

# 长寿湖沉积物中磷形态的季节变化特征

郭海涛<sup>1</sup>, 张进忠<sup>1\*</sup>, 魏世强<sup>1</sup>, 谢德体<sup>1</sup>, 车建成<sup>2</sup>

(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆市农业资源与环境重点实验室, 重庆 400716;  
2. 重庆市长寿区环境保护局, 重庆 401220)

**摘要:** 为进一步了解湖泊沉积物中磷形态的季节变化特征, 采用沉积物磷形态 SMT 提取法, 在 2009 年 7 月(丰水期)和 11 月(平水期)、2010 年 3 月(枯水期)监测了长寿湖表层沉积物样品中不同形态磷的含量. 结果表明, 长寿湖沉积物中总磷(TP)含量基本表现为丰水期 > 枯水期 > 平水期, 枯水期寿岛 TP 含量最高(2 960.29 mg/kg), 平水期关家河最低(586.05 mg/kg); 铁/铝结合态磷(Fe/Al-P)和有机磷(OP)占 TP 的质量分数均为平水期 > 丰水期 > 枯水期, 2 种形态的最大质量分数分别出现在乐温(40.01%)和大坝口(72.44%); 钙磷(Ca-P)占 TP 的质量分数为枯水期 > 平水期 > 丰水期, 最大值出现在摆布荡(15.52%), 说明长寿湖沉积物中磷形态呈现明显的时空变化特征. 另外, Fe/Al-P 受上覆水 pH 的影响, 而 OP 受溶解氧(DO)影响不太明显.

**关键词:** 长寿湖; 沉积物; 上覆水; 磷形态; 季节变化

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)07-1994-06

## Seasonal Variation Characteristics of Phosphorus Speciation in the Sediment of Changshou Lake

GUO Hai-tao<sup>1</sup>, ZHANG Jin-zhong<sup>1</sup>, WEI Shi-qiang<sup>1</sup>, XIE De-ti<sup>1</sup>, CHE Jian-cheng<sup>2</sup>

(1. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China;  
2. Changshou Environmental Protection Agency, Chongqing 401220, China)

**Abstract:** To further know the seasonal variation characteristics of phosphorus species in lake sediment, the contents of different phosphorus species in the surface sediment sampling from Changshou Lake were determined by using the SMT sequential extraction method in July and November, 2009, and March, 2010. The contents of total phosphorus (TP) basically show an order of the low-water period, high-water period, and normal-water period from high to low, and the maximum appeared in Shoudao (2960.29 mg/kg) while the minimum in Guanjiakou (586.05 mg/kg). The mass fractions of phosphorus associated with hydrous ferric/aluminum oxides (Fe/Al-P) and organic phosphorus (OP) in TP at all sampling sites are in an order of the normal-water period, high-water period, and low-water period from high to low, and the maximum of Fe/Al-P appeared in Lewen (40.01%) while that of OP in the dam mouth (72.44%). The mass fraction of phosphorus bound to calcium salt (Ca-P) in TP is in an order of the low-water period, normal-water period, and high-water period, and the maximum appeared in Baibudang (15.52%). These results suggested that the phosphorus speciation in the sediment of Changshou Lake shows obviously temporal and spatial distribution characteristics, and Fe/Al-P is mainly influenced by pH of the overlying water, while OP is not apparently influenced by dissolved oxygen (DO).

**Key words:** Changshou Lake; sediment; overlying water; phosphorus speciation; seasonal variation

湖泊富营养化是我国的主要水环境问题之一. 磷是淡水水体中藻类生长的限制性因子, 其浓度过高是引起水体富营养化的主要原因<sup>[1]</sup>. 当外源性磷得以有效控制后, 湖泊沉积物中内源性磷的释放成为维系其富营养化的重要因素. 磷在湖泊沉积物中存在多种形态, 主要有钙磷(Ca-P)、铁/铝结合态磷(Fe/Al-P)和有机磷(OP)等<sup>[2]</sup>. 随着季节和水文条件的变化, 湖泊的水环境条件(如溶解氧、温度和 pH 等)也会发生改变, 使得被沉积物固定的磷可能向湖水中释放, 进而影响水环境质量. 目前, 国内外学者针对湖泊沉积物中磷的来源、分布特征及其影响因素做了大量的研究<sup>[3-7]</sup>, 但是有关沉积物磷形

态的季节变化研究主要集中在单一形态, 如总磷(TP)和铁磷(Fe-P)<sup>[8-11]</sup>, 缺乏湖泊沉积物中多种磷形态变化的研究.

20 世纪 90 年代以来, 我国许多湖泊推行大湖面淡水养殖与网箱养殖并重的养殖方式, 在养殖过程中向湖体投入大量的动物粪便、饲料和化肥, 这种肥水养殖方式给湖泊带入了大量的含磷物质, 它们进入沉积物后, 可对湖泊水质构成长期而又严重的

收稿日期: 2010-08-15; 修订日期: 2010-12-20

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2007BAD87B10863)

作者简介: 郭海涛(1984~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境分析化学, E-mail: guohaitao1943@126.com

\* 通讯联系人, E-mail: jzhzhang@swu.edu.cn

威胁<sup>[12-15]</sup>. 从文献调研来看, 鲜见有关长寿湖沉积物中磷形态季节变化的研究报道. 为此, 本研究结合长寿湖的水环境功能和网箱养殖状况, 布设 11 个有代表性的采样点, 连续监测丰水期、平水期和枯水期这 3 个水期沉积物中不同形态磷的含量, 研究沉积物中磷形态的季节变化特征, 以为揭示磷在水-沉积物界面的迁移转化机制、控制磷的内源释放和保护湖泊生态系统提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况和采样点设置

长寿湖位于重庆市长寿区境内, 是在长江支流龙溪河下游人工砌坝而成, 其 87% 的水源来自长寿区境外, 由龙溪河经垫江普顺与发源于忠县的大沙河汇合后进入长寿区, 水域面积约 6 667 hm<sup>2</sup>, 平均水深 15 m, 最大水深 40 m, 是重庆市最大的人工湖泊、重要的淡水养殖基地. 近 10 多年来, 上游龙溪河流域生活污水和工业废水的不断汇入, 特别是肥水养鱼带入了大量营养物质, 使得长寿湖处于富营养化状态<sup>[16, 17]</sup>.

结合长寿湖的水环境功能和污染特征, 在主要河流及污染源进入后与湖水的均匀混合处, 如外源污染入湖断面、主流断面、网栏肥水养殖点、两河汇合处设置 11 个采样点. 采样点的位置和特点见表 1 和图 1.

表 1 采样点位置和特征

Table 1 Location and characteristics of the sampling sites

| 采样点 | 位置   | 特点             |
|-----|------|----------------|
| 1   | 龙河口  | 入湖断面           |
| 2   | 乐温   | 主流断面           |
| 3   | 万寿   | 沉积和网栏肥水养殖底泥污染带 |
| 4   | 关家河  | 沉积和网栏肥水养殖底泥污染带 |
| 5   | 寿岛   | 污染物沉积缓冲带       |
| 6   | 罗山口  | 污染物带降解断面       |
| 7   | 竹子滩  | 两河汇合沉积冲刷断面     |
| 8   | 罗山寨  | 网箱养殖主径流带       |
| 9   | 摆布荡  | 网箱养殖非径流带       |
| 10  | 云集码头 | 网箱养殖非径流带       |
| 11  | 大坝口  | 网箱养殖主径流带       |

### 1.2 样品采集与处理

利用采抓式底泥采样器, 于 2009 年 7 月、11 月和 2010 年 3 月 (分别代表丰水期 5~8 月、平水期 9~12 月和枯水期 1~4 月) 在长寿湖 (N29°29'44.79", E107°00'25.67") 11 个样点采集表层沉积物样品 (10 cm). 样品经自然风干后, 研磨、过 100 目筛, 保存在封口袋中备用. 在采样的同时,



采样点编号同表 1

图 1 采样点设置示意

Fig. 1 Sampling sites in Changshou Lake

用便携式多参数水质分析仪 (CN60M/HBD5 型, 北京中西化玻仪器有限公司) 现场测定湖水的溶解氧 (DO)、温度 ( $T$ )、pH 和高锰酸盐指数等水质参数.

### 1.3 沉积物磷形态测定方法

采用欧洲发展框架委员会推荐的 SMT 法提取沉积物中的磷形态, 经处理后用钼锑抗还原光度法测定不同形态磷的含量<sup>[18]</sup>, 实验步骤如图 2 所示.

## 2 结果与讨论

### 2.1 沉积物中 TP 含量的季节变化特征

图 3 为不同水期长寿湖各采样点沉积物中的 TP 含量. 从图 3 可以看出, 不同水期各采样点的 TP 含量均高于 500 mg/kg, 除寿岛、竹子滩、云集码头和大坝口这 4 个采样点的 TP 含量为枯水期 > 丰水期 > 平水期外, 其余采样点则表现为丰水期 > 枯水期 > 平水期, 枯水期寿岛 TP 含量最高 (2 960.29 mg/kg), 平水期关家河最低 (586.05 mg/kg). TP 含量最大值出现在枯水期的寿岛, 其次是云集码头, 且 TP 含量都超过 2 400 mg/kg, 比其它采样点至少高 1 000 mg/kg. 寿岛是后河汇合前污染物沉积缓冲带, 龙溪河中工业废水和城市污水在此汇入, 加之枯水期采样时正值水库流域干旱, 水位较历年低, 使得此处 TP 含量达到最高值. 云集码头是网箱养殖非径流带, 网箱养殖增加了沉积物中的有机质、Fe/Al-P 和总无机磷含量, 从而增加了沉积物对磷的吸附容量<sup>[19]</sup>. TP 含量最小值出现在平水期的竹子滩和关家河, 竹子滩为两河完全汇合沉积冲刷断面, 进入湖区中的磷经过水体的自净作用, 在此

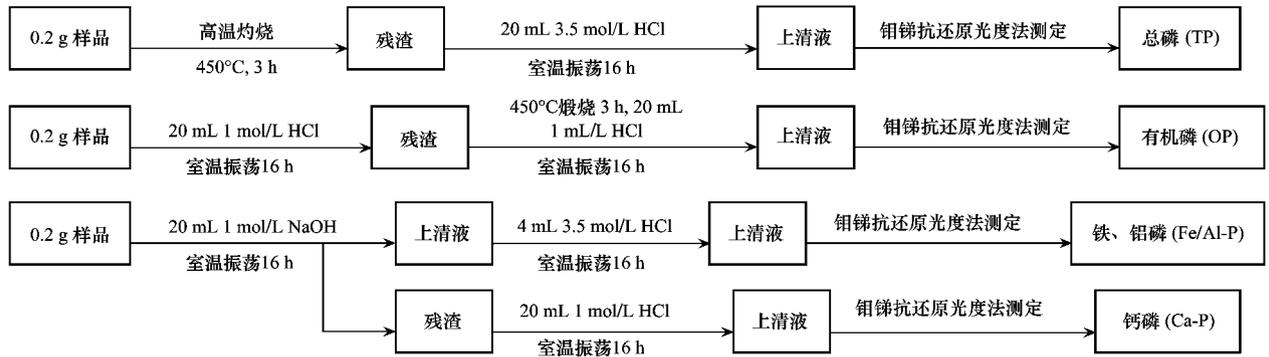


图2 沉积物磷形态分级和测定

Fig. 2 Classification and measurement of phosphorus species

沉积量少;关家河无主流工业污染源。

枯水期较丰水期降水量少,流域干旱,水位较低,不利于氮、磷营养盐的稀释<sup>[14]</sup>,而且3月微生物活动频繁,有机物开始分解,藻类处于休眠期,污染较为严重,使得沉积物TP含量较大;另一方面丰水期雨水充沛,湖区周围果园和耕地大量施用化肥,旅游活动频繁,生活污水和农业面源污染使得湖泊中磷含量增加,在总体上表现为沉积物磷含量的持续增加<sup>[20]</sup>,呈现丰水期高于平水期的趋势。龙河口和乐温受上游龙溪河污染影响严重,万寿、关家河、罗山寨、摆布荡、云集码头和大坝口均处于网箱养殖地带,丰水期渔民投放大量的动物粪便、饲料和化肥等饵料,显著增加了这些区域沉积物中的TP含量<sup>[15, 19]</sup>。云集码头和大坝口受风浪或人为扰动(如船只)的影响较大,且这种影响在枯水期尤为明显,使得2个采样点的TP含量表现为枯水期高于丰水期。

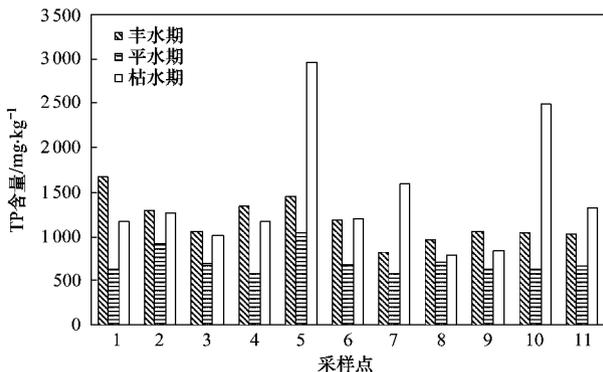


图3 不同采样点沉积物中TP含量

Fig. 3 TP contents in sediment at different sampling sites

## 2.2 沉积物中Fe/Al-P含量的季节变化特征

Fe/Al-P是指湖水中的磷被沉积物吸附后,包

裹在水合 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒表面上的沉积物磷形态。Fe-P是在湖泊沉积物-水界面迁移转化中最为重要的磷形态,其含量受沉积物粒度和氧化还原特征的影响,在氧化条件下趋于向沉积物沉降,在还原条件下则容易释放到上覆水中<sup>[21]</sup>。相对于枯水期,丰水期和平水期的水温高,DO含量较低,沉积物中的Fe-P更容易向上覆水释放。

图4为不同水期长寿湖各采样点沉积物中Fe/Al-P占TP的质量分数。从图4可以看出,除摆布荡外,沉积物中Fe/Al-P的质量分数均是平水期>丰水期>枯水期。由于枯水期上覆水的pH(8.92~9.49)比丰水期和平水期高得多(表2),远高于8.17,根据化学热力学计算,水体pH>8.17时 $\text{OH}^-$ 与 $\text{PO}_4^{3-}$ 竞争络合 $\text{Fe}^{3+}$ 和 $\text{Al}^{3+}$ ,促使Fe/Al-P的释放<sup>[22]</sup>,使得枯水期Fe/Al-P的质量分数最小。

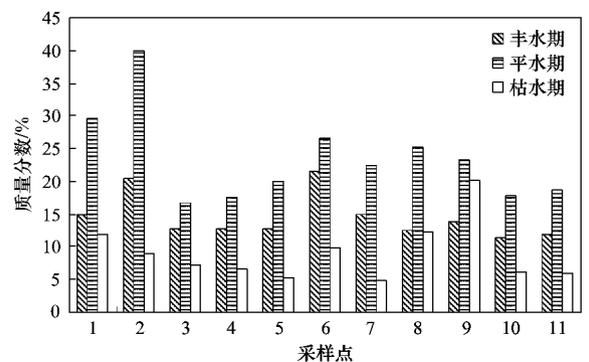


图4 不同采样点Fe/Al-P含量占TP的质量分数

Fig. 4 Mass fractions of Fe/Al-P in TP at different sampling sites

平水期乐温的Fe/Al-P质量分数最高(40.01%),此采样点为支流龙河堰污染物的输入处,可增加沉积物中的Fe/Al-P含量;丰水期罗山口的Fe/Al-P质量分数最高(21.41%),此采样点位于

主河道污染物降解断面, 两河口汇合前呈沉积状, 未充分混合, 一定程度上增加了 Fe/Al-P 含量; 枯水期摆布荡的 Fe/Al-P 质量分数最高 (20.12%), 此采样点为网箱养殖非径流带, 说明网箱养殖带入了大量磷, 且大多以 Fe/Al-P 的形式存在于沉积物中, 与米玮洁等<sup>[19]</sup>发现鱼塘养殖可增加沉积物中 Fe/Al-P 含量的结果一致。

### 2.3 沉积物中 Ca-P 含量的季节变化特征

Ca-P 为与湖泊磷灰石、沉积  $\text{CaCO}_3$  和生物骨骼等含磷矿物有关的沉积磷形式<sup>[23]</sup>, 还可通过  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{PO}_4^{3-}$  的沉淀作用形成<sup>[24]</sup>。图 5 为不同水期各采样点沉积物中 Ca-P 占 TP 的质量分数。从图 5 可以看出, 除丰水期摆布荡的 Ca-P 质量分数略高于平水期外, 各采样点均是枯水期 > 平水期 > 丰水期。由于枯水期水量减少, 流速降低, 水温较低, 光照较弱, 底栖藻类会大量死亡, 通过微生物矿化释放大量的磷酸盐, 使得以生物骨骼等含磷矿物的碎屑磷为主要存在形式; 尽管  $\text{CO}_2$  对 Ca-P 具有溶出作用<sup>[25]</sup>, 但在丰水期和平水期上覆水 pH 呈弱碱性, 使得这 2 个水期的 Ca-P 含量差异不大。

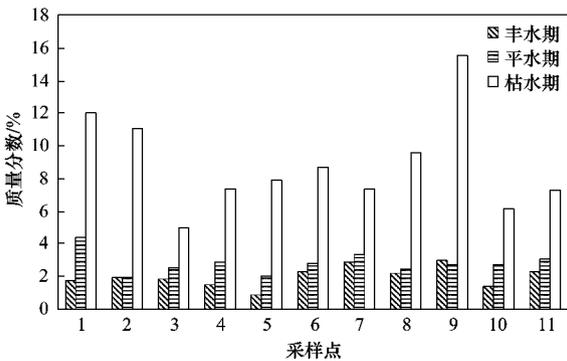


图 5 不同采样点 Ca-P 含量占 TP 的质量分数

Fig. 5 Mass fractions of Ca-P in TP at different sampling sites

摆布荡的 Ca-P 含量在枯水期和平水期均较高, 该采样点位于网箱养殖非径流带, 渔民投放的饵料 (如鸡粪) 中含有丰富的生物骨骼等含磷矿物。Matijević 等<sup>[26]</sup>研究养鱼对磷在沉积物中分布的影响发现, 鱼体残骸中含有的磷可灵敏指示湖水中磷的动态变化。平水期 Ca-P 含量在龙河口较高, 采样点处于入湖断面, 河水带入大量的农业灌溉用水和生活污水, 农业灌溉用水中含有大量的磷肥和未被利用的农药, 加上降雨径流带入的动植物残骸, 使得 Ca-P 含量相应升高。

### 2.4 沉积物中 OP 含量的季节变化特征

OP 存在于沉积物的各种动植物残体和腐殖质

中, 不易被藻类等水生植物吸收, 只能在其它生物, 尤其是微生物的作用下, 矿化分解为易被植物吸收的活性可溶性磷<sup>[27]</sup>。Gonsiorczyk 等<sup>[28]</sup>发现近期沉积的活性 OP 组分是富营养化湖泊磷释放的主要原因。图 6 为不同水期各采样点沉积物中 OP 占 TP 的质量分数。从图 6 可以看出, 各采样点 OP 的质量分数均呈现平水期 > 丰水期 > 枯水期的变化特征。丰水期和平水期正值夏秋季节, 农田化肥施用量大, 旅游业发达, 生活污水和农业面源污染使湖泊中磷含量大量增加, 其中 OP 的贡献较大<sup>[20]</sup>; 另一方面, 藻类生长过程中会优先利用沉积物中的 OP 和 Al-P<sup>[29]</sup>, 丰水期藻类生长旺盛, 消耗的 OP 较多, 使得平水期 OP 含量要高于丰水期。

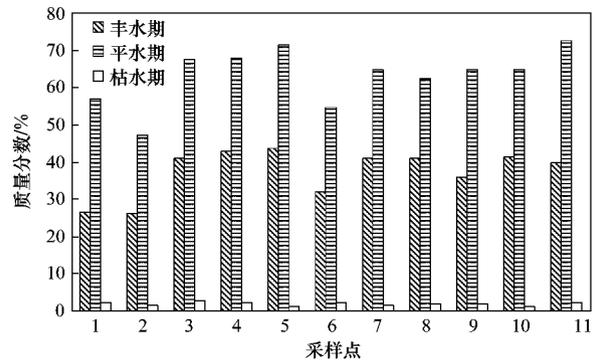


图 6 不同采样点 OP 含量占 TP 的质量分数

Fig. 6 Mass fractions of OP in TP at different sampling sites

从图 6 还可以看出, 平水期大坝口的 OP 质量分数最高 (72.44%), Zhang 等<sup>[30]</sup>认为有机质与不同形态的 OP 有明显的相关关系, 此样点位于网箱养殖主流径流带, 富余饵料沉降和鱼类排泄物增加了有机质的含量, 使得 OP 含量升高; 丰水期寿岛的 OP 质量分数最高 (43.80%), 寿岛是污染物沉积缓冲带, 陆源输入和初级生产力对有机质的贡献<sup>[31]</sup>, 导致 OP 质量分数升高; 枯水期万寿的 OP 质量分数最高 (2.78%), 位于沉积和网栏肥水养殖底泥污染带, 同样说明网箱养殖对 OP 含量的提高具有较大的贡献。

### 2.5 沉积物磷形态变化的影响因素

#### 2.5.1 pH

湖泊上覆水的酸度变化可影响沉积物对磷酸盐的吸附和离子交换过程, 进而影响沉积物中磷的释放<sup>[24]</sup>。表 2 给出了不同水期长寿湖沉积物上覆水的 pH 值。总体来说, pH 值变化为枯水期 > 丰水期 > 平水期, 变化范围为 7.50 ~ 9.49。上覆水

pH 变化,能够影响 Fe、Al、Ca 等元素与磷的结合状态,进而影响沉积物中磷的释放<sup>[23]</sup>. 金相灿等<sup>[32]</sup>研究发现,在高 pH 条件下,促进 Fe/Al-P 的释放;在低 pH 条件下,促进 Ca-P 的释放. 由于长

寿湖各采样点枯水期的 pH 值比其它 2 个水期高得多,因此枯水期 Fe/Al-P 更容易向湖水中释放,使得 Fe/Al-P 占 TP 的质量分数低于其它 2 个水期,证实了 2.2 节的结果.

表 2 不同水期上覆水的 pH 值

Table 2 pH values of overlying water during different periods

| 水期  | 采样点  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|     | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   |
| 丰水期 | 7.61 | 7.60 | 7.70 | 8.04 | 7.99 | 7.80 | 8.03 | 8.01 | 7.93 | 7.55 | 8.11 |
| 平水期 | 7.50 | 7.69 | 7.77 | 7.95 | 7.67 | 7.71 | 7.94 | 7.76 | 7.67 | 7.84 | 7.65 |
| 枯水期 | 8.92 | 9.11 | 9.20 | 9.34 | 9.43 | 9.48 | 9.31 | 9.34 | 9.16 | 9.48 | 9.49 |

### 2.5.2 DO 含量

DO 含量决定了湖泊水-沉积物界面的氧化还原状态<sup>[32]</sup>,进而影响铁的价态和有机质的矿化分解. 当上覆水中 DO 含量高时,沉积物中的 Fe<sup>2+</sup> 转化为 Fe<sup>3+</sup>,再与磷酸盐结合形成 FePO<sub>4</sub>. 表 3 给出了不同

水期长寿湖上覆水中的 DO 含量. 从表 3 可以看出, DO 变化表现为枯水期 > 平水期 ≈ 丰水期. 由此看来,长寿湖枯水期 Fe/Al-P 的质量分数应当高于其它 2 个水期,但实际上却恰好相反,说明上覆水 pH 是影响 Fe/Al-P 含量的主要因素.

表 3 不同水期上覆水中的 DO 含量/mg·L<sup>-1</sup>

Table 3 DO contents in overlying water during different periods/mg·L<sup>-1</sup>

| 水期  | 采样点   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    |
| 丰水期 | 2.87  | 2.80  | 2.86  | 2.66  | 2.44  | 2.61  | 2.57  | 2.50  | 2.48  | 2.42  | 2.43  |
| 平水期 | 2.93  | 2.89  | 2.32  | 2.65  | 2.67  | 2.96  | 2.95  | 2.21  | 2.22  | 2.76  | 2.48  |
| 枯水期 | 10.54 | 12.84 | 13.18 | 16.09 | 15.95 | 15.68 | 13.70 | 15.12 | 12.72 | 17.72 | 17.41 |

### 2.5.3 温度

温度升高一方面促进无机磷的溶解释放速率和扩散速率,另一方面也可使沉积物中微生物和底栖生物活动加强,提高生物搅动作用和有机物的矿化过程,从而促进 OP 的分解<sup>[33]</sup>. 从表 4 可以看出,温度变化整体表现为平水期 > 丰水期 > 枯水期,枯水期尽管 DO 含量较高,但是水温较低,

微生物分解速率明显不如平水期和丰水期,OP 的季节变化仍表现为平水期 > 丰水期 > 枯水期. 另外,枯水期较其它 2 个水期的人为活动干扰小,说明以网箱养殖为主输入的 OP 占总有机磷的绝大部分,而湖泊藻类和动植物残骸释放的 OP 所占比例较小,因此枯水期 OP 的质量分数低于其它 2 个水期.

表 4 长寿湖 1965~1977 年逐月上覆水温

Table 4 Overlying water temperature in Changshou Lake from 1965 to 1977

| 月份      | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 上覆水温/°C | 11.8 | 10.3 | 10.6 | 10.4 | 12.4 | 12.8 | 14.0 | 14.5 | 14.2 | 14.4 | 14.3 | 14.2 |

湖泊沉积物中磷形态除受上述因素影响外,还可能受到游艇船只、曝气装置等人为扰动的影响,在云集码头和大坝口 TP 含量的季节性变化就明显反映了扰动的影响. 另外沉积物本身的性质,如沉积物的粒径和组成(如有机质含量)等都可能影响磷形态.

## 3 结论

(1)除寿岛、竹子滩、云集码头和大坝口这 4 个采样点的 TP 含量表现为枯水期 > 丰水期 > 平水

期外,其余采样点则均表现为丰水期 > 枯水期 > 平水期,其中,枯水期寿岛 TP 含量最高,平水期关家河最低.

(2)Fe/Al-P 和 OP 含量均呈现平水期 > 丰水期 > 枯水期的变化特征. Fe/Al-P 受上覆水 pH 影响明显;OP 含量受 DO 的影响不太明显,可能与网箱养殖活动的干扰有关.

(3)Ca-P 含量呈现枯水期 > 平水期 > 丰水期的变化特征.

## 参考文献:

- [1] 袁和忠, 沈吉, 刘恩峰, 等. 模拟水体 pH 控制条件下太湖梅梁湾沉积物中磷的释放特征[J]. 湖泊科学, 2009, 21(5): 663-668.
- [2] 赵志梅. 渤海湾沉积物磷形态及营养盐在沉积物-水界面交换的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2005.
- [3] 袁和忠, 沈吉, 刘恩峰, 等. 太湖水体及表层沉积物磷空间分布特征及差异性分析[J]. 环境科学, 2010, 31(4): 954-960.
- [4] 孟春红, 赵冰. 东湖沉积物中氮磷形态分布的研究[J]. 环境科学, 2008, 29(7): 1831-1837.
- [5] 林悦涓, 吴峰, 邓南圣. 武汉东湖上覆水和沉积物中磷形态的垂直分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 1152-1156.
- [6] 李大鹏, 黄勇, 范成新. 底泥间歇扰动-沉降过程对静止水体中生物有效磷的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(8): 1795-1800.
- [7] Holmroos H, Niemistö J, Weckstrom K, et al. Seasonal variation of resuspension-mediated aerobic release of phosphorus [J]. Boreal Environmental Research, 2009, 14(6): 937-946.
- [8] 金相灿, 姜霞, 徐玉慧, 等. 太湖东北部沉积物可溶性氮-磷的季节性变化[J]. 中国环境科学, 2006, 26(4): 409-413.
- [9] 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.
- [10] 方芳, 李哲, 田光, 等. 三峡小江回水区磷素赋存形态季节变化特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2009, 30(12): 3488-3493.
- [11] 胡春华, 周文斌, 王毛兰, 等. 鄱阳湖氮磷营养盐变化特征及潜在性富营养化评价[J]. 湖泊科学, 2010, 22(5): 723-728.
- [12] Tucholski S, Wojno T. Studies on removal of wastes production during cage-rearing of rainbow trout (*Salmo gairdneri* Richardson) in lakes. 3. Budgets of mineral material and some nutrient elements [J]. Roczniki Nauk Rolniczych Seria E, Ochrona Roslin, 1980, 82(1): 31-50.
- [13] Phillips M J, Beveridge M C M, Ross L G. The environmental impact of salmonid cage on inland fisheries: Present status and future trends [J]. Journal of Fish Biology, 1985, 27(sA): 123-137.
- [14] 舒廷飞, 温琰茂, 贾后磊, 等. 哑铃湾网箱养殖对水环境的影响[J]. 环境科学, 2004, 25(5): 97-101.
- [15] 石广福, 郑永华, 蔡深文, 等. 三峡库区万州段投饵网箱养鱼对底泥水化因子的影响[J]. 淡水渔业, 2009, 39(3): 36-39.
- [16] 杨钢, 张晟, 李崇明, 等. 重庆长寿湖水富营养化的调查及评价[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2003, 28(3): 492-495.
- [17] 杨志敏, 熊海灵, 张晟, 等. 重庆长寿湖富营养化评价及氮磷平衡研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 47-57.
- [18] Ruban V, Lopez-Sanchez J F, Pardo P, et al. Development of a harmonized phosphorus extraction procedure and certification of a sediment reference material [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2001, 3(1): 121-125.
- [19] 米玮洁, 周易勇, 朱端卫, 等. 养殖污染水体-沉积物中磷的化学行为[J]. 湖泊科学, 2008, 20(3): 271-276.
- [20] 金相灿, 姜霞, 王琦. 太湖梅梁湾沉积物中磷吸附/解吸平衡特征的季节性变化[J]. 环境科学学报, 2008, 28(1): 24-30.
- [21] 向速林, 周文斌. 鄱阳湖沉积物中磷的赋存形态及分布特征[J]. 湖泊科学, 2010, 22(5): 649-654.
- [22] 范成新, 张路, 包先明, 等. 太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及量化——2. 磷释放的热力学机制及源-汇转化[J]. 湖泊科学, 2006, 18(3): 207-217.
- [23] 姜敬龙, 吴云海. 底泥磷释放的影响因素[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(6): 43-46.
- [24] 王钦. 玉渊潭及太湖沉积物氮磷及金属年际变化及其影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- [25] 徐轶群, 熊慧欣, 赵秀兰. 底泥磷的吸附与释放研究进展[J]. 重庆环境科学, 2003, 25(11): 147-149.
- [26] Matijević S, Kušpilić G, Kljaković-Gašpić Z, et al. Impact of fish farming on the distribution of phosphorus in sediments in the middle Adriatic area [J]. Marine Pollution Bulletin, 2008, 56(3): 535-548.
- [27] 吴丰昌, 金相灿, 张润宇, 等. 论有机氮磷在湖泊水环境中的作用和重要性[J]. 湖泊科学, 2010, 22(1): 1-7.
- [28] Gonsiorczyk T, Cosper P, Koschel R. Phosphorus-binding forms in the sediment of an oligotrophic and an eutrophic hardwater lake of the Baltic Lake District (Germany) [J]. Water Science and Technology, 1998, 37(3): 51-58.
- [29] 华兆哲, 朱晓青, 王晓蓉. 太湖沉积物磷释放对羊角月牙藻的生物可利用性研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(1): 100-105.
- [30] Zhang R Y, Wu F C, Liu C Q, et al. Characteristics of organic phosphorus fractions in different trophic sediments of lakes from the middle and lower reaches of Yangtze River region and Southwestern Plateau, China [J]. Environmental Pollution, 2008, 152(2): 366-372.
- [31] 吴丰昌, 王立英, 黎文, 等. 天然有机质及其在地表环境中的重要性[J]. 湖泊科学, 2008, 20(1): 1-12.
- [32] 金相灿, 王圣瑞, 庞燕. 太湖沉积物磷形态及 pH 值对磷释放的影响[J]. 中国环境科学, 2004, 24(6): 707-711.
- [33] 李高金, 周杰. 环境因子对南四湖沉积物中磷释放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊): 653-656.