

# 湖水-沉积物界面内源物质交换动态复水模拟研究

薛联青<sup>1,2</sup>, 吕锡武<sup>1</sup>, 吴磊<sup>1</sup>

(1. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 河海大学水资源环境学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 分布式采集了玄武湖底长期暴露的底泥, 分析了底泥营养物的分层分布及其理化特性对湖泊水质的影响强度。通过动态换水试验, 研究了复水过程中暴露底泥营养盐的释放过程和上覆水总磷、总氮浓度变化对水-土界面物质交换的作用关系以及对水体富营养化程度的影响机制。实验及模拟表明: 由于湖泥表层长期暴露, 有机及结合态营养盐降解为无机态营养盐, 即使复水过程中使用清水, 但由于干涸湖床沉积物总磷 T-P、总氮 T-N 的垂直分布, 也将严重导致内源营养盐释放总量持续增加, 在相对长时间内, 上覆水总磷浓度仍维持在较高(0.1 mg/L)水平。研究成果为实施生态修复, 治理复水后湖体富营养化提供了理论和实验依据。

**关键词:** 湖泊; 水土界面; 营养盐释放; 磷释放模拟; 内源物质交换; 动态模拟

**中图分类号:** X524      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2004)02-0189-04

玄武湖位于南京主城区内, 水域面积约 3.7 km<sup>2</sup>, 平均水深 1.14 m, 其水面分北湖、东南湖、西南湖三部分, 彼此通过桥、涵连接, 其中北湖约 1.3 km<sup>2</sup>。玄武湖隧道工程采用将北湖湖水抽干然后在湖底开槽的施工措施, 即采用“干湖开挖”的施工方案。由于工程庞大, 施工周期长, 干湖时间长达 1 年, 湖泥表层经长期暴露、曝晒后, 有机及结合态的营养盐类会降解为无机态的营养盐。湖区复水初期, 大量的内源无机态营养盐会快速释放进入水体, 导致湖水中营养盐浓度升高, 加剧其富营养化。为了了解复水后底泥中营养盐分布和释放情况, 拟采集长期暴露的湖床底泥, 分析其厚度、分布和理化特性对湖泊水质的影响程度, 并做复水试验, 研究水-土界面物质交换程度, 本项研究主要为实施生态修复及治理复水后湖体的富营养化提供一定技术支持。

## 1 研究对象与试验方法

### 1.1 样品采集

根据沉积物水平和垂向分布特点, 分别选取北湖 5 个采样点(湖心区 A、E 点; 湖周区 B、C、D 点)不同深度的底泥作为试验对象。各点均分 4 个层面取样(0~5 cm、5~10 cm、30~40 cm、50~60 cm), 采样时北湖已干涸近 1 年。泥样中总磷 T-P 含量采用高氯酸-硫酸酸溶-钼锑抗比色法测定, 无机磷采用 NaHCO<sub>3</sub> 浸提-钼锑抗比色法, 总氮 T-N 采用过硫酸钾氧化-钼蓝比色法测定<sup>[1,2]</sup>。

### 1.2 模拟动态复水试验

玄武湖隧道建成后, 将用大桥水厂自来水向湖内复水, 湖充满后仍持续“引水冲污”工程, 不断向湖内引入自来水, 同时溢出湖水对玄武湖换水, 实际复水采用相对动态, 湖水更换周期为 10 d。因此依据实际工况, 模拟“引水冲污”做复水试验, 上覆水 T-P 浓度采用钼酸铵分光光度法测定, T-N 浓度采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定<sup>[3,4]</sup>。复水装置分两组, I 组将不同采样点采集的不同深度的泥样(从上至下依次分层为 5、5、10、10 cm), 用 Φ80 mm × 600 mm 有机玻璃管的柱状容器按照次序装填成泥柱<sup>[5]</sup>, 上覆自来水 30 cm, 每天向柱内注水, 注入上覆水总水量的 1/10, 同时溢流出 1/10; II 组仅取不同点的表层底泥(0~5 cm)同样选用 Φ150 mm × 350 mm 柱状容器充填, 上覆水 30 cm 试验。

收稿日期: 2003-06-17; 修订日期: 2003-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50239030); 河海大学科技创新基金资助项目(2003411143)

作者简介: 薛联青(1973-), 女, 新疆石河子人, 博士, 主要从事水资源环境保护方面的研究。E-mail: xuelianqing@163.net

## 2 结果与讨论

### 2.1 泥样理化特性、主要分布特征

上层底泥成灰色至灰褐色(0~10 cm),泥质疏松均匀,中层及下层(30~60 cm)底泥由深褐色过渡到黑色,底泥中含有少量的植物根茎残体。位于湖心区的 A、E 点各层 T-P、T-N 平均含量较低,是湖周区 B、C、D 点底泥各层 T-P、T-N 平均含量的 1/2~1/5, E 点最低底泥各层 T-P 平均含量仅 254 mg/kg,最高的 D 点达 1387 mg/kg; E 点表层 T-P 也仅 341 mg/kg,是表层 T-P 含量最高的 B 点 2810 mg/kg 的 1/8。主要是由于外源负荷进入湖体后在湖外围富集程度很高,从而使外围 T-P、T-N 含量显著高于湖心区。北湖各采样点不同深度底泥的平均有机质含量为 4.50%,对比分析底泥曝晒后各点平均的有机质含量变化如表 1 所示。

表 1 底泥曝晒前后有机质含量变化

有机质含量变化	底泥各点有机质平均含量/%	曝晒后有机质平均减少百分数/%
1999年3月	9.23	51.0
2000年3月	8.01	43.8
2001年3月	11.0	59.1
2002年3月	9.98	54.9

底泥曝晒后,有机质含量与前几年检测结果相比减小 43.8%~59.1%,底泥曝晒后有机质部分无机化,使底泥中的无机营养盐类物质增多,湖体复水必然引起无机盐迅速释放而造成湖水水质恶化。根据采样点测定曝晒后底泥(文中仅列出代表点 B、E)T-P、T-N 分层分布特征如图 1、图 2 所示。

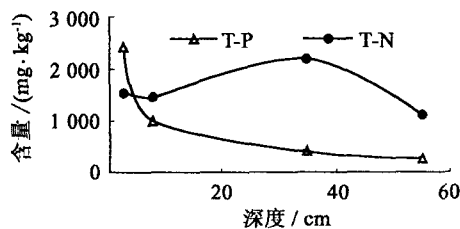


图 1 B 点 T-N、T-P 分级分布

Fig.1 Distribution of T-N and T-P in site B

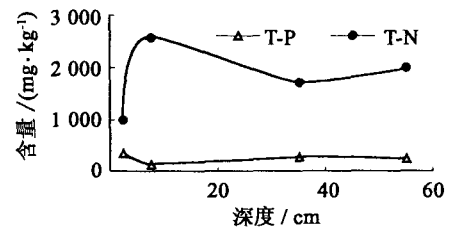


图 2 E 点 T-N、T-P 分级分布

Fig.2 Distribution of T-N and T-P in site E

测定结果表明各采样点底泥 T-P 含量随着深度的增加最终呈降低趋势。0~5 cm 层 B 点含量最高,为 2810 mg/kg,50~60 cm 层为 391 mg/kg,是 0~5 cm 层的 1/7。E 点各层 T-P 含量都较低。无机磷随深度的增加而减小,各层底泥无机磷平均含量在 100~177 mg/kg 之间;T-N 含量的垂直分布规律不明显,且各层 T-N 含量变化在 1500~1825 mg/kg 之间变动,无机氮含量随深度增加而稍有增大。

### 2.2 底泥磷释放

底泥动态复水,从 2002 年 9 月至 11 月跟踪监测,其间试验室室温从每天 24~27℃降至 16~17℃,底泥 T-P、磷酸盐释放过程见图 3、图 4(以 B、E 点为例),由释放试验分析(以变化明显点 4 日为依据),泥柱组释放入水中 T-P 在开始时较大,之后逐渐减小。在第 4 天 E 点的释放量最大,上覆水 T-P 浓度达 0.69 mg/L,然而 E 点底泥 T-P、无机磷的含量都不是最大,这与 E 点底泥泥质疏松、均匀多砂质性状有关。A 点较为特殊,上覆水 T-P 浓度在第 8 天达最大 0.59 mg/L,之后迅速减小。50 d 之后各点上覆水 T-P 浓度基本都在 0.1 mg/L 以上(超富营养化)。泥柱组释放入水中磷酸盐随时间较稳定地减小,从 0.2 mg/L 左右降至 0.1 mg/L 以下。

分析泥柱组底泥释磷量逐渐减小的原因<sup>[1,6]</sup>:其一与温度逐渐降低有关,表层底泥组释放入水中 T-P 规律明显,即先增大后减小。表层底泥组各点 T-P 释放,即上覆水中 T-P 浓度先增后减,在第 35 天达到最大,以后逐渐减小。这是因为表层底泥每天换水量较大,对底泥内部产生大的扰动,促进了物质界面交换,积累效应使 T-P、磷酸盐浓度增大,逐渐达到平衡,扰动影响逐渐减小,所以上覆水中 T-P、磷酸盐浓度有大幅度减小。同时表层组上覆水 T-P、磷酸盐浓度在中、后阶段大于泥柱组 T-P、磷酸盐浓度也表明只有底泥表层对复水时

磷释放产生较大影响。除此之外，pH 值、微生物等对无机盐的释放也都有不同程度的影响。

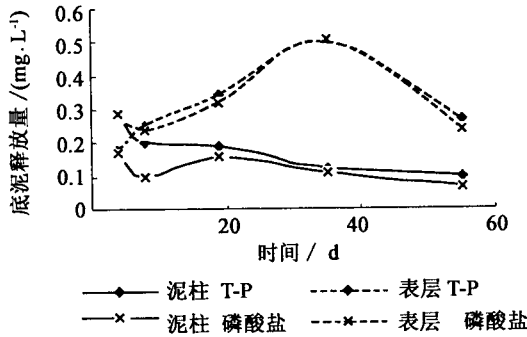


图 3 B 点底泥磷释放曲线

Fig.3 Phosphorous release curve of sediment in site B

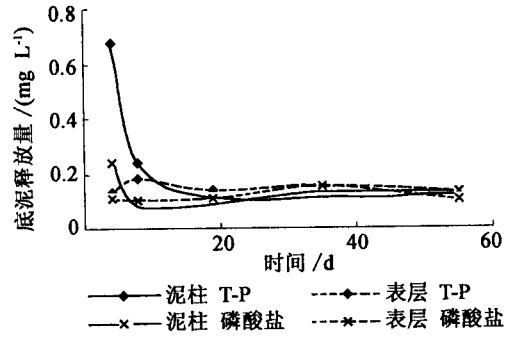


图 4 E 点底泥磷释放曲线

Fig.4 Phosphorous release curve of sediment in site E

### 2.3 底泥氮释放

由释放实验分别得到泥柱组释放入水中 T-N、氨氮具有相同的变化规律，如图 5、图 6 所示。在第 8~30 d 期间达最大，经过 8~20 d 积累达到最大，之后逐渐减小，释氮速率比释磷较慢。复水后第 4 天 A、B、C 点上覆水 T-N、氨氮浓度都在 1.0~2.0 mg/L，以后增至 2.0~3.0 mg/L，50 d 后基本都降至 0.5 mg/L。D 点上覆水 T-N、氨氮浓度较高。E 点释氮规律与释磷规律基本相同，50 d 后上覆水 T-N 浓度在 1.0 mg/L 左右，相当于 A、B、C 点的初始值。表层底泥组释氮量有时高于底泥组，但释氮比释磷过程受扰动影响小得多。

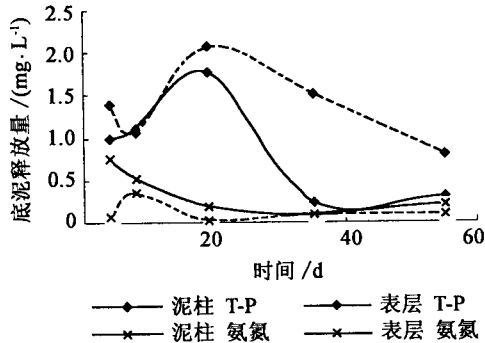


图 5 B 点底泥氮释放曲线

Fig.5 Nitrogen release curve of sediment in site B

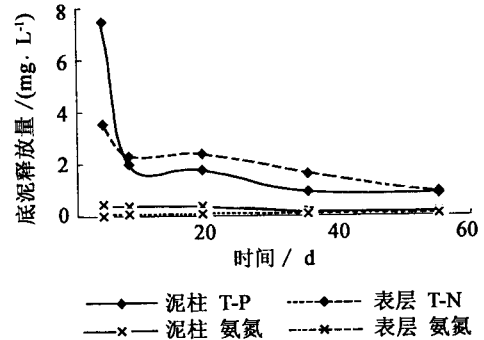


图 6 E 点底泥氮释放曲线

Fig.6 Nitrogen release curve of sediment in site E

## 3 源模型建立及分析

本文依据工程复水要求，采用现场测定和室内模拟相结合方法，取分布均匀的北湖监测点的平均值(假定湖水混合均匀)作为分析和建模依据，根据上文动态复水试验建立模型：

$$C_{t+1} = (0.9VC_t + q_{t+1})/V \tag{1}$$

式中  $C_{t+1}$  为  $t+1$  时刻上覆水营养盐(T-P、T-N)浓度，mg/L； $q_{t+1}$  为  $t$  到  $t+1$  时段底泥营养盐的释放总量，mg； $V$  为监测样柱上覆水体积，L。由上式差分计算可得动态复水试验后底泥中总磷和总氮的日释放量和累积释放量。为进一步说明动态换水试验中底泥中 T-P、T-N 累积释放总量对水体水质贡献程度，模拟并建立了底泥随时间的累积释放量关系如下式所示，模型模拟精度较高，方差分别为 0.81 及 0.85。

$$\text{总磷释放关系: } y = 0.234 \ln(x) + 0.365 \quad \text{总氮释放关系: } y = 2.243 \ln(x) + 2.987$$

式中  $x$  为时间变量，d； $y$  为 T-P、T-N 累积释放量，mg。

根据模型模拟结果得出：尽管每次使用清水冲污，但底泥中 T-P、T-N 累计释放量与时间基本成对数关系。底泥中营养盐的垂直分布决定了较长时期内即使无外源排放但由于底泥作用同样产生上覆水 T-P、T-N 累计量增加。在初期复水过程中，主要受底泥表层影响，营养盐浓度增大较快，后期速度减缓并趋于稳定。

## 4 结 论

(1) 监测结果表明北湖湖周 T-P、T-N 含量显著高于湖心区，北湖底泥 T-N 含量垂直分布规律性不十分明确。T-P 含量随着深度的增加而显著降低，其垂直分布规律为提出底泥疏浚方案提供了科学依据。若将底泥挖出 40 cm，可除去 60 cm 深底泥 T-P 的 90% 左右。

(2) 分析表明即使采取“引水冲污”动态换水，上覆水营养物含量仍很高。复水开始前 8 d 湖周上覆水 T-P 浓度为 0.5 ~ 0.6 mg/L，湖心区在 0.2 mg/L 左右。50 d 后上覆水 T-P 浓度在 0.1 mg/L 以上，属超富营养化。

(3) 底泥向湖水释磷、释氮受表层底泥扰动影响较大。因此换水尽量减少对底泥扰动。复水时期，可实施生态工程措施，如栽种挺水植物及沉水植物等直接从底泥中吸收、转移营养物质，降低湖水的富营养化程度。

### 参考文献：

- [1] 汪家权, 孙亚敏, 钱家忠, 等. 巢湖底泥磷的释放模拟实验研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(6):738 - 742.
- [2] 范成新. 高湖沉积物理化特征及磷释放模拟[J]. 湖泊科学, 1995, 7(4):341 - 349.
- [3] 黄文钰, 舒金华, 吴廷根, 等. 高湖磷迁移模型研究[J]. 环境科学学报, 1998, 18(1):34 - 36.
- [4] 金相灿. 中国湖泊富营养化[M]. 北京:环境科学出版社, 1991.36 - 46.
- [5] Lerman A. Migrational processes and chemical reactions in interstitial waters[C]. New York:Wiley-Interscience, 1997.700 - 715.
- [6] 范成新, 秦伯强, 孙越, 等. 梅梁湖和五里湖水-沉积物界面的物质交换[J]. 湖泊科学, 1998, 10(1):72 - 75.

## Dynamic simulation study on inner source nutrient exchange between water-sediment interfaces in the Xuanwu Lake\*

XUE Lian-qing<sup>1,2</sup>, LU Xi-wu<sup>1</sup>, WU Lei<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

(2. College of Water Resources and Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The distributed sediment samples in the Xuanwu Lake were collected to analyze the influence on the water quality of nutrient layer distribution condition in sediments and its physical and chemical characteristics. Through the dynamic water exchange experiments, we estimate and model quantitatively the releasing process of nutrient from the sediments, the influence mechanism of consequent concentration variation of T-P and T-N in above water to the interfacial material exchange correlation of the Xuanwu Lake eutrophication. The research results show that even if the pure water is used to exchange the polluted water in the lake, after a long time exposure of surface layer sediment, a great deal of organic and integrated nutrients would degrade into inorganic nutrient. In the early exchanging of lake water the released T-P and T-N increase continually acting as the service to inter pollution sources. This is mainly owing to the vertical distribution of T-P and T-N in the bed sediment collected during the dry period of the Xuanwu Lake. In the long run, the concentration of T-P in the above water will maintain at a high level of 0.1mg/L. The above research results provide theoretical and practical basis for relevant ecological restoration project.

**Key words:** lake; water-sediment interface; nutrient release; phosphorus simulation; inner source nutrient exchange; dynamic simulation

\* The project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50239030).