

天水苹果园土壤重金属富集状况评价及来源分析

陈学民, 朱阳春, 伏小勇

(兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070)

摘要 对天水果园表层(0~20 cm)219件土壤样品进行研究,测定5种重金属(Zn、Cu、Pb、Cr和Cd)及有机质含量,以天水小陇山土壤为对照,运用相关分析和主成分分析方法区分土壤中重金属的来源。结果表明:①Zn、Cu、Pb、Cr和Cd含量分别为77.39、23.03、23.62、61.49 mg·kg⁻¹和0.07 mg·kg⁻¹,其中Cd极显著($P<0.01$)高于小陇山土壤,其余4种重金属虽高于小陇山土壤但无显著差异性($P>0.05$);②研究区土壤Cu、Pb、Cr三者间在0.01或0.001水平上具有显著正相关性,且这3种重金属与土壤有机质具有显著正相关性,其余重金属间不存在显著相关性;③主成分分析显示Cu、Pb和Cr来源相似,主要来自于成土母质,Cd来源于人为施肥因素,Zn的富集受多种因素影响。研究评价结果显示,天水地区果园土壤Cd受人为施肥影响较大,具有一定程度的富集。

关键词 天水;苹果园土壤;重金属;来源

中图分类号:X825 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)05-0893-06

Source and Enrichment Situation of Heavy Metals in Apple Orchard Soils of Tianshui Area, China

CHEN Xue-min, ZHU Yang-chun, FU Xiao-yong

(School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract Concentrations of Zn, Cu, Pb, Cr, Cd and organic matter were investigated in apple orchard topsoils (0~20 cm) in Tianshui area. Correlation analysis and principal component analysis were taken to identify the sources of these heavy metals in soils compared with soils of Xiaolong mountain from Tianshui area. The results suggested that: ①the contents of Zn, Cu, Pb, Cr, Cd in apple orchard soils were 77.39, 23.03, 23.62, 61.49, 0.07 mg·kg⁻¹ respectively, and the Cd content was significantly ($P<0.01$) higher than Xiaolong mountain soil; ②There were significantly correlation among Cu, Pb, Cr and organic matter in apple orchard soils; ③Cu, Pb and Cr in soils were mainly related to the geology of the parent material of the soils. Cd in the apple orchards soil originated from agricultural fertilizer according principal component analysis. Enrichment of Zn in the soils was affected by other factors. Agricultural action was the major reason of Cd content in the orchard soils which was higher than other metals.

Keywords Tianshui; apple orchards soil; heavy metal; source

目前,土壤污染已是全球性问题,其中重金属具有特殊的毒理学性质,且因污染毒性强、难降解等特性成为土壤最主要的污染物之一^[1]。土壤中重金属通过污染地表水或在农作物中富集等方式,直接或间接地危及人体健康^[2]。随着社会的发展,居民消费观念的改变,绿色无公害食品的生产将成为今后的发展趋势^[3]。苹果产地土壤重金属污染是制约无公害果品发展

的一个重要因素^[4],因此果园土壤质量状况备受社会关注^[5-8],其中控制农田土壤重金属污染的关键是区分重金属的来源。然而土壤重金属的来源比较复杂,农田土壤重金属既与成土母质有关,也与污水灌溉、农药化肥的使用、污泥农用堆肥等外因有密切关系^[9-10],因此区分土壤重金属污染来源至关重要。近年来,多元统计尤其是主成分分析,被广泛应用到土壤研究中以区分重金属的不同来源^[11]。

天水地区是我国主产苹果的主要地区之一,生产的“花牛”苹果畅销国内外,而关于产地土壤重金属来源分析的研究却鲜见报道。本文通过对天水7个区(县)苹果园表层土壤中5种重金属元素的测定,并采

收稿日期:2010-11-23

基金项目:甘肃省自然科学基金(1010RJZA070)

作者简介:陈学民(1960—),女,甘肃兰州人,教授,研究方向为水污染控制工程、废水处理与资源化理论与技术研究。

E-mail: xueminch@sina.com

用主成分分析等方法,探究了天水果园土壤重金属的可能来源,为天水果产业的持续发展及产品质量的提高提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 土壤样品的采集与测定方法

采用梅花布点法于 2009 年 8 月至 11 月在天水果园主产地 43 个乡镇共采集土壤样品 219 件,采样深度为 0~20 cm,采样点分布如图 1 所示。同时采集受人类活动较少的水天小陇山土样作为背景值与研究区果园土样重金属含量作对比。将采集的土样按四分法取样,自然风干,用玛瑙研钵研细过 2 mm 和 0.15 mm 尼龙筛,保存备用。土壤有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定;土壤重金属用盐酸-氢氟酸-高氯酸消解,重金属 Cr 总量按照火焰原子吸收分光光度法测定(GB/T 17137—1997);Pb 和 Cd 总量按照石墨炉原子吸收分光光度法测定(GB/T 17141—1997);Cu 和 Zn 总量按照火焰原子吸收分光光度法测定(GB/T 17138—1997)。

1.2 数据处理

数据分析采用 Statistica 6.0 统计软件,对天水果园 5 种重金属含量进行相关分析和主成分分析,在 95% 的置信区间,对天水果园土壤 5 种重金属与小陇

山土壤重金属进行单样本 t 检验。

2 结果与分析

2.1 天水果园土壤重金属含量分析

以国家土壤环境质量二级标准 GB 15618—1995 ($\text{pH}>7.5$) 进行评价,天水果园土壤处于清洁无污染状态,适合发展无公害果品。为了进一步研究果园生产对土壤重金属积累效应的影响,本研究以天水地区受人类活动影响较小的小陇山土壤为背景值进行对比分析。经偏度-峰度检验($P<0.05$),土壤中 5 种重金属均符合正态分布,以算术平均值作为描述总体样本大小特征的统计量^[12]。

从本次研究来看(表 1),天水地区苹果园土壤不同重金属含量存在不同的特征。其中 Cu、Pb 和 Cr 在各个样点的水平基本相近,变异系数都小于 10%,说明外在环境及社会活动等干扰对土壤该 3 种重金属的影响不大,其含量大小可能取决于成土母质;而 Zn 和 Cd 的含量在研究区具有较大的变异程度,变异系数均在 20% 左右,说明该 2 种重金属含量水平除受成土母质因素影响外,还受地区间环境差异或耕作等生产差异的影响。通过与背景值比较发现,果园各类重金属均高于背景值,说明果园生产可导致土壤重金属的富集,但不同类型重金属富集情况不同,其中 Cu、

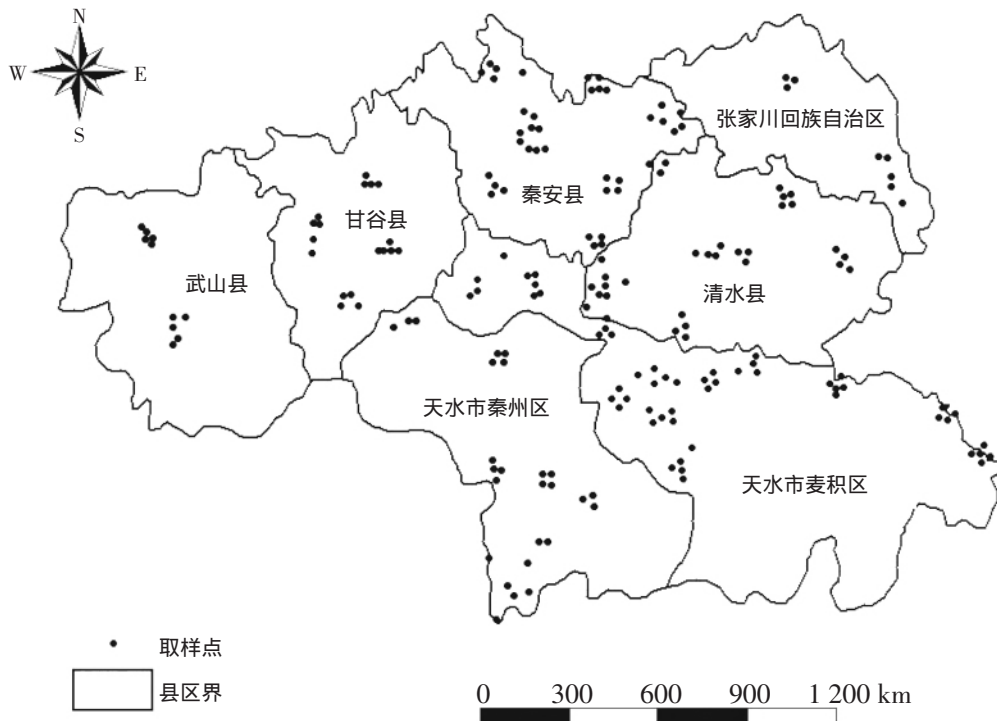


图 1 天水果园表层土壤采样点分布图

Figure 1 Sampling range arrangement of soil in apple orchards in Tianshui city

表 1 天水苹果园土壤重金属元素统计特征值

Table 1 Descriptive statistics of heavy metal concentrations in apple orchards in Tianshui area

元素	样本数/个	最大值/mg·kg ⁻¹	最小值/mg·kg ⁻¹	算术平均值/mg·kg ⁻¹	变异系数/%	背景值/mg·kg ⁻¹
Zn	219	118.21	49.43	77.39	18.04	69.1
Cu	219	25.94	20.09	23.03	6.27	21.26
Pb	219	28.95	19.25	23.62	9.22	22.61
Cr	219	70.46	51.66	61.49	5.14	58.24
Cd	219	0.11	0.03	0.07**	24.46	0.04

注 表中背景值以受人类活动影响较小的天水小陇山土样作为背景值,** 该元素与小陇山土壤重金属含量之间有显著性差异($P<0.01$)。

Pb、Cr 的富集量较低,分别超过背景值的 8.33%、4.47%和 5.58%,同时不具有显著差异性($P>0.05$);Zn 的富集量较大,为背景值的 1.12 倍,但无显著差异性($P>0.05$);同背景值比较,Cd 的富集程度最大,果园土壤 Cd 含量为背景值的 1.75 倍,且在 0.01 水平上具有显著性。由于天水小陇山远离工农业区,当地土壤受人类活动影响较小,其含量来源于成土母质,基本为天水地区土壤固有元素含量。因此,天水地区果园土壤有一定程度的 Zn 和 Cd 的积累,尤其以 Cd 为重,部分样点含量偏高,存在着污染威胁。

2.2 重金属来源分析

相关分析及主成分分析常用于评价土壤中重金属的来源^[13],统计学上相关性较好的元素之间在成因上也有相似之处^[11,14]。表 2 为天水果园土壤重金属和土壤有机质之间的 Pearson 相关关系分析结果。从表中可知,Cu 和 Pb 元素极显著正相关($P<0.001$),Cu 和 Cr,Pb 和 Cr 元素显著正相关($P<0.01$),由此推断 Cu、Pb 和 Cr 元素可能为同一来源。Cu、Pb 和 Cr 与土壤有机质显著正相关(Cu-SOM $P<0.01$,Pb-SOM $P<0.01$;Cr-SOM $P<0.001$),表明这些元素可能来源于成土母质^[15]。Zn 和 Cd 与其他元素及有机质之间都不相关,为其他来源。

表 2 天水苹果园土壤有机物、重金属元素之间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of SOM and heavy metal concentrations in apple orchard soils in Tianshui area

元素	Zn	Cu	Pb	Cr	Cd	SOM
Zn	1					
Cu	-0.08	1				
Pb	-0.12	0.60***	1			
Cr	-0.02	0.41**	0.47**	1		
Cd	-0.06	0.04	0.01	0.04	1	
SOM	-0.18	0.41**	0.48**	0.60***	-0.02	1

注:表中**表示在 0.01 水平上具有显著相关性,***表示在 0.001 水平上具有显著相关性。

主成分分析的优点是把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重金属来源^[16-17]。根据表 3 特征值的相对大小及各主成分的累计贡献率大于 70 % 的原则^[18-20],选取了前 3 个主成分。由于这 3 个主成分的累计方差贡献率达到 80.1%,基本可以解释原始信息^[21-22],其中第一个主成分能解释 40.2%的信息量,前两个主成分累计贡献率达 61.2%。

由表 4 可以看出,第一主成分 PC1 主要由 Cu、Pb 和 Cr 元素决定,主要反映这 3 种元素的含量。天水果园土壤中 Cu、Pb 和 Cr 含量与受人类活动影响较少的小陇山土壤相应的重金属含量较接近(表 1),这 3 种元素两两显著相关,且与土壤有机质显著相关(表 2),故将第一主成分 PC1 作为母质因素或自然因子。

Cd 与第二主成分 PC2 关系最为密切,主要反映第二主成分的迁移转化特征。有研究表明,长期施肥会使土壤中 Cd 含量显著增加^[23]。据统计,天水果园每年施用氮肥 750~1 125 kg·hm⁻²,钾肥 75~120 kg·hm⁻²,

表 3 天水果园重金属元素相关矩阵的特征值及其贡献率

Table 3 Explained variance and eigenvalue of correlation matrix of heavy metal in apple orchards in Tianshui area

主成分	特征值	贡献率%	累计贡献率%
PC1	2.01	40.2	40.2
PC2	1.05	21.0	61.2
PC3	0.95	18.9	80.1
PC4	0.61	12.1	92.2
PC5	0.39	7.8	100.0

表 4 天水果园重金属含量主成分负荷矩阵

Table 4 The principal component matrix of heavy metal in apple orchards in Tianshui area

元素	Zn	Cu	Pb	Cr	Cd
PC1	-0.18	0.83	0.86	0.74	0.08
PC2	-0.69	-0.05	-0.06	-0.12	0.74
PC3	-0.69	-0.01	0.06	-0.16	-0.66

磷肥 $1\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上,肥料利用率只有 30%~40%,大部分残留在土壤中,而化肥中含有一定量的 Cd^[24],这部分 Cd 随化肥的残留而富集在土壤中可能是造成研究区 Cd 含量显著($P<0.01$)高于背景值的主要原因(表 1)。据此推断,天水果园由于长期大量的施肥,导致 Cd 在土壤中明显累积。综上所述,第二主成分 PC2 代表主要的外源人为因素施肥。

第三主成分 PC3 与 Zn 及部分 Cd 关系密切,天水果园土壤中 Zn 与 Cd 在土壤中波动性相对较大,并有一定程度的累积(表 1),其受人类活动影响的可能性也较大。土壤中 Zn 与 Cd 的人为来源不唯一,可能存在多种复杂来源。

3 讨论

影响土壤重金属含量的主要因素有土壤母质、环境状况及社会生产 3 方面^[25]。当前社会工业生产过程中对大气、水体的污染可间接造成土壤重金属含量的增加。此外,工业废弃物对土壤的直接污染也相当严重^[26-28]。农业生产中,尤其是为追求产量而大量使用的化肥及农药也可显著影响土壤重金属的含量。在本次研究中,选取受人为生产活动较小的甘肃小陇山土壤为背景值作为对比,其重金属含量主要是受成土母质因素影响。有研究表明,影响土壤中 Cr 含量的主要因素是土壤母质^[29]。杨军等^[30]研究发现,北京市凉风灌区土壤 Cr 含量依然是受到土壤母质的影响,而在本研究中天水苹果园土壤 Cr 含量与小陇山土壤不存在显著差异性,因此可以认定研究区 Cr 含量主要受成土母质因素影响。此外,Cu 和 Pb 与 Cr 具有显著相关性(表 2),说明此 2 种重金属与 Cr 具有相同的来源,即成土母质,这与本研究 Cu、Pb 和 Cr 含量与小陇山土壤均不存在显著差异性(表 1)相符。据此推断,天水地区果园土壤 Cu、Pb 和 Cr 含量主要受第一主成分即成土母质因素的影响。

通过本次研究发现,研究区土壤 Cd 含量显著($P<0.01$)高于背景值(表 1),土壤中 Cd 可作为施用农药和化肥等农业活动的标识元素^[15,31]。李丽霞等^[32]研究黄土高原沟壑区苹果园土壤重金属含量特征发现,果园土壤 Cd 主要来源于施肥尤其是磷肥的施用。磷矿中含有大量的 Cd,以 P 计算,世界磷矿 Cd 含量的平均值为 $165\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[24],磷矿石中约有 80% Cd 存留于肥料中,长期施用磷肥会使土壤中 Cd 含量显著增加^[23]。张桃红等^[33]的研究表明,碳酸氢铵等氮肥可促进土壤对 Cd 的吸附。所以,在果园生产中的化肥

使用可能是导致土壤 Cd 增加的主要原因。

果园等农业土壤中 Zn 的来源较广,施用锌肥、含 Zn 农药及禽畜粪便等有机肥均可导致土壤中 Zn 含量的升高^[34-35]。磷肥中含 Zn 为 $270\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,我国每年施用过磷酸钙带入土壤中的 Zn 为 $200\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[36]。本研究中,天水果园土壤中有一定程度的 Zn 积累(表 1),这可能与果园长期施用化肥农药及有机肥等有关。Zn 是植物生长必需的营养元素,但碱性土壤中 Zn 大部分以结合态存在,不易被植物吸收^[37]。有研究表明,施肥能改变土壤中 Zn 的形态,促进土壤中 Zn 从有机态、晶体氧化结合态、残渣态向可吸收的水溶态和交换态转化^[33,38]。楼玉兰等^[39]研究发现,土壤施入 N 肥后,pH 显著下降,土壤中 Zn 的溶解度随之增大,增强了土壤中 Zn 的活性,从而提高植物对 Zn 的吸收。施肥等外因既可造成土壤中 Zn 的积累,施肥又可促进植物对 Zn 的吸收,因此土壤中 Zn 存在一种复杂的动态过程。本研究所测定的为 Zn 的全量,对于果园土壤中 Zn 的动态转化过程和 Zn 的形态,尚需进一步分析研究。

4 结论

(1)果园土壤中 Zn、Cu、Pb、Cr 和 Cd 分别在不同程度上具有一定的富集,其中 Cu、Pb、Cr 富集程度较小,超出背景值量在 10%以下,Zn 和 Cd 富集程度较大,为背景值的 1.12 和 1.75 倍,且 Cd 与背景值具有极显著差异性($P<0.01$)。

(2)天水果园土壤中 Cu、Pb 和 Cr 之间存在显著正相关,且均与有机质具有显著相关性,表明这 3 种元素来源可能与成土母质有关,Zn 和 Cd 为其他来源。

(3)主成分分析中前 3 个主成分累计方差贡献率达到 80.1%,其中前 2 个主成分累计贡献率达 61.2%。第一主成分反应 Cu、Pb 和 Cr 元素的含量主要受到成土母质的控制。第二主成分反应 Cd 元素的含量主要受人为因素施肥的影响。Zn 有不同的污染来源,也可能存在复合污染。

参考文献:

- [1] Schulin R, Curchod F, Mondeshka M, et al. Heavy metal contamination along a soil transect in the vicinity of the iron smelter of Krenfikovtzi (Bulgaria)[J]. *Geoderma*, 2007, 140: 52-61.
- [2] Mico C, Recatala 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] 刘庆,王静,史衍玺,等.绿色食品产地土壤重金属空间分布与

- 污染评价[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 90-94.
- LIU Qing, WANG Jing, SHI Yan-xi, et al. Distribution and evaluation of soil heavy metal in green food producing area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(3): 90-94.
- [4] 郑国章, 岳乐平. 洛川苹果园土壤重金属污染调查与评价[J]. 土壤通报, 2008, 39(2): 402-405.
- ZHENG Guo-zhang, YUE Le-ping. Investigation and assessment on heavy metals pollution of soil in Luochuan apple orchard[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(2): 402-405.
- [5] 张彩云, 庞奖励, 申海元. 洛川县不同种植年限果园土壤基本性质与重金属含量评价[J]. 水土保持通报, 2009, 29(1): 32-35.
- ZHANG Cai-yun, PANG Jiang-li, SHEN Hai-yuan. Assessment on contents of heavy metals and properties of apple orchard soil with different planting ages in Luochuan County[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(1): 32-35.
- [6] 刘子龙, 赵政阳, 卢玉妙. 陕西苹果园土壤砷和重金属污染评价[J]. 干旱区研究, 2010, 27(2): 273-276.
- LIU Zi-long, ZHAO Zheng-yang, LU Yu-miao. Evaluation on arsenic and heavy metal pollution in apple orchard soil in Shanxi Province[J]. *Arid Zone Research*, 2010, 27(2): 273-276.
- [7] 马军, 刘爱琴, 侯晓龙. 福州城市边缘区果园土壤 Pb Cu 分布特征与潜在生态危害评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2): 308-313.
- MA Jun, LIU Ai-qin, HOU Xiao-long. Pb, Cu Distribution characteristics and potential ecological risks assessment in orchard soil in the urban fringe of Fuzhou, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(2): 308-313.
- [8] Li W, Zhang M, Shu H. Distribution and fractionation of copper in soils of apple orchards[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2005, 12(3): 168-172.
- [9] 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]. *The Science of the Total Environment*, 2003, 3(11): 205-219.
- [10] 朱美玲, 庞奖励, 张卫青, 等. 洛川塬区典型农业土壤与苹果土壤重金属分布调查与评价[J]. 农业系统科学与综合研究, 2009, 25(2): 142-146.
- ZHU Mei-ling, PANG Jiang-li, ZHANG Wei-qing, et al. Investigation and assessment on heavy metals of agricultural soil and apple orchard soil in Luochuan[J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2009, 25(2): 142-146.
- [11] 章明奎, 王浩, 张慧敏. 浙江海积平原农田土壤重金属来源辨识[J]. 环境科学学报, 2008, 28(10): 1946-1954.
- ZHANG Ming-kui, WANG Hao, ZHANG Hui-min. Distinguishing different sources of heavy metals in soils on the coastal plain of Eastern Zhejiang Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(10): 1946-1954.
- [12] 陶澍. 应用数理统计方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1994: 37-47.
- TAO Shu. Applied mathematical statistics method[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1994: 37-47.
- [13] 李玉, 俞志明, 宋秀贤. 运用主成分分析(PCA)评价海洋沉积物中重金属污染来源[J]. 环境科学, 2006, 27(1): 137-141.
- LI Yu, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian. Application of principal component analysis(PCA) for the estimation of source of heavy metal contamination in marine sediments[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(1): 137-141.
- [14] 尹伟, 卢瑛, 甘海华, 等. 佛山市某工业区周边蔬菜地土壤重金属含量与评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3): 508-512.
- YIN Wei, LU Ying, GAN Hai-hua, et al. Heavy metals concentration and evaluation in soils around an industrial area in Foshan[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3): 508-512.
- [15] 蔡立梅, 马瑾, 周永章, 等. 东莞市农业土壤重金属的空间分布特征及来源解析[J]. 环境科学, 2008, 29(12): 3496-3502.
- CAI Li-mei, MA Jin, ZHOU Yong-zhang, et al. Multivariate geostatistics and GIS-based approach to study the spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soil in the Pearl River Delta, China[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(12): 3496-3502.
- [16] 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: 176-186.
- [17] Luo W, Wang T, 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: 567-576.
- [18] Martin J A R, Arias M L, Corbi 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): 1001-1021.
- [19] 柴世伟, 温琰茂, 张亚雷, 等. 广州市郊区农业土壤重金属污染评价分析[J]. 环境科学研究, 2006, 19(4): 138-142.
- CHAI Shi-wei, WEN Yan-mao, ZHANG Ya-lei, et al. Evaluation on the pollution of agricultural soil heavy metal in Guangzhou city[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, 19(4): 138-142.
- [20] 朱道元, 吴诚鸥, 秦伟良. 多元统计分析与软件 SAS[M]. 南京: 东南大学出版社, 1999.
- ZHU Dao-yuan, WU Chen-ou, QIN Wei-liang. Multivariate statistical analysis and software SAS[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1999.
- [21] 向东进. 实用多元统计分析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2005.
- XIANG Dong-jin. Applied multivariate statistical analysis[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2005.
- [22] 唐守正. 多元统计分析方法[M]. 北京: 中国林业出版社, 1986.
- TANG Shou-zheng. Method of multivariate statistical analysis[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1986.
- [23] 林忠辉, 陈同斌. 磷肥杂质对土壤生态环境的影响[J]. 生态农业研究, 2000, 8(2): 47-50.
- LIN Zhong-hui, CHEN Tong-bin. Effects of associated toxic constituents of phosphate fertilizers on the soil eco-environment[J]. *Eco-agriculture Research*, 2000, 8(2): 47-50.
- [24] 马文奇, 张福锁, 张卫锋. 关于我国资源、环境、粮食安全和可持续发展的化肥产业[J]. 资源科学, 2005, 27(3): 33-40.
- MA Wen-qi, ZHANG Fu-suo, ZHANG Wei-feng. Fertilizer production and consumption and the resources, environment, food security and sustainable development in China[J]. *Resources Science*, 2005, 27(3):

- 33-40.
- [25] Zhang Chaosheng. Using multivariate analyses and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 142(3) :501-511.
- [26] 崔龙鹏, 白建峰, 史永红, 等. 采矿活动对煤矿区土壤中重金属污染研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41(6) :896-904.
- CUI Long-peng, BAI Jian-feng, SHI Yong-hong, et al. Heavy metals in soil contaminated by coal mining activity[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(6) :896-904.
- [27] Ernst W H O, Nielssen H J M. Life-cycle phases of zinc and cadmium-resistant ecotype of *Silene vulgaris* in risk assessment of polymetallic mine soils[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 107(4) :329-338.
- [28] 雷 梅, 岳庆玲, 陈同斌, 等. 湖南柿竹园矿区土壤重金属含量及植物吸收特征[J]. *生态学报*, 2005, 25(5) :1147-1151.
- LEI Mei, YUE Qing-ling, CHEN Tong-bin, et al. Heavy metal concentrations in soils and plants around Shizhuyuan mining area of Hunan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5) :1147-1151.
- [29] Boruvka L, Vacek O, Jehlicka J. Principal component analysis as a tool to indicate the origin of potentially toxic elements in soils[J]. *Geoderma*, 2005, 128 :289-300.
- [30] 杨 军, 郑袁明, 陈同斌, 等. 北京市凉风灌区土壤重金属积累及变化趋势[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(9) :1175-1181.
- YANG Jun, ZHENG Yuan-ming, CHEN Tong-bin, 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.
- [31] Gray C W, McLaren R G, Roberts A H C. The effect of long-term phosphatic fertilizer applications on the amounts and forms of cadmium in soils under pasture in New Zealand[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, 54 :267-277.
- [32] 李丽霞, 郝明德, 薛晓辉, 等. 黄土高原沟壑区苹果园土壤重金属含量特征研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(6) :65-69.
- LI Li-xia, HAO Ming-de, XUE Xiao-hui, et al. Research on soil heavy metal contents of apple orchard in Gully Region of Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(6) :65-69.
- [33] 张桃红, 徐国明, 陈苗苗, 等. 几种铵盐对土壤吸附 Cd^{2+} 和 Zn^{2+} 的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(3) :445-449.
- ZHANG Tao-hong, XU Guo-ming, CHEN Miao-miao, et al. Effects of NH_4^+ salts on sorption of Cd^{2+} and Zn^{2+} in soils [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(3) :445-449.
- [34] 郑袁明, 宋 波, 陈同斌, 等. 北京市不同土地利用方式下土壤锌的积累及其污染风险[J]. *自然资源学报*, 2006, 21(1) :64-72.
- ZHENG Yuan-ming, SONG Bo, CHEN Tong-bin, et al. Zinc accumulation and pollution risk in soils under different land use types in Beijing[J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(1) :64-72.
- [35] 高 明, 车福才, 魏朝福, 等. 长期施用有机肥对紫色水稻土铁锰铜锌形态的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6(1) :11-17.
- GAO Ming, CHE Fu-cai, WEI Chao-fu, et al. Effect of long-term application of manures on forms of Fe, Mn, Cu and Zn in purple paddy soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(1) :11-17.
- [36] 李东坡, 武志杰. 化学肥料的土壤生态环境效应[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(5) :1158-1165.
- LI Dong-po, WU Zhi-jie. Impact of chemical fertilizers application on soil ecological environment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(5) :1158-1165.
- [37] 高怀友, 师荣光, 赵玉杰. 不同土壤中 Zn 有效态含量与全量关系的统计研究[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(8) :1400-1403.
- GAO Huai-you, SHI Rong-guang, ZHAO Yu-jie. Statistical relationship between bio-available Zn and total Zn concentration in soil under non-continuous spatio-temporal condition[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(8) :1400-1403.
- [38] 徐明岗, 张 茜, 孙 楠, 等. 不同养分对磷酸盐固定的污染土壤中铜锌生物有效性的影响[J]. *环境科学*, 2009, 30(7) :2053-2058.
- XU Ming-gang, ZHANG Qian, SUN Nan, et al. Changes in bio-availability of immobilized Cu and Zn bound to phosphate in contaminated soils with different nutrient addition[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(7) :2053-2058.
- [39] 楼玉兰, 章永松, 林咸勇. 氮肥对污泥农用后土壤中重金属活性的影响[J]. *上海环境科学*, 2004, 23(1) :32-36.
- LOU Yu-lan, ZHANG Yong-song, LIN Xian-yong. An effect of nitrogenous fertilizers on activity of heavy metals in sludge applied soil[J]. *Shanghai Environmental Science*, 2004, 23(1) :32-36.