

植烟土壤重金属的有效性及其影响因素研究

王春香¹, 徐 宸², 许安定³, 陈玉成^{1*}, 杨志敏¹, 杨 超³

(1. 西南大学资源环境学院 西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716; 2. 中国烟草总公司重庆市公司, 重庆 400032; 3. 重庆烟草科学研究所, 重庆 400716)

摘 要:通过野外采样和室内分析,研究了植烟土壤中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 的有效态含量特征及其影响因素。结果表明,植烟土壤中 8 种重金属的有效态平均含量分别为 0.92、0.075、0.75、1.62、0.004、1.89、1.14、1.94 mg·kg⁻¹; 重金属有效态含量属于中等变异,变异系数在 48.97%~95.64%之间,其中尤以有效 Hg 和 Pb 变化最为明显,分别为 95.64%和 90.56%,元素分布极为不均。相关分析表明有效 As、Cd、Ni、Pb、Zn 与 8 种元素中大部分元素都呈现较高的相关性,是伴随污染较多的元素,而有效 Cr 与其他元素的相关性很弱;主成分分析反映了土壤重金属有效性受工业和生活污染、农业污染和大气沉降污染影响较明显。通过分析有效态重金属与土壤 pH 和有机质的相关性发现,有效 Cd、Pb 与土壤 pH 呈极显著性负相关,有效 Cr 与 pH 呈显著性负相关;有效 Cd、Pb 与有机质呈极显著性正相关,有效 As、Zn 和 Ni 与有机质呈显著性正相关。

关键词:植烟土壤;重金属;有效性;影响因素

中图分类号:S572 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)08-1532-06 doi:10.11654/jaes.2014.08.010

Availability of Heavy Metals and Its Influencing Factors in Tobacco Grown Soils

WANG Chun-xiang¹, XU Chen², XU An-ding³, CHEN Yu-cheng^{1*}, YANG Zhi-min¹, YANG Chao³

(1. College of Resources & Environment, Southwest University, Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China; 2. Chongqing branch of National Tobacco Corporation, Chongqing 400023, China; 3. Chongqing Tobacco Science Institute, Chongqing 400716, China)

Abstract: Research has showed that total contents of heavy metals in soils are not a good indicator of their eco-environmental impacts. Here availability of heavy metals including As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn in 440 tobacco grown soils was investigated and possible sources of heavy metals were also explored. The average available concentrations of heavy metals were 0.92, 0.075, 0.75, 1.62, 0.004, 1.89, 1.14 mg·kg⁻¹, and 1.94 mg·kg⁻¹ for As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn, respectively. The coefficient of variation (CV) of heavy metal contents ranged from 48.97% to 95.64%, with the greatest variation for Hg and Pb (CV was 95.64% and 90.56%, respectively). These data suggested that available Hg and Pb in soils were largely influenced by human activities, causing extremely uneven distribution. Each of available As, Cd, Ni, Pb, and Zn was highly correlated with most of these 8 elements, implying that they had common sources; while available Cr had very weak correlation with other metals, showing its unique sources. Principal component analysis showed that the availability of heavy metals was strongly influenced by industrial and agricultural sources as well as atmospheric deposition. In addition, soil properties influenced metal availability: soil pH was significantly negatively correlated with available Cd and Pb ($P<0.01$) and available Cr ($P<0.05$); soil organic matter had significantly positive correlation with available Cd and Pb ($P<0.01$), and available As, Zn and Ni ($P<0.05$), implying that soil organic matter was an important factor influencing the availability of heavy metals.

Keywords: tobacco-grown soil; heavy metals; availability; influencing factors

重金属污染已经成为影响土壤环境质量的主要因素^[1]。作为烟叶生产必不可少的基质,植烟土壤一旦

被重金属污染,则可导致烟叶中重金属富集^[2-3]。由于重金属-土壤-植物系统间存在复杂的动态相互作用,土壤中的重金属仅有部分形态能够被植物吸收利用,即植物有效态或植物可利用态^[4],因此用重金属全量来评价其对植物的潜在危害存在不足。袁波等^[5]对菜地土壤 Pb、Cd 的有效态研究表明,菜地土壤中铅、镉有效态含量与小白菜可食部分铅、镉含量的相关性优

收稿日期:2013-12-26

基金项目:中国烟草总公司科技重点项目(110201102007)

作者简介:王春香(1987—),女,云南武定人,硕士研究生,研究方向为环境污染控制。E-mail: wangchunxiangluck@126.com

* 通信作者:陈玉成 E-mail: chenycheng@swu.edu.cn

于全量;朱维晃等^[6]研究表明,植物叶中重金属含量与土壤中重金属有效态含量的相关性更为显著。也有研究表明烟叶中重金属含量与植烟土壤重金属的有效态含量表现出显著正相关^[7],有效态的含量比总量更能反应其对烟叶的危害程度。

目前针对植烟土壤的研究,有学者探讨了烟区环境和生产资料中重金属的全量和污染状况^[8-11],并且分析了烟草生长必需微量元素的有效态含量^[12],但是对重金属元素的植物有效态含量长期以来未进行系统的研究。本文以某典型植烟区为例,探讨了土壤重金属的有效性及其影响因素,以为植烟土壤重金属污染的修复和优质烟叶的生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

选择典型植烟区的代表性田块,于前茬作物收获后、后茬烤烟起垄前采集 0~20 cm 表层土样共 440 个。具体采样方法为:在每个取样田块,根据土块的形状按“S”形随机布设 4~6 个样点的土样构成一个混合样品,采用四分法保留大约 1 kg。样品经自然风干,研磨过筛保存备用。

1.2 样品分析

土壤 pH 值采用电位法,有机质采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定^[13];有效态重金属采用不同的提取剂,即 Cu、Ni、Zn 用 DTPA 浸提^[13],Cd、Pb 用 1 mol·L⁻¹ NH₄OAc 浸提^[14],用原子吸收光谱法测定;Hg、As

和 Cr 用 0.1 mol·L⁻¹ HCl 浸提^[15],Hg 用冷原子吸收光谱法测定、As 用二乙基二硫代氨基甲酸银分光光度法、Cr 用二苯碳酰二肼分光光度法。

1.3 数据处理

采用 Excel 2003 和 SPSS 17.0 软件对数据进行分析 and 处理。

2 结果与分析

2.1 植烟土壤重金属有效态含量的分布特征

研究区内 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 的有效态平均含量分别为 0.92、0.075、0.75、1.62、0.004、1.89、1.14、1.94 mg·kg⁻¹(表 1)。各元素有效态含量样品间的变异系数为 48.97%~95.64%,整体属于中等变异^[16],其中 Hg、Pb 变异最为明显,分别达到 95.64%和 90.56%,说明有效态含量的影响因素复杂,受人为因素等影响更大^[17];8 种元素中 Hg 和 Pb 的有效性受人为因素影响也相对较大。

2.2 植烟土壤有效态重金属之间的关系

采用相关分析、主成分分析和系统聚类相结合的方法,来探讨该植烟区土壤有效态重金属之间的相关性。研究区域内,大部分重金属元素的有效含量之间均达到显著性相关水平(表 2)。As-Cd、As-Pb、Cd-Ni、Cd-Pb、Cr-Zn、Cu-Zn、Hg-Ni、Ni-Pb 之间达到极显著正相关,表明它们可能具有同源性^[18-19]或是伴生关系^[20];As-Ni、Cr-Cu、Cu-Hg、Hg-Zn 间表现出显著性相关;而 Cr-As、Cr-Cd、Cr-Hg、Cr-Pb、Cr-Ni、Cu-Cd、

表 1 植烟土壤重金属有效态含量的统计参数
Table 1 Statistics of available heavy metals in tobacco grown soils

项目	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
含量范围/mg·kg ⁻¹	0.02~2.98	0.004~0.212	0.04~2.47	0.05~4.31	0.001~0.019	0.09~6.32	0.04~10.26	0.07~6.41
平均含量/mg·kg ⁻¹	0.92	0.075	0.75	1.62	0.004	1.89	1.14	1.94
变异系数/%	73.68	55.59	59.85	48.97	95.64	62.78	90.56	75.43

表 2 植烟土壤有效态重金属的相关矩阵
Table 2 Correlation matrix of available heavy metals in tobacco grown soils

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb
Cd	0.200**						
Cr	0.030	0.075					
Cu	-0.278**	-0.089	0.105*				
Hg	-0.159**	-0.188**	-0.098	0.106*			
Ni	0.104*	0.195**	0.045	0.067	0.300**		
Pb	0.278**	0.249**	0.056	-0.161**	-0.189**	0.153**	
Zn	-0.320**	-0.133**	0.130**	0.694**	0.112*	-0.177**	-0.282**

注:**表示 $P<0.01$; *表示 $P<0.05$ 。下同。

Cu-Ni 的相关性不显著。结果表明,有效 As、Cd、Ni、Pb、Zn 与 8 种元素中大部分元素都呈现较高的相关性,是伴随污染较多的元素,而有效 Cr 与其他元素的相关性很弱,说明该元素的累积独特。

Kaiser-Meyer-Olkin 检验表明,KMO 统计量为 0.547,大于 0.5 说明数据适合主成分分析,显著性水平为 0 意味着变量之间并不相互独立^[21]。根据特征值>1 的原则,运用 SPSS 软件对有效态 8 项指标进行主成分分析,用方差最大法进行正交旋转,得到主成分的特征值、方差贡献率及其累计方差贡献率(表 3、表 4)。可以看出,前 3 个主成分累计贡献率为 59.604%,表明已包含样本的大部分信息。

主要因子识别是通过土壤因子对主成分的贡献率即主成分载荷进行分析(图 1、图 2),载荷大的即可认为是主要影响因子,其正负可以反映出因子的复合性^[22]。可以看出,第一主成分在有效态 Cu 和 Zn 上具有较大的正向载荷,由表 2 可以看出其相关系数达到了 0.694,呈极显著水平。冶炼、铜锌合金、镀锌等工业生产以及给排水设施、建筑装饰材料等生活用料^[23]都对 Cu、Zn 污染有贡献。第一主成分在一定程度上可以反映工业和生活污染。

第二主成分在有效 Cd 和 Pb 上均有很大的正向

载荷。研究表明^[24],随着磷肥及复合肥的大量施用,土壤有效 Cd 含量不断增加,作物吸收 Cd 量也相应增加。近年来,农用塑料薄膜大面积推广使用,由于其生产过程中加入了含有 Cd、Pb 的热稳定剂,也增加了土壤重金属污染^[25]。因此,Cd 和 Pb 在一定程度上可以作为反映农业活动水平的因子。

第三主成分在有效 Hg 和 Ni 上有较大的正向载荷。Hg 和 Ni 均为化石燃料燃烧后的产物,Hg 主要来自于燃煤发电,燃烧行业中释放汞量约占 60%^[21],火力电厂和汽车化石燃料产生的飞灰能使大气中 Ni 含量高达 120~170 ng·m⁻³^[26],因而第三主成分可以在一

表 4 方差最大旋转后的主成分因子载荷矩阵

Table 4 Principal component matrix with variance rotation

元素	主成分 1	主成分 2	主成分 3
As	-0.427	0.491	0.085
Cd	-0.006	0.690	0.067
Cr	0.400	0.480	-0.134
Cu	0.863	-0.016	0.110
Hg	0.053	-0.432	0.732
Ni	-0.007	0.304	0.836
Pb	-0.211	0.590	-0.046
Zn	0.867	-0.168	-0.016

表 3 主成分特征值及贡献率

Table 3 Eigenvalues and contribution ratios of principal components

主成分	初始			旋转后		
	特征值	方差贡献率/%	累计方差/%	特征值	方差贡献率/%	累计方差/%
1	2.101	26.260	26.260	1.887	23.586	23.586
2	1.402	17.529	43.788	1.602	20.021	43.607
3	1.265	15.816	59.604	1.280	15.997	59.604

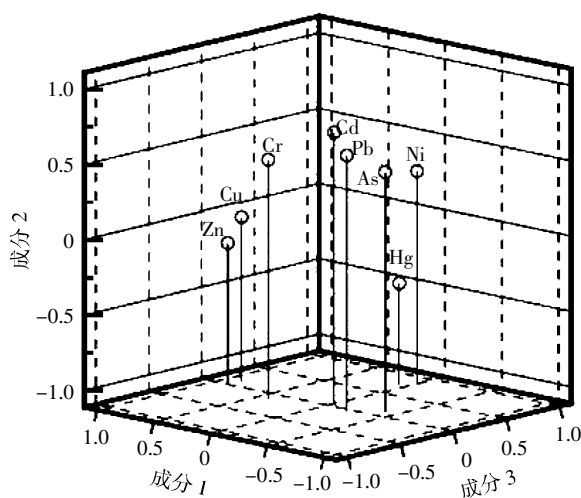


图 1 旋转后的主成分因子载荷

Figure 1 Loading plots of rotated principal components

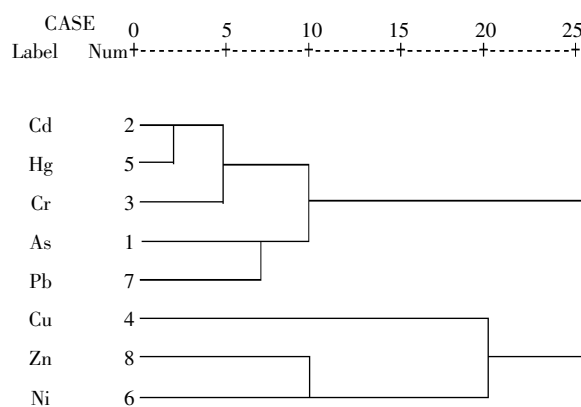


图 2 植烟土壤中重金属的聚类

Figure 2 Cluster of heavy metals in tobacco grown soils

定程度上解释为大气降尘的污染水平。

2.3 植烟土壤重金属生物有效性的影响因素

土壤重金属的形态除了受重金属元素本身性质和含量影响外,也受到土壤理化性质的直接影响,尤以 pH 和有机质影响较为显著^[27]。统计表明,研究区域 pH 值小于 7 的样点比例为 95%,其中小于 6.5 的占 80%,植烟土壤大部分偏酸性。有效态 As、Cu、Hg、Zn 与 pH 呈正相关(表 5),相关系数的大小顺序为 $Hg > Zn > Cu > As$,其中 Hg 元素与 pH 的相关性显著。李永华等^[28]认为随着 pH 值升高,酸提取态汞的含量明显增加。而有效态 Cd、Cr、Ni 和 Pb 与 pH 呈负相关,相关系数的大小顺序为 $Cd > Pb > Cr > Ni$,其中有效态 Cd、Pb 与 pH 的相关性极显著,有效态 Cr 与 pH 的相关性显著。当 pH 值下降时,土壤中 Cd、Pb 和 Cr 的有效态含量增加,容易发生迁移而被烟叶吸收。

研究区域土壤有机质含量范围在 12.34~45.86 $g \cdot kg^{-1}$,平均为 25.94 $g \cdot kg^{-1}$,处于较丰富的水平^[10]。分析发现,除有效态 Hg 与有机质呈负相关外,其余元素与有机质均为正相关关系,其影响的大小顺序为 $Cd > Pb > As > Zn > Ni > Cr > Cu$,其中有效态 Cd 和 Pb 与有机质的相关性极显著,As、Zn 和 Ni 与有机质的相关性显著。

3 讨论

3.1 pH 对植烟土壤重金属生物有效性的影响

土壤 pH 直接影响重金属的活性,从而影响重金属的迁移和淀积行为。pH 升高时,土壤中粘土矿物、水合氧化物和有机质表面的负电荷增加,因而对离子的吸附能力加强,使溶液中重金属离子的浓度降低^[29]。有研究表明,pH 是影响土壤组分对 Cd 吸附解析的重要因素,pH 值下降时,交换态 Cd 含量增加^[30]。Chuan 等^[31]对污染土壤的 Cd、Pb 研究结果指出,在碱性条件下,其有效态含量很低;李忠义等^[32]也指出 Cd、Pb 与 pH 呈极显著负相关,与本研究区域植烟土壤中有效态 Cd、Pb 与 pH 的相关性结果一致。因此,有效控制土壤中 Cd、Pb 元素对烟叶的胁迫,可以通过调控 pH 值来实现,如施用石灰提高土壤 pH 值^[33]。

3.2 有机质对植烟土壤重金属生物有效性的影响

有机质对重金属形态的影响机制复杂:一是能够提高土壤 pH 值,增加土壤固相有机质对重金属的吸附,形成难溶性沉淀,降低土壤中重金属的活性;二是有机质中释放出的 H^+ 可与土壤重金属离子交换^[29],腐殖质中的富里酸与重金属形成易溶的络合物,从而增加土壤溶液中重金属离子浓度^[34]。一般情况下有机质与重金属有效态呈负相关,而研究区域植烟土壤中有效 As、Cd、Ni、Pb 和 Zn 与有机质均达到显著性正相关。钟晓兰等^[34]发现有机质对重金属有效态含量有较大正向作用;袁波等^[17]研究表明有效 Pb 与有机质极显著正相关,是由于富里酸与重金属形成易溶的络合物;李忠义等^[32]研究表明,有效态 Cd、Pb、Zn 与有机质呈极显著正相关;刘洋等^[35]研究也表明土壤有效 As、Cd 与有机质显著正相关,并指出研究区土壤施用肥料中含有一定量的重金属。目前,大量施肥导致土壤重金属含量增加的报道较多^[27,36],因此,实际烟草生产中,在保证烟叶生产的基础上,尽量少施肥或施入重金属含量较低的有机肥,这样可以有效减少土壤中 Cd、Pb、As 和 Zn 等元素对烟叶的胁迫。

由相关分析可知,pH 和有机质对不同重金属有效态的影响作用大小和方向不同,表明有效态含量并不完全受 pH 和有机质影响,还受到重金属全量、粘粒、粉粒、砂粒及 CEC、 FeO_x 、 MnO_x 含量及土壤类型共同影响,其中重金属全量是影响较大的因素^[27]。因此,进一步分析植烟土壤中各重金属的形态与全量以及土壤理化性质的关系具有重要意义。

4 结论

(1)植烟土壤中 8 种重金属元素有效态含量属于中等变异,范围在 48.97%~95.64%之间,Hg 和 Pb 变异相对较大,表明重金属有效态含量受人为因素影响较大。

(2)植烟土壤重金属有效态含量之间大多表现出显著的相关性。As、Cd、Ni、Pb、Zn 是伴随污染较多的元素,而 Cr 与其他元素的相关性很弱。

(3)植烟土壤重金属有效性的三个主成分分别反

表 5 植烟土壤有效态重金属与 pH 及有机质的相关系数

Table 5 Correlation coefficients of available heavy metals with pH and organic matter in tobacco grown soils

项目	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
pH	0.004	-0.411**	-0.105*	0.006	0.153*	-0.035	-0.310**	0.080
有机质	0.191*	0.359**	0.075	0.067	-0.042	0.095*	0.235**	0.104*

映工业与生活污染源、农业污染源、大气自然污染源。

(4)土壤理化性质显著影响植烟土壤重金属的有效性,其中pH和有机质主要影响Cd、Pb的有效性,而As、Zn和Ni的有效性则主要为有机质所控制。

参考文献:

- [1] 王作雷,蔡国梁,李玉秀,等.土壤重金属污染的非线性可拓综合评价[J].土壤,2004,36(2):151-156.
WANG Zuo-lei, CAI Guo-liang, LI Yu-xiu, et al. Nonlinear extension multi-factorial evaluation method of soil heavy metal pollution[J]. *Soils*, 2004, 36(2): 151-156.
- [2] 张艳玲,周汉平.烟草重金属研究概述[J].烟草科技,2004(12):20-23.
ZHANG Yan-ling, ZHOU Han-ping. Summary on study of heavy metal elements in tobacco[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2004(12): 20-23.
- [3] 陈庆华,陈玉成.吸烟过程中的重金属来源解析及预防[J].微量元素与健康研究,2005,22(5):47-49.
CHEN Qing-hua, CHEN Yu-cheng. Heavy metals source analyze in smoking and its reduction strategy[J]. *Studies of Trace Elements and Health*, 2005, 22(5): 47-49.
- [4] Impellitteri C A, Saxe J K, Cochran M, et al. Predicting the bioavailability of copper and zinc in soils: Modeling the partitioning of potential bioavailable copper and zinc from solid to soil solution[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2003, 22(6): 1380-1386.
- [5] 袁波.北碚区菜地土壤铅、镉全量与有效态含量分析与评价[D].重庆:西南大学,2012.
YUAN Bo. Analysis and assessment the full amount and effective state content of lead and cadmium of vegetable plantation soils in Beibei District[D]. Chongqing: Southwest University, 2012.
- [6] 朱维晃,杨元根,毕华,等.海南土壤中Zn、Pb、Cu、Cd四种重金属含量及其生物有效性的研究[J].矿物学报,2004,24(3):239-244.
ZHU Wei-huang, YANG Yuan-gen, BI Hua, et al. Research on the total bioavailable concentrations and bioavailability of Zn, Pb, Cu and Cd in soils in Hainan Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2004, 24(3): 239-244.
- [7] Singhl J S, Milchunas D G, Lauenroth W K. Soil water dynamic and vegetation patterns in a semi arid grassland[J]. *Plant Ecology*, 1998, 134(1): 77-89.
- [8] 魏修彬.重庆植烟土壤养分状况分析及合理施肥初探[D].郑州:河南农业大学,2012.
WEI Xiu-bin. Preliminary study on soil nutrients condition and rational fertilization in tobacco-planting districts of Chongqing City[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2012.
- [9] 徐畅,高明,谢德体,等.重庆市植烟土壤重金属含量特征及污染评价[J].水土保持学报,2009,23(4):141-145.
XU Chang, GAO Ming, XIE De-ti, et al. Heavy metal content characteristics and pollution evaluation in tobacco planting soil of Chongqing[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(4): 141-145.
- [10] 关博谦.重庆市烤烟关键性元素调控研究[D].重庆:西南农业大学,2005.
GUAN Bo-qian. On regulation and control of key elements of tobacco in Chongqing[D]. Chongqing: Agricultural University of Southwest, 2005.
- [11] 马啸,杨志敏,李云平,等.重庆市主产烟区重金属污染背景特征分析[J].三峡环境与生态,2010,3(3):23-25,59.
MA Xiao, YANG Zhi-min, LI Yun-ping, et al. Heavy metals contamination background of main tobacco-growing areas in Chongqing[J]. *Environment and Ecology in the Three Gorges*, 2010, 3(3): 23-25, 59.
- [12] 刘国顺,李娟,黄克久.重庆植烟土壤有效态微量元素状况分析[J].烟草科技,2010(5):54-58.
LIU Guo-shun, LI Juan, HUANG Ke-jiu. Available microelement contents in tobacco growth soils of Chongqing[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2010(5): 54-58.
- [13] 皮广洁,唐书源.农业环境监测原理与应用[M].成都:成都科技大学出版社,1998:88-99.
PI Guang-jie, TANG Shu-yuan. Principle and application of agricultural environmental monitoring[M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1998: 88-99.
- [14] 顾国平,章明奎.蔬菜地土壤有效态重金属提取方法的比较[J].生态与农村环境学报,2006,22(4):67-70.
GU Guo-ping, ZHANG Ming-kui. Methods for extraction of available heavy metals in soils of vegetable fields[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(4): 67-70.
- [15] 张利香,侯明.土壤中有效态汞的最佳萃取条件研究[J].农业环境科学学报,2006,25(6):1675-1678.
ZHANG Li-xiang, HOU Ming. Study on the optimal extraction conditions of bioavailable Hg in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(6): 1675-1678.
- [16] 徐英,陈亚新,史海滨,等.土壤水盐空间变异尺度效应的研究[J].农业工程学报,2004,20(2):1-5.
XU Ying, CHEN Ya-xin, SHI Hai-bin, et al. Scale effect of spatial variability of soil water-salt[J]. *Transactions of the CASE*, 2004, 20(2): 1-5.
- [17] 袁波,傅瓦利,蓝家程,等.菜地土壤铅、镉有效态与生物有效性研究[J].水土保持学报,2011,25(5):130-134.
YUAN Bo, FU Wa-li, LAN Jia-cheng, et al. Study on the available and bioavailability of lead and cadmium in soil of vegetable plantation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5): 130-134.
- [18] 程芳,程金平,桑恒春,等.大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析[J].环境科学,2013,34(3):1062-1066.
CHENG Fang, CHENG Jin-ping, SANG Heng-chun, et al. Assessment and correlation analysis of heavy metals pollution in soil of Dajinshan Island[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(3): 1062-1066.
- [19] 邱海源.土壤重金属潜在生态危害评价及其同源相关性研究[J].资源节约与环保,2011(1):68-70.
QIU Hai-yuan. Assessment of potential ecological hazard and study on homologous correlation of heavy metal in soil[J]. *Resource Saving and Environmental Protection*, 2011(1): 68-70.
- [20] 王济,张凌云.贵阳市表层土壤重金属污染元素之间的相关性分析[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2006,24(3):33-36.

- WANG Ji, ZHANG Ling-yun. The relativity between elements of heavy metal contamination in surficial soil of Guiyang, Guizhou[J]. *Journal of Guizhou Normal University(Natural Sciences)*, 2006, 24(3):33-36.
- [21] 赵胜男. 乌梁素海重金属环境地球化学特征及其存在形态数值模拟分析[D]. 内蒙古农业大学, 2013.
- ZHAO Sheng-nan. Environmental geochemistry of heavy metal and modelling analysis of their speciation for Wuliangsuhai Lake in Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013.
- [22] 周文麟, 李仁英, 岳海燕, 等. 南京江北地区菜地土壤有效态重金属的含量及空间分异特征[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(3): 451-457.
- ZHOU Wen-lin, LI Ren-ying, YUE Hai-yan, et al. Concentrations and spatial distribution characteristics of available heavy metals in vegetable soils in Jiangbei Area of Nanjing City[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(3):451-457.
- [23] 李 宁. 铜锌硫化矿浮选分离研究[D]. 长沙:中南大学, 2012.
- LI Ning. Study on flotation separation of copper-zinc sulphide minerals [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [24] 肖 军, 秦志伟, 赵景波. 农田土壤化肥污染及对策[J]. 环境保护科学, 2005, 31(5):32-34.
- XIAO Jun, QIN Zhi-wei, ZHAO Jing-bo. Status and countermeasures of farmland soil polluted by chemical fertilizer[J]. *Environmental Protection Science*, 2005, 31(5):32-34.
- [25] 褚卫红, 石亚辉. 农用地膜在农业生产中的作用、影响及对策[J]. 内蒙古农业科技, 2007(增刊):142-143.
- ZHU Wei-hong, SHI Ya-hui. Effect, influence and countermeasures of plastic film in agricultural production[J]. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2007(Suppl):142-143.
- [26] 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.
- ZHONG Xiao-lan, ZHOU Sheng-lu, ZHAO Qi-guo, et al. Coregionalization, spatial-correlation and spatial-factor analysis of soil available heavy metals in a typical region of the Yangtze River Delta[J]. *Environmental Sciences*, 2007, 28(12):2758-2765.
- [27] 钟晓兰, 周生路, 黄明丽, 等. 土壤重金属的形态分布特征及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4):1266-1273.
- ZHONG Xiao-lan, ZHOU Sheng-lu, HUANG Ming-li, et al. Chemical form distribution characteristic of soil heavy metals and its influencing factors[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(4):1266-1273.
- [28] 李永华, 杨林生, 李海蓉, 等. 湘黔汞矿区土壤汞的化学形态及污染特征[J]. 环境科学, 2007, 28(3):654-658.
- LI Yong-hua, YANG Lin-sheng, LI Hai-rong, et al. Chemical speciation and pollution characteristics of soil mercury in mercury deposit area of Western Hunan-Eastern Guizhou Province[J]. *Environmental Sciences*, 2007, 28(3):654-658.
- [29] 关天霞, 何红波, 张旭东, 等. 土壤中重金属元素形态分析方法及形态分布的影响因素[J]. 土壤通报, 2011, 42(2):503-512.
- GUAN Tian-xia, HE Hong-bo, ZHANG Xu-dong, et al. The methodology of fractionation analysis and the factors affecting the species of heavy metals in soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(2):503-512.
- [30] 张会民, 徐明岗, 吕家珑, 等. pH 对土壤及其组分吸附和解吸的影响研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊):320-324.
- ZHANG Hui-min, XU Ming-gang, LÜ Jia-long, et al. A review of studies on effects of pH on cadmium sorption and desorption in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(Suppl):320-324.
- [31] Chuan M C, Shu G Y, Liy J C. Solubility of heavy metals in a contaminated soil: Effects of redox and pH[J]. *Water Air Soil Pollution*, 1996, 90:543-556.
- [32] 李忠义, 张超兰, 邓超冰, 等. 铅锌矿区农田土壤重金属有效态空间分布及其影响因子分析[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5):1772-1776.
- LI Zhong-yi, ZHANG Chao-lan, DENG Chao-bing, et al. Analysis on spatial distribution of soil available heavy metals and its influential factors in a lead-zinc mining area of Guangxi, China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(5):1772-1776.
- [33] 周泽庆, 招启柏, 朱卫星, 等. 重金属污染植烟土壤改良剂原位修复研究进展[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(11):5100-5102, 5124.
- ZHOU Ze-qing, ZHAO Qi-bai, ZHU Wei-xing, et al. Advances in research on remediation *in situ* of modifiers for tobacco-planted soil polluted by heavy metals[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(11):5100-5102, 5124.
- [34] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 土壤有效态 Cd、Cu、Pb 的分布特征及影响因素研究[J]. 地理科学, 2010, 30(2):254-260.
- ZHONG Xiao-lan, ZHOU Sheng-lu, LI Jiang-tao, et al. Soil available Cd, Cu, Pb distribution characteristic and its influencing factors[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(2):254-260.
- [35] 刘 洋, 张玉龙, 张玉玲, 等. 辽宁省设施土壤重金属 Cd、Ni、As 有效态含量及其影响因素的研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(6):1131-1134.
- LIU Yang, ZHANG Yu-long, ZHANG Yu-ling, et al. Soil available Cd, Ni and As concentrations and its influencing factors in the protected fields of Liaoning Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(6):1131-1134.
- [36] 武小净, 李德成, 胡 锋, 等. 福建典型烟区土壤、灌溉水和肥料中重金属含量调查[J]. 土壤, 2013, 45(2):246-249.
- WU Xiao-jing, LI De-cheng, HU Feng, et al. Heavy metal contents in soil, irrigation water and fertilizers of typical tobacco-planting region of Fujian Province[J]. *Soils*, 2013, 45(2):246-249.