

文章编号:1000-582X(2012)07-138-07

## 新建人工湖沉积物磷形态分布及其影响因素实验

范功端<sup>1,2</sup>, 张 智<sup>2</sup>, 任丽平<sup>2,3</sup>, 罗 静<sup>1,2</sup>, 向 平<sup>2</sup>, 杨冬雪<sup>2</sup>

(1. 福州大学 土木工程学院, 福州 350108; 2. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 3. 西华师范大学 珍稀动植物研究所, 四川 南充 637000)

**摘 要:**通过采用连续分级提取法研究了某新建人工湖沉积物磷的形态分布,并研究了环境因素(溶解氧、温度、pH 值和光照)对人工湖中的沉积物磷的影响。结果表明新建人工湖沉积物中无机磷含量在总磷中占绝对优势,其中“活性磷”占总磷的 12.0%~15.1%,其质量浓度分布为:缓流区>出湖口>湖心区>入湖口>滞流区;有机磷含量占总磷的 3.4%~8.5%,其质量浓度分布为:出湖口>湖心区>滞流区>缓流区>入湖口。新建人工湖中的沉积物磷表现出先吸附后释放的规律;较高的温度和 pH 以及较低的溶解氧都会促进沉积物中磷的释放,且磷的释放量在无光照下明显高于有光照。

**关键词:**沉积物;磷;人工湖;形态分布;连续提取法

**中图分类号:**X524

**文献标志码:**A

## Experiments on the feature distribution and influencing factors of sediment phosphorus in a new artificial lake

FAN Gongduan<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhi<sup>2</sup>, REN Liping<sup>2,3</sup>, LUO Jing<sup>1,2</sup>, XIANG Ping<sup>2</sup>, YANG Dongxue<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. Institute of Rare and Precious Animals & Plants, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637000, China)

**Abstract:** Experiments on the features distribution of sediment phosphorus is carried out with sequential extraction method in a new artificial lake. In addition, parameters affecting the sediment phosphorus, such as pH, temperature, dissolved oxygen and light, are examined. The experimental results show that inorganic phosphorus is the most component in total phosphorus, while active phosphorus is between 12.0% and 15.1%. The mass concentration distribution of the active phosphorus in descending order is as follows: slow flow area, lake outlet, lake centre, lake entrance, stagnation zone. Also, organic phosphorus in total phosphorus is in the range of 3.4% to 8.5% and its mass concentration distribution in descending order is listed as follows: lake outlet, lake centre, stagnation zone, slow flow area, lake entrance. At the same time, sediment phosphorus affected by the environmental factors is firstly released, followed by adsorption; increasing temperature and pH is beneficial to the release of sediment phosphorus;

**收稿日期:**2012-02-03

**基金项目:**国家科技支撑计划资助项目(2007BAB21B01);重庆市科技攻关计划资助项目(CSTC2006AB7054; CSTC2010AC7081);中央高校基本科研业务费资助(CDJXS10210003);重庆大学大型仪器设备开放基金(2010011528)

**作者简介:**范功端(1984-),男,重庆大学博士研究生,主要从事水体富营养化、水处理理论与技术研究,  
(E-mail)cqufgd@126.com。

at lower dissolved oxygen, the release of sediment phosphorus is largely improved; and the release of phosphorus in the absence of light is significantly higher than that in the presence of light.

**Key words:** sediments; phosphorus; artificial lake; phosphorus fractions; sequential extraction method

由于洪涝调蓄排水、局部气候调节、景观、娱乐、人居环境建设等方面的需要,目前各大城市建设有很多人工湖。一般人工湖的汇水面积小、汇水量小,交换水量小,受污染风险能力小,生态环境脆弱。人工湖在成库初期一般处于营养积累的高峰期,人工湖较容易处于富营养化状态<sup>[1]</sup>。而水体的富营养化问题是目前世界范围内所共同面临的主要水污染问题之一<sup>[2]</sup>。磷在控制淡水生态系统中的初级生产力方面起着重要作用,通常被认为是湖泊藻类生长的一个重要营养限制因子,也是导致富营养化的一个主要因素<sup>[3]</sup>,对富营养化的治理应集中控磷<sup>[4-6]</sup>。沉积物中释放的磷被认为是浅水人工湖泊蓝藻水华形成的重要原因。环境条件改变时,沉积物-水界面中的磷将发生吸附与解析作用。沉积物中磷的形态和环境条件决定了沉积物中能参与界面交换和可被生物利用的磷的含量;生物有效性随着沉积物中磷的形态不同而不同;磷的形态对上覆水体富营养化程度的影响不容忽视<sup>[7-8]</sup>。因此,研究沉积物中磷的赋存形态,以及环境因素对其影响具有重要的意义。当前,沉积物中磷赋存形态的研究多集中于年代相对久远的天然大型湖泊<sup>[9-10]</sup>,对人工湖,特别是新建人工湖沉积物中磷赋存形态和环境因素对其影响的研究较少;对于沉积物中各种形态磷含量,新建人工湖与天然大型湖泊不同,但未有过类似研究。为了解新建人工湖沉积物中各种形态的磷分布情况和特点,以及环境因素对磷的释放和循环机制的影响,以重庆市某新建人工湖为例,采用分级提取方法测定该新建人工湖主要特征区域沉积物中不同化学形态磷的含量,分析研究了其分布特征以及环境因素对磷的释放/吸附的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集及预处理

所研究的新建人工湖位于重庆市,长江一级支流上,为小(1)型水库,容积为 168 万 m<sup>3</sup>,坝址以上控制流域面积 12.00 km<sup>2</sup>。2008 年 8 月中下旬,采用自制重力型采样器对新建人工湖具有代表性的点进行采样,具体点位分布见图 1。其中 1 点为出湖口、2 点为湖心区、3 点为缓流区、4 点为入湖口和 5 点为滞流区。人工湖主要径流方向是 4 入湖口→3

缓流区→2 湖心区→1 出湖口。沉积物样品经现场预处理后带回实验室后,取表层 0~5 cm 泥样在自然风条件下风干,采用四分法取样,使用玛瑙研钵研磨并过 100 目尼龙筛,处理后的样品保存于封口袋中备用。



图 1 采样点位置图

### 1.2 实验方法

1) 沉积物 pH 值测定。将预处理后样品风干,称取 5 g 加入放有去 CO<sub>2</sub> 的蒸馏水 25 mL 的 50 mL 高型玻璃烧杯中,搅拌 1 min,使样品中可溶物质充分溶解,静置 0.5~1 h,使用经校准后的 HACH 便携式 pH 测量仪测定 pH 值。

2) 总磷的测定方法。总磷的测定采用过硫酸钾氧化-钼锑抗分光光度法<sup>[11]</sup>。

3) 沉积物磷的形态与含量的测定。根据李悦等<sup>[12]</sup>在 Ruttenberg 法<sup>[13]</sup>基础上提出的沉积物中磷分级提取方法并略做改进,提取步骤详见图 2。

4) 环境因素对沉积物中磷的影响实验。沉积物对磷的吸附/解析是一个动态平衡过程,有研究表明<sup>[14]</sup>,溶解氧(DO)、温度(T)、pH 值、氧化还原电位(Eh)、光照、水体扰动、底栖动物、藻类等因素对沉积物中磷的转化和释放等过程产生影响。选择其中的 DO、T、pH 值和光照 4 个因素来研究其对人工湖沉积物中磷的影响。

取 10 g 沉积物预处理后的风干样加入到 1 000 mL 的锥形瓶中,再加入 1 000 mL 湖水,用胶塞封住瓶口,蔽光放置,每 2 天采用虹吸法吸取水样 20 mL,测试上覆水中的总磷质量浓度,连续进行 20 d。

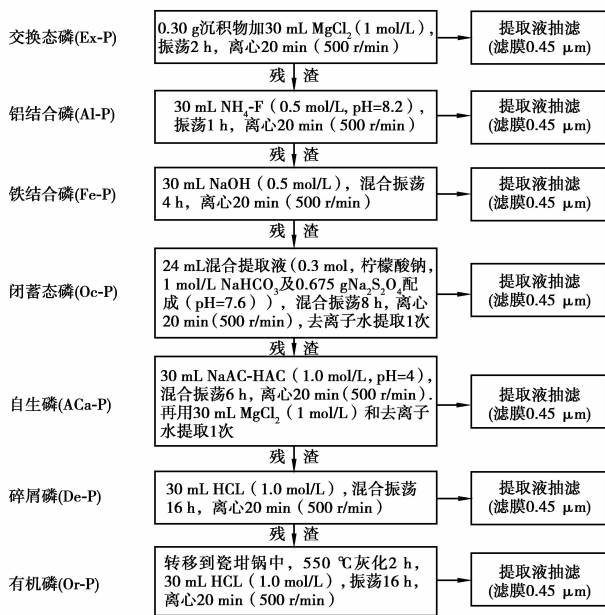


图 2 沉积物中磷的形态及含量的测定

温度控制试验:将模拟装置放入生化恒温培养箱中,分别设置 8、15、25  $^{\circ}C$  3 种温度来模拟不同的季节。

pH 值控制试验:使用 0.1 mol/L 的  $H_2SO_4$  和 NaOH 溶液调节上层水样的 pH 值,起始 pH 值分别为 5.0、7.0、9.0 来模拟 pH 值的影响。

DO 控制试验:通过搅拌调节水体中 DO 分别为  $<2.0$ 、 $4.0$ 、 $>8.0$  mg/L,以模拟缺氧和好氧等条件的影响。

光照控制:一组放置于温度(25 $\pm$ 1) $^{\circ}C$  未开启光照的培养箱中培养,另一组放置于同样温度开启光照的培养箱中培养,设置光照强度为(2 000 $\pm$ 50)lx。

## 2 结果与讨论

### 2.1 沉积物中的 pH 值

酸碱性是沉积物的重要性质,直接影响沉积物中磷的赋存形态和释放情况,从而影响其对生物的可利用性<sup>[15]</sup>。水中 pH 值越低,沉积物中的磷越容易释放,且释放速率和量均较大。pH 值对钙磷的影响最大。pH 值较低时,沉积物中不仅会释放出铁磷,而且铁以亚铁离子态溶出,增加了湖水中铁的含量;而 pH 值较高,沉积物中的磷则较难释放。

该人工湖各采样点沉积物 pH 值见图 3。从图 3 可见,人工湖中沉积物的 pH 值介于 5.34~8.12 之间,基本为中性偏碱性(出湖口除外,该处为酸性)。沉积物的 pH 值越低,新建人工湖沉积物中越

容易释放出磷。

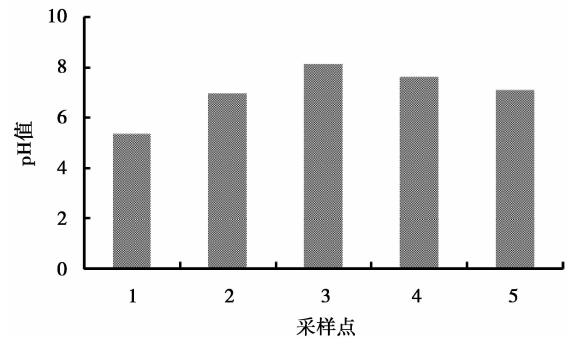


图 3 各采样点沉积物 pH 值

### 2.2 沉积物中磷的形态及含量

该人工湖各采样点特征及表层沉积物各形态磷含量测定结果见表 1。本研究为研究新建人工湖的特点,选取朱广伟<sup>[16-17]</sup>调查研究的甘棠湖、东湖、菜子湖、洪湖、巢湖、太湖、鄱阳湖和洞庭湖作为非新建湖泊与新建人工湖作对比研究。该新建人工湖与其他非新建湖泊特征及表层沉积物中磷形态含量对比情况见表 2。新建人工湖沉积物总磷含量在 595.8~673.9 mg/kg,磷形态含量平均值总体呈现 Al-P<Fe-P<Or-P<Ex-P<Oc-P<ACa-P<De-P 特征;非新建湖泊磷形态含量平均值总体呈现 Al-P<Ex-P<ACa-P<Or-P<De-P<Fe-P<Oc-P 特征。新建人工湖以无机磷为主,有机磷的含量较低;沉积物中磷的主要赋存形态为 Oc-P、De-P、ACa-P 等。而非新建湖泊也是以无机磷为主,Or-P、De-P、Fe-P、Oc-P 是其表层沉积物磷的主要赋存形态。通常情况下,Oc-P 主要包含于铁、铝等矿物颗粒中,较难释放;De-P 主要包含于沉积物中的原生矿物颗粒中,生物较难以利用;因生物作用而在沉积物中沉积、固结的颗粒磷为 ACa-P,如羟基磷灰石等,生物也难以利用;动、植物残体、腐殖质类有机物在沉积物中沉积的磷为 Or-P,生物较难以利用,且只有当有机物矿化后,这部分磷才能释放到水中<sup>[16]</sup>。新建人工湖这 4 种形态的磷(“非活性磷”)占总磷的 85.2%~87.6%。而非新建湖泊中“非活性磷”占总磷 90%以下的甘棠湖、菜子湖和太湖均处于中-富营养水平,而 90%以上的甘棠湖、东湖、洪湖、鄱阳湖和洞庭湖均处于贫-中营养水平。Ex-P、Fe-P、Al-P 较易释放而被生物利用,这 3 种磷通常被称为“活性磷”,其含量较低,仅占总磷的 12.3%~14.8%,因此,新建人工湖应特别注重对“活性磷”的控制。“活性磷”在人工湖的分布为缓流区>出湖口>湖心区>入湖口>滞流区。

表 1 各采样点特征及表层沉积物各形态磷含量

采样点	深度/ m	水草 状况	Ex-P/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	Al-P/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	Fe-P/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	Oc-P/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	ACa-P/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	De-P/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	Or-P/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	TTP/ (mg · kg <sup>-1</sup> )
1 点	15	未见	38.0	1.4	57.3	216.2	171.2	113.8	55.8	653.8
2 点	2	未见	68.3	2.6	21.0	49.6	132.5	347.9	38.6	660.5
3 点	14	未见	77.9	7.8	13.0	40.7	134.9	372.1	27.5	673.9
4 点	8	未见	68.8	6.2	8.9	156.3	132.5	202.6	20.5	595.8
5 点	12	未见	66.3	1.2	10.9	174.1	136.1	218.5	27.6	634.7

说明:TTP 表示总提取磷。

表 2 该新建人工湖与其他非新建湖泊特征及表层沉积物中磷形态含量

湖泊/ 采样点	湖泊 面积/km <sup>2</sup>	深度/ m	水草 状况	Ex-P/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	Al-P/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	Fe-P/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	Oc-P/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	ACa-P/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	De-P/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	Or-P/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	TTP/ (mg · kg <sup>-1</sup> )
甘棠湖 <sup>[17]</sup>	0.8	2.0	未见	8.5	0.1	1 071.7	1 067.3	253.6	466.7	143.2	3 011.2
东湖 <sup>[17]</sup>	33.7	3.8	未见	15.4	0.7	11.4	943.3	48.6	185.2	202.1	1 406.7
菜子湖 <sup>[17]</sup>	172.1	1.0	未见	1.6	0.2	237.0	781.7	7.9	132.4	98.9	1259.5
洪湖 <sup>[17]</sup>	344.4	1.5	有草	2.4	0.1	2.1	226.5	102.4	281.8	73.7	689.0
巢湖 <sup>[17]</sup>	769.6	3.8	未见	0.6	0.1	51.5	307.5	18.9	95.1	132.0	605.7
太湖 <sup>[17]</sup>	2 338.1	2.3	未见	3.2	0.1	120.0	240.8	33.8	122.5	144.7	665.1
鄱阳湖 <sup>[17]</sup>	2 933.0	3.0	未见	0.4	0.1	5.4	417.8	3.7	27.7	34.5	489.6
洞庭湖 <sup>[17]</sup>	2 432.5	0.9	未见	1.7	0.1	12.9	254.5	28.1	134.8	55.8	488.0
非新建湖泊 平均值	—	—	—	4.2	0.2	189.0	529.9	62.1	180.8	110.6	1 076.8
该新建 人工湖 平均值	0.2	10.0	未见	63.9	3.9	22.2	127.4	141.4	251.0	34.0	643.7

1)无机磷。由图 4 可知新建人工湖沉积物以无机磷 IP 为主,占总磷的 91.5%~96.6%,无机磷中以 ACa-P 和 Oc-P 为主。

Ex-P 最易释放到上覆水中,易于水生生物吸收。Ex-P 对水体中磷酸盐的含量会产生直接的影响。新建人工湖中 Ex-P 含量为 38.0~77.9 mg/kg,出湖口最低,缓流区最高,达到 77.9 mg/kg。而对比的非新建湖泊 Ex-P 含量 0.4~15.4 mg/kg,相对较低。可见新建人工湖 Ex-P 含量高,对湖泊富营养化程度的影响较大。

Fe-P 活性高,易释放,被认为是生物能够利用的潜在磷源之一。沉积物-水界面的氧化-还原环境控制着 Fe、Mn 循环,在铁的还原下,沉积物中将释放出 Fe-P。无定形铁/铝氧化物表面的磷呈吸附态,

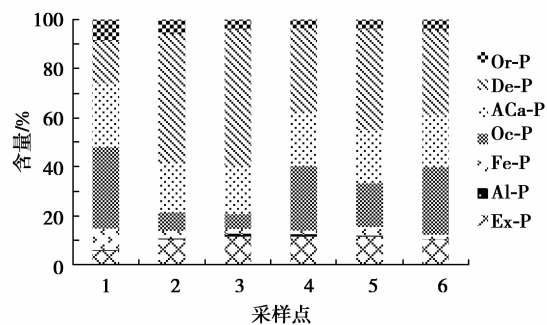


图 4 表层沉积物中各种形态的磷的比例

当氧化-还原条件改变时,能释放到水中。新建人工湖表层沉积物中 Fe-P 含量为 8.9~57.3 mg/kg,占 TP 的 1.5~8.8%,入湖口处最低,出湖口处最高。

pH 值变化会引起 Fe-P 的溶解或解析,同时还会使有机质降解或有机磷的矿化。新建人工湖 Al-P 仅占总磷的 0.2%~1.2%,与非新建湖泊类似,含量均很低。

Oc-P 外表包裹着一层  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  胶膜,包括一部分钙磷和铝磷,生物不能利用。新建人工湖中 Oc-P 的含量为 40.7~216.2 mg/kg,占总磷含量的 6.04%~33.07%,说明新建人工湖中自然状态磷的含量较多。

新建人工湖中 Aca-P 含量为 132.5~171.2 mg/kg,占总磷的 20.06%~26.19%,而非新建湖泊除甘棠湖外,其他湖泊含量较低。沉积物中 Ca-P 含量取决于湖底区域地质-地球化学特征与水体的酸碱度。Ca-P 比较稳定<sup>[17]</sup>,沉积物中的 Aca-P 主要以钙的磷酸盐( $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ )形式存在,难溶于水,对上覆水中溶解态磷的贡献很小。

新建人工湖 De-P 含量为 113.8~372.1 mg/kg,占总磷含量的 17.4%~55.2%。

2) 有机磷。贫营养湖泊中磷释放的最重要机制是铁锰结合态磷的迁移,富营养湖泊磷释放的主力却是近期沉积的活性 Or-P,生物较难利用。当有机质被矿化或降解时,Or-P 将释放到水中,该过程对沉积物间隙水中溶解态磷酸盐的质量分数及其扩散起着重要作用。在一定条件下,部分 Or-P 可水解或矿化为溶解态磷酸盐,使得水中 TP 增加,从而促进湖泊的富营养化<sup>[18]</sup>。沉积物中 Or-P 被称为“磷蓄积库”,新建人工湖含 Or-P 20.5~55.8 mg/kg,占总磷的 3.4%~8.5%;而非新建湖泊含 Or-P 含量较高 34.5~202.1 mg/kg,含量较新建人工湖高;可见新建人工湖成库后,随着时间的推移,人工湖各种动植物残体、腐殖质类有机物不断沉积,人工湖 Or-P 会不断积累。新建人工湖 Or-P 的质量分数分布为出湖口>湖心区>滞流区>缓流区>入湖口,出湖口与湖心区处最高,其原因是这两处成湖前种植有农作物。

### 2.3 环境因素对沉积物中磷的影响

1) 光照对沉积物中磷的影响。由图 5 可知,实验前 10 d 时间内,沉积物中 TP 处于吸附过程,与上覆水存在质量分数差,当沉积物中的 TP 含量远低于上覆水的 TP 含量时,沉积物会吸附上覆水中的 TP。第 10 天时吸附达到饱和,有光照条件与无光照条件下的吸附基本一致,吸附量分别为 0.28 mg/L 和 0.26 mg/L,说明光照能促进沉积物对 P 的吸附。

在第 10 天沉积物对 P 吸附达到最低,第 10 d 之后沉积物中的 TP 开始释放,有光照和无光照情

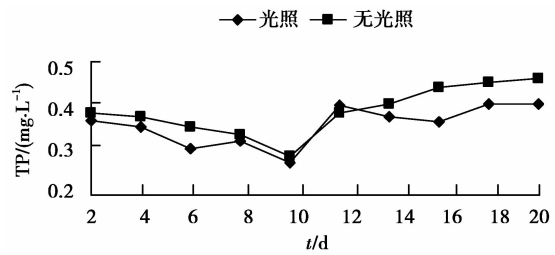


图 5 光照对沉积物中磷的影响

况下的释放量分别为 0.14 mg/L 和 0.18 mg/L,后者高于前者。

湖库中藻类的生长繁殖需要大量磷,当上覆水中的磷质量分数处于低水平时,沉积物就会释放出磷到上覆水中,然而在释放过程中可生物利用的磷会被藻类吸收用以生长繁殖,此时,藻类即成为一道生物屏障阻止磷的释放。通过藻类的生物作用,光照这一因素间接限制了沉积物中的磷向水体释放。这是因为光照将促进底栖藻类生长,其强度越大,藻类繁殖越快,被藻类吸收的磷也越多。

2) 温度对沉积物中磷的影响。由图 6 可知,温度对沉积物中 TP 的影响与光照相似。前 10 d 内,沉积物中 TP 仍处于吸附过程,温度越低对吸附越有利,不同温度下的吸附情况为  $8\text{ }^\circ\text{C} > 15\text{ }^\circ\text{C} > 25\text{ }^\circ\text{C}$ ,吸附量分别为 0.34、0.31、0.26 mg/L。第 10 天以后沉积物中的磷开始释放,温度越高,释放越快,此时不同温度下的释放情况为  $25\text{ }^\circ\text{C} > 15\text{ }^\circ\text{C} > 8\text{ }^\circ\text{C}$ ,释放量分别为 0.21、0.10、0.09 mg/L。主要是因为温度高,物质具有较高的活性,从而加快了各种物理和生化反应(如扩散、有机质降解等)速率。同时,较高的温度增强了微生物的活力,加速了有机质的分解,降低了水中氧化还原电位, $\text{Fe}^{3+}$  还原为  $\text{Fe}^{2+}$ ,磷从  $\text{FePO}_4$  和  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  沉淀物中得以释放。此外,温度还影响着水体中氧气的溶解度,温度升高,氧气的溶解度下降,同时也影响了沉积物的氧化

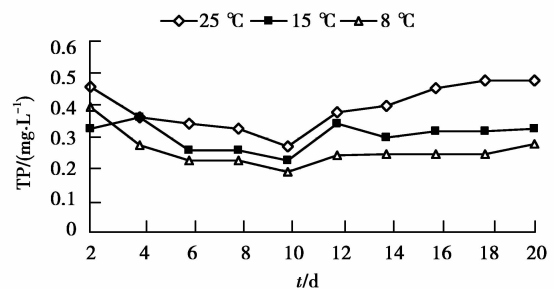


图 6 温度对沉积物中磷的影响

还原电位。

3)溶解氧对沉积物磷的影响。由图7可知,在吸附阶段,好氧条件下的吸附量大于缺氧条件,DO分别为 $>8$ 、 $4$ 、 $<2$  mg/L的吸附量分别为 $0.325$ 、 $0.275$ 、 $0.258$  mg/L。在释放阶段,好氧条件下的释放量明显低于缺氧条件,上述3种DO下的释放量分别为 $0.09$ 、 $0.20$ 、 $0.21$  mg/L。

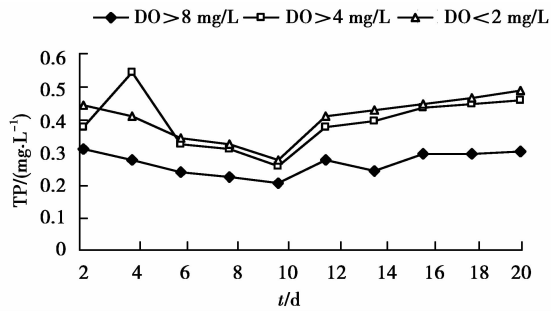


图7 DO对沉积物中磷的影响

好氧条件将抑制磷的释放,厌氧条件将加速沉积物中的磷的释放。主要是因为沉积物的氧化还原电位会受到水中DO的影响。在厌氧状况下,P-Fe表面的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 保护层很容易转化为 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ,进而使P-Fe溶解释放到水中<sup>[19]</sup>。微生物分解水生生物和藻类时将消耗水中的DO,使水中DO降低;而水体环境在缺氧条件下,将促进沉积物磷的释放。

4)pH值对沉积物中磷的影响(见图8)。磷吸附:吸附过程,pH越低,磷的吸附量越大,当 $\text{pH}=5$ 时,磷的吸附量为 $0.38$  mg/L;当 $\text{pH}=7$ 时,磷的吸附量为 $0.34$  mg/L; $\text{pH}=9$ ,磷的吸附量为 $0.27$  mg/L,说明酸性条件下,磷的吸附量大于中性和碱性条件下的吸附量。这是因为沉积物表面的反映体系均带负电荷,pH值越低,表面溶液中的 $\text{H}^+$ 质量分数越高,与之反应的负电荷也应较多,从而要求沉积物表面有较多的负电荷。当沉积物中含有较多粘土矿物时,在阳离子桥的作用下,其颗粒边缘 $\text{H}^+$ 的正电荷增加了磷酸盐的吸附量。

磷释放:从第10天之后,沉积物中的磷开始向水体释放,随pH值的升高,释放强度相应升高。从实验中可以看出, $\text{pH}=5$ 时,磷的释放量仅为 $0.02$  mg/L,较不明显;当 $\text{pH}=7$ 时,磷的释放量为 $0.18$  mg/L; $\text{pH}=9$ ,磷的释放量为 $0.21$  mg/L。pH值的大小对磷的释放会产生影响,这主要是因为氢氧根与铝胶体络合物和非晶体磷交换作用得到加强。当pH值升高,磷的这种交换作用得到增强,络合态中的磷将释放出来,磷的含量随即增加。此外,

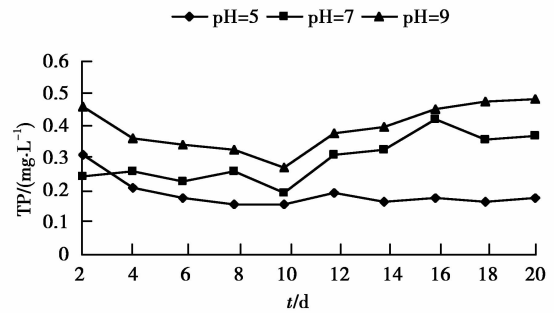


图8 pH值对沉积物TP的影响

pH值的高低影响了水体中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的存在形式: $\text{pH}\leq 7.2$ 时,磷主要以 $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ 形式存在; $7.2\leq \text{pH}\leq 12.2$ 时,磷主要以 $\text{HPO}_4^{2-}$ 形式存在; $\text{pH}\geq 12.2$ 时,磷主要以 $\text{PO}_4^{3-}$ 形式存在; $\text{pH}=7.2$ 时, $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ 和 $\text{HPO}_4^{2-}$ 2种磷共存。 $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ 和 $\text{HPO}_4^{2-}$ 最容易被沉积物中的镁盐、硅酸盐、铝硅酸盐以及氢氧化铁胶体吸附。因此,水体pH值较高时,沉积物中磷的释放以离子交换形式为主,体系中的 $\text{OH}^-$ 与铁和铝磷酸盐复合体中的磷酸盐发生交换,增加了释磷量。

### 3 结 语

1)新建人工湖表层沉积物中磷主要以无机磷形态存在,无机磷占总磷的 $91.5\%\sim 96.6\%$ ,其中,无机磷中非活性磷(闭蓄磷、钙磷、自生磷)含量远远高于铝磷和铁磷的含量。无机磷中“活性磷”占总磷的 $12.3\%\sim 14.8\%$ ,较非新建湖泊高,其含量分布为缓流区 $>$ 出湖口 $>$ 湖心区 $>$ 入湖口 $>$ 滞流区。有机磷是重要的“磷蓄积库”,含量比非新建湖泊低,其分布为出湖口 $>$ 湖心区 $>$ 滞流区 $>$ 缓流区 $>$ 入湖口。

2)环境因素对新建人工湖沉积物营养盐的影响表现出先吸附后释放的特征,即沉积物中的矿物对磷的吸附随温度的升高而减慢,而在释放阶段,随着温度的升高,沉积物中磷的释放量大幅增大;相对于中性和碱性条件,酸性条件下沉积物对上覆水中磷的吸附量较大,pH值升高将促进沉积物中磷释放;在吸附阶段,好氧条件下的吸附量大于缺氧条件下的吸附量。水体DO的升高对沉积物中磷的释放起抑制作用;有光照条件下沉积物磷的释放明显低于无光照条件,相反有光照条件下沉积物对上覆水磷的吸附较无光照快。

3)水-沉积物营养盐的变化受多种因素影响,是一个综合的动态过程,本实验仅研究了营养盐磷吸附释放最主要的影响因素,实际沉积物中营养盐的

变化过程更加复杂,在后期研究中将做进一步的分析。

#### 参考文献:

- [1] 张智, 杨冬雪, 王斌, 等. 某人工湖成库初期水环境特征研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(6): 1321-1326.  
ZHANG Zhi, YANG Dongxue, WANG Bin, et al. Study on water environment characteristics of an incipient artificial lake [J]. Chinese journal of environmental engineering, 2010, 4(6): 1321-1326.
- [2] Heisler, Glibert P M, Burkholder J M, et al. Eutrophication and harmful algal blooms: a scientific consensus[J]. Harmful algae, 2008, 8(1): 3-13.
- [3] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, et al. Ecology controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus[J]. Science, 2009, 323(5917): 1014-1015.
- [4] Schelske C L. Eutrophication: focus on phosphorus[J]. Science, 2009, 324(5928): 722-723.
- [5] Wang H J, Liang X M, Jiang P H, et al. TN: TP ratio and planktivorous fish do not affect nutrient-chlorophyll relationship in shallow lakes[J]. Freshwat Biol, 2008, 53(5): 935-944
- [6] Schindler D W, Hecky R E, Findlay D L, et al. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: results of a 37-year whole-ecosystem experiment[J]. PNAS, 2008, 105(32): 11254-11258.
- [7] Banaszkuk P, Wysocka-czubaszek A, Kamocki A K. Internal eutrophication of restored peatland stream: the role of bed sediments [J]. Ecological Engineering, 2011, 37(2): 260-268.
- [8] 朱广伟, 高光, 秦伯强, 等. 浅水湖泊沉积物中磷的地球化学特征[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 714-719.  
ZHU Guangwei, GAO Guang, QIN Boqiang, et al. Geochemical characteristics of phosphorus in sediments of a large shallow lake[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(6): 714-719.
- [9] 张润宇, 吴丰昌, 王立英, 等. 太湖北部沉积物不同形态磷提取液中有机的特征[J]. 环境科学, 2009, 30(3): 733-742.  
ZHANG Runyu, WU Fengchang, WANG Liying, et al. Characteristics of organic matter in different extractions of phosphorus forms in sediments in north part of Taihu Lake[J]. Environmental Science, 2009, 30(3): 733-742.
- [10] Lukawska-matuszewska K, Bolalek J. Spatial distribution of phosphorus forms in sediments in the Gulf of Gdansk (Southern Baltic Sea)[J]. Continental Shelf Research, 2008, 28(7): 977-990.
- [11] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版, 增补版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [12] 李悦, 乌大年, 薛永先. 沉积物中不同形态磷提取方法的改进及其环境地球化学意义[J]. 海洋环境科学, 1998, 17(1): 15-20.  
LI Yue, WU Dalian, XUE Yongxian. A development sequential extraction method for different forms of phosphorus in the sediments and its environmental geochemical significance [J]. Marine Environmental Science, 1998, 17(1): 15-20.
- [13] Ruttenberg K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments[J]. Limnology and Oceanography, 1992, 37(7): 1460-1482.
- [14] Sun Y J, Huang T L, Li X P. A review of factors affecting P release from aquatic sediments and controlling techniques, 2008[C]. 2008. 845-851.
- [15] Du Z Y, Zhou J M, Wang H Yan. Effect of nitrogen fertilizers on movement and transformation of phosphorus in an acid soil [J]. Pedosphere, 2005, 15(4): 424-431.
- [16] 朱广伟, 秦伯强, 张路. 长江中下游湖泊沉积物中磷的形态及藻类可利用量 [J]. 中国科学 D 辑, 2005, 35(Sup2): 24-32.  
ZHU Guangwei, QIN Boqiang, ZHANG Lu, et al. Fractionation of phosphorus in sediments and its amount of algae available in shallow lakes located in the middle and lower reaches of Changjiang River, China[J]. Science in China (series D), 2005, 35 (Sup2): 24-32.
- [17] 朱广伟, 秦伯强, 高光, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物中磷的形态及其与水相磷的关系[J]. 环境科学学报, 2004, 24(3): 377-381.  
ZHU Guangwei, QIN Boqiang, GAO Guang, et al. Fractionation of phosphorus in sediments and its relation with soluble phosphorus contents in shallow lakes located in the middle and lower reaches of Changjiang River, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2004, 24(3): 377-381.
- [18] Edlund G, Carman R. Distribution and diagenesis of organic and inorganic phosphorus in sediments of the Baltic proper [J]. Chemosphere, 2001, 45 (6/7): 1053-1061.
- [19] Goldhammer T, Bruchert V, Ferdelman T G, et al. Microbial sequestration of phosphorus in anoxic upwelling sediments [J]. Nature geoscience, 2010, 3(8): 557-561.