

农业流域小微水体沉积物磷形态及释放风险*

柳闻莺^{1,2,3}, 任焕博⁴, 易 军⁴, 时光翔⁴, 张 亮^{1,2,3}, 霍柯蓉^{1,2,3}, 李思思^{1,2,3**}

- (1: 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院/湖北省面源污染防治工程技术研究中心, 武汉 430077)
(2: 环境与灾害监测评估湖北省重点实验室/湖北洪湖湿地国家生态质量综合监测站, 武汉 430077)
(3: 中国科学院大学, 北京 100049)
(4: 华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079)

摘 要: 我国农业流域, 小微水体作为河湖的保护屏障是重要的磷截留和储存场所, 但在长期磷累积和特定环境条件下存在磷释放风险。目前, 缺乏小微水体释放风险相关研究和揭示磷截留-释放动态变化特征及影响因素的长期试验。本研究针对典型农业小流域, 开展 4 种类型水塘的沉积物采样和为期 6 个月的静态培养实验, 分析沉积物磷形态特征及沉积物-上覆水界面磷交换动态, 评估水塘磷释放风险及影响因素。结果表明: (1) 水塘沉积物总磷含量为: 0.55~3.02g/kg, 与其他类型湿地相比偏高。其中村落塘磷含量最高, 水田塘磷含量最低。(2) 在长江中下游农业流域, 且水塘存在时间较长的情况下, 沉积物-上覆水界面的磷交换表现出明显的季节变化: 沉积物在夏秋季向上覆水释放磷, 秋冬季磷从上覆水向沉积物沉降。存在年限相似的前提下, 水塘的磷汇能力由大到小为: 林地塘>水田塘=旱地塘>村落塘。研究发现了我国农业流域水塘磷累积量大的现状, 揭示了其长期磷“汇”、夏秋季转变为磷“源”的功能变化特征, 阐明了周边土地利用类型的影响, 为改进水塘管理策略提供科学依据, 对农业面源污染治理及河湖水环境保护具有广泛的应用价值。

关键词: 水塘, 沉积物磷形态, 农业面源污染, “源-汇”转变, 磷扩散通量

Phosphorus forms of sediment and release risk in small water bodies in agricultural watersheds*

Liu Wenying^{1,2,3}, Ren Huanbo⁴, Yi Jun⁴, Shi Guangxiang⁴, Zhang Liang^{1,2,3}, Huo Kerong^{1,2,3}, Li Sisi^{1,2,3**}

- (1: Hubei Provincial Engineering Research Center of Non-Point Source Pollution Control, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, P.R. China)
(2: Key Laboratory for Environment and Disaster Monitoring and Evaluation of Hubei, Jiangnan Plain-Honghu Lake Station for Wetland Ecosystem Research, Wuhan 430077, P.R.China)
(3: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)
(4: College of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079, P.R.China)

Abstract: In agricultural watersheds across China, small bodies of water serve as important sites for the retention and storage of phosphorus, acting as protective barriers for rivers and lakes. However, under conditions of long-term phosphorus accumulation and specific environmental factors, there is a risk of phosphorus being released. Currently, research on the risk of phosphorus release from small water bodies, and on the dynamic changes in phosphorus retention and release and the influencing factors through long-term experiments, is lacking. This study focuses on a typical agricultural watershed, conducting sediment sampling

* 2025-02-28 收稿; 2025-05-13 收修改稿。
国家自然科学基金项目 (42207059), 国家重点研发计划项目 (2023YFC3207400) 和湖北省自然科学基金 (2024AFA020, 2025AFA108) 联合资助。
** 通讯作者; Email: lisisi@apm.ac.cn。

from four types of pond alongside a six-month static incubation experiment. The study analyses the phosphorus forms in sediments and the phosphorus exchange dynamics at the sediment-water interface to assess the risk of phosphorus release from the ponds and its influencing factors. The results showed that: (1) The total phosphorus (TP) content of pond sediments was higher than that of other types of wetland, ranging from 0.55 to 3.02 g/kg. The highest phosphorus content was found in village ponds, while the lowest was observed in paddy ponds. (2) In the agricultural watersheds of the middle and lower reaches of the Yangtze River and in ponds that have existed for a long time, phosphorus exchange at the sediment-overlying water interface exhibits significant seasonal variation: sediments release phosphorus to the overlying water in summer and autumn, while phosphorus settles from the overlying water to the sediments in autumn and winter. For ponds of a similar age, the phosphorus sink capacity decreases in the following order: forest pond > paddy pond = dryland pond > village pond. This study revealed large accumulations of phosphorus in agricultural ponds in China, highlighting their long-term function as phosphorus sinks which transform into sources during summer and autumn. The findings also clarified the influence of surrounding land use types and provided scientific guidance for improving management strategies for different pond types. These insights are applicable to the control of non-point source pollution and the protection of aquatic environments in rivers and lakes.

Keywords: Pond, Phosphorus forms in sediments, Agricultural non-point source pollution, “Source-sink” transition, Phosphorus diffusion flux

尽管人类在意识到水体富营养化问题后, 已经为减少营养物质输入地表水体付出了大量努力, 但磷污染仍然是全球水质恢复项目中的关键挑战之一^[1-2]。磷不仅是能导致水体富营养化的农业面源污染的重要组成部分^[1, 3], 同时也是维持或限制水体初级生产力的主要营养元素^[4-5]。由于与水文和生物地球化学循环的相互作用, 储存在土壤或水体沉积物中的磷, 其在流域内的迁移时间可以持续数年至数十年^[6-7]。

水塘作为一种广泛分布在中国南方地区的典型小微水体^[8], 在为农业灌溉提供帮助的同时也为减轻农业面源污染和提升河流水质做出了巨大的贡献^[9-11]。目前, 已有较多的研究关注到了水塘在面源污染截流方面的功能, 水塘通过拦截或沉淀、植物吸收、沉积物吸附等多种过程减少环境中的面源污染物^[12-15]。但当水塘的截留磷能力达到饱和时, 往往会从磷“汇”转变为磷“源”并向环境中释放磷素^[16-17]。同时, 在一定的水力和环境条件下, 前期截留的磷素将再次随径流输出到下游水体, 这种遗留效应也会对流域污染防治提出新的挑战^[18]。因此, 尽管在部分流域已长期实施营养物质管理和减排措施, 但由于历史遗留的营养物质的影响, 水质改善效果仍然不理想^[19-21]。目前, 大部分研究会更加聚焦于湖泊及水库内源营养释放^[22], 如探究湖泊磷循环机制^[23]、浅水湖泊和深水湖泊内沉积物磷释放模式的差异^[24]或季节对水库沉积物磷释放速率的影响^[25]等。即便是针对水塘的研究, 通常也更多关注其对于环境的正面影响^[26-27]。实际上, 沉积物磷素的积累情况对于水塘截留和输出磷的能力具有决定性的影响^[14, 28-29]。分析沉积物的磷素特征对研究磷在沉积物-水界面的迁移转化以及理解磷在流域内的循环、输移和归趋过程具有重要意义。在长期缺乏修缮的背景下, 对水塘沉积物磷积累现状和释放风险的研究相对匮乏。现有研究大多依赖瞬时平衡浓度判断是否存在磷释放风险^[30-31], 而缺乏长期的沉积物-水界面磷通量变化连续培养实验, 这让准确把握水塘在磷“源”和磷“汇”之间转换的时间节点、动态特征及其影响因素存在困难。同时, 尽管磷的迁移通常被认为主要通过地表径流进行^[2], 但作为农业生态系统中独特的景观, 水塘与周围沟渠水系的紧密联系意味着其沉积物间隙水的侧向迁移风险不可忽视。

为了填补以上空缺, 本研究选取位于长江中游的西河流域这一拥有数量众多不同种类水塘的农业流域作为研究区, 从中选择 4 种类型的 8 个典型水塘作为研究对象, 通过原位采样, 发掘水塘沉积物中磷赋存形态间的相关关系。结合后续为期 6 个月的静态培养实验, 连续监测沉积物间隙水、上覆水磷浓度及界面磷通量动态变化, 研究水塘在磷“源”和磷“汇”间转换的动态过程及影响因素。本研究为制定有效的磷污染控制政策和优化小微水体生态系统服务功能提供了理论支持, 对水质恢复及农业面源污染治理具有广泛的应用价值。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

西河全长约 59km，是长江二级支流浠水的主要支流，同时也是英山县的两条主河之一。西河流域位于湖北省东北部（见图 1），属长江中下游北亚热带季风性气候，年平均气温 16.4℃，平均降水量 1403mm，70%的年降水量集中于 4~8 月。研究区作为典型的农业流域，位于地形起伏较大的丘陵地区。西河流域主要受农业生产和居民区污染源的影响，工业点源污染极少。流域总面积中约有 30%为耕地，林地占 66%，剩下的为水体和建设用地等。流域中广泛分布着以水塘为主的小微水体，本研究在流域内选取 8 个典型水塘，根据遥感影像判读及实地走访调查，所选水塘均已存在超过 30 年，存在时长无明显差异。依据各水塘位置和水塘上游汇水区的土地利用组成，可将其分为 4 种类型，具体分类如表 1 所示。

表 1 典型水塘基本数据及上游汇水区土地利用组成

Table 1 Typical ponds basic data and land use composition of the upstream catchment								
分类	编号	稻田 (%)	旱地 (%)	林地 (%)	建设用地 (%)	面积 (m ²)	水深 (m)	沉积物深度 (cm)
林地塘	S1	\	\	100	\	220	0.9	53
	S2	100	\	\	\	1450	1.0	27
水田塘	S3	100	\	\	\	1144	1.0	40
	S4	90	\	10	\	2933	1.3	30
	S5	50	\	30	20	1359	1.0	43
村落塘	S6	80	\	\	20	1673	1.1	52
	S7	\	30	50	20	1142	0.8	51
旱地塘	S8	\	50	50	\	2097	0.5	32

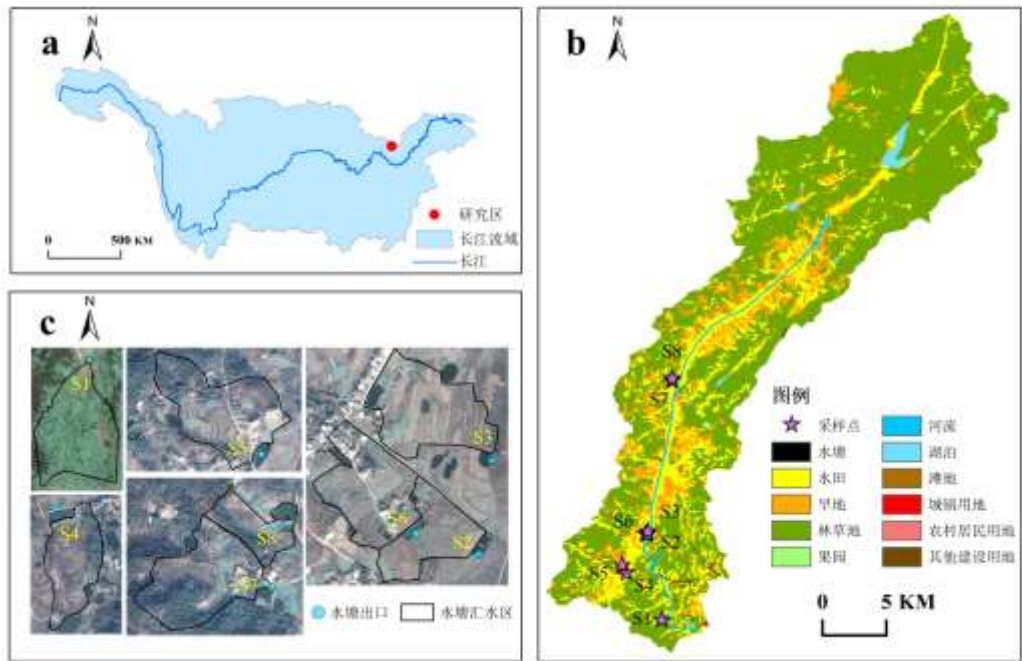


图 1 研究区示意图((a)为研究区在长江流域的位置；(b)为研究区土地利用情况及各采样水塘位置；
(c)为各采样水塘出口及汇水区影像)

Fig. 1 Maps of the study area. 1(a) shows the location of the study area within the Yangtze River Basin; 1(b) shows the land use of the study area and the locations of the sampled ponds; 1(c) shows images of the outlets and catchment areas of the sampled ponds)

1.2 样品采集与培养

于 2023 年 6 月分别采集水塘 S1-S8 上覆水和沉积物样品。其中上覆水由有机玻璃采样器采集，沉积物样品由柱状有机玻璃采样器采集沉积柱，每个水塘选择 3 个样点，将各样点沉积柱按每 5cm 分层后混合，冷藏保存运回。

取部分分层沉积物样品自然风干后，去除动植物残体、石块等杂质，研磨后按每 10cm 分层混匀过 100 目筛后置于干燥皿中保存，用于沉积物磷含量及形态测定。同时,将原始分层沉积物样品按照原有顺序填入 8 个定制的有机玻璃培养柱（高 160cm，内径 8.5cm），并用黑色塑料膜包裹培养柱沉积物部分外立面，具体沉积物深度见图 2 标注。向各培养柱中加入采集的水塘原水样，初始上覆水深为 100cm，设置于湖北省武汉市中国科学院精密测量科学与技术创新研究院天台（30.57°N，114.37°E），开展连续 6 个月的塘泥培养实验。另设置 1 个空白培养柱，采集培养实验过程中的降水样品。

塘泥培养实验采用静态释放培养法，实验装置在 2023 年 6 月搭建完成后，参考其他类似研究^[32-34]静置 4 周，旨在充分消除装置搭建和沉积物分层回填对氧化还原环境造成的扰动，使其恢复至更接近野外水塘的稳定状态。随后，于 2023 年 7 月开始正式采样，持续进行至 2023 年 12 月，共计 22 周。每周使用手持 YSI 便携式多参数水质测量仪（YSI Incorporated， USA）测定各培养柱水温、气压、溶解氧（DO）、总溶解性固体（TDS）、酸碱度（pH）、叶绿素 Chl a、藻蓝蛋白 PC 等指标。样品采集包括上覆水和间隙水，前 10 周每 2 周采样一次，之后每 4 周采样一次。其中上覆水采用聚乙烯采样瓶取塘泥表面以上 10~20cm 处水样，取水后补充同体积原水塘上覆水到培养柱中。沉积物间隙水采用 Rhizon 土壤间隙水采样器分层用针筒采集水样，根据沉积物的厚度将 S1、S6 和 S7 分为上中下 3 层，其余分为上下 2 层。由于 S1、S6 和 S7 水塘下层沉积物间隙水含量较少，采集量为 2.5 mL，其他间隙水采集量为 10 mL。气温和降水数据采用武汉市气象站每日监测数据。

1.3 样品分析

水塘沉积物分别采用高氯酸硫酸酸熔-钼锑抗比色法测定总磷（Total Phosphorus， TP）、凯氏定氮法测定总氮（Total Nitrogen， TN）和重铬酸钾氧化外加加热法测定有机质（Organic Matter， OM）。水塘上覆水、间隙水和降水采用钼酸铵分光光度法测定总磷（TP）和溶解性总磷（Dissolved Total Phosphorus， DP）。

本研究综合 Hieltjes-Lijklema 法^[35]与 Ivanoff 法^[36]，结合水塘沉积物特点^[37-39]，采用改进后的 NH₄Cl-NaOH-HCl 逐级浸提法分别获取可交换态磷（Exch-P）、铁铝结合态磷（Fe/Al-P）、活性有机磷（Hu/Fu acids-P）和钙结合态磷（Ca-P）。惰性磷（Residual-P）的含量通过用总磷（TP）含量减去各部分无机磷和活性有机磷含量的计算方式获取。具体操作流程如表 2 所示。

表 2 水塘沉积物磷形态分类与逐级浸提方法

Tab.2 Classification of phosphorus fractions in pond sediments and the sequential extraction method	
磷赋存形态	逐级浸提方法
可交换态磷（Exch-P）	1mol·L ⁻¹ NH ₄ Cl 溶液振荡提取 1 h，离心过滤，测定上清液磷酸根浓度
铁铝结合态磷（Fe/Al-P）	0.1mol·L ⁻¹ NaOH 溶液振荡提取 17 h，离心过滤，测定上清液磷酸根浓度
活性有机磷（Hu/Fu acids-P）	经 0.1mol·L ⁻¹ NaOH 溶液提取后获得的上清液，测定总磷，由总磷减去磷酸根浓度获得
钙结合态磷（Ca-P）	0.5mol·L ⁻¹ HCl 溶液振荡提取 1 h，离心过滤，测定上清液磷酸根浓度
惰性磷（Residual-P）	Residual-P = TP - Exch-P - Fe/Al-P - Hu/Fu acids-P - Ca-P

1.4 数据处理与统计分析

根据 Fick 第一定律^[40-41]结合本试验实际磷输入输出，计算沉积物-水界面磷通量，公式如下：

$$F = [V_0(c_n - c_{n-1}) - V_r \times c_r - V_a \times c_a]/(S \times t)$$

式中, F 为释放通量 ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{week}$), V_o 为柱中上覆水体积 (L), c_n 、 c_{n-1} 为第 n 次和 $n-1$ 次采样时上覆水物质浓度 (mg/L), c_a 为添加水样中的物质浓度 (mg/L), V_a 为添加水样中的物质体积 (L), c_r 为阶段降水中的物质浓度 (mg/L), V_r 为阶段降水中的物质体积 (L), S 为柱样中沉积物和水体接触面积 (m^2), t 为释放时间 (2 周或 4 周)。释放通量为负值表示营养盐从上覆水向下沉降至沉积物, 为正值时表示营养盐从沉积物向上覆水释放和扩散。

采用 Excel 软件进行实验数据的前期处理计算, 沉积物中各种磷含量及不同种类水塘的界面磷通量等相关关系选择 Pearson 相关性分析。

2 结果

2.1 各层沉积物磷含量及赋存形态特征

西河流域内水塘各层沉积物 TP 含量范围为 $0.55\sim3.02\text{g}/\text{kg}$, 水塘间存在较大的差异, 具体各水塘沉积物中磷的垂向分布情况如图 2 所示。图中沉积物 TP 含量自表层起按照每 10cm 一层进行分层测定。并结合各水塘沉积物的总深度, 进一步定义了上层、中层 (仅当沉积物深度大于 50cm 时有) 和下层采用分级提取法测定不同赋存形态的磷含量。其中, 平均 TP 最大的为村落塘 S6, 范围为 $1.75\sim3.02\text{g}/\text{kg}$; 平均 TP 最小的为水田塘 S2, 范围为 $0.55\sim0.95\text{g}/\text{kg}$ 。大多数水塘的沉积物表层 TP 含量最高, 但不同深度的 TP 含量无显著性差异 (方差分析 $p>0.05$)。村落塘 S6 和旱地塘 S8 的沉积物 TP 含量呈现出从表层到深层逐渐减少的趋势, 可能与近年来汇水区土地利用类型变化或污染输入的程度增加有关。

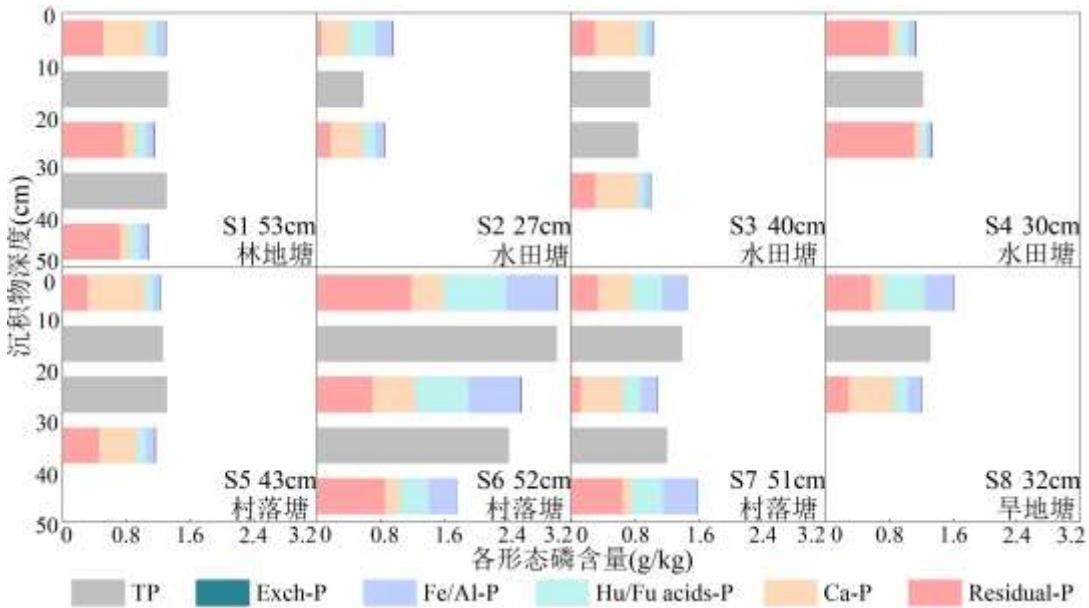


图 2 S1-S8 沉积物中磷的垂向分布情况

Fig.2 Vertical distribution of phosphorus in sediments from ponds S1-S8

沉积物磷赋存形态方面, Exch-P 在所有形态中含量最低, 为 $0.16\sim1.21\text{mg}/\text{kg}$, 平均占比为 0.04% 。该比例相对于其他研究要显著偏低^[39, 42], 这可能表明流域内水塘沉积物内的磷相对稳定, 不易解吸。然而, 也应考虑到, 本研究中沉积物分层较厚, 可能导致表层富集的 Exch-P 在一定程度上被稀释, 从而使得测得的 Exch-P 比例相对偏低。Fe/Al-P 的含量在 $63.07\sim654.98\text{mg}/\text{kg}$, 平均占比为 14.55% , 是含量第二低的磷形态。这种形态的磷容易受到 pH 和氧化还原电位等因素的影响^[43], 同时也会作为水体污染指标之一^[44]。村落塘 S6、S7 和旱地塘 S8 沉积物中 Fe/Al-P 含量相对较高, 释放迁移风险较高。同时表层 Fe/Al-P 的含量较高, 与相对深层的氧化环境及持续的外源磷输入有关。

活性有机磷 (Hu/Fu acids-P) 含量为 79.97~792.74mg/kg, 由于提取方法的局限, 可能有微量溶于弱酸的有机磷未被提取, 导致该测定值略微偏低^[45-46]。但其在沉积物中含量普遍高于 Fe/Al-P, 且各水塘沉积物间占比差异较大, 平均占比为 17.69%。活性有机磷可以分解为溶解性的小分子有机磷等, 通过间隙水向上覆水体或向周边水体侧向迁移扩散^[47]。旱地塘 S8、大部分村落塘 (S6、S7) 和个别水田塘 (S2) 有着较高的活性有机磷含量。

钙结合态磷 (Ca-P) 和惰性磷 (Residual-P) 通常都难以被生物所利用^[38, 48], 这两种磷在沉积物中平均占比分别为 29.23%和 38.49%。文献数据中惰性磷占比范围为 17.57%~43.73%^[49-52], 本研究分级提取后剩下的惰性磷占比在这一范围内, 表明磷分级提取方法较为可靠。同时各水塘各层沉积物中这两种磷的占比差别较大, 在 S4 水田塘中, 惰性磷占比高达 83.58%, 但在 S2 水田塘中惰性磷占比小于 10%。这表明不同水塘的磷输出风险有着较大的差异, 这可能是外源磷输入情况、水塘沉积物成分特性甚至是环境条件等不同因素的影响结果。

水塘沉积物中各形态磷和总氮、总磷以及有机物含量的相关关系见图 3, TP 含量与 TN、多种磷形态均呈现出显著的相关性。TP 和 Fe/Al-P 的相关性最高, 达 0.90; 和活性有机磷间的相关性为 0.88。这表明流域内水塘沉积物中 TP 含量差异主要来自于与 Fe、Al 结合的磷和与富里酸、胡敏酸结合的磷。有机活性磷与 Fe/Al-P 间相关性高达 0.97, 同时两者均与有机质含量有着显著的相关性均为 0.59, 这表明有机质在磷的吸附以及固定富集过程中扮演了重要的角色, 同时也可能是其共同受到金属离子及氧化物调控的结果^[53]。

此外, Ca-P 除了和惰性磷有着显著负相关性外, 和其他形态相关性均不强, 这证明了 Ca-P 作为一种相对稳定的磷形态, 其与其他形态的磷间具有较强的分化, 并且在短期环境变化中不容易发生转化。结合 Ca-P 与惰性磷含量占比较高的现象, 两者可能分别在不同环境或化学条件下占据主导地位, 两者间存在竞争关系并且环境条件将决定磷更倾向于向何种方向转化。

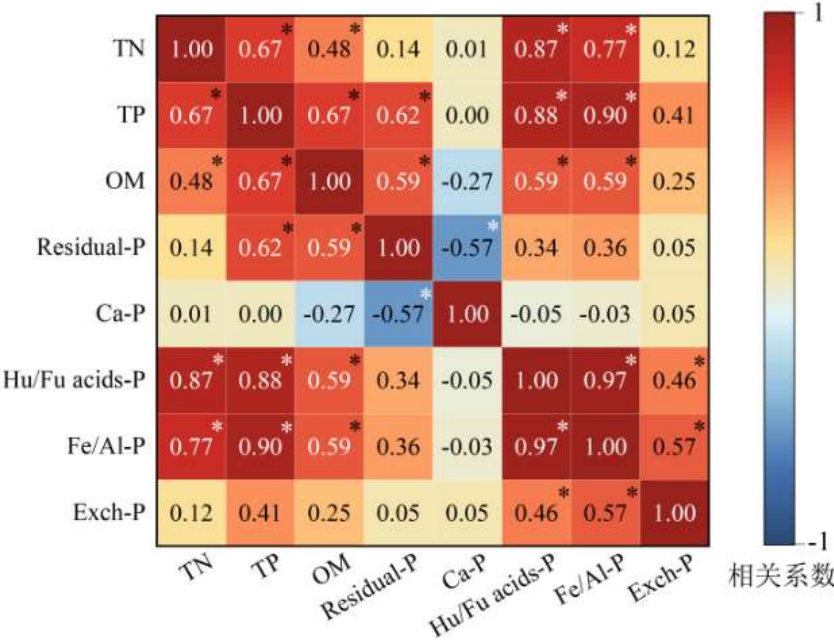


图 3 沉积物内各种磷形态含量与总氮、总磷和有机质含量间相关关系 (*表示 $p < 0.05$)

Fig.3 Correlation between various phosphorus fractions in sediments and the content of total nitrogen, total phosphorus, and organic matter (* indicates $p < 0.05$)

2.2 上覆水及沉积物间隙水磷浓度变化

培养周期内各水塘的上覆水和沉积物间隙水的磷浓度变化见图 4 所示。不同水塘沉积物上覆水的 DP、TP 浓度变化相对较大，范围分别在 0.003~0.14mg/L 和 0.01~0.88mg/L。但沉积物间隙水 DP 变化更加明显，中层和下层间隙水范围在 0.01~1.93mg/L，而上层间隙水 DP 浓度范围达到了 0.04~4.45mg/L。间隙水的 DP 浓度远高于上覆水，上覆水与间隙水二者间较大的浓度差，可能会造成磷从间隙水向上覆水迁移的风险。

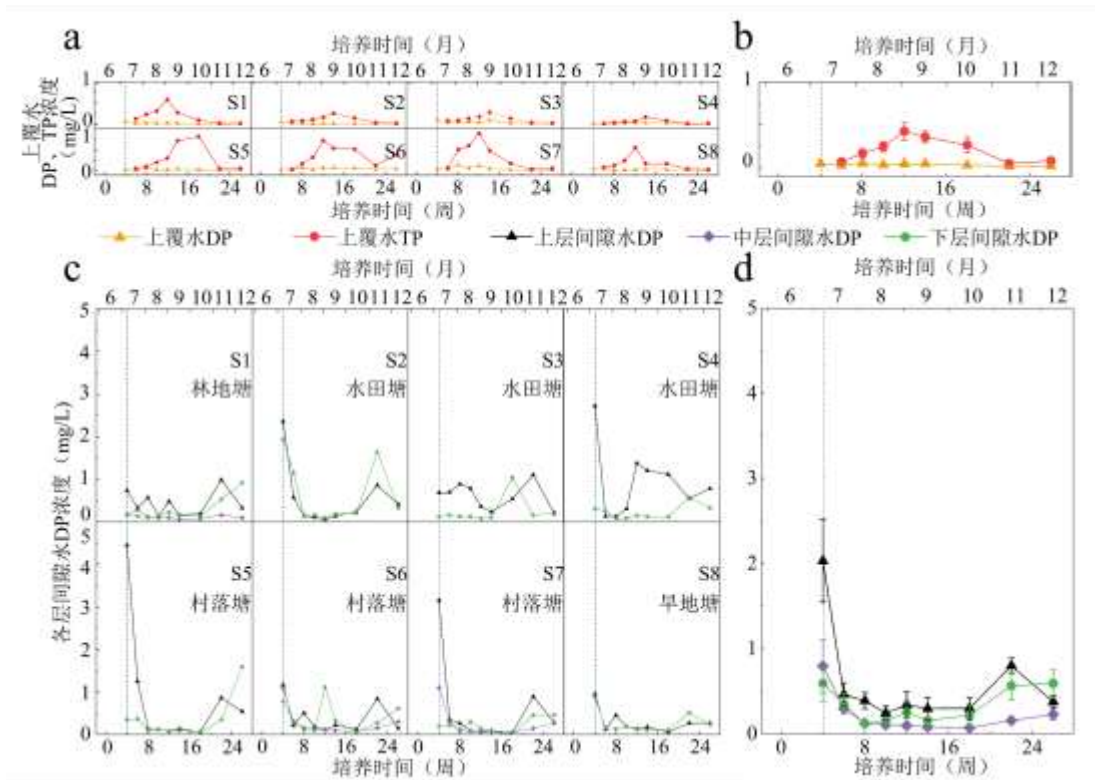


图 4 培养周期内水塘上覆水 DP、TP 浓度和间隙水 DP 浓度变化情况 (图中虚线划分静置期和采样期，4(a)为各个水塘的上覆水 DP、TP 浓度变化情况；4(b)为所有水塘的上覆水 DP、TP 浓度均值变化情况，其中误差棒表示标准误；4(c)为各个水塘的间隙水 DP 浓度变化情况；4(d)为所有水塘的间隙水 DP 浓度均值变化情况，其中误差棒表示标准误)

Fig.4 Changes in DP and TP concentrations in overlying water and DP concentration in pore water during the incubation period for ponds (The dashed line divides the settling period and the sampling period. 4(a) shows the changes in DP and TP concentrations in the overlying water of each pond; 4(b) shows the average changes in DP and TP concentrations in the overlying water of all ponds; 4(c) shows the changes in DP concentration in the pore water of each pond; 4(d) shows the average changes in DP concentration in the pore water of all ponds; error bars represent standard error)

在培养周期内，间隙水浓度变化趋势为先快速降低再少量波动最后趋于稳定。上覆水 TP 波动呈现出先快速升高再降低的态势而 DP 的波动幅度并不明显。从季节上看，在夏季上覆水和间隙水浓度变化幅度明显且波动剧烈，到冬季趋于稳定，这说明沉积物-上覆水界面磷交换过程可能会与温度变化密切相关。上覆水和间隙水的磷浓度呈现一定的负反馈关系。此外在夏季上覆水 TP 浓度急剧上升而上层间隙水 DP 浓度快速下降的同时，部分培养柱内壁及水面上出现了明显的藻类繁殖。这一现象在秋冬季逐渐消失，随着气温降低、浮藻死亡，上覆水 TP 浓度也快速下降，间隙水 DP 浓度转而上升。

2.3 沉积物-上覆水界面磷通量变化

各水塘在培养周期内的沉积物-上覆水界面磷通量变化情况如图 5 所示。磷通量在各水塘变化幅度均较为明显，培养前期均为正值，到中期转变为负值，末期趋于 0。这意味着所有水塘沉积物均会在夏末秋初达到向水体释放磷的峰值，到秋末转向磷沉降和吸附为主，最终到冬季二者交换趋于稳定。

不同类型水塘沉积物在夏秋季磷释放量和秋冬季磷沉降量有着较大的差距。村落塘在夏秋季的累积磷释放量均大于 500mg/m^2 ，S5 村落塘的释放量达到了 702.84mg/m^2 ，紧接着是旱地塘高达 432.82mg/m^2 的释放量。水田塘的夏秋季释放量均在 150mg/m^2 左右，是平均释放量最低的水塘类型。从秋冬季沉降量来看，部分村落塘的累积磷沉降达到了 716.03mg/m^2 ，同时旱地塘和林地塘的沉降量也达到了 500mg/m^2 。在整个培养周期内，除去 S6 村落塘外，其他水塘的净磷通量均为负值，范围在 $-210.31\sim-13.19\text{mg/m}^2$ 。同时，不同种类的水塘沉积物磷通量由正转负的时间节点也不同，林地塘、部分村落塘以及旱地塘的沉积物最先从磷释放转变成磷沉降。水田塘变化节点相对较晚，发生在十月初，S5 村落塘转变的最晚，到十月底才变为磷沉降。

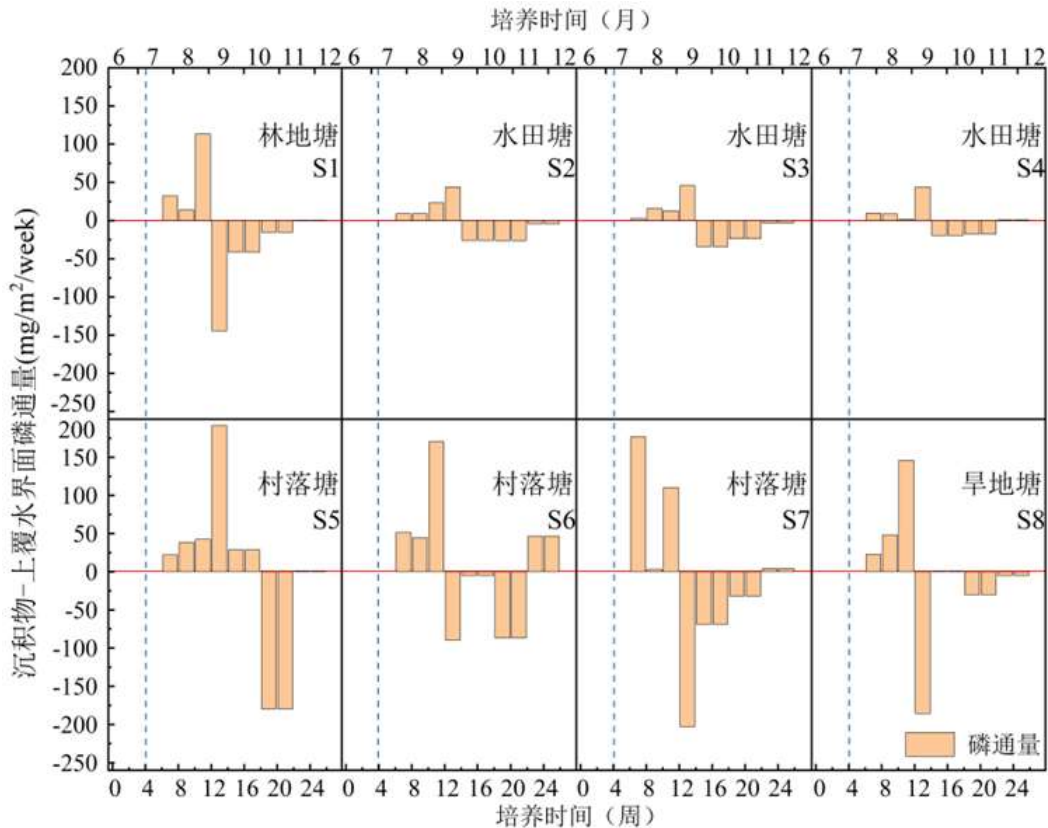


图 5 培养周期内沉积物-上覆水界面磷通量变化（其中虚线划分了静置期与采样期，红线表示界面磷通量为 0，磷通量正值表示沉积物向上覆水释放磷，负值表示上覆水磷向下沉降）

Fig.5 Changes in phosphorus flux at the sediment-water interface during the incubation period (The dashed line divides the settling period and the sampling period, the red line indicates zero flux; positive flux values represent phosphorus release from sediments to overlying water, while negative values represent phosphorus retention in sediments)

3 讨论

3.1 不同种类水塘特征对比

横向比较不同类型的水塘，由于其地理位置、上游汇水区土地利用类型差异，来水差异导致沉积物磷含量、形态组成及沉积物-水界面磷通量变化均有显著不同。沉积物磷含量方面，村落塘和旱地塘的 TP

含量显著高于水田塘与林地塘，且林地塘 TP 含量并非最低。已有部分研究表明，在生活污水、村庄堆肥和畜禽养殖废水的影响下，村庄产生的暴雨径流 TP 浓度会显著高于其他土地利用类型^[54]。林地塘的 TP 含量会较大程度受到自然环境的影响，考虑到其往往会承载更多的植被枯落物和山地径流，沉积物内的有机质较为丰富，这可能使得磷更多的富集沉积，导致 TP 含量较高。而水田塘的 TP 含量相对最低是因为汇水区內大多是稻田，污染强度不高。其中 S2 号水田塘沉积物的 TP 含量最低，这可能与其沉积物中砂砾含量较高，吸附水体磷的能力不强有关。在沉积物磷组分上，不同类型水塘也存在明显区别。如部分村落塘（S6、S7）沉积物中，Fe/Al-P 和活性有机磷占比均超过 20%。旱地塘（S8）拥有 23.19% 的活性有机磷占比和 17.99% 的 Fe/Al-P 占比。相比之下，水田塘和林地塘的 Fe/Al-P 占比基本小于 10%。这些差异表明，不同类型的水塘沉积物磷含量及组分特征明显不同，进一步证明了不同的上游汇水区土地利用类型和地理分布位置对水塘磷累积及释放风险的影响。

不同类型的水塘在夏秋季磷释放量、秋冬季磷沉降量和界面磷通量由正转负的时间节点上均存在差异。村落塘拥有较高的夏秋季磷释放量可能是由于其本身就承载了更多的营养物质，受到人类活动的影响较大。较高的有机物和磷污染的输入，使得其夏秋季沉积物磷释放量较高。然而村落塘在沉降量上的较大差异可能是由于其沉积物的结构不同，结合各水塘沉积物的磷赋存形态含量的差异，一些村落塘富含铁、铝氧化物，能够有效固定磷，增加秋冬季沉降量。例如村落塘 S7 有着最高的沉积物中铁铝磷比例（22.63%），同时也有着最高的总秋冬季磷沉降量，达-790.33mg/m²。相比而言，水田塘沉积物本身 TP 浓度较低，同时有着较高比例的 Ca-P 和惰性磷，因此其释放量和沉降量均不高，且全培养期净磷通量平均也最小。短期而言（主要在夏季），全部种类的水塘都有着向上覆水体释放磷的风险，表现为磷污染“源”。从长期来看（全培养周期），林地塘的磷“汇”功能最强，净磷通量达-197.96mg/m²。其次是水田塘和旱地塘，周期内净磷通量为负值但并不大，平均值分别是-53.97mg/m²和-76.68mg/m²。磷“汇”功能最弱的是村落塘，平均净磷通量为-12.82mg/m²且有可能成为磷“源”，向上覆水体释放磷。

3.2 沉积物-上覆水界面磷通量影响因素分析

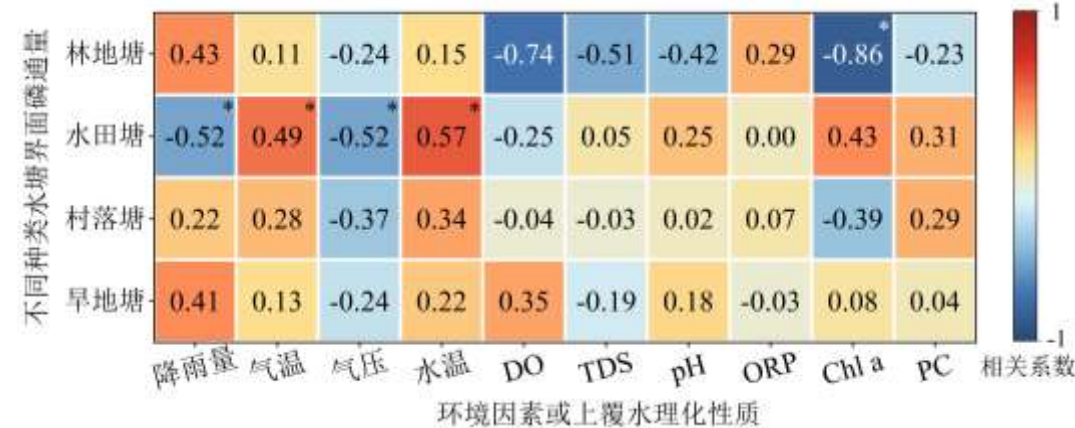


图 6 不同种类水塘的沉积物-上覆水界面磷通量与环境因素及上覆水理化性质间相关性情况（*表示 $p < 0.05$ ）

Fig.6 Correlation between phosphorus flux at the sediment-water interface and environmental factors as well as the physicochemical properties of overlying water in different types of ponds (* indicates $p < 0.05$)

不同培养时间的水塘沉积物-上覆水界面磷通量存在动态变化，不同时间段的界面磷通量与上覆水理化性质、环境因子的相关分析结果如图 6 所示。结果表明，不同种类水塘的界面磷通量对变化的环境因素及上覆水理化性质有着不同的响应强度。整体来说，相对于其他种类的水塘，水田塘界面磷通量会对环境因素的变化更为敏感。在对降雨量变化的响应上，水田塘呈现出显著的负相关，而其他种类水塘则是正相关。降雨被视作一种水动力扰动，在部分情况下降雨的扰动会增加短时间内沉积物的磷释放，使磷通量变大。但同时也可能增加了水体内的溶解氧转而在一定程度上抑制磷释放。同样的扰动作用在不同

种类的水塘会有不同的主导效果。在与温度和气压变化的相关性上，各种水塘都保持着一致性，同时这两者在影响界面磷通量上有着较为复杂的机制。温度升高、气压降低，界面磷通量增大，这与结果中夏季磷释放量到达峰值一致。林地塘的界面磷通量和上覆水 chl a 浓度呈现出显著负相关，同时也与上覆水 DO 呈现出-0.74 的负相关性。但在水田塘中，chl a 和界面磷通量表现出了正相关。水体中的叶绿素浓度是浮游植物生物量的间接指标。当叶绿素浓度升高，说明浮游植物大量生长，不同水塘的不同相关性可能与主导优势藻种不同有关^[55]。已有研究表明，藻种的不同将显著影响磷在上覆水-沉积物界面的交换过程^[56]。同时，多种因素共同影响磷从沉积物向水体的释放过程，最终呈现出的界面磷通量的变化实际上是综合结果。

整体而言，水塘释放周期磷通量、沉降周期磷通量均与沉积物磷含量和赋存形态相关（图 7）。其中磷通量（+）表示释放周期内磷从沉积物向上覆水的释放强度，磷通量（-）表示周期内磷从上覆水向沉积物的沉降强度。磷通量与沉积物中 Fe/Al-P、Hu/Fu acids-P、Exch-P 表现出显著的正相关，而与 Ca-P 和惰性磷的关系不显著。这三种磷形态相对 Ca-P 和惰性磷更不稳定，意味着易解吸的潜在生物可利用磷对沉积物磷释放风险更关键，这部分磷将在适宜的环境条件下增加上覆水中磷的浓度，或者影响周围环境造成侧向迁移风险。此外，磷通量（+）与沉积物 TP 的显著正相关则表明沉积物中的磷库越大，向上覆水体释放磷的潜力就越大，即：沉积物内的磷储量将影响到磷的释放强度。磷通量（-）强度与沉积物各项指标的相关性与磷通量（+）大部分相反，且相关性均较弱。

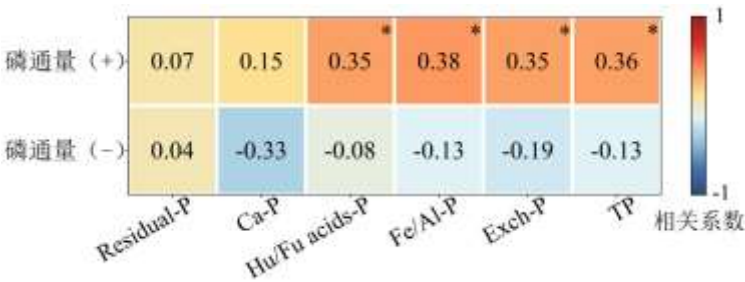


图 7 释放周期与沉降周期内界面磷通量与沉积物内磷形态含量间相关性情况（*表示 $p < 0.05$ ）

Fig.7 Correlation between phosphorus flux during release and sedimentation periods and the content of phosphorus fractions within the sediment. (* indicates $p < 0.05$)

除去实验涉及的环境因素，自然状态下的水塘界面磷通量还会受到水体扰动和生物的影响。一般认为扰动过程会增加水中的溶解氧，可能不利于沉积物磷的释放。但同时扰动也增强了泥水混合交换，极大促进了沉积物中营养盐的释放^[57]，且随着扰动的增强，营养盐的释放速率也会提升^[58]。此外，水生动植物的生长和死亡同样会改变界面磷通量^[59]，而底栖生物也会通过改变表层沉积物的理化性质的方式影响界面磷通量。

3.3 水塘长期磷“汇”功能与短期磷“源”风险

同其他湖泊^[51]、水库^[60-61]甚至是同样来自农业流域的水塘^[37]相比，西河流域内水塘的沉积物 TP 含量明显偏高。可能与这些水塘已存在超过三十年，且自 2011 年来未有修缮或维护有关。未经过疏浚和维护的水塘易形成营养物质的堆积，尤其是靠近居民点承接大量生活污水排放的村落塘。这些沉积物常年得不到有效清理，内部磷含量逐步增加形成“磷库”。一旦遇到合适的环境条件，如上覆水体搅动、温度上升或氧化还原环境的变化，活性磷便会被释放至水体中，向周围环境迁移^[62]。研究区内不同类型水塘的夏秋季磷释放速率存在较大差距。例如，水田塘的磷释放速率范围为 1.61~45.89mg/m²/week，均值为 18.85mg/m²/week，明显低于村落塘均值（83.31mg/m²/week）。林地塘和旱地塘则介于两者之间，均值分别为 53.11mg/m²/week 和 72.14mg/m²/week。除水田塘外，研究区内其他类型水塘的夏秋季磷释放速率均高于典型湖泊，如滇池^[63]（34.30mg/m²/week）、洪湖^[63]（28.00mg/m²/week）和太湖的大部分湖区^[64]（-1.4~49.63mg/m²/week）。此外，研究区内所有水塘类型的磷释放速率均高于大冶水库^[65]（14.98mg/m²/week）。与其他小微水体相比，研究区旱地塘和水田塘的磷释放速率均高于三峡库区的农田水塘^[66]（<

7mg/m²/week)。与这些湖库坑塘相比,研究区内水塘(特别是村落塘、旱地塘)单位面积较高的磷释放速率反映其磷“汇”功能的不足、提示了较高的磷释放风险,可能与其长期较高的磷截留累积导致沉积物磷含量、间隙水 DP 浓度偏高及独特的水文和微生物环境相关。这表明,水塘作为典型的小微水体,不止是流域磷截留的热区^[15],也可能是磷释放的热区;结合其数量多、分布广的特点,水塘在流域磷截留、转化和输移方面扮演了重要角色,对下游水环境具有重要影响。

本研究还发现水塘沉积物间隙水 DP 浓度较高,尤其是表层间隙水 DP 浓度平均高达 0.58mg/L (0.04~4.45mg/L),该值与太湖沉积物间隙水 DP 浓度相当^[67],高于鄱阳湖间隙水 DP 浓度^[68]和地表水 V 类 TP 标准。间隙水作为沉积物和上覆水之间磷转化和迁移的重要物质^[68],高浓度 DP 促进沉积物磷向上覆水垂直迁移。同时,高浓度的沉积物间隙水还可能与邻近水体(如沟渠)形成浓度梯度,通过扩散作用逐步向相邻水体横向迁移;特别在雨季或洪水期,水塘水位上升与邻近水体连通性增加,将增加沉积物中磷的横向输出风险。

综上,从长期来看,水塘能够发挥磷“汇”功能对污染进行拦截。但在缺乏维护导致磷累积量已经较高的背景下,降雨高温耦合期水塘会向上覆水释放磷素,因此其存在短期的磷“源”风险。尽管不同类型水塘的磷释放速率存在差异,但所有水塘在夏季高温时期均表现出短期的磷释放。夏季也是长江流域暴雨多发季节,水塘通过调蓄作用拦截前期高浓度径流^[27],但随着过量径流进入,其中携带的磷素从水塘出口排出的风险也明显上升。雨季径流带走部分磷素的同时,若能有效控制外源污染输入,理论上可以减少水塘的总磷累积,从而一定程度缓解未来磷素释放风险。但水塘往往被用作低成本的农村面源污染治理措施,持续的磷污染输入难以避免,因此,应重点关注水塘的维护管理。结合不同类型水塘的显著差异,需要针对性的管理措施有效控制磷积累和释放风险。例如,对磷释放风险最高的村落塘,应适当提升清淤疏浚的频率^[69],及时移除富磷底泥。同时,结合村落塘铁铝结合态磷占比较高的现状,还可以辅助适当的曝气措施增加水体的溶解氧防止缺氧条件下磷的大量溶出^[70],或利用镧改性膨润土原位钝化沉积物中的磷,抑制内源磷释放^[71-72]。相比之下,林地塘和水田塘的磷释放风险相对较低,清淤疏浚频率可以适当降低,更应注重维持其自然健康的生态系统,利用其生物吸收和转化作用来有效减少易解析态磷素的积累^[73-74]。

4 结论

1) 流域内水塘沉积物的总磷含量分布范围为:0.55~3.02g/kg,与长江中下游典型湖泊、水库、其他地区水塘相比偏高。不同类型的水塘其沉积物内不同形态磷的占比存在差异。沉积物中总磷含量和铁铝结合态磷、活性有机磷相关性高,同时村落塘有着最高的磷含量,以稻田为主要来水的水田塘磷含量最低。

2) 在长江中下游农业流域,且水塘存在时间较长的条件下,沉积物-上覆水界面的磷交换表现出了明显的季节性变化即:夏秋季表现为磷“源”,沉积物向上覆水释放磷;而在秋冬季则转变为上覆水向沉积物沉降磷。绝大部分水塘在全培养周期内的净磷通量为负值,仍表现为磷截留“汇”。存在年限相似前提下,不同类型的水塘磷“汇”能力由大到小排列为:林地塘>水田塘=旱地塘>村落塘,其中村落塘甚至可能成为长期磷“源”。

5 参考文献

- [1] Schindler D W, Carpenter S R, Chapra S C, et al. Reducing Phosphorus to Curb Lake Eutrophication is a Success. *Environ Sci Technol*, 2016, 50(17): 8923-8929. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02204>
- [2] Sharpley A, Jarvie H P, Buda A, et al. Phosphorus Legacy: Overcoming the Effects of Past Management Practices to Mitigate Future Water Quality Impairment. 2013, 42(5): 1308-1326. <https://doi.org/10.2134/jeq2013.03.0098>
- [3] Russell M J, Weller D E, Jordan T E, et al. Net anthropogenic phosphorus inputs: spatial and temporal variability in the Chesapeake Bay region. *Biogeochemistry*, 2008, 88(3): 285-304. <https://doi.org/10.1007/s10533-008-9212-9>
- [4] Ryther J H, Dunstan W M. Nitrogen, Phosphorus, and Eutrophication in the Coastal Marine Environment. 1971, 171(3975): 1008-1013. <https://doi.org/10.1126/science.171.3975.1008>

- [5] Currie D J, Kalff J. The relative importance of bacterioplankton and phytoplankton in phosphorus uptake in freshwater. 1984, 29(2): 311-321. <https://doi.org/10.4319/lo.1984.29.2.0311>
- [6] Powers S M, Bruulsema T W, Burt T P, et al. Long-term accumulation and transport of anthropogenic phosphorus in three river basins. *Nature Geoscience*, 2016, 9(5): 353-356. <https://doi.org/10.1038/ngeo2693>
- [7] Kellogg W K. Biogeochemical time lags may delay responses of streams to ecological restoration, F, 2011 [C].
- [8] Meng C, Liu H, Li Y, et al. Effects of environmental and agronomic factors on pond water quality within an intensive agricultural landscape in subtropical southern China. *Agricultural Water Management*, 2022, 274: 107953. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107953>
- [9] Li S, Zhuang Y, Liu H, et al. Enhancing rice production sustainability and resilience via reactivating small water bodies for irrigation and drainage. *Nat Commun*, 2023, 14(1): 3794. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39454-w>
- [10] Golden H E, Rajib A, Lane C R, et al. Non-floodplain Wetlands Affect Watershed Nutrient Dynamics: A Critical Review. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(13): 7203-7214. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b07270>
- [11] Liu W, Li S, Shen W, et al. Small water bodies influence river water quality in agricultural watersheds. *Agricultural Water Management*, 2024, 304: 109070. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109070>
- [12] Chen W, He B, Nover D, et al. Farm ponds in southern China: Challenges and solutions for conserving a neglected wetland ecosystem. *Sci Total Environ*, 2019, 659: 1322-1334. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.394>
- [13] Capps K A, Rancatti R, Tomczyk N, et al. Biogeochemical Hotspots in Forested Landscapes: The Role of Vernal Pools in Denitrification and Organic Matter Processing. *Ecosystems*, 2014, 17(8): 1455-1468. <https://doi.org/10.1007/s10021-014-9807-z>
- [14] Liu Y, Fu Q, Yin C. Phosphorus Sorption and Sedimentation in a Multipond System within a Headstream Agricultural Watershed. *Water Quality Research Journal*, 2009, 44(3): 243-252. <https://doi.org/10.2166/wqrj.2009.026>
- [15] Shen W, Li S, Basu N B, et al. Size and temperature drive nutrient retention potential across water bodies in China. *Water Research*, 2023, 239: 120054. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120054>
- [16] Gu S, Gruau G, Dupas R, et al. Release of dissolved phosphorus from riparian wetlands: Evidence for complex interactions among hydroclimate variability, topography and soil properties. *Science of The Total Environment*, 2017, 598: 421-431. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.028>
- [17] Xu J, Xu L, Zhang Q. Removal and transfer process of phosphorus between substrate and overlying water in riparian wetlands. *Journal of Lake Sciences*, 2009, 21(05): 675-681. <https://doi.org/10.18307/2009.0510> [徐进, 徐力刚, 张奇. 磷素在湖滨湿地基质-上覆水界面中的迁移过程. *湖泊科学*, 2009, 21(05): 675-681]
- [18] Li S, Zhang L, Liu H, et al. Progress on the development and application of a runoff pathway-based Spatially and Temporally distributed Model for Non-Point Source pollution. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(06): 2477-2488. <https://doi.org/10.5846/stxb202103100655> [李思思, 张亮, 刘宏斌, 等. 基于径流路径的分布式面源污染模型研发与应用进展. *生态学报*, 2022, 42(06): 2477-2488]
- [19] Haygarth P M, Jarvie H P, Powers S M, et al. Sustainable Phosphorus Management and the Need for a Long-Term Perspective: The Legacy Hypothesis. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(15): 8417-8419. <https://doi.org/10.1021/es502852s>
- [20] Meals D W, Dressing S A, Davenport T E. Lag time in water quality response to best management practices: a review. *Journal of environmental quality*, 2010, 39(1): 85-96. <https://doi.org/10.2134/jeq2009.0108>
- [21] Jarvie H P, Sharpley A N, Withers P J A, et al. Phosphorus Mitigation to Control River Eutrophication: Murky Waters, Inconvenient Truths, and "Postnormal" Science. 2013, 42(2): 295-304. <https://doi.org/10.2134/jeq2012.0085>
- [22] Qin B, Fan C. Exploration of conceptual model of nutrient release from inner source in large shallow lake. *China Environmental Science*, 2002, 22(2): 150-153. <https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-6923.2002.02.013> [秦伯强, 范成新. 大型浅水湖泊内源营养盐释放的概念性模式探讨. *中国环境科学*, 2002, 22(2): 150-153]
- [23] Chen J, Xu H, Zhan X, et al. Mechanisms and research methods of phosphorus migration and transformation across sediment-water interface. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(4). <https://doi.org/10.18307/2019.0416>. [陈洁, 许海, 詹旭, 等. 湖泊沉积物-水界面磷的迁移转化机制与定量研究方法. *湖泊科学*, 2019, 31(4)]
- [24] Xie P. Biological mechanisms driving the seasonal changes in the internal loading of phosphorus in shallow lakes. *Science in China: Series D*, 2005, 35(S2): 11-23. <https://doi.org/10.3321/j.issn:1006-9267.2005.z2.002> [谢平. 浅水湖泊内源磷负荷季节变化的生物驱动机制. *中国科学: D 辑*, 2005, 35(S2): 11-23]
- [25] Weng Y, Su Y, Zhang Y, et al. Internal phosphorus loadings and fluxes of surface sediments in four seasons in Shanzi Reservoir. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(06): 871-878. <https://doi.org/10.18307/2014.0609> [翁圆, 苏玉萍, 张玉珍, 等. 福建山仔水库不同季节表层沉积物内源磷负荷分析. *湖泊科学*, 2014, 26(06): 871-878]

- [26] Yin C, Zhao M, Jin W, et al. A multi-pond system as a protective zone for the management of lakes in China. *Hydrobiologia*, 1993, 251(1): 321-329. <https://doi.org/10.1007/BF00007191>
- [27] Nie X, Li H, Li X. Comparison of nitrogen and phosphorus removal efficiencies by storm runoffs for the ponds in the upper and lower reaches of a typical sub-catchment in Lake Chaohu drainage basin. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(1): 89-95. <https://doi.org/10.18307/2012.0112> [聂小飞, 李恒鹏, 李新艳. 巢湖典型子流域上下游水塘对暴雨径流氮磷去除效率比较. *湖泊科学*, 2012, 24(1): 89-95]
- [28] Wu H, Chen D. Progress on legacy effects of watershed non-point source phosphorus pollution. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(11): 2352-2364 [吴昊, 陈丁江. 流域非点源磷污染的遗留效应研究进展. *农业环境科学学报*, 2022, 41(11): 2352-2364]
- [29] Fu Q, Yin C-q, Shan B-q. Phosphorus sorption capacities in a headstream landscape—The pond chain structure. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(5): 1004-1011. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(06\)60030-2](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(06)60030-2)
- [30] Lu D, Guo P, Shen F, et al. Phosphorus release risk in the sediments in Shanmei reservoir-entering channel. *Environmental Chemistry*, 2015, 34 (8) : 1498-1505. <https://doi.org/10.7524/j.issn.0254-6108.2015.08.2015012608> [路丁, 郭沛涌, 沈芳芳, 等. 福建省山美水库入库河道沉积物磷释放风险. *环境化学*, 2015, 34 (8) : 1498-1505]
- [31] Zhu G, Yang Y. Variation laws and release characteristics of phosphorus on surface sediment of Dongting Lake. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(13): 12342-12351. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1777-9>
- [32] Zhu L, Yu J, Shi W, et al. Synergy of Algal Sedimentation and Sediment Capping for Methane Emission Control in Bloom Waters. *Environmental Science*, 2019, 40(09): 4238-4243. <https://doi.org/10.13227/j.hjck.201810145> [朱琳, 于江华, 施文卿, 等. 沉降除藻协同沉积物覆盖对藻华水体甲烷释放的影响. *环境科学*, 2019, 40(09): 4238-4243]
- [33] Guo L, Deng Y, Zhang W, et al. Effects of benthic community disturbance on biogenic elements at sediment-water interface. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(07): 3474-3486. <https://doi.org/10.20103/j.stxb.202405091043> [郭丽, 邓一深, 张文馨, 等. 底栖动物群落扰动作用对沉积物-水界面生源要素的影响. *生态学报*, 2025, 45(07): 3474-3486]
- [34] Hu M, Liu X, Xue J, et al. Water depth and disturbance impact on pollutants release from sediment in Beiyun River. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(01): 174-180. <https://doi.org/10.13671/j.hjckxb.2020.0549> [胡明, 刘心远, 薛娇, 等. 水深和扰动对北运河沉积物释放的模拟研究. *环境科学学报*, 2021, 41(01): 174-180]
- [35] Hieltjes A H M, Lijklema L. Fractionation of Inorganic Phosphates in Calcareous Sediments. *Journal of environmental quality*, 1980, 9: 405-407. <https://doi.org/10.2134/jeq1980.00472425000900030015x>
- [36] Ivanoff D B, Reddy K R, Robinson S. CHEMICAL FRACTIONATION OF ORGANIC PHOSPHORUS IN SELECTED HISTOSOLS. 1998, 163(1): 36-45. <https://doi.org/10.1097/00010694-199801000-00006>
- [37] Liu Y, Fu Q, Lu H, et al. The status of phosphorus and its environmental significance in various pond sediments in an agriculture watershed. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(12): 2307-2314. <https://doi.org/10.7524/j.issn.0254-6108.2013.12.013> [刘洋, 付强, 陆海明, 等. 农业流域中不同类型水塘沉积物磷素状态及其环境意义. *环境化学*, 2013, 32(12): 2307-2314]
- [38] Song Z, Gao X, Zhang C. Distribution, existed forms and ecological significance of phosphorus in tide-beach surface sediments of the Hangzhou Bay. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(6): 6 [宋祖光, 高效江, 张弛. 杭州湾潮滩表层沉积物中磷的分布、赋存形态及生态意义. *生态学杂志*, 2007, 26(6): 6]
- [39] Reddy K R, Kadlec R H, Flaig E, et al. Phosphorus Retention in Streams and Wetlands: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1999, 29(1): 83-146. <https://doi.org/10.1080/10643389991259182>
- [40] Liu S R, Zhao J D, Xiao S B, et al. [Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai]. *Huan jing ke xue= Huanjing kexue*, 2020, 41(2): 734-742. <https://doi.org/10.13227/j.hjck.201907160>
- [41] Bolalek J, Graca B. Ammonia Nitrogen at the Water–Sediment Interface in Puck Bay (Baltic Sea). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1996, 43(6): 767-779. <https://doi.org/10.1006/ecss.1996.0102>
- [42] Tang M, Zhou W, Qiao Y, et al. Phosphorus Speciation in Sediments of Major Lakes in Guangzhou City. *Journal of Hydroecology*, 2023, 44(02): 54-63. <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202111300399> [唐梦瑶, 周雯, 乔永民, 等. 广州市主要湖泊沉积物磷的赋存形态. *水生态学杂志*, 2023, 44(02): 54-63]
- [43] Pan C, Wang J, Zhen Z, et al. Forms of Phosphorus and Nitrogen Existing in Sediments in Chaohu Lake. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, (01): 43-47 [潘成荣, 汪家权, 郑志侠, 等. 巢湖沉积物中氮与磷赋存形态研究. *生态与农村环境学报*, 2007, (01): 43-47]
- [44] Joh H. Fractionation of Phosphorus and Releasable Fraction in Sediment Mud of Osaka Bay. *NIPPON SUISAN GAKKAISHI*, 1983, 49(3): 447-454. <https://doi.org/10.2331/suisan.49.447>

- [45] Fu Y, Zhou Y. Species and Fractionation of Phosphorus in Sediments and Their Ecological Significance. *Journal of Lake Sciences*, 1999, (04): 376-381. <https://doi.org/10.18307/1999.0415> [付永清, 周易勇. 沉积物磷形态的分级分离及其生态学意义. *湖泊科学*, 1999, (04): 376-381]
- [46] Liu G, Dong L, Wang X. Comparison of Three Extraction Methods of Phosphorus in Lacustrine Sediments. *Rock and Mineral Analysis*, 2011, 30(03): 276-280. <https://doi.org/10.15898/j.cnki.11-2131/td.2011.03.028> [刘冠男, 董黎明, 王小辉. 湖泊沉积物中三种磷提取方法比较. *岩矿测试*, 2011, 30(03): 276-280]
- [47] Reddy K R, Diaz O A, Scinto L J, et al. Phosphorus dynamics in selected wetlands and streams of the lake Okeechobee Basin. *Ecological Engineering*, 1995, 5(2): 183-207. [https://doi.org/10.1016/0925-8574\(95\)00024-0](https://doi.org/10.1016/0925-8574(95)00024-0)
- [48] Sonzogni W C, Chapra S C, Armstrong D E, et al. Bioavailability of Phosphorus Inputs to Lakes. *Journal of environmental quality*, 1982, 11(4): 555-563. <https://doi.org/10.2134/jeq1982.00472425001100040001x>
- [49] Li H, Wang Y, Shi L Q, et al. Distribution and Fractions of Phosphorus and Nitrogen in Surface Sediments from Dianchi Lake, China. *International Journal of Environmental Research*, 2012, 6: 195-208
- [50] Li X, Liu Z, Zhang J, et al. Phosphorus Fractions and their Spatial Distribution Characteristics in the Sediments of Dongping Lake. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(01): 62-67. <https://doi.org/10.19336/j.cnki.trtb.2020031701> [李晓瞳, 刘泽辉, 张菊, 等. 东平湖沉积物中磷的赋存形态及其空间分布特征. *土壤通报*, 2021, 52(01): 62-67]
- [51] Xiang S, Chu M, Liu I, et al. Characteristics and release risk of phosphorus fractions in sediments of Nanchang section of Ganjiang River, Lake Poyang Basin. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(04): 1121-1130. <https://doi.org/10.18307/2024.0425> [向速林, 楚明航, 刘丽贞, 等. 鄱阳湖流域赣江（南昌段）沉积物磷赋存形态特征及释放风险分析. *湖泊科学*, 2024, 36(04): 1121-1130]
- [52] Wang S, Zhang B, Jiang X, et al. Analysis of Phosphorus Fractions in Sediments by Sequential Extraction. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(09): 1382-1388. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2015.09.07> [王书航, 张博, 姜霞, 等. 采用连续分级提取法研究沉积物中磷的化学形态. *环境科学研究*, 2015, 28(09): 1382-1388]
- [53] Zhang Y, Song J, Lv Y, et al. Bioavailability and variations of organic phosphorus in sediments of Swan Lake, Rongcheng. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(12): 4629-4635. <https://doi.org/10.13671/j.hjkxxb.2017.0224> [张友, 宋佳伟, 吕迎春, 等. 荣成天鹅湖沉积物有机磷的生物有效性及其时空动态. *环境科学学报*, 2017, 37(12): 4629-4635]
- [54] Yin C, Shan B. Multipond system: a sustainable way to control diffuse phosphorus pollution. *Ambio*, 2001, 30(6): 369-375. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-30.6.369>
- [55] Ji Y, Wu Z, Zhang J, et al. Quantifying the dynamics of phytoplankton communities and its driving factors: An example from an agricultural pond within a lowland polder in Lake Taihu Basin. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(5): 1380-1391. <https://doi.org/10.18307/2024.0514> [季雨来, 吴召仕, 张京, 等. 太湖流域平原农业区典型圩塘浮游植物群落特征及其影响因子. *湖泊科学*, 2024, 36(5): 1380-1391]
- [56] Liu D, Jiang X, Jin X, et al. Effects of Algae on the Phosphorus Exchange at Water-Sediment Interface in Taihu Lake. *Research of Environmental Sciences*, 2006, 19(4): 8-13 [刘冬梅, 姜霞, 金相灿, 等. 太湖藻类对水-沉积物界面磷交换过程的影响. *环境科学研究*, 2006, 19(4): 8-13]
- [57] Zhao J, Tian W, Yang G, et al. Effects of Disturbance Modes on Lacustrine Nutrients and Algal Biomass: An Experiment Study. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(02): 234-241. <https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2019.0498> [赵家敏, 田伟, 杨桂军, 等. 扰动方式对湖泊营养盐及藻类生物量影响的模拟研究. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(02): 234-241]
- [58] 孙振红. 波浪作用下沉积物中氮、磷释放规律的试验研究 [学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [59] Cheng W, Bao L, Luo X, et al. Characteristics of phosphorus in the sediment of Dianchi Lake and its effects on algae. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(06): 822-828. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0310> [程文娟, 包立, 罗雄鑫, 等. 滇池水体沉积物磷素特征及其对藻类的影响. *农业资源与环境学报*, 2019, 36(06): 822-828]
- [60] Liu L, Liu X, Xu Q, et al. Phosphorous Species and Their Distribution Characters in Sediments of Miyun Reservoir. *Rock and Mineral Analysis*, 2003, (2): 81-85 [刘浏, 刘晓端, 徐清, 等. 密云水库沉积物中磷的形态和分布特征. *岩矿测试*, 2003, (2): 81-85]
- [61] Zhang H, Chen X, Han B, et al. Distribution and Pollution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Hedi Reservoir. *Environmental Science*, 2012, 33(04): 1167-1175. <https://doi.org/10.13227/j.hjks.2012.04.033> [张华俊, 陈修康, 韩博平, 等. 鹤地水库沉积物营养盐及重金属分布和污染特征分析. *环境科学*, 2012, 33(04): 1167-1175]
- [62] Murray D, Neilson B T, Brahney J. Source or sink? Quantifying beaver pond influence on non-point source pollutant transport in the Intermountain West. *Journal of Environmental Management*, 2021, 285: 112127. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112127>

- [63] Liu X, Deng Z, Zhang L, et al. Sediment Endogenous Pollution and Release Characteristics of Honghu Lake. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(01): 80-88.<https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2021.09.22> [刘昔, 邓兆林, 张露, 等. 洪湖沉积物内源污染及其氮磷释放特征. *环境科学研究*, 2022, 35(01): 80-88]
- [64] Yin H, Zhang M, Yin P, et al. Characterization of internal phosphorus loading in the sediment of a large eutrophic lake (Lake Taihu, China). *Water Research*, 2022, 225: 119125.<https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119125>
- [65] Wang X, Yu W, Zhao H, et al. Effect of Thermal Stratification on Nitrogen and Phosphorus Release from Sediments in Daye Reservoir. *Environmental Science & Technology*, 2023, 46(10): 42-52.<https://doi.org/10.19672/j.cnki.1003-6504.0885.23.338> [王兴菊, 于文晴, 赵华青, 等. 大冶水库夏秋季热分层对沉积物氮磷释放的影响. *环境科学与技术*, 2023, 46(10): 42-52]
- [66] Zhao Y, Zhang W, Zhang W. Phosphorus transport process and driving mechanism in the sediment of farm ponds in small watersheds of three Gorges Reservoir area. *Ecological Indicators*, 2024, 169: 112787.<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112787>
- [67] Liu H, Zhu W, Hou H, et al. Fick diffusion release flux study of dissolved total phosphorus at the sediment-water interface of Lake Taihu. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(06): 1732-1742.<https://doi.org/10.18307/2024.0621> [刘环, 朱伟, 侯豪, 等. 太湖底泥—水界面总溶解态磷的 Fick 扩散释放通量研究. *湖泊科学*, 2024, 36(06): 1732-1742]
- [68] Liu W, Xiao H, Yin J, et al. The Forms of Phosphorus in Sediments of Large Lakes (Poyang Lake) and Its Impact on Endogenous Release. *ACS ES&T Water*, 2024, 4(8): 3163-3177.<https://doi.org/10.1021/acsestwater.3c00836>
- [69] Liu J, Dong C, Song Y, et al. The seasonal variations of nitrogen and phosphorus release and its fluxes from the sediments of the Beili Lake in the Hangzhou West Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(24): 7932-7939.<https://doi.org/10.5846/stxb201204180556> [刘静静, 董春颖, 宋英琦, 等. 杭州西湖北里湖沉积物氮磷内源静态释放的季节变化及通量估算. *生态学报*, 2012, 32(24): 7932-7939]
- [70] 刘飞. 周村水库沉积物氮磷释放及扬水曝气控制内源污染的研究 [学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
- [71] Zhu G, Li J, Zhu M, et al. Efficacy of Phoslock® on the Reduction of Sediment Phosphorus Release in West Lake, Hangzhou, China. *Environmental Science*, 2017, 38(04): 1451-1459.<https://doi.org/10.13227/j.hjcx.201609123> [朱广伟, 李静, 朱梦圆, 等. 锁磷剂对杭州西湖底泥磷释放的控制效果. *环境科学*, 2017, 38(04): 1451-1459]
- [72] Zhang Q, Du Y, Luo C, et al. Advances in researches on phosphorus immobilization by lanthanum modified bentonite in lakes and its ecological risk. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(6): 1499-1509.<https://doi.org/10.18307/2019.0620> [张巧颖, 杜瑛珣, 罗春燕, 等. 镧改性膨润土钝化湖泊中的磷及其生态风险的研究进展. *湖泊科学*, 2019, 31(6): 1499-1509]
- [73] Duan H, Zhang L, Wang H, et al. Enhancing nitrate removal from small wetlands via regulating bacterial-algal symbiosis with macrophyte coverage. *Science of The Total Environment*, 2024, 951: 175745.<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175745>
- [74] Wang X, Li J, Li S, et al. Study on the interception effects of ecological pond on Nitrogen and Phosphorus in the rainfall runoff of rice field. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(03): 291-298.<https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20160792> [王晓玲, 李建生, 李松敏, 等. 生态塘对稻田降雨径流中氮磷的拦截效应研究. *水利学报*, 2017, 48(03): 291-298]