

底泥氮磷释放的空间异质性及其环境驱动因素分析——以城市中小河流为例

刘陈飞^{1,2}, 陈芳¹

¹长江水利委员会水文局, 湖北 武汉

²长江水利委员会水文局科技人才创新团队, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年3月28日; 录用日期: 2025年5月4日; 发布日期: 2025年6月27日

摘要

本文选取了9条重要河道(水库)作为研究对象, 布设22个监测点位, 检测其水体和底泥的理化参数(DO、NH₄-N、TN、TP等), 并开展室内氮磷静态释放实验, 结合综合污染指数(FF)评价底泥污染程度, 运用聚类分析和Pearson相关性解析影响因素, 探讨河流底泥氮磷释放的时空特征及其关键影响因素, 以为流域内源污染治理提供依据。结果表明: 9条河流水体指标呈现显著空间异质性, 22个样本中, S22卫星水库水体DO浓度最低(0.44 mg/L), S18大溪河水体NH₄-N和TN浓度最高(分别为6.13 mg/L和8.51 mg/L), 指示严重富营养化特征; 底泥总氮的浓度在648.30~3849.63 mg/kg之间, 总磷的含量在171.25~1073.10 mg/kg之间, 含量较高, 综合污染指数(FF)显示27.3%的样本处于重度污染状态; 静态释放试验表明, R7-大溪河和R6-桥溪河的氮磷释放速率显著高于其他河流, 其中R7-大溪河的TN释放速率高达317.1 mg/(m²·d), 聚类分析显示, 底泥特性、上覆水DO、外源污染输入是影响底泥氮磷释放的主要因素。

关键词

底泥氮磷含量, 上覆水水质, 聚类分析, 底泥释放规律

Spatial Heterogeneity and Environmental Drivers of Nitrogen and Phosphorus Release from Sediments—Focusing on Small and Medium-Sized Urban Rivers

Chenfei Liu^{1,2}, Fang Chen¹

¹Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei

²Technology Talent Innovation Team, Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei

作者简介: 刘陈飞, 男, 工程师, 硕士研究生, 主要从事水文水资源分析计算、水环境综合评价分析, Email: 543611372@qq.com

文章引用: 刘陈飞, 陈芳. 底泥氮磷释放的空间异质性及其环境驱动因素分析——以城市中小河流为例[J]. 水资源研究, 2025, 14(3): 265-275. DOI: 10.12677/jwrr.2025.143028

Abstract

This study selects nine significant river channels (reservoirs) as research subjects, establishing 22 monitoring stations to assess the physicochemical parameters (such as DO, NH₄-N, TN, TP) of their water bodies and sediments. Additionally, indoor static release experiments for nitrogen and phosphorus were conducted. By utilizing the comprehensive pollution index (FF) to evaluate the level of sediment pollution, combined with cluster analysis and Pearson correlation analysis to dissect the influencing factors, this study explores the spatiotemporal characteristics and key drivers of nitrogen and phosphorus release from river sediments, aiming to provide insights for the management of endogenous pollution within watersheds. The findings revealed notable spatial heterogeneity among the water quality indicators of the nine rivers. Specifically, among the 22 samples, the S22 satellite reservoir exhibited the lowest DO concentration (0.44 mg/L), while the S18 Daxi River demonstrated the highest NH₄-N and TN concentrations (6.13 mg/L and 8.51 mg/L, respectively), indicating severe eutrophication. The total nitrogen concentration in the sediments ranged from 648.30 to 3849.63 mg/kg, and the total phosphorus content ranged from 171.25 to 1073.10 mg/kg, both of which are relatively high. According to the comprehensive pollution index (FF), 27.3% of the samples were in a state of severe pollution. Static release experiments demonstrated that the nitrogen and phosphorus release rates of the R7 Daxi River and R6 Qiaoxi River were significantly higher than those of other rivers, with the TN release rate of the R7 Daxi River reaching as high as 317.1 mg/(m²·d). Cluster analysis indicated that sediment characteristics, dissolved oxygen (DO) in the overlying water, and external pollution inputs were the primary factors influencing the release of nitrogen and phosphorus from the sediments.

Keywords

Nitrogen and Phosphorus Content in Sediment, The Quality of Overlying Water, Cluster Analysis, Release Pattern of Sediment

Copyright © 2025 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. 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

作为三峡水库库尾的重要区域,重庆市江津区的生态环境状况对库区整体生态安全具有重要影响。监测数据显示,该区域长江干流水质虽保持较好水平,但存在波动性,且支流污染问题较为突出[1]。这一现象的形成主要与快速城镇化进程密切相关,其中生活污水排放量持续增加,而配套处理设施建设相对滞后,成为主要污染因素。城镇地表径流、农业种植、畜禽养殖以及工业生产等多元污染源的叠加效应,进一步加剧了区域水环境压力[2]。

在淡水生态系统中,磷(P)作为浮游植物生长的关键限制因子,其浓度升高显著增加了水体富营养化风险[3][4]。水体中的磷主要来源于外源输入和沉积物内源释放,其中沉积物作为磷的主要储存库,承载了约90%的磷负荷[5]。浅水湖泊的富营养化治理面临显著挑战,其中沉积物磷负荷的控制尤为关键。即使外源磷得到有效削减,沉积物内源磷的释放仍可维持水体富营养化数十年[6]。研究表明,底泥中氮磷的释放受多种环境因子的影响,包括扰动、pH、溶解氧、温度和水流条件等[7]。例如,扰动强度增加会显著提高底泥中COD、TP、NH₄-N和TN的释放量,而pH为6~8时最有利于抑制污染物释放。底泥氮磷释放速率是水环境科学中的重要参数,是指底泥中氮(N)、磷(P)向上覆水体迁移的速率,其研究对水体富营养化控制、生态修复等具有重要意义。贾艳乐

[8]等采用实验室静态模拟法,揭示了白洋淀上覆水氮磷浓度与沉积物释放速率之间的负相关关系。刘卓[9]通过室内模拟实验,探讨了滇池沉积物-水界面氨氧化菌群(AOB)对氮释放通量的响应机制,发现 pH 值和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度对 AOB 群落结构具有显著影响。王志齐[10]等结合柱状沉积物采样与静态培养实验,运用间隙水分子扩散模型,系统分析了丹江口水库沉积物-水界面氮磷释放特征。

对于富营养化水体内源氮磷的释放影响因素及其贡献率仍缺乏系统性研究,尤其对中小型河流底泥氮磷释放的时空异质性及其后续针对性治理尚未形成系统性认知。现有研究多集中于单一河流或大型水系,针对城镇中小型河流的相关研究仍显不足。在长江大保护战略背景下,为了深入打好污染防治攻坚战,协同推进高质量发展和生态环境高水平保护,城市中小河流因其独特的污染特征和治理需求,正逐渐成为水环境领域的研究重点。与三峡水库采取大规模生态调度技术不同,库尾中小河流因空间受限,更依赖底泥疏浚、微生物修复等精细化治理手段,需要因地制宜开展水体内源污染治理和生态修复,增强河湖自净功能。本文以江津区水环境综合治理规划为指导,选取江津区李市小溪、石板溪、綦江、笋溪河、璧南河、桥溪河、大溪河、安家溪及卫星水库等 9 条重要河道(水库)作为研究对象。通过测定水质基本理化指标及底泥中含水率、总氮、总磷、有机质等指标,同时开展室内底泥静态模拟释放试验,评估底泥富营养化现状,并探究其氮磷释放规律,为后续黑臭水体治理提供科学依据和数据支撑。

2. 材料与方法

2.1. 样品采集

本次研究于 2023 年 6 月在江津区开展区域环境调查,选取桥溪河等 9 条典型河流(水库)作为研究对象,共布设 22 个采样点位。具体分布情况为:李市小溪布设 S1~S4 四个点位,石板溪设置 S5~S6 两个点位,綦江布设 S7~S8 两个点位(其中 S8 因故未能成功采样),笋溪河设置 S9~S11 三个点位,璧南河布设 S12~S13 两个点位,桥溪河设置 S14~S17 四个点位,大溪河布设 S18~S19 两个点位,安家溪设置 S20~S21 两个点位,卫星水库布设 S22 一个点位(具体空间分布见图 1)。采样过程中,采用多参数水质分析仪进行现场水质测定,同时使用柱状采水器和彼得森抓斗式采泥器分别采集水柱样品和表层沉积物。为确保样品的空间代表性,每个采样断面实施不少于 3 次重复采样,现场混合均匀后装入经预处理的聚乙烯样品袋,低温保存并转运至实验室,在避光通风条件下自然风干处理。

2.2. 样品处理

采集的底泥放入预先处理好(先用洗涤剂洗刷、清水漂洗、稀硝酸荡洗,再用清水冲洗干净后晾干)的塑料盘内,摊成约 3 厘米厚的薄层,选择在通风、干净和清洁的实验室内风干,防止阳光暴晒和酸碱蒸气遇尘埃的污染。样品在风干过程中,定时翻动样品,并用木棒或木锤破碎,拣出石块、螺丝、杂草和动植物的残留物等。最后,将风干的样品用玛瑙研钵研细,用尼龙网筛过筛[11] [12]。

2.3. 分析方法

采样现场用塞氏盘测定水样的透明度(SD, cm),便携式多参数分析仪(Hach HQ-30d, 美国)测定氧化还原电位(ORP, mV)、溶解氧(DO, mg/L),氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$, mg/L)、总氮(TN, mg/L)、总磷(TP, mg/L)等指标采用《水和废水监测分析方法(第四版)》[13]推荐方法分析。

底泥样品粒径分布用马尔文激光粒度分布仪分析(马尔文 MS2000, 英国),含水率、氮、磷、有机质(OM, mg/kg)等指标参考 NY/T 1121《土壤检测》系列标准[14] [15]进行分析。

2.4. 底泥污染评价方法

1) 综合污染指数法

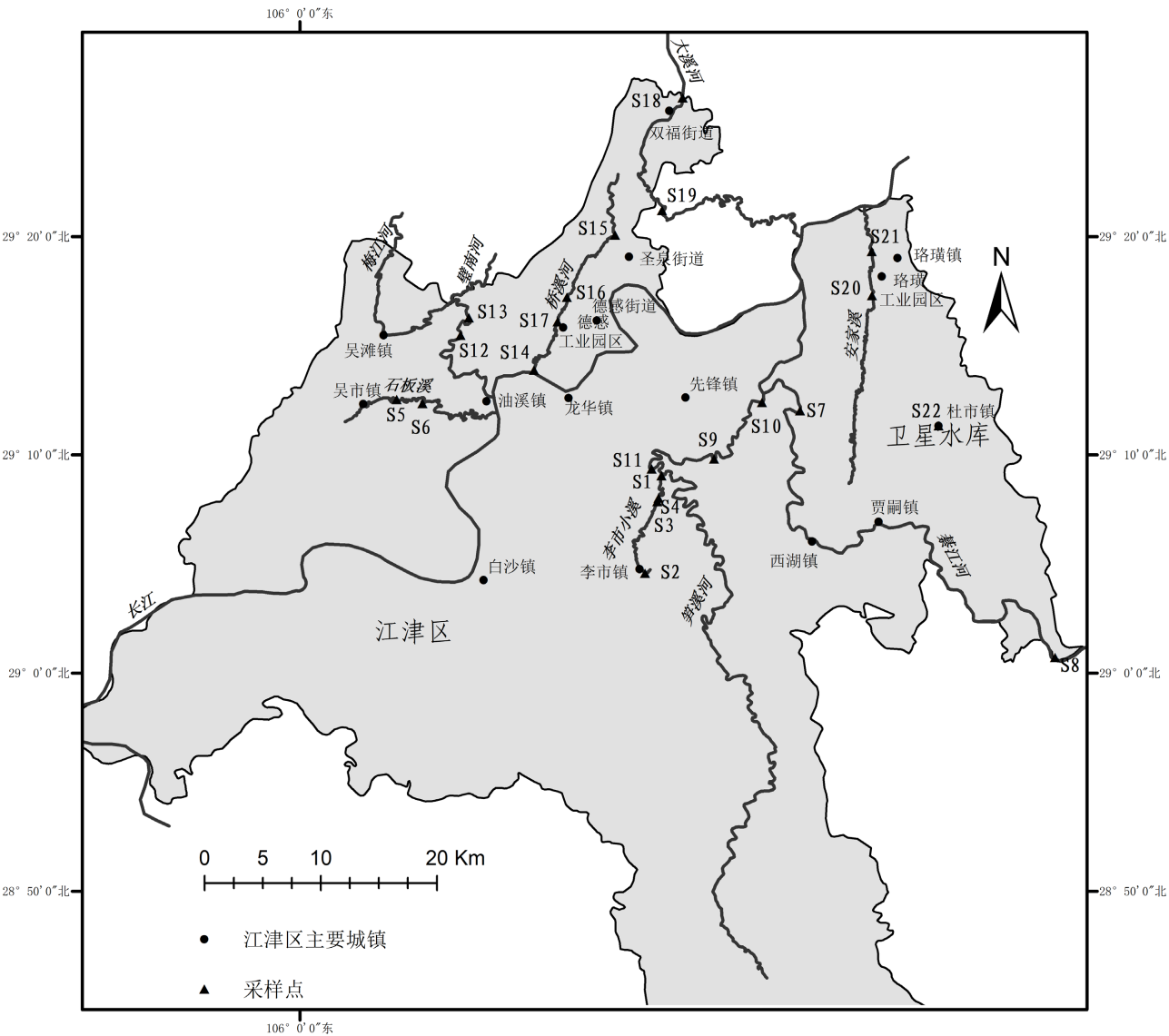


图 1. 采样点位示意图

综合考虑污染物类型及其分布特征,采用综合污染指数法及有机污染指数法对典型河流底泥中氮、磷、有机质进行污染评价。目前国际上尚无统一规定的综合污染指数阈值标准,王艳平基于加拿大安大略省基准值、1960 年太湖、美国基准值、中国东部典型湖泊基准值阈值等 4 种不同沉积物基准值的沉积物总氮、总磷污染指数评价[16],其结果在综合评价上,除加拿大安大略省基准值外,相差不大。故本文选取《中国湖泊志》1960 年太湖沉积物 TN、TP 实测值作为评价标准值(背景值) [17]。

综合污染指数计算公式为

$$S_i = \frac{C_i}{C_s} \tag{1}$$

$$FF = \sqrt{\frac{F^2 + F_{\max}^2}{2}} \tag{2}$$

式中 i : TN 指标或 TP 指标; S_i : 单项评价指数($S_i > 1$ 表示该项指标含量超过标准值); C_i : 评价指标 i 的实测值;

C_s : 评价因子 i 的评价标准值(TN 的 C_s 取 670 mg/kg, TP 的 C_s 取 440 mg/kg); FF: 综合污染指数; F : n 项污染物污染指数平均值; $F_{\max}$: 最大单项污染指数。底泥综合污染评价程度分级见表 1。

表 1. 底泥综合污染评价程度分级

等级	FF 取值范围	等级
I	$FF < 1.0$	清洁
II	$1.0 \leq FF \leq 1.5$	轻度污染
III	$1.5 < FF \leq 2.0$	中度污染

2) 有机污染指数法

有机污染指数计算公式为式(3)~(5)。

$$ON = TN(\%) \times 0.95 \quad (3)$$

$$OC = OM(\%) \div 1.724 \quad (4)$$

$$OI = OC(\%) \times ON(\%) \quad (5)$$

式中 ON: 有机氮, %; TN: 总氮; OC: 有机碳, %; OM: 有机质; OI: 有机污染指数, 有机指数评价标准见表 2。

表 2. 底泥有机指数评价标准

	$OI < 0.05$	$0.05 \leq OI \leq 0.20$	$0.20 \leq OI \leq 0.50$	$OI \geq 0.50$
类型	清洁	较清洁	尚清洁	有机氮污染
等级	I	II	III	重度污染

2.5. 底泥潜在释放速率试验

为模拟静水条件下典型河流底泥氮磷释放过程, 每条典型河道中选取现场检测溶解氧数据最低的一个布设断面进行底泥污染释放分析, 共选取 9 条河流或水库, 分别是大肚子河(R1)、石板溪(R2)、倒流溪(R3)、笋溪河(R4)、璧南河(R5)、桥溪河(R6)、大溪河(R7)、安家溪(R8)、卫星水库(R9)。释放实验采用静置释放分析, 把采集的表层底泥称重一公斤, 均匀平铺在容积为 5L 的圆柱形有机玻璃容器底部(横截面积约为 100 cm^2), 用虹吸法缓慢加入原采用点位上覆水直到注满容器, 记录加入上覆水的体积, 然后静置。静置两小时后, 每天同一时间取上覆水 50 mL, 检测总磷、总氮、氨氮、COD 含量, 连续检测 10 天, 记录所测指标含量, 计算底泥释放量。

参照《湖泊富营养化调查规范》[18], 释放速率 flux 按照下式计算:

$$R = VC_n - C_0 + \sum_{j=1}^n V_{j-1} C_{j-1} - C_a \quad (6)$$

$$\text{flux} = R_i - R_{i-1} / St \quad (7)$$

式中, R_i 为为第 i 天的累计释放量, V 为上覆水的体积, L 。 C_n 、 C_0 、 C_{j-1} 为第 n 次、第 0 次和第 $j-1$ 次采样时某物质含量, mg/L; C_a 为添加物质的含量, mg/L。 V_{j-1} 为第 $j-1$ 次采样的体积, L 。 Flux 为释放速率 $\text{mg}/(\text{m}^2\text{d})$; S 为柱样中水-沉积物接触面积, m^2 ; t 为释放时间, d ; R 为释放累积量。由于不考虑 NH_3 的水气界面交换, 所计算的 TN 为表观释放速率。

2.6. 数据处理

利用系统聚类分析(HCA)解析沉积物中氮磷释放规律。在 HCA 前, 对实验数据进行 Z-score 标准化处理,

实验数据通过了 Kaiser-Meyer-Olkin (KMO 值为 0.642 > 0.5)和 Bartlett 球形测试。上述数据分析通过 SPSS 19 和 Canoco 5 软件完成。采样点位图采用 ArcGIS 10.2 软件绘制，其余图形采用 Origin 2024 软件绘制。

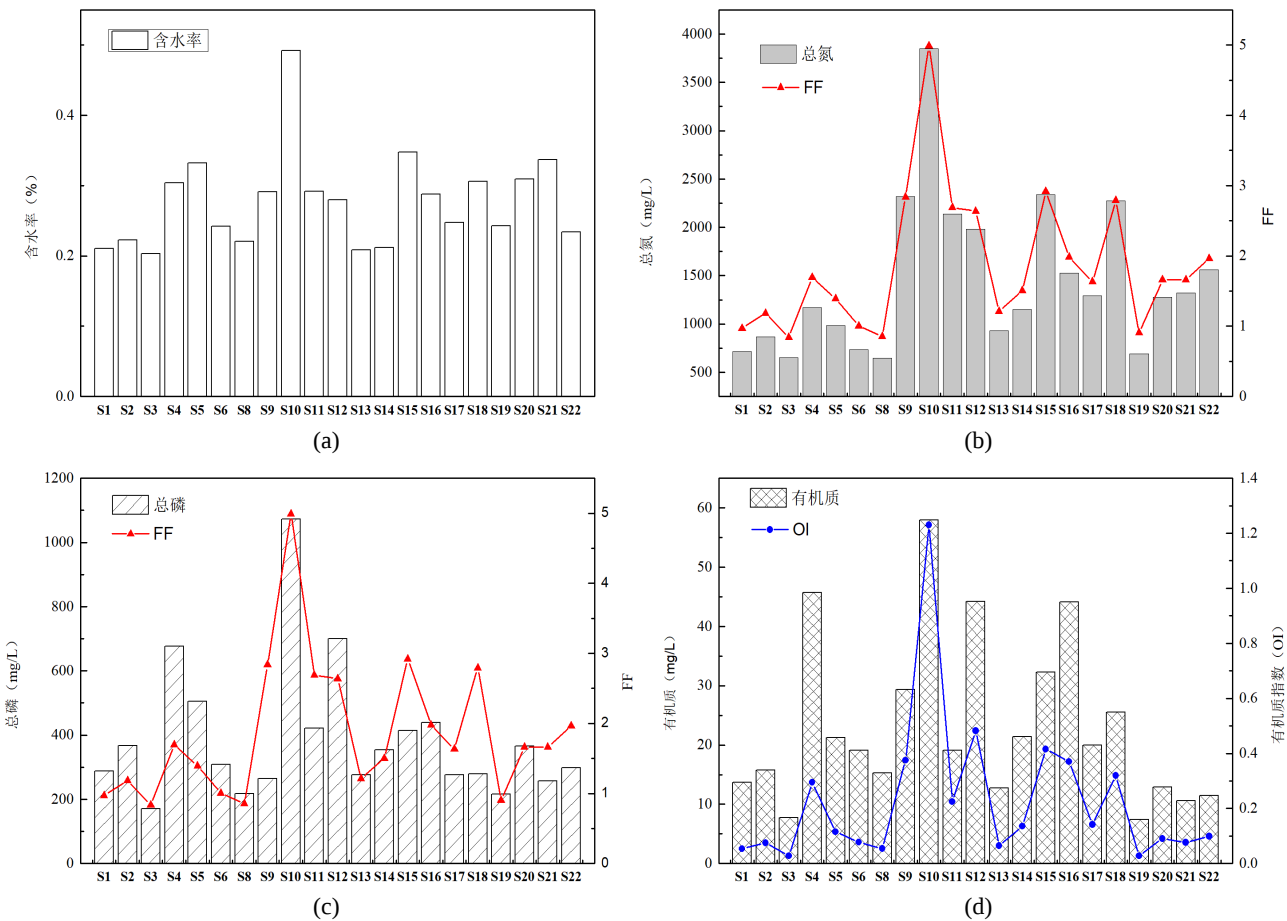
3. 结果与分析

3.1. 上覆水理化指标

21 个采样点位样品上覆水的理化指标氧化还原电位(ORP, mV)、溶解氧(DO, mg/L)，氨氮(NH₄-N, mg/L)、总氮(TN, mg/L)、总磷(TP, mg/L)含量统计见表 3，其中部分样品溶解氧含量极低(为 S22 卫星水库，其溶解氧为 0.44 mg/L，氨氮为 1.62 mg/L，现场采用时，水面长满凤眼莲(俗称水葫芦)，初步判断为该浮游植物对水体造成较大的影响)，部分样品上覆水氨氮含量较大(为 S18，大溪河，其氨氮为 6.130 mg/L，总氮为 8.51 mg/L，水体富营养化严重)。

表 3. 样品上覆水的理化指标含量统计表

指标	氧化还原电位/mV	溶解氧/mg·L ⁻¹	氨氮/mg·L ⁻¹	总氮/mg·L ⁻¹
平均值	449 ± 35	6.69 ± 0.88	0.897 ± 0.685	2.95 ± 1.89
最小值	392	0.44	0.229	0.87
最大值	513	8.46	6.130	8.51



注：图(a)~(d)分别为样品含水量、总氮、总磷和有机质含量，其中 FF 为综合污染指数，OI 为有机质指数。

图 2. 底泥含水量、有机质、氮磷空间分布

3.2. 底泥含水量、有机质、氮磷分布情况

底泥样品的含水率、有机质、氮磷含量情况见图 2。其中含水率在 20.28%~40.19%之间(见图 2(a)), 平均值为 27.72%, 最大值为 S10 样品(大肚子河), 含水率在 40.19%, 其孔隙率表现为最大。总氮含量在 648.30~3849.63 mg/kg 之间(见图 2(b)), 平均值为 1448.31 mg/kg, 最大值为 S10 样品(大肚子河), 总磷含量在 171.25~1073.10 mg/kg(见图 2(c)), 平均值为 389.05 mg/kg。综合污染指数(FF)的范围为 0.84~4.99, 样品从清洁到重度污染都有分布, 表明 7 条河流受污染程度有着显著的差异。其中中度污染($1.5 < FF \leq 2.0$)的样品有石板溪(S4), 桥溪河(S14, S16, S17), 安家溪(S20, S21), 卫星水库(S22), 占样品总数的 27.3%。重度污染($FF > 2.0$)的样品有笋溪河(S9, S11), 大肚子河(S10), 壁南河(S12), 桥溪河(S15), 大溪河(S18), 占样品总数的 27.3%。大肚子河 S10 点位的综合污染指数最高, 需要引起足够的重视。

有机质含量在 7.38~57.96 g/kg, 平均值为 23.21 g/kg, 有机质指数(OI)为 0.03~1.23 之间, 平均值为 0.23, 其中, 存在明显有机氮污染($OI \geq 0.50$)的样品有 S10 ($OI = 1.23$, 为 OI 最大值), 总氮和有机质有很高的协同性, S10 有机质含量为最高, 主要为有机氮污染。将底泥理化指标与上覆水指标进行相关性分析, 结果见图 5。分析结果表明底泥总氮、总磷、有机质之间有显著的正相关($p < 0.01$), 有机质与总氮、总磷有很高的协同性。但是, 其上覆水的溶解氧、氮磷含量与底泥氮磷含量、有机质均不相关。间接表明, 水体的污染物一方面是由底泥营养盐析出, 另外一方面也与人类活动干扰有很大关系, 特别是在综合污染指数和有机质污染指数较高的点位, 生活污水和工业废水的排入, 底泥与水体中碳氮磷类污染物同源, 以外源输入为主。由此可见, 底泥是导致水体有机污染的主要内源污染物, 也是溶解氧的主要消耗对象[18]。

3.3. 典型河道底泥氮磷释放

1) 总氮和氨氮释放速率

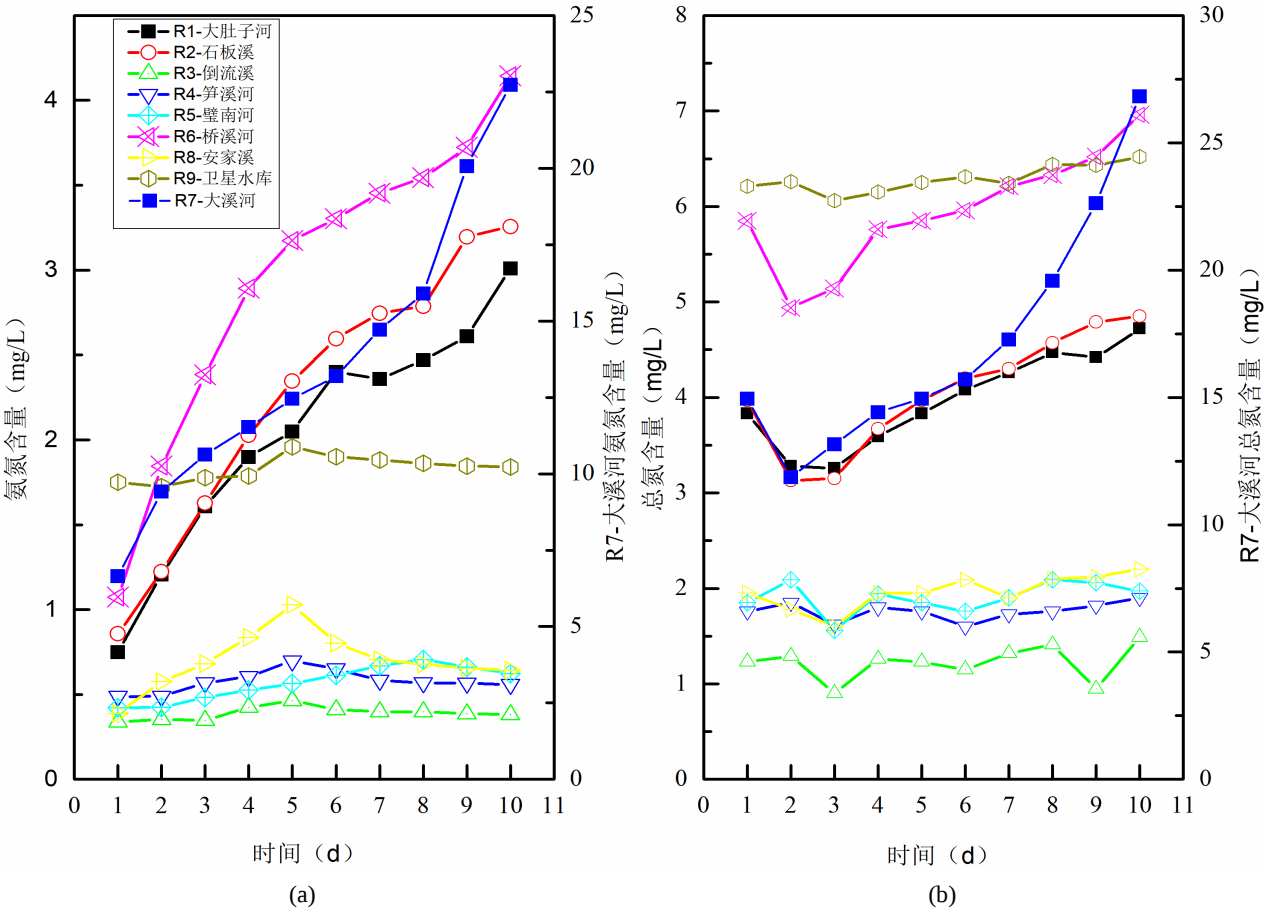
静态释放总氮和氨氮的试验结果如下图 3 所示。上覆水氨氮的变化见图 3(a)所示, 由于 R7-大溪河氨氮含量很高, 将其放在副坐标轴上展示其含量的变化过程。氨氮含量出现明显变化的河流有 R1 大肚子河、R2 石板溪、R6 桥溪河和 R7 大溪河, 其中 R6 桥溪河和 R7 大溪河上覆水的氨氮含量在第 10 天均未出现拐点, 仍然有较大的释放速率。其余河流的变化不显著。上覆水体总氮的变化见图 3(b), 同样由于 R7-大溪河总氮含量很高, 将其放在副坐标轴上展示其含量的变化过程。与氨氮变化一致, 上覆水总氮含量出现明显变化的河流为 R1 大肚子河、R2 石板溪、R6 桥溪河和 R7 大溪河。其中底泥上覆水总氮的含量为 R7-大溪河变化最高, 从第二天开始释放速率逐渐增大, 至第 10 天, 拐点仍未出现, 第 10 天总氮含量为 26.82 mg/L, 与未释放时的 12.95 mg/L 相差 1.2 倍。其余河流的变化趋势较为平缓。

结合氨氮的含量变化, 进一步表明水体中总氮的变化主要与氨氮含量有关。此外, 结合底泥有机质含量的变化情况, 底泥氨氮的释放与底泥中有机氮的含量关系较小, 主要与水体中氨氮的含量关系密切, 可能由于外界污染废水的排放, 导致水体与底泥的富集, 随着底泥的扰动会对水体造成氮的再释放。例如茅洲河作为浅水河流, 底泥中的氮与上覆水交换较为强烈, 受风浪扰动和人为活动影响, 底泥中的氮很容易释放到上覆水中, 从而引起上覆水高度富营养化[19]。

2) 总磷的释放速率

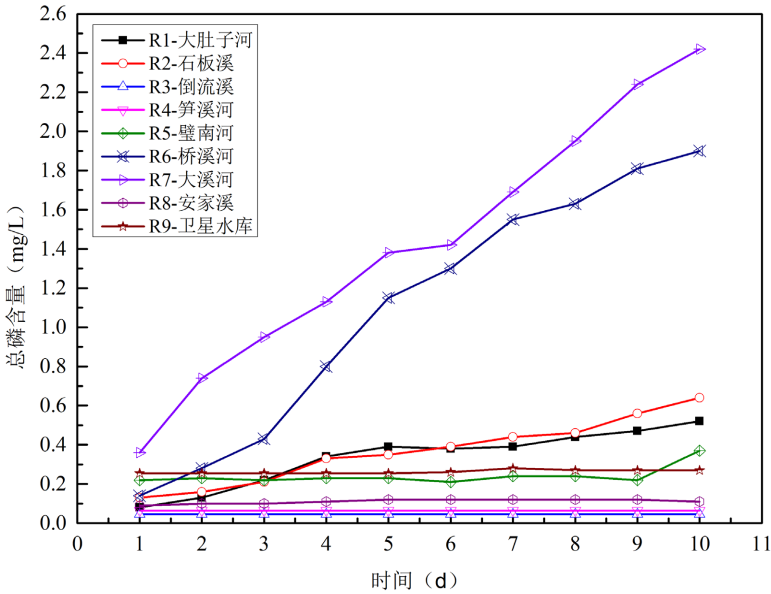
静态试验总磷的释放结果如图 4 所示, 上覆水中总磷含量变化较大的河流主要为 R6 桥溪河和 R7 大溪河, 其中 R7 大溪河的水体总磷含量仍然处于上升趋势, 且第 10 天的拐点未出现。R6 桥溪河的水体总磷趋于平缓。其余河流的变化趋势较为平缓, 未出现明显的释放过程。R7 大溪河第 10 天含量为 2.42 mg/L, 为初始值 0.36 的近 6 倍, 值得引起关注。

3) 释放速率影响因素



注：图(a)、图(b)分别为水体中氨氮和总氮含量随释放时间的变化曲线图，其中 R7 大溪河由于氨氮和总氮含量均较大，将其放入右纵坐标轴，其余河流在左纵坐标轴。

图 3. 底泥释放水体氨氮和总氮浓度变化



桥溪河和大溪河氮磷释放速率要显著高于其他河流,将 R6 桥溪河、R7 大溪河和其余 7 条河流氮磷的释放速率分开统计(详见表 4),分析典型河道底泥氮磷释放的影响因素。结果表明 R6 桥溪河、R7 大溪河的氮磷释放特征存在显著差异。大溪河的氨氮、总氮、总磷释放速率在 9 条河中最(平均释放速率分别为 175.5、183.1、25.7 mg/(m²·d)),R6-桥溪河的 NH₄-N、TN 和 TP 的 5 天和 10 天累积释放速率以及 10 天平均释放速率均处于中等水平,其中 NH₄-N 的释放速率在 5 天和 10 天之间有所下降,而 TN 的释放速率在 10 天时显著增加。R7-大溪河的 NH₄-N、TN 和 TP 的释放速率在所有河流中最高,尤其是 TN 的 10 天平均释放速率达到了 317.1 mg/(m²·d),远高于其他河流,表明该河流底泥中的氮释放潜力较大。其他 7 条河流的 NH₄-N、TN 和 TP 的释放速率均较低,尤其是 TP 的释放速率在所有河流中最低,表明这些河流的底泥对磷的释放贡献较小。总体而言,R7-大溪河的底泥释放潜力最大,尤其是在氮的释放方面,而其他河流的释放速率相对较低。

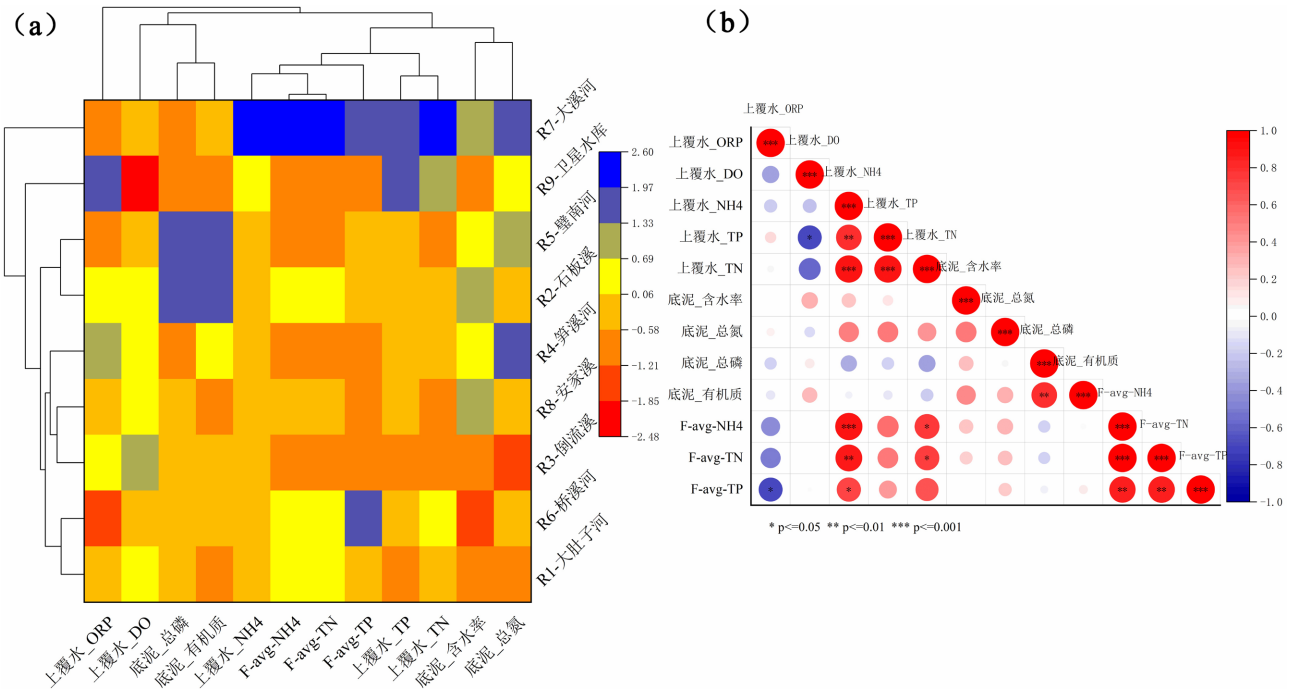
表 4. 底泥氮磷释放速率统计

	F-5d 累积-NH ₄	F-10d 累积-NH ₄	F-avg-NH ₄	F-5d 累积-TN	F-10d 累积-TN	F-avg-TN	F-5d 累积-TP	F-10d 累积-TP	F-avg-TP
R6-桥溪河	45.2	32.3	45.9	46.0	34.1	98.6	21.6	18.3	20.3
R7-大溪河	126.4	165.9	175.5	128.8	183.1	317.1	22.2	21.5	25.7
其他 7 条河流	15.2	9.3	15.2	16.8	12.4	42.2	2.3	2.0	3.1

注: F-5d 累积-NH₄ 表示为底泥 NH₄-N 释放 5 天累积速率; F-10d 累积-NH₄ 表示为底泥 NH₄-N 释放 10 天累积速率; F- avg-NH₄ 表示为底泥 NH₄-N 释放 10 天的平均速率。TN、TP 分别表示底泥总氮(TN)和底泥总磷(TP)的释放速率。

将底泥特性(包括有机质含量、总氮、总磷、含水率)、上覆水指标(氧化还原电位、溶解氧、总氮、总磷、氨氮)与氮磷平均速率释放速率进行聚类分析和相关性分析,来分析底泥氮磷释放与环境因子特性的响应关系,结果见图 5。通过对河流水体及底泥参数的聚类热图分析发现,不同河流在营养盐释放潜力及环境特征上呈现显著空间分异,可划分为以下三类:高释放潜力组(R7-大溪河、R6-桥溪河),R7-大溪河在 NH₄-N (175.48 mg/kg)和 TN (317.15 mg/kg)的平均释放速率(F-avg)上显著高于其他河流,其底泥总氮(2275.04 mg/kg)和上覆水 NH₄-N (6.13 mg/L)、TN (8.51 mg/L)浓度均处于最高水平,表明高底泥氮负荷与上覆水富营养化协同驱动了强烈的内源释放。R6-桥溪河在 TP 释放速率(20.29 mg/kg)上表现突出,与其底泥总磷(353.99 mg/kg)和有机质(21.43%)含量较高有关,但上覆水 DO (5.67 mg/L)较低可能加剧了底泥磷的厌氧释放。中等释放潜力组(R1-大肚子河、R2-石板溪),两河流的 NH₄-N (46.27, 44.40 mg/kg)和 TN (113.26, 85.02 mg/kg)释放速率处于中等水平,底泥有机质(15.77%, 45.72%)和上覆水 DO (6.81, 6.84 mg/L)的差异可能通过调控微生物活性影响释放强度。低释放潜力组(R3-倒流溪、R4-笋溪河、R5-璧南河、R8-安家溪、R9-卫星水库),该组河流的 NH₄-N (5.41~13.49 mg/kg)、TN (10.01~34.83 mg/kg)和 TP (0.22~5.67 mg/kg)释放速率普遍较低,其中 R3-倒流溪和 R4-笋溪河的底泥总氮(734.69, 2319.81 mg/kg)虽较高,但上覆水 DO (8.46、7.73 mg/L)充足可能抑制了厌氧释放过程。卫星水库(R9)因上覆水 DO 极低(0.44 mg/L)呈现特殊的 TP 释放模式,其底泥有机质(11.47%)与低 DO 环境可能促进了磷的还原性释放。变量聚类特征 NH₄-N 与 TN 释放速率高度正相关(聚类距离近),表明两者受相似环境因子(如底泥有机质、上覆水 DO)调控;TP 释放单独聚为一类,其释放机制可能与 Fe/Al-P 结合态及氧化还原敏感性有关。

结果表明大溪河初期较高的氮磷释放速率可能与其底泥中有机质含量较高有关。在厌氧条件下,底泥中的磷更容易释放,而氮则可能通过反硝化作用转化为气态氮(N₂或 N₂O)逸出,这解释了总氮释放速率出现负值的现象。此外,上覆水中的氮磷浓度梯度是驱动底泥释放的重要因素。低 pH 值可能促进磷的释放[20],而低溶解氧(DO)条件则有利于氨氮的释放。水动力条件(如流速、波浪作用)也会影响底泥-水界面的物质交换,较强的水动力条件可能促进底泥中氮磷的释放[21]-[23]。值得注意的是,外源污染输入(如生活污水、农业面源污染)是影响



注：图中上覆水_ORP/DO/NH₄/TP/TN 分别表示为各样品上覆水水质理化因子，相应的为氧化还原电位、溶解氧、氨氮、总磷、总氮；底泥_含水率/总氮/总磷/有机质分别表示为各样品底泥理化因子；F-avg-NH₄/TN/TP 分别为各样品氨氮、总氮、总磷的平均释放速率。

图 5. 底泥释放速率与上覆水及其理化性质的聚类分析和相关性分析

底泥氮磷释放行为的关键因素[24]。外源输入会增加上覆水中的氮磷负荷，进而显著影响底泥的释放动态。综上所述，底泥特性、上覆水水质、水动力条件及外源输入是调控河道底泥氮磷释放的主要因素，研究结果为河道底泥污染治理提供了科学依据。

4. 结论与建议

1) 9 条河流水体指标呈现显著空间异质性，22 个样本中，S22 卫星水库水体 DO 浓度最低(0.44 mg/L)，S18 大溪河水体 NH₄-N 和 TN 浓度最高(分别为 6.13 mg/L 和 8.51 mg/L)，指示严重富营养化特征；

2) 底泥总氮的浓度在 648.30~3849.63 mg/kg 之间，总磷的含量在 171.25~1073.10 mg/kg 之间，含量较高，综合污染指数(FF)显示 27.3%的样本处于重度污染状态；

3) 通过聚类热图分析揭示了不同河流底泥营养盐释放潜力的空间异质性及其驱动机制。R7-大溪河和 R6-桥溪河因底泥高氮磷负荷与上覆水富营养化的协同作用，成为内源污染的高风险区域；而低释放组河流(如 R3-倒流溪、R4-笋溪河)的高 DO 环境可能通过抑制厌氧过程减缓释放。聚类分析表明，NH₄-N 与 TN 释放受底泥有机质和氧化还原条件的共同调控，而 TP 释放则可能更多依赖磷形态与沉积物理化性质的相互作用；

4) 后续的黑臭河水治理建议可基于污染风险分区的差异化修复策略，例如高风险区(R7-大溪河、R6-桥溪河)可以优先实施环保疏浚，或者通过生态闸坝调控水流，增加水体溶解氧。中低风险区(R3-倒流溪、R4-笋溪河)，可以利用高 DO 环境的自净能力，沿岸种植芦苇、菖蒲等挺水植物，形成氮磷吸收屏障，截留外源输入。此外更需要减少外源输入，降低周边农业面源有机肥施用，降低外源有机质驱动的氮释放风险。

基金项目

武汉市知识创新专项资助项目(2023020201020364)；三峡后续工作项目(2136902)。

参考文献

- [1] 温泉, 马迎群, 秦延文, 等. 成渝地区中小河流水生态环境保护存在的问题与对策[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(2): 493-499.
- [2] 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.
- [3] 朱伟, 侯豪, 刘环, 等. 太湖底泥磷释放量及释放规律的研究综述[J]. 湖泊科学, 2025, 37(1): 14-35.
- [4] 张占梅, 黄大俊, 石瑞琦, 等. 重庆主城区河流底泥中重金属污染现状及生态风险分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(11): 122-127.
- [5] SCHINDLER, D. W., CARPENTER, S. R., CHAPRA, S. C., et al. Reducing phosphorus to curb lake eutrophication is a success. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(17): 8923-8929. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02204>
- [6] SØNDERGAARD, M., JENSEN, J. P. and JEPPESEN, E. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes. *Hydrobiologia*, 2003, 506: 135-145. <https://doi.org/10.1023/b:hydr.0000008611.12704.dd>
- [7] JEPPESEN, E., SØNDERGAARD, M., JENSEN, J. P., et al. Lake responses to reduced nutrient loading—An analysis of contemporary long-term data from 35 case studies. *Freshwater Biology*, 2005, 50(10): 1747-1771. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2005.01415.x>
- [8] 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.
- [9] 刘卓, 杨代琼, 李姣, 等. 沉积物氮模拟释放过程中氨氧化菌群落变化[J]. 应用化工, 2021, 50(10): 2677-2682+2686.
- [10] 王志齐, 刘新星, 姚志宏, 等. 丹江口水库氮磷内源释放对比[J]. 环境科学, 2019, 40(11): 4953-4961.
- [11] SL 219-2013. 水环境监测规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [12] GB/T 36197-2018. 土壤采样技术指南[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [13] 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]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [14] NY/T 1121-2006. 土壤检测[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [15] SL 394-2007. 铅、镉、钒、磷等 34 种元素的测定[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [16] 王艳平, 徐伟伟, 韩超, 等. 巢湖沉积物氮磷分布及污染评价[J]. 环境科学, 2021, 42(2): 699-711.
- [17] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [18] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [19] 张枫, 桂梓玲. 武汉市东湖底泥污染风险评估及精细化清淤研究[J]. 人民长江, 2024, 55(6): 45-52.
- [20] 张洪, 薛雪, 郁达伟, 等. 鄱阳湖水位对沉积物磷释放的影响及总磷考核建议[J]. 人民长江, 2023, 54(1): 46-52.
- [21] 陈超, 钟继承, 邵世光, 等. 太湖西北部典型疏浚/对照湖区内源性营养盐释放潜力对比[J]. 湖泊科学, 2014, 26(6): 829-836.
- [22] 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.
- [23] 柳肖竹, 刘群群, 王文静, 等. 水力扰动对河口沉积物中重金属再释放的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(11): 1460-1467.
- [24] 黎藐韩, 戚萌, 孙海龙, 等. 成都市锦江底泥氮磷和有机质的分布调查及特征评价[J]. 资源节约与环保, 2024(4): 84-89.