

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估 陈小彤, 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 郝吉明 (789)

空气细菌真菌污染的分级评价构建方法 张华玲, 姚大军, 张雨, 方子梁 (795)

2014年北京APEC期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析 何晓朗, 谭吉华, 郭送军, 马永亮, 贺克斌 (801)

北京市夏季不同O₃和PM_{2.5}污染状况研究 王占山, 张大伟, 李云婷, 董欣, 孙瑞雯, 孙乃迪 (807)

2013年1月南京北郊霾天气气溶胶的光学特性 王利朋, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 周瑶瑶 (816)

上海典型持续性PM_{2.5}重度污染的数值模拟 常炉予, 许建明, 周广强, 吴剑斌, 谢英, 余钟奇, 杨辰 (825)

厦门室内多溴二苯醚的沉降通量、季节变化与人体暴露水平 韩文亮, 刘豫, 陈海明, 陈兴童, 范涛 (834)

复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究 黎宝仁, 陈洲洋, 王剑斌, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (847)

环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究 孔秀君, 张鹏, 杨南南, 梁生康 (854)

面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究 杜成功, 李云梅, 王桥, 朱利, 吕恒 (862)

三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系 周川, 蔚建军, 付莉, 崔玉洁, 刘德富, 姜伟, Douglas Haffner, 张磊 (873)

三峡库区消落带水体DOM不同分子量组分三维荧光特征 陈雪霜, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 闫金龙 (884)

黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析 冯精兰, 席楠楠, 张飞, 刘书卉, 孙剑辉 (893)

岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析 谢正兰, 孙玉川, 张媚, 余琴, 徐昕 (900)

长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征 王欣悦, 唐振亚, 张成, 王永敏, 王定勇 (910)

长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征 尹肃, 冯成洪, 李扬颀, 殷立峰, 沈珍瑶 (917)

涌湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价 熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 冯立辉, 王丽卿 (925)

三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价 王永艳, 文安邦, 史忠林, 严冬春, 朱波, 唐家良 (935)

海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估 童银栋, 张巍, 邓春燕, 王学军 (942)

三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征 何立平, 刘丹, 于志国, 周斌, 杨振宇, 兰国新, 郭冬琴, 林俊杰 (950)

三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响 梁丽, 王永敏, 张成, 余亚伟, 安思危, 王定勇 (955)

不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究 周静雯, 苏保林, 黄宁波, 管毓堂, 赵堃 (963)

富营养化城市景观水体表观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征 贡丹燕, 潘杨, 黄勇, 包伟, 李倩倩 (970)

间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响 汪健, 李怀正, 甄葆崇, 刘振东 (980)

非水溶性醌加速菌GWF生物还原高氯酸盐的研究 张媛媛, 郭延凯, 张超, 梁晓红, 田秀蕾, 牛文钰, 廉静, 郭建博 (988)

紫外辐射对腐殖酸溶液理化性质及其混凝性能的影响 王文东, 张轲, 范庆海, 郑丹 (994)

类水滑石复合材料吸附去除水中硫酸根离子 顾怡冰, 马邕文, 王金泉, 王艳, 关泽宇 (1000)

富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响 李雨清, 何江, 吕昌伟, 樊明德, 王维, 张瑞卿, 谢志磊, 汪精华, 于波, 恩和, 丁涛 (1008)

铁有机骨架材料的快速合成及对阴离子染料的吸附性能 孙德帅, 刘亚丽, 张晓东, 秦婷婷 (1016)

富里酸-膨润土复合体对氟的吸附特性 方敦, 田华婧, 叶欣, 何次利, 但悠梦, 魏世勇 (1023)

3种低分子量有机酸对紫色土吸附菲的影响 谢黎, 陈本寿, 张进忠, 卢松, 江韬 (1032)

HDTMA改性蒙脱土对土壤Cr(VI)的吸附稳定化研究 蒋婷婷, 喻恺, 罗启仕, 吉敏, 林匡飞 (1039)

水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响 王兴栋, 林景江, 李智伟, 赵焕平, 余广炜, 汪印 (1048)

煤制气废水总酚负荷对反硝化的抑制效应研究 张玉莹, 陈秀荣, 王璐, 李佳慧, 徐燕, 庄有军, 于泽亚 (1055)

硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究 周健, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 完颜德卿, 丁亮, 邵经纬, 赵蓉 (1061)

低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究 端正花, 潘留明, 陈晓欧, 王秀荣, 赵乐军, 田乐琪 (1070)

游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响 孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 赵华南, 马娟, 方晓航 (1075)

1株*Arthrobacter arilaitensis*菌的耐冷异养硝化和好氧反硝化作用 何腾霞, 倪九派, 李振轮, 孙权, 冶青, 徐义 (1082)

海洋菌株y3的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性 孙庆花, 于德爽, 张培玉, 林学政, 徐光耀, 李津 (1089)

几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力:以甘肃庄浪县为例 师晨迪, 许明祥, 邱宇洁 (1098)

不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响 张延, 梁爱珍, 张晓平, 陈升龙, 孙冰洁, 刘四义 (1106)

绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响 周泉, 王龙昌, 熊瑛, 张赛, 杜娟, 赵琳璐 (1114)

黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究 方瑛, 马任甜, 安韶山, 赵俊峰, 肖礼 (1121)

黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征 张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽 (1128)

包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析 张连科, 李海鹏, 黄学敏, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大 (1139)

砷污染土壤复合淋洗修复技术研究 陈寻峰, 李小明, 陈灿, 杨麒, 邓琳静, 谢伟强, 钟宇, 黄斌, 杨伟强, 张志贝 (1147)

以预处理剩余污泥为燃料MFC产电性能及不连续供电的可行性 赵艳辉, 赵阳国, 郭亮 (1156)

废弃物焚烧飞灰中持久性自由基与二噁英及金属的关联探究 王天娇, 陈彤, 詹明秀, 郭颖, 李晓东 (1163)

淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响 耿静, 吕永龙, 任丙南, 王铁宇 (1171)

《环境科学》征订启事 (1138) 《环境科学》征稿简则 (1155) 信息 (824, 853, 883)

包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析

张连科^{1,2}, 李海鹏², 黄学敏¹, 李玉梅², 焦坤灵², 孙鹏², 王维大²

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 内蒙古科技大学能源与环境学院, 包头 014010)

摘要: 以包头市某铝厂周边 500 m 内土壤为研究对象, 土壤按 0~5 cm、5~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 分层取样, 共采集 64 个土壤样品, 测试了 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Ni、Mn 共 7 种重金属含量, 运用相关性分析和主成分分析区分厂区周边重金属的来源. 结果表明 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Ni 和 Mn 含量分别为 32.9、50.35、69.92、43.78、0.54、554.42 和 36.65 mg·kg⁻¹, 受测的 7 种重金属与内蒙古背景值相比均超标; 重金属空间分布表明, 重金属在西南方向明显富集, 且在表层土壤(0~5 cm)重金属含量最高, 重金属含量随深度的增加而降低, 在 20 cm 以下的土层趋于稳定; 来源分析表明, 土壤周边重金属 Cu、Zn、Cr 和 Mn 的来源可能受铝厂及周边工业活动的影响; Pb 和 Cd 来源可能主要与道路交通有关; Ni 的主要来源可能受农业活动和土壤母质共同作用.

关键词: 重金属污染; 土壤; 空间分布; 垂直分布; 来源解析

中图分类号: X131.3; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-1139-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.03.045

Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou

ZHANG Lian-ke^{1,2}, LI Hai-peng², HUANG Xue-min¹, LI Yu-mei², JIAO Kun-ling², SUN Peng², WANG Wei-da²

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. School of Environment and Energy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: The soil with 500 m distance from an aluminum plant in Baotou was studied. A total of 64 soil samples were taken from the 0-5 cm, 5-20 cm, 20-40 cm and 40-60 cm layers, and the contents of Cu, Pb, Zn, Cr, Cd, Ni and Mn were tested, respectively. The correlation analysis and principal component analysis were used to identify the sources of these heavy metals in soils. The results suggested that the contents of Cu, Pb, Zn, Cr, Cd, Ni and Mn in study area were 32.9, 50.35, 69.92, 43.78, 0.54, 554.42 and 36.65 mg·kg⁻¹ respectively. All seven heavy metals tested were overweight compared with the background values of soil in Inner Mongolia. The spatial distribution of heavy metals showed that the horizontal distribution of heavy metals was obviously enriched in the southwest, while in vertical distribution, the heavy metal content (0 to 5 cm) was highest in the surface soil, and the heavy metal content decreased with increasing depth and tended to be stabilized when the depth was over 20 cm. Source analysis showed that the source of Cu, Zn, Cr and Mn might be influenced by the aluminum plant and the surrounding industrial activity. The source of Pb and Cd might be mainly related to road transportation. The source of Ni may be affected by agricultural activities and soil parent material together.

Key words: heavy metals contamination; soil; spatial distribution; vertical distribution; source analysis

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^[1]. 且土壤中重金属可通过污染地表水或在农作物富集等方式直接或间接地危害人体健康, 因此成为近年来研究的热点^[2~4]. 包头市作为我国重要的工业城市, 拥有涵盖稀土、钢铁制造、冶金、机械制造及军工等多项支柱产业, 在带来经济飞速发展的同时, 也给土壤造成极大危害. 目前有关包头市土壤重金属污染的研究主要集中在对小面积农田、郊区、公园和工矿企业周边土壤重金属状况的调查及简单的污染评价方面^[5~9]. 王贵等^[10]和张花娟^[11]从不同角度对包头市土壤重金属含量分布及污染评价研究表明, 包头市土壤重金属污染主要集中于工业厂区周边. 近几年, 工业区重金属污染危害周边居民的事件频

发^[12], 而对厂区周边重金属污染空间分布及来源解析的研究较为少见, 因此对工业区周边土壤重金属的分布及来源解析的研究显得尤为重要. 污染物来源的辨识一直是环境研究中的难点^[13], 多元统计分析(相关分析及主成分分析)现已成为辨识土壤中重金属来源的经典方法, 且得到广泛应用^[14,15]. 空间插值法可模拟土壤重金属的空间结构, 也可以直观地表示重金属含量的空间分布^[15,16]. 将多元统计分析与空间插值相结合, 对环境中污染物的分布特征、来源进行分析, 通过 GIS 软件制图功能将污染

收稿日期: 2015-08-25; 修订日期: 2015-10-29

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目(2015MS0408)

作者简介: 张连科(1980~), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为土壤化学及污染修复, E-mail: lkzhang@imust.cn

程度直观地表现出来,使污染物的来源解析更加清晰明了^[17,18].

本文选择包头市某铝业周边土壤作为研究对象,利用 GIS 技术对其周边土壤中重金属空间分布进行分析,使用相关性和主成分分析解析铝业周边重金属可能的来源,以期为该厂区及周边土壤重金属污染防治提供理论依据及指导.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

包头某铝业位于包头市某重点工业区内,该工业区位于东经 109.77° ~ 109.81°,北纬 40.34° ~ 40.36°之间,属于半干旱中温带大陆季风气候,年平均温度 7.2℃,年降雨量 421.8 mm,该区域土壤以砂土和灰褐土为主.包头某铝业是以电解铝生产为主,其他铝产品深加工为辅的大型铝电一体化企业.铝厂占地约 20 hm²,生产规模年产能达 80 万 t 电解铝,40 万 t PVC、32 万 t 烧碱、60 万 t 电石、20 万 t 铝深加工项目、20 万 t 赖氨酸等.交通便利,紧靠水源,且与多个村落相邻.

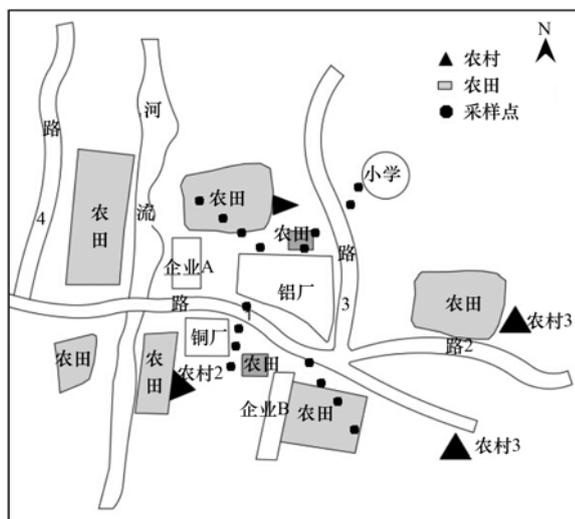


图1 研究区分布采样点示意

Fig. 1 Soil sampling sites of the study area

1.2 样品采集

包头市常年主导风向为西北风,经过实地调研,综合考虑其地貌,交通网络,土地分布等因素的基础上,以厂区边缘为起点,设定为东北(NE)、东南(SE)、西北(NW)和西南(SW)这4个采样方向.每个方位分别在50、100、300和500 m由近及远进行采样,各采样点分别采集0~5、5~20、20~40和40~60 cm不同深度土样,共采集64个样品.采样中尽量避开外来土和新近扰动过的土层,各采样点

均由20 m对角线采集5个点混匀,然后用四分法反复取舍至1 kg左右装袋带回.

1.3 样品处理与分析

土样剔除根茎,沙砾等异物,置于室内通风处自然风干,经研磨后过100目尼龙网筛后装入实验袋备用.为避免人为干扰及与其他金属接触,样品采集、混合、研磨、粉碎等过程中均采用木铲、木棒、玛瑙研钵等用具.

土样测定Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Ni、Mn这7种重金属元素,土壤样品的实验分析参照文献^[19]的方法.土样采用奥普乐MD8微波消解/萃取仪进行消解,重金属使用Perkin Elmer AA800火焰原子吸收和石墨炉双系统进行含量测定.实验所用的药品均为优级纯,所用的玻璃器皿和塑料器皿均用10%的稀硝酸浸泡24 h,后用超纯水洗涤干净.为保证分析的准确性,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,各种金属的回收率均在国家标准参比物质的允许范围内.

1.4 数据处理

空间插值制图使用ArcGIS 9.3软件,利用SPSS 19.0进行相关分析和主成分分析^[20],作为判断污染物来源途径异同的重要依据,并进一步对7种重金属数据进行详细解释,如污染来源的确定以及自然和人为因素对土壤元素含量的贡献率等^[21].

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量

某铝厂土壤重金属含量(0~20 cm)统计结果见表1.以内蒙古土壤几何平均值为评价基准,采用单因子污染指数法^[23]对该厂区周边土壤重金属(0~20 cm)污染状况进行评价,其污染程度分级为:单因子指数计算值 $P \leq 1$ 为无污染; $1 < P \leq 2$ 为轻度污染; $2 < P \leq 3$ 为中度污染; $P \geq 3$ 为重度污染^[24].由表1可知,受测的Cu、Zn、Cr、Pb、Cd、Mn、Ni 7种重金属中Cd和Pb处于重度污染,Cu和Ni处于中度污染,Zn、Cr和Mn处于轻度污染,其中Cd的单因子指数最高,达到14.59,远超其余6种重金属.从超标率来看,其大小顺序依次为:Pb = Cd > Ni > Cu > Zn > Mn > Cr,其中Pb和Cd均为100%超标,Cr的超标率最低,也达到50%,因此表明该厂区土壤重金属污染问题突出.

变异系数可反映人为活动对重金属含量的影响,变异系数越大,表明受人为活动干扰越强烈.该

厂区的变异系数的大小依次为: $Cu > Cr > Pb = Mn > Zn > Cd > Ni$. 有研究认为变异系数(CV) $< 15\%$ 为弱变异, $CV > 36\%$ 为强变异^[25]. Cu、Zn、Pb、Mn、Zn、Cd 和 Ni 这 7 种元素中, 除 Ni 为 15% 为弱变异

外, 其余 6 种重金属均超过 36%, 为强变异, 表明该厂区周边重金属受人为影响较为严重. 尤其是 Cu 的变异系数达到 185%, 远超其他重金属元素, 表明该元素分布较不均匀, 可能受人为来源的控制.

表 1 研究区域土壤重金属统计分析

Table 1 Statistical analysis of heavy metals in the soils of the study area

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 ¹⁾ /mg·kg ⁻¹	单因子污染指数 <i>P</i> ²⁾	超标率/%	变异系数 CV
Cu	441.00	8.45	32.9 ± 60.93	12.90	2.55	79.69	1.85
Zn	191.88	39.00	69.92 ± 28.04	48.60	1.44	78.13	0.40
Cr	213.88	20.15	43.78 ± 26.7	36.50	1.20	50	0.61
Pb	116.38	22.92	50.35 ± 21.85	15.00	3.36	100	0.43
Cd	1.05	0.14	0.54 ± 0.2	0.04	14.59	100	0.38
Mn	1 696.31	96.56	554.42 ± 236.12	446.00	1.24	75	0.43
Ni	46.88	7.69	36.65 ± 5.43	17.30	2.12	98.44	0.15

1) 内蒙古土壤几何平均值^[22]; 2) 单因子污染指数 $P = \text{平均值}/\text{背景值}$

2.2 土壤重金属空间分布

ArcGIS 提供多种空间插值分析, 土壤重金属含量的空间插值方法多为克里金插值和反距离插值, 前置适用于非正态分布数据, 而后者则适用于正态分布数据^[26,27]. 本研究受测的 7 种重金属含量正态分布结果表明, 除 Cd 外均为非正态分布, 其中反距离权重插值法是一种加权平均内插法, 该方法认为各个观测值对周边区域都存在影响, 且影响随距离的增大而减小^[28]. 因此本研究选用反距离权重插值法对该厂区周边土壤重金属含量进行插值分析.

根据各采样点中 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Ni 和 Mn 的含量, 通过 ArcGIS 利用反距离权重插值方法得到研究区重金属(0 ~ 20 cm) 含量水平分布(图 2). 由图 2 可知, 受测的 7 种重金属除 Ni 外, 均呈现岛状分布格局, 总体上以铝厂西南方向含量较高, 这种现象尤以 Cu、Zn 最为明显, 周边区域含量随距离的增大而降低. Cr、Pb、Cd 的高浓度区域主要集中在厂西南和东北方向, 且 Pb 和 Cd 的分布主要分布在道路两旁. Mn 含量较高的区域主要集中在厂区附近, 其余方位变化并不明显. Ni 含量在分布变

化上较为平稳, 但在靠近农田的部分采样点浓度高于非农田采样点. 包头常年主导风向为西北风, 而本研究中重金属总体产生富集的方位多为西南方向 50 m 处而非处于下风向的东南方向. 赵仁鑫等^[29] 研究内蒙古白乃庙矿区重金属污染特征也曾得出风向对重金属分布影响并不显著的结论.

2.3 土壤重金属垂直分布

基于各土层间重金属含量的数据结果, 利用单因素方差分析(ANOVA) 来分析铝厂周边土壤重金属各土层含量差异的显著性, 结果见表 2. 从中可知, 受测的 7 种重金属中, Cu、Zn、Cr、Pb 的含量随土层变化明显, 其余 Cd、Ni、Mn 的含量随土层变化差异性较小.

将 Cd 和 Mn 的含量进行标准化统一后进行比较. 铝厂周边土壤中重金属含量随深度增加各种金属含量变化关系如图 3. 从中可知 Cu、Zn、Cr、Pb、Cd、Ni 和 Mn 这 7 种重金属含量随深度的增加, 重金属含量呈现逐渐降低的变化规律. 这与近年来研究土壤剖面金属含量基本呈现出由表层向下逐渐减少的变化规律相一致^[30-32]. 受测的 7 种重金属含

表 2 研究区重金属土层变化方差分析表

Table 2 Analysis of soil layer variation of heavy metals in the study area

重金属元素	各土层重金属含量均值/mg·kg ⁻¹				<i>F</i> 检验统计量	显著性水平
	0 ~ 5 cm	5 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	40 ~ 60 cm		
Cu	67.78	28.09	19.85	15.88	2.632	0.058
Zn	89.42	72.35	59.22	58.67	5.08	0.003
Cr	60.05	44.2	37.46	33.41	3.445	0.022
Pb	59.79	52.78	45.44	43.41	1.953	0.131
Cd	0.6	0.58	0.51	0.48	1.286	0.287
Ni	38.28	37.87	35.91	36.42	1.31	0.28
Mn	655.37	551.47	519.88	490.96	1.511	0.221

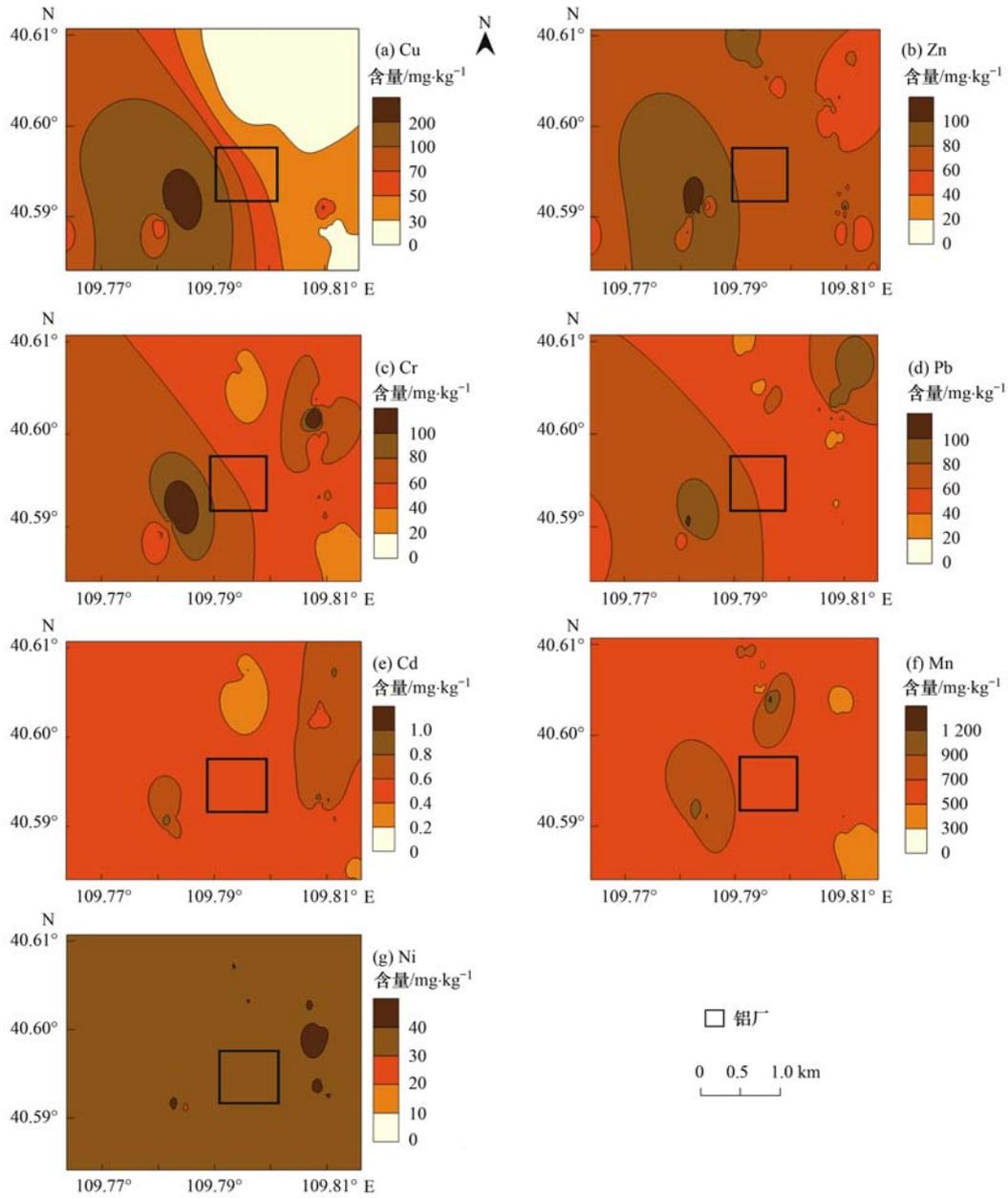


图2 研究区土壤重金属含量水平分布

Fig. 2 Distribution of soil heavy metal content in the study area

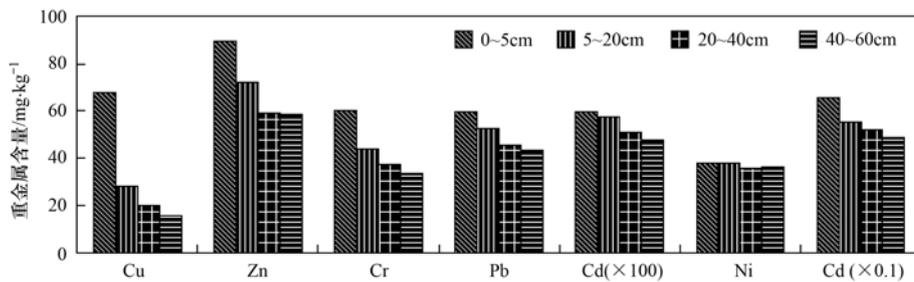


图3 研究区土壤重金属含量垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of soil heavy metal content in the study area

量在表层(0 ~ 5 cm)和亚表层(5 ~ 20 cm)均明显高于其余两层,这与郑国璋^[33]研究结果相一致,即认为表层土壤重金属的富集主要受人为活动影响,且主要在土壤0 ~ 20 cm表层积累结果相一致. Cu、Zn、Cr、Pb和Mn在表层重金属含量均明显高于其余3层,因此表层土壤受人为干扰较为严重. 而重金属在20 ~ 40 cm和40 ~ 60 cm的土层中变化并不明显,可能是由于在20 cm以下的土壤基本未受到人为的扰动,且表层土壤的重金属难以向下迁移^[34]. Ni含量在各土层垂直坡面变化较为稳定,与水平分布的变化趋势保持一致,因此Ni的含量较其他几种金属受人为干扰程度较低.

2.4 土壤重金属同源性分析

2.4.1 土壤重金属的相关分析

土壤重金属来源多受人为活动和土壤母质的影

响,来源的相似性会导致土壤中某些重金属元素间表现出一定的相关特点^[35]. 因此,相关分析是推测重金属来源的重要依据,且土壤重金属之间的相关性可以提供土壤重金属污染来源和途径等重要信息,若元素间相关性显著或极显著,则表明元素间一般具有同源关系或复合污染^[36~39]. 由于受测的7种重金属除Cd外,其余6种重金属均为非正态分布,因此采用Spearman相关分析^[40]. 表3为铝厂周边重金属Cu、Zn、Cr、Pb、Cd、Ni和Mn含量之间的Spearman相关关系分析结果. 从中可知Cu与Zn、Cr、Mn在土壤中均存在极显著正相关($P < 0.01$)且相关系数均大于60%,由此可推4种元素具有较大的同源性和复合污染的隐患. Pb和Cd在($P < 0.01$)也有较高的相关性,Ni与各元素之间并无较显著的相关性,因此推断其可能与其他重金属的来源途径不同.

表3 研究区土壤重金属含量的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of soil heavy metal contents of the study area

	Cu	Zn	Cr	Pb	Cd	Mn	Ni
Cu	1						
Zn	0.751**	1					
Cr	0.885**	0.703**	1				
Pb	0.392**	0.469**	0.428**	1			
Cd	0.423**	0.287*	0.452**	0.513**	1		
Mn	0.647**	0.608**	0.748**	0.341**	0.185	1	
Ni	0.299*	0.353**	0.308*	0.167	0.405**	0.427**	1

1) **表示在0.01水平(双侧)上显著相关; *表示在0.05水平(双侧)上显著相关

2.4.2 土壤重金属元素的主成分分析

为进一步研究各土层中7种重金属含量间的相互关系和各污染物的来源,利用SPSS进行主成分分析(PCA). 主成分分析可将多个指标转化为少数几个综合指标来反映原始数据的信息,在土壤研究中用以区分各重金属来源^[41,42]. 通过表3可知各金属元素间具有较强的相关性,且表4和表5数据均通过Bartlett球形检验适宜进行主成分分析. 由表4主成分分析可知,7种重金属前3个主成分反映

82.484%的信息,因此对前3个主成分进行分析即可得到Cu、Zn、Cr、Pb、Cd、Ni和Mn这7种重金属含量数据的大部分信息^[43,44]. 由表5可知,第一主成分(F1)中Cu、Zn、Cr和Mn有较高的载荷;第二主成分(F2)主要反映了Pb和Cd的富集信息;第三主成分(F3)则反映出Ni的富集信息.

利用主成分分析成分矩阵所对应的特征向量分量,得到7种重金属的直观分类图(图4). 图4中重金属间的距离反映了元素含量间的相关性. Cu、

表4 研究区土壤重金属含量的主成分分析

Table 4 Principal component analysis of heavy metal concentrations in soil of the study 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	3.924	56.053	56.053	3.924	56.053	56.053	3.079	43.981	43.981
2	0.981	14.014	70.066	0.981	14.014	70.066	1.496	21.374	65.355
3	0.869	12.418	82.484	0.869	12.418	82.484	1.199	17.129	82.484
4	0.558	7.969	90.454						
5	0.377	5.382	95.836						
6	0.209	2.981	98.817						
7	0.083	1.183	100						

表 5 研究区土壤重金属含量主成分分析成分矩阵

Table 5 Component matrix of principal component analysis of heavy metal concentrations in soil of the study area

重金属	初始因子载荷			旋转后因子载荷		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3
Cu	0.906	-0.187	0.093	0.844	0.382	0.078
Zn	0.832	-0.217	-0.031	0.818	0.242	0.112
Cr	0.908	-0.183	-0.014	0.862	0.305	0.149
Pb	0.622	0.07	0.587	0.387	0.754	-0.134
Cd	0.558	0.683	0.282	0.077	0.788	0.479
Mn	0.789	-0.259	-0.356	0.86	-0.044	0.274
Ni	0.516	0.572	-0.556	0.245	0.083	0.914

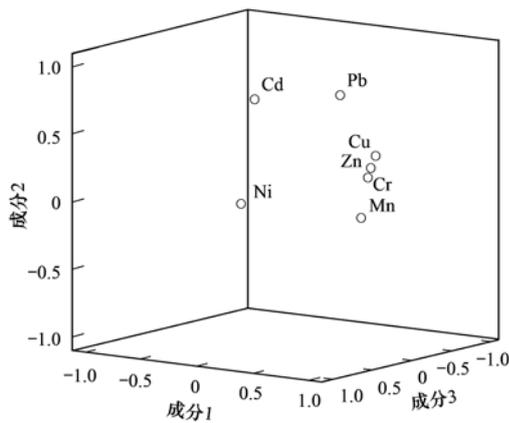


图 4 主成分中重金属载荷

Fig. 4 Heavy metal loads of the principal components

Zn、Cr 和 Mn 之间距离较近,因此相关性较强,进一步说明了 4 种重金属间极有可能来源相同。Pb 和 Cd 之间存在显著相关,从图 4 也可见,Pb 和 Cd 相较其他元素也有密切联系。此外,无论相关分析还是主成分分析,土壤 Ni 与其他 6 种元素关系并不明显,显示出较强烈的异源性。

2.5 土壤重金属来源解析

由以上可知,第一主成分(F1)的贡献率为 56%,其中 Cu、Zn、Cr 和 Mn 具有较高的载荷,F1 可能主要受以上 4 种重金属的影响,且 Cu、Zn、Cr 和 Mn 严重超标,这可能是铝厂在生产过程中产生的废气,受大气沉降等作用,沉降到周围土壤中;该铝厂在化合物生产及副产品和合金加工等都会涉及 Cu、Zn、Cr 和 Mn 等金属配合物和催化剂的使用,这些也是造成该厂区周边土壤重金属含量富集的原因。厂区周边 Cu、Zn、Cr 和 Mn 在空间上的差异较显著,在西南方向明显高于其他 3 个方向,其中 Cu 在西南方向的富集最为明显,含量随采样距离的增加而降低。在铝厂西南方向处有一铜厂,该铜厂排放的废气及生产过程产生的废渣等,也会随风扩散及大气沉降等作用影响铝厂周边土壤中 Cu

的含量。Nicholson 等^[45]对威尔士地区的农业土壤重金属污染的研究表明,其中 38%~48% 的 Cu 来自大气沉降。郑袁明等^[46]在研究北京市不同土壤中 Cu 的含量发现,土壤中 Cu 的浓度除受杀虫剂、除菌剂等农业要素影响外,受工业化等非农业要素的贡献也很大。Zn 和 Mn 作为该铝厂铝制品及合金深加工必不可少的金属元素,其金属配合物及催化剂等材料废渣的倾倒,是造成 Zn 和 Mn 富集的主要原因。Cr 在受测的 7 种元素中超标率最低,但也达到 50%,早期研究认为土壤中 Cr 受人为影响较小^[47],其变化主要受岩石风化和侵蚀的形成有关,但是近几年有学者提出,Cr 除受自然来源外,人为活动的输入对 Cr 的含量也有一定影响^[48]。李晋昌等^[39]在研究汾河水库周边土壤重金属含量中提到,Cr 主要受污水灌溉等因素影响。厂区周边 Cr 超标多集中在铝厂西面,铝厂的排污渠多集中在西面,Cr 含量与该铝厂废水排放有关,与李晋昌等研究相一致。因此成分 1 来源可能受该铝厂及周边工业活动的影响。

第二主成分的贡献率为 13.9%,主要贡献来源于 Pb 和 Cd。Pb 和 Cd 均 100% 超标,且空间分布上并无明显规律,其含量较高的地方都与城市主干道相邻。Pb 常被作为机动车污染源的标志性元素^[49],谢小进等^[13]对上海宝山区农用土壤重金属分布研究发现,Pb 分布高值区主要集中在交通网密集的区域,Pb 的积聚与交通业有密切的关系。董辰寅等^[50]和赵秀峰等^[51]研究中也相似的结论,认为 Pb 的污染来源与道路交通有关。Cd 可能来源于车辆表面电镀层的不断磨损,轮胎的磨损和破裂^[12,50]。主成分 2 来源可能主要与道路交通有关。

第三主成分的贡献率为 12.4%,其主要贡献来源于 Ni(旋转载荷为 0.914)。Ni 与其他元素的相关性均不好,且绝大多数采样点超过内蒙古土壤背景值,但在研究区内分布无论垂直还是水平分布都较

平稳. 土壤中 Ni 主要来源于土壤母质及风化产物累积的重金属^[52]. 陈晓晨等^[53]研究北京土壤时,也认为土壤中 Ni 的主要来源为成土母质. 但是一般自然来源情况下重金属的来源并不会引起重金属含量的超标,本研究中 Ni 的变异系数为弱变异,其受人为干扰程度较其他几种重金属较低,单因素方差分析也表明,Ni 的重金属含量受土层变化影响较小. 造成这种现象的原因可能与土壤背景值得选取有关,本研究的背景值为内蒙古几何土壤平均值,而内蒙古面积较大,土壤母质类型多样,包头市作为北方典型工业城市,内蒙古几何平均值中部分金属元素与包头当地土壤可能会有出入. 第三主成分中 Cd 的载荷也略高,Cd 元素常作为使用农药和化肥等农业活动的标识^[54]. 铝厂周边土壤多农田,且 Ni 在靠近农田的部分采样点高于非农田采样点,Ni 超标可能也与农药和化肥的施用等因素有关. 因此主成分三的重金属来源可能与农业活动和土壤母质等因素有关.

3 结论

(1)研究区土壤重金属 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Ni、Mn 这 7 种重金属含量单因子指数结果表明 Cd 和 Pb 处于重度污染,Cu 和 Ni 处于中度污染,Zn、Cr 和 Mn 处于轻度污染. 其中 Pb 和 Cd 为 100% 超标,Ni、Cu、Zn、Mn 超标率均高于 75%,Cr 最低但也超标 50%. 变异系数反映人为活动对重金属分布的影响,Cu 的变异系数高达 185%,其余元素也都处于中等变异,该厂区周边土壤重金属受人为影响严重.

(2)厂区周边 Cu、Zn、Cr、Pb、Cd、Ni 和 Mn 这 7 种重金属,在西南方向出现富集现象. 垂直分布上,随深度的增加,重金属含量呈现降低的趋势. 在表层(0~5 cm)含量最高,在 20~40 cm 和 40~60 cm 的土层中变化不明显,该区域 20 cm 以下的土壤基本未受到人为的扰动.

(3)通过相关分析及主成分分析,推断 Cu、Zn、Cr 和 Mn 的来源可能受铝厂及周边工业活动的影响;Pb 和 Cd 来源可能主要与道路交通有关;Ni 的主要来源可能受农业活动和土壤母质的共同作用.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Micó C, Recatalá L, Peris M, *et al.* Assessing heavy metal sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariate analysis [J]. *Chemosphere*, 2006, 65(5): 863-872.
- [3] 樊新刚,米文宝,马振宁,等. 宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征[J]. *环境科学*, 2013, 34(5): 1887-1894.
- [4] 任春辉,卢新卫,陈灿灿,等. 宝鸡长青镇铅锌冶炼厂周围灰尘中重金属的空间分布及污染评价[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(3): 706-712.
- [5] 张庆辉,王贵. 包头市农田表层土壤重金属含量综合评价[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(31): 13527-13528, 13546.
- [6] 张庆辉,王贵,朱晋,等. 包头南郊灌灌区农田表层土壤重金属潜在生态风险综合评价[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(7): 181-186, 192.
- [7] 唐力. 包头市常见绿化树种体内与生境土壤中重金属元素含量的相关分析研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.
- [8] 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其评价[J]. *环境科学*, 2011, 32(10): 3009-3105.
- [9] 王贵,丛艳静,曹霞. 包头公园土壤重金属形态分布特征及环境意义[J]. *西北农业学报*, 2007, 16(6): 273-276.
- [10] 王贵,王芳. 重工业城市土壤重金属含量分布特征及污染评价——以包头市为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(8): 170-173.
- [11] 张花娟. 包头市不同功能区土壤重金属分布特征及污染评价[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2015.
- [12] 范拴喜. 土壤重金属污染与控制[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011. 28-44.
- [13] 谢小进,康建成,李卫江,等. 上海宝山区农用土壤重金属分布与来源分析[J]. *环境科学*, 2010, 31(3): 768-774.
- [14] 戴彬,吕建树,战金成,等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2015, 36(2): 507-515.
- [15] 王幼奇,白一茹,王建宇. 引黄灌区不同尺度农田土壤重金属空间分布及污染评价: 以银川市兴庆区为例[J]. *环境科学*, 2014, 35(7): 2714-2720.
- [16] 张海珍,唐宇力,陆骏,等. 西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征[J]. *环境科学*, 2014, 35(4): 1516-1522.
- [17] 钟晓兰,周生路,赵其国,等. 长三角典型区土壤重金属有效态的协同区域化分析、空间相关分析与空间主成分分析[J]. *环境科学*, 2007, 28(12): 2758-2765.
- [18] 陆安祥,王纪华,潘瑜春,等. 小尺度农田土壤中重金属的统计分析与时空分布研究[J]. *环境科学*, 2007, 28(7): 1578-1583.
- [19] 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.
- [20] 石宁宁,丁艳锋,赵秀峰,等. 某农药工业园区周边土壤重金属含量与风险评价[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1835-1843.
- [21] Loska K, Wiechuła D. Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir [J]. *Chemosphere*, 2003, 51(8): 723-733.
- [22] 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.
- [23] 郑娜, 王起超, 刘景双, 等. 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): 2071-2076.
- [24] 柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 等. 上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 599-605.
- [25] 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.
- [26] 彭怀银, 胡彦, 司友斌, 等. 某再生铅工业园周边土壤重金属的空间分布及来源分析[J]. 土壤, 2014, **46**(5): 869-874.
- [27] 夏敏, 赵炳梓, 张佳宝. 基于 GIS 的黄淮海平原典型潮土区土壤重金属积累研究[J]. 土壤学报, 2013, **50**(4): 48-56.
- [28] 阳文锐, 王如松, 黄锦楼, 等. 反距离加权插值法在污染场地评价中的应用[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(9): 2013-2018.
- [29] 赵仁鑫, 郭伟, 包玉英, 等. 内蒙古草原白乃庙铜矿区土壤重金属污染特征研究[J]. 土壤通报, 2012, **43**(2): 496-500.
- [30] 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.
- [31] 张爱星, 聂义宁, 季宏兵, 等. 万庄金矿田土壤重金属的垂直分布及形态研究[J]. 环境科学与技术, 2014, **27**(S2): 1-8.
- [32] Riba I, DelValls 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.
- [33] 郑国璋. 关中娄土剖面中重金属元素的垂直分布规律研究[J]. 地球学报, 2008, **29**(1): 109-115.
- [34] 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.
- [35] 宁晓波, 项文化, 方晰, 等. 贵阳花溪区石灰土林地土壤重金属含量特征及其污染评价[J]. 生态学报, 2009, **29**(4): 2169-2177.
- [36] 柴世伟, 温琰茂, 张云霓, 等. 广州市郊区农业土壤重金属含量特征[J]. 中国环境科学, 2003, **23**(6): 592-596.
- [37] Guo G H, Wu F C, Xie F Z, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in urban soils from southwest China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(3): 410-418.
- [38] 邹曦, 郑志伟, 张志永, 等. 三峡水库小江流域消落区土壤重金属时空分布与来源分析[J]. 水生生态学杂志, 2012, **33**(4): 33-39.
- [39] 李晋昌, 张红, 石伟. 汾河水库周边土壤重金属含量与空间分布[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 116-120.
- [40] 吉冬青, 文雅, 魏建兵, 等. 流溪河流域景观空间特征与河流水质的关联分析[J]. 生态学报, 2015, **35**(2): 246-253.
- [41] Han Y M, Du P X, Cao J J, *et al.* Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **355**(1-3): 176-186.
- [42] Luo W, Wang T Y, Lu Y L, *et al.* Landscape ecology of the Guanting Reservoir, Beijing, China: Multivariate and geostatistical analyses of metals in soils [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **146**(2): 567-576.
- [43] 刘勇, 岳玲玲, 李晋昌. 太原市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(6): 1285-1293.
- [44] 陈学民, 朱阳春, 伏小勇. 天水苹果园土壤重金属富集状况评价及来源分析[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(5): 893-898.
- [45] 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]. *Science of the Total Environment*, 2003, **311**(1-3): 205-219.
- [46] 郑袁明, 陈同斌, 郑国砥, 等. 不同土地利用方式对土壤铜积累的影响: 以北京市为例[J]. 自然资源学报, 2005, **20**(5): 690-696.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 马建华, 谷蕾, 李文军. 连霍高速郑商段路旁土壤重金属积累及潜在风险[J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 894-899.
- [50] 董辰寅, 张卫国, 王冠, 等. 上海宝山区城市土壤铅污染来源的同位素判别[J]. 环境科学, 2012, **33**(3): 754-759.
- [51] 赵秀峰, 王强盛, 石宁宁, 等. 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.
- [52] Bilos C, Colombo J C, Skorupka C N, *et al.* 2001. Sources, distribution and variability of airborne trace metals in La Plata City area, Argentina [J]. *Environmental Pollution*, 2005, **111**(1): 149-158.
- [53] 陈晓晨, 崔岩山. 城市表层土壤中重金属的小尺度空间分布: 以首钢厂区附近小区域为例[J]. 中国科学院研究生院学报, 2010, **27**(2): 176-183.
- [54] 霍霄妮, 李红, 孙丹峰, 等. 北京耕地土壤重金属空间自回归模型及影响因素[J]. 农业工程学报, 2010, **26**(5): 78-82.

CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supramicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration	CHEN Xiao-tong,JIANG Jing-kun,DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (789)
Establishment of Assessment Method for Air Bacteria and Fungi Contamination	ZHANG Hua-ling, YAO Da-jun, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC	HE Xiao-lang, TAN Ji-hua, GUO Song-jun, <i>et al.</i> (801)
Different Air Pollution Situations of O ₃ and PM _{2.5} During Summer in Beijing	WANG Zhan-shan, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (807)
Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013	WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (816)
A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of PM _{2.5} in Shanghai	CHANG Lu-yu, XU Jian-ming, ZHOU Guang-qiang, <i>et al.</i> (825)
Indoor Deposition Flux, Seasonal Variations and Human Exposure Levels of Polybrominated Diphenyl Ethers in Xiamen, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, CHEN Hai-ming, <i>et al.</i> (834)
Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO ₂ /PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor	LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, <i>et al.</i> (847)
Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay	KONG Xiu-jun,ZHANG Peng,YANG Nan-nan, <i>et al.</i> (854)
Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data	DU Cheng-gong, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (862)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	ZHOU Chuan, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (873)
Three-dimensional Fluorescence Spectral Characteristics of Different Molecular Weight Fractionations of Dissolved Organic Matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (884)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section	FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (893)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in Surface Soil in Karst Underground River Basin	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (900)
Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water	WANG Xin-yue, TANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (910)
Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary	YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, <i>et al.</i> (917)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China	XIONG Chun-hui, ZHAGN Rui-lei, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (925)
Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	WANG Yong-yan, WEN An-bang, SHI Zhong-lin, <i>et al.</i> (935)
Pollution Characteristics Analysis and Risk Assessment of Total Mercury and Methylmercury in Aquatic Products of the Haihe Stem River	TONG Yin-dong, ZHANG Wei, DENG Chun-yan, <i>et al.</i> (942)
Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period	HE Li-ping, LIU Dan, YU Zhi-guo, <i>et al.</i> (950)
Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area	LIANG Li, WANG Yong-min, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (955)
Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns	ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, <i>et al.</i> (963)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body	GONG Dan-yan, PAN Yang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (970)
Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland	WANG Jian, LI Huai-zheng, ZHEN Bao-chong, <i>et al.</i> (980)
Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF	ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (988)
Effects of UV Radiation on the Physicochemical Properties and Coagulation Properties of Humic Acid Solution	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (994)
Removal of Sulfate Ions from Aqueous Solution by Adsorption with Hydrotalcite-like Composite	GU Yi-bing, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (1000)
Effects of Fulvic Acid on Adsorption and Form Distribution of Heavy Metals on Sediments	LI Yu-qing, HE Jiang, LÜ Chang-wei, <i>et al.</i> (1008)
Rapid Synthesis of Metal Organic Framework and Its Adsorption Properties on Anionic Dyes	SUN De-shuai, LIU Ya-li, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (1016)
Adsorption Properties of Fluorine onto Fulvic Acid-Bentonite Complex	FANG Dun, TIAN Hua-jing, YE Xin, <i>et al.</i> (1023)
Influence of Three Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Adsorption of Phenanthrene in Purple Soil	XIE Li, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1032)
Adsorptive Stabilization of Soil Cr(VI) Using HDTMA Modified Montmorillonite	JIANG Ting-ting, YU Kai, LUO Qi-shi, <i>et al.</i> (1039)
Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge	WANG Xing-dong, LIN Jing-jiang, LI Zhi-wei, <i>et al.</i> (1048)
Inhibition of Denitrification by Total Phenol Load of Coal Gasification Wastewater	ZHANG Yu-ying, CHEN Xiu-rong, WANG Lu, <i>et al.</i> (1055)
Element Sulfur Autotrophic Denitrification Combined Anaerobic Ammonia Oxidation	ZHOU Jian, HUANG Yong, LIU Xin, <i>et al.</i> (1061)
Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature	DUAN Zheng-hua, PAN Liu-ming, CHEN Xiao-ou, <i>et al.</i> (1070)
Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria	SUN Hong-wei, LÜ Xin-tao, WEI Xue-fen, <i>et al.</i> (1075)
Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of the Hypothermia Aerobic Denitrification Bacterium: <i>Arthrobacter arilaitensis</i>	HE Teng-xia, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1082)
Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (1089)
Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie (1098)
Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices	ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i> (1106)
Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration	ZHOU Quan, WANG Long-chang, XIONG Ying, <i>et al.</i> (1114)
Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration	FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1121)
C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau	ZHANG Hai-dong, RU Hai-li, JIAO Feng, <i>et al.</i> (1128)
Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou	ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (1139)
Mixture Leaching Remediation Technology of Arsenic Contaminated Soil	CHEN Xun-feng, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (1147)
Performance of Electricity Generation and Feasibility of Discontinuous Power Supply of MFC by Using Pretreated Excess Sludge as Fuel	ZHAO Yan-hui, ZHAO Yang-guo, GUO Liang (1156)
Correlation of Persistent Free Radicals, PCDD/Fs and Metals in Waste Incineration Fly Ash	WANG Tian-jiao, CHEN Tong, ZHAN Ming-xiu, <i>et al.</i> (1163)
Effects of Eliminating Backward Production Capacities on Reduction of Dioxin Emissions in Key Industries	GENG Jing, LÜ Yong-long, REN Bing-nan, <i>et al.</i> (1171)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年3月15日 第37卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 3 Mar. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行