

谭雪梅, 吉芳英, 曹琳, 等. 2012. 三峡库区出露期消落带沉积物磷分布特征[J]. 环境科学学报, 32(7): 1691-1696

Tan X M, Ji F Y, Cao L, et al. 2012. Phosphorus distribution characteristics in sediments of Three Gorges Reservoir Area during the exposed period[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 32(7): 1691-1696

## 三峡库区出露期消落带沉积物磷分布特征

谭雪梅<sup>1,2,\*</sup>, 吉芳英<sup>1</sup>, 曹琳<sup>1</sup>, 黎司<sup>1</sup>

1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045

2. 重庆工商大学 环境与生物工程学院, 重庆 400067

收稿日期: 2011-08-29 修回日期: 2011-10-16 录用日期: 2011-10-24

**摘要:** 为了揭示经历完整反季节干湿交替周期消落带沉积物磷的源汇转化趋势, 分析了三峡库区出露期消落带沉积物中磷酸盐的分布特征及含量变化. 结果表明, 首次经历完整反季节干湿交替的消落带宏观上表现出沉积物总磷 (TP) 累积现象, 但覆水沉积物 TP > 落干沉积物 TP, 表明夏季水库开闸放水排沙, 且消落带夏季出露期降雨资源丰富, 有利于出露消落带表层沉积物被冲刷排除. 有机磷 (Or-P) 含量升高是导致首次经历完整反季节干湿交替的消落带沉积物总磷积累的主要原因. 消落带反季节干湿交替有利于沉积物中活性较高的活性磷 (Ac-P)、Or-P 的累积, 有利于相对稳定的闭蓄态磷 (O-P)、钙磷 (Ca-P) 排出.

**关键词:** 磷; 三峡库区; 沉积物; 消落带

文章编号: 0253-2468(2012)07-1691-06

中图分类号: X131

文献标识码: A

## Phosphorus distribution characteristics in sediments of Three Gorges Reservoir Area during the exposed period

TAN Xuemei<sup>1,2,\*</sup>, JI Fangying<sup>1</sup>, CAO Lin<sup>1</sup>, LI Si<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Eco-environment of Three Gorges Reservoir Region Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045

2. Environmental and Biological Engineering Institute, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067

Received 29 August 2011;

received in revised form 16 October 2011;

accepted 24 October 2011

**Abstract:** In order to reveal the source-sink alternation of phosphorous based on the entire anti-seasonal dry-wet cycle in the fluctuating zone, we analyzed the distribution characteristics and content changes of phosphate in sediments of Three Gorges Reservoir Area (TGRA) during the exposed period. The result indicated that macroscopically, total phosphorous (TP) accumulated in sediments in the fluctuating zone which experienced the entire anti-seasonal dry-wet cycle for the first time. However, the TP in submerged sediment was bigger than TP in exposed sediment. It indicated the upper layer of exposed sediments was eroded because of abundant rainfall and water and sand discharge in summer. Anti-seasonal wet-dry alternation is helpful to discharging relatively stable occlude phosphorus (O-P) and calcium bounded phosphorus (Ca-P) and promotes the accumulation of active phosphorus (Ac-P) and organic phosphorus (Or-P) in sediments.

**Keywords:** phosphorus; Three Gorges Reservoir; sediment; fluctuating zone

### 1 引言 (Introduction)

三峡水库独特的“排浊蓄清”运行调蓄模式, 致使库区周边已形成垂直 30 m、面积 440 km<sup>2</sup> 的反季节干湿交替消落带, 并成为水库地区表层沉积物内源磷释放和累积的重要且活跃的场所以 (袁辉等, 2007; 吉芳英等, 2009; 钱进等, 2009). 研究表明, 沉

积物内源磷的赋存形态决定其在环境中的迁移、转化、沉积规律 (李大鹏等, 2009; Li et al., 2010; Ellison et al., 2006; Frankowski et al., 2002), 直接影响沉积物-水界面磷的交换作用 (Kaiserli et al., 2002; Lopez et al., 1996). 目前, 干湿交替条件下土壤、沉积物磷素累积、释放的研究主要是针对稻田作物磷吸收及有效性 (李津津等, 2009), 滨海潮滩

**基金项目:** 科技部中德国际合作项目 (No. 2007DFA90660); 教育部科技创新重大项目培育资金项目 (No. 708071)

**Supported by** the Chinese-German Cooperation Project in Ministry of Technology (No. 2007DFA90660) and the Scientific and Technological Innovation Project and Fostering Project in Ministry of Education (No. 708071)

**作者简介:** 谭雪梅 (1979—), 女, 讲师, E-mail: tam.lotus@gmail.com; \* 通讯作者 (责任作者)

**Biography:** TAN Xuemei (1979—), female, lecturer, E-mail: tam.lotus@gmail.com; \* Corresponding author

湿地对径流中磷去除(赵海洋等,2006).对三峡库区消落带而言,多为实验室模拟的干湿交替环境下的研究(马利民等,2008;贾海燕等,2007).

三峡水库于2008年秋首次蓄水至175 m,因此,本文以首次经历完整干湿交替周期(即:从2008年8月最低水位145 m起,秋季首次缓慢蓄水至172.5 m,然后次年春季后水位缓慢回落,到次年8月回落至145 m,水库经历的一个完整的调蓄周期)的库区出露期典型消落带为研究对象,采用连续浸提法测定覆水及落干沉积物中磷含量水平,分析消落带干湿交替沉积物中磷酸盐的赋存形态,探讨经历完整干湿交替周期后沉积物不同形态磷的累积与释放趋势,揭示具有反季节干湿交替特征的三峡库区消落带沉积物中磷的分布特征和释放规律,为三峡库岸水体富营养化污染的控制提供科学依据.

## 2 材料与方法(Materials and methods)

### 2.1 样品采集与保存

沿三峡库区长江干流布设涪陵、南沱、丰都、新生、忠县、武陵、万州、云阳、奉节、巫山共10个库区新生消落带段面,所有采样点均使用全球卫星定位仪(GPS)进行采样定位,采样点分布见图1和表1,样品采集类型、时间见表2.

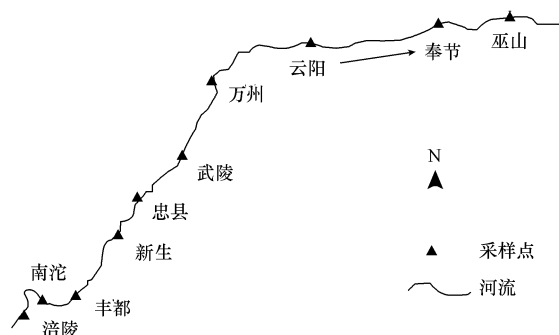


图1 三峡库区沿程采样点分布

Fig. 1 Distribution chart of sampling spots in TGRA

表1 三峡库区采样点位置及类型

Table 1 Sampling location and types in TGRA

采样点	位置	原始背景概况
涪陵	29°42'45"N 107°23'59"E	草地棕壤土
南沱	29°51'31"N 107°31'38"E	草地棕壤土
丰都	29°51'20"N 107°41'14"E	旧城废弃棕黄壤土
新生	30°12'25"N 107°57'16"E	草地棕壤土
忠县	30°18'01"N 108°03'05"E	农耕紫色土
武陵	30°26'39"N 108°14'36"E	农耕紫色土
万州	30°49'14"N 108°24'40"E	草地棕壤土
云阳	30°56'51"N 108°41'26"E	林地黄壤土, 略受农耕影响
奉节	31°03'01"N 109°31'45"E	林地黄壤土
巫山	31°03'28"N 109°52'02"E	林地黄壤土

表2 采样时间及样品类型

Table 2 Sampling time and sampling types

采样时间	样品类型
2008年8月3—12日	覆水2~3 m表层(0~5 cm)沉积物 落干表层(0~5 cm)沉积物
2009年8月3—12日	覆水2~3 m表层(0~5 cm)沉积物 落干表层(0~5 cm)沉积物

采样和保存方法按照水环境监测规范(奚旦立等,2003)用埃克曼采泥器(Hydro-Bios,德国)采集覆水沉积物样品.其中,每个落干沉积物样品均设置10 m×10 m的采样区,并按照梅花型布点方式采集落干沉积物样品,均匀混合后用四分法缩取100 g左右作为混合样品,采集的样品装在聚乙烯管中,密封,贴上标签,放入冰盒中冷藏运输.带回实验室后,样品保存于-20℃冰箱中.

### 2.2 样品分析与测试

试验中供分析的沉积物样品均为鲜样.样品分析前,将储存在-20℃冰箱中的样品置于4℃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.

无机磷形态的分级提取:无机磷的形态分级提取采用文献(鲍士旦,2000)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<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>Cl、0.5 mol·L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>F+0.8 mol·L<sup>-1</sup> H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>、0.1 mol·L<sup>-1</sup> NaOH、0.3 mol·L<sup>-1</sup> 柠檬酸钠+1 g 连二亚硫酸钠+0.5 mol·L<sup>-1</sup> NaOH、0.5 mol·L<sup>-1</sup> (1/2 H<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.

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

### 3 结果与讨论(Results and discussion)

#### 3.1 三峡库区消落带沉积物总磷的分布特征

三峡库区出露期消落带沉积物总磷沿程分布见图 2。从图 2 可以看出,夏季汛期消落带沉积物 TP 沿程波动较大。分析覆水沉积物,2008 年 8 月覆水沉积物 TP 含量在 249.06 ~ 1234.82  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,均值为 682.51  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,次年同期覆水沉积物 TP 含量在 381.61 ~ 1052.24  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,均值为 691.60  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;分析出露落干沉积物,2008 年 8 月落干沉积物 TP 含量在 231.99 ~ 1057.46  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,均值为 559.46  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,次年同期落干沉积物 TP 含量在 272.25 ~ 1001.58  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,均值为 658.65  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,相比 2008 年经过一年的干湿交替消落带覆水沉积物 TP 均值上升 9.09  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (1.31%),落干沉积物 TP 均值上升 99.19  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (15.06%),表明三峡水库按最高设计蓄水水位运行初期,由于大量本底土壤受淹,反季节干湿交替环境一定程度上促进了消落带沉积物中总磷的积累。分析消落带总磷沿程分布发现,沉积物总磷含量最高值均出现在丰都消落带,这是由于丰都消落带属于丰都名山旧城废弃型消落带,反映出消落带沉积物总磷含量与消落带原始背景有极大的关系。

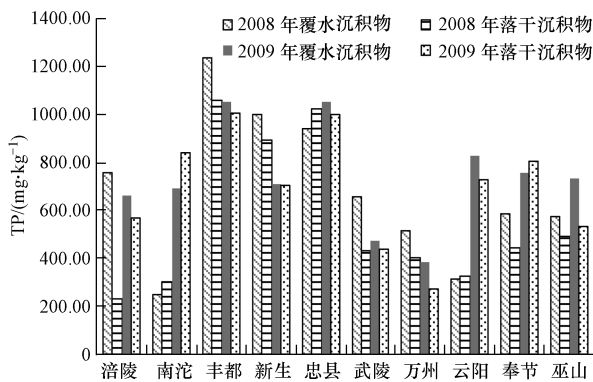


图 2 出露期消落带沉积物总磷沿程分布

Fig. 2 The distribution of TP in sediments of TGRA fluctuating zone in exposed period

采用 SPSS11.0 分析软件对 2008 年和 2009 年覆水和落干沉积物 TP 含量进行相关性分析,发现同期覆水沉积物与落干沉积物 TP 含量之间呈现显著相关性(表 3)。而同期比较发现,夏季出露期消落带落干沉积物 TP 低于覆水沉积物 TP,结合三峡水库“排浊蓄清”的调蓄模式可知,夏季水库开闸放水排沙(胡兴娥等,2008),且消落带夏季出露期降雨

资源丰富,致使出露消落带表层沉积物被冲刷排除。这从侧面反映出三峡水库反季节干湿交替调蓄模式在一定程度上降低了夏季出露期后消落带再次覆水时沉积物的释磷风险。

表 3 消落带覆水与落干沉积物总磷含量相关性分析

Table 3 Correlation analysis of TP contents in overlying water and sediments in TGRA fluctuating zone

	TP(2008 年覆水沉积物)	TP(2009 年覆水沉积物)
TP(2008 年落干沉积物)	0.844 **	0.667 *
TP(2009 年落干沉积物)	0.383	0.896 **

注: \*\* $p < 0.05$ , \* $p < 0.1$ ,  $n = 10$ 。

#### 3.2 三峡库区消落带沉积物无机磷的分布特征

三峡库区出露期消落带沉积物无机磷沿程分布见图 3。从图 3 可以看出,覆水沉积物、落干沉积物各无机形态磷分布均呈现一致规律,即  $\text{Ca-P} > \text{O-P} > \text{Al-P} > \text{Fe-P} > \text{Ex-P}$ ,这与多数土壤、湖库沉积物中的研究结果类似(贾陈忠等,2008;李江等,2007),表明三峡库区短期干湿交替对无机磷分布规律影响不大。

由图 3 还可知,夏季汛期消落带覆水沉积物 IP 含量(2008 年 8 月含量为 147.29 ~ 1078.48  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,均值为 504.82  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;次年同期含量为 196.18 ~ 768.84  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,均值为 425.85  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )高于出露落干沉积物 IP(2008 年 8 月含量为 117.89 ~ 858.47  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,均值为 375.26  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;次年同期含量为 99.57 ~ 574.34  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,均值为 332.34  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。对比 2008 年及 2009 年无机磷含量变化发现,消落带沉积物经过一次完整的水库调蓄过程后 IP 含量有所下降(覆水沉积物均值下降 78.97  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,落干沉积物均值下降 42.92  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),分析各形态无机磷累积量发现,  $\text{Fe-P} > \text{Al-P} > \text{Ex-P} > \text{O-P} > \text{Ca-P}$ ,结合各形态磷的化学性质分析发现,覆水、落干沉积物中 Fe-P、Al-P、Ex-P 等活性磷总累积量分别为 16.77  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、14.81  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,约占无机磷的 4%,而难于生物利用活性低的 Ca-P 和 O-P 含量大幅下降,降低量约占无机磷的 15%,表明三峡库区成库初期反季节干湿交替环境有利于活性较大的磷形态累积,但累积量较小,对库区再次覆水时水质影响不大。

为了反映夏季汛期消落带沉积物各形态无机磷沿程变化趋势,计算了消落带沿程各形态磷变异系数,结果见表 4。

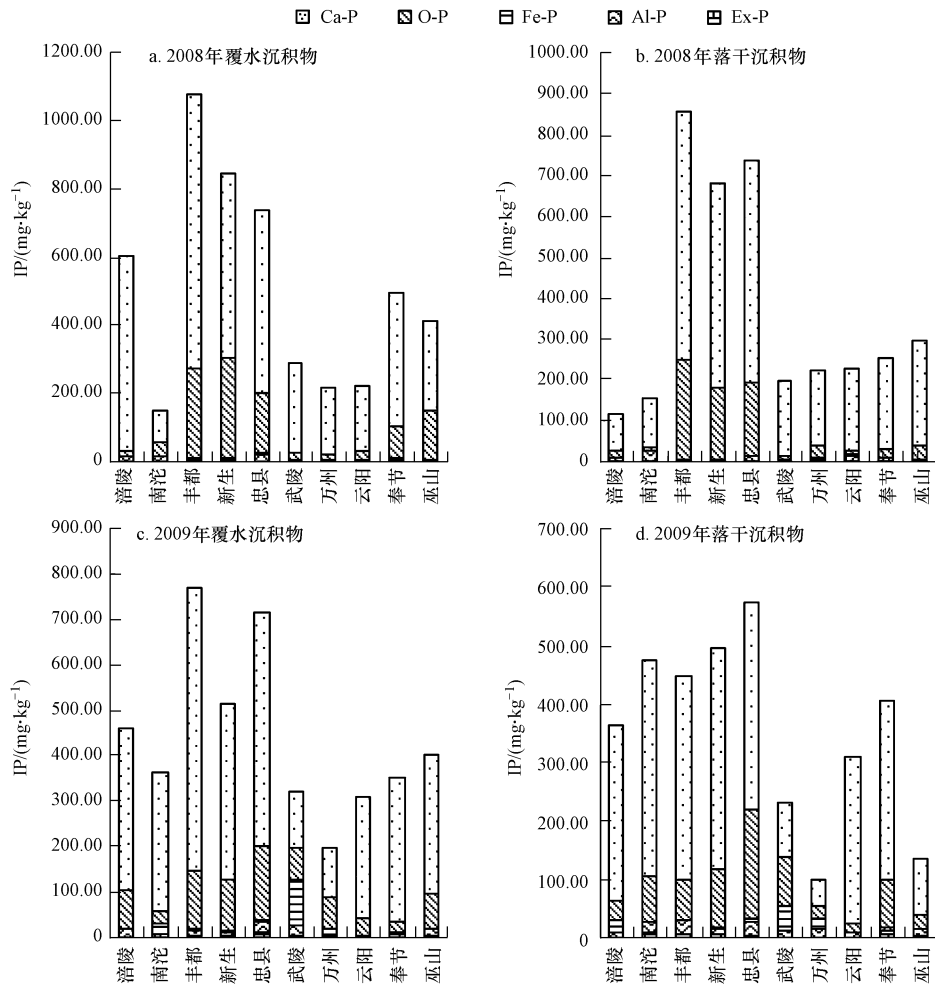


图3 出露期消落带沉积物无机磷沿程分布

Fig.3 The distribution of inorganic phosphorus in sediments of TGRA fluctuating zone in exposed period

表4 夏季出露期消落带沉积物各形态无机磷沿程变异系数(CV)

Table 4 The shape coefficient of variation of inorganic phosphorus in sediments of TGRA fluctuating zone in summer exposed period (CV)

沉积物	变异系数(CV)				
	Ex-P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca-P
2008年8月覆水沉积物	0.75	0.74	1.09	0.97	0.58
2008年8月落干沉积物	1.02	0.89	0.84	1.23	0.64
2009年8月覆水沉积物	1.22	0.81	2.03	0.60	0.44
2009年8月落干沉积物	1.08	0.54	1.47	0.80	0.51

分析沿程分布变异系数发现基本符合以下规律,  $CV(Fe-P) > CV(Ex-P) > CV(O-P) > CV(Al-P) > CV(Ca-P)$ , 表明 Fe-P 在夏季消落带着较大的空间分布差异, Ca-P 的空间分布差异最小. 丰水期无机磷的分布差异可能与其化学结合态性质有关, Ca-P 属于沉积物原生颗粒中的磷或者通过生物作用沉积物固定的颗粒磷, 其在库区消落带沉积物中

含量相对稳定且难于被生物利用, Fe-P 属于铁氧化和物吸附磷的结合态, 是易于释放和生物利用的磷形态. 值得注意的是, 其中 O-P 特指紧密包裹在铁、铝等矿物质颗粒中的磷, 也属于难于生物利用的磷, 活性明显低于 Al-P, 但其空间分布差异较大, 这可能是与夏季汛期水库排沙作用有关, 现有研究表明, O-P 的较大 CV 变化与库岸不同底质的土壤剥落沉积有关(林彰文等, 2006).

### 3.3 三峡库区消落带沉积物有机磷的分布特征

三峡库区出露期消落带沉积物有机磷沿程分布见图4. 从图4可以看出, 2008年8月沿程消落带覆水沉积物 Or-P 含量在  $92.28 \sim 368.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间, 均值为  $177.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 占 TP 含量的 26.04%; 落干沉积物 Or-P 含量在  $96.31 \sim 282.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间, 均值为  $184.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 占 TP 含量的 32.92%; 2009年沿程消落带覆水沉积物 Or-P 含量在

75.87 ~ 517.35  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间,均值为 265.74  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,占 TP 含量的 38.42%;落干沉积物 Or-P 含量在 172.68 ~ 555.34  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间,均值为 326.31  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,占 TP 含量的 49.54%。对比 2008 年及 2009 年 Or-P 含量变化发现,消落带沉积物经历一次完整的水库调蓄过程后 Or-P 含量呈现上升趋势(覆水沉积物均值上升 88.05  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,落干沉积物均值上升 142.11  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),结合 TP、IP 含量变化可知,Or-P 含量升高是导致干湿交替消落带沉积物总磷积累的主要原因。

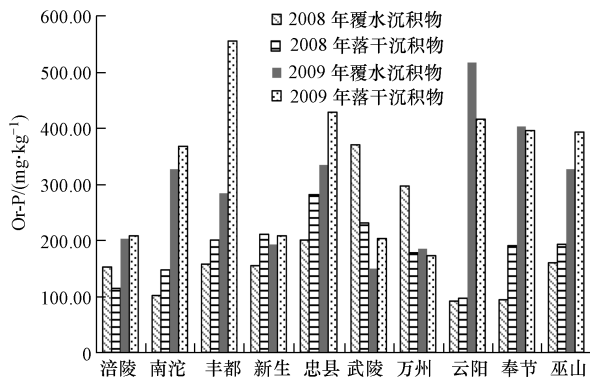


图 4 出露期消落带沉积物有机磷沿程分布

Fig. 4 The distribution of organic phosphorus in sediments of TGRA fluctuating zone in exposed period

进一步分析发现,落干沉积物 Or-P 的累积量大于覆水沉积物 Or-P 的累积量,表明干湿交替较连续覆水更容易使有机磷吸附累积。分析同期覆水与落干沉积物发现,覆水沉积物 Or-P 含量小于落干沉积物 Or-P 含量,且沉积物 Or-P 在 TP 中的百分比也呈现相同规律,进一步说明干湿交替有利于 Or-P 的吸附和累积。

#### 3.4 完整干湿交替周期沉积物不同形态磷累积量

消落带经历完整周期干湿交替后沉积物不同形态磷累积量见图 5。图 5 结果表明,消落带反季节干湿交替有利于沉积物中活性较高的 Ac-P、Or-P 累积,有利于相对稳定的 O-P、Ca-P 排出,这是由于消落带夏季出露期,消落带被临时用作农耕增加了有机磷的外源输入,且该时期光热雨资源集中有利于动植物生长、微生物繁殖,进而增加了表层落干沉积物有机磷的内源积累,人为和自然双重生化作用使得有机磷上升,而水库夏季开闸放水排沙,物理作用占主导,致使表层沉积物被冲刷排出,O-P、Ca-P 含量降低。

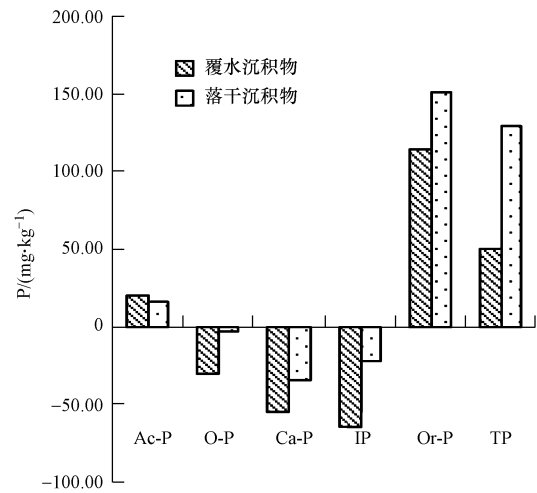


图 5 完整周期干湿交替沉积物不同形态磷累积量

Fig. 5 Accumulation of different forms of phosphorus in sediments with complete cycle of alternating wet and dry

## 4 结论 (Conclusions)

1) 首次经历完整反季节干湿交替的消落带宏观上表现出沉积物总磷累积,但覆水沉积物 TP 大于落干沉积物 TP,表明夏季水库开闸放水排沙,消落带夏季出露期降雨资源丰富,均有利于出露消落带表层沉积物被冲刷排除。

2) Or-P 含量升高是导致首次经历完整反季节干湿交替的消落带沉积物总磷积累的主要原因。

3) 消落带反季节干湿交替有利于沉积物中活性较高的 Ac-P、Or-P 累积,有利于相对稳定的 O-P、Ca-P 排出。

**责任作者简介:**谭雪梅(1979—),女,讲师,博士研究生,主要从事水污染控制理论与技术研究。E-mail: tam.lotus@gmail.com.

#### 参考文献 (References):

- 鲍士旦. 2000. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社. 80-82
- Bao S D. 2000. Agricultural Soil Analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press. 80-82 (in Chinese)
- Chang S C, Jackson M L. 1957. Fractionation of soil phosphorus [J]. Soil Sci, 84:133-134
- Ellison M E, Brett M T. 2006. Particulate phosphorus bioavailability as a function of stream flow and land cover [J]. Water Research, 40: 1258-1268
- Frankowski L, Bolalek J, Szostek A. 2002. Phosphorus in bottom sediments of Pomeranian Bay (Southern Baltic-Poland) [J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 54:1027-1038
- 胡兴娥, 李云中, 李明超. 2008. 三峡水库 135 m 运行阶段永久船闸

- 下引航道泥沙淤积分析[J]. 水科学进展, 19(1):1-7
- Hu X E, Li Y Z, Li M C. 2008. Sediment deposition analysis of downstream access channel of permanent ship lock during 135m operational phase of Three Gorges Reservoir[J]. *Advances in Water Science*, 19(1):1-7 (in Chinese)
- 吉芳英, 曹琳, 林茂, 等. 2009. 三峡库区新生消落区沉积物磷形态分析[J]. *环境科学研究*, 22(8):882-886
- Ji F Y, Cao L, Lin M, *et al.* 2009. Phosphorus forms analysis in sediments of the newly emerged fluctuation zone in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Research of Environmental Sciences*, 22(8):882-886 (in Chinese)
- 贾陈忠, 秦巧燕, 李克华, 等. 2008. 荆州市地表水沉积物中磷的形态分析[J]. *环境科学与管理*, 33(1):46-52
- Jia C Z, Qin Q Y, Li K H, *et al.* 2008. The phosphorus forms analysis in the Jingzhou Region earth's surface water and sediments [J]. *Environmental Science and Management*, 33(1):46-52 (in Chinese)
- 贾海燕, 雷阿林, 叶闽, 等. 2007. 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*, 18(3):433-438
- Jia H Y, Lei A L, Ye M, *et al.* 2007. Assessment of phosphorus release from typical soil types in the zone of fluctuating water level in the Three Gorges Reservoir Region [J]. *Advances in Water Science*, 18(3):433-438 (in Chinese)
- Kaiserli A, Voutsas D, Samara C. 2002. Phosphorus fractionation in lake sediments-Lakes Volvi and Koronia N. Greece [J]. *Chemosphere*, 46:1147-1155
- Li D P, Huang Y. 2010. Sedimentary phosphorus fractions and bioavailability as influenced by repeated sediment resuspension [J]. *Ecological Engineering*, 36:948-962
- 李大鹏, 黄勇, 李伟光. 2009. 底泥扰动对上覆水中磷形态分布的影响[J]. *环境科学学报*, 29(2):280-284
- Li D P, Huang Y, Li W G. 2009. Effect of sediment disturbance on the distribution of phosphorus forms in the overlying water [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 29(2):280-284 (in Chinese)
- 李江, 金相灿, 姜霞, 等. 2007. 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*, 20(4):64-69
- Li J, Jin X C, Jiang X, *et al.* 2007. Vertical changes of physiochemical characteristics and phosphorus concentrations of sediments from different trophic regions of Taihu Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 20(4):64-69 (in Chinese)
- 李津津, 姚菊祥, 郑洪福, 等. 2009. 南太湖区域水浆管理技术与稻田磷素流失控制的研究[J]. *环境科学学报*, 29(2):389-396
- Li J J, Yao J X, Zheng H F, *et al.* 2009. Minimizing phosphorus transport from paddy fields by innovating irrigation-drainage regime for southern region of the Taihu Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* 29(2):389-396 (in Chinese)
- 林彰文. 2006. 热带典型水库沉积物磷与硅藻的空间分布[D]. 广州:暨南大学. 21-35
- Lin Z W. 2006. The spatial distribution of phosphorus and diatoms in sediments of Three Reservoirs in Southern China [D]. Guangzhou: Jinan University. 21-35 (in Chinese)
- Lopez P, Lluh X, Vidal M, *et al.* 1996. Adsorption of phosphorus on sediments of the balearic islands (Spain) related to their composition [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 42:185-196
- 马利民, 张明, 滕衍行, 等. 2008. 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*, 29(4):1035-1039
- Ma L M, Zhang M, Teng Y X, *et al.* 2008. Characteristics of phosphorous release from soil in periodic alternately waterlogged and drained environments at WFZ of the Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 29(4):1035-1039 (in Chinese)
- 钱进, 王超, 王沛芳, 等. 2009. 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*, 20(1):139-144
- Qian J, Wang C, Wang P F, *et al.* 2009. Research progresses in purification mechanism and fitting width of riparian buffer strip [J]. *Advances in Water Science*, 20(1):139-144 (in Chinese)
- 奚旦立, 孙裕生, 刘秀英. 2003. 环境监测[M]. 北京:高等教育出版社. 23-67
- Xi D L, Sun Y S, Liu X Y. 2003. *Environmental Monitoring* [M]. Beijing: Higher Education Press. 23-67 (in Chinese)
- 袁辉, 黄川, 崔志强, 等. 2007. 三峡库区消落带与水环境响应关系预测[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 30(9):134-138
- Yuan H, Huang C, Cui Z Q, *et al.* 2007. Forecast of the relation between the water quality and the wet-dry zone of the Three Gorges Area [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 30(9):134-138 (in Chinese)
- 赵海洋, 王国平, 刘景双, 等. 2006. 三江平原湿地土壤磷的吸附与解吸研究[J]. *生态环境*, 15(5):930-935
- Zhao H Y, Wang G P, Liu J S, *et al.* 2006. Phosphorus sorption/desorption characteristics of wetland soils in Sanjiang Plain [J]. *Ecology and Environment*, 15(5):930-935 (in Chinese)