

杨 军,郑袁明,陈同斌,等.北京市凉凤灌区土壤重金属的积累及其变化趋势[J].环境科学学报,2005,25(9):1175-1181

YANG Jun, ZHENG Yuanming, CHEN Tongbin, *et al.* Accumulation and temporal variation of heavy metals in the soils from the Liangfeng Irrigated Area, Beijing City[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(9): 1175 - 1181

[免审稿件]责任编辑提示:本刊欢迎广大读者针对免审稿件提出各种意见

北京市凉凤灌区土壤重金属的积累及其变化趋势

杨 军^{1,2},郑袁明¹,陈同斌^{1,*},黄泽春¹,罗金发¹,刘洪禄³,吴文勇³,陈玉成²

1. 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心,北京 100101

2. 西南农业大学资源与环境学院,重庆 400716

3. 北京市水利科学研究所,北京 100044

收稿日期:2005-02-04 修回日期:2005-04-30 录用日期:2005-05-08

摘要:通过对典型污灌区——北京市凉凤灌区的详细调查发现:灌区土壤中 Hg、Pb、Cu、Cr、As、Ni、Zn 显著高于背景值,其中 Hg 污染严重,其含量的几何平均值($0.147 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)为北京市土壤 Hg 背景值($0.0576 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的 2.5 倍。除 Cd、Ni 外,其它 5 种重金属都存在不同程度的积累现象(超过基线值),Hg 的超标率(超过基线值)高达 34.5%;Pb、Cu 次之,超标率分别为 8.86%、8.33%;Zn、Cr、As 污染相对较轻一些,超标率为 2.41%、1.20%、1.19%;没有发现 Cd、Ni 污染问题。与 20 世纪 70 年代中期的调查结果比较发现,经过近 30 年后,该地区的土壤 Hg、Pb、Cu、As 含量分别增加了 11.4%、40%、26%、9.0%。结果表明,污水灌溉是导致土壤重金属积累的重要原因之一,Hg、Pb 是该灌区土壤中需要优先控制的重金属。

关键词:土壤;重金属;污水灌溉;北京;污染;积累

文章编号:0253-2468(2005)09-1175-07 中图分类号:X 53 文献标识码:

Accumulation and temporal variation of heavy metals in the soils from the Liangfeng Irrigated Area, Beijing City

YANG Jun^{1,2}, ZHENG Yuanming¹, CHEN Tongbin^{1,*}, HUANG Zechun¹, LUO Jinfa¹, LIU Honglu³, WU Wenyong³, CHEN Yucheng²

1. Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

2. School of Environment and Resources, Southwest Agricultural University, Chongqing 400716

3. Beijing Institute of Water Resource, Beijing 100044

Received 4 February 2005; received in revised form 30 April 2005; accepted 8 May 2005

Abstract: To identify the pollution risks associated with wastewater irrigation, 84 samples of surface soils (0—20 cm) were collected from the Liangfeng Irrigated Area in Beijing. The results indicated that the concentrations of Hg, Pb, Cu, Cr, As, and Zn were significantly higher than background levels. Mercury had the highest levels of accumulation with a geometric mean ($0.147 \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1}$) of 1.6 times higher than its background concentration ($0.0576 \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1}$). Meanwhile, levels of Cd and Ni were not significantly different from the respective background concentration. Moreover, 34.5% of soil samples had higher concentrations of Hg (compared to the baseline), while 8.86% and 8.33% of the samples had higher concentrations than baseline of Pb and Cu, respectively. Only 2.41%, 1.20%, and 1.19% of the soil samples had greater concentrations than baseline of Zn, Cr, and As, respectively. No obvious accumulations of Cd or Ni in the irrigated soils were observed in the studied area. Compared with the results investigated in the 1970s, the concentrations of Hg, Pb, Cu, and As increased 11.36%, 40%, 26%, and 9.0%, respectively. Based on the distance of the sampling sites from the Liangshui river, three transects were divided to distinguish the relation between the concentrations of heavy metals and different transects. It was found that the concentrations of heavy metals in these soil samples, especially Hg, Pb, Cu, and As, declined with the increase of distance from the Liangshui River. It can be concluded that wastewater irrigation is an important factor of the obvious accumulation of heavy metals in the irrigated soils, especially Hg, Pb, and Cu. Consequently, Hg and Pb, which are the priority pollutants, should be frequently monitored and closely regulated in the wastewater-irrigated soils in Beijing City.

Keywords: Accumulation; Beijing City; heavy metal; risk assessment; soil; wastewater irrigation

基金项目:国家杰出青年基金项目(No. 40325003);北京市重大科技攻关项目(No. H030730040330)

作者简介:杨 军(1979—),男,博士研究生;*通讯作者(责任作者),E-mail:chentb@igsnrr.ac.cn

Foundation item: National Science Fund of China for Distinguished Young Scholars (No. 40325003); Key Scientific Project of Beijing (No. H030730040330)

Biography: YANG Jun (1979—), male, Ph.D. candidate; * Corresponding author, E-mail: chentb@igsnrr.ac.cn

中国是一个水资源相对缺乏的国家(水利电力部水文局,1987),农业灌溉用水占全国用水总量的65.6%以上(中国科学院自然资源综合考察委员会,1990),因而水资源短缺问题在农业生产中尤为突出.随着中国经济的迅速发展,部分地区由于富营养化等水体污染问题而导致水质型缺水,更加剧了水资源紧张.污水灌溉能够在一定程度上缓解用水的供需矛盾,但是由于部分生活及工业污水中含有一定量的重金属或有机污染物(Bansal,1998;Aleem *et al.*,2003),如果用污水进行灌溉有可能造成有毒污染物在土壤和作物中的积累(Adriano *et al.*,1998;Cameron *et al.*,1997;Anikwe *et al.*,2002;Möller *et al.*,2005).已经有一些学者对天津、保定、兰州等工业城市的污灌区进行过调查(张勇,2001;张乃明等,1996;龚钟明等,2002;谢建治等,2002;韩冰,1999),但这些早期的调查工作取样点都不多,大多是一些比较零散的抽样调查结果.如:研究发现,由于长期使用工业和生活混合污水进行灌溉,沈阳张士污灌区土壤Cd、Pb、Hg污染比较严重(张勇,2001).实际上,污灌问题涉及的因素较多,与当地的气候、土壤、农业和经济条件和工业化水平都有关系.因此,对于污灌导致土壤重金属的积累情况各地不能一概而论.尽管目前学术界普遍认为污灌会导致土壤污染,但国内关于污灌对土壤重金属积累的影响仍缺乏系统的研究.

北京是一个具有悠久历史的超大规模城市,其污灌历史相对较长.20世纪70年代,曾对北京市东南郊以及西郊进行了水、土、植物等方面的污染问题进行了抽样调查.但是,调查中的采样点较少(凉水河中下段仅设12个样点)¹⁾.1995年,王学军等对通惠河灌区农田土壤的重金属污染状况进行了小尺度(面积为0.5 km²)的空间分异研究(王学军等,1997).这些工作为了解北京市污灌区的重金属问题提供了许多有益的信息.但是,到目前为止,对北京市大范围的污灌区土壤重金属积累的情况仍缺乏系统、全面的研究,对其土壤重金属积累的动态变化情况至今仍缺乏了解.近年来,随着环境保护措施的不断完善和环保技术水平的不断提高,污水中的重金属水平已经发生明显变化.污灌对土壤重金属积累的动态影响究竟如何目前仍有待研究.尤其是目前

北京市等缺水城市拟开展大规模的中水回用,故深入研究污灌对土壤重金属积累的影响,对于评估中水回用的环境风险也有一定的参考价值.

北京的污水灌溉区主要集中在东南郊和通州区.由于北京市快速的城市化过程,原来的东南郊及东郊污灌农田已经改变为城市建设用地,因此,本研究选取北京市另一个典型污灌区——凉水河及凤港河污灌区,进行污灌区土壤重金属积累的系统研究.通过对不同污水灌溉渠附近土壤重金属积累程度的比较,分析土壤重金属含量与灌区水源的关系,从区域尺度上探索污染物的来源;并通过对前人研究的结果²⁾进行对比,分析近30年来土壤重金属含量的变化趋势,以便为污水灌溉的环境风险评估提供参考依据.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 研究区域概况

研究区域(凉水河及凤港河污灌区)位于北京市西南,属大陆性季风气候,受季风影响,春季干旱多风,年降水量约620 mm.主要土壤类型为褐潮土、砂姜潮土,以及一些零星分布的湿潮土、盐潮土.农作物类型以玉米、小麦为主.

研究区域从20世纪60年代初开始进行污灌,主要引凉水河(北京市第二排污河)及凤港河的污水灌溉农田(以下称凉凤灌区).高碑店污水处理厂出水经通惠北干渠进入凉水河,是凉水河的主要污染源之一.凤港河是1961年开挖的人工河,主要用于除涝防碱,将凉水河以南和凤港河以北近223 km²面积的沥水导入北运河,缓解京津边界地区的排水矛盾³⁾.

1.2 采样方法

为调查不同灌溉水源对土壤重金属积累的影响,在研究区内由北向南分别设置3个取样带:凉水河灌溉区、中间过渡带、凤港河灌溉区(图1).在2条河流南北两岸分别设置1.5 km缓冲区,此范围内的样点为各自灌溉带内的调查点.3条样带内按照均匀布点原则进行采样.采样时从10 m × 10 m正方形的4个顶点各取表层(0~20 cm)土壤约1 kg组成混合样品,共采集土壤样品84个.

1) 北京东南郊环境污染调查及其防治途径研究协作组. 北京东南郊环境污染调查及防治途径研究(报告集),1980:620

2) 北京东南郊环境污染调查及其防治途径研究协作组. 北京东南郊环境污染调查及防治途径研究(报告集),1980:617—667

3) 北京市通县水利志编辑委员会. 北京市区县水利志丛书:通县水利志. 1993:16—47

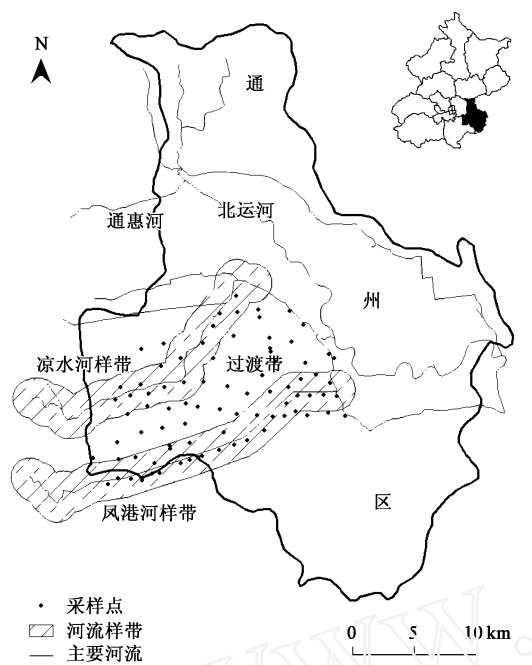


图1 北京市凉凤灌区土壤重金属污染调查样点分布图

Fig.1 Soil sampling sites of heavy metal investigation in Liangfeng Irrigated Area , Beijing City

1.3 样品分析及测定

土壤样品风干后过 100 目尼龙筛,用 HNO₃-H₂O₂ 法 (USEPA Method 3050B) (USEPA,1996) 消煮后测定 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 浓度;硝酸-盐酸混合液(体积比 1 1)于沸水浴中消煮 2 h 后用于测定土壤中的 Hg(Macleod,1999).消煮液中 Cd 含量用石墨炉-原子吸收光谱法(AAS Vario 6)测定;Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 含量用火焰-原子吸收光谱法测定;As、Hg 含量用氢化物发生-原子荧光法(AFS-2202)测定.分析过程所用试剂均为优级纯.分析过程中加入国家标准土壤样品(GSS-1、GSS-2)进行分析质量控制,各种重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

全部数据采用 Grubbs 法进行异常值剔除.原始数据经对数转换后符合正态分布 ($P < 0.05$).相关分析、主成分分析以及方差分析用 SPSS 完成,正态分布检验用 Origin Pro 完成.

2 结果(Results)

2.1 灌区土壤的重金属含量特征

凉凤灌区土壤重金属含量如表 1 所示.通过均值比较发现,土壤 As、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 含量均显著高于背景值 ($P < 0.01$),土壤 Cd 含量与背景值没有显著差别.其中,土壤 Hg 含量与背景值的差别最为明显,其平均值为背景值的 2.5 倍,最高达到背景值的 10 倍左右.不同样点的土壤 Cd、Hg 含量变异范围较大,分布很不均匀.

土壤基线值 (baseline) 可以作为判断土壤是否受到污染的一项重要参考标准 (Chen *et al.*,1999,2001).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 (Chen *et al.*,1999;夏增禄等,1987).根据陈同斌等 (2004) 的研究结果和《中国土壤元素背景值》(中国环境监测总站,1990),本研究通过几何平均值与几何标准差平方的乘积计算出北京市 8 种重金属的基线值 (表 1).以此为标准进行比较,在本研究中土壤 Hg 的超标率最高,达到 34.5%,远远高于其它几种重金属,其几何平均值与基线值相当接近,最大值达到基线值的 3 倍;Cu 和 Pb 的超标率分别为 8.86% 和 8.33%,呈现一定程度的污染现象;Zn、Cr、As 的超标率较低,分别为 2.41%、1.20%、1.19%,但最大值与基线值差别不大;Cd 和 Ni 没有发现超标现象.

表 1 北京市凉凤灌区土壤重金属含量的统计

Table 1 Basic statistics of heavy metal concentrations in the soils from Liangfeng Irrigated Area in Beijing City

元素 Element	重金属含量 Heavy metal concentrations/(mg kg ⁻¹)				北京市土壤背景值 ¹⁾ Background concentration of Beijing soil /(mg kg ⁻¹)	北京市土壤重 金属基线值 Baseline of Beijing soil/(mg kg ⁻¹)	研究区土壤重 金属超标率 Percentage of soil samples beyond the baseline
	最小值 Min.	最大值 Max.	几何平均值 Geom. M.	几何标准差 Geom. S. D			
As	5.71	14.7	8.12 ^{*,2)}	1.22	7.09	14.3	1.19 %
Cd	0.043	0.347	0.115	1.46	0.119	0.391	0
Cr	30.9	56.2	41.3 ^{**}	1.13	29.8	54.3	1.20 %
Cu	15.5	50.0	25.2 ^{**}	1.26	18.7	37.1	8.86 %
Hg	0.035	0.525	0.147 ^{**}	1.69	0.0576	0.176	34.5 %
Ni	21.0	41.3	28.2 ^{**}	1.14	26.8	48.1	0
Pb	14.1	53.9	30.8 ^{**}	1.23	24.6	40.3	8.33 %
Zn	49.6	97.4	65.5 ^{**}	1.17	57.5	97.2	2.41 %

1) 土壤 Hg 背景值引自中国环境监测总站的资料(1990);其余元素土壤背景值引自陈同斌等(2004)

2) ** 表示该元素与北京市的土壤背景值存在极显著差异 ($P < 0.01$)

2.2 相关分析及主成分分析

相关分析可以用来检验成对数据之间的相似性 (Chen *et al.*, 1999). 对污灌区土壤中 8 种重金属进行偏相关分析发现, Cu 与 Zn, As、Cr 与 Ni, Hg 与 Cd、Cr、Pb、Zn 达到显著正相关; 而 Hg 与 Ni、Cu 为显著负相关 (表 2).

主成分分析作为一种用来辅助数据分析的统计方法, 可进一步对数据进行详细解释, 例如污染来源的确定以及自然和人为因素对土壤元素的贡献等 (Facchinelli, 2001). 对 8 种重金属进行主成分分析发现, 在因子的初始矩阵中, As、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 在因子 1 (F1) 中显示出较高的因子负荷, Cd、Hg 在因子 2 (F2), Cu、Cd 在因子 3 (F3), Cd 在因子 4 (F4) 中分别表现出较高的值, 并无明显的规律 (表 3).

经过矩阵变换后, F1 包含 As、Cr、Ni、Pb、Zn 以及部分的 Cu, F2 包含 Hg, F3 包含 Cu、Zn, F4 包含 Cd (表 4).

表 2 北京市凉水灌区土壤重金属含量的偏相关系数

Table 2 Partial correlations between heavy metal concentrations in the soils from Liangfeng Irrigated Area in Beijing City

	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
As	1.00	-0.05	-0.11	0.19	0.64**	0.16	0.11	0.05
Cd		1.00	-0.09	0.12	0.10	-0.09	0.01	0.24*
Cr			1.00	0.06	0.40**	0.13	0.01	0.24*
Cu				1.00	0.09	-0.16	0.57**	-0.25*
Ni					1.00	0.17	0.17	-0.39**
Pb						1.00	0.17	0.28*
Zn							1.00	0.48**
Hg								1.00

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

表 3 北京市凉水灌区土壤重金属含量的主成分分析

Table 3 Principal component analysis of heavy metal concentrations in the soils from Liangfeng Irrigated Area in Beijing City

成分 Component	初始特征值 Initial Eigenvalues			提取后特征值 Extraction Sums of Squared loadings			变换后特征值 Rotation Sums of Squared loadings		
	特征值 Total	解释方差 % of variance	累积方差 Cumulative	特征值 Total	解释方差 % of variance	累积方差 Cumulative	特征值 Total	解释方差 % of variance	累积方差 Cumulative
1	3.981	49.76 %	49.76 %	3.981	49.76 %	49.76 %	3.461	43.26 %	43.26 %
2	1.245	15.56 %	65.32 %	1.245	15.56 %	65.32 %	1.253	15.66 %	58.92 %
3	0.954	11.93 %	77.24 %	0.954	11.93 %	77.24 %	1.152	14.40 %	73.33 %
4	0.694	8.68 %	85.92 %	0.694	8.68 %	85.92 %	1.007	12.59 %	85.92 %
5	0.498	6.23 %	92.15 %						
6	0.311	3.89 %	96.04 %						
7	0.188	2.35 %	98.39 %						
8	0.129	1.61 %	100 %						

表 4 北京市凉水灌区土壤重金属含量主成分分析成分矩阵

Table 4 The component matrix of principal component analysis of heavy metal concentrations in the soils from Liangfeng Irrigated Area in Beijing City

重金属 Heavy metal	主成分 Component matrix				旋转主成分 Rotated component matrix			
	1	2	3	4	1	2	3	

污灌区的小尺度调查研究也发现,距污灌口的距离远近是影响土壤重金属含量的一个重要原因(王学军等,1997).因此,王学军等人和本文分别从不同空间尺度进行的研究结果都证明,该污灌区确实存在污灌导致土壤重金属积累的现象.

凉水河作为北京市主要的排污河,每年接纳的

表 5 北京市凉水灌区不同采样带土壤重金属含量的统计及差异比较¹⁾

Table 5 Mean concentrations and comparison of heavy metals in the soils from different transects of Liangfeng Irrigated Area in Beijing City										
采样带 Sampling area	样本数/个 N of samples	重金属含量的平均值 Means of heavy metal concentration/(mg kg ⁻¹)								
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	
凉水河样带 Transect irrigated with Liangshui River	25	9.14 ^a	0.111 ^a	43.6 ^a	28.2 ^a	0.200 ^a	29.4 ^a	33.9 ^a	71.5 ^a	
过渡带 Transition transect	20	8.19a ^b	0.117 ^a	41.2 ^{ab}	25.4 ^a	0.150 ^b	29.1 ^a	33.3 ^a	66.2 ^{ab}	
凤港河样带 Transect irrigated with Fenggang River	39	7.49 ^{bc}	0.117 ^a	39.9 ^b	26.0 ^a	0.123 ^b	27.0 ^b	27.9 ^b	62.6 ^b	
北京市土壤重金属背景值 ²⁾ Background concentration of Beijing soil ²⁾		7.09 ^c	0.119 ^a	29.8 ^c	18.7 ^b	0.0576 ^c	26.8 ^b	24.6 ^c	57.5 ^c	
沈阳张士灌区(张勇,2001) Zhangshi Irrigated Area of Shenyang(Zhang,2001)		14.2	1.12	94.2	39.4	0.180	—	69.0	95.6	

- 1) 表中数据后标注不同字母表示同一列的数据之间存在显著差异($p < 0.05$)
- 2) 土壤 Hg 背景值引自中国环境监测总站文献(1990);其余元素的土壤背景值引自陈同斌等文献(2004)

污水量为 $(1.5 \sim 1.8) \times 10^8 \text{ m}^3$,尤其在灌溉季节,凉水河平均有 50 % 的河水(污水)用于农业灌溉¹⁾;而凤港河是一条人工河,其主要功能是除涝防碱,纳污较少,用于灌溉的污水量也相对有限.前者的河水中 Hg 含量明显高于后者.根据《通县水利志》的资料¹⁾以及前人调查资料²⁾,1976 年,凉水河的 Hg 含量曾高达 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,即使到 1991 年河水水质有所改善,其 Hg 含量($0.89 \mu\text{g L}^{-1}$)几乎相当于凤港河($0.1 \mu\text{g L}^{-1}$)的 9 倍.这可能是导致不同灌溉区土壤 Hg 的污染程度差别较大的重要原因.2 条河流的 Cd 含量并没有明显的差别,不同灌溉区内的土壤 Cd 含量差异也不显著.1979 年的监测结果表明¹⁾,凉水河中下游河水的 Cr 含量高于凤港河.这也可以解释为何凉水河灌区的土壤 Cr 含量明显高于凤港河灌区.

与沈阳张士灌区(张勇,2001)相比,本研究区的土壤中重金属含量明显低于沈阳张士灌区的土壤重金属含量,尤其 Cd 含量仅为张士灌区的 10.3 %.

3.2 污灌区土壤重金属的来源及变化趋势

与 20 世纪 70 年代中期凉水河灌区的调查结果²⁾相比,本研究中的土壤 Hg、Pb、Cu、As 含量分别增加了 11.4 %、40 %、26 %、9.0 % (表 6).历史上,高碑店污水下段(凉水河污染源的源头)的 Hg 含量相对较高,1977 年灌溉水中 Hg 含量在 $11.0 \sim 11.3 \mu\text{g L}^{-1}$ 之间¹⁾,远远高于农田灌溉水质标准($\text{Hg} \leq 1 \mu\text{g L}^{-1}$).1977 年,北京化工二厂用汞法电解食盐生产氢氧化钠的项目停产之后,灌溉水中 Hg 的含量

明显降低:1979 ~ 1985 年,高碑店污水厂出水的 Hg 含量在未检出至 $1 \mu\text{g L}^{-1}$ 之间,1991 年仅为 $0.9 \mu\text{g L}^{-1}$,基本上都接近农田灌溉水质标准(除 1981 年为 $4 \mu\text{g L}^{-1}$ 之外)¹⁾.据此判断,污灌是研究区内土壤 Hg 的一个主要来源,是导致灌区土壤 Hg 污染较为严重的重要原因.但是,从上述不同年代的 Hg 含量变化情况可以看出,近 20 年中由灌溉输入到土壤中 Hg 在逐渐减少.

表 6 北京市凉水灌区土壤重金属含量的比较

污灌区土壤的 Cr、As 与 Ni 之间呈显著相关(表 2),且都分布在主成分 F1 中(表 4);Pb、Zn 在 F1 中的负荷也较高;且 Cr 与 Ni 仅在 F1 中有分布.有研究表明(Chen *et al.*, 1999),影响土壤中 Cr、Ni 含量的主要因素是土壤母质.在本研究中,影响土壤 As、Cr、Ni、Pb、Zn 含量的主要因素依然是土壤母质(Chen *et al.*, 1999;Pierce *et al.*, 1982).

综合主成分分析和相关分析的结果可以得出,影响凉凤灌区内土壤重金属的因素较多,土壤重金属的来源受多种因素影响,包括成土母质和人类活动等,重金属之间的相关特征是土壤母质以及人类活动等综合作用的结果(Nicholson *et al.*, 2003;Pierce *et al.*, 1982).

3.3 优先控制重金属的筛选

研究区内土壤 Hg 的超标比较普遍,且超标的程度也比较严重. Hg 是剧毒的重金属元素,能够通过食物链进入人体,严重危害人体健康,因此,需要严格控制土壤中 Hg 的积累.此外,污灌区的土壤也表现出一定的 Pb 污染问题. Pb 容易通过大气进行传输,进而影响农作物的 Pb 含量(Markus *et al.*, 2001;Alloway *et al.*, 2000)和作物的生长发育(夏增禄, 1987),因此,对当地食物链的污染风险较高(根据我们的调查,当地作物样品的 Pb 超标率较高, Pb 的超标率为 28.6%,远远高于 Hg、Cu、Cr、As、Cd、Zn 元素).尽管在调查中也发现,土壤 Cu 含量也存在一些超标问题,但是,由于其含量仍普遍较低($26 \sim 28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),远低于北京市潮土的 Cu 临界含量($104 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)(夏增禄, 1992),因此,其潜在环境风险较低.从污灌区的重金属超标情况及其环境风险来看,应该将 Hg、Pb 列为北京市污灌区需要优先控制的重金属;如果从污水灌溉的角度考虑,则应该将 Hg 列为北京市灌溉污水中最需要优先控制的重金属.

4 结论(Conclusions)

通过对北京市凉凤灌区土壤重金属的调查,本研究得出以下结论:

1) 以基线值为标准,凉凤灌区土壤 Hg 污染比较严重, Cu、Pb 污染居中, As、Cr、Zn 为轻微污染.

2) 与 1975 年凉凤灌区的土壤调查值相比,经过 30 年之后,土壤中 Hg、Pb、Cu 含量呈上升趋势,分别增加了 11.4%、40%、26%.

3) 凉凤灌区土壤中的重金属含量,尤其是 Hg

含量与污水灌溉有密切关系,但同时也受土壤母质等其他因素的影响.

4) 从土壤重金属污染风险的角度来看,北京市凉凤灌区中需要优先控制的重金属为 Hg、Pb.

通讯作者简介:陈同斌(1963—),男,博士,研究员,博士生导师.主要研究方向为污染土壤的植物修复,固体废弃物资源化利用及区域土壤环境质量与风险评价.

参考文献(References):

- Adriano D C, Chlopecka A, Kaplan D I, *et al.* 1998. Soil Contamination and Remediation: Philosophy, Science and Technology, in Contaminated Soil [M]. Paris: NRA: 465—504
- Aleem A, Isar J, Malik A. 2003. Impact of long-term application of industrial wastewater on the emergence of resistance traits in *Azotobacter chroococcum* isolated from rhizospheric soil [J]. *Bioresource Technology*, 86: 7—13
- Alloway B J, Zhang P, Mott C. *et al.* 2000. The vulnerability of soils to pollution by heavy metals, Final Report for MAFF Contract SP0127 [R]. London: MAFF
- Anikwe M A N, Nwobodo K C A. 2002. Long term effect of municipal waste disposal on soil properties and productivity of sites used for urban agriculture in Abakaliki, Nigeria [J]. *Bioresource Technology*, 83: 241—250
- Bansal O P. 1998. Heavy metal pollution of soils and plants due to sewage irrigation [J]. *Indian Environmental Health*, 40: 51—52
- Cameron K C, Di H J, McLaren R G. 1997. Is soil an appropriate dumping ground for our wastes? [J] *Australian Journal of Soil Research*, 35: 995—1035
- Chen M, Ma L Q, Harris W G. 1999. Baseline concentrations of 15 trace elements in Florida surface soils [J]. *Journal of Environmental Quality*, 28: 1173—1181
- Chen M, Ma L Q, Hoogeweg C G, *et al.* 2001. Arsenic background concentration in Florida, USA. Surface soil: Determination and interpretation [J]. *Environmental Forensics*, 2: 117—126
- Chen T B, Zheng Y M, Chen H, *et al.* 2004. Background concentrations of soil heavy metals in Beijing [J]. *Environmental Science*, 25(1): 117—122 (in Chinese)
- China National Environmental Monitoring Center (CNEMC). 1990. The Background Concentrations of Soil Elements in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press: 355 (in Chinese)
- Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. 2001. Multivariate statistical and GIS—based approach to identify heavy metal sources in soils [J]. *Environmental Pollution*, 114: 313—324
- Gong Z M, Cao J, Zhu X M, *et al.* 2002. Organochlorine pesticide residues in agricultural soils from Tianjin [J]. *Agro—Environmental Protection*, 21(5): 459—461 (in Chinese)
- Han B. 1999. Study the effects of farmland condition and qualities of wheat by using waste—water irrigating [J] *Gansu Agricultural Science and Technology*, (6): 46—47 (in Chinese)

- Macleod C L, Scrimshaw M D, Emmerson R H C, *et al.* 1999. Geochemical changes in metal and nutrient loading at uplands farm managed retreat site, Essex, UK (April 1995—1997) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 38: 1115—1125
- Markus J, McBratney A B. 2001. A review of the contamination of soil with lead. Spatial distribution and risk assessment of soil lead [J]. *Environment International*, 27: 399—411
- Möller A, Möller H W, Abdullah A, *et al.* 2005. Urban soil pollution in Damascus, Syria: concentrations and patterns of heavy metals in the soils of the Damascus Ghouta [J]. *Geoderma*, 124: 63—71
- Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, *et al.* 2003. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales [J]. *The Science of the Total Environment*, 311: 205—219
- Pierce F J, Dowdy R H, Grigal D F. 1982. Concentrations of six trace metals in some major Minnesota soil series [J]. *Journal of Environmental Quality* 11: 412—416
- The Comprehensive Research Committee for Natural Resources of the Chinese Academy of Sciences. 1990. *Handbook of Natural Resources in China* [M]. Beijing: Science Press: 483—494 (in Chinese)
- The Department of Hydrology of Ministry of Water Resources and Electric Power of P. R. China. 1987. *The Estimation of Water Resources of China* [M]. Beijing: Water Resources & Hydropower Press: 14—54 (in Chinese)
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). 1996. Method 3050B: Acid digestion of sediments sludges and soils (revision 2) [R].
- Wang X J, Xi S. 1997. Kriging analysis and heavy metal pollution assessment for soil from eastern suburb of Beijing City [J]. *China Environmental Science*, 17(3): 225—228 (in Chinese)
- Xia Z L. 1998. *Soil Environmental Capacity and Application* [M]. Beijing: China Meteorological Press: 34 (in Chinese)
- Xia Z L (editor). 1992. *Soil Environmental Capacity of China* [M]. Beijing: China Earthquake Press: 178, 201 (in Chinese)
- Xie J Z, Liu S Q, Liu Y Z, *et al.* 2002. Effects of heavy metal pollution in soil on Nutrition, quality of vegetable in Baoding [J]. *Agro—Environmental Protection*, 21(4): 325—327 (in Chinese)
- Xia Z L, Li S Z, Li T F, *et al.* 1987. *Soil Elements Background Concentrations and Research Methods* [M]. Beijing: China Meteorological Press: 4 (in Chinese)
- Zhang N M, Xing C Y, Jia R S, *et al.* 1996. Study on soil heavy metal pollution in sewage irrigation area of Taiyuan city. [J]. *Agro—Environmental Protection*, 15(1): 21—23 (in Chinese)
- Zhang Y. 2001. Heavy metal pollution of soil and agricultural products in Shenyang suburbs: current situation [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 32(4): 182—186 (in Chinese)
- 中文参考文献:
- 陈同斌, 郑袁明, 陈 煌, 等. 2004. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J]. *环境科学*, 25(1): 117—122
- 龚钟明, 曹 军, 朱学梅, 等. 2002. 天津市郊灌区农田土壤中的有机氯农药残留[J]. *农业环境保护*, 21(5): 459—461
- 韩 冰. 1999. 白银市污水灌溉对农田环境及小麦产量质量的影响研究[J]. *甘肃农业科技*, (6): 46—47
- 水利电力部水文局. 1987. *中国水资源评价* [M]. 北京: 水利电力出版社: 14—54
- 王学军, 席 爽. 1997. 北京东郊污灌土壤重金属浓度的克立格插值及重金属污染评价[J]. *中国环境科学*, 17(3): 225—228
- 夏增禄. 1988. *土壤环境容量及其应用* [M]. 北京: 气象出版社: 34
- 夏增禄(主编). 1992. *中国土壤环境容量* [M]. 北京: 地震出版社: 178, 201
- 夏增禄, 李森照, 李廷芳, 等. 1987. *土壤背景值及其研究方法* [M]. 北京: 气象出版社: 4
- 谢建治, 刘树庆, 刘玉柱, 等. 2002. 保定市郊土壤重金属污染对蔬菜营养品质的影响[J]. *农业环境保护*, 21(4): 325—327
- 张乃明, 邢承玉, 贾润山, 等. 1996. 太原污灌区土壤重金属污染研究[J]. *农业环境保护*, 15(1): 21—23
- 张 勇. 2001. 沈阳郊区土壤及农产品重金属污染的现状评价[J]. *土壤通报*, 32(4): 182—186
- 中国环境监测总站. 1990. *中国土壤元素背景值* [M]. 北京: 中国环境科学出版社: 355
- 中国科学院自然资源综合考察委员会. 1990. *中国自然资源手册* [M]. 北京: 科学出版社: 483—494