三峡水库蓄水对消落带土壤重金属的影响*

储立民[1,2]　常　超[1,2]　谢宗强[1†]　熊高明[1]
(1 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室,北京　100093)
(2 中国科学院研究生院,北京　100049)

EFFECT OF IMPOUNDING OF THE THREE-GORGES RESERVOIR ON SOIL HEAVY METALS IN ITS HYDRO-FLUCTUATION BELT

Chu Limin[1,2]　Chang Chao[1,2]　Xie Zongqiang[1†]　Xiong Gaoming[1]
(1 *State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change*, *Institute of Botany*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing*　100093, *China*)
(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing*　100049, *China*)9

关键词　淹水强度;土壤环境质量;重金属
中图分类号　X825　　**文献标识码**　A

河岸带土壤重金属已成为国内外研究的热点问题之一[1-4]。随着水库蓄水,长江水流速度降低,水体稀释扩散能力下降,水体中污染物浓度增加,水库大面积长时期淹水容易造成污染物在土壤中滞留时间加长[5],此外,水库两岸排放的污染物也将在水流缓慢的消落带富集。另外,水库大面积蓄水一段时间后,消落带土壤中重金属将被溶出直接释放至水中,或者随着径流汇入水库,成为水库重金属的一个重要来源[6],由于消落带原有的生态系统受损,新的湿地生态系统还未发育完善,其截留、吸收污染物的能力减小,造成大量污染物直接进入水体[7-8],从而加大水库重金属生态风险。

三峡工程蓄水后,水库在每年汛期(6 ~ 9 月)将水位降至最低的 145 m,而在汛期后(10 月)开始蓄水,将水位升至最高的 175 m。因此,三峡水库经过蓄水后两岸将形成垂直落差达 30 m的消落带。高强度的年周期性水位涨落将使消落带水土环境发生巨大改变,带来一系列生态环境问题[9-11]。目前,有关三峡土壤重金属的研究主要集中于淹水前三峡水库消落带土壤重金属的现状调查[12-15]、耕地土壤重金属研究[16]及消落带水体-土壤重金属动态模拟研究[16]等方面。然而,对实际淹水前后消落带土壤重金属的变化情况及淹水后消落带重金属污染评价的研究少见报道,因此,本文依据三峡水库长时间、高深度、反季节淹水的现实情况,分析了蓄水前后消落带不同淹水强度土壤 Cu、Zn、Pb、Cr 含量及变化情况,为研究蓄水对消落带水土污染状况的影响提供依据,为水库消落带生态系统污染评价奠定基础。

1　研究区域及研究方法

1.1　试验区域概况

重庆忠县地处东经 107°32′ ~ 108°14′、北纬 30°03′ ~ 30°35′,位于三峡库区腹心地带,属典型的丘陵地貌,地质岩层以侏罗纪蓬莱组沙页岩为主,土壤类型以紫色土为主。该区域地处暖湿亚热带东南季风区,年降雨量 1 267 mm,年均温 18.2℃,相对湿度 81%[17]。

三峡水库 2007 年 9 月蓄水至 156 m,2008 年 3 ~ 6月退水至 145 m,形成垂直落差 11 m 的消落带,不同垂直高度的土壤在淹水期间遭受的淹水强

* 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2 - XB2 - 07 - 03)和国家科技支撑计划课题(2006BAC10B01)资助
† 通讯作者,E-mail: xie@ ibcas. ac. cn
作者简介:储立民(1984—),男,浙江人,硕士,主要从事保护生态学研究。E-mail: ywlmchu@ gmail. com
收稿日期:2009 - 04 - 25;收到修改稿日期:2010 - 01 - 20

度不同,低水位的土壤遭受长时间、高强度的持续淹水,仅偶尔出露,149 ~155 m 水位经过 2007 年 10 月至 2008 年 3 ~6 月的淹水后暴露,155 m 以上水位一直未经过淹水。淹水前,此区域为农田,淹水后,出露区域撂荒变成杂草地。

1.2　样地设置

在忠县石宝寨消落带地区设置 6 条样带,各样带以海拔 146 m 为最低点,从该点往高处每隔 3 m 高差设置采样点,样点海拔分别处在 146 m、149 m、152 m、155 m、158 m、161 m,每条样带设置 6 个点,共 36 个固定样点(图 1)。

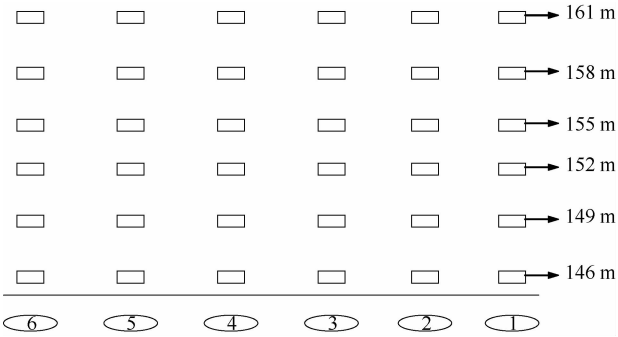


图 1　实验地采样点分布图

1.3　土壤样品采集与处理方法

于 2007 年 9 月、2008 年 3 ~6 月退水后、2008 年 7 月初、2008 年 8 月初、2008 年 9 月初五个土壤裸露时期在 36 个固定样点用土钻分别钻取 3 个0 ~20 cm 的表层土壤样品。2007 年 9 月、2008 年退水后、2008 年 7 月初分别采土壤样品 108 个;8 月初由于 146 m 水位被水淹,采土壤样品 90 个,9 月初由于 146 m、149 m 水位均被水淹,采土壤样品 72 个。将土壤自然风干后去除有机残体、杂质等,编号,装封口袋带回实验室,供分析用。

1.4　土壤测定项目及分析方法

风干土壤取回至实验室,过 2 mm 筛,用于分析 pH;过 0.25 mm 尼龙筛,用于分析 Cu、Zn、Pb、Cr 含量。所有室内土壤样品分析方法根据土壤理化分析步骤进行,具体方法如下:土壤 pH 采用 pH 计法;土壤重金属含量采用氢氟酸-高氯酸消煮-ICP 测定。

1.5　数据分析方法

利用 Excel 和 SPSS 11.5 软件对数据进行统计分析。采用双因素方差分析研究不同淹水强度及不同时期土壤重金属的差异性,差异程度用多重比较(SSR) ($p < 0.05$)分析。土壤重金属环境质量评价采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法。

2　结果与分析

2.1　土壤 pH 变化

不同淹水强度土壤酸碱性差异显著($p < 0.001$)。其中,146 m、149 m、152 m、155 m、158 m 和 161 m 水位土壤 pH 分别为 8.43、8.51、8.14、8.05、7.76 和 7.42,淹水土壤 pH 显著高于未淹水土壤。

淹水前后不同时期土壤酸碱性差异显著($p < 0.05$),淹水前土壤 pH 为 8.15,土壤经过淹水完全暴露后,土壤 pH 升高,之后随着暴露时间的延长 pH 又逐渐下降(图 2)。

2.2　土壤重金属含量变化

经双因素方差分析得出,不同淹水强度和不同时期土壤各重金属含量交互作用不显著。

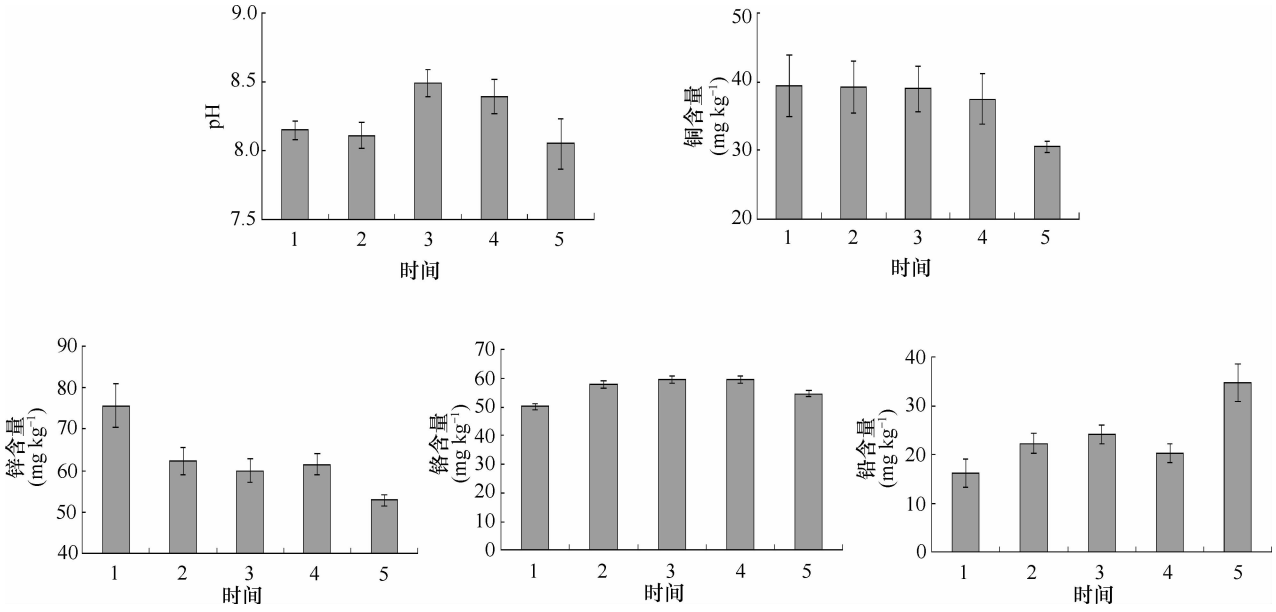
2.2.1　不同淹水强度对土壤重金属含量变化的影响　　不同淹水强度土壤 Cu、Zn、Cr 和 Pb 含量均差异显著($p < 0.001$)。长期淹水土壤重金属含量显著高于短期淹水土壤与未淹水土壤。146 m 水位各重金属含量最高(表 1)。

表 1　不同淹水条件下重金属含量及 SSR 检验

水位 (m)	Cu ($mg\ kg^{-1}$)	Zn ($mg\ kg^{-1}$)	Cr ($mg\ kg^{-1}$)	Pb ($mg\ kg^{-1}$)
146	48.85b	77.61b	59.04c	28.77b
149	48.52b	71.32b	58.06bc	24.32ab
152	30.77a	57.59a	55.57ab	19.68a
155	29.84a	55.28a	54.16a	19.68a
158	29.56a	55.50a	52.25a	19.28a
161	29.23a	55.66a	54.18a	20.38a

注:表中所列数据为不同淹水强度样点的平均值,表中字母代表双因素方差分析 SSR 检验比较($p < 0.05$)

2.2.2　不同时期土壤重金属含量变化　　淹水前后不同时期土壤 Zn、Cr、Pb 含量均差异显著($p < 0.001$),Cu 含量差异不显著($p = 0.989$)。土壤 Cu、Zn 含量经过淹水暴露后稍微下降,并随暴露时间延长继续下降(图 2)。土壤 Cr、Pb 含量在暴露后出现上升,Cr 含量在 2008 年 7 月达到最大值(59.66 $mg\ kg^{-1}$),之后又逐渐下降,Pb 含量在 2008 年 9 月达到最大值(34.76 $mg\ kg^{-1}$)(图 2)。



1. 2007 年 9 月;2. 2008 年 3 ~ 6 月;3. 2008 年 7 月;4. 2008 年 8 月;5. 2008 年 9 月

图 2 不同淹水时期经过淹水的土壤重金属含量

2.3 土壤重金属之间的相关性

对调查的土壤重金属元素进行两两相关分析,结果表明:土壤各重金属元素之间呈显著正相关关系(表 2)。可见,消落带土壤 4 种重金属元素同时累积的可能性较大,土壤存在重金属复合污染隐患。

表 2 各测定指标之间的相关性分析

指标	Cu	Zn	Cr	Pb
Cu	1.000			
Zn	0.742 **	1.000		
Cr	0.557 **	0.402 **	1.000	
Pb	0.617 **	0.363 **	0.541 **	1.000

注: ** 表示相关性的显著水平 $p < 0.01$

2.4 土壤重金属环境质量评价

三峡水库消落带土壤重金属环境质量评价以三峡水库土壤环境背景值作为评价标准。唐将等[15]提出了三峡水库土壤重金属含量背景值:Cr 为 78.03 mg kg^{-1}, Cu 为 25.00 mg kg^{-1}, Pb 为 23.88 mg kg^{-1}, Zn 为 69.88 mg kg^{-1}。

采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法对库区消落带土壤 Cu、Zn、Pb、Cr 四种重金属元素分别进行评价。根据单因子污染指数,P_i 表现为 Cu > Pb > Zn > Cr,其中,Cu 累积程度最为严重(表 3)。根据土壤评价分级标准,$0.7 < P \leqslant 1.0$ 属于土壤污染警戒级,$1.0 < P \leqslant 2.0$ 属于土壤轻度污染,因此,146 m、149 m 水位土壤已经处于轻度污染级,149 m 以上水位均处于警戒级。根据内梅罗综合污染指数分析,消落带土壤重金属多因子综合污染指数为 1.24,表明三峡水库消落带土壤处于轻度污染级。

表 3 土壤重金属环境质量指数

水位(m)	单因子污染指数 P_i					综合污染指数 P_j
	Cu (mg kg^{-1})	Zn (mg kg^{-1})	Cr (mg kg^{-1})	Pb (mg kg^{-1})	平均值	
146	1.95	1.11	0.76	1.20	1.26	1.64
149	1.94	1.02	0.74	1.02	1.18	1.61
152	1.23	0.82	0.71	0.82	0.90	1.08
155	1.19	0.79	0.69	0.82	0.88	1.05
158	1.18	0.79	0.67	0.81	0.86	1.04
161	1.17	0.80	0.69	0.85	0.88	1.03
平均值	1.45	0.89	0.71	0.92	0.99	1.24

3 讨　论

3.1 不同淹水强度对土壤酸碱性的影响

大量其他流域研究及三峡消落带模拟实验研究发现,经过淹水,酸性土壤 pH 升高,碱性土壤 pH 降低,最终均趋近于中性[18-19]。但本研究发现,消落带土壤为微碱性,经过淹水土壤 pH 仍高于未淹水土壤(图 2),且淹水时间越长,pH 越大。这可能是由于在嫌气强烈还原条件下,形成大量还原性碳酸铁、锰,呈碱性,溶解度较大,导致 pH 升高。同时,土壤酸碱性也受江水影响,可能江水 pH 高,导致淹水后土壤 pH 也升高。此外,经过淹水的土壤 pH 在暴露后于 2008 年 7 月期间达到最大,之后又回落(图 2),这可能是由于随着暴露后光热条件的逐渐恢复,植物生长产生一定数量的有机酸,导致 pH 出现回落。本研究 2008 年 3 ~ 6 月取样时期刚刚退水,9 月取样期间正值雨天,淹水土壤经风干后测定,pH 与原位实际状况有区别,一般风干后土壤 pH 会降低,因此 2008 年 3 ~ 6 月及 9 月期间 pH 较其他时期低,也可能是风干土与实际土壤状况产生较大差异造成的。土壤 pH 受多种因素影响,三峡水库淹水对土壤酸碱性的影响有待于进一步研究。

3.2 不同淹水强度对土壤重金属含量的影响

淹水条件下土壤的物理、化学、生物学性质均将发生显著变化,这些变化将通过改变土壤组分的化学行为而最终影响元素的活化、迁移[20-22]。黎莉莉等[23]于三峡水库蓄水前在忠县消落带所做的土壤重金属调查结果显示:Cu、Zn、Pb 含量分别为 22.0、55.2、18.1 mg kg^{-1};陈梓云等[12]对三峡水库蓄水前忠县消落带 Cr 的调查分析显示:Cr 含量为 22.24 mg kg^{-1}。本研究显示,三峡水库蓄水后,忠县消落带未淹水土壤重金属含量与之相比含量相当,但经过淹水的土壤其重金属含量明显高于蓄水前水平,其中,146 m、149 m 水位土壤 Cu、Pb、Zn、Cr 含量均远远高于蓄水前水平,146 m 水位土壤重金属含量增加最为显著,Cu、Pb、Zn 和 Cr 含量分别增加了 122%、59%、41% 和 29%。这说明,经过淹水后,水中重金属在土壤中有沉淀积累现象,146 m、149 m 土壤重金属含量最高,说明淹水强度越大,淹水时间越长,重金属在土壤中的累积越严重。首先,这是由于土壤重金属含量与距离水体的远近距离有关,远河岸远离水体,受水体影响较轻,再加上污染物向近河岸方向的淋溶,造成重金属在低水位土壤中的累积,这与秦淮河河岸带土壤重金属累积现象相一致[24]。其次,2008 年长江三峡工程生态与环境监测公报结果显示:2007 年 7 月、8 月期间,三峡库区长江干流断面水质最差[17],其中,离忠县石宝寨最近的监测点为万州沱口和涪陵清溪场,沱口 7 月水质为Ⅴ类,8 月水质为Ⅳ类,清溪场 7 月水质为Ⅳ类,8 月水质为Ⅴ类,水质污染均较严重;2008 年三峡生态与环境监测信息简报显示:2008 年 8 月长江水体重度污染,2008 年 9 月长江水体中度污染[25]。因此,由于 7、8 月期间三峡水库水位一直在 145 ~ 149 m 范围波动,此期间水质污染较为严重,从而导致重金属在土壤中沉积,造成近河岸土壤重金属富集。此外,淹水使土壤重金属的有效性降低,并且随淹水时间的延长而加重。水分影响重金属形态的主要原因是水分调节土壤的氧化还原电位(Eh)。土壤在淹水还原条件下,易形成沉淀[26];且有机质不易分解,产生硫化氢,同时 SO_4^{2-} 还原为 S^{2-},使重金属生成硫化物沉淀而降低其生物有效性,从而减少土壤重金属解吸,使重金属在土壤中累积而未释放至水体。

淹水暴露后,土壤中 Cu、Zn 含量均下降,说明淹水造成土壤中 Cu、Zn 逐渐被解吸释放至水体中,在 2008 年 9 月出现明显下降是由于取样前连续降雨造成土壤淋溶作用加强,使土壤中 Cu、Zn 含量迅速下降。Pb、Cr 含量在淹水暴露后略有增长,这可能是由于水体中可溶性 Pb、Cr 含量高,淹水期间在土壤中沉淀累积,傅杨武等[16]也在三峡消落带的土壤-水体重金属迁移研究中证明土壤重金属含量随长江水体重金属浓度的升高而增加。

3.3 土壤重金属对水环境的动态风险与污染控制

三峡水库消落带土壤重金属环境质量评价结果表明,三峡水库消落带已受到外源物质的侵袭,且存在重金属同时累积的隐患,随着将来每年高强度、高深度的周期性水位涨落,消落带土壤中的重金属及其他污染物将通过溶解、交换、扩散等方式进入水体而引起水质变化,可能增加水环境的风险;江水中的重金属等各种污染物质亦可能通过吸附、沉淀等形式迁移至消落带土壤中而引起土壤环境改变,土壤重金属累积必然成为影响消落带生态环境状况的重要因子。

同时,重金属离子在土壤和水体间存在一系列复杂的络合、吸附、解吸、沉积等物理化学过程,这些过程受土壤的特性、江水的重金属浓度、pH 等诸多条件的影响,不断变化的水环境也将影响着重金

属的迁移转化和状态分布,因此,本研究还有待进一步深入。

参 考 文 献

[1] Foster I D L, Charlesworth S M, Keen D H. A comparative study of heavy metal contamination and pollution in four reservoirs in the English Midlands, UK. Hydrobiologia, 1991, 214: 155—162

[2] Stephane A, Jorg S, Gerard B, et al. Fifty-year sedimentary record of heavy metal pollution (Cd, Zn, Cu, Pb) in the Lot River reservoirs (France). Environmental Pollution, 2004, 132: 413—426

[3] Shotbolt L, Hutchinson S M, Thomas A D. Sediment stratigraphy and heavy metal fluxes to reservoirs in the southern Pennine uplands, UK. Journal of Paleolimnology, 2006, 35: 305—322

[4] Lasheen M R, Ammar N S. Speciation of some heavy metals in River Nile sediments, Cairo, Egypt. Environmentalist, 2009, 29: 8—16

[5] 钟成华. 三峡水库对重庆段水环境影响及其对策. 重庆: 西南师范大学出版社, 2004: 2—12

[6] 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. 水土保持学报, 2003, 17(4): 64—66

[7] 冯启言, 孟庆俊, 韩宝平, 等. 荆马河水体 Cu、Cd、Pb、Cr 污染及其对土壤的影响. 环境科学与技术, 2004, 27(1): 46—47, 61

[8] 冯孝杰, 魏朝富, 谢德体. 周期性淹水对消落区水土环境的影响及控制对策. 中国农学报, 2005, 21(10): 356—359

[9] Baldwin D S, Mitchell A M. The effects of drying and re-flooding on the sediment and soil nutrient dynamics of lowland river-floodplain systems: A synthesis. Regulated Rivers: Research & Management, 2000, 16: 457—467

[10] Chao D H. The Three Gorges Project and eco-environmental monitoring system. Environmental Informatics Archives, 2006, 4: 419—426

[11] 谢德体, 范小华, 魏朝富. 三峡水库消落区对库区水土环境的影响研究. 西南大学学报: 自然科学版, 2007, 29(1): 39—47

[12] 陈梓云, 彭梦侠. 三峡库区消落带土壤中重金属铬调查与分析. 四川环境, 2001, 21(1): 53—54

[13] 陈梓云, 彭梦侠. 三峡库区消落带土壤中铅污染调查. 土壤与环境, 2001, 10(2): 165—166

[14] 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. 西南农业大学学报: 自然科学版, 2006, 28(1): 165—168

[15] 唐将, 钟远平, 王力. 三峡库区土壤重金属背景值研究. 中国生态农业学报, 2008, 16(4): 848—852

[16] 傅杨武, 陈明君, 祁俊生. 重金属在消落带土壤水体系中的迁移研究. 水资源保护, 2008, 24(5): 8—11

[17] 中国环境监测总站. 2008 年长江三峡工程生态与环境监测公报. [2008 - 06 - 17]. http://www.zhb.gov.cn/hjjc09/jcxx/sxgb/08sxgb/

[18] 张金洋, 王定勇, 石孝洪. 三峡水库消落区淹水后土壤性质变化的模拟研究. 水土保持学报, 2004, 18(6): 120—123

[19] 唐罗忠, 生原喜久雄, 户田浩人, 等. 湿地林土壤的 Fe^{2+}, Eh 及 pH 值的变化. 生态学报, 2005, 25(1): 103—107

[20] Das D K, Kumar M. Interaction between Zn and Cd in submerged soil in relation to nutrition of rice. Indian-Agriculturist, 1996, 40(1): 45—52

[21] 胡枭, 樊耀波, 王敏健. 影响有机污染物在土壤中的迁移、转化、行为的因素. 环境科学进展, 1998, 7(5): 14—22

[22] Tack F M G, van Ranst E, Lievens C, et al. Soil solution Cd, Cu and Zn concentrations as affected by short-time drying or wetting: The role of hydrous oxides of Fe and Mn. Geoderma, 2006, 137: 83—89

[23] 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. 水土保持学报, 2005, 19(4): 127—130

[24] 李冬林, 金雅琴, 张纪林, 等. 秦淮河河岸带典型区域土壤重金属污染分析与评价. 浙江林学院学报, 2008, 25(2): 228—234

[25] 长江三峡工程生态与环境监测中心. 三峡生态与环境监测信息简报, 2009 - 03 - 16

[26] Chatterjee A K, Mandal B, Mandal L N. Interaction of nitrogen and potassium with zinc in submerged soil and lowland rice. Indian Soc Soil Sci, 1996, 44(4): 792—794