

71-77

底泥释磷及其对杭州西湖富营养化的影响

韩伟明

P343.3

(杭州市环境保护科学研究所, 杭州 310007)

摘要 杭州西湖是一个小型浅水湖泊, 底泥由上部藻骸腐泥和下部泥炭层构成, 其显著特点是有机碳含量特别高, 氮含量也相当高, 而磷的富集程度相对较低。

通过实验室和现场模拟研究, 考察了 pH 值、温度、溶解氧、氧化还原电位及上覆水种类等环境因素对底泥释磷量和释磷速率的影响。上覆水 pH 值在 6.5—7.0 范围内底泥释磷量最低; 在较高或较低 pH 值时, 释磷量倍增。升高水温或降低上覆水溶解氧浓度均能加速释磷。实验室模拟西湖底泥最大释磷量为 $0.368 \mu\text{g P/g}$ 。夏季现场模拟平均释磷速率为 $1.02 \text{mg P/m}^2 \cdot \text{d}$; 由此估算底泥释磷量达 1.346t P/a , 相当于年平均外部入湖磷负荷的 36.4%。底泥释磷对西湖富营养化起着不容忽视的影响。

关键词 底泥, 释磷, 富营养化, 西湖

碳, 氮

驰名中外的杭州西湖, 因库容量小、自然补给水源不足, 加上流域内经济迅速发展而环境保护未能协调发展, 致使氮、磷等营养物大量积蓄, 至 70 年代已重度富营养化, 严重影响其游览观瞻的利用价值。

为恢复和保护西湖原有良好的生态环境, 70 年代末以来, 杭州市有关部门采取搬迁、截污、疏浚、引水和绿化等措施全面综合整治西湖。这对改善西湖水质、减缓富营养化有一定的效用, 但未见明显的改善。西湖目前仍属富营养化湖泊。

本文采用实验室和现场模拟两种方法对底泥释磷进行较系统的研究, 考察了 pH、DO、温度和上覆水种类等环境因素对底泥释磷的影响, 获得了底泥释磷速率和释磷量, 定量估算了底泥释磷对西湖富营养化过程的影响程度, 并结合有关资料^[1]探讨了对策。

一、西湖底泥的营养状况

根据对西湖 20 个监测点的底泥柱状样和表层样的系统调查^[1], 湖底沉积物自下而上分为四层: 基底粉砂层、泥炭层、下腐泥层和上腐泥层。基底上部湖沼层的平均厚度为 0.86m, 总体积达 $4.85 \times 10^6 \text{m}^3$ 。泥炭层由沼泽化沉积所致, 腐泥层系藻骸沉积物。各层的营养状况见表 1。

国家“七五”攻关项目的子课题(60-02-01-7-2)。

本文于 1991 年 9 月 23 日收到, 1991 年 12 月 9 日改回。

由表 1 可见,基底粉砂层的营养物含量明显低于上覆各层,故对西湖富营养化产生影响的主要是基底上部的湖沼相沉积层。与国内部分湖泊相比,西湖底泥的有机碳含量特别高,如泥炭层已属重污染水平;氮含量亦较高,属中等污染;而磷含量相对较低,属轻污染。泥炭层有机碳含量特高并不完全由现代人类活动所致,但氮、磷含量自下而上大致呈增加趋势,这与人类活动有较大的关系。

表 1 西湖和其他湖泊底泥营养物平均含量的比较
Tab.1 Average nutrient content of sediments in West lake and other lakes

湖名、层位	层厚 (m)	TOC (%)	TN (%)	TP (%)	C/N	N/P
西湖上腐泥层	0.27	12.24	0.92	0.073	13.86	13.36
西下腐泥层	0.31	10.00	0.84	0.075	15.53	11.24
泥炭层	0.28	27.87	1.18	0.054	19.04	12.72
基底粉砂层	0.40	3.03	0.13	0.029	10—15	5
平均(不含基底)	0.86	16.70	0.77	0.067		
武汉东湖		5.78	0.16—0.33	0.065—0.070		
太湖		1.37	0.075	0.127		
巢湖		1.11	0.056	0.058		

二、底泥释磷

1989年采用实验室和现场模拟两种方法,较系统地研究了底泥释磷,结果如下:

(一)材料和方法

1. 实验室模拟

(1)底泥 用采泥器分别采集湖心和涌金门(离岸约 50m)两处的表层底泥,静置过夜,沥去水分后用塑料袋密封,置于 5℃左右冰箱内待用,其理化性质见表 2。

表 2 试验用底泥的特性
Tab.2 Some characteristics of sediments in simulated tests

项 目	采 样 点	
	湖 心	涌 金 门
pH	7.14	7.09
干固体物(%)	18.95	18.18
TOC(%)	16.44	9.84
TN(%)	1.30	0.72
TP(%)	0.085	0.062
Fe(%)	0.028	0.028
C/N	12.65	13.67
N/P	15.29	11.61

(2)上覆水 取含磷较低的三潭内湖水,经 0.45 μ m 微孔滤膜过滤后作试验用上覆水;另取闸口钱塘江水进行上覆水种类的影响试验。表 3 列出上覆水化学组成,湖心水样数据仅

供比较。

表 3 上覆水的化学组成

Tab. 3 Chemical composition of overlying water in simulated tests 单位:mg/L

项 目	三潭内湖	湖 心	闸 口
K ⁺	1.68	1.59	1.45
Na ⁺	7.00	6.34	3.73
Ca ²⁺	25.30	16.30	13.60
Mg ²⁺	2.60	2.55	2.18
Fe ²⁺	<0.01	<0.01	0.07
Cl ⁻	9.81	8.28	3.61
SO ₄ ²⁻	18.91	19.29	10.21
NO ₃	<0.30	0.52	5.37
TDP	0.0065	0.0091	0.0109
TP	0.066	0.139	0.061
TN	1.23	1.95	1.62

(3) 释磷量试验 在烧杯中加入 50g 底泥和 1.5L 试验用水, 20℃ 恒温下连续搅拌, 使泥水全部混匀成泥浆, 每隔 1h 或 2h 取一均匀泥浆样, 立即离心分离, 测定上清液中总可溶性磷(TDP)。由此可得 TDP-时间曲线并据此获知达最大 TDP 浓度所需的时间(称“平衡时间”), 并按下式计算最大释磷量:

$$W = \frac{(C - C_0)V}{G}$$

式中, C_0 和 C 分别是起始和达“平衡时间”时的 TDP 浓度($\mu\text{g/L}$); V 试验用水体积(L); G 底泥干重(g)。

(4) 影响因素试验 取三角烧瓶若干只, 分别加入 5g 底泥和适量水, 而后在预定的影响因素(pH、DO、温度及上覆水种类)条件下连续振荡至“平衡时间”, 立即将内含物离心分离, 测定上清液中 TDP 浓度。

(5) 释磷速率试验 在内径 85mm 带电动搅拌的玻璃筒内, 加入适量的底泥和试验用水, 使泥层和水层深度分别约为 250 和 150mm, 稍加搅拌后静置过夜, 次日取上覆水作为起始样品。试验在好氧、遮光及预定的 pH、温度条件下进行, 控制搅拌速度以消除上覆水中磷酸盐的浓度梯度但不至于扰动底泥。每隔 1 或 2 日测上覆水的 TDP 浓度, 同时补充原先的试验用水。按《湖泊富营养化调查规范》计算释磷速率。

2. 现场模拟

现场试验点设在涌金门附近离岸 50m 左右的湖内, 该处水深约 1.5m, 底泥理化状况见表 2。现场垂直设置试验筒三个: 一个是内径 0.42m 的无底透光筒, 模拟湖内泥水间的磷交换; 另一个是内径 0.30m 的无底遮光筒, 模拟抑制藻类生长时的泥水间磷交换; 还有一个是内径 0.24m 的有底透光桶, 模拟无底泥时藻类生息。试验前注入三潭内湖水, 次日起逐日测定上覆水及筒外湖水的 TP、TDP、TN、pH、DO、Chl-a 及温度等指标。

(二) 结果与讨论

1. 释磷量及影响因素

(1) 释磷量 在 20℃、pH8.0 左右连续进行了 24h 释磷量试验, 发现 4h 时, 水中 TDP 达最大值(5.40μg/L), 折算西湖底泥最大释磷量为 0.368μg/g。同时确定“平衡时间”为 4h。

(2) pH 在 20℃、pH3.0—9.8 范围内测定了 9 种不同 pH 条件下的释磷量, 发现 pH 对底泥释磷有重要影响。pH6.5 左右释磷量最小; 升高或降低 pH 值时释磷量倍增。TDP 释放量(y) 与 pH(x) 呈抛物线相关(图 1), 回归方程为 $y = 24.513 - 7.572x + 0.586x^2$ 。

pH6.5 左右, 水中正磷酸盐主要以 HPO_4^{2-} 和 H_2PO_4^- 的形态存在, 最易被底泥吸附, 故此时释磷量最小。降低 pH, 释磷以溶解作用为主, 随着氢离子浓度增大(pH 降低), 释磷量增大; 而升高 pH, 释磷以离子交换为主, 体系中 OH^- 与铁、铝磷酸盐复合体中磷酸盐发生交换, 亦使释磷量增大^[2]。西湖水年平均 pH 在 8.5—9.5 范围内波动, 呈微碱性, 夏季常维持在 pH9 以上, 这样的 pH 条件有助于底泥释磷。

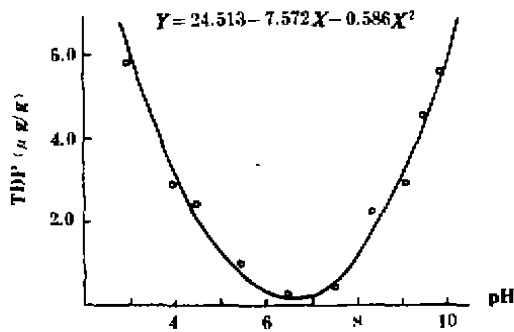


图 1 pH 对释磷量的影响(20℃时)

Fig. 1 Influence of pH on phosphorus release (20℃)

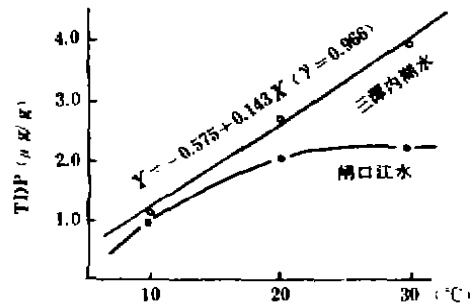


图 2 温度对释磷量的影响

Fig. 2 Influence of temperature on phosphorus release

(3) 温度和上覆水 在 10℃、20℃和 30℃条件下, 分别以三潭内湖水和闸口水进行释磷量试验。温度升高, 释磷量明显增大(图 2)。三潭内湖水释磷量与温度呈正相关: $y = -0.575 + 0.143x$ ($r = 0.966$)。升高温度能增加底泥中生物活动, 促进生物扰动、矿化作用和厌氧转化, 导致间隙水耗氧, 使底泥表面呈还原状态, 利于 $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$, 加速释磷^[3]。还发现 10℃时上述两种水中释磷量相仿, 升高温度时, 三潭内湖水中释磷量明显大于闸口水。

(4) DO—氧化还原电位(Eh) 在 30℃、pH8.0 左右分别考察 DO 为 0 和 6.52mg/L 时的释磷量, 发现厌氧释磷量达 1.82μg/g, 为好氧时的一倍左右。一般认为底泥释磷与铁磷关系密切, 当表层底泥 Eh 较高时, 利于 $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ 反应, 使 Fe^{3+} 与磷酸盐结合成难溶的磷酸盐; 而当 Eh 较低(小于 200mV)时, 有助于 $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ 反应, 使铁和被吸附的磷酸盐转变成溶解态而释出^[3]。西湖底泥—水界面的 Eh 在 67—141mV 之间, 呈弱酸性还原状态。因此, 尽管西湖水中溶解氧充沛, 但泥—水界面的还原状态有助于底泥释磷。

(5) 释磷与释铁 试验还发现上覆水 TP 浓度与铁浓度呈正线性相关: $y = 0.076 +$

0.095x ($r_s = 0.986$)。这亦证实底泥中可释放的磷与铁磷密切相关。

2. 底泥释磷速率

在 10、20 和 30℃ 三种温度下分别进行 18 天释磷速率试验, 温度越高, 释磷速率越高, 两者呈正线性相关: $y = -0.0177 + 0.00735x$ ($r = 0.998$)。10℃ 平均释磷速率为 0.053mg/m²·d, 30℃ 时增至 0.20mg/m²·d。

同时, 在 20℃、pH9.0 左右测定了闸口江水作上覆水的平均释磷速率为 0.086mg/m²·d, 略低于三潭内湖水(0.135mg/m²·d)。

3. 现场模拟试验

现场试验于 1989 年夏季(6 月 7 日至 7 月 4 日)进行, 历时 25 天。透光筒试验尽可能模拟西湖实际环境, 上覆水 TP、TDP 浓度变化是底泥释磷、藻类摄磷、颗粒物矿化、吸附、沉降及扩散等过程的综合影响的结果, 所获的释磷速率其实是上覆水 TDP 的增长速度。遮光筒模拟抑制藻类生长条件下底泥释磷, 试验 7 天后上覆水中 DO、pH 急剧下降, 呈厌氧、中性状态, 底泥释放的大部分积蓄在上覆水中, 至第 17 天, 上覆水 TDP 浓度达 0.065mg/L。上覆水 TP 和 TDP 浓度变化见图 3, 底泥释磷速度列入表 4。夏季现场模拟西湖底泥平均释磷速度为 1.02mg/m²·d。

参照实验室试验获得的释磷速率与温度的相关关系, 由夏季现场试验值推算出春、秋和冬季的释磷速率。由此推算, 西湖底泥全年向湖水释放 TDP 达 1.346t。

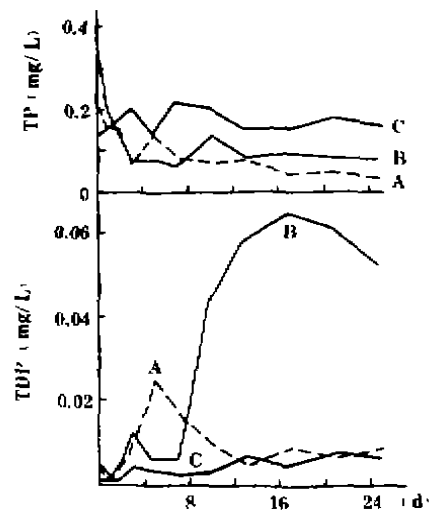


图 3 现场模拟试验测定 TP 和 TDP 变化

A. 透光筒, B. 遮光筒, C. 筒外湖水
Fig. 3 On-the-spot simulated test of TP and TDP variation

表 4 现场试验底泥释磷速率

Tab. 4 Phosphorus release rate from sediments of on-the-spot tests

试 验 条 件				释磷速率(mg/m ² ·d)	
光 照	pH	水 温(℃)	DO(mg/L)	最大值	平均值
透 光	7.1—8.6	25.2—29.2	4.2—13.8	4.70	1.02

三、底泥释磷的污染影响及其对策

据最新研究成果^[1], 由湖面降水、入湖径流、引水及未截污水等外部负荷年输入西湖的磷总量达 3.70t; 而按底泥释磷研究估算, 西湖底泥年释磷量为 1.346t, 相当于外部输入磷负荷的 36.4%。因此, 西湖底泥释磷是威胁西湖水体的一个重要污染源, 对西湖富营养化产生不可忽视的影响。

为消除底泥释磷的污染影响, 结合西湖的实际情况, 建议采取下述对策:

1. 疏浚底泥 目前, 每年疏浚 3—6×10⁴m³ 底泥, 但对改善西湖水质效果不明显。建议

清除 0.86m 厚的湖泊沉积层,并注意以下三点:一是要重点疏浚西湖南区及近岸湖区等重污染地带;二是研究开发适宜于半流动态腐泥的疏浚技术和设备,力求将营养盐丰富的腐泥清除干净;三是妥善解决底泥的出路,防止二次污染。

2. 合理养殖水生物 在不影响西湖景观的前提下,种植能吸收水中氮、磷等营养盐的水生植物,如水葫芦、荷花等,但要妥善管理、及时收集残枝。同时在不投放饵料的前提下,适量放养吞食藻类的鱼类,以降低水体营养水平。

3. 充分发挥引水效能 根据西湖水情,应尽可能增加引水量,加速湖水更新,降低水中营养盐及藻类含量。进一步研究引水流向,使湖面水流均匀,提高引水效果。

为制止西湖富营养化进程,除了上述消除底泥释磷的污染影响治理措施外,还必须进一步发挥截污工程的效能,加强湖区旅游业及流域内经济活动的管理,有效地控制外部营养源的输入。鉴于底泥释磷研究的试验条件与西湖的实际环境情况尚有较大的差异;而湖泊富营养化机理十分复杂,至今对西湖水生态中的不少关键环节和影响因子还不甚清楚。因此,西湖的进一步治理对策,有待今后深入研究。

致谢 张国勋同志参加底泥释磷研究,中国环境科学研究院金相灿副研究员和本所吴静波高级工程师给予指导和帮助,本所仪器室和西湖课题组同志协助部分分析工作,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 金相灿等. 中国湖泊富营养化. 北京, 中国环境科学出版社, 1990, 442—472.
- [2] A. Povini, G. Premazzi. 内负荷的作用. 环境科学与技术, 1987, (12), 56—68.
- [3] 熊念志. 关于沉积物释磷问题的研究. 海洋湖沼通报, 1989, (2), 80—84.

PHOSPHORUS RELEASE FROM THE SEDIMENTS OF WEST LAKE IN HANGZHOU AND ITS EFFECTS ON LAKE EUTROPHICATION

Han Weiming

(Hangzhou Institute of Environmental Protection Science, Hangzhou 310007)

Abstract

West Lake in Hangzhou is a small shallow lake. Its surficial sedimentary stratum is composed of algae faulschlamm layer and peat layer, and is mainly characterized by high organic carbon content and extreme high nitrogen content, but by relatively low degree of phosphorus enrichment.

A simulation study in laboratory and on the spot was conducted to determine the effects of various environmental parameters on the phosphorus release rate and the capacity from the sediments of West Lake in Hangzhou. Factors investigated in laboratory included pH, temperature, dissolved oxygen, redox potential and overlying water type. The lowest release capacity was found when the pH was at the range of 6.5—7.0 for the overlying water. Raising the temperature or lowering oxygen concentrations in the overlying water may also accelerate phosphorus release. The highest release capacity was found to be about 0.368 $\mu\text{g P/g}$ in laboratory. The average release rate measured on the spot in summer was 1.02 $\text{mg P/m}^2 \cdot \text{d}$. The calculated release capacity from the sediments of West Lake was 1.346 tP/a , equivalent to 36.4% of the average annual external phosphorus loading. The internal loading is a major contributory factor in the continuing eutrophic states of the lake.

Key words Sediments, phosphorus release experiment, eutrophication, West Lake