

# 湖泊底泥氮、磷污染分布特征及风险分析

——以钟祥市南湖为例

张平, 陈颖姝, 张曼, 刘伯娟, 吴迪民, 乔梁

湖北省水利水电规划勘测设计院有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2024年1月2日; 录用日期: 2024年1月18日; 发布日期: 2024年2月28日

## 摘要

以汉江中下游典型湖泊钟祥市南湖为研究区, 对湖泊底泥进行分层采样并测定各分层氮磷含量, 摸清湖泊氮磷污染分布规律, 同时进行底泥氮磷静态释放试验, 综合分析底泥氮磷污染程度及对湖泊水环境的影响。结果表明: 1) 湖泊各检测点位底泥营养盐污染严重: 总氮各层平均值在1224 mg/kg~1473 mg/kg之间; 总磷各层平均值在702 mg/kg~939mg/kg之间; 有机质各层平均值在20.3 mg/kg~27.7 mg/kg之间, 大部分底泥氮磷为中重度污染。2) 不同深度的底泥均可向上覆湖水释放氮, 释放速度在18.75 mg/(m<sup>2</sup>·d)~303.1 mg/(m<sup>2</sup>·d)之间; 总磷释放速度有正有负, 在-18.5 mg/(m<sup>2</sup>·d)~11.61 mg/(m<sup>2</sup>·d)之间, 这表明了湖泊底泥不仅不会向水体释放磷, 还可反向吸附孔隙水中磷, 有利于湖泊水体富营养化控制。

## 关键词

底泥污染, 营养盐, 释放速度

# Distribution Characteristics and Risk Analysis of Nitrogen Phosphorus Pollution in Lake Sediments

—Case of Nanhu Lake in Zhongxiang City

Ping Zhang, Yingshu Chen, Man Zhang, Bojuan Liu, Dimin Wu, Liang Qiao

Hubei Institute of Water Resources Survey and Design Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: Jan. 2<sup>nd</sup>, 2024; accepted: Jan. 18<sup>th</sup>, 2024; published: Feb. 28<sup>th</sup>, 2024

文章引用: 张平, 陈颖姝, 张曼, 刘伯娟, 吴迪民, 乔梁. 湖泊底泥氮、磷污染分布特征及风险分析[J]. 世界生态学, 2024, 13(1): 76-89. DOI: 10.12677/ije.2024.131011

## Abstract

Taking Nanhu Lake in Zhongxiang City, a typical lake in the middle and lower reaches of the Han River, as the research area, stratified sampling was conducted on the sediment of the lake, and the nitrogen and phosphorus content in each layer was measured to understand the distribution pattern of nitrogen and phosphorus pollution in the lake. At the same time, static nitrogen and phosphorus release experiments were conducted on the sediment to comprehensively analyze the degree of nitrogen and phosphorus pollution in the sediment and its impact on the water environment of the lake. The results indicate that: 1) the sediment nutrient pollution at each detection point in the lake is severe: the average value of total nitrogen in each layer ranges from 1224mg/kg to 1473 mg/kg; The average value of total phosphorus in each layer ranges from 702 mg/kg to 939 mg/kg; The average value of organic matter in each layer ranges from 20.3 mg/kg to 27.7 mg/kg, and most of the sediment nitrogen and phosphorus are moderately or severely polluted. 2) Different depths of sediment can release nitrogen into the overlying lake water, with a release rate ranging from 18.75 mg/(m<sup>2</sup>·d) to 303.1 mg/(m<sup>2</sup>·d); The release rate of total phosphorus varies from positive to negative, ranging from -18.5 mg/(m<sup>2</sup>·d) to 11.61 mg/(m<sup>2</sup>·d). This indicates that lake sediment not only releases phosphorus into the water body but also reversely adsorbs phosphorus in pore water, which is beneficial for eutrophication control of lake water bodies.

## Keywords

Sediment Pollution, Nutrient Salts, Release Rate

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

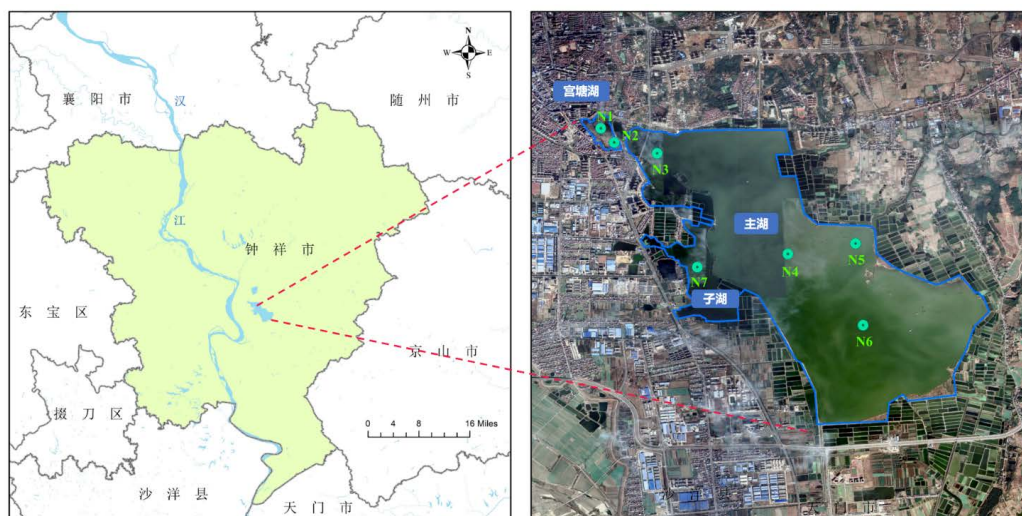
目前, 随着我国一系列水环境保护相关法律法规的出台及大批控源截污工程的实施, 湖泊的外源污染得到了一定控制, 湖泊内源污染控制成为湖泊水环境治理的重点[1], 湖泊底泥污染是内源污染的主要来源。

底泥是湖泊生态系统的重要组成部分, 也是营养物质循环的中心环节, 底泥承接了水体中各类污染物包括营养盐、重金属及有机污染物等, 是湖泊潜在的污染受体和污染源[2] [3] [4]。底泥的污染状况可间接反映上覆水体的污染状况和湖泊水动力状态[5], 底泥中的氮、磷含量是反应上覆水体营养状况和污染程度的双重指标[6]。有机质是底泥中重要的自然胶体, 是重金属、有机物等污染物发生吸附、分界、络合作用的活性物质[4], 可反应底泥的有机营养状态, 是内源污染的重要指标[6]。通过研究湖泊底泥中氮、磷的含量及其分布特征, 对把握该湖氮、磷的分布规律及其富营养化过程有重要意义[7]。

目前对湖泊底泥污染的研究多集中在表层营养盐污染的分析, 较少对底泥垂向分布及底泥释放规律进行研究, 且还没有对钟祥市南湖底泥污染的研究。本次以汉江中下游典型湖泊钟祥市南湖为研究区, 通过对研究区域内底泥进行分层采样并测定各分层氮磷含量, 摸清湖泊氮磷污染分布规律, 同时进行底泥氮磷静态释放试验, 综合分析底泥氮磷污染程度及对湖泊水环境的影响, 以为湖泊治理保护和水环境系统的可持续发展提供科学依据。

## 2. 研究区概况

南湖处于汉江中游左岸, 紧邻汉江, 地跨东经 112°35'~112°47', 北纬 31°07'~31°09', 是钟祥市重要的城市湖泊。南湖南北长 5 km, 东西宽 3.1 km, 平均宽度 2.44 km, 湖岸线总长 21.7 km。据 2012 年湖北省“一湖一勘”数据, 该湖泊平均水面面积 11.8 km<sup>2</sup>, 平均水深 1.5 m, 储水量 3496 万 m<sup>3</sup>。南湖周边分布有大面积的居民生活区及养殖鱼塘, 城镇居民生活污水及养殖尾水是威胁湖泊水环境的主要来源, 2016~2020 年南湖水质指标基本维持在 IV 类~劣 V 之间。



**Figure 1.** Geographical location and distribution of sediment sampling points in the study area  
**图 1.** 研究区地理位置及底泥采样点位分布图

## 3. 材料与方法

### 3.1. 采样点位布设

根据《湖泊入湖排口与底泥清淤调查技术指南》及《湖泊沉积物调查规范》相关要求, 于 2020 年 12 月在南湖开展底泥采样, 共布设 7 个采样点位(编号 N1~N7) (图 1)。每个采样点分 4 层采集湖泊底泥沉积物样品, 用于开展湖泊底泥氮磷及有机质检测和底泥氮磷静态释放试验, 各分层采样深度见表 1。

**Table 1.** Sampling depth of each sampling point  
**表 1.** 各采样点位采样深度

序号	采样点位	采样深度 (cm)	序号	采样点位	采样深度 (cm)	序号	采样点位	采样深度 (cm)	序号	采样点位	采样深度 (cm)
1	N1	0~10	5	N2	0~20	9	N3	0~15	13	N4	0~20
2		10~20	6		20~40	10		15~30	14		20~40
3		20~30	7		40~60	11		30~45	15		40~60
4		30~40	8		60~80	12		45~60	16		60~80
17	N5	0~7.5	21	N6	0~10	25	N7	0~10	29	N7	0~10
18		7.5~15	22		10~20	26		10~20	30		10~20
19		15~22.5	23		20~30	27		20~30	31		20~30
20		22.5~30	24		30~40	28		30~40	32		30~40

### 3.2. 样品分析与数据处理

底泥采样采用水底沉积物采样器进行采样, 采样要求全柱状采样, 采样底面至正常层以下 20 cm 左右。将采样底泥平均分为四层, 每层采取一个样品, 并进行记录、编码、送样, 本次调查采集样品共计 28 个。底泥样品的检测指标包括: 总氮、总磷、有机质共三项指标, 总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定, 总磷采用碱熔-钼锑抗分光光度法测定, 有机质采用重铬酸钾氧化外加热-滴定。样品的采集、运输、保存、试验室分析和数据计算的全过程均按照国家颁布的标准分析方法及有关规范要求进行。

为研究“底泥-湖水”界面及“底泥-孔隙水”处底泥氮磷释放的特征及其对湖泊水环境的影响, 对 28 个样品开展静水条件下湖泊底泥氮磷释放试验。本次试验检测的指标类别包括总氮和总磷共两项, 在静态模拟试验中, 底泥释放在第 48 h 之后达到稳定, 本次每个试验组试验时间考虑延长为 96 h, 28 个试验组同时开始试验, 每个试验组水样共采集 10 次, 采样频率见表 2。

Table 2. Sampling time and quantity

表 2. 采样时间及采样数量

试验开始(h)	采样时间										单组水样数量	试验总组数	水样总数
	0	4	8	12	24	36	48	60	72	96			
	0	4	8	12	24	36	48	60	72	96	10	28	280

湖泊底泥氮磷释放速度的计算方法如下[8]:

$$r = \frac{[V(C_n - C_0) + \sum_{j=1}^n V_{j-1}(C_{j-1} - C_a)]}{At} \quad (1)$$

式中,  $r$  为释放速度[ $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ];  $V$  为柱中上覆水体积(L),  $V = 1\text{L}$ ;  $C_n$ 、 $C_0$ 、 $C_{j-1}$  为第  $n$  次、初始和  $j-1$  次采样时某物质含量( $\text{mg}/\text{L}$ );  $C_a$  为添加水量中的物质含量( $\text{mg}/\text{L}$ );  $V_{j-1}$  为第  $j-1$  次采样体积(L),  $V_{j-1} = 0.1\text{L}$ ;  $A$  为柱样中水-沉积物接触面积( $\text{m}^2$ ),  $A = 0.0042\text{m}^2$ ;  $t$  为释放时间( $d$ )。

## 4. 结果与分析

### 4.1. 湖泊底泥氮磷的污染特征

#### 4.1.1. 湖泊底泥中总氮、总磷及有机质垂向分布特征

南湖湖泊底泥总氮、总磷及有机质含量统计结果见表 3。

Table 3. Statistics of total nitrogen, total phosphorus and organic matter content in each layer of lake sediment

表 3. 湖泊底泥各层总氮、总磷及有机质含量统计表

分层	项目	总氮( $\text{mg}/\text{kg}$ )	总磷( $\text{mg}/\text{kg}$ )	有机质( $\text{g}/\text{kg}$ )
第一层	最小值	642	575	9.6
	最大值	2820	1910	52.0
	平均值	1473	939	27.7
第二层	最小值	593	524	12.0
	最大值	2950	1220	57.3
	平均值	1451	745	29.2

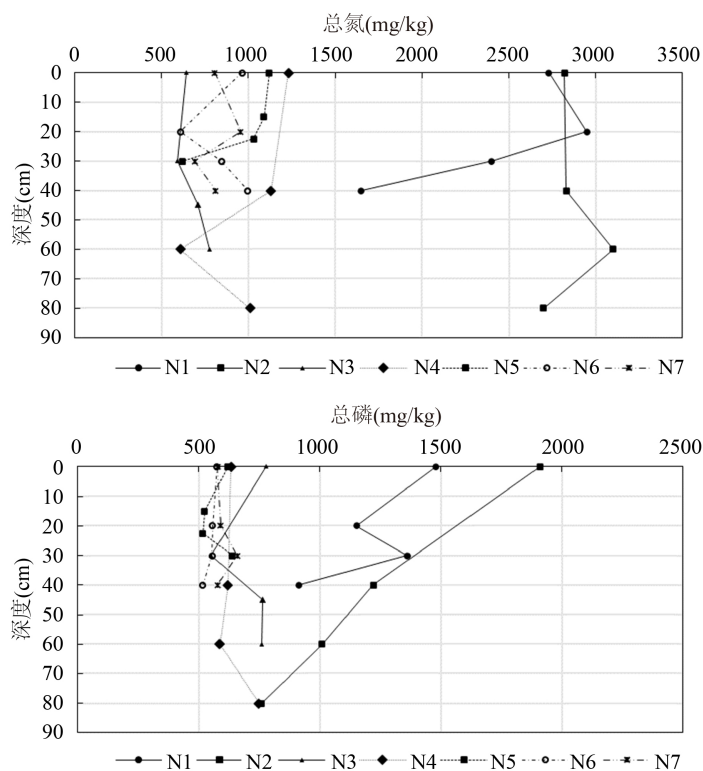
续表

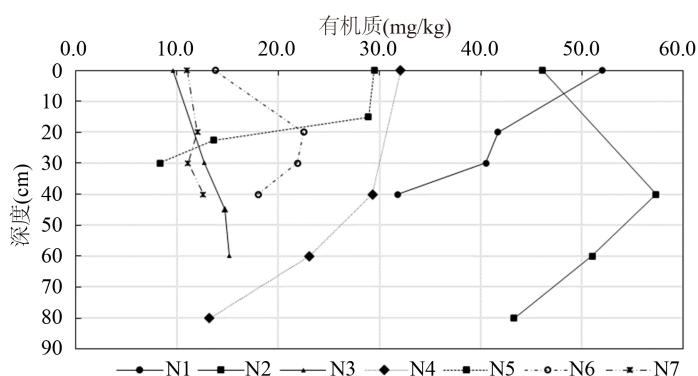
第三层	最小值	608	517	11.1
	最大值	3100	1360	51
	平均值	1340	778	25.1
第四层	最小值	621	517	8.3
	最大值	2700	914	43.3
	平均值	1224	702	20.3

各层底泥总氮含量平均值在 1224 mg/kg~1473 mg/kg 之间, 平均值从第一层到第四层呈现减小趋势, 各层总氮最大值均大于 2500 mg/kg, 最小值均小于 700 mg/kg, 各层最大值接近于最小值 5 倍左右, 同一层底泥各点位总氮含量差异较大; 各层总磷含量平均值在 702 mg/kg~939 mg/kg 之间, 第一层~第三层总磷最大值均大于 1000 mg/kg, 各层最大值接近于最小值 3 倍左右, 第四层总磷含量均小于 1000 mg/kg, 最大值接近于最小值 2 倍左右; 各层有机质含量平均值在 20.3 mg/kg~27.7 mg/kg 之间, 各层最大值接近于最小值 5 倍左右, 同一层底泥各点位有机质含量差异较大。

各检测点位总氮、总磷及有机质垂向分布见图 2。

检测点 N1 及 N2 总氮、总磷及有机质含量明显高于其他点位, 通过调查, 检测点 N1 及 N2 所在宫塘湖片区生活污水未纳入市政排水管网, 周边主要排口共有 12 个, 多数为污水直排口(污水立管直排宫塘), 长期的生活污水排入使得宫塘湖底泥营养盐污染严重。N3~N7 各点位总氮、总磷及有机质含量从第一层至第四层有递减趋势, 第四层总氮稳定在 500 mg/kg~1000 mg/kg 之间, 第四层总磷稳定在 500 mg/kg~750 mg/kg 之间, 第四层有机质稳定在 10 g/kg~20 g/kg 之间。



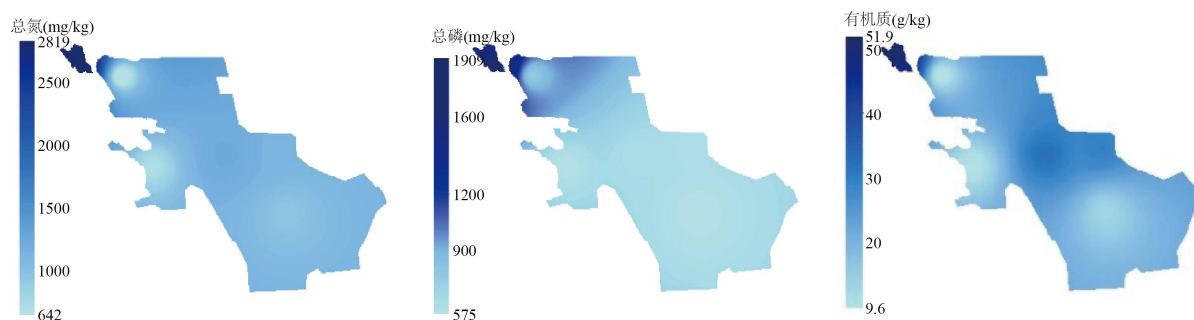


**Figure 2.** Vertical distribution of total nitrogen, total phosphorus and organic matter in sediment sampling points

**图 2.** 底泥各采样点位总氮、总磷及有机质垂直向分布图

#### 4.1.2. 湖泊表层底泥中总氮、总磷、有机质平面分布特征

湖泊表层底泥与湖水直接接触，其营养盐含量是影响湖泊水质的潜在威胁。本次对南湖表层底泥中总氮、总磷及有机质含量进行分析，表层底泥中总氮、总磷及有机质平面分布见图 3。



**Figure 3.** Total nitrogen, total phosphorus, and organic matter content in lake surface sediment and their spatial distribution

**图 3.** 湖泊表层底泥总氮、总磷及有机质含量及其空间分布

宫塘湖因周边生活污水排入，加之与南湖主湖仅通过一处闸口连接，水系沟通不畅，水动力条件较差，导致底泥有机质沉淀量较多，总氮及总磷营养盐含量较高。主湖表层底泥中的总氮含量与有机质含量空间分布一致，湖泊中心检测点位 N4 及其附近河流出口 N5 检测点位总氮含量及有机质含量较高，说明有机质按 Turbidity Flood Model 方式在底质中的富集是其氮的主要来源，湖泊底泥受周边出入湖河流冲刷，导致其在湖心处淤积严重，根据表 1，湖泊中心检测点底泥淤积深度达 80 cm，底泥的大量淤积，导致其有机质含量较高。

## 4.2. 湖泊底泥氮磷污染程度分析

### 4.2.1. 底泥氮磷污染评价方法

目前尚无针对底泥污染状况的统一的评价标准，较为常用的方法有富集系数法、有机指数法及有机氮指数、污染指数等[9]。本次参考相关文献[10][11][12]，综合考虑确定评价方法。

#### 1) 总氮污染评价方法

总氮污染情况采用有机污染指数法，通过有机污染指数和有机氮指数进行综合评价[13]。有机指数通

常用作评价水体底质环境状况的指标，可用来衡量底泥受有机物污染的程度[4]，有机氮指数常用来衡量底泥受氮污染程度。计算方法如下：

$$\begin{aligned}OI &= OC \times ON \\OC &= OM/1.724 \\ON &= TN \times 0.95\end{aligned}\quad (2)$$

式中： $OI$  为有机指数； $OC$  为有机碳，%； $ON$  为有机氮指数，%； $OM$  为有机质，%； $TN$  为总氮，%。评价标准见表 4。

**Table 4.** Assessment standards for total nitrogen pollution

**表 4.** 总氮污染评价标准

$OI$	$ON/\%$	污染级别	TN 污染程度
$OI < 0.05$	$ON < 0.033$	I	无污染
$0.05 \leq OI < 0.2$	$0.033 \leq ON < 0.066$	II	轻度污染
$0.2 \leq OI < 0.5$	$0.066 \leq ON < 0.133$	III	中度污染
$OI > 0.5$	$ON > 0.133$	IV	重度污染

## 2) 总磷污染评价方法

总磷采用单因子指数法进行评价，通过磷污染指数( $P_i$ )对其进行评价。计算方法如下：

$$P_i = C_i / C_{oi} \quad (3)$$

式中  $C_i$  为总磷的实际检测浓度，mg/kg； $C_{oi}$  为环境评价标准值，mg/kg，本次参考《湖泊入湖排口及底泥清淤调查技术指南》，取 420 mg/kg。评价标准见表 5。

**Table 5.** Assessment standards for total phosphorus pollution

**表 5.** 总磷污染评价标准

$P_i$	$P_i \leq 0.5$	$0.5 < P_i \leq 1$	$1 < P_i \leq 1.5$	$P_i \geq 1.5$
污染级别	I	II	III	IV
TP 污染程度	无污染	轻度污染	中度污染	重度污染

### 4.2.2. 底泥氮磷污染程度分析

总氮有机污染指数法和总磷单因子指数法的评价结果见表 6。各点位各层有机指数介于 0.03~0.89 之间，有机氮指数介于 0.0563~0.2945 之间，总磷单因子指数介于 1.2~4.5 之间。底泥总氮污染情况为：轻度污染层数占 21%，中度污染层数占 50%，重度污染层数占 29%；总磷污染情况：中度污染占 46%，重度污染层数占 54%，总磷污染相对较严重。宫塘湖检测点各层底泥氮磷均为重度污染。

**Table 6.** Assessment results of total nitrogen and total phosphorus pollution levels

**表 6.** 总氮、总磷污染程度评价结果

序号	采样点位	$OI$	$ON/\%$	总氮污染程度	$P_i$	总磷污染程度
1	N1	0.78	0.259	重度污染(IV级)	3.5	重度污染(IV级)
2		0.68	0.280	重度污染(IV级)	2.7	重度污染(IV级)

续表

3		0.54	0.228	重度污染(IV级)	3.2	重度污染(IV级)
4		0.29	0.157	重度污染(IV级)	2.2	重度污染(IV级)
5		0.72	0.268	重度污染(IV级)	4.5	重度污染(IV级)
6	N2	0.89	0.269	重度污染(IV级)	2.9	重度污染(IV级)
7		0.87	0.295	重度污染(IV级)	2.4	重度污染(IV级)
8		0.64	0.257	重度污染(IV级)	1.8	重度污染(IV级)
9		0.03	0.061	轻度污染(II级)	1.9	重度污染(IV级)
10	N3	0.04	0.056	轻度污染(II级)	1.3	中度污染(III级)
11		0.06	0.067	中度污染(III级)	1.8	重度污染(IV级)
12		0.07	0.074	中度污染(III级)	1.8	重度污染(IV级)
13		0.22	0.117	中度污染(III级)	1.5	重度污染(IV级)
14	N4	0.18	0.107	中度污染(III级)	1.5	中度污染(III级)
15		0.08	0.058	轻度污染(II级)	1.4	中度污染(III级)
16		0.07	0.096	中度污染(III级)	1.8	重度污染(IV级)
17		0.18	0.106	中度污染(III级)	1.5	中度污染(III级)
18	N5	0.17	0.104	中度污染(III级)	1.2	中度污染(III级)
19		0.08	0.098	中度污染(III级)	1.2	中度污染(III级)
20		0.03	0.059	轻度污染(II级)	1.5	重度污染(IV级)
21		0.07	0.092	中度污染(III级)	1.4	中度污染(III级)
22	N6	0.08	0.058	轻度污染(II级)	1.3	中度污染(III级)
23		0.10	0.080	中度污染(III级)	1.3	中度污染(III级)
24		0.10	0.095	中度污染(III级)	1.2	中度污染(III级)
25		0.05	0.076	中度污染(III级)	1.4	中度污染(III级)
26	N7	0.06	0.091	中度污染(III级)	1.4	中度污染(III级)
27		0.04	0.066	轻度污染(II级)	1.6	重度污染(IV级)
28		0.06	0.077	中度污染(III级)	1.4	中度污染(III级)

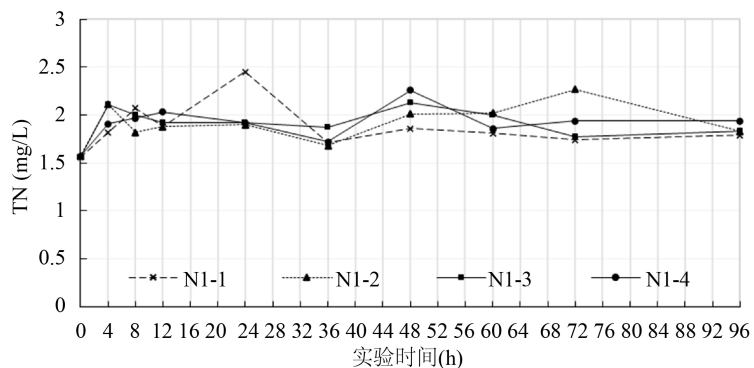
### 4.3. 底泥氮磷污染释放特征及其对水环境的影响

#### 4.3.1. 湖泊底泥氮磷释放特征

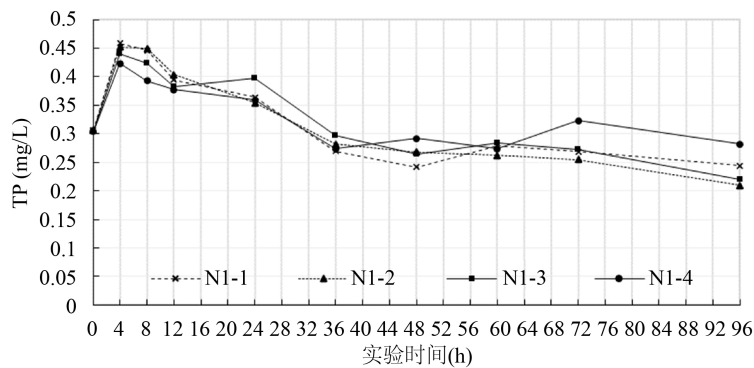
底泥吸收了水体中外源输入的氮磷等营养物质后,相对于上覆水体中的营养元素含量,会变成新的营养物质,影响湖泊水质,导致湖泊水体富营养化。本次利用采集的湖泊原状底泥样品和湖水,在室内开展氮磷静态释放试验,对上覆水体氮磷参数进行测量,研究底泥释放对水环境的影响。各点位不同深度底泥释放特征见图4。随着试验的进行,试验组水体中总氮浓度迅速升高,表明不同深度的底泥均可向上覆水体中释放氮,96 h后,各点各层底泥试验水体中总磷浓度在1.5 mg/L左右;试验组水体中的总磷含量经历初期波动后,变动不大,96 h后,N1点位各层底泥上覆水总磷浓度维持在0.2 mg/L~0.3 mg/L之间,N3各层底泥上覆水总磷浓度维持0.3 mg/L左右,N2及N4~N7点位各层底泥上覆水总磷浓度维持在0.1 mg/L左右。



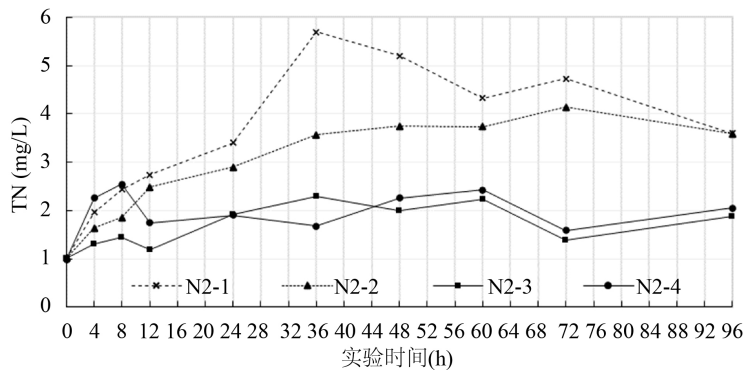
N1点底泥氮释放试验中水体总氮浓度变化曲线



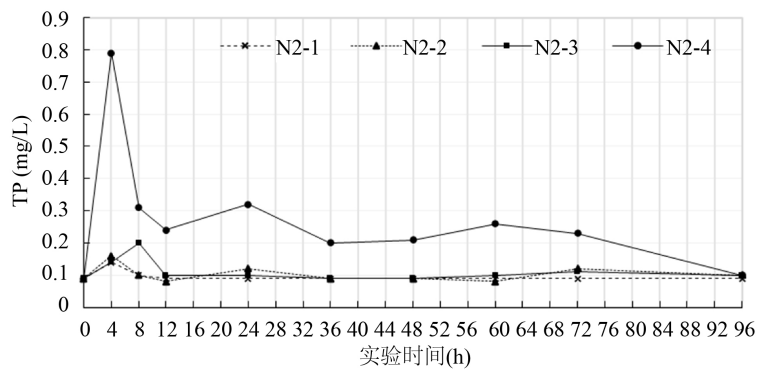
N1点底泥磷释放试验中水体总磷浓度变化曲线



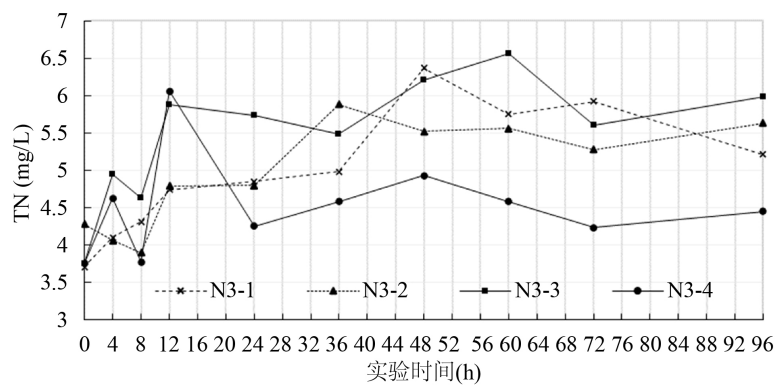
N2点底泥氮释放试验中水体总氮浓度变化曲线



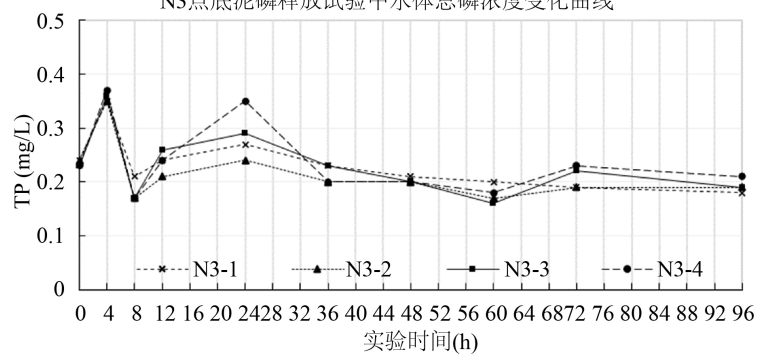
N2点底泥磷释放试验中水体总磷浓度变化曲线



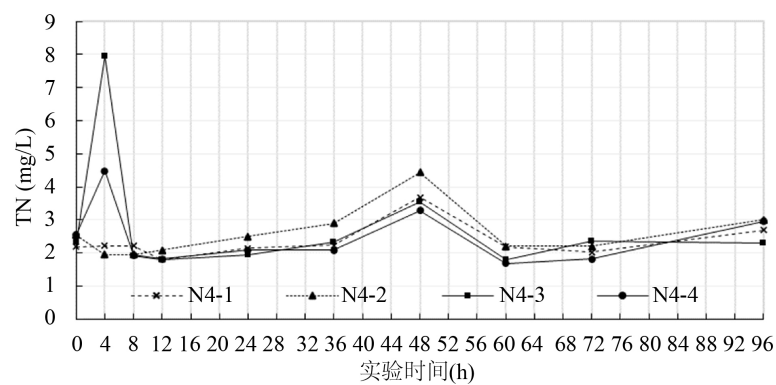
N3点底泥氮释放试验中水体总氮浓度变化曲线



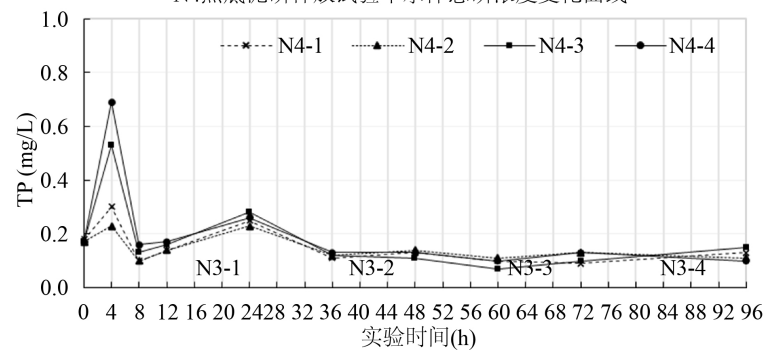
N3点底泥磷释放试验中水体总磷浓度变化曲线



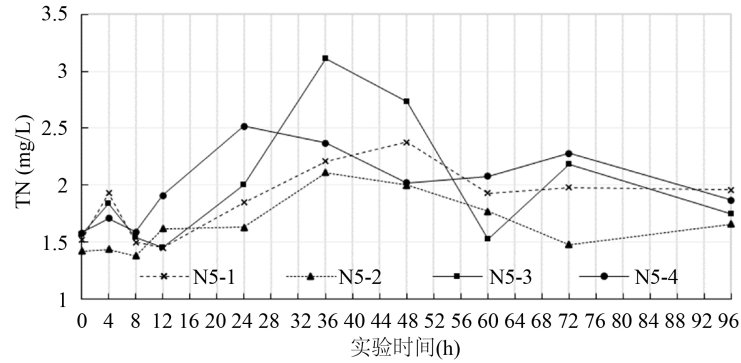
N4点底泥氮释放试验中水体总氮浓度变化曲线



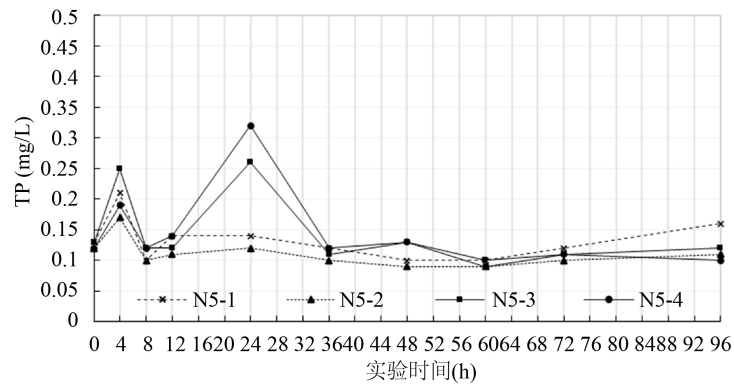
N4点底泥磷释放试验中水体总磷浓度变化曲线



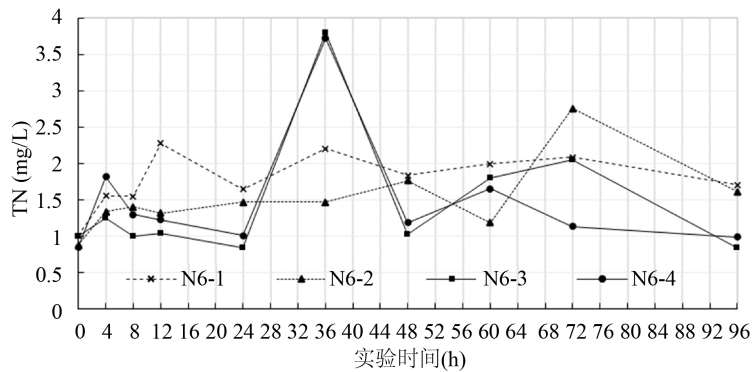
N5点底泥氮释放试验中水体总氮浓度变化曲线



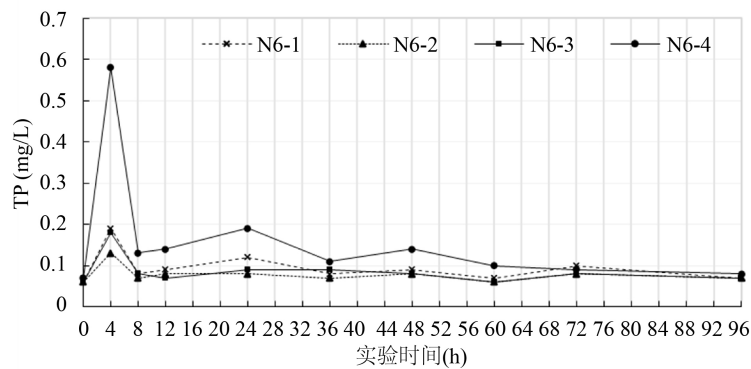
N5点底泥磷释放试验中水体总磷浓度变化曲线

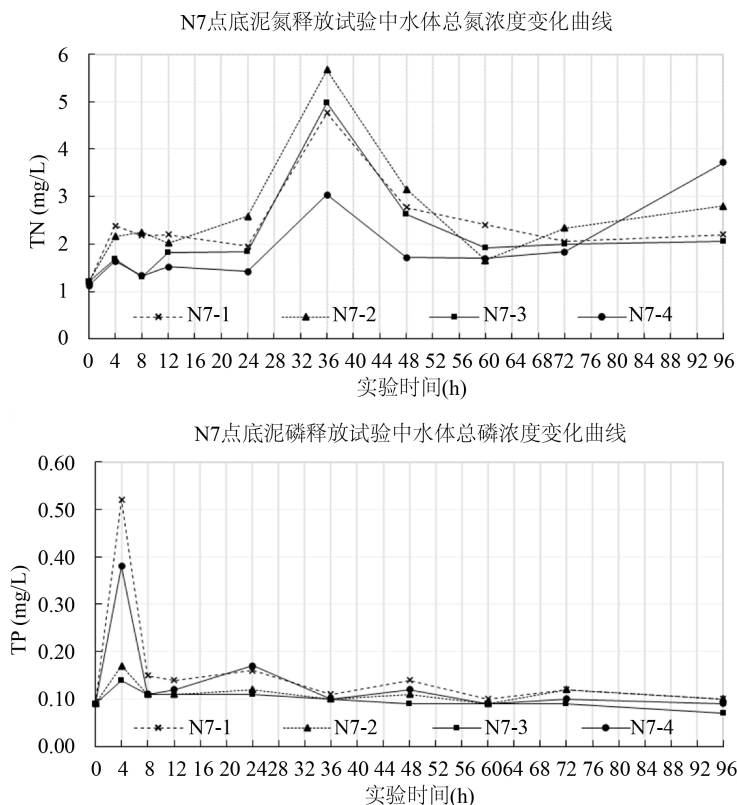


N6点底泥氮释放试验中水体总氮浓度变化曲线



N6点底泥磷释放试验中水体总磷浓度变化曲线





**Figure 4.** Variation curve of nitrogen and phosphorus concentration in the water body during the nitrogen and phosphorus release experiment in the sediments of Nanh Lake

**图 4.** 南湖底泥氮磷释放试验中水体氮磷浓度变化曲线

#### 4.3.2. 湖泊底泥氮磷释放对水环境的影响

研究表明,在静态模拟试验中,底泥释放在第 48 h 之后达到稳定,综合考虑本次试验中底泥氮磷释放规律,采用 96 h 的数据计算氮磷累积综合释放速度。分析结果见表 7。

由表 7 可知,总氮释放速度皆为正值方面,在  $18.75 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ~ $303.1 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 之间, N2~N4 及 N6 第一层底泥氮释放速度较高, N5 及 N7 第四层氮释放速度较高。总磷释放速度有正有负,在  $-18.5 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ~ $11.61 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 之间,这表明了湖泊底泥不仅会向水体释放磷,还可反向吸附孔隙水中磷,有利于湖泊水体富营养化控制。底泥总磷释放速度的绝对值远小于总氮,说明湖泊底泥磷释放对上覆水水环境影响小于总氮。

**Table 7.** Release rate of nitrogen and phosphorus in sediment at each point and each layer

**表 7.** 各点位各层底泥氮磷释放速度

序号	采样点位	底泥营养盐释放系数 ( $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ )		序号	采样点位	底泥营养盐释放系数 ( $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ )	
		总氮	总磷			总氮	总磷
1	N1	165.71	-4.05	17	N5	131.61	4.94
2		121.43	-4.40	18		175.42	1.90
3		235.60	-2.32	19		105.06	-0.60
4		87.68	-0.71	20		200.36	2.80

续表

5		47.08	1.90	21		303.10	0.36
6	N2	28.04	-1.13	22	N6	262.98	1.37
7		34.52	0.30	23		90.77	1.90
8		41.85	0.24	24		119.94	11.61
9		38.39	-4.58	25		320.83	-25.24
10	N3	28.75	-4.88	26	N7	356.55	-46.25
11		28.10	-0.48	27		369.64	-35.24
12		18.75	-2.14	28		423.81	2.44
13		88.10	2.68				
14	N4	82.32	1.67				
15		18.93	2.14				
16		46.55	6.13				

## 5. 结论及讨论

1) 湖泊各检测点位底泥总氮各层平均值在 1224 mg/kg~1473 mg/kg 之间；总磷各层平均值在 702 mg/kg~939 mg/kg 之间；有机质各层平均值在 20.3 mg/kg~27.7 mg/kg 之间，同一层各点位总氮及有机质含量差异较大。各点位各层有机指数介于 0.03~0.89 之间，有机氮指数介于 0.0563~0.2945 之间，总磷单因子指数介于 1.2~4.5 之间，大部分底泥为中重度污染。宫塘湖因周边污水汇入，加之水系连通不畅，底泥氮磷含量较高，营养盐污染严重。

2) 不同深度的底泥均可向上覆湖水释放氮，释放速度在 18.75 mg/(m<sup>2</sup>·d)~303.1 mg/(m<sup>2</sup>·d)之间；总磷释放速度有正有负，在-18.5 mg/(m<sup>2</sup>·d)~11.61 mg/(m<sup>2</sup>·d)之间，这表明了湖泊底泥不仅会向水体释放磷，还可反向吸附孔隙水中磷，有利于湖泊水体富营养化控制。

## 参考文献

- [1] 朱林, 汪院生, 邓建才, 等. 长荡湖表层沉积物中营养盐空间分布与污染特征[J]. 水资源保护, 2015, 31(6): 135-140.
- [2] 王永豪, 李晓勇, 邱建贺, 等. 城市湖泊底泥污染分析及生态风险评价——以沅江市中心城区为例[J]. 环境生态学, 2023, 5(2): 75-80.
- [3] 张坤, 李彬, 王道增. 动态水流条件下河流底泥污染物(COD<sub>(Cr)</sub>)释放研究[J]. 环境科学学报, 2010, 30(5): 985-989.
- [4] 余辉, 张文斌, 卢少勇, 等. 洪泽湖表层底质营养盐的形态分布特征与评价[J]. 环境科学, 2010, 31(4): 961-968.
- [5] 华江环, 吉芬芬, 向孟玲, 等. 青山湖沉积物中氮、磷、有机质分布特征及风险评价[J]. 福建师范大学学报: 自然科学版, 2021, 37(6): 53-61. <https://doi.org/10.12046/j.issn.1000-5277.2021.06.008>
- [6] 赵兴青, 杨柳燕, 于振洋, 等. 太湖沉积物理化性质及营养盐的时空变化[J]. 湖泊科学, 2007, 19(6): 698-704.
- [7] 王永华, 钱少猛, 徐南妮, 等. 巢湖东区底泥污染物分布特征及评价[J]. 环境科学研究, 2004, 17(6): 22-26. <https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-6929.2004.06.006>
- [8] 范成新, 张路, 杨龙元, 等. 湖泊沉积物氮磷内源负荷模拟[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(4): 370-378. <https://doi.org/10.3321/j.issn:0029-814X.2002.04.005>
- [9] 陈如海, 詹良通, 陈云敏, 胡洪志. 西溪湿地底泥氮、磷和有机质含量竖向分布规律[J]. 中国环境科学, 2010(4): 493-498.

- 
- [10] 韩继博, 张晟瑀, 周昊, 田宇, 冯立民. 中国北方某湖泊底泥污染分析及重金属潜在生态风险评价[J]. 世界地质, 2022, 41(1): 227-235.
- [11] 卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静. 三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 5020-5031.
- [12] 王莉君, 吴思麟. 南京黑臭河道底泥污染特征及评价[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(3): 117-122.
- [13] Yuan, L.B., Xing, S.Y., Liu, X., *et al.* (2021) Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City. *Environmental Science*, **42**, 3186-3197.