

三峡库区农业土壤重金属含量特征及污染评价——以 Cu Pb 和 Zn 为例

宋珍霞¹, 高明², 王里奥¹, 王子芳¹, 谢德体², 秦建成²

(1.重庆大学资源及环境科学学院, 重庆 沙坪坝 400030; 2.西南大学资源与环境学院, 重庆 北碚 400715; 3. 重庆工学院工商管理学院, 重庆 杨家坪 400050)

摘要:通过田间采样和室内分析,对重庆市三峡库区 6 个区(县)(丰都、奉节、江津、万州、武隆和忠县)农业土壤中 Cu、Pb 和 Zn 的含量特征进行了调查研究,并同时对其污染状况进行了评价。结果表明,重庆市三峡库区农业土壤 Cu、Pb 和 Zn 全量的平均值分别为 $(29.96\pm12.80)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $(25.45\pm8.80)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $(64.79\pm18.79)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;其有效态含量的平均值分别为 $(1.66\pm1.36)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $(1.67\pm1.24)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $(2.95\pm3.02)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;3 种重金属有效态含量变异均明显大于全量的变异;Cu、Pb 和 Zn 有效性系数分别为 $(5.53\pm3.77)\%$ 、 $(7.52\pm7.18)\%$ 和 $(4.36\pm4.14)\%$ 。各区(县)农业土壤 Cu、Pb 和 Zn 的有效态与其全量间均呈显著或极显著正相关;Cu、Pb 和 Zn 全量两两间也呈显著或极显著正相关。各区(县)农业土壤重金属单因子污染状况均表现为 $\text{Cu} > \text{Zn} > \text{Pb}$;各区(县)农业土壤重金属综合污染指数平均值为 0.38 ± 0.20 ,属安全等级,表明调查区域土壤清洁。

关键词:重金属;土壤;含量特征;污染评价;三峡库区

中图分类号:X825 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)06-2189-06

Heavy Metal Concentrations in Agriculture Soils of the Three-Gorge Reservoir Area and Their Pollution Evaluation——Taking Cu,Pb,and Zn as Examples

SONG Zhen-xia¹,GAO Ming², WANG Li-ao¹, WANG Zi-fang¹, XIE De-ti², QIN Jian-cheng²

(1.College of Resources and Environmental Science,Chongqing University,Shapingba 400030,China; 2.College of Resources and Environment,Southwest University,Beibei 400715,China; 3.Department of Business Administration, Chongqing Institute of Technology,Yangjiaping 400050,China)

Abstract:The heavy metal concentrations in agricultural soils are directly associated with food safety and human health. In this study,the concentrations of Cu,Pb and Zn in agricultural soils in Fengdu, Fengjie, Jiangjin,Wanzhou,Wulong and Zhongxian counties of Chongqing in the Three Gorges Reservoir (TGR) area were determined,and their polluted status were evaluated. The results showed that the total concentrations of Cu,Pb and Zn in the agricultural soil of Chongqing in the TGR area were $(29.96\pm12.80)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $(25.45\pm8.80)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $(64.79\pm18.79)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; respectively,and the average available concentrations of Cu,Pb and Zn were $(1.66\pm1.36)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $(1.67\pm1.24)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $(2.95\pm3.02)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. The available coefficients of Cu,Pb and Zn were $(5.53\pm3.77)\%$, $(7.52\pm7.18)\%$ and $(4.36\pm4.14)\%$, respectively. The variability of three heavy metal elements in the soils was much more than their total concentrations. The available concentrations of Cu, Pb and Zn in the soils were highly associated with their total concentrations. There were significantly positive or positive relations between total Cu and total Pb, total Pb and total Zn, and total Cu and total Zn. The polluted status sequence of heavy metals in agricultural soils of Chongqing in the TGR area was followed by $\text{Cu} > \text{Zn} > \text{Pb}$ according to the monomial pollution index. The soil's comprehensive pollution index of Cu, Pb and Zn was 0.38 ± 0.20 , suggesting that the soils investigated in TGR area were clean and safety according to the standard of the second grade of GB 15618—1995.

Keywords:heavy metal; soil; concentration character; pollution evaluation; Three-Gorges Reservoir(TGR) area

收稿日期:2008-01-22

基金项目:国家科技支撑计划项目(2007BAD87B10-02)

作者简介:宋珍霞(1981—),女,安徽霍山人,博士研究生,主要从事固体废弃物资源化利用及土壤质量与环境方面的研究。

E-mail:songzhenxia211@yahoo.com.cn.

通讯作者:高明 E-mail:Gao Ming@swu.cq.cn.

土壤不仅是农业生产的基础,而且是人类环境的重要组成部分。近些年,由于工业“三废”的排放^[1]和矿山的开采^[2],同时伴随着污水灌溉^[3]、污泥农用和施用含有重金属元素的肥料和使用农药^[4]等,我国土壤重金属污染越来越严重,农用耕地面积锐减,相当数量农田的土壤质量也日趋下降^[5]。重金属在土壤中一般不易随水淋失,不能被土壤微生物分解,相反生物体可以富集重金属,通过食物链传递危害人类健康^[6]。更为严重的是,土壤重金属污染具有隐蔽性、长期性和不可逆性的特点,进入土壤的重金属元素,在一定时期内尚不表现出对环境和作物的危害,但当其积累量超过土壤承受能力或土壤容量时,就会对作物和人体产生危害,从而导致严重的生态问题。

重庆市三峡库区农业土壤是重要的蔬菜、粮食、水果和中药材的生产用地,这些土壤的环境质量严重地影响着当地居民的食品安全和身体健康,也间接地影响着当地经济的发展;而 Cu、Pb 和 Zn 等是土壤环境中最引人关注的重金属^[7]。因此,本文研究了重庆市三峡库区丰都、奉节、江津、万州、武隆和忠县 6 个区(县)农业土壤 Cu、Pb 和 Zn 的全量和有效态含量特征,分析了 Cu、Pb 和 Zn 全量与有效态含量间的相关关系以及各重金属全量间的相关关系,并同时对各重金属的污染状况进行评价,旨在为重庆市三峡库区农业土壤重金属污染的演变趋势预测和当地无公害农产品生产基地建设提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 样点布置和样品采集

本研究在重庆市的丰都、奉节、江津、万州、武隆和忠县等 6 个区(县),沿长江干流和主要次级河流淹没带附近的农业土壤上进行。由于研究区土壤类型主要以紫色土、紫色水稻土、冲击潮土和山地黄壤土为主,其土地利用状况主要是农用地、果园和林地;因而,在采样点布设过程中综合考虑了各个区(县)的主要土壤类型和主要的土地利用方式,使样点尽量在各土壤类型及各种土地利用方式中均匀分布。各区(县)均分别布设 20 个采样点,总计布点 120 个。在各采样区,根据具体情况布设梅花型多点(5~12 点),采集 0~20 cm 表层土壤,共采集土壤 0.50~1.00 kg,混合均匀后按四分法获取足量样品装入聚乙烯塑料袋中。采集样品时间为 2006 年 10 月。

1.2 样品的处理

土壤样品在实验室中用牛皮纸自然风干,磨碎,

过 100 目尼龙筛,贮于聚乙烯薄膜袋中,以备分析使用。土壤样品经酸熔法($\text{HNO}_3\text{--HCl--HClO}_4$)加热消解后,采用原子吸收分光光度法^[8]测定全 Cu、全 Pb 和全 Zn 的含量;土壤样品经 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{HCl}$ 浸提,采用原子吸收分光光度法^[8]测定有效 Cu、有效 Pb 和有效 Zn 的含量。在重金属元素分析测定中采用国家标准土壤样品(GBW07046)进行全过程质量控制,每种元素测定的相对标准偏差均小于 10%。

1.3 数据处理

土壤重金属含量的平均值、标准差、相关分析应用 Excel2003 和 SPSS11.5 进行统计分析。对于异常值的剔除主要剔除重金属元素中有效态与全量的比值大于 1 的元素。根据分析结果,只剔除武隆县 2 个样点的数据,表层土壤共有有效数据 118 个。

2 结果与分析

2.1 三峡库区农业土壤重金属含量特征分析

2.1.1 三峡库区农业土壤重金属全量含量分析

三峡库区农业土壤 Cu、Pb 和 Zn 全量的描述性统计分析结果列于表 1。从表 1 可以看出,三峡库区农业土壤 Cu、Pb 和 Zn 全量的平均值分别为 $(29.96\pm 12.80)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $(25.45\pm 8.80)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $(64.79\pm 18.79)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。对照我国土壤环境质量二级标准^[9],发现三峡库区农业土壤重金属 Cu、Pb 和 Zn 含量均未出现超标现象。说明虽有连年施用化肥和农药的习惯,但带入土壤系统重金属数量不大,没有造成对土壤环境质量的严重影响。

变异系数作为反映统计数波动特征的参数,一定程度上可以描述该元素污染状况的特征。三峡库区农业土壤 Cu、Pb 和 Zn 全量的变异系数分别为 42.72%、34.58% 和 29.00%,均属中等的变异。Cu 在土样之间较大的变异性反映了各区(县)Cu 污染有较大的差异,而 Pb 和 Zn 相对较小的变异性则反映了各区(县)这两类重金属污染程度的相似性。

各区(县)农业土壤中,Cu 含量以武隆 $(41.44\pm 18.96)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为最高;Pb 和 Zn 含量的最大值 $(29.56\pm 7.93)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $(70.84\pm 19.48)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 均出现在江津市,原因可能是由于江津市处于重庆市主城区,受工业和生活污染的影响较大。Cu、Pb 和 Zn 的平均含量均以忠县为最低,其含量最小值分别为 $(21.77\pm 9.69)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $(19.02\pm 7.63)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $(57.89\pm 15.82)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2.1.2 三峡库区农业土壤重金属有效态含量分析

土壤中重金属元素的有效态易于转化和迁移,其数量的多少受人类生产活动和土壤条件因子所制约,它们易被农作物吸收而进入食物链,将对农产品安全产生潜在危害。因此,了解重金属有效态含量特征及其所占全量的比例,即重金属元素的有效性系数,对于深入了解土壤重金属污染非常重要。

三峡库区农业土壤 Cu、Pb 和 Zn 有效态含量的平均值分别为 $(1.66\pm1.36)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $(1.67\pm1.24)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $(2.95\pm3.02)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,3 种重金属有效态含量变异均明显大于全量的变异,其中有效 Zn 变异最大,其变异系数达 102.53%(表 2)。重金属有效态变异较大,一方面与土壤重金属全量含量不同有关;另一方面由于不同农户对农田的耕作管理措施不一,尤其是耕作制度、施肥数量、类型存在较大差异,造成土壤有机物料输入量差异也较大,使重金属螯合物产生数量、类型不一,从而使重金属在土壤中形态及溶解度存在较大

差别。

重金属有效态比例增加,意味着重金属在土壤中的活动性增加,将对农产品安全产生潜在危害。三峡库区农业土壤中 Cu、Pb 和 Zn 的有效性系数分别为 $(5.53\pm3.77)\%$ 、 $(7.52\pm7.18)\%$ 和 $(4.36\pm4.14)\%$,其与我国一般良田土和菜园土有效态重金属所占的比例^[10]相当。其中 Zn 的有效性系数最低,其活性最低,对农产品安全产生的潜在危险也最小。

2.2 三峡库区农业土壤重金属含量间的相关性分析

2.2.1 三峡库区农业土壤重金属全量与有效态含量间的相关性分析

各区(县)农业土壤重金属元素全量与有效态之间的相关性见表 3。结果表明,各区(县)农业土壤重金属 Cu、Pb 和 Zn 元素全量与有效态含量间均呈显著或极显著正相关,表明这 3 种元素有效态含量很大程度上是全量决定的,Cu、Pb 和 Zn 是农业土壤认

表 1 三峡库区农业土壤重金属全量含量特征($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 1 The total content of heavy metals in agriculture soil of the Three-Gorges Reservoir area

元素	项目	丰都(20)	奉节(20)	江津(20)	万州(20)	武隆(18)	忠县(20)	各地平均
Cu	含量范围	20.33~40.60	17.77~73.84	9.86~56.51	11.80~40.08	20.83~87.86	5.56~47.14	5.51~87.90
	平均值	29.83±6.01	30.71±12.35	26.94±12.54	30.25±6.46	41.44±18.96	21.77±9.69	29.96±12.80
	变异系数/%	20.15	40.23	46.57	21.37	45.75	44.52	42.72
Pb	含量范围	12.56~45.69	12.03~36.09	15.11~41.89	12.56~44.58	12.21~42.83	9.02~31.87	8.99~45.69
	平均值	28.01±9.91	24.38±5.95	29.56±7.93	26.89±8.37	24.79±9.45	19.02±7.63	25.45±8.80
	变异系数/%	35.36	24.43	26.83	31.15	38.13	40.11	34.58
Zn	含量范围	35.27~140.03	27.78~91.82	37.58~101.02	47.31~93.42	36.45~109.06	22.74~82.17	22.72~140.00
	平均值	63.62±21.57	56.07±15.94	70.84±19.48	73.01±13.37	67.61±21.06	57.89±15.82	64.79±18.79
	变异系数/%	33.91	28.43	27.50	18.31	31.15	27.32	29.00

注:各区县名称括号内的数值为各个区县的样本数,以下同;其中变异系数(%)=标准偏差/平均值×100%。

表 2 三峡库区农业土壤重金属有效态含量特征

Table 2 The available content of heavy metals in agriculture soil of the Three-Gorges Reservoir area

元素	项目	丰都(20)	奉节(20)	江津(20)	万州(20)	武隆(18)	忠县(20)	各地平均
Cu	含量范围	0.25~7.44	0.56~5.75	0.39~5.21	0.15~1.84	1.11~4.57	0.15~2.24	0.15~7.44
	平均值	2.35±2.14	2.03±1.36	1.58±1.14	1.00±0.45	2.27±0.94	0.79±0.60	1.66±1.36
	变异系数/%	91.18	67.04	72.50	44.55	41.30	76.82	81.89
	有效性系数/%	7.53±6.09	6.44±3.14	6.53±3.98	3.22±1.20	5.84±1.88	3.67±2.18	5.53±3.77
Pb	含量范围	0.62~3.32	0.34~3.70	1.30~4.84	0.17~0.86	0.21~6.95	0.38~1.88	0.17~6.95
	平均值	1.44±0.76	2.10±1.02	2.94±0.90	0.36±10.16	2.16±1.64	1.05±0.49	1.67±1.24
	变异系数/%	52.47	48.77	30.72	42.73	76.24	46.27	74.41
	有效性系数/%	5.37±2.52	8.49±3.84	10.29±3.02	1.39±0.49	8.54±5.26	5.80±2.32	7.52±7.18
Zn	含量范围	0.24~0.85	0.95~3.26	1.21~5.46	3.63~10.13	0.20~4.27	0.28~1.56	0.20~10.13
	平均值	0.55±0.17	2.02±0.65	3.56±1.12	8.80±1.81	1.95±1.33	0.71±0.31	2.95±3.02
	变异系数/%	30.84	32.13	31.60	20.54	68.37	43.07	102.53
	有效性系数/%	0.89±0.27	3.67±1.01	5.12±1.27	12.27±2.61	2.81±2.01	1.26±0.53	4.36±4.14

注:变异系数(%)=标准偏差/平均值×100%;有效性系数(%)=有效态含量平均值/全量含量平均值×100%。

为施肥造成污染最为普遍的元素。本研究结果与张民等^[10]对我国菜园土的研究以及姜培坤等^[11]对雷竹林土壤的研究结果类似。

2.2.2 三峡库区农业土壤重金属全量间相关性分析

由于地球化学条件的相似性,以及造成土壤污染的污染源中金属元素共存于土壤中,导致重金属元素在总量上存在相关性。元素间相关性显著和极显著,说明元素间一般具有同源关系或是复合污染^[12]。为了了解各重金属元素之间的相关性,对各区(县)的土样重金属元素两两之间进行相关分析,其结果见表 4。表 4 表明,各区(县)Cu 和 Pb 及 Cu 和 Zn 间均呈现极显著正相关,丰都、奉节和江津 3 个区(县)Pb 和 Zn 也呈现极显著正相关,而万州、武隆和忠县 3 个区(县)Pb 和 Zn 间呈现显著正相关,尚未达到极显著水平。表明库区土壤同时受 Cu、Pb 和 Zn 污染的可能性比较大,即土壤污染存在复合污染特性,这与其他学者有关于复合污染研究的结论一致^[12-13]。

2.3 三峡库区农业土壤重金属污染评价

采用土壤环境质量标准(GB 15618—1995)^[9]及土壤环境污染分级标准^[14-15](表 5)进行评价。重金属污染程度评价方法采用单因子污染指数法和多因子综合污染指数法,具体评价方法见文献[16],评价结果见表 6。从表 6 可看出,在所检测的 3 种元素之间进行比较,以各种元素的单因子污染指数的平均值表征其受污染程度大小,可得调查区 6 个区(县)污染状况均表现为:Cu >Zn >Pb。各区(县)Cu、Zn 和 Pb 的单因子污染指数分别以江津、武隆和万州为最高,其单因子污染指数的最大值分别为:0.60±0.46、0.11±0.03 和 0.33±0.08;Cu、Zn 和 Pb 的单因子污染指数均以忠县为最低,其单因子污染指数的最小值分别为:0.23±

0.10、0.06±0.02 和 0.17±0.05。

单项污染指数只能反映土壤中某一重金属元素的污染状况,而土壤是一个十分复杂的体系,只有通过综合污染指数才能较具体地评判和表明其重金属的污染情况。根据综合污染指数计算结果可以看出,三峡库区农业土壤重金属综合污染指数平均值为 0.38±0.20,总体污染水平评定为清洁。其中污染程度

表 4 三峡库区土壤重金属各元素全量含量间的相关关系矩阵
Table 4 The matrix of correlative coefficient among 3 types of heavy metals total content in agriculture soil of the Three-Gorges Reservoir area

地区		Cu		Pb		Zn		地区		Cu		Pb		Zn
丰都 (20)	Cu	1						万州 (20)	Cu	1				
	Pb	0.500	4**	1					Pb	0.764	7**	1		
	Zn	0.581	6**	0.716	0**	1			Zn	0.538	8**	0.468	4*	1
奉节 (20)	Cu	1						武隆 (18)	Cu	1				
	Pb	0.825	8**	1					Pb	0.623	4**	1		
	Zn	0.731	6**	0.697	8**	1			Zn	0.775	1**	0.465	9*	1
江津 (20)	Cu	1						忠县 (20)	Cu	1				
	Pb	0.788	3**	1					Pb	0.710	1**	1		
	Zn	0.718	8**	0.664	1**	1			Zn	0.761	8**	0.462	2*	1

注:* 显著性水平为 0.05(显著);** 显著性水平为 0.01(极显著)。

表 5 土壤重金属污染分级标准
Table 5 National classification standard of soil heavy metal pollution

等级划分	综合污染指数($P_{综}$)	污染等级	污染水平
I	$P_{综} \leq 0.7$	安全	清洁
II	$0.7 < P_{综} \leq 1$	警戒线	尚清洁
III	$1 < P_{综} \leq 2$	轻污染	土壤轻污染作物开始受到污染
IV	$2 < P_{综} \leq 3$	中污染	土壤作物均受中度污染
V	$P_{综} > 3$	重污染	土壤作物均受污染已相当严重

表 3 三峡库区农业土壤重金属全量与有效态含量之间的相关关系
Table 3 The relationship between total content and available content of heavy metals in agriculture soil of the Three-Gorges Reservoir area

地区	重金属	R	回归方程	地区	重金属	R	回归方程
丰都(20)	Cu	0.454 2*	$Y = 0.161\ 7\ Q - 2.477\ 4$	万州(20)	Cu	0.618 2**	$Y = 0.042\ 6\ Q - 0.288\ 9$
	Pb	0.498 7*	$Y = 0.038\ 1\ Q + 0.375$		Pb	0.496 1*	$Y = 0.009\ 2\ Q + 0.116\ 0$
	Zn	0.584 5**	$Y = -0.006\ 1\ Q + 1.053\ 7$		Zn	0.466 1*	$Y = 0.063\ Q + 4.201\ 3$
奉节(20)	Cu	0.638 6**	$Y = 0.031\ 6\ Q + 0.545\ 3$	武隆(18)	Cu	0.615 0**	$Y = 0.030\ 2\ Q + 0.875\ 8$
	Pb	0.590 4**	$Y = 0.082\ Q + 0.064\ 8$		Pb	0.626 7**	$Y = 0.109\ Q - 0.545\ 7$
	Zn	0.569 0**	$Y = 0.023\ 2\ Q + 0.721\ 8$		Zn	0.537 4*	$Y = 0.034\ Q - 0.349\ 8$
江津(20)	Cu	0.573 9**	$Y = 0.052\ 3\ Q + 0.167\ 9$	忠县(20)	Cu	0.505 7*	$Y = 0.031\ 5\ Q + 0.100\ 0$
	Pb	0.457 9*	$Y = 0.052\ 1\ Q + 1.397\ 3$		Pb	0.668 8**	$Y = 0.042\ 7\ Q + 0.240\ 6$
	Zn	0.680 2**	$Y = 0.039\ 2\ Q + 0.776\ 8$		Zn	0.480 8*	$Y = 0.009\ 3\ Q + 0.171\ 8$

注:R 相关系数;Y 土壤重金属有效态含量;Q 土壤重金属全量;* 显著性水平为 0.05(显著);** 显著性水平为 0.01(极显著)。

为清洁($P_{综} \leq 0.7$)的样点有 114 个,占 96.61%;尚清洁水平($0.7 < P_{综} \leq 1.0$)的样点有 2 个,占 1.69%;轻度污染($1.0 < P_{综} \leq 2.0$)的样点有 2 个,占 1.69%。其中 $0.7 < P_{综} \leq 2.0$ 的 4 个土壤样本均出现在江津市;丰都、万州、武隆、奉节和忠县 5 个区(县)的所有土壤样本的 Cu、Zn 和 Pb 的综合污染指数均小于 0.7,所测定的土样 100%都属于清洁水平。各区(县)Cu、Zn 和 Pb 综合污染程度由高到低的排列顺序为:江津>丰都=万州>武隆>奉节>忠县,其综合污染指数依次为 0.48、0.43、0.43、0.38、0.34 和 0.21。对比土壤污染分级标准可以看出,各区(县)Cu、Zn 和 Pb 综合污染指数 $P_{综}$ 也均小于 0.7,污染等级为 I 级、污染水平为清洁、污染程度为安全等结果说明调查区土壤环境质量状况良好。因此,重庆市三峡库区 6 个区(县)农业土壤中 3 种重金属元素含量均达到无公害农产品生产土壤环境质量标准。

3 结论

三峡库区农业土壤 Cu、Pb 和 Zn 全量的平均值分别为 $(29.96 \pm 12.80) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $(25.45 \pm 8.80) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(64.79 \pm 18.79) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;Cu、Pb 和 Zn 全量的变异系数分别为 42.72%、34.58%和 29.00%,均属中等的变异。Cu、Pb 和 Zn 有效态含量的平均值分别为 $(1.66 \pm 1.36) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $(1.67 \pm 1.24) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(2.95 \pm 3.02) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。3 种重金属有效态含量变异均明显大于全量的变异;其中有效 Zn 变异最大,其变异系数达 102.53%。Cu、Pb 和 Zn 的有效性系数分别为 $(5.53 \pm 3.77)\%$ 、 $(7.52 \pm 7.18)\%$ 和 $(4.36 \pm 4.14)\%$,其中 Zn 的有效性系数最低,其对农产品安全产生的潜在危险也最小。

各区(县)农业土壤重金属 Cu、Pb 和 Zn 全量与有效态含量间均呈显著或极显著正相关,表明这 3 种元素有效态很大程度上是全量决定的。各区(县)农业

土壤重金属 Cu、Pb 和 Zn 元素全量两两间均呈现显著或极显著正相关,表明库区农业土壤同时受 Cu、Pb 和 Zn 污染的可能性比较大,即土壤污染存在复合污染特性。

三峡库区农业土壤重金属单因子污染状况均表现为:Cu>Zn>Pb;其 Cu、Pb 和 Zn 综合污染指数平均值为 0.38 ± 0.20 ,总体污染水平评定为清洁。各区(县)农业土壤 Cu、Pb 和 Zn 综合污染程度由高到低的排列顺序为:江津>丰都=万州>武隆>奉节>忠县,其综合污染指数依次为 0.48、0.43、0.43、0.38、0.34 和 0.21。

参考文献:

[1] 赵其国,周炳中,杨浩,等.江苏省环境质量与农业安全问题研究[J].土壤,2002,34(1):1-8.
ZHAO Qi-guo, ZHOU Bing-zhong, YANG Hao, et al. Study on environmental quality and agricultural safety problems of Jiangsu province[J]. Soil, 2002, 34(1):1-8.

[2] Yang Q W, Shu W S, Qiu J W, et al. Lead in paddy soils and rice plants and its potential health risk around lechang Lead/Zinc mine, Guangdong, China[J]. *Environment International*, 2004, 30(7):883-889.

[3] 杨军,郑袁明,陈同斌,等.北京市凉水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 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.

[4] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J. 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.

[5] 李波,林玉锁,张孝飞,等.宁连高速公路两侧土壤和农产品中重金属污染的研究[J].农业环境科学学报,2005,24(2):266-269.
LI Bo, LIN Yu-suo, ZHANG Xiao-fei, et al. Pollution of heavy metals in soil and agricultural products on sides of Ning-Lian superhighway[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2):266-269.

[6] 郑海龙,陈杰,邓文靖,等.城市边缘带土壤重金属空间变异及其

表 6 三峡库区农业土壤重金属污染评价
Table 6 Evaluation of agriculture soil of the Three-Gorges Reservoir area

地区	样本数	单级污染指数(P_i)				综合污染指数($P_{综}$)	污染等级及水平
		Cu	Pb	Zn	均值		
丰都	20	0.52±0.16	0.10±0.04	0.30±0.12	0.31±0.08	0.43±0.13	I 级,清洁
奉节	20	0.41±0.16	0.08±0.02	0.22±0.06	0.24±0.07	0.34±0.12	I 级,清洁
江津	20	0.60±0.46	0.09±0.04	0.31±0.12	0.33±0.19	0.48±0.35	I 级,清洁
万州	20	0.52±0.19	0.10±0.04	0.33±0.08	0.32±0.09	0.43±0.14	I 级,清洁
武隆	18	0.45±0.18	0.11±0.03	0.31±0.08	0.29±0.08	0.38±0.13	I 级,清洁
忠县	20	0.23±0.10	0.06±0.02	0.22±0.05	0.17±0.05	0.21±0.07	I 级,清洁
均值		0.45±0.25	0.09±0.04	0.28±0.09	0.27±0.11	0.38±0.20	I 级,清洁

- 污染评价[J]. 土壤学报, 2006, 43(1):39-45.
- ZHENG Hai-long, CHEN Jie, DENG Wen-jing, et al. Spatial analysis and pollution assessment of soil heavy metals in the steel industry areas of Nanjing periurban zone[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1): 39-45.
- [7] 喻 菲, 张 成, 张 晟, 等. 三峡水库消落区土壤重金属含量及分布特征[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2006, 28(1):165-168.
- YU Fei, ZHANG Cheng, ZHANG Sheng, et al. Contents and distribution of heavy metals in the draw-down zone of the Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Southwest Agricultural University(Natural Science)*, 2006, 28(1):165-168.
- [8] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 1999.
- Chinese Society of Soil Science. Soil agricultural chemistry analysis method[M]. Beijing:Chinese Agriculture Science and Technology Press, 1999.
- [9] 国家技监局, 国家环保局. 中华人民共和国土壤环境质量标准 GB15168-1995[S]. 北京:中国标准出版社, 2000.
- National Technical Supervision Bureau, National Environmental Protection Agency. National soil environmental quality standard of GB15168-1995[S]. Beijing:Chinese Standard Press, 2000.
- [10] 张 民, 龚子同. 我国菜园土壤中某些重金属元素的含量与分布[J]. 土壤学报, 1996, 33(1):85-93.
- ZHANG Min, GONG Zi-tong. Contents and distribution of some heavy metal elements in the vegetable cultivated soils in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(1):85-93.
- [11] 姜培坤, 叶正钱, 徐秋芳. 高效栽培雷竹林土壤重金属含量的分析研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4):61-64.
- JIANG Pei-kun, YE Zheng-qian, XU Qiu-fang. Changes in heavy metal elements of soil in ecosystem of *phyllostachys praecox* under intensive management[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(4):61-64.
- [12] 柴世伟, 温琰茂, 张云霓, 等. 广州市郊区农业土壤重金属含量特征[J]. 中国环境科学, 2003, 23(6):592-596.
- CHAI Shi-wei, WEN Yan-mao, ZHANG Yun-ni, et al. The heavy metal content character of agriculture soil in Guangzhou suburbs[J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(6):592-596.
- [13] 黎莉莉, 张 晟, 刘景红, 等. 三峡库区消落区土壤重金属污染调查与评价[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4):127-130.
- LI Li-li, ZHANG Sheng, LIU Jing-hong, et al. Investigation and evaluation on heavy metal pollution of water-level-fluctuating zone in Three Gorge Reservoir Area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(4):127-130.
- [14] 尹 军. 基于 GIS 绿色食品基地土壤环境质量评价方法研究[J]. 农业环境保护, 2001, 20(6):446-448.
- YIN Jun. An assessment method of soil environmental quality for production base of green food based on GIS[J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(6):446-448.
- [15] 朱美英, 罗运阔, 卢志红, 等. 南昌市郊蔬菜基地土壤重金属含量及评价[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(18):5500-5501.
- ZHU Mei-ying, LUO Yun-kuo, LU Zhi-hong, et al. Content and evaluation of heavy metal in soil of vegetable growth base in Nanchang suburb[J]. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2007, 35(18):5500-5501.
- [16] 马成玲, 王火焰, 周健民, 等. 长江三角洲典型县级市农田土壤重金属污染状况调查与评价[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3):751-755.
- MA Cheng-ling, WANG Huo-yan, ZHOU Jian-min, et al. Investigation and evaluation of the heavy metal pollution in farmland of a typical county in Yangtze river delta[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(3):751-755.