

文章编号:1004-8227(2011)01-0101-06

## 三峡库区干湿交替消落区土壤磷形态

曹琳, 吉芳英\*, 林茂, 黎司, 王图锦

(重庆大学城市建设与环境工程学院三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要:**结合三峡水库“蓄清排浊”、反季节调度模式,通过对消落区首次自然干湿交替土壤中磷的赋存形式、含量变化的分析,揭示了新生消落区土壤中磷的分布特征和释放规律。结果表明:水库夏季低水位运行时上覆水总磷含量远高于冬季枯水期高水位时上覆水总磷含量,且由于汛期径流量大,上下游上覆水总磷含量波动明显。自然干湿交替状态下土壤中不同形态磷分布规律一致,活性磷、有机磷含量变化程度剧烈,成为新生消落区上覆水内源磷负荷的主要来源,且库区首次蓄水至 175 m 后新生消落区土壤有机磷是土壤内源磷贡献的主要承担者。覆水初期干湿交替土壤各形态磷含量没有显著差异。覆水后消落区土壤总磷释放程度与本底土壤的总磷、有机磷、活性磷呈现出显著线性相关关系。新生消落区土壤作为潜在磷源,在成库初期对库区水质影响不大。

**关键词:**三峡库区; 消落区; 磷; 干湿交替

文献标识码: A

三峡大坝建成投入运行后,根据“蓄清排浊”的水库运行方案,库区周边将形成垂直距离 30 m、面积 440 km<sup>2</sup> 的反季节消落区<sup>[1,2]</sup>。新生消落区土壤是磷元素积累和释放的重要场所<sup>[3,4]</sup>。三峡水库运行情况已表明,库区次级河流的富营养化态势日趋明显。三峡反季节消落区的干湿交替状态是否增加土壤磷向水体释放的风险值得深入研究。现有研究表明,磷的形态决定了磷在环境中的迁移、转化、沉积规律<sup>[4~10]</sup>;杨学芬等<sup>[11]</sup>研究发现沉积物中活性磷和有机磷是潜在释放源;SAH 等<sup>[12]</sup>研究了自然季节性消落区土壤各形态磷变化发现,覆水期 Al-P 含量降低而 Fe-P 含量升高,出露期 Al-P 含量先降低后升高而 Fe-P 下降;马利民等<sup>[13]</sup>和王里奥等<sup>[8]</sup>分别以万州新田乡紫色土和开县土壤为对象进行实验室模拟淹水实验发现,水土界面释放活性为 Ca<sub>2</sub>-P, Fe-P > Ca<sub>8</sub>-P, Al-P > O-P > Ca<sub>10</sub>-P。目前干湿交替土壤磷素释放研究主要是针对水田和湿地作物磷吸收及有效性,而针对库区消落区干湿交替的研究,主要集中于单一消落区土壤实验室模拟淹水研究,尚未见有关库区新生消落区自然环境条件下干湿交替土壤磷形态、分布特征的相关报道。

基于 2008 年 9 月三峡水库首次以 175 m 高水位试运行,该研究将结合库区汛期低水位 145 m 至枯水期高水位 175 m 的水位调度模式,以成库过程中的三峡库区新生消落区为研究对象,采用连续浸提法测定自然环境下首次干湿交替土壤中弱吸附态磷、铝磷、铁磷、闭蓄态磷、钙磷的含量水平,对比分析高低水位下消落区上覆水、干湿交替土壤中磷酸盐的赋存形式,揭示消落区自然环境干湿交替土壤中磷的分布特征变化和释放规律,为库区新生消落区磷内源控制提供理论指导,为库岸河流水体富营养化污染的控制提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集与保存

沿三峡库区长江干流布设滩涝、丰都、高家、新生、忠县、武陵、万州、云阳、奉节、巫山、巴东、秭归共 12 个库区新生消落区段面,见图 1。采样时间、样品类型见表 1。

采样和保存方法:按照水环境监测规范<sup>[14]</sup>分别用采水器和埃克曼采泥器(Hydro-Bios,德国)采集

收稿日期:2009-01-29;修回日期:2010-04-08

基金项目:科学技术部中德三峡库区水环境污染过程控制与安全保障技术研究合作项目(2007DFA90660);教育部科技创新工程重大项目培育资金项目(708071)

作者简介:曹琳(1984~),女,重庆人,博士研究生,主要从事水污染控制原理研究。E-mail:sweetiecl@163.com

\*通讯作者 E-mail:jfy@cqu.edu.cn

水样、土壤样品。其中,每个土壤样品均设置 10 m × 10 m 的采样区,并按照梅花型布点方式采集土壤样品,均匀混合后用四分法缩取 100 g 左右的土壤作为混合样品,采集的样品装在聚乙烯管中,密封,贴上标签,与上覆水样品一起放入冰盒中冷藏运输。带回实验室后,样品保存于 -20 °C 冰箱中。

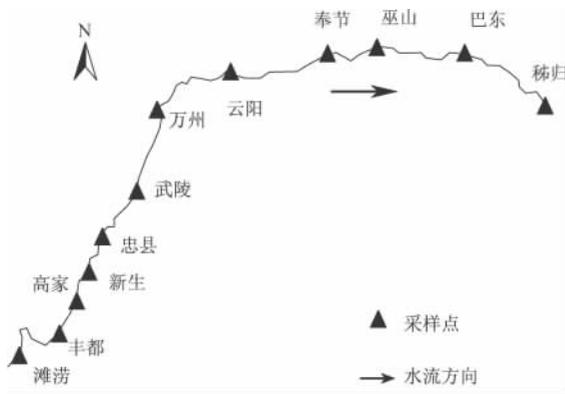


图 1 消落区采样点分布图

Fig. 1 Sampling Spots Distribution in Fluctuating Zone

表 1 采样时间及样品类型

Tab. 1 Sampling Time and Type

采样时间	水样	土壤样品
2008 年 8 月	表层上覆水	未覆水, 表层(0~5 cm) 本底土壤
2008 年 11 月	表层上覆水、 底层上覆水	覆水 2~3m, 表层(0~5 cm)土壤

注:2008 年 8 月采集的本底土壤为蓄水前裸露未受淹的约为 170~175 m 土壤,11 月采集的土壤样品为与覆水前同一地点的覆水深度约为 2~3m 的土壤;表层上覆水为覆水消落区水面以下 0~1 m 水样;底层上覆水为覆水消落区土壤以上 0~1 m 水样。

## 1.2 样品分析与测试

### 1.2.1 上覆水样分析方法

上覆水样总磷采用过硫酸钾消解法+钼锑抗分光光度法测定。

### 1.2.2 土壤样品分析方法

试验中供分析的土壤样品均为鲜样。样品分析前,将储存在 -20 °C 冰箱中的样品置于 4 °C 冰箱中解冻,然后将各采样点样本混合均匀按四分法取样。样品测试时同时测定水分,结果以干重表示。

(1)无机磷形态的分级提取:无机磷的形态分级提取采用张敬守和 Jackson<sup>[15]</sup>提出的连续浸提法测定磷的 5 种形态,包括弱吸附态磷(Ex-P)、铝磷(Al-P)、铁磷(Fe-P)、闭蓄态磷(O-P)、钙磷(Ca-P),分析方法为:称取土壤样品 1.0 g,依次以 1 mol/L NH<sub>4</sub>Cl、0.5 mol/L NH<sub>4</sub>F+0.8 mol/L H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>、0.1 mol/L NaOH、0.3 mol/L 柠檬酸钠+1 g 连二亚硫酸钠+0.5 mol/L NaOH、0.5 mol/L (1/2H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)为浸提剂,进行连续浸提,离心分离后上层清液用钼锑抗分光光度法测定 5 种形态的无机磷。

(2)总磷(TP):硫酸-高氯酸消解法,过滤后钼锑抗分光光度法测定。其与无机磷的差值即为有机磷(Or-P)。

## 2 结果

### 2.1 消落区上覆水总磷变化

8、11 月份消落区上覆水总磷含量见图 2。从图 2 可以清楚地看出,8 月汛期水库 145 m 低水位运行时期,消落区上覆水中总磷含量较高且波动较大,

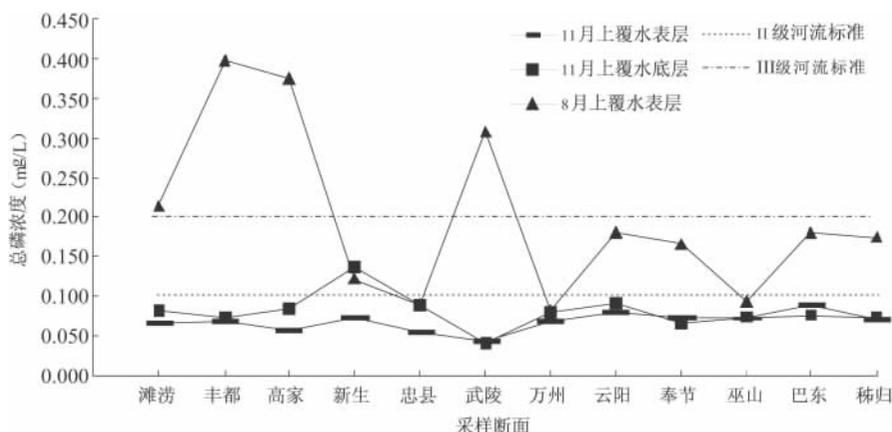


图 2 消落区上覆水总磷含量

Fig. 2 Total Phosphorous Contents in the Overlying Water

在 0.082~0.398 mg/L,均值为 0.199 mg/L。11 月枯水期水库首次 175 m 高水位运行,消落区土壤全部处于覆水状态,各点上覆水总磷含量较低且波动较小,表层水总磷在 0.043~0.089 mg/L,均值为 0.068 mg/L,底层水总磷在 0.041~0.091 mg/L,均值为 0.081 mg/L。

从 11 月水库高水位运行状态看,消落区表层上覆水总磷含量<底上层上覆水总磷含量,说明底层上覆水受消落区土壤磷释放作用的影响更为明显。还可以发现,库区上下游各点上覆水总磷含量趋于平稳,波动很小,可能是因为成库后流速减缓,一定程度上增加了水中营养物的停留时间,有利于水流混合和悬浮物沉降。对比水库低、高水位运行时消落区上覆水总磷含量不难发现,水库低水位运行时总磷含量明显高于高水位运行时总磷含量,且库区上下游总磷含量波动明显,究其原因发现,水库高水位运行时,虽然消落区覆水土壤有向上覆水释放磷的特征,但库容急剧增大对上覆水总磷起到明显的稀释均化作用,导致内源影响不明显,水库夏季低水位运行时,正值汛期,径流量大,人为活动对地表径流影响显著,导致外源磷输入较大<sup>[16]</sup>。

对照《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) 河流的 II、III 级标准,8 月大部分消落区上覆水总磷以及总磷均值均满足 III 级河流标准,其中丰都、高家、武陵总磷明显超过 III 级河流标准限制,是由于丰都消落区原本为丰都名山旧城,旅游业和畜禽养殖业均较为发达,生活污染和农业面源污染较为严重,而高家、武陵消落区土壤原始利用模式为农耕,人为活动致使更多外源磷随地表径流进入水体。除忠县、万州、巫山外,其余各点 8 月总磷均不满足 II 级河流标准;而 11 月份除新生外,各点总磷含量均满足 II 级河流标准。结合三峡水库调度运行历程,可以初步认为,新生消落区覆水土壤磷素释放对水体水质影响不明显,库区总体水质良好。

值得注意的是,研究范围内消落区上覆水总磷浓度均远远大于 0.02 mg/L,可以认为磷元素已不再是消落区上覆水体浮游藻类过度繁殖的限制因素。显然,这种状态对三峡库区库岸水体富营养化进程具有一定促进作用,这与模型计算结果相符<sup>[17,18]</sup>。

## 2.2 消落区土壤磷形态及分布特征

新生消落区干湿交替状态下,土壤总磷含量变化见图 3,除滩涝、巴东以外,各点覆水土壤总磷均低于本底土壤总磷,其原因是淹水初期土壤磷的溶

解性增加,相比本底土壤更有利于磷的迁移扩散<sup>[19]</sup>。结合图 3 所示,对比土壤不同形态无机磷分布不难发现,虽然各采样段面不同形态无机磷含量变化幅度大,但干湿交替作用下,磷形态分布均呈现一致规律,即 Ca-P>O-P>Al-P>Fe-P>Ex-P,这与多数沉积物研究结果类似<sup>[20,21]</sup>,表明短期干湿交替对无机磷分布规律影响不大。

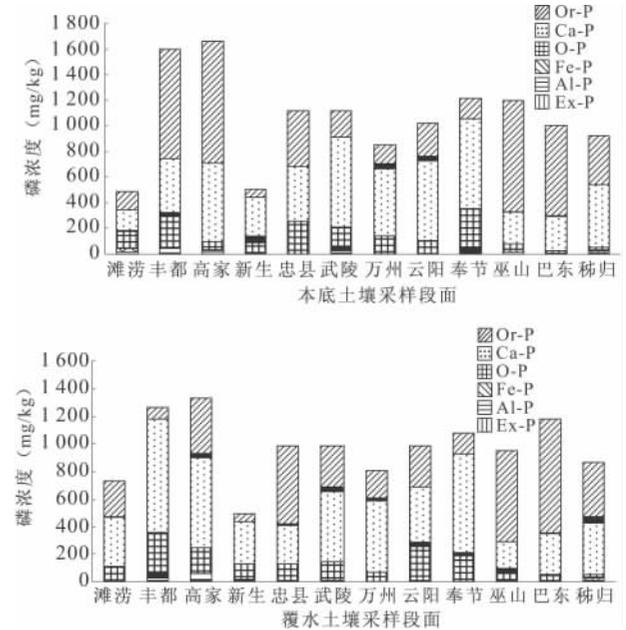


图 3 干湿交替消落区土壤不同形态磷分布图  
Fig. 3 Distribution of Soil Phosphorous in Different Form in Dry-wet Cycling Zone

结合表 2 所示的土壤各形态磷平均含量及其化学性质,分析其干湿交替状态下含量变化程度可知,Al-P、Fe-P 变化最为剧烈,Ex-P、Al-P、Fe-P 有较强的释放活性,被称为活性磷<sup>[22]</sup>(Ac-P, 8 月均值 18.59 mg/kg, 11 月均值为 14.02 mg/kg, 覆水释放程度为 24.96%),这是由于消落区覆水时,土壤氧化还原电位(本底土壤 Eh 均值为 161, 覆水土壤 Eh 均值为 -49)降低,有利于 Fe<sup>3+</sup> 还原为 Fe<sup>2+</sup>, 覆水土壤 pH (pH 为 7.12~8.01) 接近中性,有利于无定形 Al 胶体的生成,使得 Ex-P、Al-P、Fe-P 在 Eh、pH 等环境条件发生变化时转化成溶解性磷,并通过间隙水向上覆水释放,成为了消落区水体内部磷负荷的主要来源。干湿交替状态下,钙磷(覆水释放程度为 0.88%)和闭蓄态磷(覆水释放程度为 2.02%)含量相对较恒定,因为闭蓄态磷被紧密包裹在铁、铝等矿物颗粒中,钙磷是土壤中原生颗粒中的磷或者通过生物作用沉积固定的颗粒磷,这 2 种形态的磷通常

被认为较难参与短时的磷循环<sup>[22]</sup>。结合图 3 可清晰看出各采样段面有机磷变化规律各异,有机磷主要指土壤中各种动植物残体、腐殖质类有机物中含有的磷以及含磷农药,土壤覆水时,有机质不断被微生物矿化,使得有机磷被逐步转化释放出来,有机质释放出  $H^+$  可使矿物表面基团质子化而重新吸附被释放出的磷酸盐<sup>[23]</sup>,而另有研究表明有机质中的富里酸聚阴离子和磷酸盐阴离子产生吸附竞争,促进磷的释放<sup>[24]</sup>,因此有机物矿化对有机磷的影响是多方面的、复杂的,有待进一步考察。另外,蓄水前后有机磷平均释放值(75.17 mg/kg)远大于活性磷平均释放值(4.57 mg/kg),表明首次蓄水的新生消落区土壤有机磷是土壤内源磷贡献的主要承担者。

表 2 新生消落区干湿交替土壤各形态磷平均含量(mg/kg)  
Tab. 2 Average Contents of Soil Phosphorous in Different Form in the Newly Merged Fluctuating Zone(mg/kg)

	Ex-P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca-P	Or-P
本底土壤	2.69	11.45	4.45	135.83	465.44	437.89
覆水土壤	2.71	8.12	3.19	133.09	461.32	362.72
平均释放值	-0.02	3.33	1.26	2.74	4.12	75.17
覆水释放程度(%)	0.74	29.08	28.31	2.02	0.88	17.17

注:磷平均释放值为覆水前后土壤各形态磷平均含量差值;覆水释放程度为平均释放值与本底土壤磷含量的百分比

### 3 讨论

#### 3.1 本底土壤磷与消落区环境因素

库区上游滩涝至万州段消落区本底土壤总磷含

量范围为 481.809 4~1 663.092 3 mg/kg,变化幅度较大,而库区下游云阳至秭归段土壤总磷含量范围为 927.038 1~1 215.460 7 mg/kg,变化幅度小,其原因在于库区上游段滩涝、新生、万州采样段面为棕壤土且未被用于农耕,而高家为黄壤土,忠县、武陵为紫色土,这 3 个采样段面农耕活动强烈,区域内土壤中化肥残留量高<sup>[25]</sup>,丰都消落区为名山旧城,旅游业和畜禽养殖业发达,生活污染和农业面源污染较为严重<sup>[26]</sup>,因此本底土壤总磷含量较滩涝、新生、万州段面高;库区下游段处于三峡峡谷段,土壤原始背景、利用功能较为一致,多为黄壤林地,仅秭归段面略受农耕影响,因此各采样段面土壤总磷含量变化不如上游剧烈。

#### 3.2 消落区干湿交替状态下土壤磷释放程度与磷形态的相关性分析

水库首次由低水位过渡到高水位运行,致使消落区土壤全部淹没,土壤中不同形态磷由于 DO、pH、Eh 等环境条件变化,逐步从土壤中释放到上覆水中。为了反映消落区本底土壤中不同形态磷的释放活性和潜在风险,计算了消落区覆水后土壤总磷释放程度与本底土壤中不同形态磷含量的相关关系和线性方程,并运用  $T$  检验法对覆水前后土壤各形态磷含量进行差异显著性检验,结果见表 3 和表 4。

统计检验结果表明,覆水前土壤总磷与覆水后总磷呈显著相关(相关系数  $R$  为 0.906),土壤各形态磷含量没有显著差异。其原因有,采样时间为库区三期首次蓄水仅月余,且蓄水期正值库区枯水

表 3 土壤总磷释放程度与土壤不同形态磷含量的相关方程和显著性检验

Tab. 3 Correlation Equation and Significance Test Between Soil Total Phosphorous Release Level and Its Contents

	Ac-P	O-P	Ca-P	Or-P	TP
释放程度相关系数 $R$	0.696*	0.182	-0.146	0.869**	0.870**
线性回归方程	$y = 0.318 6x + 5.801$	—	—	$y = 0.018 8x + 3.072$	$y = 0.018 4x - 9.259 5$

注: \*\*  $p < 0.05$ ; \*  $p < 0.1$ ;  $n = 10$ ; 线性回归方程中  $y$  代表总磷释放程度,  $x$  代表不同形态磷含量。

表 4 覆水前后土壤各形态磷含量差异显著性检验

Tab. 4 Significance Test on Discrepancy of Soil Phosphorous Contents in Different Form

磷形态	Ac-P	O-P	Ca-P	Or-P	TP
$T$  值	0.925	0.099	0.087	0.907	1.694

注:  $T_{0.05}(11) = 2.201$ ; 当  $|T| > T_{0.05}(n-1)$  时,表示覆水前后磷含量有显著差异。

期,水体中悬浮物浓度普遍不高,沉积量较少,覆水土壤乃少量长江干流水体悬浮物与本底土壤混合而

成的,总磷及各形态磷含量更多受本底土壤背景影响,还没有发生根本性质变。结合差异显著性检验值,发现覆水前后土壤活性磷、有机磷含量差异性大于闭蓄态磷、钙磷。同时土壤总磷释放程度与本底土壤的总磷、有机磷、活性磷呈现出显著线性相关关系,而与本底土壤钙磷、闭蓄态磷不相关。说明本底土壤总磷含量越高,覆水后土壤向上覆水迁移、转化磷的风险越高,而覆水初期土壤内源磷迁移转化主要以活性磷的溶解释放、有机磷的矿化释放为主,与

国内外有关研究结果类似<sup>[20,27,28]</sup>。

## 4 结论

(1) 水库低水位运行时上覆水总磷含量明显高于高水位运行时上覆水总磷含量,且低水位运行时由于夏季汛期径流量大,库区上下游上覆水总磷含量波动明显;

(2) 干湿交替状态下土壤不同形态磷分布规律一致,  $Ca-P > O-P > Al-P > Fe-P > Ex-P$ ;

(3) 干湿交替状态下土壤中,活性磷、有机磷含量变化剧烈,成为覆水后消落区上覆水内源磷负荷的主要来源,且首次蓄水的新生消落区土壤有机磷是土壤内源磷贡献的主要承担者;

(4) 覆水初期干湿交替土壤各形态磷含量没有显著差异。首次覆水后消落区土壤总磷释放程度与本底土壤的总磷、有机磷、活性磷呈现出显著线性相关关系,而与本底土壤钙磷、闭蓄态磷不相关。

## 参考文献:

- [1] 牛志明,解明曙. 三峡库区水库消落区水土资源开发利用的前期思考[J]. 科技导报,1998,4:61~62.
- [2] 肖文发,李建文,于长青,等. 长江三峡库区陆生动植物生态[M]. 重庆:西南师范大学出版社,2000:1~88.
- [3] 钱进,王超,王沛芳,等. 河湖滨岸缓冲带净污机理及适宜宽度研究进展[J]. 水科学进展,2009,20(1):139~144.
- [4] 贾海燕,雷阿林,叶 闯,等. 三峡水库水位消落区典型土壤磷释放特征及其环境效应[J]. 水科学进展,2007,18(3):433~438.
- [5] 黎慧卉,刘丛强,汪福顺,等. 猫跳河流域梯级水库磷的夏季变化特征[J]. 长江流域资源与环境,2009,18(4):368~372.
- [6] RUBAN V, BRIGAULT S, DEMARE D, et al. An investigation of the origin and mobility of phosphorus in freshwater sediments from Bort-Les-Orgues Reservoir[J]. Journal of Environmental Monitoring,1999,1(4):403~407.
- [7] SUNDBY B, GOBEIL C, SILBERBERG N, et al. The phosphorus cycle in coastal marine sediments[J]. Limnol Oceanogr,1992,37:1129~1145.
- [8] 王里奥,黄 川,詹艳慧,等. 三峡库区消落带淹水一落干过程土壤磷吸附—解吸及释放研究[J]. 长江流域资源与环境,2006,15(5):593~597.
- [9] WATSS C. Seasonal phosphorus release from exposed, re-inundated littoral sediments of two Australian reservoirs [J]. Hydrobiologia,2000,431:27~39.
- [10] GERDES P, KUNST S. Bioavailability of phosphorus as a tool for efficient P reduction schemes[J]. Water Science and Technology,1998,37:241~247.
- [11] 杨学芬,熊邦喜,杨明生. 武汉南湖水体及沉积物不同形态磷的季节变化[J]. 应用生态学报,2008,19(9):2029~2034.
- [12] SAH R N. Transformations of inorganic phosphorus during the flooding and draining cycles of soil[J]. Soil Sci Soc Am J,1986,50:62~67.
- [13] 马利民,张 明,滕衍行,等. 三峡库区消落区周期性干湿交替环境对土壤磷释放的影响[J]. 环境科学,2008,29(4):1035~1039.
- [14] 奚旦立,孙裕生,刘秀英. 环境监测[M]. 北京:高等教育出版社,2003.
- [15] CHANG S C, JACKSON M L. Fractionation of soil phosphorus [J]. Soil Sci,1957,84:133~134.
- [16] 张 晟,刘景红,张全宁,等. 三峡水库成库初期氮磷分布特征[J]. 水土保持学报,2005,19(4):123~126.
- [17] DAVID C K, 幸治国,钟成华. 长江嘉陵江重庆城区段二维水质对流扩散数学模型[J]. 重庆环境科学,1994,16(4):35~39.
- [18] DAVID C K, 幸治国,刘永明. 长江嘉陵江重庆段内污染物的停留时间模型[J]. 重庆环境科学,1994,16(3):24~28.
- [19] 石孝洪. 三峡水库消落区土壤磷素释放与富营养化[J]. 土壤肥料,2004(1):40~42,44.
- [20] 贾陈忠,秦巧燕,李克华,等. 荆州市地表水沉积物中磷的形态分析[J]. 环境科学与管理,2008,33(1):46~52.
- [21] 李 江,金相灿,姜 霞,等. 太湖不同营养水平湖区沉积物理化性质和磷的垂向变化[J]. 环境科学研究,2007,20(4):64~69.
- [22] 林悦涓. 东湖沉积物及上覆水氮磷形态分布特征[D]. 武汉:武汉大学博士论文,2005.
- [23] OZIMEK T, GULATI R D, van DONK E. Can macrophytes be useful biomanipulation of lakes? The lake Zwemuhist example[J]. Hydrobiologia,1990,200/201:399~409.
- [24] KASTELAN-MACAN M, PETROVIC M. The role of fulvic acids in phosphorus sorption and release from mineral particles[J]. Wat Sci Tech,1996,34(7/8):259~265.
- [25] 冯孝杰. 三峡库区农业面源污染环境经济分析[D]. 重庆:西南大学博士论文,2005.
- [26] 杜 军,张宏华,李劲松. 三峡库区重庆段富营养化物质氮磷污染负荷比较研究[J]. 重庆交通学院学报,2004,23(1):121~125.
- [27] RYDIN E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment[J]. Water Research,2000,34:2037~2042.
- [28] ZHOU Q, GIBSON C, ZHU Y. Evaluation phosphorus bioavailability in sediment of three contrasting lakes in China and the UK[J]. Chemosphere,2001,42:221~225.

## SOIL PHOSPHOROUS FORM ANALYSIS IN FLUCTUATING (DRY-WET CYCLING) ZONE OF THREE GORGES RESERVOIR AREA

CAO Lin, JI Fang-ying, LIN Mao, LI Si, WANG Tu-jin

(Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** Based on the anti-seasonal operation mode of storing the clean and discharging the muddy, the changes of soil phosphorous forms and contents were analyzed through dry-wet cycling for the first time in TGRA (Three Gorges Reservoir area), which reveals phosphorous distribution characteristics and its release laws. In summer, total phosphorous contents in the overlying water in low-water-level mode was much higher than that in high-water-level mode in winter. Moreover, total phosphorous contents in the overlying water in the upstream and that in the downstream fluctuated remarkably due to the large runoff in flood period. Soil phosphorous in different form distributed in a uniform law. Active phosphorous and organic phosphorous contents changed fiercely, which were the main source of endogenous phosphorus load in the overlying water. Additionally, organic phosphorous was the primary contributor for soil endogenous phosphorus load after the water level went up to 175 m for the first time. In the early submerged period, soil phosphorous contents in different form in dry-wet cycling did not differ significantly. Soil phosphorous release level showed significant linear correlation to soil total phosphorous, organic phosphorous and active phosphorous. Therefore, the newly emerged fluctuating zone, a potential phosphorous source, had little impact on water quality in the initial period of TGRA operation.

**Key words:** Three Gorges Reservoir area; fluctuating zone; phosphorus; dry-wet cycling