

丹江口水库淅川淹没区土壤中汞和砷的赋存特征及生态风险评价

余加平, 武 俐, 赵同谦*, 张坤峰

(河南理工大学资源环境学院, 河南 焦作 454000)

摘 要:为研究丹江口水库淅川淹没区土壤中 Hg 和 As 的赋存特征及潜在风险,采集高程在 170 m 以下 8 个乡镇 18 个采样点不同利用类型的土壤样品共 30 个,微波消解后采用氢化物发生原子荧光光谱法测定。结果表明:淅川淹没区土壤中 Hg 和 As 的含量均未超过国家规定的土壤环境质量 II 类标准(GB15618—1995),但 Hg 的变异程度较强,反映了在淹没区各区域土壤中 Hg 的来源存在较大差异。Hg 和 As 的含量与土壤的理化性质存在一定的相关性:pH 与 Hg 的含量呈极显著负相关,与 As 呈显著正相关;有机质(TOC)和 Hg 的含量呈显著正相关,与 As 呈负相关,但显著性不明显。采用 Hakanson 潜在生态风险指数法对土壤中 Hg 和 As 进行风险评价,综合潜在风险指数表明,研究区 Hg 和 As 的总潜在生态风险值较低,生态危害程度为轻微污染。从单元素角度分析,Hg 的潜在生态危害程度要高于 As,且部分属于中等污染水平,值得进一步关注。

关键词:土壤;重金属;分布特征;风险评价

中图分类号:X820.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)01-0111-07 doi:10.11654/jaes.2013.01.017

Distribution Characteristics and the Potential Ecological Risk of Hg and As in the Soil of Xichuan Submerged Area in the Danjiangkou Reservoir, China

SHE Jia-ping, WU Li, ZHAO Tong-qian*, ZHANG Kun-feng

(Department of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The distribution characteristics and potential ecological risk of Hg and As in the soil of Xichuan submerged area in the Danjiangkou Reservoir were studied. Thirty soil samples were collected and determined using hydride generation-atomic fluorescence spectrometry after microwave digestion. The results showed that the concentrations of Hg and As met grade II of the Environmental Quality Standard for Soil. However the variation of Hg was significant, which indicated different sources of Hg in the soil of Xichuan. The contents of Hg and As were correlated to soil properties. There were significantly negative relationship between pH and Hg, positive relationship between pH and As and positive relationship between organic matter and Hg. The negative relations between organic matter and As was not significant. The potential ecological risks of Hg and As assessed to be low in most areas of the Danjiangkou Reservoir by using the Hakanson ecological risk index method. The single factor analysis indicated a higher ecological risks level for Hg than As for irrigation regions. The moderate pollution level of Hg in some area of Danjiangkou Reservoir calls for further attention.

Keywords: soil; heavy metals; distribution characteristics; risk assessment

南水北调中线工程是国家优化资源配置及区域
经济可持续发展的特大型引水工程,其渠首位于河南
省南阳市淅川县的陶岔村。丹江口水库在已建成初期

规模的基础上,坝顶高程从现在的 162 m,加高至
176.6 m,将增加淹没区面积 307.7 km²,淹没生产用地
1.57 万 hm²,其中耕地 1.48 万 hm²^[1-2]。为确保南水北
调中线工程源头和沿线的水质安全,河南省已经关闭
了水源地水质保护范围内的一批污染企业,点源污染
问题得到了有效控制,但对非点源污染问题的研究尚
缺乏足够的研究基础。

与氮、磷等常规非点源污染物相比,重金属元素

收稿日期:2012-06-15

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-09-0120)

作者简介:余加平(1978—),女,湖北随州人,实验师,主要从事环境质
量检测及风险评估研究。E-mail:shejiaping@hpu.edu.cn

*通信作者:赵同谦 E-mail:zhaotongqian@126.com

的种类较多,理化性质差异较大,不能被土壤微生物所降解。当进入土壤中的重金属积累达到一定程度时,一方面,会对“土壤-植物”系统产生毒害和破坏作用,并对作物的生长、产量和品质产生较大危害,并通过食物链,对人类的健康造成潜在威胁;另一方面,赋存于土壤中的重金属在土壤可溶性有机质的作用下,可以缓慢的发生土壤-水界面的迁移过程,从而造成水体的重金属非点源污染。因此,土壤中重金属污染及其控制引起人们的广泛关注^[3-5]。国内学者对重金属在典型地区的土壤^[6]、沉积物^[7]、河流、湖泊^[8]以及大型水库中^[9-11]的赋存进行了大量的研究。

本文以丹江口水库淅川淹没区为研究区域,以典型重金属 Hg 和 As 为研究对象,研究了该地区耕地(旱地)、水田、果园、消落带和底泥中 Hg 和 As 的含量及分布特征,采用 Hakanson 潜在生态风险指数法对土壤中 Hg 和 As 进行风险评价,进而为南水北调中线水源地环境保护和环境管理措施提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于河南省淅川县,人口 15.6 万人,耕地 0.8 万 hm^2 。淅川县属北亚热带向暖温带过渡的季风性气候,年平均降水 804.3 mm,土壤以黄棕壤为主,水资源丰富,丹江、灌河、淇河、滔河、刁河 5 条河流贯

穿全境^[1]。

1.2 样品采集与处理

土壤样品采集遵循《农田土壤环境质量监测技术规范》NY/T 395—2000 的有关准则,于 2010 年设置 18 个采样点(以村庄为单位)5 种不同样品类型的表层土壤(0~20 cm)样品 30 个,采样约 500 g,样品去掉石块和草根等杂物后混匀,置于聚乙烯土样袋,避光风干,研磨过 100 目筛,低温保存备用。采集地点涉及 8 个乡镇,分别为金河镇、大石桥乡、老城镇、淘河乡、盛湾镇、仓房镇、香花镇和马蹬镇。采用 GPS 定位。具体采样点名称及位置见表 1 和图 1。

1.3 样品分析

采用闷罐微波消解法对土壤样品进行消解,氢化物发生原子荧光光谱法(HG-AFS)对土壤中 Hg 和 As 进行检测分析^[12]。土壤中有机质含量及 pH 值测定参照国标(NY/T 1121.6—2006, NY/T 1121.2—2006)分别采用重铬酸钾容量法和电位法。实验所用试剂未加说明均为分析纯,试验用水均为 Milipore 超纯水。所采集的样品土壤类型为黄棕壤, pH 分布范围为 5.6~6.8, TOC 含量范围为 2.93~29.99 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.4 质量控制

分析过程采用国家标准物质 GBW07310 进行质量控制。测试中随机抽取 3~5 个样品做 5 次平行测定,同批次样品设定空白样和标准物质(GBW07310)

表 1 土壤各采样点名称及地理坐标

Table 1 The sampling sites name and station of the soil

采样点编号	采样点名称	样品类型	经度	纬度	高程/m
1	陶岔	旱地	111°35'6.2"	32°40'6.0"	165
2	杨岗	旱地、消落带、底泥	111°33'31.2"	32°42'40.8"	165
3	岗上	旱地、消落带、底泥	111°32'11.1"	32°46'35.0"	165
4	北王营	旱地	111°32'20.6"	32°49'27.1"	167
5	白渡滩	旱地	111°24'0.4"	32°57'18.6"	168
6	虎山坡	旱地、消落带、底泥	111°25'8.0"	32°59'16.4"	163
7	徐家岭	旱地	111°17'48.5"	33°07'13.6"	170
8	张湾	旱地	111°20'34.1"	33°05'25.3"	165
9	狮子港	旱地、消落带、底泥	111°20'21.5"	32°59'23.5"	165
10	东岳庙	旱地、水田	111°19'38.3"	33°00'52.4"	166
11	赵河	旱地、果园	111°13'18.2"	33°02'23.9"	168
12	柳家全	旱地、水田	111°09'40.6"	33°04'28.4"	166
13	余营	旱地	111°08'46.8"	33°03'22.1"	167
14	上周湾	旱地	111°07'26.8"	33°05'25.3"	163
15	兴化市	旱地	111°16'43.4"	32°58'0.5"	160
16	姚营	旱地、果园	111°13'53.8"	32°56'19.6"	170
17	宋湾	旱地	111°18'22.6"	32°57'6.9"	160
18	侯家坡	旱地	111°23'30.3"	32°47'59.5"	167

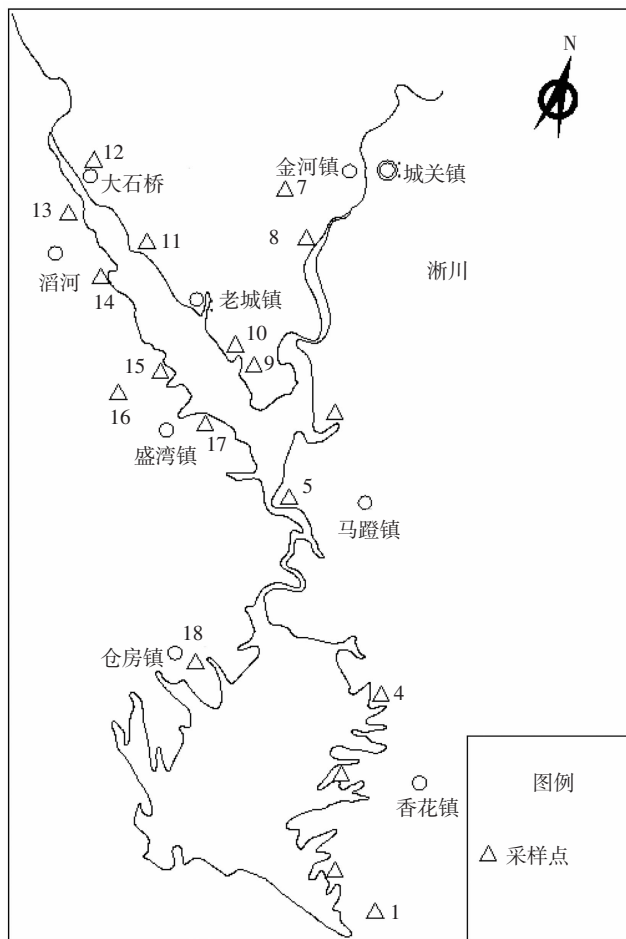


图 1 研究区位置示意图
Figure 1 Schematic graph of study area

对照,平行误差均小于 10%,Hg 和 As 的加标回收率分别为 101.2%~104.8%和 86.6%~98.8%。

1.5 数据处理

本文中,采样点分布图采用 AutoCAD2004 软件制作,数据统计及分析采用 SPSS 15.0 和 Origin 7.0

软件完成。

2 结果与分析

2.1 淅川淹没区土壤中 Hg 和 As 的含量及分布特征

丹江口水库淅川淹没区土壤中 Hg 和 As 的含量统计结果如表 2 所示。整体看来,不同土地利用类型 Hg 的含量大小依次为果园>河流底泥>水田>旱地>消落带,As 的含量大小依次为果园>旱地≈消落带>河流底泥>水田,但变小的趋势不是很明显。

在不同的样品类型中,果园中的 Hg 含量最高,消落带中最低。有关果园土壤中的 Hg 含量相对于其他样品类型较高,在不同地区,例如川中典型丘陵区^[13]、北京郊区土壤^[14]、黄土高原^[15]中均有发现。土壤中 Hg 的来源一般分为地质背景^[16]、化肥农药施用^[17-19]、大气干湿沉降^[20]、污水灌溉^[21]等。在本文所研究的 5 种样品类型中,耕作区(果园、旱地和水田)中的 Hg 含量要远高于河南省 Hg 的土壤环境背景值 0.026 mg·kg⁻¹^[22],是全国 Hg 土壤环境背景值(0.15 mg·kg⁻¹)的 1~2 倍。研究区域内的果园多为南水北调工程开始后,当地实行退耕还林、坡改梯后形成的,并且该区域主要地貌为山地和丘陵,耕作方式较为初级,不存在污灌因素。因此,耕作区的 Hg 可能主要来源于化肥农药的施用。这一点从消落带中的 Hg 含量也可以得到证实。消落带中的 Hg 含量要小于耕作区而大于背景值,原因为消落带是水库季节性水位涨落使库区被淹没土地周期性出露于水面的区域,作为库区水域生态系统和岸上陆地生态系统的重要交错地带,人类活动与自然因素相互作用影响了其中 Hg 的赋存^[23]。河流底泥中 Hg 也较高,其主要原因可能是沿河流域人口密集,人地矛盾突出,城镇生活污水、工业废水以及在水库支流

表 2 丹江口库区土壤中 Hg 和 As 的含量及统计参数
Table 2 Contents and summarized statistics of Hg and As in soil from Danjiangkou Reservoir

重金属元素	样品类型	范围/mg·kg ⁻¹	均值/mg·kg ⁻¹	标准差/mg·kg ⁻¹	变异系数/%	占土壤环境质量标准(GB 15618—1995)比例/%		
						一级	二级	三级
Hg	旱地	0.06~0.27	0.14	0.06	52.29	55.56	44.44	0
	水田	0.13~0.16	0.15	0.21	141.42	50	50	0
	果园	0.27~0.31	0.29	0.03	9.75	0	100	0
	消落带	0.08~0.12	0.09	0.02	21.03	100	0	0
	河流底泥	0.09~0.28	0.19	0.11	56.26	50	50	0
As	旱地	6.84~30.45	17.18	4.99	29.07	5.56	94.44	0
	水田	11.74~15.45	13.60	2.62	19.30	50.00	50.00	0
	果园	16.83~20.47	18.65	2.57	13.80	0	100	0
	消落带	13.95~19.83	17.27	2.79	16.19	25	75	0
	河流底泥	12.71~17.95	15.41	2.15	13.97	25	75	0

的大规模的采砂活动中和许多小采矿点的废水未经处理而直接排放所致。

在不同的样品类型中,As 的含量尽管表现为果园>旱地≈消落带>河流底泥>水田,但差异没有 Hg 明显,而且与 Hg 相比,仅高出河南省 As 土壤背景值^[22] ($9.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 不到一倍,与全国砷土壤环境背景值 ($15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 相当,这说明该区域内的外源性 As 污染现象不太明显。其原因可能有二:一是砷本身在表层土壤中主要以离子态的 As(V) 形式存在^[24],而且与土壤的结合较弱,易于迁移至水体或者被土壤中的微生物转化为挥发态^[25];二是当地畜牧业以散养为主,几乎没有集约化养殖所带来的 As 的外源性污染^[26]。

参照国家土壤环境质量标准(GB15618—1995),对浙川淹没区土壤中 Hg 和 As 的含量进行对比分析,结果表明,浙川地区土壤中 Hg 和 As 的含量均未超过国家规定的二级质量标准。

变异系数是统计数波动的参数,在一定程度上反映了该元素的分布特征。淹没区土壤中 Hg 的变异程度较强,其中水田最高 (141.42%),其次是底泥 (56.26%) 和旱地 (52.29%),果园最小 (9.75%),反映了在淹没区各区域土壤中 Hg 的含量存在较大差异。这说明水田土壤中 Hg 的来源并不单一,局部含量较高的点可能受人为因素影响较强,而果园中 Hg 的主要来源较为单一,可能主要为人源。As 的变异程度较弱,最高的为旱地达 29.07%,水田、果园、消落带和底泥中的 As 含量变异程度相当,反映了 As 的空间分异较小或污染程度具有相似性,并且受人为因素影响较小。

2.2 浙川淹没区土壤中 Hg、As 和土壤 pH 及有机质含量相关性分析

已有的研究表明,土壤 pH 和有机质含量是影响土壤重金属含量的重要因子。pH 主要是通过影响重金属化合物在土壤溶液中的溶解度来影响重金属的行为,进而影响土壤重金属的含量^[9,27],而有机质含有羧基、羟基、羰基和甲氧基等活性功能,可作为有机配体与土壤中的金属离子发生离子交换、吸附、络合、螯合等一系列反应,影响金属离子在土壤中的形态、迁移转化^[28]。

表 3 为土壤 Hg、As 含量和土壤 pH、有机质之间的相关性分析。从表 3 可知,丹江口水库浙川淹没区土壤 As 含量与 pH (5.6~6.8) 呈显著正相关 ($P<0.05$)。实验室模拟研究表明,As 与其他重金属不同,随 pH 的升高在土壤上的吸附减弱^[29-30],但有的研究认为,

表 3 土壤重金属与土壤理化性质之间的相关性分析

Table 3 Correlative analysis between physical properties and heavy metals content

		Hg	As	pH	TOC
Hg	Pearson Correlation	1	-0.153	-0.650**	0.596*
	Sig. (2-tailed)		0.419	0.001	0.01
As	Pearson Correlation		1	0.400*	-0.201
	Sig. (2-tailed)			0.029	0.286
pH	Pearson Correlation			1	-0.450*
	Sig. (2-tailed)				0.013
TOC	Pearson Correlation				1
	Sig. (2-tailed)				

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

As 在土壤-水界面的迁移除了受 pH 影响外,还与土壤的性质、矿物组成有密切的关系^[31],例如,砷酸根在粘土上的吸附在 pH 为 6.0 附近时,吸附量出现峰值,随后随 pH 增加砷酸根的吸附量反而下降^[32],这与本研究的结果一致。

研究区土壤 Hg 含量与 pH 值呈极显著负相关 ($P<0.01$),这可能有两方面的原因:一是土壤中的汞在淹水厌氧条件以及高 pH 环境下,易形成二甲基汞,易挥发、继而被光解为汞、甲烷和乙烷,从而使土壤中 Hg 的含量减少^[9,27];二是土壤 pH 在 5.6~6.8 之间,Hg 主要以 $\text{Hg}(\text{OH})\text{Cl}$ 和 $\text{Hg}(\text{OH})_2$ 的形式存在,而这两种存在形式相对于汞离子在土壤上的吸附要弱,容易解析到水相^[33-34],与其他地区的研究结果类似^[35-36]。本研究区土壤 Hg 含量与 TOC 含量呈现明显正相关关系,这是因为尽管土壤中腐殖质含量较低,但是由于腐殖质表面积和吸附量超过任何粘土矿物,其吸附 Hg 的能力远远大于粘土矿物。由于富含有机质的土壤中明显存在 Hg 富集现象^[37],在一定土壤条件和时间限制下,土壤有机质增加 1%,Hg 的固定率可提高 30%^[38]。

2.3 浙川淹没区土壤中重金属风险评价

本研究采用瑞典学者 Hakanson^[39]提出的潜在生态危害指数法(risk index, RI)对丹江口水库浙川淹没区土壤中 Hg 和 As 的污染及生态风险进行评价。该方法考虑到环境对重金属污染的敏感程度、不同重金属的毒性以及重金属区域背景值的差异,能够综合反映重金属对生态环境影响潜力的指标^[39-41],是目前较为常用的评价方法。重金属生态危害程度的划分标准见表 4。

潜在生态危害指数 RI 的计算方法如下:

表4 潜在生态危害系数、危害指数与生态危害程度分级

Table 4 Potential ecological risk coefficient, index and classification of risk intensity

生态危害 系数	生态危害程度				
	轻微	中等	强	很强	极强
E_i	<40	40~80	80~160	160~320	≥320
RI	<150	150~300	300~600	≥600	

$$RI = \sum E_i = \sum T_i (C_s^i / C_n^i)$$

式中, C_s^i 为表层沉积物中重金属 i 的实测值; C_n^i 为重金属 i 的参比值; T_i 为重金属 i 的毒性系数, 此值反映了该种重金属的毒性水平及水体对其污染的敏感性; E_i 为重金属 i 的潜在生态危害系数。

表5为丹江口水库淅川淹没区土壤中 Hg 和 As 的单项潜在生态风险指数 (E_{Hg} 和 E_{As}), 以及总潜在生态风险指数 (RI)。由表5可知, 研究区重金属的总潜在生态风险值较低, 生态危害程度为轻微污染。从单元元素角度分析可知: Hg 的潜在生态危害程度高于 As, 在所有样品中, Hg 的生态危害程度有 83.33% 属于轻微污染, 16.67% 属于中等污染; As 均为轻微污染, 潜在生态危害程度较低。

表5 丹江口库区土壤中重金属的潜在生态因子 (E_i) 和潜在生态风险指数 (RI) 统计Table 5 Potential ecological risk factor (E_i) and potential ecological risk index (RI) statistics in soil of Danjiangkou Reservoir

生态危害指数	范围	均值	占生态危害程度的比例/%				
			轻微	中等	强	很强	极强
E_{Hg}	9.60~49.60	23.84	83.33	16.67	0	0	0
E_{As}	7.94~20.30	11.42	100	0	0	0	0
RI	20.44~60.82	35.26	100	0	0	0	0

与国内其他区域的研究结果相比, 本区域 Hg 单元的生态危害指数略高于武汉湖泊底泥^[42], 是乌江流域底泥的 1/2~1/3^[43], 是宝鸡燃煤电厂周围土壤的 1/5~1/20^[44]; As 单元生态危害指数与巢湖沉积物^[45]和陕西果园基地土壤^[46]以及三峡库区消落带土壤^[23]相当。

3 结论

(1) 对比国家土壤环境质量标准 (GB15618—1995), 淅川淹没区土壤中 Hg 和 As 的含量均未超过国家规定的二级质量标准。但土壤中 Hg 的变异程度较强, 最高的水田达到 141.42%, 反映了在淹没区各区域土壤中 Hg 的含量存在较大差异。As 的变异程度

较弱, 最高的旱地为 29.07%, 反映了 As 的空间分异较小或污染程度具有相似性。

(2) 不同土地利用类型 Hg 的含量大小依次为果园>河流底泥>水田>旱地>消落带; As 的含量大小依次为果园>旱地≈消落带>河流底泥>水田。果园土壤中 Hg 和 As 的含量均比其他土地利用类型要高, 可能是长期大量施肥和使用农药所造成的。

(3) 通过相关性分析可知, 丹江口水库淅川淹没区土壤的 pH 与 As 含量显著正相关 ($P<0.05$), pH 与 Hg 含量极显著负相关 ($P<0.01$)。Hg 和 TOC 之间呈显著性相关关系 ($P<0.05$); 而 As 和 TOC 的相关性不明显。

(4) 采用 Hakanson 潜在生态风险指数法对土壤中 Hg 和 As 进行风险评价, 综合潜在风险指数表明, 研究区重金属的总潜在生态风险值较低, 生态危害程度为轻微污染。从单元元素角度分析, Hg 的潜在生态危害程度高于 As, 且部分属于中等污染水平。

参考文献:

- [1] 刘占朝. 南水北调(中线)河南淅川水源区植被建设模式[J]. 水土保持学报, 2002, 16(5): 102-104.
LIU Zhan-chao. Constructing mode on source region for middle route south-to-north water transfer project of Xi-chuan, Hehan Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(5): 102-104.
- [2] 刘宁. 南水北调中线一期工程丹江口大坝加高方案的论证与决策[J]. 水利学报, 2006, 38(8): 899-905.
LIU Ning. Study on heightening schemes of Danjiangkou Reservoir for first stage of middle route south-to-north water transfer project[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 38(8): 899-905.
- [3] Roach A C. Assessment of metals in sediments from Lake Macquarie, New South Wales, Australia, using normalization models and sediment quality guidelines[J]. *Marine Environmental Research*, 2005, 59: 453-472.
- [4] 刘恩玲, 王亮. 土壤中重金属污染元素的形态分布及其生物有效性[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(3): 547-548.
LIU En-ling, WANG Liang. Distribution of different heavy metal forms in soil and their bio-availability[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2006, 34(3): 547-548.
- [5] 梁国玲, 黄冠星, 孙继朝, 等. 珠江三角洲污灌区土壤中重金属含量特征[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 2307-2312.
LIANG Guo-ling, HUANG Guan-xing, SUN Ji-chao, et al. Heavy metal content characteristics of soil in sewage irrigation area of Pearl River Delta[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1): 2307-2312.
- [6] 韩平, 王纪华, 陆安祥, 等. 北京顺义区土壤重金属分布与环境质量评价[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(1): 106-112.
HAN Ping, WANG Ji-hua, LU An-xiang, et al. Distribution and environment quality evaluation of heavy metals in soil in Shunyi of Beijing, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(1): 106-112.

- [7] 王利军, 卢新卫, 雷凯, 等. 渭河宝鸡段表层沉积物重金属污染研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2): 334-340.
WANG Li-jun, LU Xin-wei, LEI Kai, et al. Heavy metal pollution in surface sediment of Wei River(Baoji), China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(2): 334-340.
- [8] 周莉萍, 金相灿, 卢少勇, 等. 重庆市长寿湖重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(7): 1355-1361.
ZHOU Li-ping, JIN Xiang-can, LU Shao-yong, et al. Access of heavy metals pollution of Changshouhu in Chongqing, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(7): 1355-1361.
- [9] 叶琛, 李思悦, 卜红梅, 等. 三峡水库消落带区蓄水前土壤重金属含量及生态危害评价[J]. 土壤学报, 2010, 47(6): 1254-1269.
YE Chen, LI Si-yue, BU Hong-mei, et al. Heavy metals in soil of the ebb-tide zone of the Three-gorges Reservoir and their ecological risks[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(6): 1254-1269.
- [10] 王晓阳, 傅瓦利, 谢芳, 等. 三峡库区消落带完整淹水后土壤重金属分布特征及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2010, 17(6): 265-274.
WANG Xiao-yang, FU Wa-li, XIE Fang, et al. The distribution characteristic of soil heavy metals and their influencing factors in water-level-fluctuating zones of the Three-Gorges Reservoir area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(6): 265-274.
- [11] 裴廷权, 王里奥, 韩勇, 等. 三峡库区消落带土壤剖面重金属分布特征[J]. 环境科学研究, 2008, 21(5): 72-78.
PEI Ting-quan, WANG Li-ao, HAN Yong, et al. Distribution characteristics form soil profile heavy metal of water-level-fluctuating zone in Three Gorges Reservoir area[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(5): 72-78.
- [12] 李波, 崔杰华, 刘东波, 等. 微波消解-氢化物发生原子荧光法同时测定土壤中的砷汞[J]. 分析实验室, 2008, 27(7): 106-108.
LI Bo, CUI Jie-hua, LIU Dong-bo, et al. Simultaneous determination of As and Hg in soil by microwave digestion and hydride generation-atomic fluorescence spectrometry[J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2008, 27(7): 106-108.
- [13] 徐小逊, 张世熔, 李丹阳, 等. 川中典型丘陵区土壤砷和汞空间变异特征及影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(7): 1320-1325.
XU Xiao-xun, ZHANG Shi-rong, LI Dan-yang, et al. Spatial variability characteristics and influencing factors of soil arsenic and mercury in the typical hilly region of central Sichuan, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(7): 1320-1325.
- [14] 尤冬梅, 王纪华, 马志宏, 等. 北京郊区小尺度农产品产地土壤重金属污染性评价[J]. 上海农业学报, 2011, 27(3): 89-93.
YOU Dong-mei, WANG Ji-hua, MA Zhi-hong, et al. Assessment of heavy metal pollution of small scale farmland in Beijing suburbs[J]. *Acta Agriculture Shanghai*, 2011, 27(3): 89-93.
- [15] 张玉斌, 曹宁, 余雕, 等. 黄土高原残塬沟壑区梯田土壤重金属分布特征[J]. 中国农学通报, 2009, 25(12): 252-256.
ZHANG Yu-bin, CAO Ning, SHE Diao, et al. Heavy metal distribution feature in terrace soil on the loess gullied-hilly area[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(12): 252-256.
- [16] 张明, 杨忠芳, 陈岳龙, 等. 湖南洞庭湖地区土壤中 Hg 的来源[J]. 地质通报, 2007, 26(11): 1463-1469.
ZHANG Ming, YANG Zhong-fang, CHEN Yue-long, et al. Sources of Hg in soils of the Dongting Lake area, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(11): 1463-1469.
- [17] 刘赫, 李双异, 汪景宽. 长期施用有机肥对棕壤中主要重金属积累的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2177-2182.
LIU He, LI Shuang-yi, WANG Jing-kuan. Effects of long-term application of organic manure on accumulation of main heavy metals in brown earth[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(6): 2177-2182.
- [18] Forster U, Wittman D. Metal pollution in the aquatic environment[M]. Springer, Berlin, 1979.
- [19] 白玲玉, 曾希柏, 李莲芳, 等. 不同农业利用方式对土壤重金属累积的影响及原因分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(1): 96-104.
BAI Ling-yu, ZENG Xi-bai, LI Lian-fang, et al. Effects of land use on heavy metal accumulation in soils and source analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(1): 96-104.
- [20] 何锦林, 谭红, 赵亚民, 等. 贵州梵净山自然保护区大气汞的沉降[J]. 环境科学学报, 1999, 19(2): 164-169.
HE Jin-lin, TAN Hong, ZHAO Ya-min, et al. Atmosphere Hg deposition in Guizhou Fanjing Mountain[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, 19(2): 164-169.
- [21] 解文艳, 樊贵盛, 周怀平, 等. 太原市污灌区土壤重金属污染现状评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(8): 1553-1560.
XIE Wen-yan, FAN Gui-sheng, ZHOU Huai-ping. Access of heavy metals pollution of the sewage irrigation region in Taiyuan, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(8): 1553-1560.
- [22] 邵丰收, 周皓韵. 河南省主要元素的土壤环境背景值[J]. 河南农业, 1998, 10: 29.
SHAO Feng-shou, ZHOU Hao-yun. Studying on the background value of soil environment of main element in Henan Province[J]. *Agriculture of Henan*, 1998, 10: 29.
- [23] 刘丽琼, 魏世强, 江韬. 三峡库区消落带土壤重金属分布特征及潜在风险评价[J]. 中国环境科学, 2011, 31(7): 1204-1211.
LIU Li-qiong, WEI Shi-qiang, JIANG Tao. Distribution of soil heavy metals from water-level-fluctuating zone in Three-Gorge Reservoir Area and their evaluation of potential ecological risk[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(7): 1204-1211.
- [24] 王春旭, 李生志, 许荣玉. 环境中砷的存在形态研究[J]. 环境科学, 1993, 14(4): 53-57.
WANG Chun-xu, LI Sheng-zhi, XU Rong-yu. Study on the speciation of arsenic in the environment[J]. *Environmental Science*, 1993, 14(4): 53-57.
- [25] 杨胜科, 王文科, 张威, 等. 砷污染生态效应及水土体系中砷的治理对策研究[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(3): 69-73.
YANG Sheng-ke, WANG Wen-ke, ZHANG Wei, et al. Study on ecosystem effect and the remediation methods of arsenic pollution in water and soil system[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2004, 26(3): 69-73.
- [26] Moore P A, Daniel T C, Gilmour J T, et al. Decreasing metal runoff from

- poultry litter with aluminum sulfate[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27:92-99.
- [27] Yin Y J, Allen H E, Huang C P, et al. Adsorption of mercury(II) by soil effects of pH, chloride and organic matter[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25:837-844.
- [28] 王治喜, 屈 明. 溶解性有机质对土壤重金属活性影响的研究概况[J]. 中国农学通报, 2005, 21(12):388-406.
- WANG Zhi-xi, QU Ming. Dissolved organic matter and its effect on activity of soil heavy metal[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(12):388-406.
- [29] 陈 静, 王学军, 朱立军. pH值和矿物成分对砷在红土中迁移的影响[J]. 环境化学, 2003, 22(2):121-125.
- CHEN Jing, WANG Xue-jun, ZHU Li-jun. The effects of pH value and minerals on adsorption of arsenic in red soil[J]. *Environmental Chemistry*, 2003, 22(2):121-125.
- [30] 金广哲, 梁成华, 杜立宇, 等. pH和磷酸根对砷(V)在棕壤上吸附解吸的影响[J]. 河南农业科学, 2009, 38(6):71-76.
- JIN Guang-zhe, LIANG Cheng-hua, DU Li-yu, et al. Effect of phosphate on arsenate adsorption by-brown soil [J]. *Editorial Board of Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2009, 38(6):71-76.
- [31] Postma D, Jessena S, Hueb N T M, et al. Mobilization of arsenic and iron from Red River floodplain sediments, Vietnam[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74(12):3367-3381.
- [32] 赵卫红, 张正斌. 砷酸根的液-固界面交换吸附研究: pH和Ca(II)的影响[J]. 青岛海洋大学学报, 1997, 27(2):234-240.
- ZHAO Wei-hong, ZHANG Zheng-bin. Effect of pH, Ca^{2+} on arsenate exchange adsorption on hydrosides and clay minerals [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1997, 27(2):234-240.
- [33] 李英华, 孙丽娜. pH值和外加汞浓度对汞在棕土中的吸附-解吸动力学特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2):579-582.
- LI Ying-hua, SUN Li-na. Impact of pH and mercury concentration on adsorption-desorption kinetic characteristics of mercury in umber[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2):579-582.
- [34] 祝 惠, 阎百兴, 张丰松, 等. 粒级、pH和有机质对汞在松花江沉积物表面吸附-解吸的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(10):2315-2320.
- ZHU Hui, YAN Bai-xing, ZHANG feng-song, et al. Effect of particle-sizes, pH and organic matter on adsorption and desorption of mercury to sediments in the Songhua River[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(10):2315-2320.
- [35] 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 Science*, 2007, 28(3):654-658.
- [36] 方凤满, 杨 丁, 汪琳琳, 等. 芜湖燃煤电厂周边土壤中砷汞的分布特征研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1):109-113.
- FANG Feng-man, YANG Ding, WANG Lin-lin, et al. Distribution of arsenic and mercury in soil around coal-fired power plant in Wuhu[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(1):109-113.
- [37] Schlüter K. Sorption of inorganic mercury and monomethyl mercury in an iron-humus podzol soil of southern Norway studied by batch experiments[J]. *Environmental Geology*, 1997, 30(3-4):266-279.
- [38] 荆延德, 赵石萍, 何振立. 土壤中汞的吸附-解吸行为研究进展[J]. 土壤通报, 2010, 41(5):1270-1274.
- JING Yan-de, ZHAO Shi-ping, HE Zhen-li. A review on the studies on mercury adsorption-desorption behavior in the soil adsorption[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(5):1270-1274.
- [39] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-986.
- [40] 许振成, 杨晓云, 温 勇, 等. 北江中上游底泥重金属污染及其潜在生态危害评价[J]. 环境科学, 2009, 30(11):3262-3268.
- XU Zhen-cheng, YANG Xiao-yun, WEN Yong, et al. Evaluation of the heavy metals contamination and its potential ecological risk of the sediments in Beijiang River's upper and middle reaches[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(11):3262-3268.
- [41] 单丽丽, 袁旭音, 茅昌平, 等. 长江下游不同源沉积物中重金属特征及生态风险[J]. 环境科学, 2008, 29(9):2399-2404.
- SHAN Li-li, YUAN Xu-yin, MAO Chang-ping, et al. Characteristics of heavy metals in sediments from different sources and their ecological risks in the lower reaches of the Yangtze River[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(9):2399-2404.
- [42] 苏秋克, 祁士华, 蒋敬业, 等. 武汉城市湖泊汞的环境地球化学评价[J]. 地球化学, 2006, 35(3):265-270.
- SU Qiu-ke, QI Shi-hua, JIANG Jing-ye, et al. Environmental geochemistry assessment of mercury from lakes in Wuhan City, Hubei Province, China[J]. *Geochimica*, 2006, 35(3):265-270.
- [43] 陈 许, 秦樊鑫, 林 陶, 等. 乌江主要支流夏季底栖动物群落组成及其与汞污染的相关性[J]. 环境科学研究, 2010, 23(8):999-1006.
- CHEN Hu, QIN Fan-xin, LIN Tao, et al. Zoobenthic community structure and its correlation with mercury pollution in main tributaries of Wujiang River in summer[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(8):999-1006.
- [44] 章明奎, 郑顺安, 王丽平. 土壤中颗粒状有机质对重金属的吸附作用[J]. 土壤通报, 2007, 38(3):623-624.
- ZHANG Ming-kui, ZHENG Shun-an, WANG Li-ping. Adsorption of heavy metals by soil particulate organic matter[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(3):623-624.
- [45] 余秀娟, 霍守亮, 胥逢宇, 等. 巢湖表层沉积物中砷的分布特征及其污染评价[J]. 环境工程技术学报, 2012, 2(2):124-132.
- YU Xiu-juan, HUO Shou-liang, ZAN Feng-yu, et al. Distribution characteristics and contamination assessment of arsenic in surface sediments of Lake Chaohu, China[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2012, 2(2):124-132.
- [46] 刘子龙, 赵政阳, 鲁玉妙. 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):273-277.
- LIU Zi-long, ZHAO Zheng-yang, LU Yu-miao. Evaluation on arsenic and heavy metal pollution in apple orchard soil in Shaanxi Province[J]. *Arid Zone Research*, 2010, 27(2):273-277.