

不同温度对沉积物理化性质 及磷形态赋存特征的 影响研究

易佳妮

温州大学生命与环境科学学院, 浙江 温州

收稿日期: 2025年12月23日; 录用日期: 2026年1月25日; 发布日期: 2026年2月14日

摘 要

温度是调控沉积物磷释放的关键环境因子。为了探究不同温度下沉积物磷释放特性, 对不同温度条件下, 三垟湿地沉积物中磷形态含量特征及理化性质进行了研究。通过室内模拟实验, 测定了在10℃、25℃、30℃培养条件下, 沉积物在不同时间的磷形态含量特征及理化性质。结果表明, 不同温度下底泥中磷的赋存形态存在较大差异, 并且其磷的释放具有极强的温度依赖性: 在25℃下, 磷释放主要经由铁结合磷的还原溶解路径主导; 在30℃下, 高温同时激活多个释磷路径, 其中有机磷的转化成为最主要的释磷来源, 同时伴随着铁、铝结合磷的复杂动态变化。本研究系统揭示了温度对三垟湿地沉积物磷形态赋存特征的影响, 对于深入理解湿地内源磷释放机制、预测富营养化风险及制定针对性生态修复策略等具有重要意义。

关键词

沉积物, 磷形态, 温度

A Study on the Effects of Different Temperatures on the Physicochemical Properties and Phosphorus Speciation Characteristics of Sediments

Jiani Yi

College of Life and Environmental Sciences, Wenzhou University, Wenzhou Zhejiang

Received: December 23, 2025; accepted: January 25, 2026; published: February 14, 2026

Abstract

Temperature is a key environmental factor controlling phosphorus release from sediments. To investigate the characteristics of phosphorus release from sediments at different temperatures, the phosphorus speciation and physicochemical properties of sediments from Sanyang Wetland were studied under varying temperature conditions. The phosphorus speciation characteristics and physicochemical properties of sediments in the Sanyang Wetland were investigated under different temperature conditions. Through laboratory simulation experiments, phosphorus speciation characteristics and physicochemical properties of sediments in culture columns were measured at different time points under incubator temperatures of 10°C, 25°C, and 30°C. Results indicate significant form-specificity and temperature dependence in phosphorus release: at 25°C, phosphorus release primarily occurs via the reduction-dissolution pathway of iron-bound phosphorus; at 30°C, elevated temperatures simultaneously activate multiple release pathways, with the transformation of organic phosphorus becoming the predominant release source, accompanied by complex dynamic changes in iron-and aluminum-bound phosphorus. This study systematically reveals the influence of temperature on the characteristics of phosphorus speciation in the sediments of the Sanyang Wetland, which is of great significance for a deeper understanding of the mechanisms of internal phosphorus release in wetlands, predicting eutrophication risks, and formulating targeted ecological restoration strategies.

Keywords

Sediment, Phosphorus Speciation, Temperature

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

磷是水体富营养化的关键限制性元素[1], 其在水体中的浓度和生物有效性受沉积物内源释放的影响。湿地沉积物作为磷的重要源与汇, 其磷的吸附-解吸、沉淀-溶解等界面过程受到温度、pH、溶解氧等多种环境因子的调控[2][3]。其中, 温度作为一个关键驱动因子, 已被大量研究证实能够显著促进浅水湖泊和河口沉积物中磷的释放[4]。沉积物中磷以不同的化学形式存在, 它们发挥着不同的生态环境作用[5], 明确沉积物中磷组分的化学成分信息对于了解湖泊生态系统中磷的生物利用度和富营养化至关重要。

三垱湿地作为典型的城市湿地生态系统, 人类活动干扰明显, 不仅多年来受温瑞塘河污水影响, 而且湿地内工农业生产、居民生活污水的直接排放等造成三垱湿地水体富营养化严重。尽管近年来, 由于政府采取了一系列措施, 有效控制了外源污染物的污染, 但内源(底泥沉积物)污染问题尚未有效解决, 因此, 揭示湿地上覆水-底泥界面磷吸附与解析的特征性过程及其规律性机制, 可为科学合理实施湿地磷生态修复提供理论基础与技术指导。

2. 材料与方法

2.1. 实验装置

实验装置如图所示(图 1), 由内径 10 cm, 高 45 cm 的带底座玻璃柱为容器, 将沉积物样品混合均匀铺在柱底部, 厚度为 6 cm, 用虹吸法缓缓注入 2 L 纯水, 柱口使用锡纸覆盖避免水分蒸发损失。在 21 cm

处打孔，连接硅胶软管，便于实验时用注射器取水。

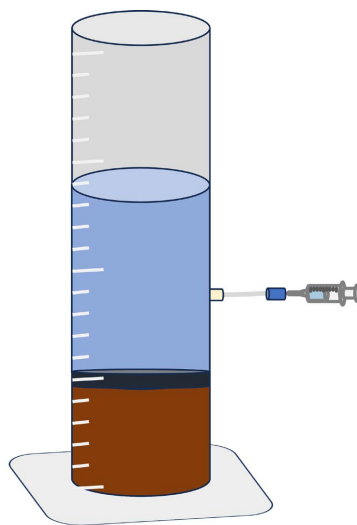


Figure 1. Schematic diagram of the experimental apparatus

图 1. 实验装置示意图

2.2. 实验设计

将装置放入培养箱，培养箱设定不同温度水平(10℃、25℃、30℃)，实验开始后于第 1、7、14 天进行破坏性取样，每组三个平行，实验周期共计 14 天。

2.3. 分析方法

上覆水氧化还原电位与溶解氧使用便携式多参数水质分析仪测定。

沉积物 pH 值的测定，采用国标 HJ 962-2018 电位法、有机质采用重铬酸钾容量法 - 外加热法测定。

采用 Rydin [6]的连续分级提取法测定沉积物中弱结合态磷(LP)、铁结合态磷(Fe-P)、铝结合态(Al-P)、钙结合态(Ca-P)、残渣态磷(Res-P)和有机磷(OP)、无机磷(IP)和总磷(TP)。

2.4. 统计分析

实验数据以均值 $\pm$ 标准差表示。各指标均设置 3 个平行样本($n = 3$)。使用 GraphPad Prism 10 软件进行统计分析。采用单因素方差分析比较同一温度条件下不同培养时间点之间的差异，显著性水平设定为 $P < 0.05$ 。

3. 结果

3.1. 上覆水中理化性质特征

10℃下上覆水氧化还原电位值在整个实验期间维持在 192.5 mV~245.4 mV，25℃处理下上覆水氧化还原电位值在第 14 天达到最低值 280.6 mV；30℃下上覆水氧化还原电位值随时间显著增加，整体维持在 228.9 mV~262.4 mV (图 2(A))。三个实验温度条件下氧化还原电位变化范围较窄(192.5 mV~280.6 mV)，且随温度变化无明显规律。

上覆水溶解氧值在 10℃处理下由 11.21 mg/L 降低到 10.13 mg/L，在 25℃下由 10.44 mg/L 降低到 8.51 mg/L，30℃下溶解氧值在实验过程中维持在 9.26 mg/L~9.78 mg/L (图 2(B))。

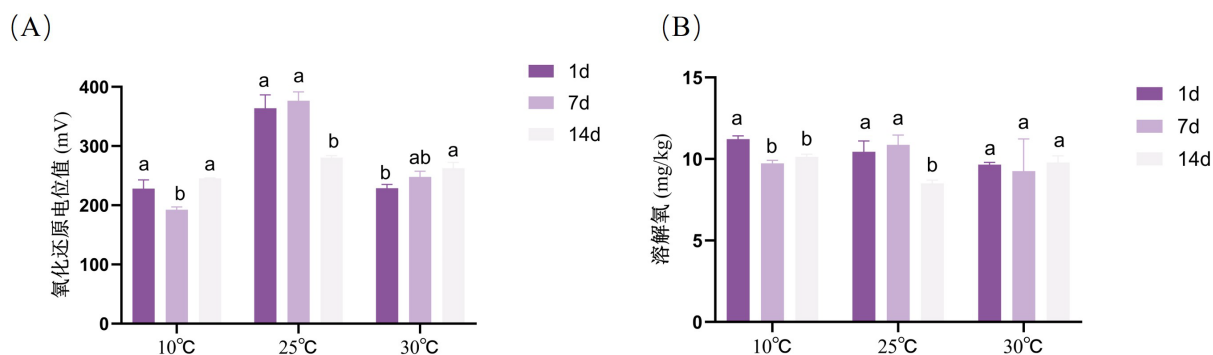


Figure 2. Variations in (A) redox potential and (B) dissolved oxygen of overlying water with temperature

图 2. 各温度下上覆水(A)氧化还原电位和(B)溶解氧的变化

3.2. 沉积物中理化性质特征

实验表明, 10°C 环境下, 沉积物有机质含量在第 7 天达到最高值, 并显著高于第 1 天和第 14 天, 25°C 环境下沉积物有机质在第 14 天达到最高值; 30°C 下沉积物有机质在第 7 天显著高于第 14 天和第 1 天, 可能与微生物活动加剧导致有机质积累或转化有关(图 3(A)); 沉积物 pH 值在 10°C 下随时间显著降低, 从 7.04 下降到 6.81, 在 25°C 和 30°C 下, 沉积物 pH 值随时间显著升高, 分别由 6.91 升高到 7.06 和 6.79 升高到 7.2 (图 3(B))。

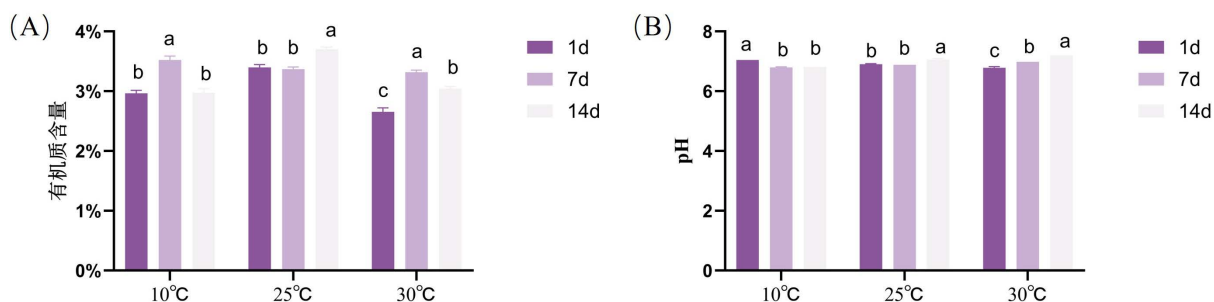


Figure 3. Effect of temperature on organic matter content (A) and pH (B) in sediments

图 3. 温度对沉积物有机质(A)和 pH (B)的影响

3.3. 沉积物中各形态无机磷含量特征变化

弱结合态磷主要存在于沉积物表层, 极易受外界环境的干扰[7]; 钙结合态磷主要由钙结合的磷组成, 难以被生物或浮游植物利用[8]; 残渣态磷是指被固定在原生和次生矿物晶格中的磷形态, 由于其稳定的化学性质, 残渣态磷是沉积物中最惰性的磷组分, 难以被生物直接利用[9]。本研究结果发现弱结合态磷和钙结合态磷和残渣态磷在不同温度下实验前后的含量变化不大, 只有在 30°C 下沉积物 LP 含量出现降低, 表明高温促进了沉积物对弱结合态磷的释放, 使其成为可快速交换的磷源; 而钙结合态磷和残渣态磷实验前后无显著变化是因为钙结合态磷和残渣态磷化学性质最为稳定, 并不作为沉积物中主要的释放来源(图 4(A)、图 4(D)、图 4(E))。

铁结合态磷是指沉积物中通过吸附、共沉淀等作用与铁氧化物及氢氧化物结合的磷形态。由于其结合力相对较弱, 铁结合态磷是沉积物中最活跃的磷形态之一[10], 其含量对环境条件, 特别是氧化还原状态的变化极为敏感, 是内源磷释放的关键指标[11]。铁结合态磷在 25°C 和 30°C 下均出现显著升高, 分别由初始 53.55 mg/kg 升高至 60 mg/kg 和 47.94 mg/kg 升高至 76.20 mg/kg, 而在 10°C 下表现为显著降低,

由初始 59.48 mg/kg 降低至 57.02 mg/kg (图 4(B))。且在 30℃ 下, 沉积物中铁结合态磷百分比在 30℃ 下持续增加(图 5(C)), 而在 10℃ 和 25℃ 下并未出现增加趋势(图 5(A)、图 5(B))。这与一般情况下高温促进沉积物铁结合态磷的释放现象相反, 这表明高温(30℃)可能改变了沉积物磷循环路径: 强烈的有机磷矿化作用导致间隙水中磷酸盐浓度急剧升高, 进而促进了磷酸盐与铁(氢)氧化物的再结合与共沉淀, 使得铁结合态磷的生成速率超过了其可能被还原的速率[12]。

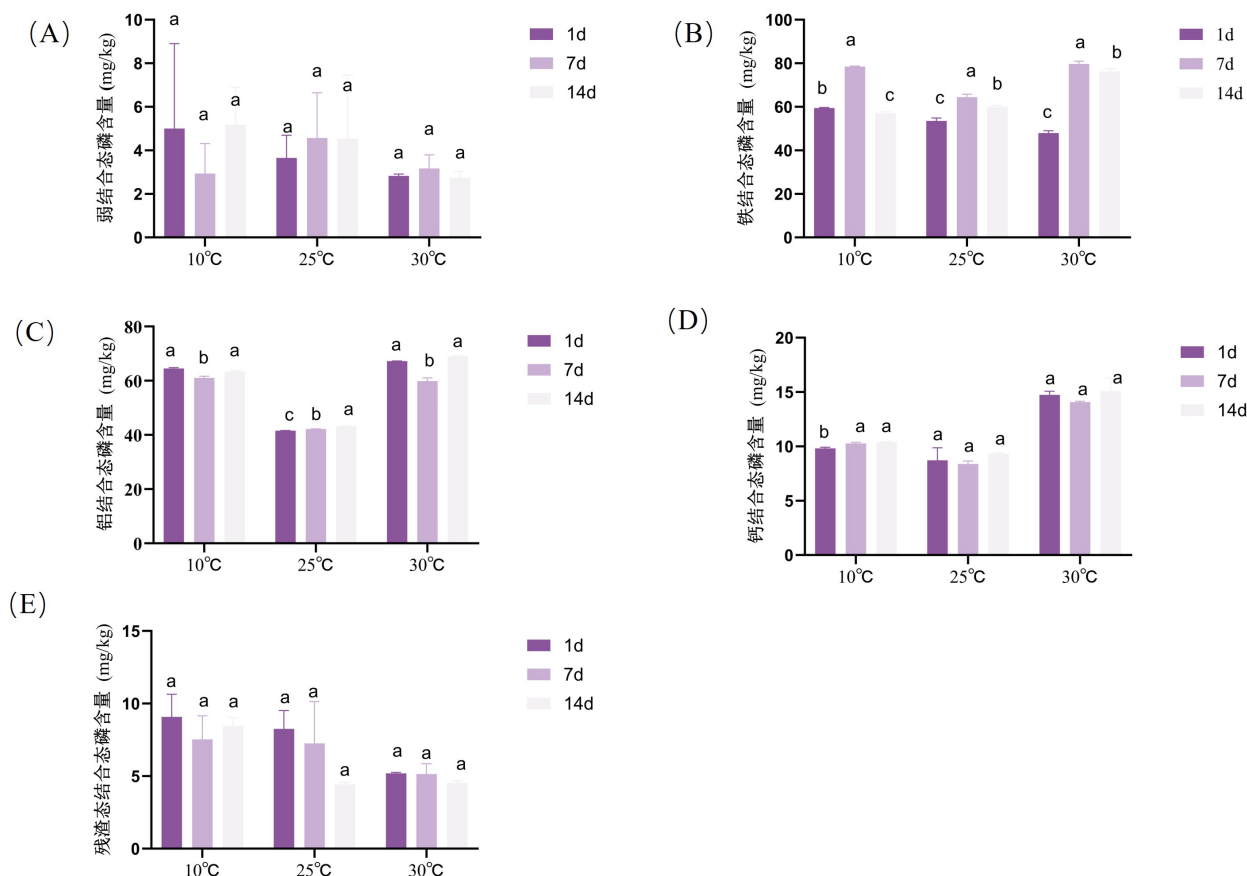


Figure 4. Effect of temperature on various forms of inorganic phosphorus in sediments: (A) LP; (B) Fe-P; (C) Al-P; (D) Ca-P; (E) Res-P

图 4. 温度对沉积物弱结合态磷(A) 铁结合态磷; (B) 铝结合态磷; (C) 钙结合态磷; (D) 和残渣态磷; (E) 的影响

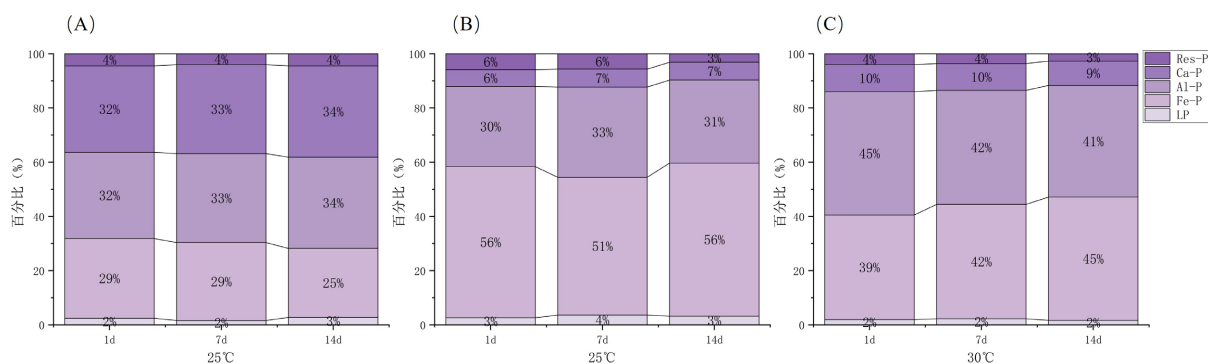


Figure 5. Percentage of different phosphorus forms in sediments at different temperatures: (A) 10°C; (B) 25°C; (C) 30°C

图 5. 各温度下沉积物中不同形态磷百分比图(A) 25°C; (B) 25°C; (C) 30°C

铝氧化物对磷的吸附作用为不可逆的永久性吸附[13]。被认为是具有潜在生物活性的磷源。铝结合态磷在 10℃ 和 30℃ 下实验前后变化不明显,但在这两个温度下的实验过程中(第 7 天)存在显著释放,在 25℃ 下表现为显著升高,由初始 41.57 mg/kg 升高至 43.16 mg/kg (图 4(C))。且在 30℃ 下,沉积物中铝结合态磷百分比在 30℃ 下持续减少(图 5(C)),而在 10℃ 和 25℃ 下并未出现下降趋势。以上研究结果表明有机磷矿化导致沉积物中铝结合态磷含量增加,导致铝结合态磷的释放。

3.4. 沉积物中无机磷、有机磷含量特征

无机磷(IP)含量在 10℃ 时随时间而显著下降,与 Fe-P 的释放对应;在 25℃ 下随时间变化不明显;30℃ 时随时间变化显著升高,由 147.78 mg/kg 升高到 167.51 mg/kg,表明高温下有机磷强烈矿化转变为无机磷(图 6(A))。

有机磷含量在 10℃ 时随时间变化显著升高,由 12.32 mg/kg 升高到 15.71 mg/kg,可能是微生物合成或由 IP 转化而来;25℃ 时随时间变化不明显,说明该温度下 OP 和 IP 转换达到相对平衡;30℃ 时随时间变化显著降低,由 13.93 mg/kg 降低至 3.18 mg/kg,其主要机制推测为,高温下微生物活动增强导致有机质分解加速,导致沉积物中无机磷浓度迅速增加(图 6(B))。

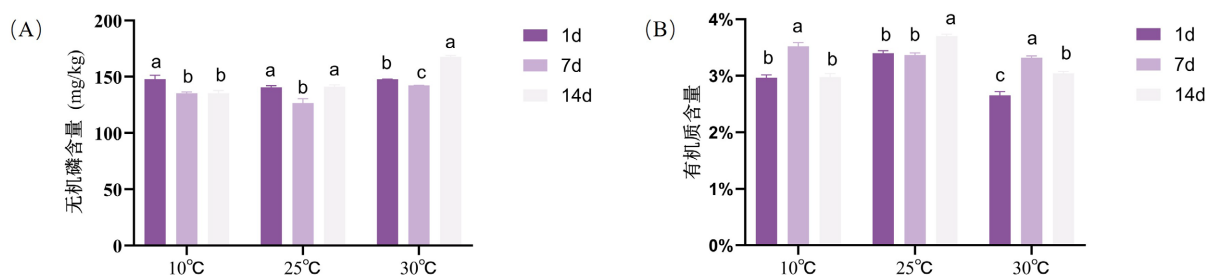


Figure 6. Effect of temperature on inorganic phosphorus (A) and organic phosphorus (B) in sediments

图 6. 温度对沉积物无机磷(A)和有机磷(B)的影响

4. 结论

本研究通过室内模拟实验,系统揭示了三垌湿地沉积物磷形态对温度的响应规律:

(1) 低温(10℃): 沉积物 pH 降低,铁结合态磷释放,无机磷减少而有机磷积累。沉积物总体释磷路径以铁还原溶解为主,但释放量较小。

(2) 中温(25℃): pH 升高有利于铁、铝结合态磷的吸附增加,磷形态间转换达到平衡,无机磷和有机磷含量稳定,释磷路径以铁结合磷的还原溶解为主导。

(3) 高温(30℃): 显著提升 pH 和有机质含量,同时激活多种磷释放机制:有机磷强烈矿化为无机磷,成为最主要的释磷来源;高温促进了沉积物对弱结合态磷的释放,使其成为可快速交换的磷源;铁结合态磷增加,但可能伴随复杂动态转化。高温下磷释放路径多元化,总体释放风险最高。

5. 总结

温度可能通过调控沉积物 pH、酶活性和微生物过程,显著影响磷的形态转化与释放潜力。30℃ 下有机磷矿化显著增加了内源磷释放风险。该研究为湿地内源磷管理及富营养化防控提供了温度依赖的理论依据。

参考文献

[1] 张修峰, 陆健健. 温州三垌湿地底泥疏浚对水体总磷浓度影响的生态模型研究[J]. 农业环境科学学报, 2006(S1):

- 158-162.
- [2] Tu, C.Q., Chang, Y.S., Dong, X.S., *et al.* (2023) The Effect of Paraburkholderia on the Nutrients in Eutrophic Lakes. *Separations*, **10**, Article 595. <https://doi.org/10.3390/separations10120595>
 - [3] Wang, Z.L., Wang, C.H., Jiang, H.L., *et al.* (2022) Higher Dissolved Oxygen Levels Promote Downward Migration of Phosphorus in the Sediment Profile: Implications for Lake Restoration. *Chemosphere*, **301**, Article 134705. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134705>
 - [4] Cheng, X.L., Huang, Y.N., Li, R., *et al.* (2020) Impacts of Water Temperature on Phosphorus Release of Sediments under Flowing Overlying Water. *Journal of Contaminant Hydrology*, **235**, Article 103717. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2020.103717>
 - [5] 汪宇菲, 张云鹏, 金苗, 等. 水环境中无机还原态磷的研究进展与展望[J]. 湖泊科学, 2024, 36(6): 1626-1638.
 - [6] Rydin, E. (2000) Potentially Mobile Phosphorus in Lake Erken Sediment. *Water Research*, **34**, 2037-2042. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(99\)00375-9](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(99)00375-9)
 - [7] 周茨, 孙景昱, 刘建刚, 等. 温度和采样深度对于静态培养法测定太湖沉积物磷释放的影响[J]. 环境工程学报, 2025, 19(5): 1074-1081.
 - [8] Jing, D., Yan, Y., Ren, T., Lu, J., Wang, X., Chen, J., *et al.* (2021) Effects of Nitrogen Application Rate on Phosphorus Transformation in an Alfisol: Results from Phosphate-Oxygen Isotope Ratios. *Applied Geochemistry*, **134**, Article 105094. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.105094>
 - [9] Liang, J., Yan, M., Zhu, Z., Lu, L., Ding, J., Zhou, Q., *et al.* (2025) The Role of Microorganisms in Phosphorus Cycling at River-Lake Confluences: Insights from a Study on Microbial Community Dynamics. *Water Research*, **268**, Article 122556. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122556>
 - [10] 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): 182-190.
 - [11] Rapin, A., Grybos, M., Rabiet, M., Mourier, B. and Deluchat, V. (2019) Phosphorus Mobility in Dam Reservoir Affected by Redox Oscillations: An Experimental Study. *Journal of Environmental Sciences*, **77**, 250-263. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.07.016>
 - [12] 张思远. 藻类腐解驱动的硫、铁还原及沉积物释磷过程研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京师范大学, 2021.
 - [13] Huang, W., Chen, X., Wang, K. and Jiang, X. (2018) Seasonal Characteristics of Phosphorus Sorption by Sediments from Plain Lakes with Different Trophic Statuses. *Royal Society Open Science*, **5**, Article 172237. <https://doi.org/10.1098/rsos.172237>