

## 合肥市大兴镇水稻根际土重金属积累

王俊涛, 周涛发, 李湘凌, 袁峰, 陶春军, 邢怀学, 张颖慧

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**通过对合肥市周边中心城镇大兴镇的标准农田的调查研究,发现土壤中 As、Cd、Cr、Pb、Cu、Zn、Ni 几何均值基本位于背景值附近,土壤 Hg 质量比全部超过背景值,其质量比的几何平均值(0.067 mg/kg)为背景值(0.030 6 mg/kg)的 2.2 倍,重金属 Hg、Cr、Pb、Cu 都存在着积累现象(超过基线值),但污染程度相对较轻,超标率都为 3.33%;其他元素没有发现污染问题。研究结果表明,本区土壤重金属的累积只是由于农业生产活动的原因而有所增加,Hg、Cd 是该区土壤中需要优先控制的重金属。

**关键词:**根际土; 重金属; 基线值; 相关分析; 主成分分析

**中图分类号:**X142 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-5060(2008)04-0499-05

### Accumulation of heavy metals in the root zone of the rice plant from Daxing Town, Hefei City

WANG Jun-tao, ZHOU Tao-fa, LI Xiang-ling, YUAN Feng,  
TAO Chun-jun, XING Huai-xue, ZHANG Ying-hui

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** To identify the pollution risks, 30 samples of root-zone soil were collected from the standard farmland in Daxing Town, Hefei City. The results indicate that the geometric means of As, Cd, Cr, Pb, Cu, Zn and Ni are basically around background levels. The concentration of mercury exceeded its background concentration(0.030 6 mg/kg), and its geometric mean which was 0.067 mg/kg is 2.2 times higher than its background concentration. Meanwhile, only 3.33% of soil samples had higher concentrations than the baselines of Hg, Cr, Pb and Cu, respectively. No obvious accumulations of other heavy metals in the soil were observed in the study area. It can be concluded that the human factor is an important factor of the accumulation of heavy metals in the root-zone soil. Consequently, Hg and Cd, which are the priorities of the pollutants, should be frequently monitored and closely regulated in the Daxing standard farmland in Hefei City.

**Key words:** root-zone soil; heavy metal; baseline; correlation analysis; principal component analysis

重金属是土壤环境中一类具有潜在危害的污染物,土壤一旦遭受重金属污染,就难以在短时间内除去。在农业生态环境中,土壤是连接有机与无机界的重要枢纽,重金属元素可以通过土壤积累于农作物体内,再通过食物链进入人体,给人体健康带来潜在的危害<sup>[1-4]</sup>。

改革开放以来,合肥市城市化和工业化发展迅速,但经济的巨大发展也带来了农业土壤的严重污染。这一环境问题在我国经济发展较快的区域具有一定的代表性。通过对合肥市周边城镇农作物根际土壤重金属质量比特征的研究,可以探讨城市化对城郊农业土壤的污染影响。

收稿日期:2007-04-17;修改日期:2007-05-18

基金项目:中国地质调查局国土资源大调查项目(JH2005-3);安徽省优秀青年科技基金资助项目(04045063)

作者简介:王俊涛(1983-),男,湖北天门人,合肥工业大学硕士生;

周涛发(1964-),男,安徽庐江人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师;

袁峰(1971-),男,广西桂林人,博士,合肥工业大学教授,硕士生导师。

本研究选择合肥市周边中心城镇大兴镇标准农田中的水稻根际土为研究对象,在水稻生长成熟时期采样测定土壤中重金属元素的质量比,通过基线值重点分析了大兴地区根际土重金属的污染情况,通过相关分析与主成分分析研究了各个元素间的相关关系,同时也分析了各元素空间分布特征,并讨论了重金属污染源。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 样品采集

调查区域为合肥市大兴镇。该调查区以种植水稻和油菜为主,调查中选择根际土作为主要研究对象。在 2005 年 9 月中旬水稻收割时进行采样,采样时用 GPS 定位,以水平剖面为基准,向两侧各处外推 500 m,以 1 km<sup>2</sup> 为 1 个研究单元,选择 3 个研究单元,选择研究单元时考虑土壤类型、元素质量比高低等情况。每个单元内选取有代表性的采样区布置取样样方,每个单元采取根际土 10 件(0~20 cm),共 30 个土样。其中采样方中所有根际土壤混匀后作为 1 个子样,各子样根际土混匀后,以四分法取样,样品干燥后过 20 目筛质量大于 800 g。

### 1.2 样品的处理与测定

在实验室内将水稻土样品自然晾干并储存 30 d 后,采用物理方法加工,先将土样粉碎,然后称取过 200 目筛土样约 50 g,在国土资源部合肥矿产资源监督检测中心测定重金属质量比。

### 1.3 数据处理与计算方法

在进行统计分析前,所有分析数据均进行正态分布检验。正态分布检验用 MATLAB 软件完成。相关分析、主成分分析以及方差分析用 SPSS 软件完成。

## 2 结 果

### 2.1 根际土重金属质量比特征

大兴根际土壤重金属质量比见表 1 所列。通过几何均值比较发现,土壤 As、Cd、Cr、Pb、Cu、Zn、Ni 几何均值均位于背景值附近,Hg 由于质量比较大,其几何均值偏离背景值;其中土壤 Pb、Cu 和 Zn 的质量比与其背景值没有显著差别( $P < 0.01$ ),土壤 Hg 质量比与背景值的差别最为明显,全部超过背景值,且最高值达到背景值的 4 倍左右。不同样点的 Cd 和 As 质量比变异范围较大,分布不均匀。

表 1 大兴地区水稻根际土重金属质量比的统计

元素	重金属质量比				安徽土壤背景值 <sup>[5]</sup>	大兴根际土重金属基线值	大兴地区土壤重金属超标率/(%)
	最大值	最小值	几何平均值	几何标准差			
As	12.800	4.300	8.442	1.272	10.000	13.661	0
Hg	0.133	0.043	0.067	1.337	0.030 6	0.119	3.33
Cd	0.238	0.084	0.136	1.328	0.090 0	0.239	0
Cr	98.900	51.400	65.647	1.128	69.000	83.512	3.33
Pb	36.300	23.500	28.523	1.111	26.000	35.230	3.33
Cu	39.000	20.200	25.179	1.150	25.000	33.315	3.33
Zn	79.000	47.300	60.781	1.170	52.000	83.209	0
Ni	29.400	13.600	20.700	1.221	25.000	30.851	0

土壤基线值可以作为判断土壤是否受到污染的一项重要参考标准<sup>[6,7]</sup>。在评价土壤污染状况时,选择其背景值作为参考,得到的重金属污染信息难以反映真实的污染状况,在研究特定地区的土壤环境污染和生态风险时,应以该地区的土壤基线值作为污染评价的参考值,从而确保获得的污染信息符合实际情况<sup>[8]</sup>。如果土壤重金属的背景值服从对数正态分布,则基线值为几何平均值与几何标准差平方的乘积<sup>[6,9]</sup>。根据合肥市江淮分水岭地区全区及各市、县表层土壤背景平均值,

本研究通过几何平均值与几何标准差平方的乘积计算出大兴镇 8 种重金属的基线值,列于表 1。以此为标准进行比较,发现土壤中 Hg、Cr、Pb、Cu 这 4 种重金属出现部分超标,但超标率较低,都为 3.33%,呈现一定的污染现象,这 4 种重金属最大值与其基线值差别都不大,但几何平均值与其基线值相差较大。As、Cd、Zn、Ni 没有超标现象。

### 2.2 重金属元素相关分析与主成分分析

运用 SPSS 软件对合肥市大兴镇水稻土中的 8 种重金属进行相关分析发现,As 与 Cd 负相关;

Cu 与 Cd、As 显著正相关, Pb 与 Cd、Hg、As、Cu 等达到显著正相关<sup>[6]</sup>, 见表 2 所列。

主成分分析与因子分析作为一种统计分析方法, 可用来辅助数据分析, 以便进一步对数据进行详细解释, 例如对于污染源的确定以及自然和人

为因素对土壤中重金属元素的贡献等<sup>[10]</sup>。对 8 种重金属进行主成分分析, 结果见表 3、表 4 所列。由表 3 可见, Cu、Cr、Ni、As 在主成分 1(F1) 中显示出较高的因子负荷, Cd、Pb、Zn 在主成分 2(F2) 中表现出较高的因子负荷。

表 2 合肥市大兴镇水稻土重金属质量比的相关系数

	Cd	Hg	As	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni
Cd	1	0.113	-0.027	0.461*	0.469**	0.617**	0.375*	0.080
Hg		1	0.314	0.323	0.534**	0.437*	0.245	0.406*
As			1	0.547**	0.375*	0.334	0.777**	0.427*
Cu				1	0.765**	0.810**	0.891**	0.435*
Pb					1	0.772**	0.589**	0.373*
Zn						1	0.644**	0.592**
Cr							1	0.438*
Ni								1

注: \* P<0.05; \*\* P<0.01。

由表 4 可知, 经过矩阵变换后, F1 中包含 As、Cr、Cu、Ni 和部分的 Hg, F2 中包含 Cd、Zn、Pb 和部分 Cu。各重金属的空间载荷图, 如图 1 所示。图 1 清晰地印证了主成分分析的结果。

表 3 水稻土重金属质量比的主成分矩阵分析

	F1	F2
Cd	-0.119	0.908
Hg	0.522	0.225
As	0.890	-0.034
Cu	0.639	0.662
Pb	0.492	0.711
Zn	0.485	0.799
Cr	0.759	0.448
Ni	0.697	0.157

表 4 水稻土重金属质量比的主成分旋转矩阵分析

	F1	F2
Cd	0.518	-0.755
Hg	0.539	0.181
As	0.640	0.620
Cu	0.918	-0.066
Pb	0.841	-0.200
Zn	0.894	-0.270
Cr	0.865	0.174
Ni	0.624	0.349

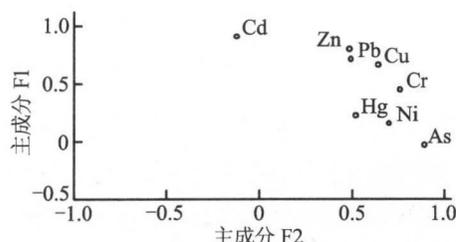


图 1 合肥市大兴镇水稻土重金属质量比的主成分载荷图

### 3 讨 论

#### 3.1 水稻根际土的污染状况

通过与安徽地区背景值<sup>[5]</sup>的比较, 大兴水稻根际土 8 种重金属的累积都有部分质量比超过区域背景值, 其中 Cd 的质量比大部分超过背景值, Hg 的质量比全部超过背景值, 但是依据土壤基线值, 只有重金属 Hg、Cr、Pb、Cu 这 4 种超标, 且超标率都很低。一般认为, 土壤中的 Pb 主要来自汽车尾气和冶炼厂<sup>[11]</sup>, 而含 Pb 汽油的燃烧是城市和公路两侧农田中 Pb 污染的主要来源。由于猪饲料中常添加 Hg、Pb 等元素, 有研究表明, 利用猪粪等也可能造成 Hg、Pb 等的污染。值得一提的是, 我国曾大量使用磷酸铅及其他含铅农药, 也可能造成土壤中 Pb 的累积<sup>[12]</sup>。此外, 大量使用的波尔多液等农药以及无机肥料中都含有 Cu 元素, 也是造成土壤中 Cu 质量比升高的主要原因<sup>[12]</sup>。由于本研究各土样都是围绕着企业周边采集的, 土壤中重金属的累积主要影响因素为

周边企业、农业生产活动和母质条件。依据以上的标准,合肥市大兴镇水稻土尚未受到周边企业的影响,重金属的累积可能只是由于农业生产活动的原因而有所增加。

### 3.2 污染变量之间的关系及污染物在样点间的空间分布

利用 SPSS 软件对这 8 个环境变量进行相关

分析,结果表明大部分环境变量间存在着显著的相关性。对相关矩阵进行特征向量提取,结果见表 5 所列。

由表 5 可见,主成分 1(F1)和主成分 2(F2)的累积贡献率达到 76.386%,说明 2 个独立的主成分变量就可以反映 8 个原始环境变量的绝大部分信息。

表 5 合肥市大兴镇水稻土重金属质量比的主成分分析

成分	初始特征值			提取后特征值			变换后特征值		
	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	4.454	60.674	60.674	4.454	60.674	60.674	3.027	42.838	37.838
2	1.257	15.712	76.386	1.257	20.712	76.386	2.684	33.548	76.386
3	0.983	7.283	83.669						
4	0.632	7.895	91.564						
5	0.360	4.506	96.069						
6	0.185	2.314	98.384						
7	0.104	1.305	99.688						
8	0.025	0.312	100.000						

F1 和 F2 的空间载荷图(图 1)列出了 8 个环境变量整体的相对关系以及主成分之间的关系。2 个变量间的距离越近表示 2 个变量间的相关性越高。环境变量在主成分轴上的投影大小代表了该环境变量与主成分的关系。投影越长,在主成分中的贡献率越高<sup>[13]</sup>。由表 5 和图 1 分析可见,主成分 F1 贡献了方差的 60.674%,依次与 As、Cr、Ni、Cu 显著相关,其次与 Hg、Pb、Zn 相关,其中 Zn、Pb 和 Cu 间存在着紧密的相关性;主成分 F2 贡献了方差的 15.714%,与 Cd 相关。F1 反映了污染变量的信息,而 F2 则代表了非污染变量的信息。因此,Cu 和 Zn 二者显著相关,且共同负担因子 F2,说明土壤中部分 Cu、Zn 具有共同来源,例如畜禽粪便的使用<sup>[14]</sup>。水稻土中的 Cr、Ni 之间呈显著相关(表 2),且都在主成分 F1 中贡献率较大。有研究表明,影响土壤中 Cr、Ni 质量比的主要因素是土壤母质<sup>[9]</sup>。

综合以上分析可以看出,影响大兴镇水稻土壤重金属的因素主要有成土母质和农业生产活动等,重金属之间的相关特征是土壤母质与人类活动等综合作用的结果<sup>[14,15]</sup>。

## 4 结 论

(1) 大兴镇水稻土中重金属的质量比,Cd 大

部分超过背景值,Hg 全部超过背景值,从土壤重金属污染风险的角度来看,本区需要优先控制重金属 Hg、Cd。

(2) 以基线值为参考标准,大兴镇土壤重金属总体污染程度较轻,除了 Hg、Cr、Pb、Cu 4 种重金属有少量的超标和轻微的污染以外,其他重金属没有超标。

(3) 根据相关分析与主成分分析,水稻土 Cu、Zn 之间密切相关,且主要受人为因素的影响。

致谢:本研究过程中,得到安徽省地质调查院赵和仓、陈永宁、陈富荣、贾十军等的指导和帮助,特此致谢!

## [参 考 文 献]

- [1] 陈怀满. 土壤-植物系统中的重金属污染[M]. 北京:科学出版社,1994:1-10.
- [2] Yarlalagadda P. Characteristics of heavy metals in contaminated soil [J]. J Environ,1995,121(4):276-286.
- [3] Yoko F. Vertical distributions of trace metals in natural soil horizons from Japan, Part 1: effect of soil types [J]. Water Air Soil Pollut,2001,124(1/2):1-21.

(下转第 506 页)

表 4 有、无石灰预处理时渗透液出水水质比较 mg/L

水质参数	原水	直接微滤	混凝-微滤*
$\rho_{\text{COD}_{\text{Cr}}}$	420.3	54.1	49.6
$\rho_{\text{PO}_4^{3-}}$	104.72	93.25	0.36
$\rho_{\text{Ca}^{2+}}$	34.88	23.65	1.97
$\rho_{\text{Mg}^{2+}}$	15.95	14.26	0.21

注: \* 石灰用量为 680 mg/L。

### 3 结束语

在微滤处理高浓度含磷废水时采用石灰作为预处理剂,既软化了水质又降低了磷酸盐含量,磷酸盐的去除率从直接微滤的 11.0% 提高到 99.7%,处理出水能够达标排放。研究表明,适宜的石灰投加量为 680 mg/L,此时水的硬度最低,微滤膜的渗透通量提高了 60%。过量投加会使水的硬度提高,降低微滤膜的渗透通量。

### [参 考 文 献]

- [1] Billy R A. 环境化学[M]. 柳大志,译. 北京:化学工业出版社, 1987: 6-40.
- [2] 王九思,陈学民,肖举强,等. 水处理化学[M]. 北京:化学工业出版社, 2002: 50-87.
- [3] 张进,孙宇新,董强,等. 混凝对微滤膜处理含磷废水的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(6): 1098-1102.
- [4] Eckenfelder W W. 工业水污染控制[M]. 陈忠明,译. 北京:化学工业出版社, 2004: 80-139.
- [5] 凯纳兹 T M. 水的物理化学处理[M]. 李维音,译. 北京:清华大学出版社, 1982: 79-80.
- [6] Hammer M J. Water and wastewater technology [M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 1986:179-231.
- [7] 唐受印,戴友芝,汪大群,等. 废水处理工程[M]. 北京:化学工业出版社, 2004: 62-86.
- [8] Zhang Jin, Sun Yuxin, Chang Qibing, et al. Improvement of crossflow microfiltration performances for treatment of phosphorus-containing wastewater [J]. Desalination, 2006, 194: 182-191.
- [9] Kim S H, Moon S Y, Yoon C H, et al. Role of coagulation in membrane filtration of wastewater for reuse [J]. Desalination, 2005, 173: 301-307.
- [10] Peuchot M M, Aim R B. Improvement of crossflow microfiltration performances with flocculation [J]. J Membr Sci, 1992, 68: 241-248.
- [11] Yildiz E, Nuhoglu A, Keskinler B, et al. Water softening in a crossflow membrane reactor [J]. Desalination, 2003, 159: 139-152.
- [1] Billy R A. 环境化学[M]. 柳大志,译. 北京:化学工业出版社, 1987: 6-40.
- [2] 王九思,陈学民,肖举强,等. 水处理化学[M]. 北京:化学工业出版社, 2002: 50-87.
- [4] 张乃明. 土壤-植物系统重金属污染研究现状与展望[J]. 环境科学进展, 1999, 7(4): 30-33.
- [5] 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: 329-482.
- [6] Chen M, Ma L Q, Harns W G. Baseline concentrations of 15 trace elements in Florida surface soils [J]. Journal of Environmental Quality, 1999, 28: 1173-1181.
- [7] Chen M, Ma L Q, Hoogeweg C G, et al. Arsenic background concentration in Florida, USA surface soil; determination and interpretation [J]. Environmental Forensics, 2001, 2: 117-126.
- [8] 宣昊,滕彦国,倪师军,等. 基于地球化学基线的土壤重金属污染潜在生态风险评价[J]. 矿物岩石, 2005, 25(4): 69-72.
- [9] 夏增禄,李森照,李廷芳,等. 土壤背景值及其研究方法[M]. 北京:气象出版社, 1987: 4.
- [10] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils [J]. Environmental Pollution, 2001, 114: 313-324.
- [11] 阎伍玖,吕成文,陈飞星. 芜湖城市郊区土壤重金属污染危害及其对策研究[J]. 土壤学报, 2002, 37(1): 137-141.
- [12] 王国梁,周生路,赵其国,等. 菜地土壤剖面上重金属元素含量随时间的变化规律研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 79-84.
- [13] Thioulouse J, Chessel D, Doleadec S, et al. ADE-4: a multivariate analysis and graphical display software[J]. Statistics and Computing, 1997, 7: 75-83.
- [14] Nicholson F A, Smith S A, 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.
- [15] Pierce F J, Dowdy R H, Grigal D F. Concentrations of six trace metals in some major Minnesota soil series[J]. Journal of Environmental Quality 1982, 11: 412-416.

(责任编辑 张淑艳)

(责任编辑 张淑艳)

### (上接第 502 页)