· 创新与探索 ·

风对石臼湖底泥磷释放的影响

纪昳[1],薛宗璞[1*],柏松[1],崔岩[2],侯豪[3],周顺[1],刘树阳[1],倪莹[1],范婕[1]

(1. 江苏省南京环境监测中心,江苏　南京　210041;2. 江苏省生态环境厅第二环境监察专员办公室,江苏　无锡　214000;3. 河海大学土木与交通学院,江苏　南京　210098)

摘　要:针对长江通江浅水湖泊石臼湖低水位期总磷(TP)易超标的问题,在实测气象、水质数据的基础上定性分析风对石臼湖国考断面 TP 超标的影响,通过室内静态释放试验和动态释放试验定量分析风对底泥磷释放的影响。结果表明:低水位期风扰动下的底泥磷释放是石臼湖国考断面 TP 超标的主要原因;石臼湖底泥具有密度小、有机质占比高、含磷量高(尤其是颗粒态磷)、粉土占比高的特点,易于在扰动情况下悬浮;在静水状态下,石臼湖底泥能维持较稳定的磷吸附-释放平衡,释放量在±2 mg/(m^2·d)范围,扰动会显著促进其再悬浮磷释放,释放量 > 15 mg/(m^2·d);石臼湖夏季水位一般为 7 m,当风速超过 6.3 m/s 时,国考断面 TP 超标风险显著上升。

关键词:磷;风生流;预警指标;底泥;浅水湖泊;石臼湖

中图分类号:X131.2;X524　　**文献标志码**:B　　**文章编号**:1006-2009(2025)06-0088-06

Impact of Wind on Phosphorus Release from the Sediments in Shijiu Lake

JI Yi[1], XUE Zongpu[1*], BAI Song[1], CUI Yan[2], HOU Hao[3], ZHOU Shun[1], LIU Shuyang[1], NI Ying[1], FAN Jie[1]

(1. *Jiangsu Nanjing Environmental Monitoring Center*, *Nanjing*, *Jiangsu* 210041, *China*; 2. *Office of the Second Environmental Inspector*, *Department of Ecology and Environment of Jiangsu Province*, *Wuxi*, *Jiangsu* 214000, *China*; 3. *College of Civil and Transportation Engineering*, *Hohai University*, *Nanjing*, *Jiangsu* 210098, *China*)

Abstract: To address the issue of total phosphorus(TP) concentration exceeding the standard during low water level period of Shijiu Lake, a shallow lake connected to the Yangtze River, this study qualitatively analyzed the impact of wind on TP concentration exceeding the standard in the national monitoring sections in Shijiu Lake based on measured meteorological and water quality data, and quantitatively analyzed the influence of wind-induced disturbances on TP release from sediments according to the static and dynamic release tests in the laboratory. The results showed that wind was the main reason for phosphorus release from sediments, which led to TP concentration exceeding the standard in the national monitoring sections during the low water level period of Shijiu Lake. The sediments in Shijiu Lake were characterized by low density, high proportion of organic matter, high phosphorus content(especially in granular form), high proportion of silt, and were prone to suspension under the influence of wind. Under windless conditions, the adsorption-release of phosphorus in sediments in Shijiu Lake could maintain a relatively stable equilibrium, with a release amount of ±2 mg/(m^2·d). Wind-induced disturbances could significantly promote sediments resuspension and phosphorus release, with a release amount exceeding 15 mg/(m^2·d). The water level of Shijiu Lake was generally 7 m in summer. When the wind speed exceeded 6.3 m/s, the risk of TP concentration exceeding the standard in national monitoring sections increased significantly.

收稿日期:2024-08-15;**修订日期**:2025-09-11

基金项目:国家重点研发计划基金资助项目(2022YFC3204400)

作者简介:纪昳(1988—),女,江苏镇江人,高级工程师,本科,研究方向为理化检验分析。

* **通信作者**:薛宗璞 E-mail: xzp_hhu@163.com

Key words: Phosphorus; Wind-driven current; Early warning indicator; Sediments; Shallow lake; Shijiu Lake

磷在湖泊生态系统中扮演着重要的角色,既是水生生物生长所需的营养元素,又是造成富营养化的主要因素之一[1]。湖泊底泥(尤其是表层沉积物)是磷循环的活跃区域,磷在底泥中的吸附-释放过程对湖泊的总磷(TP)浓度有显著影响[2],尤其是在外源磷输入受到控制的情况下,内源磷释放可能成为湖泊 TP 变化的主要驱动因素。我国东部湖泊底泥磷含量的研究表明,超过 50% 的样品 TP 测定值 > 500 mg/kg,TP 平均值为 574 mg/kg[3],高磷含量底泥的磷释放可能增加上覆水的磷负荷,加剧水体的富营养化风险。

湖泊上覆水-底泥界面磷吸附-释放过程受复杂因素的共同影响,涵盖物理、化学、生物、地球化学等因素。上覆水-底泥界面的磷循环主要包括 5 个过程:①基于底泥间隙水与上覆水之间溶解性磷的浓度梯度所产生的扩散释放作用,该过程遵循 Fick 定律,具体表现为溶解性磷从浓度较高的底泥间隙水向上覆水扩散迁移[4];②底泥表面因氧化还原反应、吸附/解吸、离子交换等作用导致磷进入上覆水的化学释放机制,该过程受溶解氧(DO)、氧化还原电位、pH 值等因素的影响[5];③吸附磷或富含磷的底泥颗粒在水流扰动作用下发生再悬浮进入上覆水的过程[6];④吸附磷的颗粒及颗粒态磷以颗粒的方式沉降[6];⑤浮游生物生长繁殖、底栖生物活动等生物过程驱动形成的上覆水-底泥界面磷循环[7]。

石臼湖位于江苏安徽两省交界,其湖心为国考断面,低水位时期存在 TP 超标的问题。今在石臼湖气象、水质实测数据的基础上,探究风对浅水湖泊底泥-水磷循环影响的机理,通过室内试验明确风对石臼湖底泥磷释放的影响,并提出相应的预警指标,以期为石臼湖国考断面水质稳定保持优良水平提供参考。

1　数据与方法

1.1　研究区域及历史数据

1.1.1　研究区域

石臼湖为浅水型湖泊,位于水阳江下游入江尾闾的右岸,湖区年平均降水量 1 196.5 mm,其水位受降水和长江水位影响较大,存在明显的季节变化,高水位一般出现在夏秋,低水位出现在春冬。石臼湖高水位时面积约 207 km^2,当蛇山水文站水位低于 5 m 时,石臼湖大面积处于干涸或湿地状态。水位和水域面积的变化造成石臼湖的天然湿地类型动态转换,水位高时以湖泊为主体,水深在 1 m~4 m 范围内波动,水位低时形成河道、草洲、泥滩、沼泽等多种湿地景观格局,整个湖盆呈现年际间规律性的周期性变化。

1.1.2　历史数据

于 2021—2023 年在石臼湖省界湖心监测断面监测获得 TP 质量浓度、蛇山水文站的水位,以及风场数据。监测流程满足《地表水自动监测技术规范(试行)》(HJ 915—2017)的要求,并利用 SPSS 20.0 对 TP 和风速的关系进行 Spearman 相关性分析。

1.2　室内试验

1.2.1　泥柱采集及理化性质分析

2024 年 3 月 11 日于石臼湖省界湖心断面(E118.9°,N31.5°)使用柱状采泥器采集泥柱,并采集原位上覆水,用于后续的室内底泥释放试验。样品采集时,确保样品柱中可见清晰的泥水分界面,采集的完整底泥柱状样品高度超过 40 cm。同时,对上覆水和底泥的理化指标(TP 质量浓度、有机质含量、孔隙率、密度、含水率、粒径分布)进行同步监测。

1.2.2　静态释放试验

参照相关研究[6],于 2024 年 3 月 13 日—4 月 1 日在实验室内开展连续 20 d 的底泥静态磷释放试验。将底泥样品置于内径 10 cm、高 50 cm 的释放试验专用有机玻璃柱内。将原位上覆水通过 0.45 μm 滤膜过滤去除悬浮颗粒物,利用蠕动泵缓慢地将水样加注至有机玻璃柱中,避免水样加入对底泥产生扰动,提高试验的精确性。

在连续试验的前 3 天,每隔 4 h 在有机玻璃柱内取 100 mL 上覆水分析 TP 和溶解性总磷(DTP),并使用抽滤后的原位湖水进行补充。在连续试验的后 17 天,每隔 8 h 在有机玻璃柱内取 100 mL 的上覆水监测 TP 和 DTP,并使用抽滤后的原位湖水进行补充。每次取水时均同步监测水温及 DO,并保持室温恒定。

1.2.3　动态释放试验

参照相关研究[8]，以紊流动能（TKE）作为衡量风生流扰动强弱的指标，于 2024 年 3 月 13 日—4 月 1 日在实验室内开展连续 20 d 的底泥动态磷释放试验。试验中设置低扰动组（TKE = 30 cm^2/s^2）、中扰动组（TKE = 100 cm^2/s^2）和高扰动组（TKE = 150 cm^2/s^2），分析扰动强度变化对石臼湖底泥中磷释放-吸附的影响，探究不同风速下石臼湖底泥的磷循环规律。在释放试验专用有机玻璃柱中加入特制的电机格栅，通过不同的转速定量控制扰动强度[9]。参照相关研究中风速与浅水湖泊 TKE 的转换公式[10]，低、中、高扰动组对应的风速分别为 3.5 m/s、5.5 m/s、7.0 m/s。在 20 d 的连续试验中，取样时间、监测指标均与静态释放试验保持一致。

1.3　底泥磷释放-吸附能力的计算

通过室内试验可以得到特定环境条件下的底泥磷释放-吸附能力，参考相关研究将其量化为释放量 R[11]，R 值的大小代表其释放/吸附磷的能力，即每平方米的底泥每天释放/吸附磷的质量。当 R 值为正时，代表底泥向上覆水中释放磷，反之则为吸附磷。考虑到取样可能造成释放试验专用有机玻璃柱内上覆水的损失，R 的计算公式如下：

$$R = \frac{\sum (V_0 - \sum V_{n-1})(C_n - C_{n-1})}{A_0 \times T_0} \qquad (1)$$

式中：R 为底泥磷释放-吸附能力，mg/(m^2 · d)；V_0 为初始上覆水的体积，L；V_{n-1} 为试验期间 $n-1$ 次取样的体积，L；C_n、C_{n-1} 分别为试验期间 n 次、$n-1$ 次取样的 TP 质量浓度，mg/L；A_0 为底泥面积，m^2；T_0 为取样间隔时间，d。

1.4　TP 超标风险的风速范围计算

通过动态释放试验得到 R 和 TKE，采用 Nearest Neighbor 的方法构建 R 和 TKE 的拟合函数关系式，基于风速和石臼湖 TKE 的转换公式[10]将其转化为 $R(x)$ 和风速的拟合函数关系式，$R(x)$ 为随 TKE 变化的底泥磷释放-吸附能力函数。为利用风速变化预测石臼湖省界湖心断面 TP 超标的概率，本研究提出以下两项假设：①石臼湖各处底泥磷释放-吸附能力保持一致；②石臼湖水量与水位变化成正比。根据 $R(x)$ 和风速的拟合函数关系式，结合以上假设，分析不同风速和水位条件下石臼湖全湖底泥释放的磷负荷量，进而根据石臼湖的蓄水量，将其换算为对应的 TP 质量浓度。以 0.05 mg/L 作为 TP 的超标阈值，计算在不同水位条件下，因底泥磷释放导致上覆水 TP 超标的风速范围。其计算公式如下：

$$F(x) = F\left[\frac{(0.05 - C) \times V}{R(x) \times A \times T}\right] \qquad (2)$$

式中：$F(x)$ 为低水位期石臼湖 TP 超标预警的日均风速阈值与水位的复合函数，其中 x 为石臼湖水位，m；C 为石臼湖 2021—2023 年 TP 平均值，取 0.02 mg/L；V 为石臼湖湖水体积，由石臼湖面积乘以水深得到，L；A 为石臼湖面积，m^2；T 为时间，取 1 d。

2　结果与讨论

2.1　石臼湖 TP 的变化

2.1.1　TP 超标情况

2021—2023 年对国考断面石臼湖省界湖心共开展月度监测 18 次，其中出现 5 次 TP 质量浓度超标，分别为 2021 年 5 月、11 月、12 月，以及 2023 年 6 月、8 月。结合石臼湖蛇山水文站的水位变化分析可以发现，TP 超标均发生在湖区水位快速上升时期和低水位时期。

石臼湖是通江湖泊，水位快速上升主要是由于长江来水补给。长江水 TP 质量浓度一般 > 0.05 mg/L，通江湖泊在涨水期往往会因江水携带大量外源磷进入而造成 TP 超标，洞庭湖[12]和鄱阳湖[13]均出现过类似的情况。在石臼湖涨水期对环湖河道 TP 监测分析发现，石臼湖入湖水的 TP 质量浓度虽然基本达到或优于《地表水环境质量标准》（GB 3838—2002）河流Ⅲ类标准，但仍高于湖、库Ⅲ类标准，说明涨水期石臼湖的 TP 超标主要是外源输入引起。在低水位期，石臼湖入湖河道流量很小，该时期底泥磷释放应是国考断面 TP 超标的主要原因。

2.1.2　低水位期 TP 超标与风速的相关性分析

在石臼湖低水位期（蛇山水文站水位 < 7 m、水深 < 2 m），入湖河道流量很小，内源磷释放应是主要影响因素。关于低水位期 TP 超标时段，利用石臼湖省界湖心断面水质自动监测站的数据，对 TP 浓度与风速开展相关性分析。结果表明，低水位期石臼湖 TP 浓度与风速呈显著正相关关系（P < 0.05）。2023 年 7 月 27 日—29 日石臼湖省界湖心断面出现自 2021 年以来最严重的连续 TP 超标情

况,该时段的逐小时风速均在 7 m/s 以上,说明强风促进了石臼湖底泥磷释放。同时,对低水位期省界湖心断面水质监测自动站提供的 TP 浓度与浊度开展相关性分析。结果表明,低水位期石臼湖 TP 浓度与浊度呈显著正相关关系($P<0.05$),从侧面说明当石臼湖 TP 浓度超标时,颗粒态磷可能占据主导地位。

2.2　室内试验结果

2.2.1　石臼湖底泥的理化性质

石臼湖底泥表观为黑褐色,有明显的泥水分界面,密度为 1.14 g/cm^3 ~ 1.28 g/cm^3,最接近泥-水界面的表层底泥(0 cm~5 cm)密度为 1.25 g/cm^3;孔隙率为 76%~81%,表层底泥孔隙率为 79%。从底泥的密度和孔隙率来看,密度较低、孔隙率较大。石臼湖省界湖心的底泥有机质占比为 7.1% ~ 9.3%,表层底泥有机质占比为 7.2%。石臼湖历史上长期是草型湖泊,近年向藻型湖泊转变,底泥的有机质含量较高,且早期沉积层中底泥的有机质含量更高。石臼湖省界湖心的底泥 TP 测定值为 426 mg/kg ~ 579 mg/kg,表层底泥 TP 测定值为 514 mg/kg。相关研究表明,当表层底泥磷测定值超过 500 mg/kg 时,即存在一定条件下向上覆水释放磷,造成上覆水 TP 快速上升,促进藻类大量繁殖,破坏水体生态平衡,引发湖泊生态系统富营养化的风险[14]。石臼湖省界湖心的底泥以粉土为主,占比为 44% ~ 70%,表层粉土占比最高。相关研究表明,长江下游流域湖库底泥的粉土一般由石英、长石、云母、碳酸钙(石灰岩碎屑)、钙镁矿物、铁氧矿物、硫化物矿物等组成,其显著特点是对水中磷酸根的吸附能力弱,发生沉淀(磷酸钙沉淀)反应的能力强[15]。因此,磷易以颗粒态形式在湖底沉积,当底泥受到扰动时易发生再悬浮,导致上覆水 TP 浓度升高。

综上所述,石臼湖省界湖心底泥存在密度小、有机质占比高、含磷量高(尤其是颗粒态磷)、粉土占比高的特点,易于在扰动情况下悬浮,对上覆水 TP 造成不利影响。

2.2.2　静态释放试验结果

石臼湖省界湖心断面底泥静态释放试验结果表明,释放量 R 变化范围为 −4.0 mg/(m^2·d) ~ 1.97 mg/(m^2·d),主要集中在 ±2 mg/(m^2·d)范围内,见图 1(a)。说明石臼湖省界湖心底泥存在较稳定的释放-吸附平衡,正常情况下不会向水中大量释放磷。之前调查中发现存在明显底泥磷释放的湖泊,如太湖竺山湾[7]、南四湖[16]等,其静态释放试验的平均释放量均稳定在 5 mg/(m^2·d)以上。分析试验期间的 DO 和水温变化,发现 DO 质量浓度大多维持在 6 mg/L 左右,水温在试验期间也保持稳定,见图 1(b)。底泥中吸附在铁氧化物上的磷在释放时会大量消耗水中的 DO,在静态释放试验中,上覆水 DO 始终未出现显著下降,表明试验过程中底泥未向上覆水中释放磷从而消耗氧气。

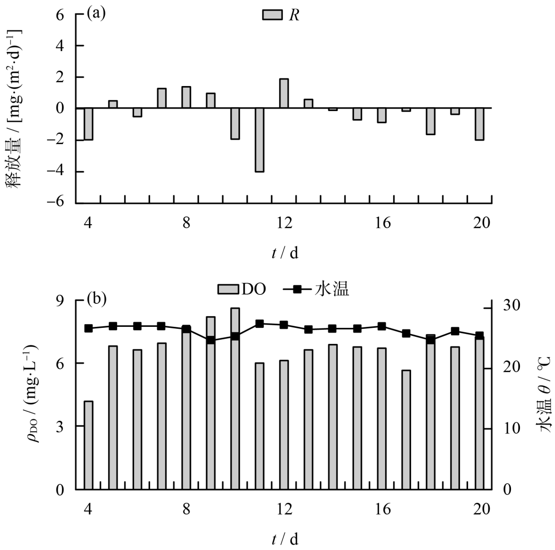

图 1　石臼湖底泥静态释放试验结果

Fig. 1　Static test results of phosphorus release from sediment in Shijiu Lake

2.2.3　动态释放试验结果

石臼湖省界湖心断面底泥动态释放试验结果表明,风浪扰动会显著破坏石臼湖底泥的磷吸附-释放平衡。低、中、高扰动组的平均释放量 R 分别达到 15 mg/(m^2·d)、25 mg/(m^2·d)、37 mg/(m^2·d),见图 2(a)。上覆水 TP 浓度上升可能是因为水体扰动造成底泥颗粒物再悬浮,进而使其中的磷以颗粒态的形式大量释放。从试验期间的 DO 变化来看,与静态释放试验一致,未出现显著的 DO 降低,水温在试验期间也保持稳定,见图 2(b),表明扰动未影响底泥-水界面的氧化还原反应。

入湖河流携带的颗粒物与湖泊内浮游植物、浮游动物形成的颗粒物在湖泊中共同通过沉降进入底泥。在沉降过程中,这些颗粒物携带的无机磷和

有机磷也随之进入底泥。然而,受风浪等水体扰动影响,沉积在底泥表面的颗粒物易发生再悬浮,导致颗粒态磷和部分溶解态磷重新进入水体。该现象在浅水湖泊中尤为显著,被称为“再悬浮释放”[17],对湖泊磷循环和上覆水 TP 具有重要影响。风生流等水动力作用于湖底,当剪切和紊动作用超过底泥中颗粒物保持的稳定临界值时,颗粒物会被剥离底床[18]。频繁的动力扰动使得底泥表层成为物质交换的活跃层,活跃层中不断发生底泥颗粒物的悬浮与沉降,沉积物中的溶解态磷和颗粒态磷易随底泥悬浮而释放进入上覆水体[6]。石臼湖底泥密度低、以粉土为主的特点也决定了其对扰动的敏感性。随着水动力作用的减弱,从沉积物中再悬浮的颗粒物将逐步恢复沉降。扰动发生后,再悬浮颗粒随水动力减弱而逐渐沉降至底泥表面,在下一次风浪来临时再发生悬浮。再悬浮颗粒在沉降过程中将其携带的磷从水中输送至底泥表层,导致上覆水 TP 浓度显著降低[19]。

从低水位期石臼湖省界湖心断面 TP 浓度与风速的关系来看,尽管遭遇强风时 TP 会显著增加,但是当风速减小时,TP 会很快下降,表明石臼湖省界湖心断面的 TP 增加主要由于风扰动引起的颗粒磷再悬浮,而非底泥在氧化还原反应条件下释放的溶解态磷所致。

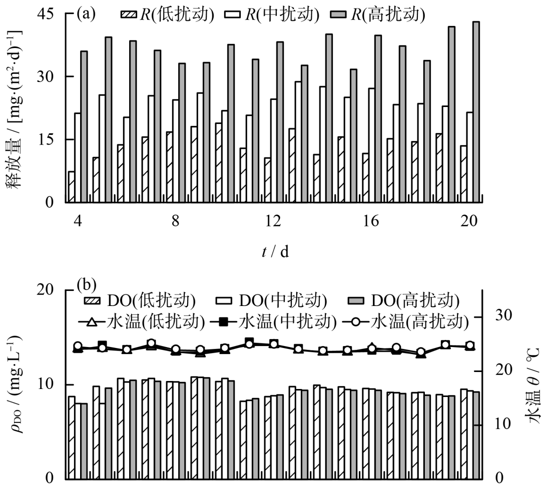

图 2　石臼湖底泥动态释放试验结果

Fig. 2　Dynamic test results of phosphorus release from sediment in Shijiu Lake

2.3　TP 超标风险的风速范围

根据 1.4 中 R 和风速的拟合函数关系式[10,20],得到在不同水位下底泥磷释放开始时(即 $R>0$)对应的瞬时风速,计算公式如下:

$$y_0 = 0.55x^{1.5} - 5.9 \tag{3}$$

式中:y_0 为底泥磷释放的启动风速,m/s;x 为石臼湖的水位,m。

根据室内试验数据和历史数据,通过分析公式(2),得到在不同水位条件下断面日均 TP 超标预警风速,数值解析式为:

$$y_1 = 0.41x^{1.8} - 6.9 \tag{4}$$

式中:y_1 为断面 TP 预警的日均风速,m/s;x 为石臼湖的水位,m。

综上,根据历史数据和室内试验结果得到不同水位下石臼湖 TP 超标的预警风速,见图 3。石臼湖夏季水位一般能达到 7 m,此时扰动湖底产生底泥磷释放的风速阈值是 4.2 m/s。当日均风速超过 6.3 m/s 时,国考断面 TP 超标风险显著上升。

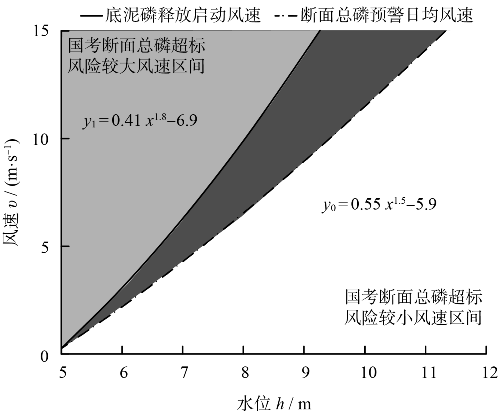

图 3　TP 超标风险的风速范围

Fig. 3　Wind speed range causing TP concentration exceeding the standard

3　结论

(1)低水位期,石臼湖入湖河道流量较小,风扰动下的底泥磷释放是该时期石臼湖国考断面 TP 超标的主要原因。

(2)石臼湖底泥具有密度小、有机质占比高、含磷量高(尤其是颗粒态磷)、粉土占比高的特点,易于在扰动情况下悬浮,对上覆水 TP 造成不利影响。

(3)在静水状态下,石臼湖省界湖心的底泥能

维持较稳定的磷吸附-释放平衡，释放量在 ±2 mg/(m^2·d)范围内，不会向上覆水大量释放磷。扰动会显著促进石臼湖底泥的磷释放，造成颗粒磷大量向水中再悬浮释放，释放量超过 15 mg/(m^2·d)。

(4)根据室内试验和历史数据建立了低水位期石臼湖 TP 超标预警的风速阈值与水位的关系，石臼湖夏季水位一般能达到 7 m 左右，当风速超过 6.3 m/s 时，国考断面 TP 超标风险显著上升。

[参考文献]

[1] 张艳会，朱红云，李冰. 指标动态权重对湖泊水生态系统健康评价影响研究[J]. 环境监测管理与技术，2022，34(5)：16-21.

[2] 张明，唐访良，程新良，等. 千岛湖沉积物中碳、氮、磷的分布特征及污染评价[J]. 环境监测管理与技术，2024，36(2)：38-43.

[3] ZHANG W Q，JIN X，MENG X，et al. Phosphorus control：Inadequate attention was paid in Eastern China[J]. ACS ES & T Water，2024，4(7)：2772-2774.

[4] ZHOU Y W，WANG H X，ZHANG Y L，et al. Availability and diffusion kinetic process of phosphorus in the water-sediment interface assessed by the high-resolution DGT technique [J]. Journal of Soils and Sediments，2021，21：3274-3288.

[5] YUAN H Z，LI Q，KUKKADAPU R K，et al. Identifying sources and cycling of phosphorus in the sediment of a shallow freshwater lake in China using phosphate oxygen isotopes[J]. Science of the Total Environment，2019，676：823-833.

[6] 秦伯强，胡维平，高光，等. 太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式[J]. 科学通报，2003，48(17)：1822-1831.

[7] 范成新，张路，包先明，等. 太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及定量化——2.磷释放的热力学机制及源-汇转换[J]. 湖泊科学，2006，18(3)：207-217.

[8] 李一平，逢勇，吕俊，等. 水动力条件下底泥中氮磷释放通量[J]. 湖泊科学，2004，16(4)：318-324.

[9] JUN Y，NI J R. Sediment-copper distributions in hyper-concentrated turbulent solid-liquid system[J]. Journal of Environmental Sciences，2007，19(1)：123-127.

[10] MACKENZIE B R，LEGGETT W C. Wind-based models for estimating the dissipation rates of turbulent energy in aquatic environments：empirical comparisons[J]. Marine Ecology Progress Series，1993，94：207-216.

[11] WU Y H，WEN Y J，ZHOU J X，et al. Phosphorus release from lake sediments：Effects of pH，temperature and dissolved oxygen [J]. KSCE Journal of Civil Engineering，2014，18(1)：323-329.

[12] TIAN Z B，ZHENG B H，WANG L J，et al. Effects of river-lake interactions in water and sediment on phosphorus in Dongting Lake，China[J]. Environmental Science and Pollution Research，2017，24：23250-23260.

[13] LIU W，QIN T，WU M T，et al. Analyzing the phosphorus flow characteristics in the largest freshwater lake (Poyang Lake) watershed of China from 1950 to 2020 through a bottom-up approach of watershed-scale phosphorus substance flow model[J]. Water Research，2023，245：120546.

[14] DING S M，CHEN M S，GONG M D，et al. Internal phosphorus loading from sediments causes seasonal nitrogen limitation for harmful algal blooms[J]. Science of the Total Environment，2018，625：872-884.

[15] TANG X Y，ZENG S D，HUANG P，et al. Geochemistry characteristics of sediment phosphorus in a typical area prone to deposition in the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Hydrology：Regional Studies，2024，52：101728.

[16] 王志齐，李宝，梁仁君，等. 南四湖内源氮磷释放的对比研究[J]. 环境科学学报，2013，33(2)：487-493.

[17] TAMMEORG O，NIEMISTÖ J，MÖLS T，et al. Wind-induced sediment resuspension as a potential factor sustaining eutrophication in large and shallow Lake Peipsi[J]. Aquatic Sciences，2013，75：559-570.

[18] TANG C Y，LI Y P，HE C，et al. Dynamic behavior of sediment resuspension and nutrients release in the shallow and wind-exposed Meiliang Bay of Lake Taihu[J]. Science of the Total Environment，2020，708：135131.

[19] LIJKLEMA L. Nutrient dynamics in shallow lakes：effects of changes in loading and role of sediment-water interactions [J]. Hydrobiologia，1994，275：335-348.

[20] EGHBALI S，ASHTIANI H，TAHVILDARI L. Online nearest neighbor search using hamming weight trees[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence，2019，42(7)：1729-1740.