

南水北调中线干渠水体磷沉积关键过程研究^{*}

郑志侠¹⁾, 冯皖玉^{1,2)}, 王世香³⁾, 裴西平^{2,5)}, 杜兆楠^{2,4)}, 唐文忠^{2,5)†}, 张洪^{2,5)}

(1) 合肥大学生命健康与环境工程学院, 安徽合肥; 2) 中国科学院生态环境研究中心, 区域环境安全全国重点实验室, 环境水质学重点实验室, 北京; 3) 河南省信阳生态环境监测中心, 河南信阳; 4) 河北科技大学环境科学与工程学院, 河北石家庄; 5) 中国科学院大学资源与环境学院, 北京)

摘要 南水北调中线干渠作为一项跨流域调水的重大工程, 其水质安全至关重要. 本研究在中线干渠的 14 个淤积区采集了表层沉积物和水体样品, 系统分析了水体的理化指标以及沉积物中营养盐含量和 6 种磷形态特征, 评估了内源磷的释放潜能, 并揭示了水体磷沉积的过程. 结果显示, 藻类通过吸收水体中的磷并随其死亡沉降进入沉积物, 与地球化学过程共同作用, 驱动磷在沉积物中积累. 导致干渠水体处于磷限制状态(N 与 P 物质的量比平均值为 1 203.2), 沉积物中总磷以有机磷和铁结合磷为主, 生物有效磷占比高达 65.8%, 在空间分布上呈现中上游高、下游低的趋势. 单因子污染指数表明, 多数点位处于清洁或正常水平, 而生物有效磷指数则显示中上游多个点位处于中度至重度富集状态, 表明沉积物中的磷具有较高的释放潜能. 建议从界面氧化还原调节和钙磷转化 2 个方面入手, 以有效实现水质调控, 支撑南水北调中线干渠的水质安全.

关键词 南水北调中线干渠; 沉积物; 磷赋存形态; 空间分布; 释放潜能

中图分类号 X524; TV68

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2025184

0 引言

南水北调中线干渠, 作为国家南水北调工程的核心组成部分, 旨在缓解我国黄淮海平原水资源严重短缺问题, 并优化水资源的配置, 是一项具有重大战略意义的基础设施. 这条连通南北的生命线, 其水流畅通与水质达标是工程运行的基础保障. 在未来长期运行中, 水量的输送状况及水质的优劣将直接决定工程的成败^[1-2]. 近年来, 受营养物质输入的影响, 中线总干渠多次出现藻类异常增殖现象, 导致水质波动和生态风险. 因此, 深入探究其影响机制, 对确保输水安全至关重要^[3-4].

磷是水生态环境中的关键营养元素, 对生态系统具有至关重要的作用. 然而, 其含量过高会导致水体富营养化^[5]. 水体中磷的输入主要分为内源释放和外源输入 2 种途径. 外源磷进入水体后, 一部分被水生生物吸收同化, 大部分则会沉降到沉积物中. 进入沉积物中的磷, 一部分会与沉积物中的铁、锰、铝氧化物、黏土矿物以及碳酸钙等物质结合^[6-8]. 被浮游动植物利用的磷, 在生物体内转化为有机磷和多磷酸盐. 当生物体凋亡后, 小部分磷矿化为溶解态磷, 大部分

则又沉降至沉积物中, 成为水体内源磷库^[9].

当沉积物界面的环境条件发生改变时, 磷元素会从沉积物中释放, 重新进入水体, 进而加剧水体的富营养化^[10-12]. 磷在沉积物中存在多种形态, 其中部分形态在环境变化时易于释放进入水体, 不同形态的磷具有不同的释放潜力和生物有效性^[13-14]. 因此, 深入研究南水北调中线干渠沉积物中磷的赋存形态, 揭示内源磷的沉积过程及其机制, 不仅能为沉积物内源污染的治理提供理论支撑, 更具有重要的现实意义.

南水北调中线干渠的水质和水生态过程的水质问题日益受到关注. 王超等^[15]对中线干渠水质监测数据进行分析, 发现高锰酸盐指数与藻密度密切相关, 尤其在 7—9 月藻密度峰值期, 相关性更为显著, 藻类生长对高锰酸盐指数的影响较大; 而在藻类生长稳定和衰退期, 相关性则有所减弱, 藻类对渠道水质的贡献超过 50%. 高赛等^[16]的研究指出, 中线干渠北京段水体中的溶解性有机物呈现出明显的季节效应, 主要源于内源输入, 其中浮游植物的淤积腐化是重要来源之一; 蔡晓彤等^[17]研究发现, 中线干渠西黑山进水闸上游段的沉积物污染较为严重, 污染物释放速率受温度和 pH 影响. 目前, 对中线干渠的整体性研究仍不

^{*} 国家重点研发计划资助项目(2023YFC3205600), 国家自然科学基金面上资助项目(52270202)

[†] 通信作者: 唐文忠(1982—), 男, 研究员. 研究方向: 流域系统治理与水生生态修复. E-mail: wztang@rcees.ac.cn

收稿日期: 2025-09-26

足,尤其是沉积物组成和状态缺乏系统认知.本文以中线干渠近年来藻类异常增殖现象为出发点,以磷作为重点研究对象,揭示沉积物中磷的总量及其形态分布特征,评估沉积物中磷释放潜能,旨在为中线干渠沉积物污染防治与管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

南水北调中线工程全长 1 432 km,横跨中国暖温带半湿润气候区和北部亚热带湿润气候区^[18].跨越湖北、河南、河北、天津与北京 5 省市,流经长江、淮河、黄河及海河等 4 大流域.中线工程于 2014 年 12 月全线正式通水,输水方式以明渠为主,明渠段长 1 197 km^[19].截至 2024 年 3 月,南水北调中线一期工程累计调水 $>625.93 \times 10^8 \text{ m}^3$,直接受益人口 $>1.08 \times 10^8$ 人^[20].近年来,中线总干渠多次发生藻类异常增殖情况,本文通过探究中线干渠沉积物中磷的聚集形态,以及水体环境条件改变对沉积物-水界面的影响可以探究藻类异常增殖的内因,为南水北调中线干渠水质安全、管理调度等工作提供基础数据和技术支撑.

1.2 样品采集与处理

2023 年 4 月,在中线干渠进行了水样和表层沉积

物采集(共 14 个点位),如图 1 所示.按行政区划分为 3 个渠段:上游河南段(采样点编号为 S1~S7),中游河北段(编号为 S8~S11),下游京津段(编号为 S12~S14).水样使用定深采水器采集,并用便携式水质分析仪(WTW Multi 3630)对水体的温度(T)、pH、溶解氧(DO)和氧化还原电位(ORP)等指标进行现场测定;Chl-a 采用丙酮提取-分光光度法测定;水体流速采用便捷式流速仪测量.沉积物使用 Peterson 抓斗式采泥器采集表层 0~10 cm 泥样,收集在塑封袋中低温保存运回实验室,在实验室中通过冷冻干燥、研磨、过 100 目筛后干燥存放.沉积物粒径采用激光粒度分析仪测定;总磷质量分数($w_T(\text{P})$)测定使用微波消解-电感耦合等离子体光谱法;磷形态采用 Hupfer 等^[21]提出的 4 步连续提取法进行分析,包括可交换态磷(Ex-P)、铁结合态磷(Fe-P)、铝结合态磷(Al-P)、有机磷(Or-P)、钙结合态磷(Ca-P)和残渣态磷(Res-P)6 种形态,随机选取 10% 样品进行加标回收实验,回收率为 92.5%~105.3%.总碳质量分数($w_T(\text{C})$)和总氮质量分数($w_T(\text{N})$)采用重铬酸钾-硫酸消化法测定,沉积物形态采用 SEM 扫描电镜技术观测.

1.3 评价方法

1.3.1 沉积物磷污染评价方法

本文选取在河湖沉积物中应用较为广泛的单因

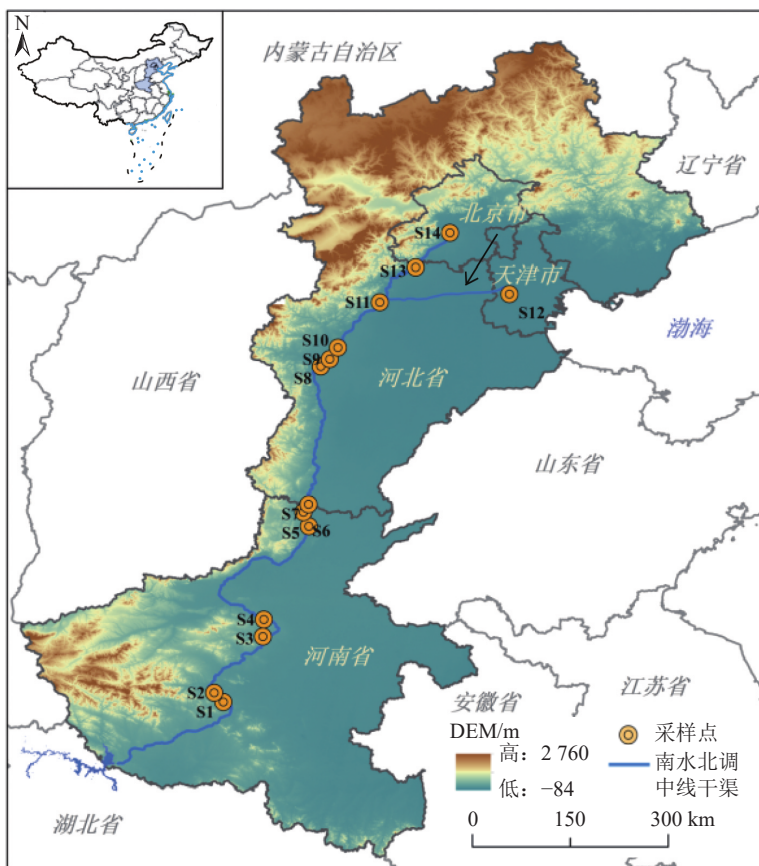


图 1 研究区位置及采样分布示意

子污染指数评价法^[22]对中线干渠沉积物中的磷污染程度进行评价, 单因子指数的计算公式为

$$P_i = C_i/C_s, \quad (1)$$

式中: P_i 为单项评价指标; C_i 为评价因子实测值; C_s 为评价因子的平均背景值。

本文根据加拿大安大略省环境和能源部发布的沉积物质量评价指南中指出的 $w_T(P) < 600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 无污染为清洁水平, 以沉积物 $w_T(P) = 600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为标准值进行沉积物污染评价。沉积物磷污染按照分级标准分为4个等级(I: 贫化区或低背景值区 $P_i < C_A/C_B$; II: 正常区域或背景值区域范围 $C_A/C_B < P_i < 1$; III: 轻污染区或超背景值区 $1 < P_i < 2$; IV: 污染区或异常富集区 $P_i > 2$)。

目前, 多数研究对沉积物中磷的释放风险评估仅考虑 TP, 较少考虑其生物可利用性。本研究采用 Ye 等^[23]提出的生物有效指数评估磷的生物可利用部分, 并与单因子评价方法进行对比分析。生物可利用磷(BAP)是指沉积物中潜在的易于释放并被水生生物直接利用的磷, 或能够通过自然过程转化为有效形式的磷。作为水生态系统磷循环的核心组分, 其赋存形态及环境响应机制对流域营养盐动态具有重要指示意义^[24-25]。生物有效磷界定和划分尚不相同^[26-27]。本研究将 Al-P、Fe-P、Ex-P 与 Or-P 之和作为生物可利用磷(BAP)。

$$P_{ki} = K_p \cdot P_i, \quad (2)$$

$$K_p = \rho_{BAP}/(\rho_{TP} - \rho_{BAP}), \quad (3)$$

式中: P_{ki} 表示 TP 的生物有效指数, K_p 代表 TP 的生物效率系数; ρ_{TP} 和 ρ_{BAP} 分别代表 TP 和 BAP 的标准质量浓度。生物有效指数 P_{ki} 的风险水平定义与基于单一污染指数的评估方法中的 P_i 相同。

2 结果与分析

2.1 采样点水质基本情况

由图2可见, 南水北调中线干渠水体总氮质量浓度 $\rho_T(N)$ 介于 $1.10 \sim 1.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 超过 III 类水标准限值 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中河南段 S4 点位最高 ($1.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。 $\rho(\text{DO})$ 整体处于较高水平 ($9.53 \sim 10.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 表明水体复氧能力较强, 其中河北段 S10 点位 $\rho(\text{DO})$ 值最高, 可能与流速变化或藻类光合作用相关^[28]; pH ($8.17 \sim 9.20$) 整体呈弱碱性, ORP 变化范围较大 ($46.8 \sim 138.2 \text{ mV}$), 上游 S1、S4 点位 ORP 较高, 表明氧化环境占主导, 而中游河北段 ORP 降低, 可能与有机质积累有关^[29]; 京津段 S12 的高 $\rho(\text{DO})$ ($10.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、

高 pH 与低高锰酸盐指数 ($1.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 表明藻类光合作用活跃。河北段 S11 的高锰酸盐指数 ($2.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和 $\rho_T(C)$ ($2.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 达峰值。 $\rho(\text{Chl-a})$ 整体较低 ($0.08 \sim 0.42 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), 未表现显著富营养化特征, 但上游点位略高于下游。中线干渠 14 个采样点水体平均流速为 $0.724 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 介于 $0.68 \sim 0.78 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 标准差较小为 $0.024 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 表明流速在空间和时间上保持了相对稳定水平。

2.2 表层沉积物营养盐分布特征

南水北调中线干渠表层沉积物营养盐分布如图3所示, 表现出营养盐分布与生态化学计量特征的空间分异性。 $w_T(N)$ 呈现显著的上游富集趋势 (河南段 (7.24 ± 1.77) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 河北段 (6.25 ± 0.16) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 京津段 (5.56 ± 0.09) $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$), 且河南段变异系数最高 (24.4%)。 $w_T(P)$ 表现为河南段 ($0.47 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)、河北段 ($0.44 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)、京津段 ($0.37 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), 其空间异质性沿程递减 (变异系数由 21.3% 降至 8.1%)。 TN 与 TP 呈显著正相关 ($P < 0.01$), 表明氮磷沉积来自相同的源。 $w_T(C)$ 则呈现逆向分布, 京津段最高 ($105.31 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), 河南段最低 ($94.18 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), 河北段的高变异性 ($98.20 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, $\text{CV} = 22.5\%$) 可能反映点源输入或局部沉积动力差异。

水体中营养物限制性分类标准^[30-32]: $n(N)/n(P) \geq 50$ 时为磷限制状态, $n(N)/n(P) \leq 22$ 时为氮限制状态, 干渠水体 $n(N)/n(P)$ 平均值为 1 203.2, 表明磷为藻类生长潜在限制因子。生态化学计量特征表明系统的生物地球化学过程: 沉积物 $n(N)/n(P)$ 平均值为 15.5, 且沿程呈现微弱的递减趋势, 从河南段的 15.8 降至京津段的 15.1。该特征与水体极高的 $n(N)/n(P)$ (543.4) 及磷限制现状形成鲜明对比。

然而 $m(C)/m(N)$ 的空间梯度揭示关键限制因素: $m(C)/m(N)$ 从河南段 (12.7) 经河北段 (16.1) 至京津段 (18.9) 显著递增, 表明有机质老化程度沿程增强。尤其京津段的高 $m(C)/m(N)$ 表明难降解有机质主导或强烈微生物改造, 通过氮固持作用抑制有机质矿化^[33]。这导致沉积物中藻源磷的再矿化效率降低, 阻碍磷向水体的再生通量, 从而维持并强化上覆水体的磷限制状态。

2.3 表层沉积物磷形态空间分布特征

表层沉积物不同形态磷质量分数及空间分布特征如图4所示, 不同渠段的表层沉积物中磷形态的分布呈现出较为显著的空间异质性。平均 w 由高到低的排序为 Or-P、Fe-P、Ca-P、Res-P、Al-P、Ex-P。Ex-P 能通过沉积物间隙水逐渐释放到上覆水中, 直接影响

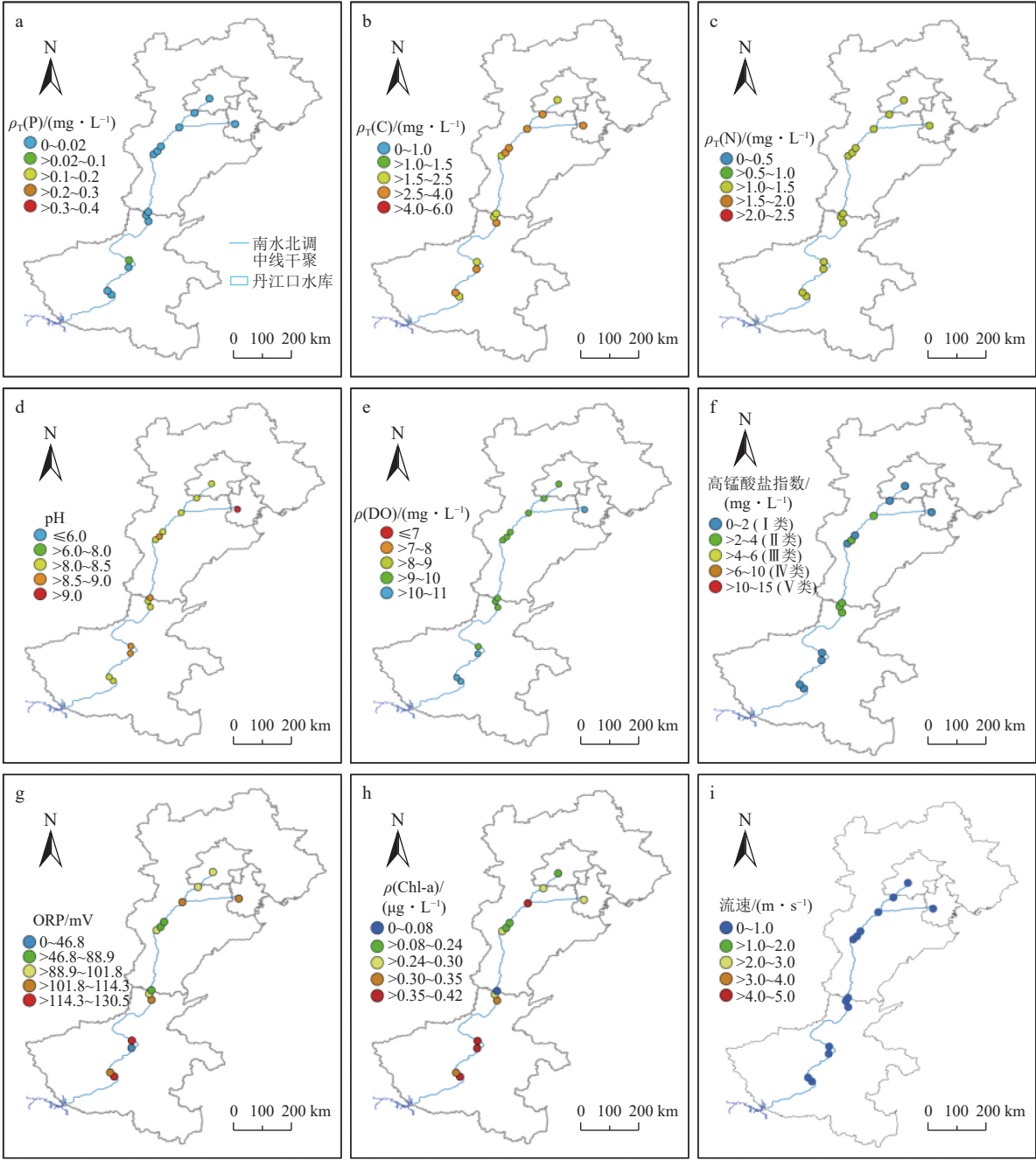


图 2 采样点水质参数及流速状况

水体中生物可利用性磷的质量分数,并对水体富营养化风险具有潜在贡献^[34],虽然其质量分数较低,为 7.06~19.07 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占比介于 1.51%~4.38%,但当外界环境发生变化时首先从水体中释放^[35]. Fe-P 作为潜在活性磷的重要组成部分^[36],质量分数为 34.09~199.28 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占比为 8.92%~32.46%,其空间分布与沉积物中铁氧化物的丰度及氧化还原条件密切相关^[37],ORP 与 Fe-P 占比呈负相关($P<0.01$),表明还原条件会增强磷的活性^[38]. 中游点位 Fe-P 占比均超过 20%,可能与中游区域氧化性较强的沉积环境促进铁化合物对磷酸盐的吸附有关^[39]. $w(\text{Al-P})$ 为 24.07~123.19

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占比为 3.92%~21.81%,其与黏粒(Clay)占比呈显著正相关($P<0.01$),表明黏粒矿物的层状结构对 Al^{3+} 的固定作用增强了磷的稳定性^[40],Al-P 在水体中主要受 pH 的影响,当水体 $\text{pH}>8$ 时,会造成磷的释放^[41],南水北调中线干渠水体 pH(8.17~9.20)整体呈弱碱性,有利于促进 Al-P 向 Ex-P 转化. Or-P 是优势形态,在河南段(S1~S7)、河北段(S8~S11)和京津段(S12~S14)均值分别为 149.3、167.7和 96.4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占 TP 比例达 35%~50%,其中 S2 点位(河北段)高达 244.3 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,远超典型河流沉积物背景值^[42~43]. Ca-P 质量分数为 62.12~106.17 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是表层沉积物中

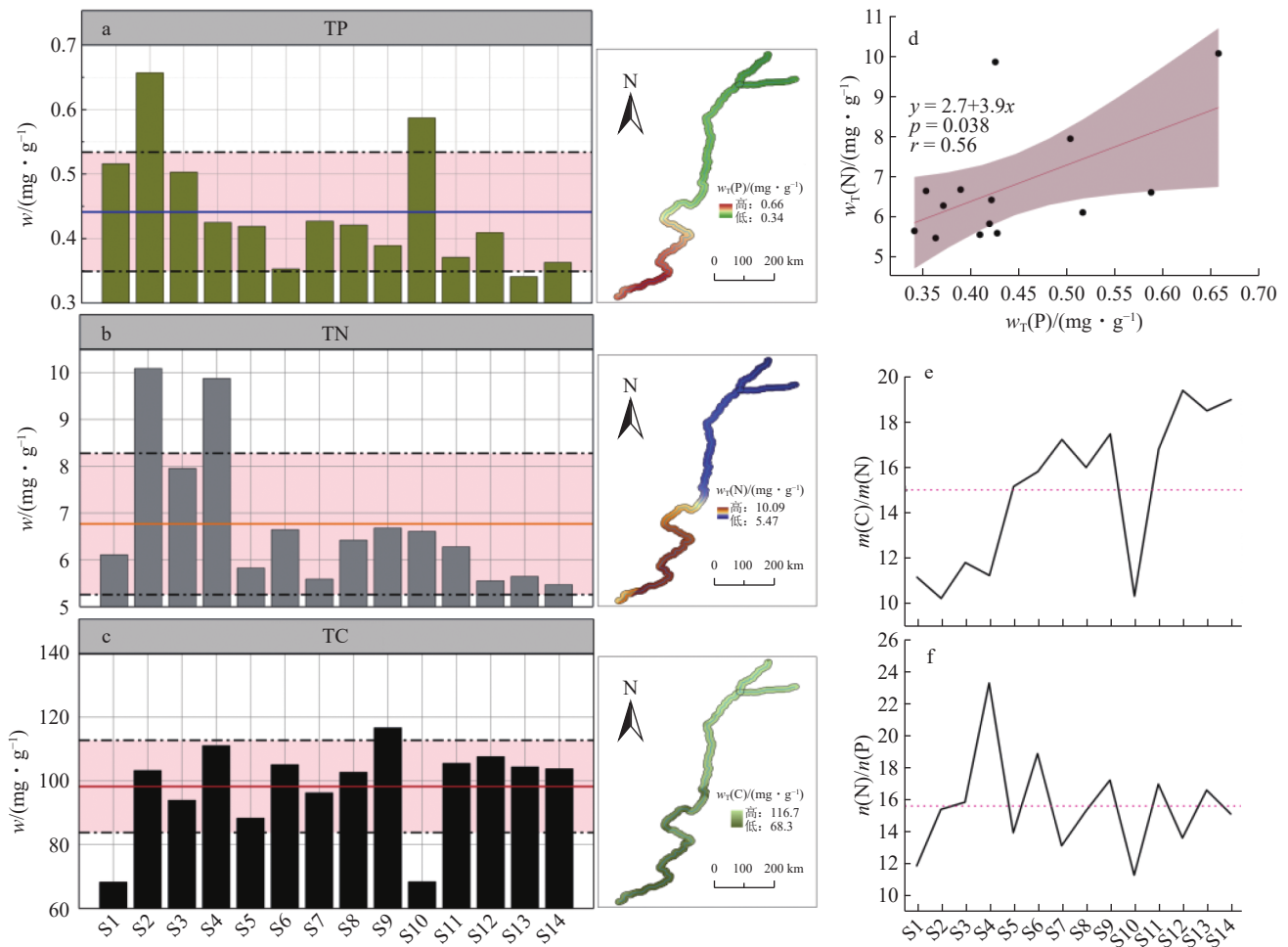


图3 南水北调中线干渠表层沉积物营养盐质量分数变化与生态化学计量特征

无机磷的主要成分,碱性条件有利于 CaCO_3 与磷酸盐共沉淀^[44]. Res-P 是较为稳定的磷形态,不易释放到水体中被生物吸收利用,对水体中磷含量水平影响最小^[36],其质量分数介于 $42.10 \sim 82.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占比为 $10.12\% \sim 18.45\%$. 空间分布上,上游河南段以 Fe-P 和 Or-P 为主要形态,中游河北段 Ca-P 和 Res-P 比例升高,下游京津段则呈现 Al-P 与 Or-P 的复合特征,这种分异反映了水动力条件、沉积物组成等综合影响。

2.4 生物有效性磷(BAP)与释放潜能

本文采用沉积物磷污染评价方法进行评价,将质量分数转化为相对指数,直观反映沉积物中磷的富集程度和释放潜能。指数值越大,表明沉积物作为“磷库”的规模越大,在环境条件(pH、水温等)发生变化时,其向上覆水释放磷的潜能也越高。

如图5所示,从质量分数来看,南水北调中线干渠 $w(\text{BAP})$ 为 $176.34 \sim 486.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均为 $289.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,最高出现在上游河南段。干渠内沉积物 $w(\text{BAP})$ 波动范围较大,不同渠段空间异质性较为明显,下游京津段 ($202.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 明显低于河南段 (310.36

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 与河北段 ($320.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),表明京津段内源磷释放潜能较低。 $w(\text{BAP})/w_T(P)$ 值的变化范围为 $52.4\% \sim 79.3\%$,均值为 65.8% ,与 TP 保持相同的渠段分布特征。其中沉积物 BAP 中 Or-P 质量分数最高,平均占比为 48.0% ,其次为 Fe-P,平均占比为 30.1% ,表明南水北调中线干渠中沉积物磷潜在释放潜能主要来自 Or-P 与 Fe-P。干渠水体 pH ($8.17 \sim 9.20$) 整体呈弱碱性,氢氧根离子浓度增加会与 Fe^{3+} 形成可溶性更强的羟基络合物,导致包裹或吸附磷的铁(氢)氧化物胶体溶解或稳定性下降^[45]。随着载体铁(氢)氧化物的溶解,原本被吸附或共沉淀在其表面的磷酸盐就被释放到水体中^[46]。因此南水北调中线干渠水环境对沉积物 Fe-P 释放作用较大。

在对南水北调中线干渠 14 个点位的单因子污染磷指数与生物有效磷指数进行分析(表1),从 P_i 值评价结果来看,13 个点位处于 II 级(正常区域),河南段 S2 点位被评为 III 级(轻度富集区)。 P_i 值的变化范围为 $0.53 \sim 1.02$,整体处于较低磷富集水平,富集区域主要集中在上游河南段。但基于 P_{ki} 值的生物有效磷指

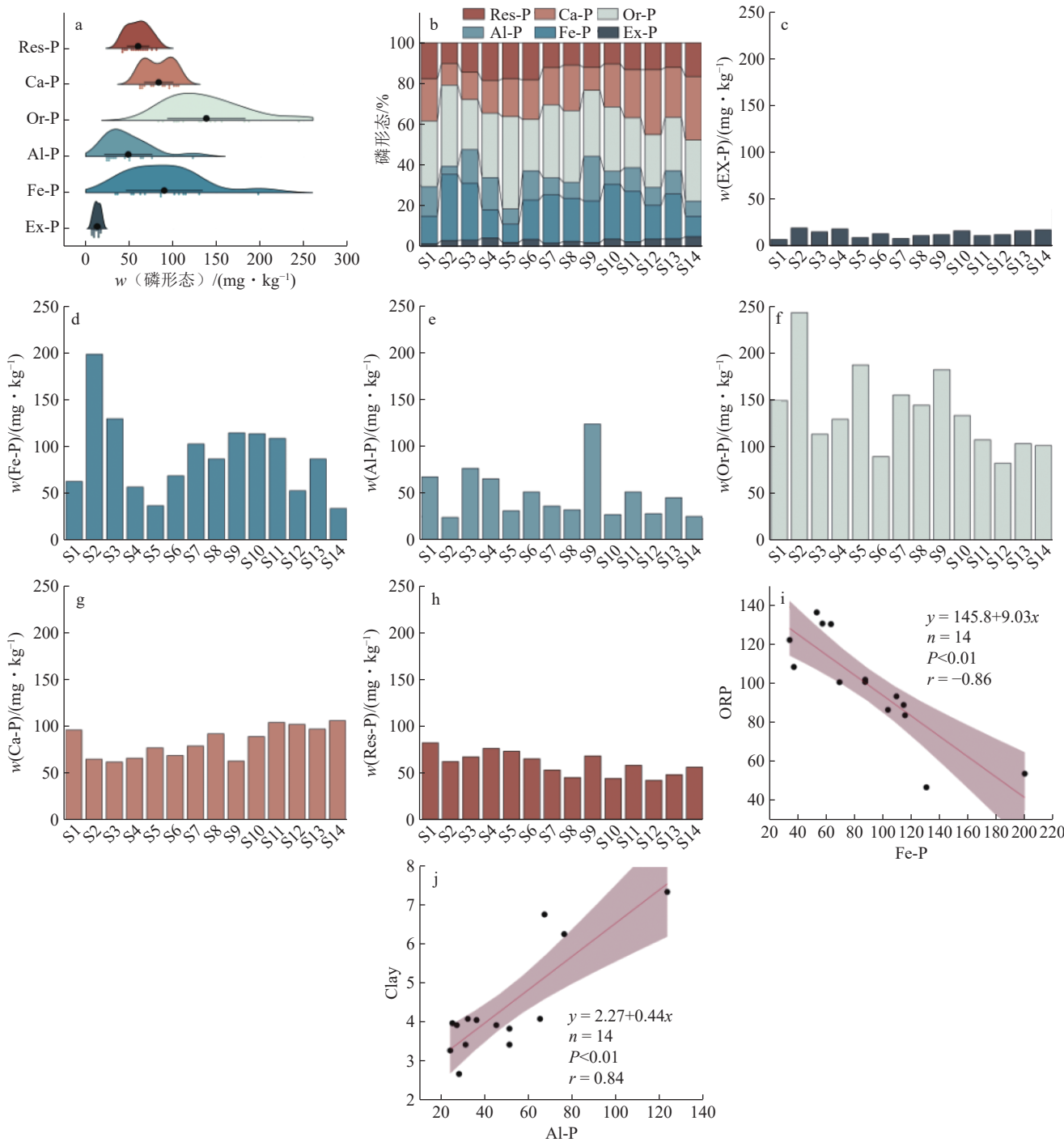


图 4 表层沉积物磷形态分布特征和部分形态磷与理化性质的相关性分析

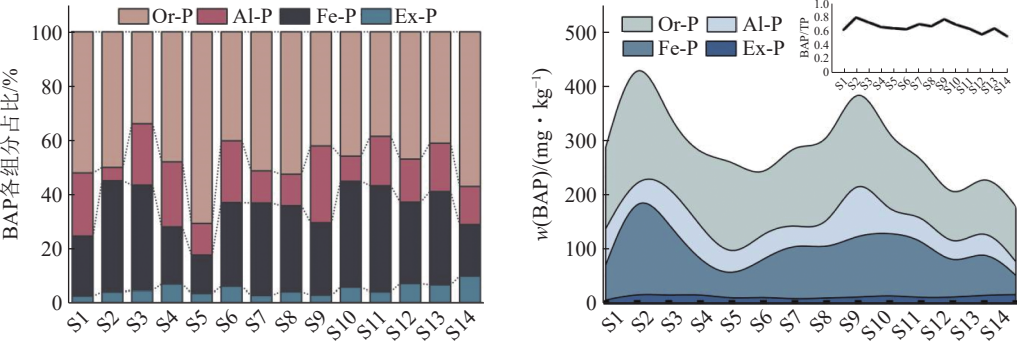


图 5 表层沉积物 BAP 含量和 $w(\text{BAP})/w_{\text{T}}(\text{P})$ 及 BAP 组分占比

数评价结果显示, 3 个点位被评为Ⅳ级(污染区域), 分别为 S2、S3、S9, 另有 8 个点位被评为Ⅲ级(轻度富集区), 3 个点位处于Ⅱ级(正常区域). P_{ki} 值的范围为 0.62~3.91, 表明河南、河北段存在一定程度的生物有效性磷富集现象.

表 1 南水北调中线干渠 TP 的单因子指数和生物有效磷指数及释放潜能划分

采样点位	P_i 值	释放潜能	P_{ki} 值	释放潜能
S1	0.78	Ⅱ	1.25	Ⅲ
S2	1.02	Ⅲ	3.91	Ⅳ
S3	0.77	Ⅱ	2.01	Ⅳ
S4	0.69	Ⅱ	1.31	Ⅲ
S5	0.69	Ⅱ	1.22	Ⅲ
S6	0.60	Ⅱ	0.99	Ⅱ
S7	0.73	Ⅱ	1.67	Ⅲ
S8	0.69	Ⅱ	1.38	Ⅲ
S9	0.94	Ⅱ	3.11	Ⅳ
S10	0.71	Ⅱ	1.55	Ⅲ
S11	0.74	Ⅱ	1.27	Ⅲ
S12	0.53	Ⅱ	0.65	Ⅱ
S13	0.66	Ⅱ	1.15	Ⅲ
S14	0.57	Ⅱ	0.62	Ⅱ

河南段和河北段沉积物磷的生物有效性较强, 沉积物磷释放潜能较大, 京津段整体释放潜能较低. 生物有效磷指数侧重于磷对生物的可利用性, 能直接反映沉积物磷对水生生物的潜在毒性能力; 而单因子污

染指数则主要考量磷的总量及富集程度, 从污染负荷角度评估潜在释放风险. 当 P_i 值高而 P_{ki} 值低时, 此时沉积物为较大的“磷库”, 但短期释放潜能较低. 当 P_i 值低而 P_{ki} 值高时, 此时沉积物中 $w_T(P)$ 相对较低, 但其有效磷的比例较高, 沉积物的短期释放潜能升高. 因此, 综合运用这 2 种指标, 能更全面、准确地评估干渠沉积物磷富集状况, 为后续污染防控提供更具针对性与科学性的决策依据.

2.5 磷沉积关键过程

空间分布特征表明, 沉积物 N 与 P 质量比沿水流方向呈递减趋势, 与上覆水体磷限制状态形成显著反差. 表明藻类通过吸收水体溶解态活性磷, 并经沉降过程将磷转移至沉积相.

磷形态分布特征进一步从地球化学相角度提供了关键证据: 上游沉积物中以 Fe-P 和 Or-P 为主要活性磷库, 反映了藻源性磷输入及相应的氧化还原成岩环境^[47]. 在高有机质负荷背景下, 异养微生物代谢导致沉积物-水界面趋于缺氧状态, 进而引发电化学转化. 下游表现为活性磷的稳定化路径: 京津段沉积物中 Ca-P 富集, 而 Fe-P 与 Or-P 含量降低, 表明在钙质与 pH 较高的水化学环境下, 还原释放的 Fe-P 并未完全进入上覆水体, 而是部分经生物地球化学作用转化为难释放的钙磷矿物, 导致京津段磷的有效性显著降低. 同时, 下游高 $m(C)/m(N)$ 表明有机质以难降解组分为主^[48], 进一步抑制了 Or-P 的矿化动力学速率.

如图 6 所示, 南水北调中线干渠沉积物磷沉降-固定过程是由藻类驱动泵吸与地球化学调控 2 个过程

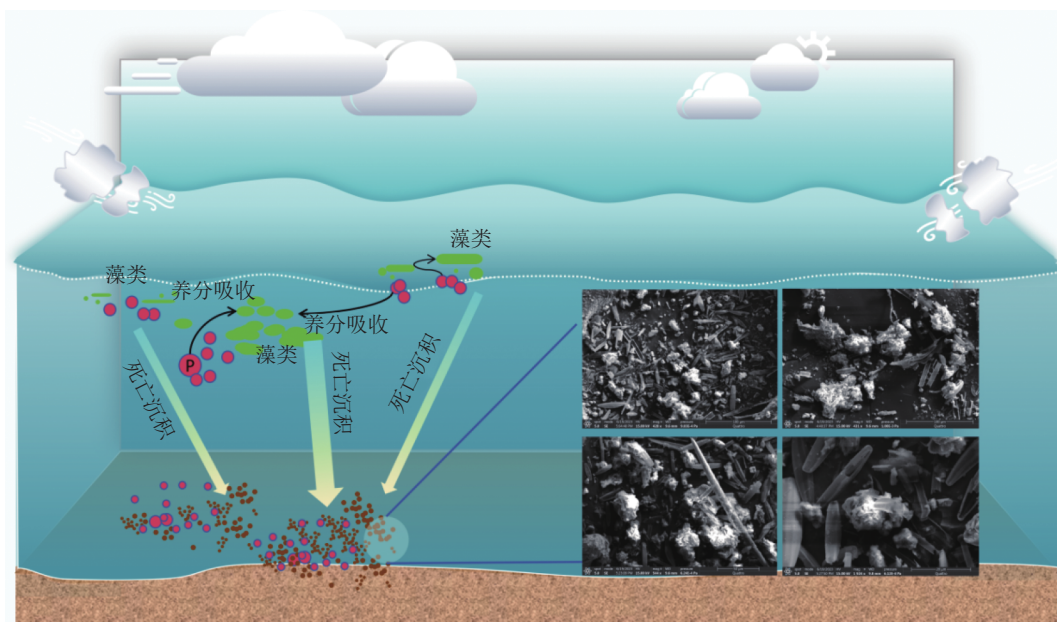


图 6 南水北调中线干渠水体磷沉积过程概念

共同耦合控制. 藻类生长活动将磷以活性形态(Fe-Al-P、Or-P)输送至沉积物, 在高有机质诱导的还原条件及高钙环境中, 这些活性组分经化学反应转化为稳定的钙结合态, 造成磷在沉积相中的生物可利用性降低. 沉降-固定过程构成一个自我维持的“内源磷滞留循环”: 藻类泵吸作用导致水体磷限制, 磷在沉积物中积累并发生形态稳定化. 揭示了沉积物“磷汇”功能与水体磷限制并存的内在成因, 明确指出当前系统的关键约束并非磷总量, 而是磷生物地球化学循环的效率阻滞. 因此, 治理策略需从沉积物界面氧化还原调控-钙磷转化抑制的多目标协同治理新路径.

3 结论

1) 南水北调中线干渠沉积物具有较高的内源磷释放潜能. 基于 TP 的 P_i 评估结果显示, 大部分区域未受到污染. 而基于 BAP 的 P_{ki} 评价却发现, 中上游(河南、河北段)多个点位存在较高的磷释放潜能. 沉积物中 BAP 占比高达 65.8%, 其主要活性组分包括 Or-P 和 Fe-P. 在弱碱性水环境条件下, Fe-P 具有较高的释放潜能, 对淤积区水体构成潜在威胁.

2) 中线干渠系统中存在“藻类生物泵驱动”的磷沉降过程. 藻类在生长过程中吸收上覆水体中的溶解性磷, 导致水体磷含量变低, 其死亡后沉降, 携带磷在沉积物中富集, 形成高有机磷“磷库”. 沉积物中生物有效磷的分布特征及利用扫描电镜技术识别沉积物形态, 间接证实了藻类生物泵的重要性, 凸显了其在沉积过程的关键作用. 在高有机质诱导的还原环境和碱性水质条件下, 活性磷(如 Fe-P)转化为稳定的 Ca-P. 此外, 在高 C、N 质量比环境下, 矿化速率降低, 进一步促进了磷在沉积相中的沉积.

3) 水体磷限制状态与沉积物“磷汇”功能并存, 治理关键是调控磷形态及生物有效性. 中线干渠上覆水体呈磷限制状态(N、P 物质的量比值极高)、沉积物中 TP 持续累积的现象, 所以单纯关注 TP 治理效果有限. 未来水质安全调控应着重调节沉积物-水界面氧化还原环境, 抑制活性磷释放, 调控其向稳定形态转化的地球化学路径.

4 参考文献

- [1] 陈伟. 决定南水北调工程成败的关键: 水质抑或水量[J]. 中国软科学, 2016(7): 9
- [2] 范傲翔, 王智鹏, 王超, 等. 南水北调中线总干渠水体耗氧特征及成因[J]. 环境科学学报, 2020, 40(3): 871
- [3] Long Y, Feng M J, Li Y M, et al. Comprehensive risk

- assessment of algae and shellfish in the middle route of South-to-North Water Diversion Project[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(52): 79320
- [4] Qu J H, Peng J F. Significance and enlightenment of implementing water ecological assessment[J]. *Water & Ecology*, 2025, 1(1): 100002
- [5] 王计超, 黄涛, 孙婷婷, 等. 蓝藻生消对沉积物-水界面磷、铁、硫耦合循环的影响[J]. 环境科学学报, 2024, 44(7): 231
- [6] 张雪瑞, 郭一玮, 王晓燕, 等. 密云水库沉积物-水界面磷交换特征及其对环境因子的响应[J]. 湖泊科学, 2025, 37(3): 835
- [7] 刘迪, 刘亚涛, 赵可可, 等. 习水河典型水生生物群落对环境因子的响应机制研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2025, 61(5): 698
- [8] 秦伯强. 浅水湖泊湖沼学与太湖富营养化控制研究[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1229
- [9] 王荣, 贺锋, 徐栋, 等. 人工湿地基质除磷机理及影响因素研究[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(增刊1): 12
- [10] 沈逸伦, 李财, 孙全, 等. 典型城市入湖河流沉积物磷的时空分布规律与释放风险研究[J]. 环境科学学报, 2025, 45(4): 231
- [11] 刘杰, 陈前, 许妍, 等. 长江流域洞庭湖区出入湖磷通量模拟及水质预测: 机器学习与传统水文模型耦合方法[J]. 地球科学, 2024, 49(11): 3995
- [12] Walton C R, Zak D, Audet J, et al. Wetland buffer zones for nitrogen and phosphorus retention: impacts of soil type, hydrology and vegetation[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 727: 138709
- [13] 何宜颖, 陈建耀, 高磊, 等. 惠州白盆珠水库沉积物营养元素时空变化特征及源解析[J]. 生态环境学报, 2020, 29(7): 1419
- [14] 谢发之, 罗锟, 朱元荣, 等. 南漪湖沉积物磷的赋存形态及对上覆水的影响[J]. 中国环境科学, 2022, 42(11): 5318
- [15] 王超, 毕磊, 赵伦, 等. 南水北调中线总干渠浮游藻类对高锰酸盐指数的影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(2): 284
- [16] 高赛, 毕可跃, 张海鹏, 等. 南水北调中线北京段浮游植物时空变化与水质指标关系[J]. 环境污染与防治, 2025, 47(2): 88
- [17] 蔡晓彤, 刘凯, 刘晓波, 等. 南水北调中线总干渠西黑山沉积物营养盐释放速率[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(2): 303
- [18] Du C, Chang Z B, Tang W Z, et al. Molecular insights into the seasonal variation of fluorescent dissolved organic matter in a hydrologically isolated aquatic continuum[J].

- Journal of Hydrology*, 2025, 661: 133620
- [19] 陈维江, 左丽, 黄明海, 等. 南水北调中线工程总干渠冬季大流量输水水温调控措施 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(6): 1064
- [20] 王秀杰, 宋新丹, 乔鸿飞, 等. 南水北调中线干渠冰情时空变化特征及驱动因素研究 [J]. *冰川冻土*, 2025, 47(3): 804
- [21] Hupfer M, Zak D, Roßberg R, et al. Evaluation of a well-established sequential phosphorus fractionation technique for use in calcite-rich lake sediments: identification and prevention of artifacts due to apatite formation[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2009, 7(6): 399
- [22] 丁厚宽, 曾大海, 赵建南, 等. 黄河中下游表层沉积物营养盐和重金属的污染评价与来源解析 [J]. *环境科学*, 2025, 46(12): 7647
- [23] Ye H M, Yang H, Han N, et al. Risk assessment based on nitrogen and phosphorus forms in watershed sediments: a case study of the upper reaches of the Minjiang watershed[J]. *Sustainability*, 2019, 11(20): 5565
- [24] Boström B, Persson G, Broberg B. Bioavailability of different phosphorus forms in freshwater systems[J]. *Hydrobiologia*, 1988, 170(1): 133
- [25] Reddy Y, Ganguly D, Singh G, et al. Assessment of bioavailable nitrogen and phosphorus content in the sediments of Indian mangroves[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(31): 42051
- [26] 杨柳英, 焦树林, 王磊, 等. 岩溶峡谷型水库沉积物磷形态分布及污染评价: 以万峰水库为例 [J]. *湖泊科学*, 2024, 36(4): 1131
- [27] Reynolds C S, Davies P S. Sources and bioavailability of phosphorus fractions in freshwaters: a British perspective[J]. *Biological Reviews*, 2001, 76(1): 27
- [28] 黄广灵, 黄本胜, 刘达, 等. 东江河口典型河段溶解氧时空动态及低氧成因解析 [J]. *湖泊科学*, 2025, 37(1): 112
- [29] 吉芳英, 王图锦, 胡学斌, 等. 三峡库区消落区水体-沉积物重金属迁移转化特征 [J]. *环境科学*, 2009, 30(12): 3481
- [30] 李哲, 郭劲松, 方芳, 等. 三峡水库小江回水区不同TN/TP水平下氮素形态分布和循环特点 [J]. *湖泊科学*, 2009, 21(4): 509
- [31] 聂泽宇, 梁新强, 邢波, 等. 基于氮磷比解析太湖苕溪水体营养现状及应对策略 [J]. *生态学报*, 2012, 32(1): 48
- [32] 杨文焕, 李艳芳, 张明宇, 等. 基于长时间序列内蒙古典型湖泊水质变化特征及趋势分析 [J]. *湖泊科学*, 2025, 37(4): 1249
- [33] 李荣富, 廖文成, 梁培瑜, 等. 鄱阳湖流域典型水源水库水华暴发成因及氮污染溯源 [J]. *湖泊科学*, 2024, 36(4): 1014
- [34] 王超, 邹丽敏, 王沛芳, 等. 典型城市浅水湖泊沉积物磷形态的分布及与富营养化的关系 [J]. *环境科学*, 2008, 29(5): 1303
- [35] 李清雪, 靳慧慧, 赵海萍, 等. 向家坝库区沉积物磷形态分布及释放风险 [J]. *环境科学学报*, 2022, 42(9): 182
- [36] 赵政, 钱姝羽, 白雷雷, 等. 新型通江湖泊隔湖沉积物内源污染物分布及释放特征 [J]. *湖泊科学*, 2025, 37(3): 872
- [37] 沙梦乔, 柴娜, 赵洪涛, 等. 互花米草入侵对胶州湾湿地土壤磷赋存形态的影响 [J]. *环境科学*, 2021, 42(11): 5414
- [38] 谭立贤, 康得军, 刘成, 等. 丘陵山区水库沉积物-水界面磷源汇转换机制 [J]. *中国环境科学*, 2024, 44(4): 2137
- [39] 杜兆楠, 许清峰, 冯皖玉, 等. 长江流域退养湖泊沉积物中磷的系统性特征 [J]. *环境科学*, 2026, 47(3): 1688
- [40] Chen J Q, Jiang F J, Cong Q, et al. Adsorption characteristics of shale gas in organic-inorganic slit pores[J]. *Energy*, 2023, 278: 127788
- [41] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment[J]. *Water Research*, 2000, 34(7): 2037
- [42] 杨宏伟, 杨小红, 韩明梅. 黄河表层沉积物中磷形态分布与释放风险 [J]. *环境化学*, 2016, 35(2): 403
- [43] 杨耿, 秦延文, 韩超南, 等. 岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征 [J]. *环境科学*, 2018, 39(5): 2165
- [44] 鲁婷, 陈能汪, 陈朱虹, 等. 九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义 [J]. *环境科学*, 2013, 34(9): 3430
- [45] 张雪, 朱波. 三峡库区支流库湾消落带土壤磷形态赋存特征及其释放风险 [J]. *环境科学*, 2023, 44(5): 2574
- [46] Liu D D, Li X Y, Qiao Q, et al. Assessment of phosphorus pollution and phosphorus release mechanisms of sediment in the Tuojiang River, Southwest China[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024, 51: 101635
- [47] 王亚蕊, 陈向超, 陈丙法, 等. 藻屑堆积对沉积物-水界面污染物的释放效应 [J]. *环境科学学报*, 2018, 38(1): 142
- [48] 崔圆, 张振明, 王晨, 等. 黄河三角洲湿地表层土壤磷形态分布特征 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(1): 59

Key phosphorus deposition processes in the main canal in the Middle Route, South-to-North Water Diversion Project

Zheng Zhixia¹⁾, Feng Wanyu^{1, 2)}, Wang Shixiang³⁾, Pei Xiping^{2, 5)},
Du Zhaonan^{2, 4)}, Tang Wenzhong^{2, 5)}, Zhang Hong^{2, 5)}

(1) School of Life and Health Sciences, Environmental Engineering, Hefei University, Hefei, Anhui, China; 2) Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, State Key Laboratory of Regional Environment and Sustainability, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China; 3) Xinyang Ecological Environment Monitoring Center of Henan Province, Xinyang, He'nan, China; 4) College of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei China; 5) University of Chinese Academy of Sciences College of Resources and Environment, Beijing, China)

Abstract As a major trans-basin water transfer project, water-quality safety of the Middle Route Main Canal in the South-to-North Water Diversion Project is of paramount importance. In this study surface sediment and water samples were collected from 14 siltation zones along the canal, to analyze water physicochemical parameters and sediment nutrient contents. Six phosphorus forms were characterized, release potential of endophytic phosphorus was evaluated, and the process of phosphorus deposition was examined. Algae were found to absorb phosphorus from water, to deposit it into sediments upon death, interacting with geochemical processes to drive phosphorus accumulation in sediments. This would result in a phosphorus-limited state in the canal water (average N/P molar ratio of 1 203.2), with total phosphorus in sediments predominantly consisting of organic phosphorus and iron-bound phosphorus, and bioavailable phosphorus accounting for 65.8%. Spatially, phosphorus levels showed a trend of higher concentrations in the middle and upper reaches and lower concentrations downstream. Single-factor pollution indices indicate that most monitoring points were at clean or normal levels, while the bioavailable phosphorus index revealed moderate to severe enrichment at multiple points in the middle and upper reaches, indicating high release potential of phosphorus in sediments. To implement water quality regulation, it is recommended to interface redox regulation and calcium-phosphorus transformation, to effectively ensure water quality safety at the Middle Route Main Canal of the South-to-North Water Diversion Project.

Keywords the main canal of the South-to-North Water Diversion Project central route; sediment; phosphorus speciation; space distribution; release potential

【责任编辑: 武 佳】