 0~20 cm 表层土壤样品 115 个,其中西北方向 24 个(4~20 km)、西南方向 48 个(5~34 km)、东南方向 43 个(10~43 km)(图 1),包括水田样品 92 个和旱地样品 23 个。每个样点 5 m 见方范围内 5 点梅花形取样,混合均匀,四分法保留 1 kg 左右土样用布袋包装、标记后带回实验室。每个采样点用 GPS 定位并详细记录土地利用类型、利用现状、耕作历史等信息。

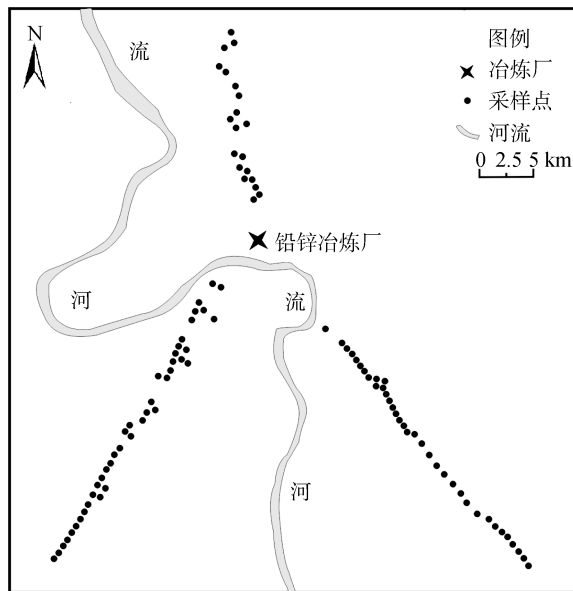


图 1 采样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling sites

土壤样品自然风干,去除动植物残体等杂物,用瓷研钵研磨,过 10 目和 100 目尼龙筛,备分析测试用。土壤理化性质按土壤农化常规分析法测定^[14],土壤重金属元素浓度采用 HCl-HNO₃-HClO₄ 消煮^[15]、ICP-MS (Thermo X7)测定。测试过程中外加空白和标样以

控制质量,所用试剂均为优级纯。

1.3 评价标准与方法

以国家《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)^[16]二级标准和当地土壤元素背景值^[17]的算术平均值加 2 倍算术标准差(Cd 0.43、Cr 139、Cu 49.0、Ni 59.9、Pb 56.5、Zn 164 mg/kg)作为标准,利用单因子指数法分析评价该冶炼厂周边耕地土壤重金属的污染状况,并利用内梅罗综合污染指数法计算土壤重金属综合污染指数,评价土壤重金属综合污染程度,计算公式为 $P_{综} = \{[(C_i/S_i)_{ave}^2 + (C_i/S_i)_{max}^2]/2\}^{1/2}$ 。式中, $P_{综}$ 为内梅罗综合污染指数, C_i 为污染物 i 的实测浓度, S_i 为污染物 i 的国家土壤环境质量二级标准。

1.4 数据处理

数据统计及土壤重金属浓度随距离变化的方程拟合用 Excel 2013 进行,重金属元素之间、重金属浓度与距离之间的相关性分析以及不同耕作方式的单因素方差分析用 SPSS 20.0 进行。

2 结果与讨论

2.1 土壤基本性质及养分指标分级

考虑到 3 个调查方向及水田和旱地两种耕作方式,从 115 个土壤样品中选取了 30 个代表性样品测定其基本性质,结果见表 1。该区土壤总体呈酸性,极个别土壤为中性。酸性条件将提高重金属的活性,易使农作物出现重金属超标现象,加大土壤重金属污染风险水平^[18]。研究区内土壤养分指标存在较大的空间变异性,以 1980 年全国第二次土壤普查养分分级标准进行养分指标分级^[19],该区有机质平均为二级(30~40 g/kg)、全氮平均为二级(1.5~2.0 g/kg)、全磷平均为三级(0.6~0.8 g/kg)、全钾平均为三级(15~20 g/kg)、速效氮平均为二级(120~150 mg/kg)、速效磷平均为六级(<3 mg/kg)、速效钾平均为四级(50~100 mg/kg)。除速效磷较低外,其他养分指标均较高,说明研究区土壤肥力总体较高。

表 1 研究区表层土壤基本性质($n=30$)

Table 1 Basic properties of 0-20 cm soil layers

项目	pH	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	速效氮 (mg/kg)	速效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	CEC (cmol (+)/kg)
平均值	5.3	38.0	1.76	0.72	15.5	125	2.47	58.0	10.4
范围	4.11~7.62	14.5~57.7	0.97~2.66	0.34~1.55	10.1~19.1	65~241	0.13~44.26	20~480	7.3~14.9
标准差	0.9	11.0	0.42	0.33	2.3	32	2.50	33.0	1.9

2.2 重金属污染状况及污染评价

研究区土壤受 Cd 污染最为严重,浓度范围是 0.17~2.58 mg/kg,平均 0.67 mg/kg,是国家土壤环境质量二级标准值的 2.23 倍,最高值达 2.58 mg/kg,

为二级标准的 8.60 倍(表 2)。115 个土壤表层混合样品中,超过国家土壤环境质量二级标准的点位: Cd 有 99 个, Zn 有 8 个, Cu 有 10 个, Cr 和 Ni 各有 2 个, Pb 均未超标。从空间变异性看, Zn 的变异系

表 2 研究区土壤重金属浓度
Table 2 The heavy metal concentrations in soils

土地利用类型	项目	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
总体 (n = 115)	平均值(mg/kg)	0.67	76.4	27.4	23.9	26.2	115
	范围(mg/kg)	0.17 ~ 2.58	40.3 ~ 501	6.18 ~ 81.9	11.7 ~ 185	5.4 ~ 110	53.9 ~ 262
	变异系数(%)	68.1	59.5	52.7	69.1	63.3	38.7
	污染百分比(%)	86.1	1.7	8.7	1.7	0	7.0
水田 (n = 92)	平均值(mg/kg)	0.61	77.6	25.3	24.2	33.3	109
	范围(mg/kg)	0.17 ~ 2.02	41.4 ~ 501	6.18 ~ 80.0	11.7 ~ 185	5.40 ~ 110	53.9 ~ 262
	变异系数(%)	63.5	63.4	45.3	74.6	65.2	39.0
	污染百分比(%)	83.7	1.1	4.4	2.2	0	5.4
旱地 (n = 23)	平均值(mg/kg)	1.00	71.3	35.3	22.6	44.6	138
	范围(mg/kg)	0.26 ~ 2.58	40.3 ~ 152	9.3 ~ 81.9	13.1 ~ 39.2	6.16 ~ 86.4	70.7 ~ 222
	变异系数(%)	68.7	37.1	60.6	36.0	51.7	32.5
	污染百分比(%)	95.7	4.4	26.1	0	0	17.4

注：n 为样本数。国家土壤环境质量二级标准：Cd 0.30 mg/kg；Cr 水田 250 mg/kg，旱地 150 mg/kg；Cu 50 mg/kg；Ni 40 mg/kg；Pb 250 mg/kg；Zn 200 mg/kg。

数较小，而 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 浓度的变异系数较大。对旱地、水田两种耕作方式土壤重金属浓度的单因素方差分析结果发现，6 种重金属元素均无显著差异($P > 0.05$)，说明不同土地利用类型和灌溉条件不是造成该区重金属污染分布差异的主要影响因素^[20]。

为深入了解研究区耕地土壤的重金属污染情况，选取当地土壤元素背景值作为标准进行评价。与当地土壤背景值相比，该区土壤均不同程度地受到 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 的污染，其中 Cd 污染最严重，Pb、Zn、Cu 次之，各元素超过背景值的点位分别是：Cd 60.9%、Cr 1.7%、Cu 8.7%、Ni 0.9%、Pb 15.7%、Zn 13.9%，这与吴双桃等^[21]的调查结果相似。

内梅罗综合污染指数法可全面反映土壤中各污染物的平均污染水平，也突出了污染最严重的污染物

给环境造成的危害。依据冶炼厂周边不同方向水田土壤重金属浓度、国家土壤环境质量二级标准和内梅罗综合污染指数评价方法，得到该冶炼厂周边总体及西北、西南和东南 3 个方向边水田土壤污染评价结果(表 3)。该冶炼厂周边的水田表层土壤主要以轻度污染为主，受到不同程度污染的点位达 63.1%，警戒线范围占 28.3%，而处于安全水平的仅占 8.7%。通过比较不同方向的内梅罗综合污染指数(表 3)，无论是各方向的所有样点还是相同距离段内(10 ~ 20 km)的样点，不同方向的污染水平均表现出“西北>西南>东南”的趋势，这可能是冶炼厂大气飘尘主要受夏季东南风影响所致。

土壤中的各种重金属元素具有不同的迁移和富集趋势，研究重金属之间的相关性可以推测重金属的来源是否相同。如若它们之间存在相关性，则来源可

表 3 内梅罗综合污染指数评价结果
Table 3 Results based on the Nemerow comprehensive pollution index assessment

方向	项目	重度污染 $P_{\text{污}} > 3$	中度污染 $2 \leq P_{\text{污}} < 3$	轻度污染 $1 \leq P_{\text{污}} < 2$	警戒线 $0.7 < P_{\text{污}} \leq 1$	安全 $P_{\text{污}} \leq 0.7$
总体	点位数	10	9	39	26	8
	百分比(%)	10.9	9.8	42.4	28.3	8.7
西北	点位数	5	3	8	2	0
	百分比(%)	27.8	16.7	44.4	11.1	0
西南	点位数	4	5	17	9	3
	百分比(%)	10.5	13.2	44.7	23.7	7.9
东南	点位数	1	1	14	15	5
	百分比(%)	2.8	2.8	38.9	41.7	13.9

能相同，否则来源可能不同^[22]。研究区土壤各重金属浓度的 Pearson 相关分析发现，土壤全量 Cd、Pb、Zn 之间存在显著的相关关系($P < 0.01$)，Cd 与 Pb、Zn 的相关系数达到 0.639 和 0.861，且 Pb 与 Zn 的相关系数达 0.644，呈现显著的正相关关系($P < 0.01$)。说明它们可能是来自相同的污染源，或是具有相同的富集途径。Cd 一般是工业“三废”排放所致^[23]，或作为施用农药和化肥等农业活动的标识元素^[24-25]。研究区土壤 Cd、Pb、Zn 浓度均有部分超出当地土壤环境背景值，说明其受人为活动影响较大。重金属 Ni 与 Cr 显著正相关关系($P < 0.01$)，相关系数达 0.922，而土壤中的 Ni 主要为地质来源^[26]，且该研究区土壤 Cr、

Ni 仅有两个点浓度超出当地土壤背景值及国家土壤环境质量二级标准，故 Cr、Ni 基本上反映了土壤母质及其风化物而累积的重金属。

2.3 土壤重金属空间分布特征分析

本研究对土壤重金属浓度与距冶炼厂距离的分析显示，土壤 Cd、Pb 和 Zn 全量与距冶炼厂的距离显著负相关关系($P < 0.01$)，即随着距冶炼厂的距离增加，土壤 Cd、Pb 和 Zn 全量降低(表 4)。包丹丹等^[27]研究苏南某冶炼厂周边农田土壤重金属分布情况，发现土壤全量 Cd、Pb、Cu、Zn、Hg 浓度随着距污染源距离的增加而降低。张素娟等^[28]、郑海龙等^[29]调查研究也有类似结果。

表 4 土壤重金属浓度与距冶炼厂远近的相关性
Table 4 Correlation between heavy metal concentrations in soils and the distance to smelter

方向	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
总体	-0.734**	0.189	0.036	0.123	-0.671**	-0.650**
西北	-0.745**	0.258	-0.490*	0.178	-0.583*	-0.631**
西南	-0.846**	0.464**	0.229	0.433**	-0.797**	-0.729**
东南	-0.539**	0.040	-0.150	0.084	-0.678**	-0.177

注：* 和 ** 分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平(双侧)上显著相关。

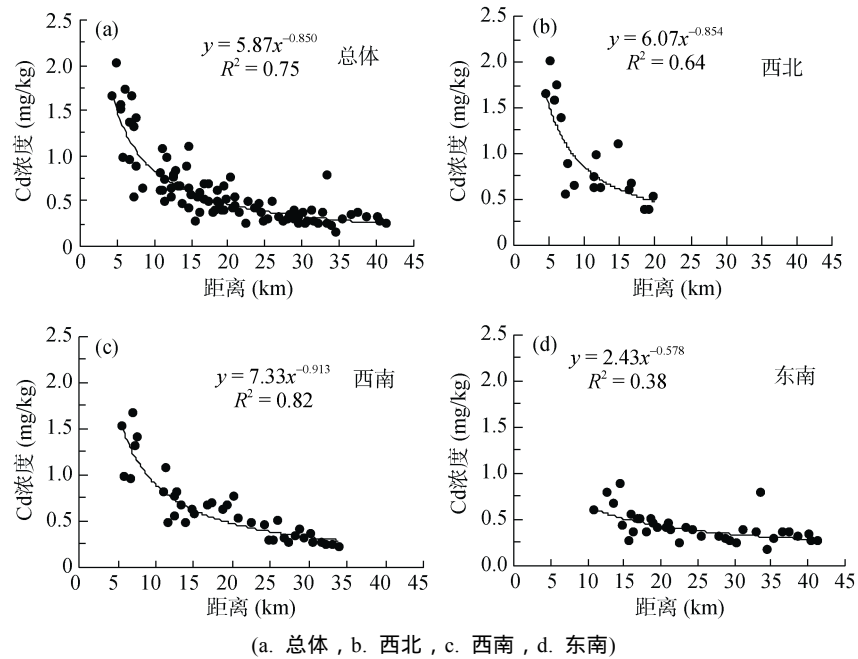
许多工业发达国家将大气沉降对土壤重金属累积的贡献率在各种外源输入因子中排首位^[30]。也有一些用曲线拟合重金属分布模式的研究，如 Feng 等^[31]曾用指数方程较好地描述土壤中 Hg 随距离的变化，说明指数方程能够较好地描述由于大气沉降造成的土壤污染趋势。郑娜等^[32]用指数和幂函数较好地描述了葫芦岛土壤中 Pb、Cd、Zn、Cu 浓度随距离锌厂的变化趋势，发现离锌厂越近，其土壤重金属污

染越严重，反之则越轻，进一步说明锌厂的粉尘排放是该市土壤污染重金属的主要来源。本研究采用指数和幂函数方法从总体及西北、西南和东南 3 个方向均较好地拟合了土壤全量 Cd、Pb、Zn 的分布模式(表 5)。以 Cd 为例，绘出浓度随距离变化拟合幂函数的分布模式图(图 2)，更形象地描述了重金属浓度随距离变化的趋势，随着距冶炼厂距离的增加，土壤重金属浓度先迅速下降，后慢慢趋于平缓，接近背景值。

表 5 土壤重金属浓度随距离变化的函数拟合
Table 5 Estimated exponential equation between heavy metal concentration in soils and the distance to smelter

元素	方向	$y = a \times e^{-bx}$			$y = a \times x^{-b}$		
		a	b	R^2	a	b	R^2
Cd	总体	1.30	0.046	0.66	5.87	0.850	0.75
	西北	2.01	0.077	0.60	6.07	0.854	0.64
	西南	1.63	0.056	0.84	7.33	0.913	0.82
	东南	0.69	0.023	0.33	2.43	0.578	0.38
Pb	总体	70.4	0.048	0.49	290.6	0.831	0.49
	西北	83.3	0.064	0.26	225	0.743	0.30
	西南	76.7	0.061	0.70	400	0.999	0.69
	东南	81.0	0.046	0.47	714	1.056	0.43
Zn	总体	165	0.024	0.45	377	0.455	0.55
	西北	232	0.039	0.38	403	0.425	0.41
	西南	178	0.027	0.63	355	0.429	0.58
	东南	89	0.003	0.02	113	0.100	0.05

注：函数中 y 表示研究区土壤各重金属浓度， x 表示采样点距冶炼厂中心的距离。



(a. 总体, b. 西北, c. 西南, d. 东南)

图 2 土壤 Cd 浓度随距离的分布模式

Fig. 2 Distribution models of soil Cd concentrations with different distances to the smelter

4 结论

中南某大型冶炼厂周边土壤总体呈酸性,除速效磷较低外,其他养分指标均较高;土壤重金属污染以 Cd 为主,平均 0.67 mg/kg,是国家土壤环境质量二级标准的 2.23 倍,最高值达 2.58 mg/kg。与当地土壤背景值比较,各元素点位超标率分别是 Cd 60.9%, Cr 1.7%, Cu 8.7%, Ni 0.9%, Pb 15.7%, Zn 13.9%。水田与旱地土壤重金属差异不显著,说明耕作方式不是造成该区重金属分布差异的主要原因。相关性表明,土壤 Cd 与 Pb、Zn 浓度显著相关,且与距冶炼厂的距离呈显著负相关,用指数函数和幂函数能很好地拟合其随距离的变化趋势,说明土壤中重金属 Cd、Pb、Zn 可能均源于冶炼厂降尘污染。

参考文献:

[1] 骆永明,滕应,过园. 土壤修复——新兴的土壤科学分支学科[J]. 土壤, 2005, 37(3): 230–235

[2] 刘凤枝,师荣光,徐亚平,蔡彦明,刘铭,战新华,王跃华,刘保锋,赵玉杰,郑向群. 耕地土壤重金属污染评价技术研究——以土壤中铅和镉污染为例[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(2): 422–426

[3] World Bank, FAO, UNDP, UNEP. Land Quality Indicators [M]. No. 315 of the World Bank Discussion Papers. Washington DC, The International Bank for Reconstruction and Development, The World Bank, 1995: 1–15

[4] Bullock P, Gregory PJ. Soil in the Urban Environment [M]. Oxford, UK: Blackwell Scientific Publications, 1991

[5] 张素娟,肖玲,关帅朋,张耀华,张军,程冬鸽. 蓝田冶炼厂周边农田土壤重金属复合污染分析评价[J]. 干旱地

区农业研究, 2009, 27(5): 265–270

[6] 吴春发,吴嘉平,骆永明,章海波,滕应,宋静,吴龙华. 冶炼厂周边土壤重金属污染范围的界定与不确定性分析[J]. 土壤学报, 2009, 46(6): 1 006–1 012

[7] 郑娜,王起超,郑冬梅. 锌冶炼厂周围重金属在土壤-蔬菜系统中的迁移特征[J]. 环境科学, 2007, 28(6): 1 349–1 354

[8] 李如忠,潘成荣,徐晶晶,陈婧,姜艳敏. 典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 1 076–1 085

[9] 雷鸣,曾敏,郑袁明,廖柏寒,朱永官. 湖南采矿区和冶炼区水稻土壤重金属污染及其潜在风险评价[J]. 环境科学学报, 2008, 28(6): 1 212–1 220

[10] 龙安华,刘建军,倪才英,黄贵凤,汤海燕. 贵溪冶炼厂周边农田土壤重金属污染特性及评价[J]. 土壤通报, 2006, 37(6): 1 212–1 217

[11] 王利军,卢新卫,荆淇,任春辉,陈灿灿,李晓雪,罗大成. 宝鸡长青镇铅锌冶炼厂周边土壤重金属污染研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2): 325–330

[12] 李晓勇. 农田土壤重金属污染评价方法研究——以株洲市白马乡为例[J]. 土壤通报, 2009, 40(2): 390–393

[13] 刘扬林,蒋新元. 株洲市白马乡土壤和农作物重金属污染评价[J]. 土壤, 2004, 36(5): 551–556, 564

[14] 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

[15] 李柱,任婧,杨冰凡,王松凤,吴龙华,骆永明. 铜对伴矿景天生长及锌镉吸收性的影响[J]. 土壤, 2012, 44(4): 626–631

[16] 中华人民共和国环境保护局. 中华人民共和国土壤环境质量标准(GB15618-1995)[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995

[17] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990

[18] Sauve S, Hendershot W, Allen HE. Solid-solution parti-

- tioning of metals in contaminated soils: Dependence on pH, total metal burden, and organic matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, 34(7): 1 125–1 131
- [19] 张建杰, 李富忠, 胡克林, 张强, 郭彩霞, 黄元仿. 太原市农业土壤全氮和有机质的空间分布特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2009, 29(6): 3 163–3 172
- [20] 李鹏, 李晔, 曾璞, 胡斌, 杜双. 某冶炼厂周边农田土壤重金属污染状况分析与评价[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(2): 863–865, 876
- [21] 吴双桃, 吴晓芙, 胡曰利, 陈少瑾, 胡劲召, 陈宜菲, 谢凝子. 铅锌冶炼厂土壤污染及重金属富集植物的研究[J]. *生态环境*, 2004, 13(2): 156–157, 160
- [22] 程芳, 程金平, 桑恒春, 于金莲, 席磊, 皮帅帅. 大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析[J]. *环境科学*, 2013, 34(3): 1 062–1 066
- [23] 陈同斌, 曾希柏, 胡清秀. 中国化肥利用率的区域分异[J]. *地理学报*, 2002, 57(5): 531–538
- [24] Garcia R, Maiz I, Millan E. Heavy metal contamination analysis of road soils and grasses from Gipuzkoa (Spain) [J]. *Environmental Technology*, 1996, 17(7): 763–770
- [25] 赵秀峰, 王强盛, 石宁宁, 丁艳锋. 石化园区周边农田土壤重金属污染分析与评价[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(1): 133–141
- [26] Cecchi AM, Koskinen WC, Cheng HH, Haider K. Sorption-desorption of phenolic acids as affected by soil properties[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2004, 39(4): 235–242
- [27] 包丹丹, 李恋卿, 潘根兴, 崔立强, 朱大才. 苏南某冶炼厂周边农田土壤重金属分布及风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(8): 1 546–1 552
- [28] 张素娟, 肖玲, 孙科, 张耀华, 关帅鹏, 程冬鸽. 某冶炼厂周边农田土壤重金属复合污染研究[J]. *农业现代化研究*, 2009, 30(2): 243–247
- [29] 郑海龙, 陈杰, 邓文靖, 甄满枝. 南京城市边缘带化工园区土壤重金属污染评价[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(9): 1 182–1 188
- [30] Nriagu JO. *Changing Metal Cycles and Human Health* [M]. Dr. S. Bernhard, Dahlem Konferenzen, Berlin: Springer-Verlag, 1984
- [31] Feng XB, Li GH, Qiu GL. A preliminary study on mercury contamination to the environment from artisanal zinc smelting using indigenous methods in Hezhang County, Guizhou, China: Part 2. Mercury contaminations to soil and crop[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 368(1): 47–55
- [32] 郑娜, 王起超, 刘景双, 王洋, 张仲胜. 葫芦岛市土壤、蔬菜重金属污染空间变化规律[J]. *环境科学*, 2009, 30(7): 2 071–2 076

Heavy Metal Contamination Characteristics in Soils Around a Nonferrous Metal Smelter in Central Southern China

CAO Xue-ying^{1,2}, ZHANG Sha-na¹, TAN Chang-yin¹, HU Peng-jie^{2*}, CUI Xu²,
ZHOU Tong², WU Long-hua², LUO Yong-ming²

(1 *College of Resources and Environmental Science, Hu'nan Normal University, Changsha 410081, China*; 2 *Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

Abstract: The characteristics of heavy metal pollution in 0–20 cm soil layers of the farmlands surrounding a nonferrous metal smelter in central southern China were assessed from three directions: northwest, southwest and southeast. The correlation analyses among heavy metal elements and between heavy metal concentrations and the distance to the smelter were conducted to identify metal spatial distribution and the pollution source. The results showed that the soils in this area were mainly acidic and seriously contaminated by Cd. Approximately 60.9% and 86.1% of the soils exceeded local soil environmental background values and the National Soil Environmental Quality Standards, respectively. The soil was polluted lightly by Cu, Zn, Cr and Ni, but not polluted by Pb. According to the “Nemerow comprehensive pollution index”, only 8.7% of the samples were within the level of “security”, which suggested that crop production in this area faces serious risk of heavy metal contamination. One factor analysis of variance demonstrated that the difference of heavy metal concentrations in dry land and paddy was not significantly different, indicating that farming methods are not the main cause of the different distribution of heavy metals in this area. Soil Cd, Pb and Zn were significantly correlated and showed remarkable negative relationship with the distance to the smelter. Exponential and power functions can be used to fit heavy metal distribution patterns with the distance, indicating that these pollutants might come from the high metal containing dust of the smelter.

Key words: Lead and zinc smelting; Heavy metal in soil; Spatial variation; Risk assessment