

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.297>



四湖流域长江侧向交互带中磷的富集特征与成因分析

梁宇航¹, 孙海船¹, 朱 棋¹, 李 葵^{2,3}, 吴梦琪², 刘路广^{2*}, 刘 慧^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 地质微生物与环境全国重点实验室, 湖北武汉 430078
2. 湖北省水利水电科学研究院, 湖北武汉 430070
3. 湖北省汉江兴隆水利枢纽管理局, 湖北武汉 430062

摘要: 为了探究长江侧向交互带地下水中磷的富集特征与成因机制, 以四湖流域内江陵、监利、洪湖 3 条侧向交互带为研究对象, 开展了水化学和磷酸盐氧同位素($\delta^{18}\text{O}_\text{p}$)的分析. 结果发现交互带地下水中普遍存在磷的显著富集区, 潜水和承压水中富集位置存在差异. 水化学分析显示监利断面磷富集主要受有机质矿化驱动, 江陵断面与矿物溶解释放关系更为密切, 而洪湖断面则受到了二者的共同调控. $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 证实了微生物磷循环参与诱导铁氧化物表面磷的还原溶解释放对承压水磷富集的重要作用. 交互带磷富集的空间分异和主导机制受到水文过程调控, 较强的水文过程促进有机质对磷富集的作用并使富集区更靠近长江.

关键词: 地下水; 交互带; 磷; 磷酸盐氧同位素; 四湖流域; 环境地质.

中图分类号: P641.3

文章编号: 1000-2383(2026)06-2228-09

收稿日期: 2025-10-15

Enrichment Characteristics and Cause Analysis of Phosphorus in Lateral Interaction Zone of the Yangtze River in Four Lake Basin

Liang Yuhang¹, Sun Haichuan¹, Zhu Qi¹, Li Yan^{2,3}, Wu Mengqi², Liu Luguang^{2*}, Liu Hui^{1*}

1. State Key Laboratory of Geomicrobiology and Environmental Changes, School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China
2. Hubei Water Resources Research Institute, Wuhan 430070, China
3. Hubei Hanjiang Xinglong Multipurpose Project Management Bureau, Wuhan 430062, China

Abstract: To investigate the enrichment characteristics and underlying mechanisms of phosphorus (P) in groundwater within the river lateral interaction zone, this study conducted hydrochemical and phosphate oxygen isotope ($\delta^{18}\text{O}_\text{p}$) analyses on three lateral interaction zones (Jiangling, Jianli, and Honghu) within the Four Lake basin. The results reveal the widespread presence of significant P enrichment zones in the groundwater of the interaction zones, with the locations of enrichment differing between the unconfined and confined aquifers. Hydrochemical analysis indicates that P enrichment in the Jianli section is primarily driven by organic matter mineralization. In contrast, in the Jiangling section, it is more closely related to mineral dissolution/release. The

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No.U2340206); 湖北省科技创新平台计划项目(No.2025CSA007); 国家自然科学基金青年科学基金项目(No.52409024).

作者简介: 梁宇航(2001—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为地下水中磷的生物地球化学过程. ORCID: 0009-0008-7167-3532, E-mail: 2395493379@qq.com

*** 通讯作者:** 刘慧, ORCID: 0000-0002-1080-0883, E-mail: hliu2009@cug.edu.cn; 刘路广, E-mail: wlhlhg814704@163.com

引用格式: 梁宇航, 孙海船, 朱棋, 李葵, 吴梦琪, 刘路广, 刘慧, 2026. 四湖流域长江侧向交互带中磷的富集特征与成因分析. 地球科学, 51(6): 2228-2236.

Citation: Liang Yuhang, Sun Haichuan, Zhu Qi, Li Yan, Wu Mengqi, Liu Luguang, Liu Hui, 2026. Enrichment Characteristics and Cause Analysis of Phosphorus in Lateral Interaction Zone of the Yangtze River in Four Lake Basin. *Earth Science*, 51(6): 2228-2236.

Honghu section appears to be regulated by a combination of both processes. The $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ data confirmed the crucial role of microbially mediated reductive dissolution of P from iron oxides in the enrichment of P in the confined aquifer. The spatial variation and dominant mechanisms of P enrichment in the interaction zones are regulated by hydrological processes. More intense hydrological dynamics enhance the role of organic matter in P enrichment, shifting the enrichment zone closer to the Yangtze River.

Key words: groundwater; interaction zone; phosphorus; phosphate oxygen isotope; Four Lake basin; environmental geology.

0 引言

磷是引起水体富营养化的关键元素.随着社会经济的快速发展和人口的持续增长,越来越多的磷随着工业废水、生活污水、农业径流等进入地表水和地下水水体(Liu *et al.*, 2025).磷已经成为长江流域内地表水的主要污染物之一.地下水是一种重要的水资源,在世界范围内被广泛用于农业灌溉、家庭饮用和工业生产等用途(Aeschbach-Hertig and Gleeson, 2012).人们普遍认为地下水环境中的磷容易被土壤或沉积物吸附而难以发生迁移,因此地下水中的磷污染问题长期以来一直被忽视(Tao *et al.*, 2020).然而越来越多的研究在地下水中检测出异常高值的磷(Tao *et al.*, 2020; Ke *et al.*, 2024),地下水磷污染的成因已成为亟需解决的科学问题之一.

河流是连接陆地和海洋的重要纽带.随着河流水位的动态变化,河流侧向交互带中发生河水与地下水的混合交互(Mao *et al.*, 2024).交互带中频繁且复杂的水流运动会使其中形成一定的地球化学梯度,从而对多种物质的生物地球化学过程产生影响(Li *et al.*, 2024).磷作为一种环境敏感元素,在河流侧向交互带中也可能存在同样的梯度分布,交互带中频繁的水流运动可能会使磷在其中发生着与平原内部不同的生物化学过程,进而改变交互带中磷的富集特征.河流与侧向数公里流域尺度的地下水都存在一定联系,而交互带尤其是大尺度上磷的分布研究目前尚薄弱.

长江是中国第一大河.长江中游是中国重要的商品粮油基地和淡水渔业基地(Liu *et al.*, 2020).三峡工程的调度运行会显著影响到下游的水位,而长江水位的波动对其侧向交互带中的水流模式和溶质的迁移、分布产生重要影响(Müller *et al.*, 2008; Dai *et al.*, 2025).长江中游尤其是生态地位突出的四湖流域,氮磷污染等生态环境问题日趋突出(Tian *et al.*, 2021).近年研究表明四湖流域离江27 km内的地下水水位和长江之间存在明显响应

(张红等, 2009),四湖流域河流交互带中频繁且密切的水力交换对其中溶质分布产生重要影响.弄清交互带中磷的富集特征和成因机制对当地水体磷污染的防治具有重要意义.

因此,本研究的目的旨在查明四湖流域侧向交互带中磷的富集特征揭示四湖流域不同侧向交互带中磷富集的成因.本文的研究结果可为长江中游地下和地表水体中磷的研究提供科学依据,有助于长江中游的水污染控制和水资源管理.

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区位于长江中游的四湖流域(图1),东西两侧直线距离超过140 km.研究区属于亚热带季风气候,年平均气温15~17℃,年降雨量在1100 mm(Du *et al.*, 2020b).第四纪松散含水层沉积物的多孔介质是研究区地下水资源的主要储集层(Du *et al.*, 2018),大部分地区地层顶部覆盖粉质黏土或粘土与淤泥质交错,局部穿插粉砂,厚度普遍在10~35 m,沉积物矿物主要由石英(40%~50%)、黏土矿物(30%~40%)、长石(10%~15%)和方解石(5%)组成,下层含水层则是由砂和砾石组成的多孔含水层,地下水资源丰富(Du *et al.*, 2020a).在研究区内潜水的溶解性总磷浓度为BDL-2.56 mg/L,承压水中为BDL-4.31 mg/L,而在含水层沉积物中,总磷浓度为0.62~0.95 mg/g(可交换态磷0.087~0.418 mg/g,铁结合态磷0.499~0.598 mg/g,残余有机磷0.251~0.319 mg/g)(Tao *et al.*, 2020).

1.2 样品采集与测量

已有研究表明,河流水位在雨季或洪水期升高时会增强向地下水的补给作用,从而扩大河水—地下水交互带的空间范围(Su *et al.*, 2018; Cai *et al.*, 2022),三峡工程每年5月开始增加出库流量,长江水位也在该时段内出现明显抬升.为扩大研究区交互带的影响范围,本研究于2024年5月对图1所示采样点进行取样.研究区自上游向下游方向布设了

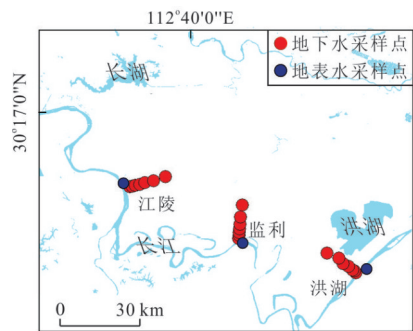


图 1 研究区地理位置及采样点分布

Fig.1 Location of the study area and distribution of sampling sites

3条断面,分别为江陵、监利和洪湖断面,断面地层分布如图2所示.每个断面布设7组监测点,每个监测点布设两口井分别对潜水和承压水进行取样,断面各点位到长江垂向距离分别为1、2、3、5、7、10、15 km,监测井组按照距离长江由近到远分别进行编号(在江陵、监利、洪湖断面分别编号JL1-JL7、JLX1-JLX7、HH1-HH7).在每条监测断面分别对临江井旁的长江水进行取样.本次取样共采集45个样品,其中长江水样3个,潜山水样和承压水水样各21个.地下水监测井中放置有水位自动监测装置对地下水水位进行全年监测.

在野外地下水采样时,根据《地下水环境监测技术规范》(HJ 164-2020)的要求使用抽水泵对每口

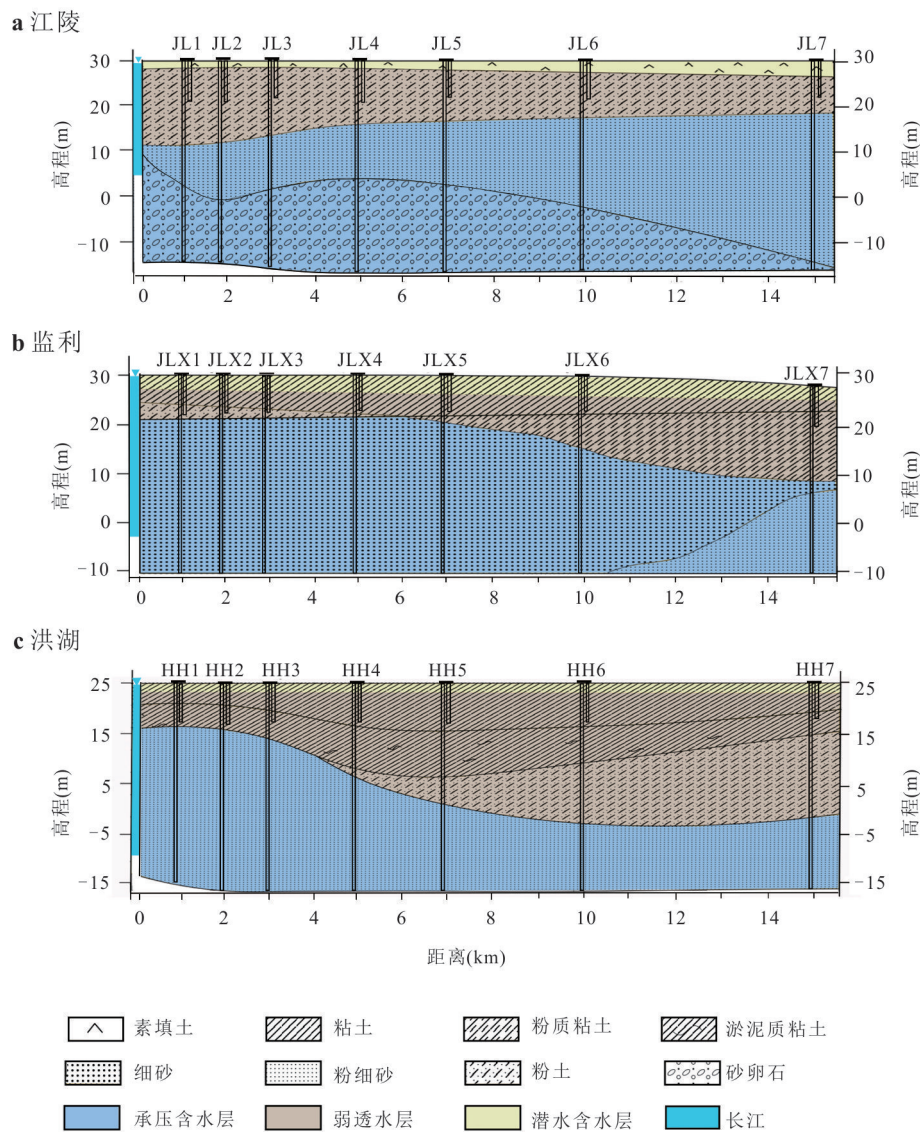


图 2 3条交互带的水文地质剖面

Fig.2 Hydrogeological profile of three interaction zones

监测井进行30 min以上的洗井工作.地下水使用抽水泵抽取,采取的地下水样品装满密封在聚乙烯瓶中.对于地表水水样的采集,使用采水器在水面以下0.5 m采集后分装在聚乙烯瓶中.通过50 mL聚乙烯瓶收集水样用于总有机碳(TOC)分析,水样用HNO₃酸化至pH<2.地下水水样用5 L聚乙烯桶保存,用于磷酸盐氧同位素提取.在野外使用便携式多参数水质分析仪(SX836, SANXIN, 中国)测定水样的水温、pH、电导率、溶解氧、氧化还原电位等常规指标,使用便携式分光光度计(DR/2800, HACH, 美国)测定水样中Fe²⁺、NH₄⁺等氧化还原敏感组分.

样品运送回实验室后,通过钼酸铵分光光度法(GB 11893-89)测量未过滤水样的总磷、过滤后水样的溶解性总磷,相减得到水样的颗粒态磷.使用总有机碳分析仪(vario TOC, Elementar, 德国)测定水样的TOC.按照McLaughlin (McLaughlin *et al.*, 2006)的方法对水样进行磷酸盐氧同位素富集除杂的前处理,最后使用同位素比率质谱仪(MAT 253 plus, Thermo Fisher Scientific, 美国)测定磷酸盐氧同位素($\delta^{18}\text{O}_\text{p}$)组成.

2 结果与讨论

2.1 四湖流域侧向交互带中磷的富集特征

如图3所示为各交互带潜水、承压水中磷的形态及含量分布.尽管天然地下水中磷含量普遍偏低(通常<0.05 mg/L)(Lewandowski *et al.*, 2015),但长期饮用超过世界卫生组织建议磷标准(0.1 mg/L)的地下水仍会带来潜在健康风险(Liu *et al.*, 2023).本研究中以0.1 mg/L作为区分研究区地下水总磷浓度高低的依据.在3条交互带中,江陵断面和洪湖断面的承压水中更容易出现高磷的现象,而监利断面的潜水中磷含量较承压水高.这些高磷的点位中,除监利交互带距江15 km处的潜水和江陵交互带距江5 km的承压水外,其余点位中颗粒态磷均占据了主导.值得注意的是,不论在潜水或是承压水中,各交互带靠近长江的中段区域内均出现了一个磷富集区域.在江陵交互带承压水中,磷富集区出现在交互带距江3~7 km区域,尽管此处潜水中磷含量仍维持在较低的水平,但相较于1~2 km处仍有提高.同样在监利交互带距江2 km处承压水和距江1~2 km的潜水中也出现磷的富集.而在洪湖交互带内尽管潜水和承压水同样出现磷富集区,

但出现位置存在明显差异,潜水中高磷区出现在距离长江更近的1 km处,而承压水中高磷区的区域出现在距江3 km和7 km处.

目前针对江汉平原地下水的研究表明该区域内普遍存在较高磷浓度的地下水(潜水磷浓度均值0.29 mg/L;承压水磷浓度均值0.63 mg/L)(Tao *et al.*, 2020).与江汉平原内部地下水相比,本研究中长江侧向交互带地下水中总磷浓度较低(潜水磷浓度为0.03~0.27 mg/L,均值0.10 mg/L;承压水磷浓度为0.04~0.75 mg/L,均值0.13 mg/L),这可能与交互带内发生着比内部平原地区更强烈的水文过程有关.河水侧向交互带中存在明显的生物地球化学作用的分带,形成砷、锰等的富集现象(Ma *et al.*, 2023; Mao *et al.*, 2024).本研究同样在交互带中发现磷富集现象,但其机制目前尚不清楚.

2.2 四湖流域侧向交互带中磷富集区的水化学机制

在江汉平原地区的地下水中,磷主要有有机质以及矿物溶解释放两大来源(Tao *et al.*, 2020).本研究区域的潜水中总磷和Fe²⁺表现出显著相关性($R^2=0.43$, $p<0.05$),这表明含铁矿物的溶解对潜水中的磷有较大的贡献.研究区承压水中较高含量的TOC(平均值26.70 mg/L)也证实地层中存在着丰富的天然有机质.

Redfield比值常用于鉴定还原环境中有机质来源的磷(Zhou *et al.*, 2022),当NH₄⁺:TDP>16:1时说明有机质来源的磷占据主导.图4显示了3条交互带各点承压水的氮磷比,可以看出在TOC含量较低的江陵断面(均值14.43 mg/L)该比值很低,而在监利和洪湖交互带内氮磷比普遍较高,说明这两处交互带的承压水中磷受有机质矿化的调控更加显著.值得注意的是,在监利断面距江2 km高磷区中的磷主要来自有机质的矿化,而在洪湖断面距江3 km和7 km的高磷区的氮磷比小于16,这表明有机质直接矿化的磷并非该交互带高磷区的主要形成原因.

图5显示了3条交互带中TOC的含量分布.对于监利和洪湖交互带的承压水,TOC均在2~7 km内出现了富集,与高磷区域分布吻合,进一步证明该区域的高磷与有机质矿化有关.交互带地下水中的TOC可为微生物提供碳源,有机碳的输入会导致微生物作用的增强,进而促进铁还原过程与磷的解吸(Guo *et al.*, 2023).前人针对江汉平原南部地

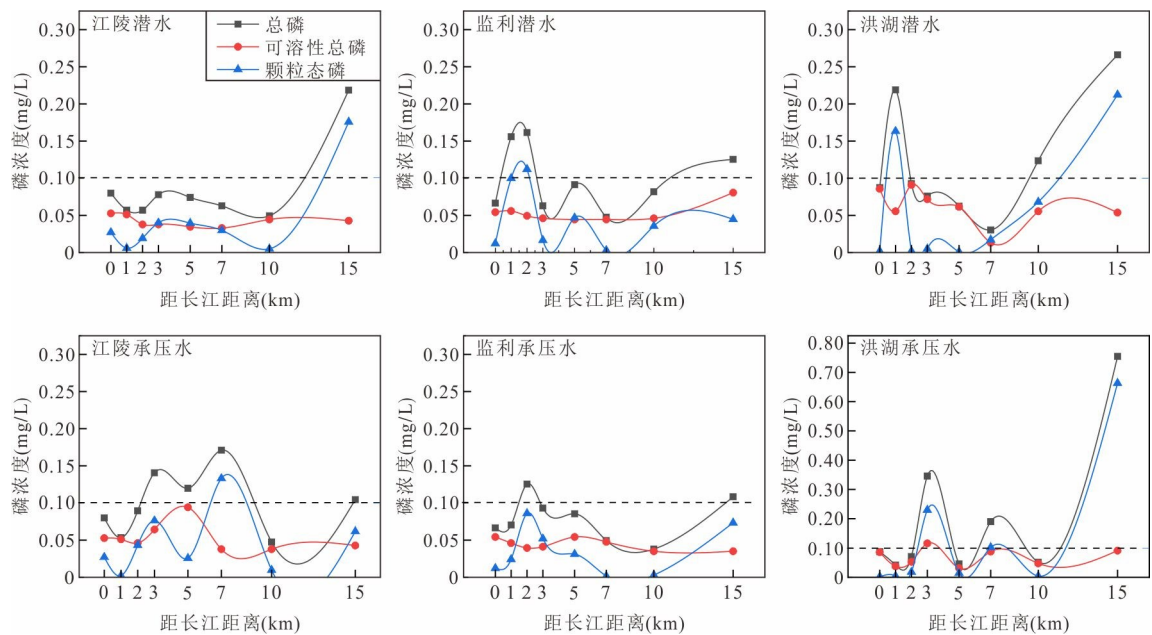


图3 3条交互带中磷的形态及含量分布

Fig.3 Distribution of phosphorus species across the three interaction zones

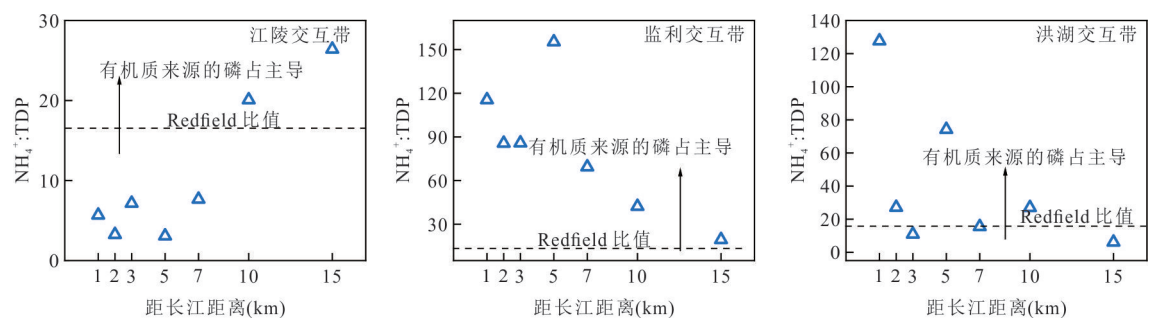


图4 3条交互带中各监测点承压水中 $\text{NH}_4^+:\text{TDP}$ 比值

Fig.4 $\text{NH}_4^+:\text{TDP}$ ratio in the confined water at each monitoring site across the three interaction zones

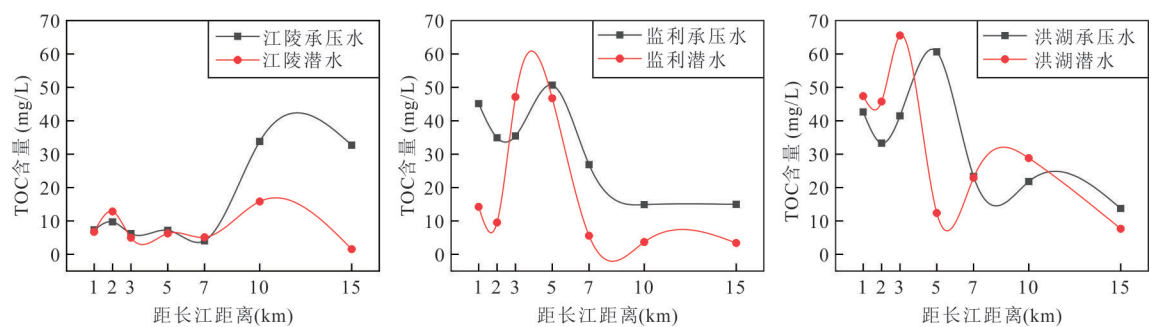


图5 3条交互带中TOC的含量分布

Fig.5 Distribution of TOC concentrations across the three interaction zones

下水的研究表明,该区域地下水中溶解性有机质的来源与微生物降解过程密切相关,高磷地下水中微生物来源的低分子量腐殖质组分在地下水有机质中占据主导(Tao *et al.*, 2022),因此监利和洪湖交互带中高含量 TOC 和高浓度磷的一致性可以指示

微生物活动在有机质释磷过程中的重要性.潜水中 TOC 含量在更靠近长江的区域出现峰值,TOC 的输入使得潜水在更靠近长江的区域内出现磷的富集.在江陵交互带中,有机质富集层现位于距江 10 km 处,氮磷比也证实靠近长江处低含量的有机

质无法直接成为地下水的主导磷源.该断面的高磷区不依赖于沉积物中有机质生物降解的参与,更有可能是由水力驱动的含水层环境改变所导致的磷的释放.

2.3 基于磷酸盐氧同位素的磷循环生物地球化学过程

磷酸盐氧同位素分析已成为一种新颖、强有力的溯源工具(Gooddy *et al.*, 2018).本研究对部分磷含量较高的点位进行了 $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 的测试,分析了江陵、洪湖两条断面共5个点位承压水的 $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 值.如图6所示,承压水中 $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 值在9.529‰~13.467‰之间,和地表水(7.143‰)之间呈现出明显差异,这指示承压水中磷的来源与长江水不同.参考以往报道的 $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 值范围(Jin *et al.*, 2023; Le *et al.*, 2024),本研究中承压水 $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 值均落在含磷矿物的 $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 范围内,这表明含磷矿物的溶解或解吸过程是地下水中磷的重要来源.

前人在对海洋、湖泊等地表水生态系统磷生物循环的研究中发现, $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 与经生物利用代谢后的 PO_4^{3-} 理论氧同位素值($\delta^{18}\text{O}_{\text{p-equ}}$)之间的差值($\Delta^{18}\text{O}_\text{p}$)大小可以有效反映微生物利用 PO_4^{3-} 新陈代谢的程度(Davies *et al.*, 2014).其计算公式如下:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{p-equ}} = (\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} + 1000) \times e^{(14.43 \times 1000/T[\text{K}] - 26.54)/1000} - 1000, \quad (1)$$

$$\Delta^{18}\text{O}_\text{p} = \delta^{18}\text{O}_\text{p} - \delta^{18}\text{O}_{\text{p-equ}}, \quad (2)$$

式(1)~(2)中, T 为水温(K), $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水体 $\delta^{18}\text{O}$ 组成(‰), $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 为磷酸盐氧同位素组成(‰).

微生物也可能从矿物表面获取 PO_4^{3-} 用于其新陈代谢,并诱导铁氧化物的还原溶解,从而将更多携带有 $\delta^{18}\text{O}_{\text{p-equ}}$ 值的 PO_4^{3-} 释放到地下水中.含磷矿物的非生物溶解或解吸过程中,环境水中O原子与磷酸盐的O原子之间不会发生同位素分馏(Liang and Blake, 2007).在承压含水层的还原环境中,除了有机质的降解,微生物介导的铁氧化物的还原性溶解同样是磷释放进入地下水的重要过程(Yan *et al.*, 2020).图7显示 Fe^{2+} 和 $\Delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 之间表现出正相关趋势,这表明含铁矿物溶解释放磷并非单纯的水流驱动下所完成,微生物磷循环对诱导铁氧化物表面的 PO_4^{3-} 的还原溶解释放同样是承压水中重要的生物地球化学过程,交互带地层中高浓度TOC驱动了铁还原作用造成磷的释放.在TOC缺乏的江

陵4 km处,更低的 $\Delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 指示着更加微弱的微生物驱动力,而在江陵10 km、洪湖3 km等位于交互带

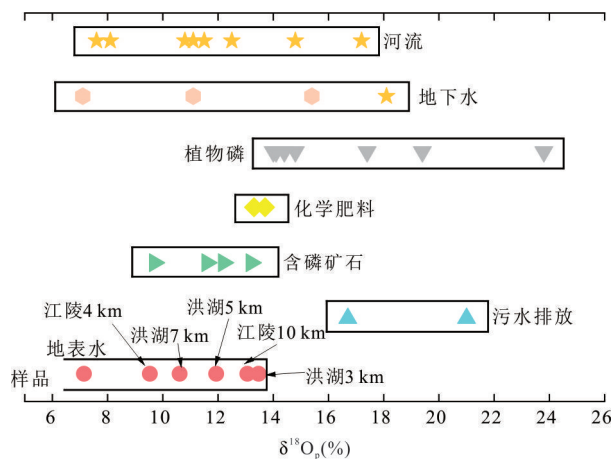


图6 交互带部分点位 $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 值

Fig.6 $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ values at selected sites in the interface zones

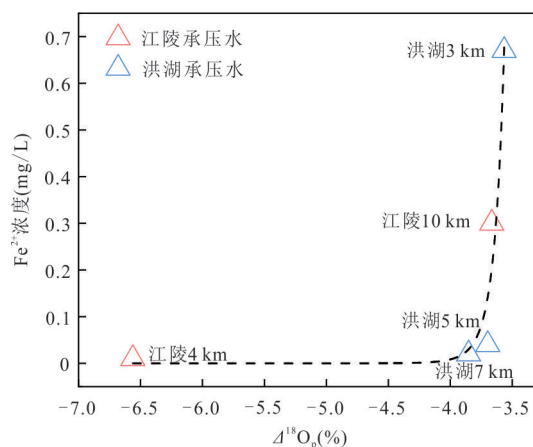


图7 交互带承压水中 Fe^{2+} 和 $\Delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 关系

Fig.7 Relationship between Fe^{2+} and $\Delta^{18}\text{O}_\text{p}$ in the confined water of the interaction zones

陵富含有机质地层的地下水中,微生物诱导含铁矿物释放磷的驱动力更强,然而这些富含有机质区域地下水中的 $\Delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 仍未达到平衡(均值-3.64‰),这表明释放的磷酸盐经历了有限的氧原子交换.

2.4 四湖流域侧向交互带中磷富集区的水流特征

交互带中发生着河水 and 地下水的混合并形成一系列水文化学梯度.图8显示了3条交互带距江1 km处的水位变化,3处断面地下水水位变化趋势和变幅有所差异,尽管在采样时段长江均补给地下水,但3条交互带和长江之间表现出不同的交互模式.对于监利和洪湖断面,监利断面地下水尤其是

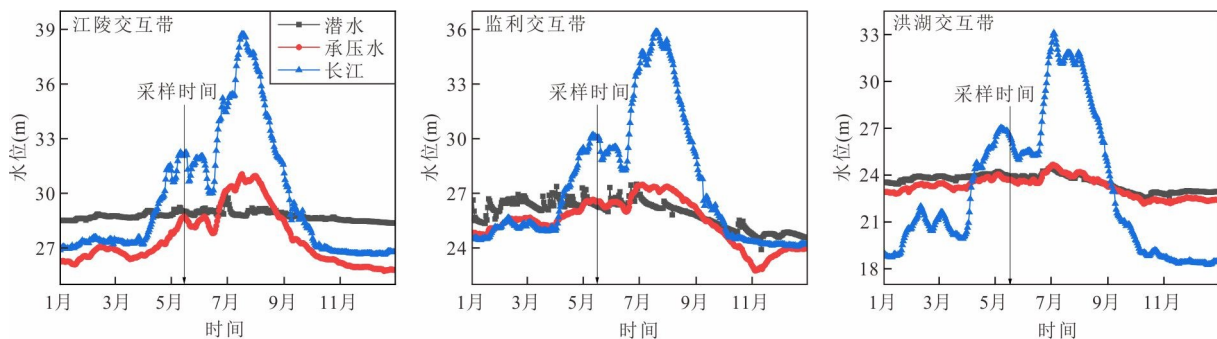


图 8 3条交互带距江 1 km 处水位变化

Fig.8 Water level fluctuations at a distance of 1 km from the river across the three interaction zones

承压水的水位变幅远超洪湖断面,和长江的交互更为强烈.图 2 显示这两条断面的承压含水层存在差异,监利断面含水层由细砂构成,渗透性更优于洪湖断面的粉细砂含水层,因此地下水水位波动较洪湖交互带更为明显.前文已表明这两处交互带中发生着类似的水文化学过程,但由于监利交互带中水位波动更大,频繁的干湿交替和更强的河流交互加速了近江段还原环境的形成和有机质的降解(Wu *et al.*, 2021; Fan *et al.*, 2023).因此,尽管二者同样在距江 2 km 处形成新的有机质输入,但监利交互带承压水中高磷区较洪湖断面更接近于长江,磷的来源也更偏向于有机质降解.江陵交互带中长江与深层的卵石层直接相连,含水层良好的渗透性导致地下水水位变化剧烈,长江和承压水之间存在强烈的水力联系,更频繁的水力交互改变了含水层原有的氧化还原条件,促进了含铁矿物对磷的释放,造成磷浓度的升高.

3 结论

本文以长江中游四湖流域为研究区,通过系统采集与分析长江侧向交互带内地下水水位、水化学、不同磷形态及含量、磷酸盐氧同位素组成等,揭示了交互带内磷的富集特征与成因机制,主要结论如下.

(1) 四湖流域侧向交互带地下水中普遍存在磷的富集现象,3条断面在距长江 1~3 km 的区域内均出现了明显的磷富集区,但磷富集区在不同断面之间、潜水和承压水之间的空间分布具有异质性.

(2) 不同交互带磷富集的主导地球化学过程不同.监利断面磷的富集主要受有机质矿化驱动,洪湖断面磷的富集受到了微生物介导的有机质降解和铁氧化物还原溶解的共同作用,而江陵断面中磷

的富集则与矿物溶解释放有关.磷酸盐氧同位素进一步证实微生物磷循环对参与诱导铁氧化物表面磷的还原溶解释放在交互带磷富集过程中的重要作用.

(3) 各交互带和长江水力联系的强弱决定了地下水磷富集区在空间上的具体位置和主要成因,地下水和长江之间更强的交互利于有机质对磷富集的贡献,并使磷在交互带更靠近长江的区域富集.

References

- Aeschbach-Hertig, W., Gleeson, T., 2012. Regional Strategies for the Accelerating Global Problem of Groundwater Depletion. *Nature Geoscience*, 5(12): 853–861. <https://doi.org/10.1038/ngeo1617>
- Cai, Y. M., Feng, M. Q., Zhang, T., 2022. Review of Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Riparian Zones of Chinese Inland Water Bodies. *Acta Ecologica Sinica*, 42(6): 583–592. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2021.09.010>
- Dai, X., Wang, L. C., Cao, Q., et al., 2025. Assessing the Hydrological and Social Effects of Three Gorges Reservoir Using a Modified SWAT Model. *Journal of Earth Science*, 36(4): 1793–1807. <https://doi.org/10.1007/s12583-024-0108-y>
- Davies, C. L., Surridge, B. J., Goody, D. C., 2014. Phosphate Oxygen Isotopes within Aquatic Ecosystems: Global Data Synthesis and Future Research Priorities. *Science of the Total Environment*, 496: 563–575. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.057>
- Du, Y., Deng, Y. M., Ma, T., et al., 2018. Hydrogeochemical Evidences for Targeting Sources of Safe Groundwater Supply in Arsenic-Affected Multi-Level Aquifer Systems. *Science of the Total Environment*, 645: 1159–1171. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.173>

- Du, Y., Deng, Y. M., Ma, T., et al., 2020a. Spatial Variability of Nitrate and Ammonium in Pleistocene Aquifer of Central Yangtze River Basin. *Groundwater*, 58(1): 110–118. <https://doi.org/10.1111/gwat.12888>
- Du, Y., Deng, Y. M., Ma, T., et al., 2020b. Enrichment of Geogenic Ammonium in Quaternary Alluvial-Lacustrine Aquifer Systems: Evidence from Carbon Isotopes and DOM Characteristics. *Environmental Science & Technology*, 54(10): 6104–6114. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00131>
- Fan, Z. H., Zhang, C. X., Xu, Y., et al., 2023. The Influence of Water Level Fluctuations on the Migration and Enrichment of Phosphorus in an Agricultural Groundwater System, Jiangnan Plain. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(8): 21213–21224. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23618-0>
- Goody, D. C., Bowes, M. J., Lapworth, D. J., et al., 2018. Evaluating the Stable Isotopic Composition of Phosphate Oxygen as a Tracer of Phosphorus from Waste Water Treatment Works. *Applied Geochemistry*, 95: 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.05.025>
- Guo, Z. W., Wen, Z., Bu, X. C., et al., 2023. A Sand Tank Experimental Study of Distribution, Migration and Transformation Mechanism of Iron and Phosphorus Species under Redox Fluctuation in a Simulated Riparian Zone. *Journal of Hydrology*, 625: 130032. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130032>
- Jin, Z. X., Wang, J. F., Zhang, R. X., et al., 2023. Identification of the Sources of Different Phosphorus Fractions in Lake Sediments by Oxygen Isotopic Composition of Phosphate. *Applied Geochemistry*, 151: 105627. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105627>
- Ke, X. Z., Tao, Y. Q., Zhang, X. X., et al., 2024. Geogenic and Anthropogenic Impacts on Phosphorus Enrichment in Groundwater around China's Largest Freshwater Lake. *Journal of Hydrology*, 635: 131154. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131154>
- Le, F., Ruan, X. H., Wei, Z., et al., 2024. Tracing Phosphorus Sources in the River-Lake System Using the Oxygen Isotope of Phosphate. *Science of The Total Environment*, 949: 175022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175022>
- Lewandowski, J., Meinikmann, K., Nützmann, G., et al., 2015. Groundwater: The Disregarded Component in Lake Water and Nutrient Budgets. Part 2: Effects of Groundwater on Nutrients. *Hydrological Processes*, 29(13): 2922–2955. <https://doi.org/10.1002/hyp.10384>
- Li, S., Huang, Y., Shen, J. H., et al., 2024. Iron Transformation and Hydroxyl Radical Production during Mixing Surface Water and Groundwater in the Riparian Zone: Effects of Bicarbonate and Surface Water-Groundwater Ratio. *Applied Geochemistry*, 168: 106017. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2024.106017>
- Liang, Y. H., Blake, R. E., 2007. Oxygen Isotope Fractionation between Apatite and Aqueous-Phase Phosphate: 20–45 °C. *Chemical Geology*, 238(1–2): 121–133. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.11.004>
- Liu, M. H., Du, Y., Deng, Y. M., et al., 2023. Effect of Depositional Evolution on Phosphorus Enrichment in Aquifer Sediments of Alluvial-Lacustrine Plain. *Science of the Total Environment*, 900: 165857. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165857>
- Liu, R., Ma, T., Qiu, W. K., et al., 2020. Effects of Fe Oxides on Organic Carbon Variation in the Evolution of Clayey Aquitard and Environmental Significance. *Science of the Total Environment*, 701: 134776. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134776>
- Liu, Z. S., Zhang, Y., Zhou, Q. H., et al., 2025. In-Situ Technologies for Controlling Sediment Phosphorus in Eutrophic Shallow Lakes: A Review. *Journal of Earth Science*, 36(1): 113–133. <https://doi.org/10.1007/s12583-024-0118-9>
- Ma, A. L., Huang, Y., Mao, S. J., et al., 2023. “Mn(II) Curtain” in the Riparian Sediment at the Lower Reaches of the China. *Journal of Hydrology*, 625: 130047. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130047>
- Mao, S. J., Huang, Y., Li, S., et al., 2024. Two-Dimensional Distribution of Arsenic Species in the Riparian Zone Regulated by As-Fe Co-Transformation under Varying River Water Proportions and Bicarbonate Concentrations. *Journal of Hydrology*, 643: 131919. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131919>
- McLaughlin, K., Kendall, C., Silva, S. R., et al., 2006. Phosphate Oxygen Isotope Ratios as a Tracer for Sources and Cycling of Phosphate in North San Francisco Bay, California. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 111(G3): 2005JG000079. <https://doi.org/10.1029/2005jg000079>
- Müller, B., Berg, M., Yao, Z. P., et al., 2008. How Polluted is the Yangtze River? Water Quality Downstream from the Three Gorges Dam. *Science of the Total Environment*, 402(2–3): 232–247. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.04.049>
- Su, X., Lu, S., Yuan, W., et al., 2018. Redox Zonation for Different Groundwater Flow Paths during Bank Filtra-

- tion: A Case Study at Liao River, Shenyang, Northeastern China. *Hydrogeology Journal*, 26: 1573–1589. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1759-5>
- Tao, Y. Q., Deng, Y. M., Du, Y., et al., 2020. Sources and Enrichment of Phosphorus in Groundwater of the Central Yangtze River Basin. *Science of the Total Environment*, 737: 139837. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139837>
- Tao, Y. Q., Du, Y., Deng, Y. M., et al., 2022. Carbon and Iron Isotope Approach Elucidates the Enrichment of Geogenic Phosphorus in Alluvial-Lacustrine Sedimentary Aquifers. *Journal of Hydrology*, 607: 127517. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127517>
- Tian, Z. B., Wang, L. J., Li, Y. J., et al., 2021. Changes of Phosphorus Delivery from Yangtze River to Dongting Lake under New Water and Sediment Conditions. *Journal of Cleaner Production*, 316: 128248. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128248>
- Wu, X. C., Ma, T., Du, Y., et al., 2021. Phosphorus Cycling in Freshwater Lake Sediments: Influence of Seasonal Water Level Fluctuations. *Science of the Total Environment*, 792: 148383. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148383>
- Yan, L., Xie, X. J., Wang, Y. X., et al., 2020. Organic-Matter Composition and Microbial Communities as Key Indicators for Arsenic Mobility in Groundwater Aquifers: Evidence from PLFA and 3D Fluorescence. *Journal of Hydrology*, 591: 125308. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125308>
- Zhang, H., Chen, S. J., Zhang, G. Y., et al. 2009. The Effect of Three Gorges Project on Groundwater Level and Soil Gleization in Honghu Region. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 25: 317–321(in Chinese with English abstract).
- Zhou, J., Du, Y., Deng, Y. M., et al., 2022. Source Identification of Groundwater Phosphorus under Different Geological Settings in the Central Yangtze River Basin. *Journal of Hydrology*, 612: 128169. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128169>

中文参考文献

- 张红, 陈世俭, 张光岳, 等, 2009. 三峡工程对洪湖地区地下水动态和土壤潜育的影响. 农业系统科学与综合研究, 25(3): 317–321.