

三峡库区消落区表层土壤重金属污染评价及源解析*

叶琛^{1,2,3} 李思悦^{1,2} 张全发^{1,2**}

(1. 中国科学院武汉植物园 武汉 430074; 2. 中国科学院水生植物与流域生态重点实验室 武汉 430074;
3. 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 三峡库区是我国重要的水源地, 研究库区水陆交错带消落区内土壤重金属污染程度并解析其来源, 对水库的水环境和土壤环境具有重要意义。本研究采用地质累积指数, 对三峡库区消落区 175 m 水位蓄水前 12 个采样区表层 68 个土样的土壤重金属 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As 和 Cr 污染进行评价, 结果表明: 整个研究区不受 Cr 污染, 研究区 70% 以上面积不受 Pb、Cu 和 Zn 污染; 研究区 As 污染最严重, 其次为 Cd 和 Hg。利用因子分析法对这 7 种重金属来源进行解析的结果表明, 库区消落区土壤重金属源可分为 2 大类别: “自然因子” 类别元素(Cr、Pb、Cu 和 Zn)和“工业污染因子” 类别元素(Hg、As 和 Cd)。消落区表层土壤重金属污染评价及源解析可为消落区生态环境的综合治理提供参考。

关键词 三峡水库 消落区 重金属 土壤污染 污染源

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2011)01-0146-04

Sources and assessment of heavy metal contamination in water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China

YE Chen^{1,2,3}, LI Si-Yue^{1,2}, ZHANG Quan-Fa^{1,2}

(1. Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China; 2. Key Laboratory of Aquatic Botany and Watershed Ecology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The Three Gorges Reservoir is one of the most important water resources in China. Understanding the degree of soil contamination in the water-level fluctuation zone is critical for water/soil conservation in the region. A total of 68 soil samples were collected at 12 sites in the reservoir region and analyzed before the water level rose to 175 m above mean sea level. The degrees of Cu, Pb, Zn, Cd, Hg, As and Cr contamination were determined via the geo-accumulation index (Igeo) method. The study showed that soils in the reservoir region were severely contaminated with As, Cd and Hg. While there was no Cr contamination in the reservoir region; Pb, Cu and Zn contamination was not significant in about 70% of the region. Further Factor Analysis on sources of heavy metals revealed that Cr, Pb, Cu and Zn contamination in the water-level fluctuation zone were caused by natural factors, and that of Hg, As and Cd by industrial factors. The findings of sources and the evaluation of surface soil heavy metal contamination were critical for sustainable environmental management in especially the water-level fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir.

Key words Three Gorges Reservoir, Water-level fluctuating zone, Heavy metal, Surface soil contamination, Contaminant source
(Received April 16, 2010; accepted Aug. 27, 2010)

重金属在土壤中积累不仅直接影响土壤理化性状、降低土壤生物活性、阻碍养分有效供应, 而且通过食物链数十倍富集, 通过多种途径直接或间接威胁人类健康^[1], 因此土壤重金属污染问题是当今环境科学研究的重要内容。研究土壤重金属的含量、分析其来源并对污染进行治理, 对保护人类健康、创造良

好的生态环境具有重要意义。三峡库区消落带是指由于三峡水库运行期间水文调度引起的库区水位周期性变化(水位在高程 145~175 m 之间变化)而在库区流域周边形成的一段特殊的生态环境区域, 总面积 348.93 km²^[2]。三峡水库蓄水后被淹的土壤中重金属及其他污染物质可从土壤中溶出或因土壤有机质分

* 国务院三峡建设委员会办公室项目(SX2008-005)资助

** 通讯作者: 张全发(1965~), 男, 博士, 研究员, 主要从事景观生态学和流域生态学研究。E-mail: qzhang@wbpcas.cn

叶琛(1985~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤环境监测与土壤氮循环。E-mail: yechen922@sina.com

收稿日期: 2010-04-16 接受日期: 2010-08-27

解而进入水体,引起水库水质下降,危害人类健康,进而影响三峡库区的生态环境^[3]。为保证三峡工程发挥更好的经济效益,建立库区良好的生态环境,对 175 m 水位线以下消落区土壤的重金属组成、污染评价及来源分析以及对污染的治理显得尤为迫切。

前人在三峡库区开展了大量的土壤重金属研究工作^[4-6],这些研究主要集中在不同土地利用方式以及不同土壤类型下重金属分布及评价。如陈梓云等^[7-8]对三峡库区消落区土壤的 Pb 和 Cd 进行了污染调查,许书军等^[5]对三峡库区耕地土壤重金属的分布特征进行了初步研究,周谐等^[9]对三峡库区淹没区土壤重金属分布进行了分析评价,但土壤重金属来源的分析研究鲜有报道。本文以三峡库区消落区 12 个采样区的表层土壤为研究对象,对 175 m 水位蓄水前土壤重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As、Cr 进行污染评价并分析其来源,旨在为三峡库区消落区土地利用规划、土壤环境质量保护、局部污染治理提供科学依据。

1 研究方法

1.1 样品采集

研究区位于三峡库区消落区,包括巴南、渝北、长寿、涪陵、丰都、忠县、万洲、云阳、奉节、巫山、巴东、秭归等 12 个区县。依据长江水流方向,将 12 个采样点分为上游地区(巴南至涪陵)、中游地区(丰都至云阳)、下游地区(奉节至秭归)。采样点一般选在荒地或者撂荒地上,除巴南地区水位较高只取 2 个样外,其余地区均取 6 个样,共计 68 个样。每个样方为 1 m × 1 m,采集表层 0~20 cm 深度混合土样。采样时间为蓄水前的 2008 年 8~9 月^[10]。

1.2 监测项目

监测项目主要包括 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As、Cr 等 7 项指标。分析方法为国家土壤环境质量标准(GB15618—1995)规定的分析方法,Cu、Zn、Pb、Cd 和 Cr 采用火焰原子吸收分光光度法测定,Hg 用冷原子分光光度法测定,As 用 DDC-Ag 分光光度法测定。

1.3 重金属污染评价

重金属污染评价采用当前使用较广泛的地质累积指数(Index of geoaccumulation, 简称 I_{geo})方法。它不仅反映了重金属元素分布的自然变化特征,且可判别人为活动对环境的影响,是区分人为活动影响的重要参数^[11]。地质累积指数可分为几个级别,国内使用较广的以 Förstner 等^[12]7 分法最有代表性,0~6 级表示污染程度由无到极强,最高级 6 级的元素含量可能是背景值的几百倍,不同级别代表不同的重金属污染程度(表 1)。

表 1 地质累积指数污染评价标准

Tab. 1 Criteria for assessment of soil pollution with index of geoaccumulation

地质累积指数 Index of geoaccumulation	级别 Class	污染程度 Pollution status
<0	0	无污染 Unpolluted
0~1	1	无污染至中度污染 Unpolluted to moderately polluted
1~2	2	中度污染 Moderately polluted
2~3	3	中度污染至强度污染 Moderately to heavily polluted
3~4	4	强度污染 Heavily polluted
4~5	5	强度污染至极强污染 Heavily to extremely polluted
>5	6	极强污染 Extremely polluted

采用地质累积指数评价环境污染程度时,应选择与该沉积物有直接联系的地球化学背景,使分析的污染程度更具真实性。本研究选用的基线浓度值为三峡库区土壤重金属背景值(mg · kg⁻¹): As 5.84, Cd 0.134, Cr 78.0, Cu 25.0, Hg 0.046, Pb 23.9, Zn 69.9^[13]。

1.4 数据统计

所有数据均采用 Excel、SPSS13.0 进行处理。

2 结果与分析

2.1 地质累积指数法评价三峡库区消落区土壤重金属污染

利用地质累积指数法,以三峡库区土壤重金属背景值作为基准值,对整个三峡库区消落区 68 个土样的重金属污染进行评价,7 种重金属的地质累积指数分布特征见图 1。由图 1 可知,三峡库区消落区 Cr、Pb 和 Zn 的地质累积指数分布较集中,各个地区受污染的程度相似。Hg、As、Cd 和 Cu 的地质累积指数分布较分散,各个地区受污染的程度有较大差异。

利用地质累积指数对三峡库区表层土壤进行重

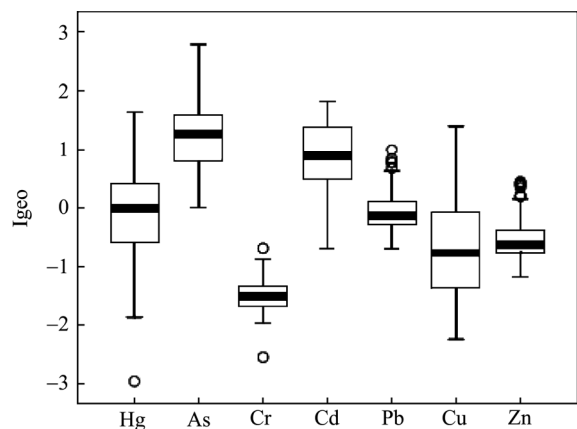


图 1 三峡库区消落区表层土壤重金属地质累积指数分布
Fig. 1 Distribution of heavy metal geoaccumulation indices of surface soils in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir

金属污染评价的结果见表 2(其中比例是通过各污染级别的样品数分别占总样品数百分数求得)。从表 2 可知, 整个研究区不受 Cr 污染; Pb、Cu 和 Zn 的无污染区分别为 69.12%、77.94%和 83.82%; As 中度以上的污染区达到 64.7%; Cd 的中度污染区为 47.06%, 轻微污染区为 41.18%; Hg 的中度污染区为 7.35%, 轻微污染区为 39.71%。因此研究区 As 污染最严重, 其次是 Cd 和 Hg。随着库区船舶数量的增加和库区沿江工业如采矿、冶炼、化工等的发展, 大量重金属污染物排入长江, 淹水时, 受污染江水的重金属污染物通过交换、扩散和沉积等方式向消落区土壤中迁移, 从而影响消落区土壤环境, 受淹土壤中重金属及其他污染物质可从土壤中溶出或因土壤有机质分解而进入水体, 进一步降低水质, 形成恶性循环。因此要加强库区点源污染的治理, 做好工业“三废”排放前的处理工作, 尽量减少船舶数量, 开展有针对性的土壤污染治理工作, 进而改善整个库区的生态环境。

表 2 三峡库区消落区表层土壤重金属污染评价
(地质累积指数法)

Tab. 2 Pollution assessment of soil heavy metals in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir (by Igeo)

污染级别 Class	所占比例 Percent (%)						
	Hg	As	Cr	Cd	Pb	Cu	Zn
0	52.94	1.47	100.00	11.76	69.12	77.94	83.82
1	39.71	33.82	—	41.18	30.88	16.18	16.18
2	7.35	58.82	—	47.06	—	5.88	—
3	—	5.88	—	—	—	—	—

2.2 地质累积指数法和潜在生态危害指数法评价土壤重金属污染结果比较

Hakanson 潜在生态危害指数法考虑到不同重金属的毒性差异及环境对重金属污染的敏感程度, 以及重金属区域背景值的差异, 是能综合反映重金属对生态环境影响潜力的指标。利用该方法对单个重金属的潜在生态危害进行评价, 结果表明 Cd 危害最严重, 其次是 Hg, 最后是 As^[10], 而地质累积指数法评价的结果为 As 污染最严重, 其次是 Cd, 最后是 Hg。这主要是因为潜在生态危害指数法在计算时要乘以重金属的毒性系数(Hg 为 40, Cd 为 30, As 为 10), 而该毒性和加权带有主观性^[14]。但这两种方法都指出土壤的主要重金属污染元素为 Cd、Hg 和 As, 并且都消除了区域差异的影响, 只是侧重点不同, 潜在生态危害指数法综合考虑了重金属的毒性、评价区域对重金属污染的敏感性, 而地质累积指数法不仅反映了重金属元素分布的自然变化特征, 而且可以判别人为活动对环境的影响, 是区分人为活动影响的重要参数^[11]。因此, 结合上述两种评价方法可

以更全面地评价三峡库区消落区土壤重金属污染, 为消落区土壤污染治理提供科学依据。

2.3 三峡库区消落区表层土壤重金属元素的分类与源解析

虽然本研究采样点是在受人为活动影响小的荒地或者撂荒地上进行, 但随着大坝蓄水, 三峡库区消落区表层土壤重金属元素含量的大小不仅取决于本地区地质背景, 也受被污染的江水影响。随着库区沿江工业的发展, 船舶数量增加, 大量重金属污染物排入长江, 受污染的江水增加了土壤重金属的来源。同一工业活动可以产生许多重金属元素, 同一重金属元素的来源也不尽相同。因此, 为更好地界定研究区表层土壤重金属元素的来源和类别, 综合运用多种统计分析方法对原始数据进行分析。

多变量研究中, 变量的个数很多, 并且彼此往往存在一定的相关性。因子分析(Factor analysis)能把具有复杂关系的变量归结为数量较少的几个综合因子。它是通过一种降维的方法进行简化得到综合指标(综合指标是原来多个变量的线性相关组合)。因子分析在界定土壤或沉积物中元素的来源和分类方面应用广泛^[15]。

因子分析前, 对研究区 68 个土样进行 KMO 和 Bartlett 球形检验, 检验结果分别为 0.703 和 366.814 ($df=21, P<0.01$), 表明该因子分析是有效的^[16]。通过因子分析, 提取的 2 个因子解释了总方差的 71.233% (表 3)。从表 3 可以看出 7 种元素的所属类别。因子 1 包括 Cr、Pb、Cu 和 Zn, 表明它们有很强的地球化学关系^[17-18]。从地质累积指数法分析的结果可知, 三峡库区表层土壤受 Cr、Pb、Cu 和 Zn 的污染较小, 因此因子 1 可以被视为“自然因子”: 一方面因为三峡库区消落区土壤 Cr、Pb、Cu 和 Zn 的平均含量分别为 $41.94 \pm 6.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $36.16 \pm 8.89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $31.70 \pm 19.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $78.80 \pm 24.62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[10], 接近或者小于土壤背景值(Cr 为 $78.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cu 为

表 3 三峡库区表层土壤重金属元素提取的因子负荷
Tab. 3 Factor loadings of heavy metals extracted from the topsoil samples of the Three Gorges Reservoir

重金属 Heavy metal	旋转变换前因子 Component matrix		旋转变换后因子 Rotated component matrix	
	1	2	1	2
Hg	0.263	0.708	0.540	-0.528
As	0.484	-0.647	0.161	0.792
Cr	0.502	0.223	0.549	0.013
Cd	0.748	-0.447	0.485	0.723
Pb	0.963	0.029	0.884	0.385
Cu	0.936	0.108	0.893	0.302
Zn	0.909	0.243	0.926	0.169
累积负荷 Cumulative load (%)	53.508	71.233	46.988	71.233

25.0 mg · kg⁻¹, Pb 为 23.9 mg · kg⁻¹, Zn 为 69.9 mg · kg⁻¹[13]; 另一方面从土壤重金属间以及土壤重金属与土壤有机质的相关分析结果也可知(表 4), Cr、Pb、Cu 和 Zn 之间的相关性显著($P < 0.05$), 并且 Cr、Zn 与土壤有机质(SOM)的相关性也显著($P < 0.05$), 从某种程度上表明 Cr、Pb、Cu 和 Zn 主要来自于自然背景[19]。因子 2 包括 Hg、As 和 Cd, 该组元素也是三

峡库区土壤污染较严重的元素, 并且从这些元素在三峡流域的分布看, As 和 Cd 均为上游值高[10], 上游多为重庆主城区, 工业发达, 污染严重, 因此因子 2 可以被称为“工业污染因子”。虽然土壤 As 与土壤有机质的相关性显著, 但 As 含量($22.39 \pm 7.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[10]远高于土壤的背景值($5.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[13], 同时 As 与 Cd 的相关性也显著, As 主要来自于工业污染。

表 4 三峡库区表层土壤重金属间及其与土壤有机质(SOM)间的相关性

Tab. 4 Correlations matrix for heavy metals and soil organic matter (SOM) in the topsoil samples of the Three Gorges Reservoir

	Hg	As	Cr	Cd	Pb	Cu	Zn	SOM
Hg	1							
As	-0.064	1						
Cr	0.090	0.147	1					
Cd	-0.020	0.532**	0.174	1				
Pb	0.207	0.370**	0.428**	0.702**	1			
Cu	0.316**	0.382**	0.333**	0.601**	0.901**	1		
Zn	0.249*	0.174	0.471**	0.521**	0.911**	0.900**	1	
SOM	0.044	0.387**	-0.280*	0.173	-0.163	-0.171	-0.359**	1

*和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著相关 * and ** mean significant correlation at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

3 结论

利用地质累积指数法, 以三峡库区土壤重金属背景值作为基准值, 对整个三峡库区消落区 68 个土样的重金属污染进行评价, 结果表明整个研究区不受 Cr 污染, 70%土样以上不受 Pb、Cu 和 Zn 污染, As 污染最严重, 其次是 Cd 和 Hg。要结合土壤重金属的来源, 从根本上对土壤污染进行治理, 改善整个库区的生态环境。

Hakanson 潜在生态危害指数法和地质累积指数法评价结果均指出三峡库区消落区土壤主要重金属污染元素为 Cd、Hg 和 As, 因此对该区土壤恢复治理时要加强这 3 种元素的治理。

通过对三峡库区消落区 12 个采样区表层土壤重金属来源解析, 把 7 种重金属分为 2 个类别: “自然因子”类别元素(Cr、Pb、Cu 和 Zn)和“工业污染因子”类别元素(Hg、As 和 Cd)。

致谢 卢志军、黄汉东、李连发、陶敏等参加了野外调查, 卢志军参与了文章的修改指导工作, 在此深表感谢!

参考文献

- [1] 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
- [2] 傅杨武, 陈明君, 祁俊生. 重金属在消落带土壤-水体系统中的迁移研究[J]. 水资源保护, 2008, 24(5): 8-11
- [3] 张金洋, 王定勇, 石孝洪. 三峡水库消落带淹水后土壤性质变化的模拟研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 120-123
- [4] 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
- [5] 许书军, 魏世强, 谢德体. 三峡库区耕地重金属分布特征

- 初步研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 64-66
- [6] 李其林, 黄昀, 刘光德, 等. 三峡库区主要土壤类型重金属含量及特征[J]. 土壤学报, 2004, 41(2): 301-304
- [7] 陈梓云, 彭梦侠. 三峡库区消落带土壤中铅污染调查[J]. 土壤与环境, 2001, 10(2): 165-166
- [8] 陈梓云, 彭梦侠. 三峡库区消落带土壤中镉污染调查及分析[J]. 西南民族大学学报: 自然科学版, 2003, 29(4): 494-495
- [9] 周谐, 郑坚, 张晟, 等. 三峡库区重庆段淹没区土壤重金属分布及评价[J]. 中国环境监测, 2006, 22(6): 86-88
- [10] 叶琛, 李思悦, 张全发. 三峡库区消落区蓄水前土壤重金属含量分析及生态危害评价[J]. 土壤学报, 2010, 47(6): 1264-1269
- [11] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Journal of Geology, 1969, 2(3): 108-118
- [12] Förstner U, Ahlf W, Calmano W, et al. Sediment criteria development-contributions from environmental geochemistry to water quality management[C]//Heling D, Rothe P, Förstner U, et al. Sediments and environmental geochemistry. Berlin: Springer-Verlag, 1990: 311-338
- [13] 唐将, 钟远平, 王力. 三峡库区土壤重金属背景值研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(4): 848-852
- [14] Fernandes H M. Heavy metal distribution in sediments and ecological risk assessment: The role of diagenetic processes in reducing metal toxicity in bottom sediments[J]. Environmental Pollution, 1997, 97(3): 317-325
- [15] 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
- [16] Zhou F, Guo H C, Liu L. Quantitative identification and source apportionment of anthropogenic heavy metals in marine sediment of Hong Kong[J]. Environmental Geology, 2007, 53(2): 295-305
- [17] 李思悦, 程晓莉, 张全发, 等. 南水北调中线水源丹江口水库水化学特征研究[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2111-2116
- [18] 李思悦, 谭香, 张全发, 等. 湖北丹江口水库主要离子化学季节变化及离子来源分析[J]. 环境科学, 2008, 29(12): 3353-3359
- [19] 唐将, 王世杰, 付绍红, 等. 三峡库区土壤环境质量评价[J]. 土壤学报, 2008, 45(4): 601-607