

汤逊湖·南湖及墨水湖底泥沉积物中氮磷的释放特征

林子阳¹, 姜应和^{1*}, 程润喜², 胡芳², 周欢², 陈铭楷¹

(1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北武汉 430070; 2. 路德环境科技股份有限公司, 湖北武汉 430000)

摘要 在夏季环境下以武汉汤逊湖、南湖和墨水湖的底泥沉积物为目标, 采用蒸馏水作为上覆水进行静态释放试验, 监测各试验柱上覆水中氮磷营养盐的变化趋势, 计算 TN、TP 的累计释放量, 分析湖泊底泥中氮磷营养盐的释放规律。结果表明, 各湖泊底泥样本向上覆水中释放的氮主要以 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的形式存在; 墨水湖底泥向上覆水中释放的氮最多, 南湖底泥向上覆水中释放的磷最多。3 个湖泊的底泥向上覆水释放的氮磷总量仅占底泥氮磷总量的极少部分, 说明汤逊湖、南湖和墨水湖底泥均具有较大的氮磷释放潜力。

关键词 氮磷; 底泥沉积物; 释放特征

中图分类号 X524 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2023)02-0064-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.02.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Release Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments of Tangxun Lake, South Lake and Moshui Lake

LIN Zi-yang¹, JIANG Ying-he¹, CHENG Run-xi² et al (1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070; 2. Road Environment Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000)

Abstract Under the summer environment, taking the sediments of Tangxun Lake, South Lake and Moshui Lake in Wuhan as the target, the static release test was conducted with distilled water as the overlying water to monitor the change trend of nitrogen and phosphorus nutrients in the overlying water of each test column, calculate the cumulative release amount of TN and TP, and analyze the release rule of nitrogen and phosphorus nutrients in the lake sediment. The results showed that the nitrogen released to the overlying water from the sediment samples of each lake mainly existed in the form of $\text{NO}_3^- \text{-N}$; the sediment of Moshui Lake released the most nitrogen to the overlying water, and the sediment of South Lake released the most phosphorus to the overlying water. The total nitrogen and phosphorus released by the sediment of the three lakes from the upper water cover accounts for only a very small part of the total nitrogen and phosphorus of the sediment, indicating that the sediment of Tangxun Lake, South Lake and Moshui Lake all had greater nitrogen and phosphorus release potential.

Key words Nitrogen and phosphorus; Sediment; Release characteristic

汤逊湖位于武汉市东南部, 水域面积达 47.62 km², 横跨江夏区、洪山区和东湖新技术开发区, 是武汉最大的城中湖; 南湖位于武昌南部, 水域面积达 7.67 km², 是武汉市第三大的城中湖; 墨水湖位于汉阳西南, 水域面积达 3.64 km², 为浅水湖泊。随着湖泊周边城市发展, 各类污染物排入湖中, 造成水体污染。水中营养盐通过一系列理化作用, 逐渐蓄积于湖泊底泥之中。其中, 氮、磷等营养盐是湖泊底泥营养盐的主要组成部分, 对水体环境影响极大。在外界环境的影响下, 底泥中的氮磷元素部分被沉水植物吸收, 重新参与物质循环; 部分以闭蓄态或结合态的形式稳定存在, 难以被释放; 部分通过扩散作用重新进入上覆水中, 造成二次污染^[1]。这部分重新被释放的氮磷元素, 也是湖泊水体治理水质难以根本好转的主因之一。

底泥中氮磷的释放是一个物理、化学和生物综合作用的过程, 其释放、累积和输送遵循一定的规律^[2]。底泥中氮磷的释放受到如 DO、温度、pH、上覆水污染物浓度等因素的影响^[3]。笔者以汤逊湖、南湖和墨水湖为研究对象, 采用实验室静态模拟法对底泥氮磷释放规律进行研究。

1 材料与方法

1.1 样品的采集 将带上覆水和底泥的柱样定义为 A 类试验柱样, 不带上覆水的底泥柱样定义为 B 类试验柱样。在汤

逊湖(114°23'E, 30°25'N)、南湖(114°21'E, 30°30'N)和墨水湖(114°14'E, 30°32'N)各设一个取样点, 每一取样点取 1 个 A 类试验柱样和 2 个 B 类试验柱样。A 类试验柱样取样管长为 2.5 m, 上覆水采样深度不小于 1.5 m, 底泥采样深度不小于 70 cm; B 类试验柱样取样管长为 1.5 m, 底泥采样深度不小于 1.0 m。取样点具体位置如图 1 所示。

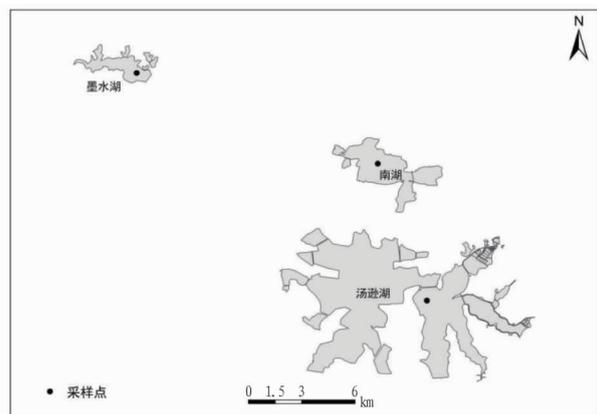


图 1 采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling points

1.2 样品的处理 各试验柱样被带回实验室后, 将 A 类试验柱样的上覆水用虹吸管调整至相同深度(上覆水深度为 1.5 m)。对上覆水进行测量所得各理化指标如表 1 所示。

对 B 类试验柱样的表层(0~5 cm)底泥进行采样, 吸除水分后置于阴凉处自然风干, 研磨后过 100 目筛, 保存在聚乙烯袋中备用。测得底泥 TN、TP 含量如表 2 所示。

基金项目 路德环境科技股份有限公司科技攻关项目(LDHJ20200102)。
作者简介 林子阳(1996—), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 研究方向: 水污染控制理论及应用。* 通信作者, 教授, 博士, 博士生导师, 从事水污染控制理论及应用研究。

收稿日期 2022-02-17

表 1 各湖泊上覆水理化指标

Table 1 Physical and chemical indicators of overlying water in each lake

湖泊名称 Lake name	pH	DO mg/L	TN mg/L	TP mg/L	NH ₄ ⁺ -N mg/L	NO ₃ ⁻ -N mg/L
汤逊湖 Tangxun Lake	7.85	5.0	1.73	0.212	0.89	0.37
南湖 South Lake	8.28	5.5	1.69	0.231	0.90	0.62
墨水湖 Moshui Lake	7.62	4.8	2.32	0.198	1.32	0.68

表 2 各湖泊底泥中 TN、TP 含量

Table 2 Contents of TN and TP in sediments in each lake

湖泊名称 Lake name	TN	TP
汤逊湖 Tangxun Lake	25 714	1 212
南湖 South Lake	4 715	2 535
墨水湖 Moshui Lake	4 045	2 112

单位:mg/kg

1.3 底泥释放营养盐试验方法 将从 3 个湖泊各取的 1 个 A 类试验柱样分别命名为汤逊湖、南湖和墨水湖试验柱。该试验采样时间为夏季,试验期间水温维持在(30±1)℃。将试验柱中原上覆水替换为蒸馏水。监测上覆水中 DO、TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 TP 的变化,前期每隔 24 h 取样并检测,后期取样并检测的时间间隔为 48 h,每次采集水样后分别用

蒸馏水补足。

累计释放量 γ (mg)用以下公式计算^[4]:

$$\gamma_n = V(C_n - C_0) + \sum_{j=1}^{n-1} [V_j(C_j - C_a)] \quad (1)$$

式中, V 为试验柱中上覆水总体积(L); n 为采样次数, $n \geq 2$,当 $n=1$,仅取式右两项中的第一项; V_j 为每次采集水样的体积(L); C_n 为第 n 次采样时测出的营养盐浓度(mg/L); C_j 为第 j 次采样时测出的营养盐浓度(mg/L); C_a 为每次取样后补充水样中营养盐浓度(mg/L); C_0 为各类上覆水中营养盐的初始浓度(mg/L)。

1.4 水质检测方法 上覆水中 DO 采用 JPB-607A 溶解氧仪测定。TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 TP 采用《水和废水监测分析方法(第四版)》提供的方法测定;TN 采用过硫酸钾氧化,紫外分光光度法测定;TP 采用钼酸铵分光光度法测定;NH₄⁺-N 采用纳氏试剂比色法测定;NO₃⁻-N 采用紫外分光光度法测定。

2 结果与分析

2.1 上覆水中各指标的变化 不同湖泊底泥条件下,上覆水中各指标的变化趋势如图 2 所示。由图 2 可知,3 个试验柱中水样各指标的变化趋势基本一致。DO 含量在 10 d 前持续下降,可能是好氧微生物的持续活动导致的^[5];16 d 后 DO 略有回升,此时其他营养盐浓度基本处于平衡阶段,水体环

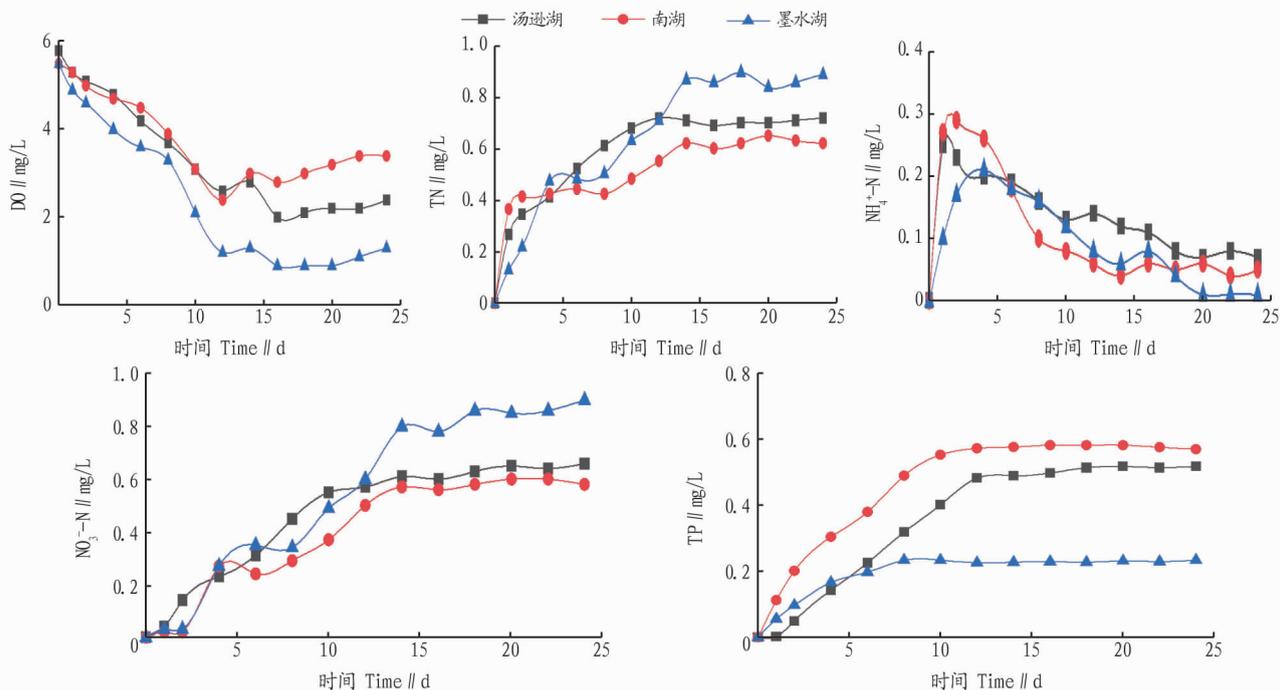


图 2 各试验柱上覆水各指标随时间变化曲线

Fig.2 Variation curve of various indicators of overlying water on each test column with time

境相对稳定,说明存在一定程度的大气复氧。TN、NO₃⁻-N 和 TP 均呈持续上升趋势,墨水湖试验柱的上覆水中 TN 浓度最高,汤逊湖试验柱次之,南湖试验柱最低;NO₃⁻-N 浓度排序与 TN 一致;南湖试验柱的上覆水中 TP 浓度最高,汤逊湖试验柱次之,墨水湖试验柱最低。由表 1 可知,对于原上覆水而言,TN 浓度表现为墨水湖>汤逊湖>南湖,与试验结果相符,且各试验柱中上覆水 TN 的最终浓度均小于各湖泊实

测结果。这可能是因为在自然湖泊的上覆水环境内存在大量生物活动,以汤逊湖为例,现仍有相当规模的渔业养殖^[6]。它们的代谢活动所产生的氮元素部分悬浮在上覆水中,进一步提高了 TN 的含量。TP 浓度表现为南湖>汤逊湖>墨水湖,主要以溶解性磷酸盐(SRP)的形式存在^[7],也与试验结果相符,但各试验柱中上覆水 TP 的最终浓度均大于各湖泊实测结果。该试验在夏季进行,气温较高,史静等^[8]研究表

明,温度对氮磷元素释放的影响类似,但对磷的影响更显著。且当温度升高到一定程度后,由于生物活性不再提高,氮的释放不再明显增强,而磷由于氧化还原电位的降低和含磷沉积物溶解加快等原因,释放更为明显^[9]。而自然水体中存在藻类及沉水植物对溶解性磷酸盐的吸收,降低了环境中磷的浓度,所以各湖泊 TP 的实测数据会低于试验条件下释放的 TP。 NH_4^+-N 表现出先上升后下降的趋势,这可能与底泥中有机氮转化为氨氮和硝化反应有关。

2.2 上覆水中氮类营养盐变化 不同湖泊底泥条件下,上覆水中各类含氮营养盐变化如图 3 所示。由图 3 可知,各试验柱中 TN 绝大部分由 NO_3^--N 组成。说明氮元素主要以无机氮的形式向上覆水中释放,难以以有机氮的形式释放。在试验初期,各试验柱均出现 NH_4^+-N 浓度迅速上升的趋势,这可能是由于在向试验柱内注入蒸馏水的过程中,对底泥造成

了一定扰动,且试验初期水体中溶解氧充足。这可能是因为底泥中存在好氧微生物将有机氮转化为氨氮^[10]。在前 10 d,水体中溶解氧持续下降, NH_4^+-N 也持续下降, NO_3^--N 则持续上升,说明水体中存在硝化反应将 NH_4^+-N 转化为 NO_3^--N 。但也可以看出, NO_3^--N 增长的量大于 NH_4^+-N 减少的量,说明底泥仍在向上覆水中释放 NO_3^--N 或释放 NH_4^+-N 并转化为 NO_3^--N 。陶玉炎等^[11] 研究表明,溶解氧缺乏的条件下,沉积物氮主要以 NH_4^+-N 形式释放,溶解氧充足条件下,沉积物氮主要以 NO_3^--N 形式释放。王圣瑞等^[12] 研究表明,底泥中可释放的氮主要以 NO_3^--N 的形式存在;且由于土壤带负电荷,铵根带正电荷,易被土壤吸附难以释放,而硝酸根带负电荷,更容易释放。

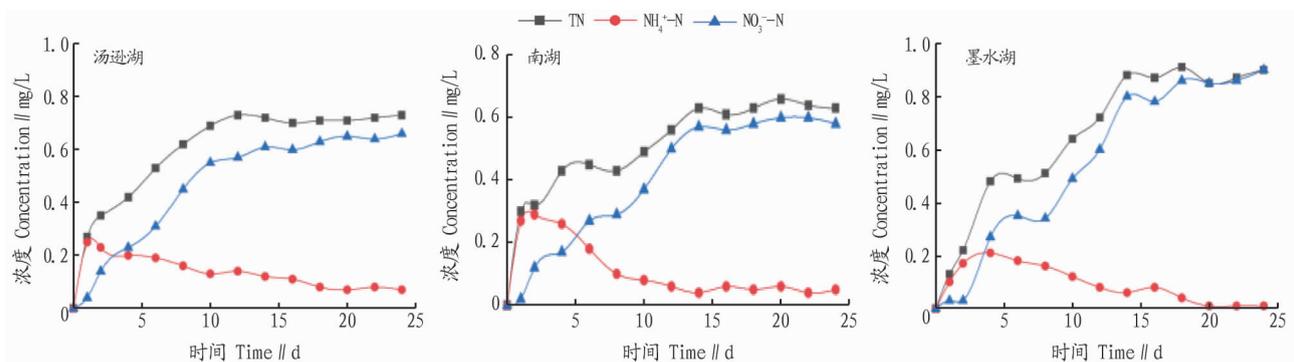


图 3 各试验柱上覆水含氮营养盐随时间变化曲线

Fig.3 Variation curve of nitrogen containing nutrient salts in the overlying water of each test column with time

2.3 上覆水中 TN、TP 累计释放量的变化 从各试验柱上覆水中 TN 和 TP 累计释放量的变化趋势(图 4)可以看出,不同湖泊底泥氮磷的累计释放量变化趋势基本相同。由于释放强度受上覆水与底泥间的浓度差影响,根据 Fick 第一扩散定律^[13],在静态释放条件下,由于底泥-水界面浓度梯度的影响,底泥 TN 和 TP 的释放速率在初期最大,随着时间的延续,

释放速率逐渐降低^[14],则累计释放量的增长也由陡变缓;最终,随着浓度差的不断缩小,扩散作用不断减弱,上覆水与底泥间逐渐达到某个平衡点,累计释放量不再明显增长,呈现出动态平衡状态。试验结束时墨水湖 TN 的累计释放量最大,说明墨水湖可能具有更大的氮释放能力;南湖 TP 的累计释放量最大,说明南湖可能具有更大的磷释放能力。

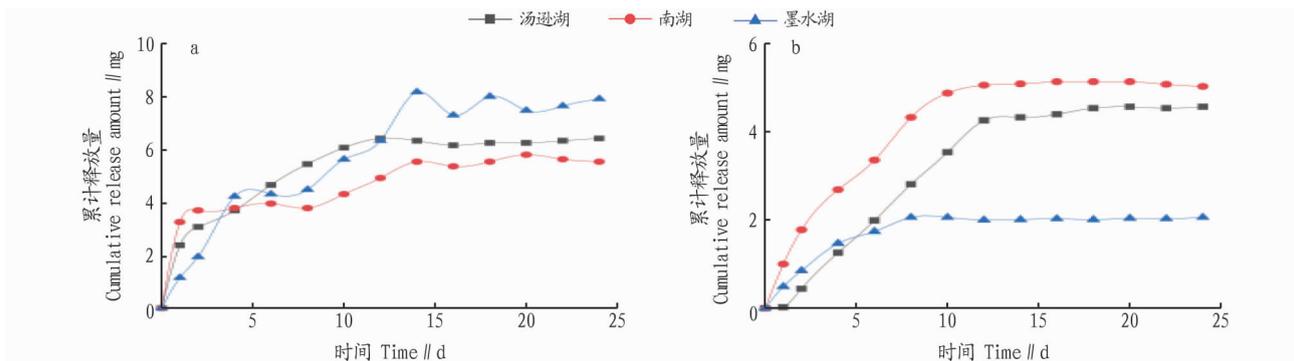


图 4 各试验柱上覆水 TN(a)和 TP(b) 累计释放量随时间变化曲线

Fig.4 Variation curve of cumulative release amount of TN (a) and TP(b) in the overlying water of each test column with time

2.4 底泥沉积物氮磷存在形态对释放的影响 底泥中的氮磷元素并不都具有向上覆水中释放的潜力。不同湖泊表层底泥 TN 中可转化态氮(TAN, TTN)及 TP 中易转化态磷占比区别均较大。王圣瑞等^[12] 对太湖等长江中下游湖泊的表层底泥测量发现, TN 中可交换氮(EN)占比为 6.29%~19.24%;

对太湖和武汉月湖表层底泥的研究发现, TN 中 TAN 的占比随粒径的降低而升高^[15], 其中最容易释放的 IEF-N 是可转化态无机氮的主体, 占总可转化态氮的 7.37%~22.25%。赵宝刚等^[16] 研究发现骆马湖等 4 个湖泊表层底泥 TN 中 TAN 占比均值为 50.93%~73.10%, IEF-N 占 TTN 的 6.74%~

8.82%。叶华香等^[17]对南山湖表层底泥测量发现,潜在可移动形态磷占 TP 的 54.06%。马金玉等^[18]研究表明,最易释放的 EX-P 占华阳河湖群表层底泥 TP 的 0.4%~4.9%。周帆琦等^[19]测得武汉南湖与东湖表层底泥 TP 中 EX-P 占比为 3%~11%。上述试验均表明,不同湖泊的表层底泥具有各自的形态分布特征,TN、TP 中具有释放潜力的部分占比也因湖泊环境和外源输入的不同而有差异。

此次试验测得 3 个湖泊表层(0~5 cm)底泥的干重约为 166 g,根据表 2 的各湖泊底泥 TN、TP 含量计算得出的各湖泊累计释放量占表层底泥内氮磷含量的比值如表 3 所示。

表 3 各湖泊累计释放量占比

Table 3 The proportion of cumulative release of each lake

湖泊名称 Lake name	TN			TP		
	底泥 TN 量 TN amount of sediment mg	释放 TN 量 Release amount of TN//mg	释放量占比 Proportion of released amount//%	底泥 TP 量 TP amount of sediment mg	释放 TP 量 Release amount of TP//mg	释放量占比 Proportion of released amount//%
汤逊湖 Tangxun Lake	4 268	6.43	0.15	201	4.57	2.27
南湖 South Lake	784	5.55	0.71	421	5.03	1.19
墨水湖 Moshui Lake	671	7.93	1.18	351	2.06	0.59

3 结论

(1) 夏季环境下各湖泊底泥样本向上覆水中释放的氮主要以 NO_3^- -N 的形式存在,墨水湖底泥向上覆水中释放的氮最多,有较强的释放能力;南湖底泥向上覆水中释放的磷最多,有较强的释放能力。在未来的治理计划中可针对各湖泊不同的释放特点进行针对性治理。

(2) 各湖泊底泥具备释放潜力的氮磷元素占比具有不同特征,最终呈现出的释放总量不一定由不同湖泊底泥间的氮磷总量简单决定。此次试验中向上覆水释放的氮磷含量仅占底泥氮磷总量的极少部分,说明汤逊湖、南湖和墨水湖底泥均具有较大的氮磷释放潜力,这也是导致各湖泊富营养化的主因之一。

参考文献

[1] WU Z, LIU Y, LIANG Z Y, et al. Internal cycling, not external loading, decides the nutrient limitation in eutrophic lake: A dynamic model with temporal Bayesian hierarchical inference [J]. *Water research*, 2017, 116: 231-240.

[2] 陈平, 倪龙琦. 河湖底泥中氮磷迁移转化的研究进展 [J]. *徐州工程学院学报(自然科学版)*, 2020, 35(2): 60-66.

[3] 张茜, 冯民权, 郝晓燕. 上覆水环境条件对底泥氮磷释放的影响研究 [J]. *环境污染与防治*, 2020, 42(1): 7-11.

[4] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范 [M]. 2 版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 219.

[5] 黄伟惠. 中国水环境溶解氧基准与标准初步研究 [D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2021.

[6] 杜明普, 王红丽, 刘康福, 等. 生态渔业养殖模式下汤逊湖鱼产力估算及对内源污染的影响 [J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(2): 278-282.

[7] YU P P, WANG J F, CHEN J G, et al. Successful control of phosphorus release from sediments using oxygen nano-bubble-modified minerals [J]. *Sci-*

ence of the total environment, 2019, 663: 654-661.

从表 3 可以看出,该试验中各湖泊底泥氮磷累计释放量仅占表层底泥氮磷含量的极少部分,显然低于潜在可释放的氮磷总量。大量可释放的氮磷留存在底泥中,形成内源污染,使得湖泊水质情况难以好转,持续呈现富营养化。通过 2016—2020 年武汉水务局发布的武汉市水资源公报^[20-24]可知,汤逊湖水质条件为 V 类,中度富营养化,水质变化稳定;南湖水质条件仍为劣 V 类,中度富营养化;墨水湖水质条件由劣 V 类转为 V 类,中度富营养化,水质有所好转。这说明底泥中大量富集的氮磷营养盐对湖泊环境的治理仍形成较大阻碍。

[8] 史静, 于秀芳, 夏运生, 等. 影响富营养化湖泊底泥氮、磷释放的因素 [J]. *水土保持通报*, 2016, 36(3): 241-244.

[9] 周成, 杨国录, 陆晶, 等. 河湖底泥污染物释放影响因素及底泥处理的研究进展 [J]. *环境工程*, 2016, 34(5): 113-117, 94.

[10] 王红, 阮爱东, 徐浩. 太湖氨化功能菌群的分布及其有机氮降解条件 [J]. *河南科学*, 2019, 37(3): 439-446.

[11] 陶玉炎, 耿金菊, 王荣俊, 等. 环境条件变化对河流沉积物“三氮”释放的影响 [J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(S1): 41-44, 78.

[12] 王圣瑞, 焦立新, 金相灿, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物总氮、可交换态氮与固定态氮的赋存特征 [J]. *环境科学学报*, 2008, 28(1): 37-43.

[13] 贾艳乐, 贾飞虎, 马慧杰, 等. 白洋淀上覆水氮磷浓度对沉积物氮磷释放的影响 [J]. *中国环境管理干部学院学报*, 2019, 29(3): 89-93.

[14] 韩宁, 郝卓, 徐亚娟, 等. 江西香溪流域干季交替下底泥氮释放机制及其对流域氮输出的贡献 [J]. *环境科学*, 2016, 37(2): 534-541.

[15] 王圣瑞, 金相灿, 焦立新. 不同污染程度湖泊沉积物中不同粒级可转化态氮分布 [J]. *环境科学研究*, 2007, 20(3): 52-57.

[16] 赵宝刚, 张夏彬, 咎逢宇, 等. 不同湖泊表层沉积物氮形态的分布特征与影响因素 [J]. *中国环境科学*, 2021, 41(2): 837-847.

[17] 叶华香, 臧淑英, 尉文佳, 等. 南山湖沉积物磷形态时空分布特征 [J]. *环境工程*, 2019, 37(5): 105-110, 116.

[18] 马金玉, 罗千里, 王文才, 等. 华阳河湖群表层沉积物磷形态及生物有效性 [J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(12): 2962-2971.

[19] 周帆琦, 沙茜, 张维昊, 等. 武汉东湖和南湖沉积物中磷形态分布特征与相关分析 [J]. *湖泊科学*, 2014, 26(3): 401-409.

[20] 黄天荣, 易相军. 2016 年武汉市水资源公报 [R]. 武汉: 武汉市水务局, 2016.

[21] 徐照彪, 易相军. 2017 年武汉市水资源公报 [R]. 武汉: 武汉市水务局, 2017.

[22] 徐照彪, 王沫. 2018 年武汉市水资源公报 [R]. 武汉: 武汉市水务局, 2018.

[23] 徐照彪, 王沫. 2019 年武汉市水资源公报 [R]. 武汉: 武汉市水务局, 2019.

[24] 徐照彪, 王沫. 2020 年武汉市水资源公报 [R]. 武汉: 武汉市水务局, 2020.