

# 汾河水库周边土壤重金属含量与空间分布

李晋昌<sup>1 2 3</sup> 张红<sup>4</sup> 石伟<sup>3</sup>

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学防沙治沙教育部工程研究中心, 北京 100875; 3. 山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; 4. 山西大学环境与资源学院, 太原 030006)

**摘要:** 基于 95 个表层土壤样品重金属实测含量, 运用多元统计和地统计相结合的方法, 对汾河水库周边土壤重金属含量的分布特征和来源进行分析。结果表明, 研究区土壤重金属 Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 的平均含量分别为 38.45、19.09、24.02、11.98、55.01 mg·kg<sup>-1</sup>, 均没有超过国家土壤环境质量一级标准和山西省土壤背景值, 但各元素均有部分样品含量超过山西省土壤背景值, 其中 Pb、Cr 和 Cu 的超标率较为显著, 分别为 28%、14% 和 13%。相关分析和因子分析结果显示, 各元素超标部分的来源可分为三类, Cu、Ni 和 Zn 为一类, Cr 和 Pb 分别单独为一类。分析各重金属空间分布图发现, 第一类元素的超标部分主要来源于城镇区域内的日常生活和生产活动, Cr 和 Pb 的超标部分则分别主要来源于农业生产活动和交通运输等。Cr 和 Pb 元素的高值区分别位于汾河水库的上游和下游区域。

**关键词:** 土壤; 重金属; 空间分布; 地统计分析; 汾河水库

中图分类号: X131.3; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)01-0116-05

## Concentrations of Soil Heavy Metals and Their Spatial Distribution in the Surrounding Area of Fenhe Reservoir

LI Jin-chang<sup>1 2 3</sup> ZHANG Hong<sup>4</sup> SHI Wei<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. MOE Engineering Center of Desertification and Blown-sand Control, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 4. School of Environmental Science and Resources, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Based on the concentrations of heavy metals from 95 topsoil samples, the spatial distribution characteristics and sources of the heavy metals in soil of the surrounding area of Fenhe Reservoir were analyzed with a method combining multivariate statistics and geo-statistics. The results showed that the average concentrations of the Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn in soil of study area were 38.45, 19.09, 24.02, 11.98 and 55.01 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively, and all were lower than the first class standard of the national soil environment and the background values of soil in Shanxi Province. For all heavy metals, there were some samples with concentrations higher than the background values of soil in Shanxi Province, especially for Pb, Cr, and Cu, exceeding by 28%, 14%, and 13%, respectively. The results of correlation analysis and factor analysis showed that the sources of the excess of these heavy metals could be divided into three categories, Cu, Ni and Zn as one class, Cr and Pb as the other two classes. Spatial structure analysis showed the excess of Cu, Ni, and Zn came mainly from daily life and production activities, and the excess of Cr and Pb came mainly from agricultural activities and transportation.

**Key words:** soil; heavy metal; spatial distribution; geo-statistical analysis; Fenhe Reservoir

土壤作为自然圈层之一, 是大气、水体与生物中物质迁移、滞留和沉积的重要场所<sup>[1]</sup>。土壤重金属污染可影响土壤微生物区系、生态物种和微生物过程, 进而影响生态系统的结构和功能<sup>[2]</sup>, 并且可能经作物吸收后进入食物链<sup>[3]</sup>, 通过某些迁移方式进入水体和大气<sup>[4]</sup>, 威胁人类的健康与其它动物的繁衍生息<sup>[5]</sup>, 从而备受关注。目前, 相关研究主要集中在对城市和农用土壤重金属累积特征、空间分异、污染评价和来源解析等方面<sup>[6~13]</sup>, 为采取有效措施保护水源, 对水源地土壤重金属污染的研究也正逐渐引起重视<sup>[14~16]</sup>。

汾河水库位于山西省太原市西北娄烦县境内,

南北长 15 km, 东西宽 5 km, 总面积 32 km<sup>2</sup>, 上距汾河发源地 122 km, 下距省会太原市 83 km, 系拦截汾河上游的干流而成, 是山西省最大的水库和最大的饮用水源地。本研究拟通过对汾河水库周边土壤采样监测, 利用 RS、GIS 技术和地统计分析方法, 探讨重金属元素的含量、空间分布特征及可能来源, 以期为水库周边土壤质量评价及水库综合治

收稿日期: 2012-03-29; 修订日期: 2012-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101558, 41271513, 41101013); 山西省自然科学基金项目(2011021027-1, 2010011044-2)

作者简介: 李晋昌(1980~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为区域生态学, E-mail: lijch@lzb.ac.cn

理提供基础性指导.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品的采集和分析

2010年4月,在汾河水库周边10 km范围内( $38^{\circ}00' \sim 38^{\circ}14'N$ ,  $111^{\circ}80' \sim 111^{\circ}93'E$ )采用蛇形采样法和GPS定位,采集地表0~20 cm的土壤样品95个(图1),每个样品约重1 kg,均由 $25 m^2$ 范围内的8个点的土壤样品均匀混合而成.土壤经登记编号后,用聚乙烯塑料袋封装,于实验室自然风干,剔除植物残体和石块,磨碎、过100目筛,

混匀后保存备用.样品采用 $HNO_3$ - $HF$ - $HClO_4$ 法溶解后采用火焰原子吸收分光光度法(GB/T 17138-1997)测定样品中的Cr、Cu、Ni、Pb和Zn等5种重金属元素,这5种元素被认为在太原盆地及太原市土壤中污染较为严重<sup>[17]</sup>.分析仪器为Perkin Elmer公司生产的AANAL YST 800型原子吸收光谱仪.测定重金属含量时每个样品均采用3组平行试验同时进行,取均值作为样品测定浓度,并在分析过程中加入国家土壤标准样品(GSS-1)进行分析质量控制.另外从95个样品中随机抽取10个,再次测定土壤重金属含量,以保证测定结果的准确性.

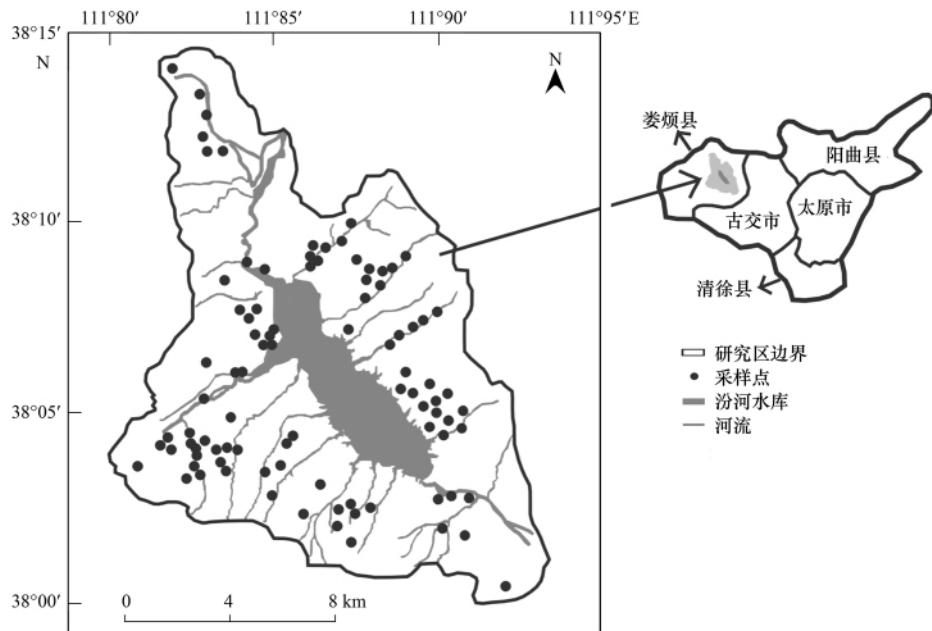


图1 汾河水库周边土壤重金属污染调查采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites for investigation of soil heavy metal contamination in the surrounding of Fenhe Reservoir

### 1.2 数据处理

数据统计分析采用SPSS 13.0和Excel 2003完成,半变异函数拟合和重金属含量插值图采用ArcGIS 10.0完成.相关系数计算采用的是Spearman相关分析.数理统计分析中,应用因子分析的前提条件是数据呈正态分布.数据正态检验方法为单样本K-S检验,若 $PK-S > 0.05$ ,表示样本呈正态分布.对不服从正态分布的数据进行对数转换,使其服从正态分布.

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤重金属元素含量

由表1可知,重金属元素Cr、Cu、Ni、Pb和Zn的平均值均未超过国家土壤环境质量一级标准<sup>[18]</sup>,且仅Cr和Ni有个别样点超过该标准,其中以Cr含

量较为突出,最高值达到 $176.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,明显高于国家土壤环境质量标准的一级标准值 $90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

5种重金属元素平均值均未超过山西省土壤背景值<sup>[19]</sup>,但均有部分样点超过背景值,以Pb、Cr和Cu相对较为显著,超标率分别为28%、14%和13%.研究区除Cr和Pb的变异系数相对较大外,其它元素的变异系数介于0.17~0.21之间,属中等变异强度,表明Cr和Pb的空间差异相对较大.从偏态和峰度来看,Cr和Ni服从对数正态分布,Cu、Pb和Zn服从正态分布.以上分析表明,研究区人类活动对土壤重金属累积影响较小,其中Cr和Pb累积相对较为明显.

### 2.2 土壤重金属元素间的相关性

相关性分析(Spearman相关)表明(表2),研究

表 1 研究区土壤重金属统计分析( $n=95$ )  
Table 1 Statistical analysis of heavy metals in the soils of study area

重金属元素	平均值 /mg·kg <sup>-1</sup>	标准差	变异系数	最小值 /mg·kg <sup>-1</sup>	最大值 /mg·kg <sup>-1</sup>	峰度
Cr	38.45	29.52	0.77	4.60	176.82	7.31
Cu	19.09	3.92	0.21	12.14	31.44	0.31
Ni	24.02	4.02	0.17	16.89	40.57	4.63
Pb	11.98	4.77	0.40	1.70	23.72	-0.44
Zn	55.01	10.11	0.18	15.26	89.40	4.09

重金属元素	偏度	分布类型	山西省土壤背景值 /mg·kg <sup>-1</sup>	超标率/%	国家土壤环境质量 一级标准/mg·kg <sup>-1</sup>
Cr	2.34	对数正态	55.3	14	90
Cu	0.64	正态	22.9	13	35
Ni	1.49	对数正态	29.9	4	40
Pb	0.34	正态	14.7	28	35
Zn	-0.06	正态	63.5	8	100

表 2 研究区土壤重金属含量的相关系数<sup>1)</sup>Table 2 Correlation coefficients among heavy metal contents  
in soils of study area

	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Cr	1				
Cu	0.10	1			
Ni	-0.10	0.62**	1		
Pb	0.06	0.25*	0.18	1	
Zn	-0.22*	0.35**	0.45**	0.32**	1

1) \*\* 表示  $P < 0.01$ ; \* 表示  $P < 0.05$  ( $n=95$ )

区土壤中 Cr 与 Zn 呈显著负相关, 此外, 除 Cr 与 Cu、Ni、Pb 及 Ni 与 Pb 相关性不明显外, 其它元素之间均呈显著正相关, 其中 Ni 与 Cu、Zn 之间的相关系数较高, Pb 与其它元素之间的相关系数相对较小。该结果进一步表明, 研究区土壤中 Cr 与 Pb 的累积具有与其它元素不同的影响因素, 尤其是 Cr。

### 2.3 土壤重金属元素的因子分析

因子分析是将多个实测变量简化为较少变量的

方法, 可用来判别土壤中元素的来源<sup>[20 21]</sup>。由于研究区土壤中 5 种重金属污染并不严重, 因此, 因子分析中不同因子主要反映了各重金属元素超标部分的人为源差异<sup>[22]</sup>。通过主成分分析计算(表 3), 研究区土壤中 5 种重金属元素(5 个变量)可由前 3 个因子(特征值:  $2.137 + 1.079 + 0.888 = 4.104$  个变量)反映 82% 的信息, 即对前 3 个因子进行分析已基本能够反映 5 种重金属含量数据的大部分信息。在因子的初始矩阵中, Pb 在 3 个因子中的载荷差别较小, 经过矩阵变化后, 差别明显增大(表 4)。第一主成分的贡献率为 42.736%, 特点表现为因子变量在元素 Cu、Ni 和 Zn 的含量上有较高的正载荷(表 4)。由于 Cu 和 Zn 主要来源于汽车轮胎磨损和油的泄露, 因此第一主成分可能反映了道路交叉口区域高负荷的汽车排放对环境的污染<sup>[20]</sup>。第二主成分的贡献率是 21.571%, 在 Pb 的含量上有较高的载荷, 为 0.949, 而 Pb 的来源常与工业和交通有

表 3 研究区土壤重金属元素含量的因子分析  
Table 3 Factor analysis of heavy metal concentrations in the soil of study area

主成分	初始特征值			提取特征值		
	特征根	贡献率/%	累积贡献率/%	特征根	贡献率/%	累积贡献率/%
1	2.137	42.736	42.736	2.137	42.736	42.736
2	1.079	21.571	64.307	1.079	21.571	64.307
3	0.888	17.766	82.073	0.888	17.766	82.073
4	0.542	10.847	92.919			
5	0.354	7.081	100.000			

表 4 研究区土壤重金属含量因子分析成分矩阵

Table 4 Component matrix for factor analysis of heavy metal concentrations in the soils of study area

元素	初始因子载荷			旋转后因子载荷		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3
Cr	-0.189	0.922	-0.148	0.009	0.056	0.951
Cu	0.784	0.209	-0.363	0.874	0.134	0.087
Ni	0.821	-0.010	-0.373	0.889	0.079	-0.128
Pb	0.504	0.367	0.726	0.085	0.949	0.086
Zn	0.747	-0.223	0.263	0.509	0.474	-0.439

关<sup>[22]</sup>. 第二主成分也支配部分 Zn 的来源. 第三主成分的主要特征在 Cr 的含量上有较高的载荷, 为 0.951, 可能来源于农业施肥<sup>[23]</sup>. 因子分析进一步验证了相关分析的结果.

## 2.4 土壤重金属元素的空间结构和空间分布

### 2.4.1 重金属的空间结构

利用 ArcGIS 地统计分析模块对研究区土壤中

各重金属进行最优模型拟合, 结果如表 5 所示. 元素 Cr、Cu、Ni 和 Zn 块金值与基台值的比值在 25% ~ 75% 之间, 属于中等空间相关, 其中 Cr 的比值为 75%, 表明受人类活动等随机因子影响相对较大; 元素 Pb 块金值与基台值的比值 > 75% (88%), 属于空间弱相关, 表明 Pb 空间结构受随机因子影响显著, 外源污染物对土壤 Pb 含量的贡献较大.

表 5 研究区土壤重金属半变异函数模型<sup>1)</sup>

Table 5 Semi-variation models for heavy metals in soils of study area

元素	拟合模型	块金值 $C_0$	基台值 $C_0 + C_1$	块金值/基台值/% $C_0 / (C_0 + C_1)$	标准平均值	标准均方根预测误差
Cr	高斯模型	0.370 7	0.494 0	75	-0.704 6	1.035
Cu	球状模型	12.275 0	17.626 2	70	0.078 7	1.002
Ni	高斯模型	0.020 0	0.034 0	59	0.014 0	1.039
Pb	指数模型	20.970 0	23.838 3	88	0.044 3	1.045
Zn	指数模型	114.760 0	193.210 0	59	-0.004 4	1.054

1) 最优拟合模型检验标准: 标准平均值接近于 0, 标准均方根预测误差接近于 1

### 2.4.2 土壤重金属元素的空间分布规律

根据各重金属元素的分布形态, 采用 ArcGIS 软件中的地统计模块, 对服从正态分布的 Cu、Pb 和 Zn 采用普通克里格插值, Cr 和 Ni 采用析取克里格插值, 结果如图 2 所示. 从中可知, Cu、Ni、Zn 含量的高值区及 Cr 和 Pb 含量的部分高值区均位于研究区西南部, 即娄烦县城所在区域, 表明城镇内

的工业生产、交通运输、燃煤释放、生活排污等是研究区土壤中 Cu、Ni、Zn 及部分 Cr 和 Pb 的主要污染源. Cr 含量的其它高值区主要位于汾河水库的上游地区, 该区域地势平坦, 农业历史悠久, 分布有大面积耕地. 由于农业施用的磷肥、含磷复合肥及城市垃圾、污泥为原料的肥料中均混杂有 Cr 元素<sup>[23]</sup>, 因此该区域土壤中 Cr 元素的累积可能主要

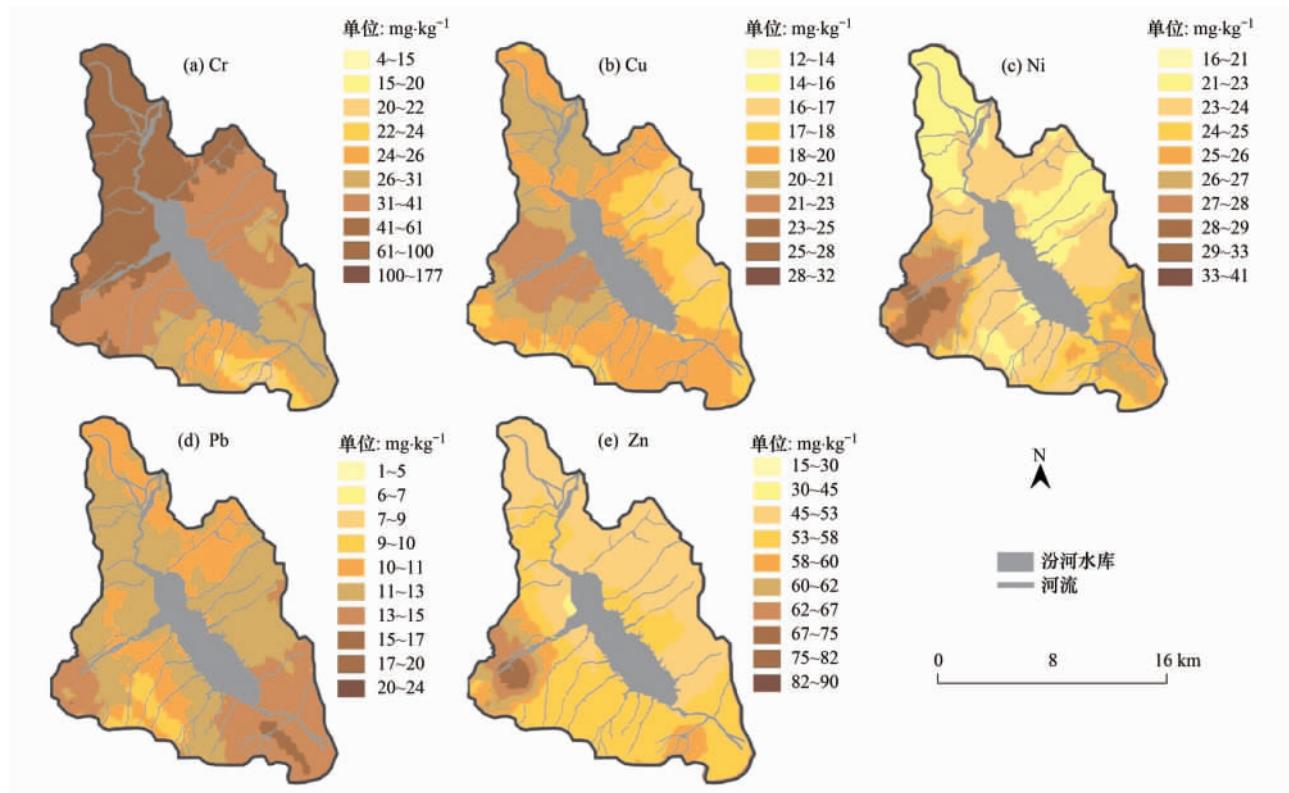


图 2 汾河水库周边土壤重金属含量空间分布

Fig. 2 Distribution of the concentrations of soil heavy metals in the surrounding of Fenhe Reservoir

源于上述农业活动。由于极其重要的地理位置,汾河水库上游土壤中Cr的累积可能会直接影响汾河水库的水质,因此该区域土壤中Cr元素的累积应引起高度重视。Pb含量的另一高值区位于汾河水库下游,该区域是娄烦县及其北部和西北部其它县市通往古交市和太原市的交通要道,来往车辆较多,而Pb被认为是机动车污染源的标志性元素<sup>[24-25]</sup>,因此该区域土壤中Pb的累积可能主要源于交通污染。整体而言,研究区各样点5种重金属含量与山西省背景值较为接近,应主要由成土母质等自然因素控制。

### 3 结论

(1) 研究区土壤重金属元素Cr、Cu、Ni、Pb、Zn的平均含量均低于国家土壤环境一级标准和山西省背景值,基本处于正常水平。以山西省土壤背景值为标准,Pb、Cr和Cu超标率相对较高。

(2) 5种元素超标部分的来源可分为三类,Cu、Ni和Zn为一类,Cr和Pb分别单独为一类。Cu、Ni和Zn的超标部分主要来源于城镇区域内的日常生活和生产活动,Cr和Pb的超标部分分别主要来源于农业生产活动和交通运输等。Cr和Pb的污染区域分别主要位于汾河水库的上游和下游区域。

### 参考文献:

- [1] 周生路,廖富强,吴绍华,等.宜兴典型农用地土壤剖面重金属元素含量研究[J].科学通报,2008,53(增刊):153-161.
- [2] 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.
- [3] Wenzel W W, Jockwer F. Accumulation of heavy metals in plants grown on mineralised soils of the Austrian Alps [J]. Environmental Pollution, 1999, 104(1): 145-155.
- [4] Nriagu J O, Pczyna J M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soil by trace metals [J]. Nature, 1988, 333(6169): 134-139.
- [5] Qian J, Shan X Q, Wang Z, et al. Distribution and plant availability of heavy metals in different particle-size fractions of soil [J]. Science of the Total Environment, 1996, 187(2): 131-141.
- [6] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils [J]. Environmental Pollution, 2001, 114(3): 313-324.
- [7] Gil C, Boluda R, Ramos J. Determination and evaluation of cadmium, lead and nickel in greenhouse soils of Almeria (Spain) [J]. Chemosphere, 2004, 55(7): 1027-1034.
- [8] Huang K M, Lin S. Consequences and implication of heavy metal spatial variations in sediments of the Keelung River drainage basin, Taiwan [J]. Chemosphere, 2003, 53(9): 1113-1121.
- [9] Nicholson F, Smiths R, Alloway B, 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.
- [10] Zhao Y F, Shi X Z, Huang B, et al. Spatial distribution of heavy metals in agricultural soils of an industry-based peri-urban area in Wuxi, China [J]. Pedosphere, 2007, 17(1): 44-51.
- [11] 郭朝晖,肖细元,陈同斌,等.湘江中下游农田土壤和蔬菜的重金属污染[J].地理学报,2008,63(1):3-11.
- [12] 吴绍华,周生路,杨得志,等.宜兴市近郊土壤重金属来源与空间分布研究[J].科学通报,2008,53(增刊):162-170.
- [13] 朱文转,夏北成,江学顶.惠州市土壤重金属污染景观空间格局特征研究[J].中国环境科学,2009,29(8):885-891.
- [14] 张春燕,王学锋,王建玲,等.新乡市水源地土壤重金属含量特征及其对地下水的影响[J].生态学杂志,2007,26(9):1355-1358.
- [15] 王铁宇,罗维,吕永龙,等.官厅水库周边土壤重金属空间变异特征及风险分析[J].环境科学,2007,28(2):225-231.
- [16] 史贵涛,陈振楼,张翠,等.上海市饮用水源地周边环境中的重金属[J].环境科学,2008,29(7):1797-1805.
- [17] 王雄军,赖健清,孔华,等.太原盆地及太原市重金属元素地球化学分布特征分析[J].地球与环境,2008,36(1):72-80.
- [18] GB 15618-1995.土壤环境质量标准[S].
- [19] 史崇文,赵玲芝,郭新波,等.山西土壤元素背景值及其特征[J].华北地质矿产杂志,1994,9(2):188-196.
- [20] 张一修,王济,秦樊鑫,等.贵阳市道路灰尘和土壤重金属来源识别比较[J].环境科学学报,2012,32(1):204-212.
- [21] Martín J A R, Arias M L, Corbí J M G. Heavy metals contents in agricultural topsoils in the Ebro basin (Spain). application of the multivariate geostatistical methods to study spatial variations[J]. Environmental Pollution, 2006, 144(3): 1001-1012.
- [22] 杨忠平,卢文喜,刘新荣,等.长春市城区表层土壤重金属污染来源解析[J].城市环境与城市生态,2009,22(5):29-33.
- [23] 王军,陈振楼,王初,等.上海崇明岛蔬菜地土壤重金属含量与生态风险预警评估[J].环境科学,2007,28(3):647-653.
- [24] 肖鹏飞,李法云,付宝荣,等.土壤重金属污染及其植物修复研究[J].辽宁大学学报(自然科学版),2004,31(3):279-283.
- [25] 朱建军,崔保山,杨志峰,等.纵向岭谷区公路沿线土壤表层重金属空间分异特征[J].生态学报,2006,26(1):146-153.