

城镇水系统研究与应用

孟英杰, 康兴生, 孙建璋, 等. 氮磷污染河湖底泥疏浚深度判定方法[J]. 净水技术, 2025, 44(5): 159-166.

MENG Y J, KANG X S, SUN J Z, et al. Determination method of dredging depth of nitrogen and phosphorus contaminated sediments in rivers and lakes [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(5): 159-166.

氮磷污染河湖底泥疏浚深度判定方法

孟英杰^{1,2,*}, 康兴生^{1,2}, 孙建璋^{1,2}, 范洪凯^{1,2}, 黄丽珠^{1,2}, 周国锋^{1,2}

(1. 山东省环科院环境工程有限公司, 山东济南 250100; 2. 山东省环境保护科学研究设计院有限公司, 山东济南 250100)

摘 要 【目的】河湖底泥环保疏浚深度的判定方法并无统一标准,且现有的方法各有其优势及短板。文章旨在探讨提出一种快速、准确且适用于河流及浅水湖泊的氮磷污染底泥疏浚深度判定方法。【方法】基于上覆水成分对底泥氮磷释放影响规律的研究,在现有疏浚深度判定方法的基础上进行优化和改进,提出一种氮磷污染底泥疏浚深度判定新方法,即“基于拐点修正的吸附解吸平衡法”,并在某河道拟疏浚区进行新旧方法的对比与验证。【结果】上覆水污染浓度越高,底泥氮磷释放强度越低。同等浓度条件下,自然水体中底泥释放强度大于人工配制水样。经对比测试,新方法与传统吸附解吸平衡法及拐点法所得出的判定结论相似,且比传统吸附解吸平衡法减少 85% 的测试化验量。【结论】“基于拐点修正的吸附解吸平衡法”综合了拐点法和传统吸附解吸平衡法的优势,经过方法改进可更好地模拟自然水体环境,大幅减少试验分析化验数量,是一种快速、准确的氮磷污染底泥疏浚深度判定方法。在实际工程应用中,应综合考虑水文特性、水体功能规划、工期要求等进行疏浚深度判定方法的选择。

关键词 底泥疏浚 疏浚深度 氮磷释放 吸附解吸 拐点

中图分类号: X52 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)05-0159-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.05.017

Determination Method of Dredging Depth of Nitrogen and Phosphorus Contaminated Sediments in Rivers and Lakes

MENG Yingjie^{1,2,*}, KANG Xingsheng^{1,2}, SUN Jianzhang^{1,2}, FAN Hongkai^{1,2}, HUANG Lizhu^{1,2}, ZHOU Guofeng^{1,2}

(1. Shandong Huankeyuan Environmental Engineering Co., Ltd., Jinan 250100, China;

2. Shandong Academy of Environmental Science Co., Ltd., Jinan 250100, China)

Abstract [Objective] There is no unified standard for determining the environmental dredging depth of river and lake sediments, and existing method each have their own advantages and limitations. This study aims to propose a rapid, accurate, and applicable method for determining the dredging depth of nitrogen and phosphorus polluted sediments in rivers and shallow lakes. [Methods] Based on research into the influence law of overlying water composition on nitrogen and phosphorus release from sediments, this study optimized and improved existing dredging depth determination method. A new method for determining the dredging depth of nitrogen and phosphorus polluted sediment was proposed, which named "adsorption and desorption equilibrium method based on inflection point modification", and compared verified by collected samples from a planned dredging area of a river. [Results] The result showed that the higher the concentration of overlying water was, the lower the nitrogen and phosphorus release intensity of the sediment would be. Under the same concentration condition, the release intensity of the sediment in natural water was greater than that of the artificially configured water sample. Through comparing testing, the conclusion of the new method was similar to that obtained by the traditional

[收稿日期] 2023-09-18

[基金项目] 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2020CXGC011406)

[通信作者] 孟英杰(1991—),女,硕士研究生,研究方向为水生态污染治理与修复,E-mail:mengyingjiesdu@163.com。

adsorption and desorption method and the inflection point method, and the new method saved 85% of the testing amount compared with the traditional adsorption and desorption method. [Conclusion] This new method combines the advantages of the inflection point method and the traditional adsorption-desorption equilibrium method. Through method improvements, it better simulates natural water environments and significantly reduces the number of required experimental analyses, making it a rapid and accurate approach for determining dredging depth in nitrogen and phosphorus polluted sediments. In practical engineering applications, factors such as hydrological characteristics, water body function planning, and project schedule requirements should be comprehensively considered when selecting a dredging depth determination method.

Keywords sediment dredging dredging depth nitrogen and phosphorus release adsorption and desorption inflection point

底泥是河流湖泊等众多水体生态系统的重要组成部分,其对营养盐、有机质、重金属等污染物的蓄积作用,使水体具有较强的抗冲击负荷能力,表现为较高的水环境容量^[1]。但底泥中所积累的污染物质,在一定条件下会通过物理解吸、生物分解等作用重新释放,成为水体污染的内源物质,导致水体富营养化甚至黑臭、重金属含量超标等^[2-3]。随着水体污染治理力度的不断加大,与水体水质密切相关的底泥内源污染治理也越来越得到人们的关注^[4]。

底泥环保疏浚是水环境改善的重要工程措施,其可从源头直接切断内源污染释放,处理效率高,不受底泥理化性质、污染程度、污染物形态等因素影响,因此在河湖污染治理工程中被广泛采用^[5-7]。其中,疏浚深度是决定疏浚工程造价和治理效果的关键指标之一,合理地确定污染底泥疏浚深度,可避免欠挖引起的持续污染,也可避免超挖引起的高工程成本及后续处置等问题^[8-9]。

目前,关于河湖底泥环保疏浚深度的判定方法,国内外并没有统一的标准。针对氮、磷及有机污染的底泥,主要有以下3类方法:一类为沉积层法、拐点法和背景值法等直接比对方法,这类方法主要将柱状底泥样品按沉积学特性或污染物含量分层,结合背景值进行疏浚深度的判断。宋倩文^[10]通过分析底泥总磷含量的垂向分布拐点,判定梅梁湾疏浚深度为17 cm。该类方法简单直观,但仅以污染物含量或底泥物理性质作为判断依据,主观性介入强,未考虑底泥污染物在自然水体中的迁移行为,结果难免不够准确;第二类为分层释放法,主要是通过底泥静态释放试验获取污染物释放速率,建立污染物释放速率与相应的污染物含量的关系,并根据所划分的相应释放风险等级,确定底泥疏浚深度。该类方法在我国湖泊疏浚研究和工程中得到广泛应用,龚春生^[11]通过分层模拟释放试验研究,分析得出南

京玄武湖湖边和湖心的疏浚深度分别为25 cm和15 cm。但相比于水文条件较稳定的湖泊,河流尤其是北方季节性河流的流量、流速及水位均不稳定,汛期存在闸坝放水、暴雨冲刷等情况,相应的底泥扰动、悬浮与再沉淀等行为比湖泊更剧烈,因此该类方法中采用的释放试验并不完全适用于河流疏浚,且释放试验测试周期较长^[12]。第三类为吸附解吸平衡法,主要通过配制含不同浓度梯度污染物的模拟水体进行吸附解吸平衡试验,找到吸附解吸平衡浓度大于上覆水要求氮、磷浓度的底泥层,相应的底泥厚度为环保疏浚深度。马永刚等^[13]在太原汾河示范段应用了氮、磷吸附解吸法,确定了其有效疏浚深度为1.6 m。该类方法适用于河流环保疏浚,且疏浚深度计算比较精细,然而其试验测试数量过大,在实际工程勘察设计阶段并不适用。此外,吸附解吸平衡试验采用的是实验室配制的标准溶液,标准溶液与自然水体成分及水质特点差异较大。

现有的疏浚深度判定方法各有优势,为我国过去环保疏浚工程的实施起到了积极的指导作用,同时也在应用过程中显示出不同的短板^[14-15]。因此,针对氮磷污染底泥,结合上覆水成分等因素影响底泥释放特性研究,在现有疏浚深度判定方法的基础上,本文进行了方法优化和改进,提出1种快速、准确且适用于河流及浅水湖泊的氮磷污染底泥疏浚深度判定方法,即“基于拐点修正的吸附解吸平衡法”,并进行对比验证。

1 材料与方法

1.1 底泥样品来源与采集

底泥释放影响规律研究所用底泥采集于山东省南四湖二级坝附近,由于长期的营养盐积累以及受航运的影响,该区域湖水总氮和总磷浓度均高于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅴ类标准,经检测 pH 值为 8.02,总氮质量浓度为

4.5 mg/L,总磷质量浓度为 0.22 mg/L,氨氮质量浓度为 0.21 mg/L。该区域表层底泥中总氮质量分数为 5.55 g/kg,总磷质量分数为 1.04 g/kg,有机质质量分数为 6.90 g/kg。

表层底泥的采集使用箱式采泥器,柱状底泥样品的采集使用柱状采泥器,并将底泥样品现场进行分割。所采集底泥样品用聚乙烯封口袋密封,于 0~4 ℃ 下保存,当天运回实验室,经冷冻干燥、过 100 目筛后储存备用。同时采集上覆水样品,运回实验室后,经 0.45 μm 滤膜过滤、加入氯仿后于 4 ℃ 下保存备用。

1.2 底泥释放试验

本研究主要考察上覆水成分对底泥释放行为的影响。实验室内使用氯化铵和磷酸二氢钾配制氨氮和总磷符合相应标准浓度的模拟Ⅲ类地表水(Ⅲ-RG)和Ⅳ类地表水(Ⅳ-RG),氨氮质量浓度分别为 1.0 mg/L 和 1.50 mg/L,总磷质量浓度分别为 0.05 mg/L 和 0.10 mg/L。此外,将采集于南四湖二级坝点位的上覆水原水(YS)进行稀释和加药处理,配制得到总磷和氨氮符合相应标准浓度的Ⅲ类地表水(Ⅲ-YS)和Ⅳ类地表水(Ⅳ-YS),南四湖上覆水氨氮浓度偏低,故在纯水添加氯化铵来制备。

针对采集的表层底泥,设置 5 组试验,分别称取干燥底泥 20 g,置于烧杯中,每组试验分别加入 YS、Ⅲ-YS、Ⅳ-YS、Ⅲ-RG、Ⅳ-RG 水样各 2 L。在恒温扰动模式中,将烧杯置于磁力搅拌器上,设置转速为 140 r/min,温度为 25 ℃。试验从第 0 h 开始,分别于第 4、6、12、24、48 h 取水样 50 mL,经 0.45 μm 滤膜过滤后,立即测上覆水中氨氮和总磷的含量,或置于 4 ℃ 密封保存统一检测。底泥污染物吸附/解吸量计算如式(1)。

$$Q = (C_n - C_0) V / M \quad (1)$$

其中: Q ——单位质量底泥污染物吸附/解吸量,mg/kg,正值代表解吸状态,负值代表吸附状态;

C_n ——第 n 次采样时溶液中污染物质量浓度,mg/L;

C_0 ——溶液中污染物初始质量浓度,mg/L;

V ——溶液体积,L;

M ——底泥质量,kg。

1.3 传统吸附解吸平衡法

(1)采集柱状底泥样品并按 10 cm 进行切割分层,同时采集上覆水样品,样品运回实验室后进行预处理。(2)用氯化铵分别配制不同氨氮浓度的模拟水,同时采集上覆水,按水土比为 100:1 置于摇瓶中,在 25 ℃ 下,恒温振荡 2~4 h,以 5 000~10 000 r/min 的转速离心 10 min,上清液过 0.45 μm 纤维滤膜后,测定氨氮浓度。以上处理设置 2 个平行样,要求相对离均差小于 5%。(3)用磷酸二氢钾分别配制不同磷浓度的模拟水,同时采集上覆水,按水土比为 100:1 置于摇瓶中,在 25 ℃ 下,恒温振荡 24~48 h,以 5 000~10 000 r/min 的转速离心 10 min,上清液过 0.45 μm 纤维滤膜后,测定总磷浓度。以上处理设置 2 个平行样,要求相对离均差小于 5%。(4)计算单位质量底泥氨氮和总磷的吸附/解吸量。(5)建立初始浓度与吸附/解吸量线性回归方程,找出底泥既不吸附也不释放的氮、磷零点平衡浓度,与疏浚后达标的水质类别比较。当某一深度底泥的零点平衡浓度大于目标水质类别时,底泥对水质有释放风险,评价为影响水质的污染底泥层,反之,当某一深度底泥的零点平衡浓度小于目标水质类别时,对水体中氨氮、磷呈现吸附作用,评价为正常底泥层,该临界点以上深度为底泥的疏浚深度。

1.4 基于拐点修正的吸附解吸平衡法

(1)采集柱状底泥样品并按 10 cm 进行切割分层,同时采集上覆水样品,样品运回实验室后进行预处理。(2)测试各层底泥中总氮、总磷的含量,绘制底泥氮磷垂向分布曲线,获取污染物含量出现明显转折的拐点,若不同污染物拐点位置不同,则取最大值,若同一污染物出现 1 个以上的拐点,则需考虑疏浚可行性、经济性、其他污染物拐点位置等来最终确定拐点位置。根据上述拐点位置,确定底泥吸附解吸试验的范围,即拐点层向上 2 层至向下 2 层,共 5 层,50 cm 底泥。(3)根据河流水质监测控制断面要求、水质提升要求等确定水体治理目标要求的氨氮浓度(O_N)、总磷浓度(O_P),在上覆水中添加纯净水或氯化铵/磷酸二氢钾药剂,将上覆水调配至目标浓度 O_N 、 O_P 的试验水样 1[#] 和 2[#]。(4)每层底泥取 0.5 g 置于 100 mL 容量的锥形瓶中,分别加入 1[#] 试验水样 50 mL,恒温振荡[(25±1)℃,250 r/min] 2 h,离心(5 000 r/min) 10 min,上清液过 0.45 μm 纤维滤膜后,测定氨氮浓度。每层底泥取 0.5 g 置

于 100 mL 容量的锥形瓶中,分别加入 2[#] 试验水样 50 mL,恒温振荡[(25±1)℃, 250 r/min] 48 h,离心 (5 000 r/min) 10 min,上清液过 0.45 μm 纤维滤膜后,测定总磷浓度。以上处理均设置 3 个平行样,取平均值,平行试验结果的相对离均差小于 5%。(5) 根据式(2) 计算单位质量底泥氨氮和总磷的吸附/解吸量,分别绘制氨氮、总磷的吸附/解吸量垂向分布。若 Q 为正值,则底泥为解吸(释放) 污染物状态,若 Q 为负值,则底泥为吸附污染物状态;若某一深度以上底泥中某污染物存在解吸状态,以下各层底泥中各污染物均为吸附状态时,则将该深度认定为理论环保疏浚深度。

$$Q = (C_e - C_0) V / M \quad (2)$$

其中: C_e ——溶液中污染物平衡质量浓度, mg/L。

1.5 水质及底泥指标测定分析方法

底泥样品总氮测定采用过硫酸钾-紫外法,总磷采用高氯酸-硫酸消煮钼蓝比色法,水样总磷测定采用钼锑抗分光光度法,氨氮测定采用纳氏试剂法^[16]。

2 结果与讨论

2.1 底泥释放影响规律研究

上覆水污染物浓度对底泥氮、磷释放速率的影响如图 1 所示。由图 1(a) 可知,不同上覆水条件下,底泥中氨氮的释放动态变化趋势基本一致,均表现为初期快速释放,后期相对平稳释放,但各上覆水间释放幅度存在差异。对比 YS (0.21 mg/L)、Ⅲ-

YS (1.00 mg/L)、Ⅳ-YS (1.50 mg/L) 条件下氨氮的释放量,在其他试验条件相同时,上覆水中氨氮浓度越高,底泥氨氮的释放量越少,在 4 h 时,YS 条件底泥氨氮释放量为 42.5 mg/kg,约为Ⅳ-YS 条件下氨氮释放量的 5.6 倍。同样,对比图 1(b) 中 YS (0.22 mg/L)、Ⅲ-YS (0.05 mg/L)、Ⅳ-YS (0.10 mg/L) 条件下总磷的释放,在其他试验条件相同时,上覆水中磷浓度越低,底泥总磷的释放量越大,且随着时间的延长,上覆水中总磷浓度趋于平衡,底泥总磷的释放速率也逐渐降低。在 48 h 时,YS 条件底泥总磷释放量为 20.7 mg/kg,约为Ⅲ-YS 条件下总磷释放量的 58%。在人工配制的Ⅲ-RG、Ⅳ-RG 条件下,底泥氮、磷的释放也存在相同规律。因此,上覆水污染物浓度影响底泥的释放行为,通常污染浓度越高,释放量越低。

此外,自然水体和人工配制的上覆水对底泥内源释放影响的表现不同。对比图 1(b) 中Ⅲ-YS 和Ⅲ-RG 以及Ⅳ-YS 和Ⅳ-RG 上覆水条件下的总磷释放量,相同的污染物浓度条件下,自然水体条件的总磷释放量略大于人工配制水样。这与上覆水成分有关,推测原上覆水中含有多种微生物成分,可参与底泥中磷的分解、转化与释放。钱燕等^[17] 发现,上覆水中微生物可改变泥水界面的氧化还原点位,且代谢产物可溶解底泥中难溶的磷酸盐,从而促进底泥磷的释放。同样自然上覆水中存在的硝化、反硝化细菌等对底泥中的氮元素发挥着不同的作用,但对比图 1(a) 中Ⅲ-YS 和Ⅲ-RG 以及Ⅳ-YS 和Ⅳ-RG 上覆水条件下的氨氮释放量,自然水体和人工配制的

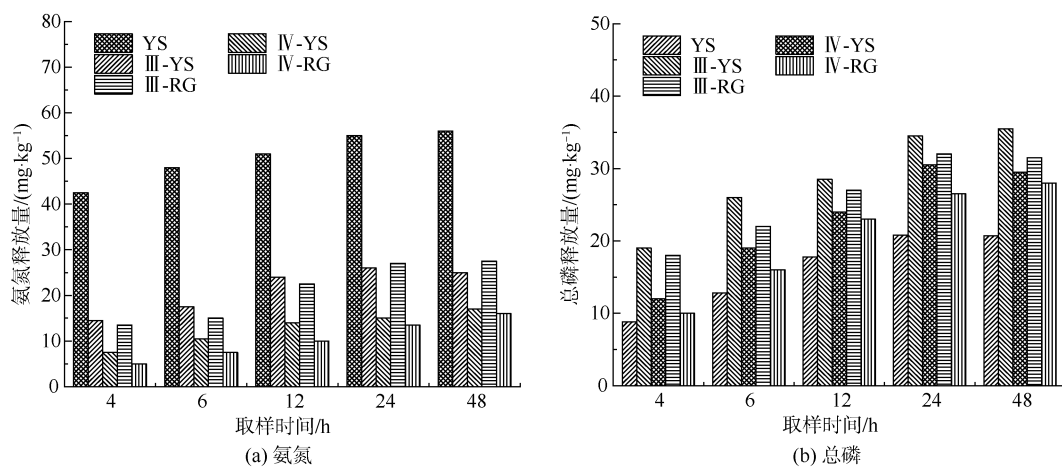


图 1 不同上覆水条件下底泥污染物释放量

Fig. 1 Release Amount of Sediment Pollutants under Different Overlying Water Conditions

水样数据相似,这与原上覆水氨氮浓度过低有关,在自然水体基础上配制的Ⅲ-YS和Ⅳ-YS与人工配制的水样成分相差不大。

由上述试验可知,自然水体成分复杂,富营养化底泥氮、磷的释放行为受其影响。基于此结论,对传统吸附解吸疏浚深度判定方法进行优化改进,主要创新之处在于采用原上覆水调配试验水样代替磷酸二氢钾/氯化铵溶液,更好地模拟实际水环境条件,此外通过拐点法快速锁定需进行吸附解吸试验的底泥范围,减少测试化验量,提高效率,具体步骤详见1.4小节。

2.2 底泥疏浚深度判定方法验证试验研究

本研究在临沂武河某疏浚工程段布点采集柱状样品,以单个点位为例进行拐点法、传统吸附解吸平衡法及基于拐点修正的吸附解吸平衡法的验证对比。

2.2.1 拐点法

该点位采集的底泥柱状样品深度为1 m,现场按0.1 m间距进行分割,预处理后进行污染物含量检测。底泥中总氮和总磷含量垂向分布情况如图2所示。由图2可知,总氮和总磷质量分数的拐点均出现在0.4~0.5 m,该点位的综合清淤深度为0.5 m。

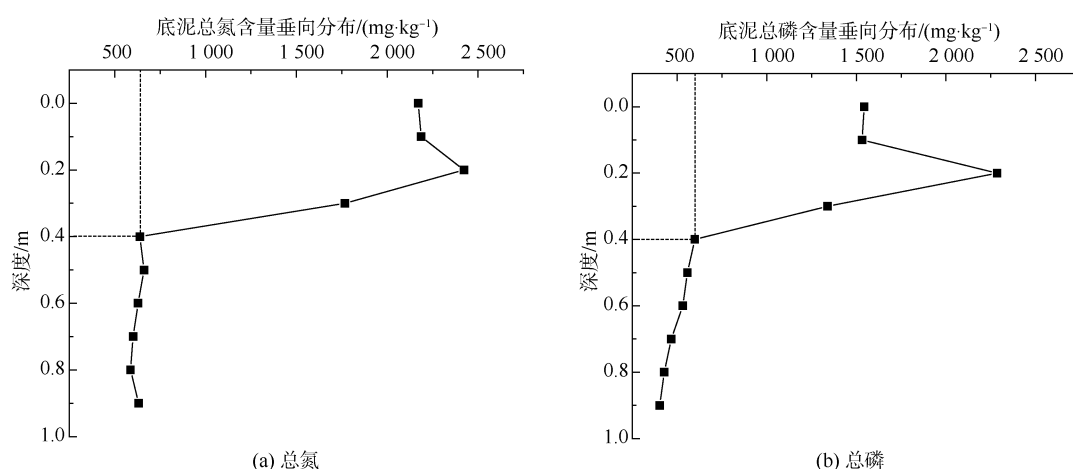


图2 底泥污染物含量垂向分布

Fig. 2 Vertical Distribution of Sediment Pollutants Content

2.2.2 传统吸附解吸平衡法

采用传统吸附解吸平衡法进行试验,并以污染物初始浓度与吸附/解吸量建立线性回归方程,可得每层底泥污染物吸附/解吸零点平衡浓度,以表层底泥为例,如图3所示。

不同深度底泥样品污染物吸附/解吸零点平衡浓度垂向变化如图4所示,相关吸附解吸特征如表1所示。由图4可知,氨氮和总磷的零点平衡浓度在0.2~0.3 m处最大,后随着深度的增加,呈现逐渐降低的趋势。该处河流水质管控要求为Ⅳ类,即

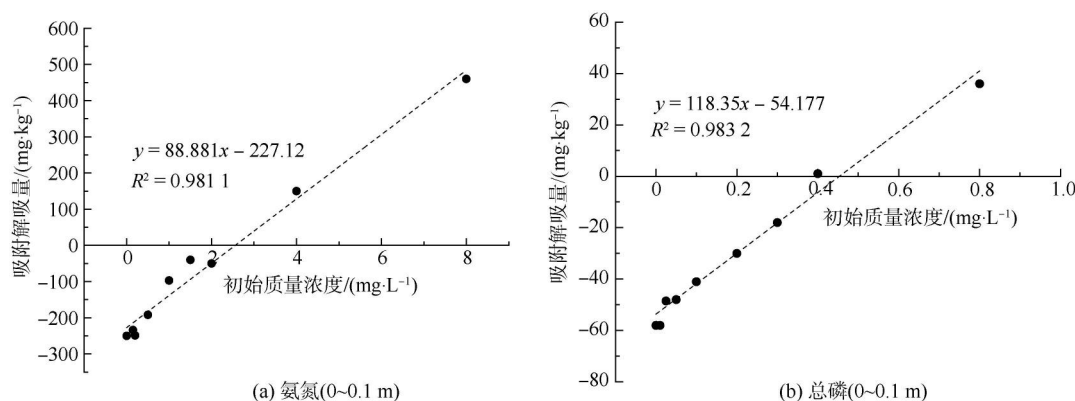


图3 表层底泥污染物吸附/解吸特征曲线

Fig. 3 Pollutants Adsorption/Desorption Characteristics Curve of Surface Sediments

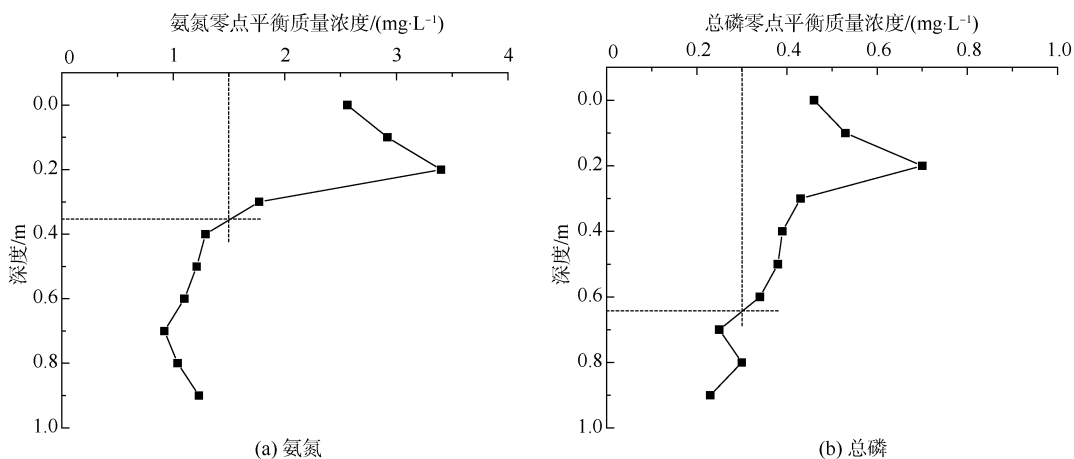


图4 底泥样品污染物吸附/解吸零点平衡浓度垂向分布

Fig. 4 Vertical Distribution of Zero Equilibrium Concentration of Pollutants Adsorption/Desorption in Sediment Samples

表1 底泥柱状样品污染物吸附/解吸特征统计

Tab. 1 Statistical Analysis of Pollutants Adsorption/Desorption Characteristics of Sediment Column Samples

取样深度/m	氨氮零点平衡质量浓度/(mg·L ⁻¹)	水质治理后类别(氨氮)	底泥状态	总磷零点平衡质量浓度/(mg·L ⁻¹)	水质治理后类别(总磷)	底泥状态	治理目标类别
0~0.1	2.56	劣V	释放	0.46	劣V	释放	IV
0.1~0.2	2.92	劣V	释放	0.53	劣V	释放	IV
0.2~0.3	3.40	劣V	释放	0.70	劣V	释放	IV
0.3~0.4	1.77	V	释放	0.43	劣V	释放	IV
0.4~0.5	1.29	IV	吸附	0.39	V	释放	IV
0.5~0.6	1.21	IV	吸附	0.38	V	释放	IV
0.6~0.7	1.10	IV	吸附	0.34	V	释放	IV
0.7~0.8	0.92	IV	吸附	0.25	IV	吸附	IV
0.8~0.9	1.04	IV	吸附	0.30	IV	吸附	IV
0.9~1.0	1.23	IV	吸附	0.23	IV	吸附	IV

氨氮质量浓度不高于 1.5 mg/L,总磷质量浓度不高于 0.3 mg/L。因此,以氨氮和总磷进行判定,氨氮疏浚深度(H_N)、总磷疏浚深度(H_P)分别为 0.4、0.7 m,该点位的综合清淤深度为 0.7 m。

2.2.3 基于拐点修正的吸附解吸平衡法

由拐点法可知,总氮、总磷质量分数垂向分布拐点均为 0.5 m,因此,选择 0.2~0.3、0.3~0.4、0.4~0.5、0.5~0.6、0.6~0.7 m 5 层底泥为下一步试验用泥。

该段河水 pH 值为 7.72,总氮质量浓度为 1.45 mg/L,总磷质量浓度为 0.33 mg/L,氨氮质量浓度为 0.43 mg/L,水质类别为《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) V 类。根据检测结果,将原上覆

水稀释 1.1 倍得总磷质量浓度为 0.3 mg/L 的 IV 类水,另将原水与 50 mg/L 的氨氮标准溶液按比例混合,得氨氮质量浓度为 1.5 mg/L 的 IV 类水。

氨氮和总磷的吸附解吸试验结果如图 5 所示,底泥在 0.4~0.5 m 层及以下深度,氨氮为吸附状态,在 0.5~0.6 m 层及以上深度,总磷为解吸状态。因此, H_N 、 H_P 分别为 0.4、0.6 m,该点位的综合清淤深度为 0.6 m。

2.2.4 方法对比分析

3 种疏浚深度判定方法的测试数量及判定结果如表 2 所示,3 种方法判定的疏浚深度分别为 0.5、0.7 m 和 0.6 m,结论不一致但基本相似。多项研究^[18-19]表明,底泥中氮磷污染物的吸附解吸平衡浓

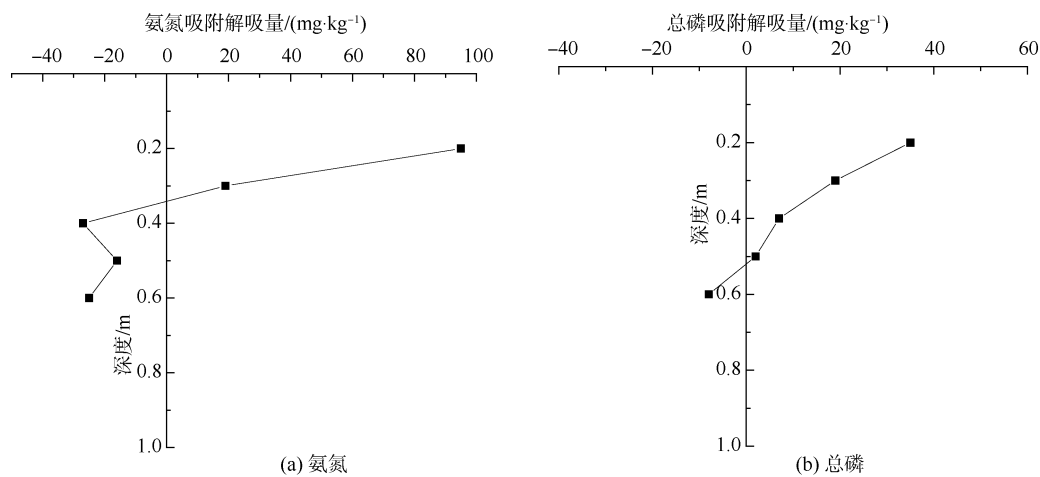


图5 底泥污染物吸附/解吸量垂向分布

Fig. 5 Vertical Distribution of Sediment Pollutant Adsorption/Desorption Amount

度与其含量呈显著正相关,这与本研究的测试结论 200次和30次,新方法比传统吸附解吸平衡法可节省85%的测试化验量。

表2 3种疏浚深度判定方法测试量及判定结果对比

Tab. 2 Comparison of Test Quantity and Result of Three Dredging Depth Determination Methods

方法名称	试验测试量/次				判定结果/m
	底泥-总氮	底泥-总磷	水-氨氮	水-总磷	
拐点法	10	10	0	0	0.5
传统吸附解吸平衡法	10	10	90	90	0.7
基于拐点修正的吸附解吸平衡法	10	10	5	5	0.6

综合对比上述3种疏浚深度判定方法。基于拐点修正的吸附解吸平衡法采用原上覆水调配的试验水样进行试验,可更好地模拟实际水环境条件,且通过拐点法快速明确吸附解吸试验的底泥范围,显著降低了测试化验量。

3 结论

- (1)上覆水污染物浓度及水质成分等均会影响底泥中氮磷的释放行为。通常,上覆水污染浓度越高,释放量越低;相同的污染物浓度条件下,底泥在自然水体条件下的氮、磷释放量略大于人工配制水样。
- (2)基于拐点修正的吸附解吸平衡法综合了拐点法和传统吸附解吸平衡法的优势,经过方法改进可更好地模拟自然水体环境,大幅减少试验分析化验数量,是1种快速、准确的氮磷污染底泥疏浚深度判定方法。
- (3)在实际工程中,应综合考虑水文特性、水体功能规划、工期要求等进行疏浚深度判定方法的选择。

参考文献

[1] ZHONG J C, YOU B S, FAN C X, et al. Influence of sediment dredging on chemical forms and release of phosphorus [J]. Pedosphere, 2008, 18(1): 34-44.

[2] 徐进, 徐力刚, 龚然, 等. 鄱阳湖沉积物中磷吸附释放特性及影响因素研究[J]. 生态环境学报. 2014, 23(4): 630-635.

XU J, XU L G, GONG R, et al. Adsorption and release characteristics of phosphorus and influential factors in Poyang Lake sediment[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(4): 630-635.

[3] 孙即梁, 田旭, 董家晏, 等. 原位固化技术在河道底泥资源化建设生态护岸中的应用[J]. 净水技术, 2022, 41(s1): 226-230, 295.

SUN J L, TIAN X, DONG J Y, et al. Application of in-situ curing technology in the construction of ecological bank protection by river substrate resource utilization [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(s1): 226-230, 295.

[4] 王磊, 向甲甲, 殷瑶, 等. 河道底泥重金属的含量特征与潜在生态风险[J]. 净水技术, 2020, 39(10): 162-167, 172.

WANG L, XIANG J J, YIN Y, et al. Content characteristics and

- potential ecological risks of heavy metals in river sediment[J]. *Water Purification Technology*, 2020, 39(10): 162–167, 172.
- [5] 范成新, 钟继承, 张路, 等. 湖泊底泥环保疏浚决策研究进展与展望[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(5): 1254–1277.
FAN C X, ZHONG J C, ZHANG L, et al. Research progress and prospect of environmental dredging decision-making of lake sediment[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(5): 1254–1277.
- [6] 路文典, 龚浩, 徐超. 黑臭水体底泥调查分析及达标清淤量研究[J]. *水资源开发与管理*, 2022, 8(3): 43–49.
LU W D, GONG H, XU C. Investigation and analysis of sediment in black and odorous water body and study on dredging amount up to standard[J]. *Water Resources Development and Management*, 2022, 8(3): 43–49.
- [7] 张建华, 殷鹏, 张雷, 等. 底泥疏浚对太湖内源及底栖生物恢复的影响[J]. *环境科学*. 2023, 44(2): 828–838.
ZHANG J H, YIN P, ZHANG L, et al. Effects of sediment dredging on the reduction in sediment internal loading of Lake Taihu and the self-recovery ability of benthic organism [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(2): 828–838.
- [8] 周铭浩, 邱静, 洪昌红, 等. 水体内源污染及环保疏浚措施研究[J]. *江西水利科技*. 2019, 45(4): 290–294, 312.
ZHOU M H, QIU J, HONG C H, et al. Research of internal pollution and environmental dredging [J]. *Jiangxi Hydraulic Science & Technology*, 2019, 45(4): 290–294, 312.
- [9] 夏文林, 黄伟. 黑臭水体综合治理工程中河道底泥清淤深度的确定[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(6): 44–47.
XIA W L, HUANG W. Determination on dredging depth of river sediment in the comprehensive treatment project of black and odorous water bodies [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(6): 44–47.
- [10] 宋倩文. 太湖沉积物磷形态空间分布的研究及其环保疏浚范围的确定[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
SONG Q W. The distribution of phosphorus fractions in the sediments in Taihu Lake and the range of dredging[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013.
- [11] 龚春生. 城市小型浅水湖泊内源污染及环保清淤深度研究——以南京玄武湖为例[D]. 南京: 河海大学, 2007.
GONG C S. Study on small urban shallow lake inner pollution source and environmental dredging depth: Taking Lake Xuanwuhu in Nanjing as the research object [D]. Nanjing: Hohai University, 2007.
- [12] 朱红伟, 尚晓, 张坤, 等. 疏浚水流扰动作用下的河道底泥污染物释放效应[J]. *净水技术*, 2014, 33(2): 81–85.
ZHU H W, SHANG X, ZHANG K, et al. Effects of pollutants release from river sediment under hydro-dredging disturbance conditions[J]. *Water Purification Technology*, 2014, 33(2): 81–85.
- [13] 马永刚, 程瑾, 励彦德. 氮、磷吸附/解吸法确定环保疏浚深度方法探讨——以太原汾河示范段为例[J]. *环境工程技术学报*, 2020, 10(3): 392–399.
MA Y G, CHENG J, LI Y D. Discussion on the way of determining environmental dredging depth based on nitrogen and phosphorus adsorption-desorption method: Taking the demonstration section of Fenhe River in Taiyuan as an example [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, 10(3): 392–399.
- [14] 余居华, 钟继承, 张银龙, 等. 湖泊疏浚对沉积物再悬浮及磷迁移影响的模拟研究[J]. *环境科学*, 2012, 33(10): 3368–3375.
YU J H, ZHONG J C, ZHANG Y L, et al. Influence of dredging on sediment resuspension and phosphorus transfer in lake: A simulation study [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(10): 3368–3375.
- [15] 陈建民, 李东灵, 肖合顺, 等. 城市黑臭河道底泥内源污染控制的固化与稳定化技术[J]. *净水技术*, 2020, 39(8): 154–159, 166.
CHEN J M, LI D L, XIAO H S, et al. Technology of solidification and stabilization of internal pollution control for urban black and odorous river sediments [J]. *Water Purification Technology*, 2020, 39(8): 154–159, 166.
- [16] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration The *Water and Wastewater Monitoring Analysis Method* Editorial Board. *Water and Wastewater monitoring analysis method* [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [17] 钱燕, 陈正军, 吴定心, 等. 微生物活动对富营养化湖泊底泥磷释放的影响[J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(4): 35–40.
QIAN Y, CHEN Z J, WU D X, et al. Effects of microorganisms on phosphorus release from sediment of eutrophic lake [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(4): 35–40.
- [18] 王雯雯, 姜霞, 王书航, 等. 太湖竺山湾污染底泥环保疏浚深度的推算[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(6): 1013–1018.
WANG W W, JIANG X, WANG S H, et al. Calculation of environmental dredging depth of contaminated sediments in Zhushan Bay of Taihu Lake [J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(6): 1013–1018.
- [19] 周亚婷, 陈兴宏, 李立青, 等. 基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度[J]. *环境科学*, 2021, 42(10): 4781–4788.
ZHOU Y T, CHEN X H, LI L Q, et al. Identification of dredging depths based on sediment vertical distribution profiles of total nitrogen and total phosphorus and their adsorption-desorption equilibria [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(10): 4781–4788.