

# 湖泊底泥磷释放影响因素显著性试验分析

张智, 刘亚丽, 段秀举

(重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要:** 通过底泥正交模拟实验分析认为, 温度、溶解氧、pH 值和水动力均是影响双龙湖底泥磷释放的显著因素, 各因素水平间有显著差异; 影响因素显著性排序从大到小依次为溶解氧、温度、pH 值、水动力; 提高双龙湖水体的溶解氧水平是降低底泥磷释放的有效手段。

**关键词:** 双龙湖; 富营养化; 内源污染; 底泥; 释磷

**中图分类号:** X131.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0978(2006)02-0016-04

**Research on remarkable affecting factors of phosphorus releasing from sediment in Shuanglong Lake** ZHANG Zhi, LIU Ya-li, DUAN Xiu-ju (Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-environment Ministry of Education, Chongqing 400045, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2006, 15(2): 16-19

**Abstract:** The effects of environmental factors (temperature, dissolvable oxygen, pH and stir power) on release of phosphorus from sediment in Shuanglong Lake were analyzed by the orthogonal experiment. It is concluded that temperature, dissolvable oxygen, pH and stir power are all remarkable affecting factors in phosphorus releasing, and every level of factors has remarkable difference. The order of marked factors from large to small is dissolvable oxygen, temperature, pH, stir power. It is a effective measure to improve level of lake's dissolvable oxygen to reduce phosphorus releasing in sediment.

**Key words:** Shuanglong Lake; eutrophic; endogenesis pollutes; sediment; phosphorus releasing

输入水体的氮、磷等营养物质被生物吸收利用, 或以各种形式存在于水中, 还可沉降水底, 在湖泊底部形成“淤泥”。底泥表层积累的营养物质被微生物摄入利用参与水生态系统循环。湖泊点源、非点源得到有效控制后, 底泥污染物释放速率明显增加<sup>[1]</sup>, 湖泊仍可发生富营养化, 沉积物中营养盐成为湖泊富营养化的主导因子。磷是多数水体浮游藻类限制性营养元素, 湖泊沉积物中磷的特征、水-土界面间的行为以及沉积物释放规律研究, 对探求湖泊富营养化防治意义深远。磷释放受各种环境因子影响, 自底泥中释放的磷首先进入底泥间隙水, 这是释磷速率的决定步骤<sup>[2]</sup>。不同水体磷积累速率、积累量和形态分布存在差异, 释磷与化学沉淀形态有关, 一旦出现利于钙、铝、铁等不溶性磷酸盐沉淀物溶解的条件, 磷就释放, 释放物质逐步扩散到沉积物表面, 进而向湖泊上层水混合扩散, 成为湖泊总磷的一部分。

双龙湖位于重庆市, 属浅水型城市湖泊。湖面积 180 191.7 m<sup>2</sup>, 库容 109.92 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。2002 年对

双龙湖的水体监测结果表明其属劣 V 类水体, 水质远远超过水体富营养化的警戒线。2003 年对双龙湖进行综合治理: 设环湖污水截流管; 截流雨水净化入湖; 湖底清障、底泥疏浚; 布置深水曝气循环活水设备等。外源污染得到有效控制后, 水体内源污染上升为双龙湖富营养化防治的主要方面。研究双龙湖底泥释磷规律及影响因素, 对湖泊水质保持、污染防治至关重要。

## 1 实验方法

### 1.1 底泥磷释放正交实验因素的选择

根据前人的研究结果及磷释放过程中影响因子的作用机理及影响程度<sup>[3-5]</sup>, 确定双龙湖底泥磷释放实验的影响因素为环境因子, 分别为水体的温

收稿日期: 2005-09-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50178070)和博士点基金资助项目(20010611020)

作者简介: 张智(1960-), 男, 四川隆昌人, 博士, 教授, 从事水资源保护与利用的研究与教学。

度、pH值、溶解氧及水动力。

## 1.2 磷释放正交实验各因素水平的选定

1.2.1 温度调节 进行实验时将模拟装置放入生化恒温培养箱,选择5℃、20℃和35℃3种温度,探讨温度对释磷的影响。

1.2.2 pH值调节 模拟上层水体pH值的影响,调节起始pH值为6.0、7.5和9.0。

1.2.3 溶解氧控制 进行实验时从好氧和厌氧状态考察底泥释磷规律。好氧状态I:调解曝气装置使溶氧达平衡,DO为 $6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (地表水I、II类水质之间);好氧状态II:DO为 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (III类水质);厌氧状态:将实验装置液面以上抽成真空,DO为 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (V类水质)。

1.2.4 水动力条件 设置3组水动力条件:1组静置;另外2组自动搅拌,搅拌功率分别为0.70和 $1.54 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

## 1.3 双龙湖底泥释磷正交实验方法

将10g双龙湖底泥风干样置于1000mL锥形瓶中,每瓶加模拟湖水1000mL,实验装置蔽光密闭。模拟实验考虑影响底泥释磷的主要因素:温度、溶解氧、pH和水动力作用,采用正交实验设计法,选择 $L_9(3^4)$ 正交实验设计表,共9种实验方案(表

1),每组实验时间为20d,取样频率为每2天1次。为保证实验的合理性和数据的可靠性,每种实验方案作2次平行实验,测定结果取其均值。

表1 双龙湖底泥磷释放的模拟正交实验设计[ $L_9(3^4)$ ]  
Table 1 The orthogonal experiment of phosphorus releasing from sediment in Shuanglong Lake [ $L_9(3^4)$ ]

实验号 No.	因素及水平 Factor and level			
	温度/℃ Temperature (A)	pH (B)	溶解氧/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Dissolvable oxygen (C)	水动力/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ Stir power (D)
1	5	6.0	2.0	0
2	5	7.5	4.0	0.70
3	5	9.0	6.0	1.54
4	20	6.0	4.0	1.54
5	20	7.5	6.0	0
6	20	9.0	2.0	0.70
7	35	6.0	6.0	0.70
8	35	7.5	2.0	1.54
9	35	9.0	4.0	0

## 2 结果和讨论

### 2.1 双龙湖底泥磷释放的正交实验结果

双龙湖底泥释磷正交模拟实验中上层水磷释放的测定结果见表2。

表2 双龙湖底泥释磷正交实验的测定结果

Table 2 The releasing intensity of phosphorus from sediment in Shuanglong Lake by the orthogonal experiment

实验号 No.	释放强度/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$ Releasing intensity									
	2 d	4 d	6 d	8 d	10 d	12 d	14 d	16 d	18 d	20 d
1	3.19	6.90	9.91	11.15	11.86	12.04	11.86	12.65	11.50	11.24
2	3.89	7.96	8.94	9.73	9.91	9.65	9.38	9.20	9.12	8.85
3	4.07	7.16	8.23	8.50	8.67	7.61	7.35	6.99	6.90	6.59
4	4.25	8.14	9.56	11.24	12.92	12.92	12.65	12.65	12.57	12.61
5	2.65	3.54	4.15	4.69	2.65	0.18	-0.27	-0.53	-0.53	-0.58
6	4.96	9.20	13.36	16.99	19.73	20.71	20.44	20.00	19.91	19.65
7	4.16	6.73	9.03	9.73	10.53	11.24	11.77	11.77	11.68	11.59
8	6.73	11.50	14.96	20.18	24.42	24.16	24.07	23.89	23.72	23.49
9	4.69	7.88	11.86	14.34	17.96	20.27	20.18	19.82	19.82	19.69

### 2.2 双龙湖底泥磷释放的正交实验结果统计分析

按双龙湖底泥释磷强度数据计算统计量,列出方差分析表,见表3。

如表3所示,在各因素控制水平范围内,双龙湖底泥释磷强度随温度升高而增加,且温度超过20℃后释磷强度增幅加快;随pH值水平提高,释磷强度先降后升;随溶解氧水平增加,底泥释磷强度降低,

而且随溶解氧水平增加,底泥磷吸附强度加大;磷释放强度随水动力水平升高而增加。

### 2.3 双龙湖底泥磷释放的单因素影响分析

采用极差法分析实验数据,各因素列极差表示其对双龙湖底泥释磷强度影响主次顺序。底泥释磷正交实验统计方差分析各因素的极差如下(表4):温度 $S_{jA}^2 = 149.8$ ;pH值 $S_{jB}^2 = 35.99$ ;溶解氧

$S_{jc}^2 = 231.2$ ; 水动力  $S_{jd}^2 = 28.22$ 。因此在实验规定范围内, 4 个因素对双龙湖底泥磷释放影响显著性排

序从大到小依次为溶解氧、温度、pH 值、水动力。

表 3 双龙湖底泥磷释放正交实验结果统计和极差分析

Table 3 The statistic analysis of phosphorus releasing from sediment in Shuanglong Lake by the orthogonal experiment

实验号 No.	因素和水平 Factor and level				磷释放强度/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$ Releasing intensity of phosphorus			Ri
	温度/ $^{\circ}\text{C}$ Temperature (A)	pH (B)	溶解氧/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Dissolvable oxygen (C)	水动力/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ Stir power (D)	1	2	均值 Mean	
	1	5	6.0	2.0	0	11.00	11.48	
2	5	7.5	4.0	7.0	8.59	9.11	8.85	0.526 0
3	5	9.0	6.0	1.54	6.80	6.39	6.59	0.410 0
4	20	6.0	4.0	1.54	12.95	12.27	12.61	0.680 0
5	20	7.5	6.0	0	-0.61	-0.54	-0.58	0.078 0
6	20	9.0	2.0	0.70	19.42	19.88	19.65	0.460 0
7	35	6.0	6.0	0.70	11.33	11.86	11.59	0.530 0
8	35	7.5	2.0	1.54	23.21	23.78	23.49	0.570 0
9	35	9.0	4.0	0	20.01	19.37	19.69	0.640 0
$K_{j1}$	26.68	35.44	54.38	30.35	$K = 113.1$			
$K_{j2}$	31.68	31.77	41.15	40.09	$P = 1.422$			
$K_{j3}$	54.78	45.93	17.61	42.70	$Q = 1.868$			
$k_{j1}$	8.89	11.81	18.13	10.12				
$k_{j2}$	10.56	10.59	13.72	13.36				
$k_{j3}$	18.26	15.31	5.87	14.23				
$Q_j$	1 572	1 458	1 654	1 450				
$S_{j2}$	149.8	35.99	231.2	28.22	$ST^2 = 445.2$			

2.4 释磷计算结果方差分析及显著性检验

实验误差的估计: 同一实验号 2 次重复实验之差反映了实验误差, 将它们平均计算得到  $R = 0.486 0$ ,  $n = 2, l = 9$ , 查表得  $d(2, 9) = 1.160$ , 则  $\sigma = R/d(2, 9) = 0.486 0/1.16 = 0.419 0$ , 误差自由度  $fa = \varphi(n, l) = 8_0$ 。

检验 A、B、C、D 的显著性: 双龙湖底泥磷释放模拟实验中对温度、溶解氧、pH 值和水动力等各因素

表 4 双龙湖底泥磷模拟实验中各因素的方差分析

Table 4 The square deviation analysis of phosphorus releasing from sediment in Shuanglong Lake by the orthogonal experiment

方差来源 <sup>1)</sup> Variance sources <sup>1)</sup>	平方和 Sum of square	自由度 Freedom degree	均方和 Sum of equal square	q	显著性 Remarkable character
A	149.80	$(2 \times 3)^{1/2}$	61.15	145.90	**
B	35.99	$(2 \times 3)^{1/2}$	14.69	35.06	**
C	231.20	$(2 \times 3)^{1/2}$	94.40	225.30	**
D	28.22	$(2 \times 3)^{1/2}$	11.52	27.49	**

<sup>1)</sup> A: 温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ) Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ); B: pH 值 Value of pH; C: 溶解氧 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) Dissolvable oxygen ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ); D: 水动力 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ ) Stir power ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

取显著水平  $\alpha = 0.01, q_{0.01}(3, 8) = 5.63$ , 则  $q_A, q_B, q_C$  和  $q_D$  均大于 5.63, 表明 A、B、C 与 D 4 因素都显著。

2.5 双龙湖底泥释磷各影响因素水平显著性分析

针对双龙湖底泥磷释放的正交实验结果, 根据各因素水平及各因素的 K 值变化进行比较和分析。

2.5.1 正交实验趋势分析 由图 1 可知, 双龙湖底泥释磷强度随温度的改变而变化显著: 温度升高释磷强度增加, 且温度越高增加幅度越大。其原因为温度升高利于  $\text{Fe}^{3+}$  向  $\text{Fe}^{2+}$  转化, 促进磷释放。

随 pH 值增加, 释磷强度先降后升。由于 pH 8 ~ pH 10 时, 磷的主要形态为  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , 当以  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  为主要成分时, 利于磷释放到水中, 因而, 在 pH 值较高的环境下释磷强度增加。

水体中溶解氧水平增加, 底泥释磷强度降低, 而且随溶解氧水平增加, 底泥磷吸附强度加大。由于水体溶解氧水平高时吸附磷, 而溶解氧水平低时处于还原状态,  $\text{Fe}^{3+}$  被还原成  $\text{Fe}^{2+}$  进入间隙水, 向上层水扩散导致磷释放至水体中。

磷释放强度随水动力水平升高而增加,这是由于搅动加速底泥间隙水中磷扩散的缘故。

2.5.2 对各因素的多重比较<sup>[6]</sup> 双龙湖底泥磷释放正交实验  $Se = \sigma^2 = 0.2362$ ,  $fe = 8$ ,  $m = 3$ ,  $r = 6$ ,  $q_{0.01}(3,8) = 5.63$ 。计算出:  $d_T = q_{0.01}(3,8)(Se/r)^{1/2} = 1.117$ 。

对于因素 A(温度):水平 1 和水平 2 之间的  $k$  之差为:  $|k_{A1} - k_{A2}| = 5.001 > d_T$ ;水平 1 和水平 3 之间的  $k$  之差为:  $|k_{A1} - k_{A3}| = 28.10 > d_T$ ;水平 2 和水平 3 之间的  $k$  之差为:  $|k_{A2} - k_{A3}| = 23.10 > d_T$ ,因此,因素 A 的各水平间都有显著差异。

同样,对因素 B(pH 值)、C(溶解氧)、D(水动力),各水平间  $k$  之差为:  $|k_{B1} - k_{B2}|$ 、 $|k_{B1} - k_{B3}|$ 、 $|k_{B2} - k_{B3}|$  均大于  $d_T$ ;  $|k_{C1} - k_{C2}|$ 、 $|k_{C1} - k_{C3}|$ 、 $|k_{C2} - k_{C3}|$  均大于  $d_T$ ;  $|k_{D1} - k_{D2}|$ 、 $|k_{D1} - k_{D3}|$ 、 $|k_{D2} - k_{D3}|$  均大于  $d_T$ 。

可见,底泥释磷正交实验中各因素水平间有显著差异。

综上所述,影响双龙湖底泥磷释放的显著因素是温度、pH 值、溶解氧和水动力,可以通过调节影响因素来抑制底泥磷释放。由于实际运用过程中很难控制湖体的温度和 pH 值,因此提高双龙湖水体的溶解氧水平是降低底泥磷释放行之有效的手段。在双龙湖区布置喷泉和深层曝气装置以增加水体的溶解氧和水循环,选择适宜的曝气强度、控制水体的溶氧水平是双龙湖治理内源污染的关键之一。

### 3 结 论

在实验室条件下,通过双龙湖底泥磷释放模拟

正交实验测定分析,得出以下结论:

1) 在模拟实验规定范围内,温度、pH 值、溶解氧和水动力等因素对双龙湖底泥释磷影响显著。

2) 底泥释磷强度随温度升高而增加;随 pH 增加而降低;随溶解氧增加而降低;随水动力增强而升高。

3) 底泥释磷影响因素显著性排序从大到小依次为溶解氧、温度、pH 值、水动力。

4) 通过正交实验趋势分析和水平间的多重比较可以看出,各因素水平间有显著差异。

5) 提高双龙湖水体的溶解氧水平是降低底泥磷释放的有效手段。针对湖区可安装深层曝气装置,确定适宜的曝气强度,以控制水体的溶解氧水平,治理湖泊内源污染。

#### 参考文献:

- [1] 金相灿,尚榆民,徐南妮,等.湖泊富营养化控制与管理技术(第1版)[M].北京:化学工业出版社,2001.87-89.
- [2] Baudo R. Sediments: Chemistry and Toxicity of In-place Pollutants [M]. Michigan: Lewis Publishers, 1990. 131-144.
- [3] 彭近新,陈慧君.水质富营养化与防治(第1版)[M].北京:中国环境科学出版社,1988.97-115.
- [4] Paul C M B, Istvanovics V, Cockrum D M. The influence of pH on phosphate release from lake sediments[J]. Wat Res, 1991, 25(3): 309-311.
- [5] Frankowski L, Bolalek J, Szostek A. Phosphorus in bottom sediments of Pomeranian Bay (Southern Baltic-Poland) [J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2002, 54(6): 1027-1038.
- [6] 王足献.正交试验在混凝土中的应用[M].北京:中国建筑工业出版社,1982.110-169.