

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.181>



长江中游临江潜水和承压水中氮的富集特征及其与水流模式的关系

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

1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 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: 为了探究长江中游临江地下水中氮的赋存状态及地表水—地下水补排模式对氮富集的影响, 对长江中游 18 个监测点两年 8 个季度的水文监测和 288 组水样分析, 系统揭示了长江中游临江地下水中氮的富集特征及不同富集区中江水—潜水—承压水的补排模式的差异性. 结果表明, 长江中游临江地下水中氮的富集差异性较大, 研究区识别出高硝、高氨和低氮区 3 种氮的赋存模式; 长江北侧地下水中氮的富集主要受氧化还原电位的调控, 而南侧地下水中氮的富集受多种因素共同控制; 高硝区主要出现在潜水有氮污染且潜水—承压水—江水均连通、以江水补给为主的承压水中; 高氨区主要出现在潜水—承压水—江水分水间水力联系较弱或地下水向长江排泄为主的承压水中, 不受潜水中氮污染的影响, 其主要源于地质成因. 该研究结果分别揭示了长江中游临江潜水和承压水中不同形态氮的富集特征及其与潜水—承压水—江水的连通性和补排关系之间的联系, 为该区域氮的生物地球化学过程及氮来源解析提供了重要的科学依据.

关键词: 潜水; 承压水; 硝态氮; 铵态氮; 富集特征; 水流模式; 长江中游; 环境地质.

中图分类号: P641

文章编号: 1000—2383(2026)06—2144—08

收稿日期: 2025-10-27

Enrichment Characteristics of Nitrogen in Phreatic and Confined Groundwater along Middle Reaches of Yangtze River and Their Relationship with Flow Patterns

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

1. 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

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); 湖北省联合基金项目(No. 2023AFD194).

作者简介: 孙海船(1998—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为地下水中氮的生物地球化学过程. ORCID: 0000-0003-3917-7447. E-mail: 308981082@qq.com

*** 通讯作者:** 刘慧, 教授, 主要研究方向为环境化学生物学与修复. ORCID: 0000-0002-1080-0883. E-mail: hliu2009@cug.edu.cn
刘路广, 正高级工程师, 主要研究方向为水资源配置与管理. E-mail: wlhllg814704@163.com

引用格式: 孙海船, 梁宇航, 朱棋, 李葵, 刘路广, 刘慧, 2026. 长江中游临江潜水和承压水中氮的富集特征及其与水流模式的关系. 地球科学, 51(6): 2144—2151.

Citation: Sun Haichuan, Liang Yuhang, Zhu Qi, Li Yan, Liu Luguang, Liu Hui, 2026. Enrichment Characteristics of Nitrogen in Phreatic and Confined Groundwater along Middle Reaches of Yangtze River and Their Relationship with Flow Patterns. *Earth Science*, 51(6): 2144—2151.

Abstract: To explore the nitrogen distribution state and the influence of the surface water-groundwater recharge and discharge patterns on nitrogen enrichment in the groundwater along the Middle Reaches of Yangtze River, this study conducted hydrological monitoring for two years and analyzed 288 water samples at 18 monitoring points along the Middle Reaches of Yangtze River, systematically revealing the enrichment characteristics of nitrogen in the groundwater along the Middle Reaches of Yangtze River and the differences in recharge and discharge patterns of river - phreatic groundwater - confined groundwater in different enrichment areas. The results show that groundwater nitrogen concentrations exhibit significant variation. Three nitrogen distribution patterns were identified in the study area: high nitrate areas, high ammonia areas, and low nitrogen areas. The enrichment of nitrogen in groundwater on the northern side of the Yangtze River is mainly regulated by the redox potential, while the enrichment of nitrogen in groundwater on the southern side is controlled by multiple factors in combination. The high nitrate areas mostly occurs in confined groundwater, where nitrogen pollution is present in the upper phreatic groundwater and where phreatic groundwater, confined groundwater, and river water are connected, with river water as the primary source of replenishment. The high ammonia area mainly occurs in confined groundwater where the hydraulic connection among the phreatic groundwater, confined groundwater, and river water is weak or where groundwater discharges to the Yangtze River. It is not affected by nitrogen pollution in the phreatic groundwater and mainly originates from geological causes. The research results respectively reveal the enrichment characteristics of different forms of nitrogen in the phreatic groundwater and confined groundwater across the Middle Reaches of the Yangtze River and their connections with the connectivity and replenishment and discharge relationships among the phreatic groundwater, confined groundwater, and river water, providing essential scientific basis for the biogeochemical process of nitrogen and the source analysis of nitrogen in this area.

Key words: phreatic groundwater; confined groundwater; nitrate; ammonium; enrichment characteristic; flow pattern; the Middle Reaches of the Yangtze River; environmental geology.

0 引言

地下水中的氮污染是全球共同关注的环境问题(Guo *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2017). 根据我国《生活饮用水卫生标准》,地下水中的 $\text{NO}_3\text{-N}$ (以N计)含量不得超过10 mg/L,根据《地下水质量标准》,地下水中的 $\text{NH}_4\text{-N}$ (以N计)超过1.5 mg/L就不宜作为饮用水来源.氮的赋存特征受多种生物地球化学过程的影响,而探究地表水和地下水不同补给—排泄模式下河流侧向地下水中氮的赋存与转化规律对于深入理解该区域的生物地球化学过程至关重要(Kiel and Cardenas, 2014; Liu *et al.*, 2018; Zuo *et al.*, 2023).

长江中游水资源丰富,地表水—地下水交互强烈,且上游存在着大型水利工程—三峡水库,水库的蓄水和调水会改变长江—地下水交互程度进而影响氮的迁移和转化过程(Niu *et al.*, 2017). 同时长江中游是我国重要的农业生产基地,来自农业化肥和渔业养殖产生的氮污染可能进入含水层污染地下水(Zhou *et al.*, 2013; Hu *et al.*, 2023). 此外,近年来大量文献报道长江中游存在着地质成因的 $\text{NH}_4\text{-N}$,进一步加剧了该地区氮污染的复杂性(Du *et al.*, 2017; Du *et al.*, 2020; Liang *et al.*, 2022). 研

究长江中游不同补给—排泄模式下地下水中氮的赋存特征有助于厘清该区域氮污染的形成与转化机制,对该区域氮污染的调控具有重要的意义.

本文对长江中游18个点位临江地下水(包括潜水和承压水)中氮的浓度和形态进行了采样检测,主要目的是研究长江中游临江地下水中氮的污染状况和控制因素,探究长江—临江地下水不同补给—排泄模式对氮赋存形态的影响.本文的研究结果可为长江中游氮的污染来源与机制提供重要的科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区水文地质条件

长江中游水资源丰富,河湖众多,江水与地下水交互频繁.长江中游第四纪含水层在垂向上呈多层结构,可划分为3个含水层.第一层为浅层潜水含水层(深度0~20 m),岩性主要为黏土、粉质黏土、黏质粉砂土.第二层为中层承压水含水层(深度20~100 m),由细砂、中粗砂、卵石组成,是当前开采的主要含水层.第三组为深层承压水含水层(深度>100 m),由砂卵石、砂砾岩组成(Gan *et al.*, 2018).本研究采集的地下水样本均为浅层潜水和中

层承压水。

1.2 采样点设置与监测方法

研究区包括从枝江到龙感湖的长江中游区域, 采样点位置如图 1 所示。所设点位共计 18 个, 长江南侧点位分别为枝江南、荆州南、江陵南、石首、嘉鱼 2、武汉、鄂州和阳新, 长江北侧点位分别为枝江北、荆州北、江陵北、监利 1、监利 2、洪湖、嘉鱼 1、涨渡湖、蕲春和龙感湖, 其中除荆州北、石首、武汉等点位距离长江大于 1 km 外, 其余点位距离长江皆为 1 km。每个点位设有两口监测井, 其中潜水监测井深度约 10 m, 承压水监测井深度约 40 m。每口井中均设有水位自动监测设备, 对地下水水位实施全年自动监测。长江水位来源于长江水文网, 取枝城、沙市、新厂、石首、监利、螺山、汉口、黄石港、九江等站点 2022—2023 年的每日水位。

本研究采样时间为 2022 年和 2023 年的 4 个季度(分别为 2 月、5 月、8 月、11 月), 两年 8 次共采集 288 个地下水样品, 其中潜水和承压水样品各 144 个。取样前先通过抽水泵洗井(抽出 3 倍井体积的地下水)约 30 min, 直至水温、pH 等常规指标稳定后, 采取地下水样品。现场使用便携式多参数水质分析仪测量地下水的 pH、温度、电导率(EC)、氧化还原电位(Eh)等指标后, 用聚乙烯采样瓶将地下水样品于当天运回实验室, 分别采用碱性过硫酸钾分光光度法(HJ 636-2012)、紫外分光光度法(HJ/T 346-007)、纳氏试剂紫外分光光度法(HJ 535-2009)测量地下水中总氮 TN、硝态氮(NO₃-N)、氨态氮(NH₄-N)浓度。

2 结果与讨论

2.1 长江中游干流侧向地下水中氮的富集特征

长江中游侧向各点位地下水中总氮浓度呈现显著的差异性(图 2a)。根据总氮、NO₃-N 和 NH₄-N 的浓度将所有点位分为 3 类: 第一类是枝江 1、江陵 1、监利 1 和嘉鱼 2 的潜水及枝江北、嘉鱼南的承压水, 其中总氮的浓度高, 除监利 1 承压水中 NH₄-N 超过我国《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)中 V 类水的 NH₄-N 标准限值(1.5 mg/L)外, 其他点位 NO₃-N 的浓度均高于我国《生活饮用水卫生标准》规定饮用水中 NO₃-N 的限值(10 mg/L), 形成“高硝区”; 第二类包括枝江 2、江陵 2 等在内的 7 个点位, 均表现为承压水中 NH₄-N 高于限值, 形成“高氨区”, 但只有部分点位的潜水中 NH₄-N 高于限值; 第三类包括荆州 1、荆州 2 等在内的 7 处点位, 其中 NO₃-N 和 NH₄-N 的含量均较低, 并未形成氮的富集现象。

不同形态氮的富集区分布如图 3 所示。总体来看, 高硝区主要分布在武汉上游的区域, 高氨区除在武汉上游区域普遍存在之外, 在下游区域的涨渡湖和龙感湖的潜水和承压水中也存在高氨现象。

2.2 长江中游临江地下水中氮分布的影响因素

为了探究地下水中各形态氮赋存的影响因素, 本研究对 pH、温度、电导率、氧化还原电位、三氮等指标进行了斯皮尔曼相关性分析(如图 4 所示)。结果表明, 总氮的含量与电导率呈显著正相关($r=0.23, p\leq 0.001$)。电导率可以指示人为活动的影响, 异常高值的电导率表明外源输入对地下水成分的贡献, 这可能是受氮污染较严重的高离子浓度地表



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

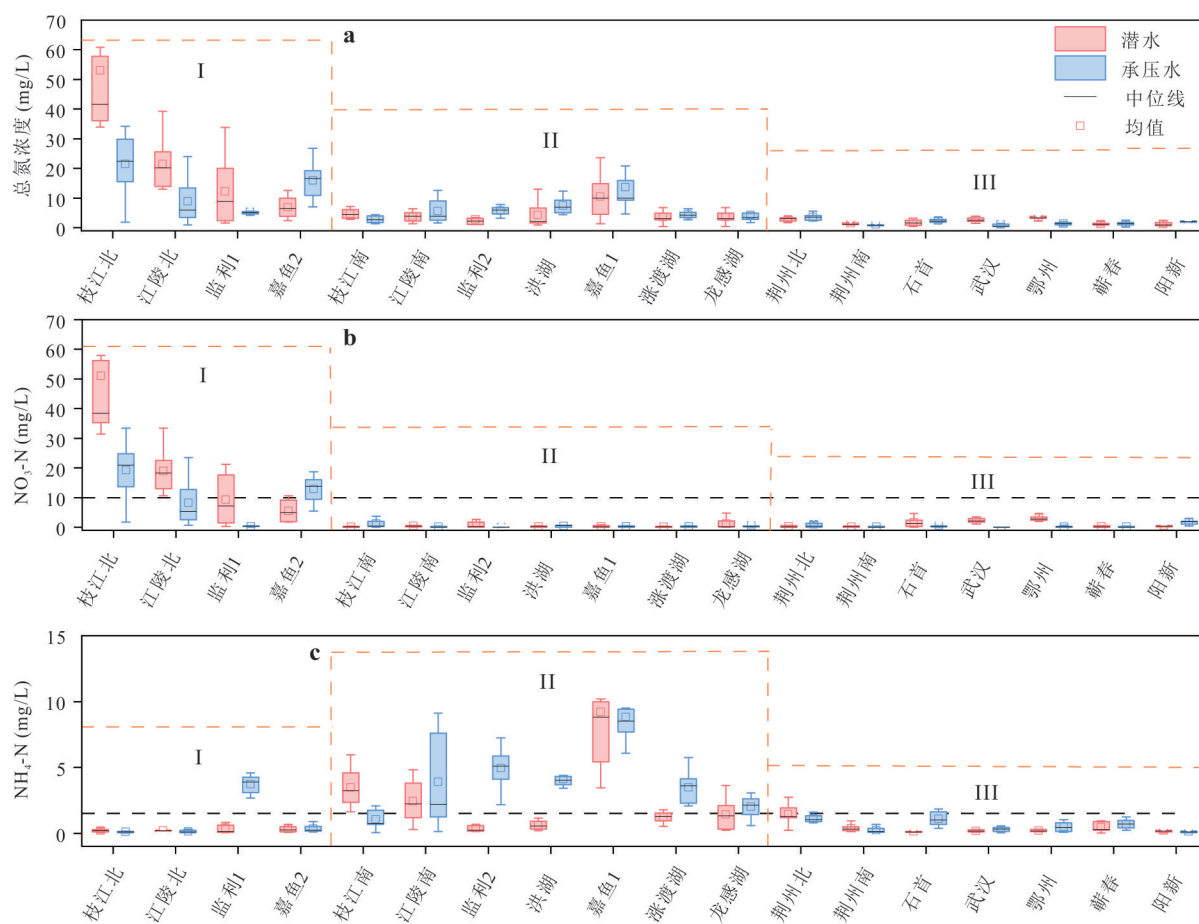
图2 长江中游各采样点总氮(a)、NO₃-N(b)和NH₄-N(c)的分布特征

Fig.2 The distribution characteristics of total nitrogen (a), NO₃-N (b) and NH₄-N (c) at each sampling point in the Middle Reaches of the Yangtze River

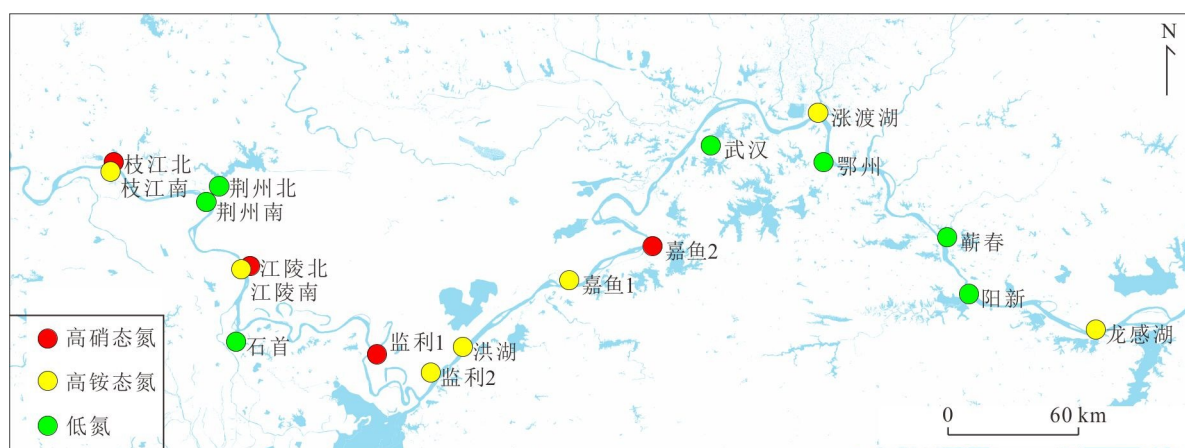


图3 长江中游侧向地下水中氮富集区的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of nitrogen-enriched areas in groundwater in the Middle Reaches of the Yangtze River

水进入地下水所致。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 与氧化还原电位呈显著正相关($r=0.49, p\leq 0.001$),而 $\text{NH}_4\text{-N}$ 与氧化还原电位呈显著负相关($r=0.57, p\leq 0.001$).氮形态的转化往往与微生物活动密切相关,而氧化还原电位决

定着微生物控制的各种氮转化作用(例如硝化和反硝化作用、硝酸盐异化还原)(Liu *et al.*, 2017).值得注意的是, $\text{NH}_4\text{-N}$ 还与pH呈显著负相关($r=0.25, p\leq 0.01$),这可能是因为pH越高, $\text{NH}_4\text{-N}$ 越容易

挥发.

为揭示长江南北两侧地下水氮形态与氧化还原电位的差异,分别对NO₃-N和NH₄-N氧化还原电位进行线性回归分析(如图5所示).在长江以北的地下水样品中(*n*=160),硝态氮与氧化还原电位呈极显著正相关($y=0.045x+4.74$, $R^2=0.22$, $p<0.001$),表明随地下水氧化性增强,硝态氮含量相应升高;而铵态氮与氧化还原电位呈极显著负相关($y=-0.016x+2.15$, $R^2=0.24$, $p<0.001$),且相关性强度更高,说明还原环境增强时,硝化过程受到抑制,铵态氮的累积效应更为突出.在长江以南的地下水样品中(*n*=128),NO₃-N与氧化还原电位的相关性未达到显著水平($y=0.0054x+1.79$, $R^2=0.008$, $p=0.154$),揭示了氧化还原条件并非控制该

区域硝态氮空间分布的主导因子,其含量可能更多受水文地质条件、外源氮输入及其他地球化学过程的共同调控;而铵态氮与氧化还原电位同样呈极显著负相关($y=-0.0062x+1.06$, $R^2=0.13$, $p<0.001$),但回归斜率与决定系数均低于长江以北,表明该区域铵态氮对氧化还原条件变化的响应程度相对较弱,可能受到水文条件及微生物群落结构等因素影响.

2.3 不同氮富集区下长江—潜水—承压水的补给—排泄模式

水流模式是影响溶质运移的关键因素.地下水位和长江水位的差异形成的水力梯度影响着长江和地下水间的补排关系,这种补排关系也影响着地下水中的氧化还原电位,从而决定着氮的形态

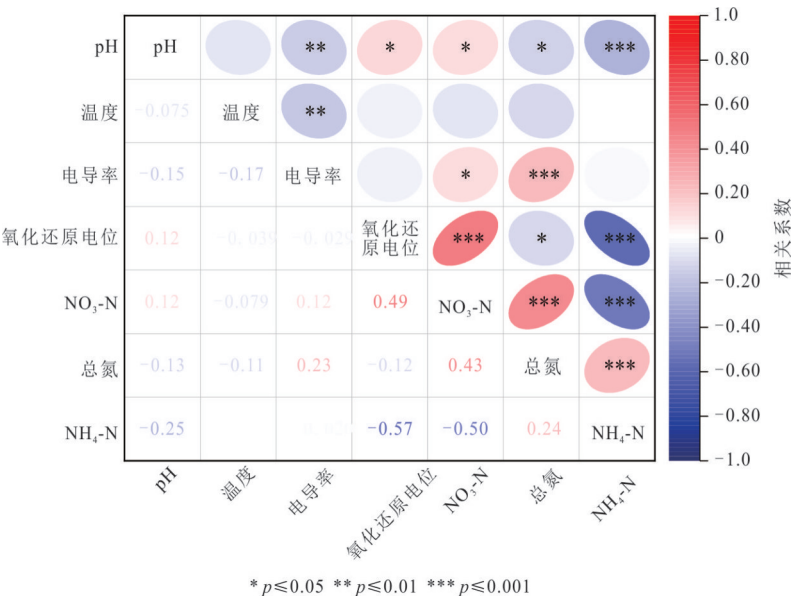


图4 地下水相关性热图

Fig.4 Correlation heat map of groundwater

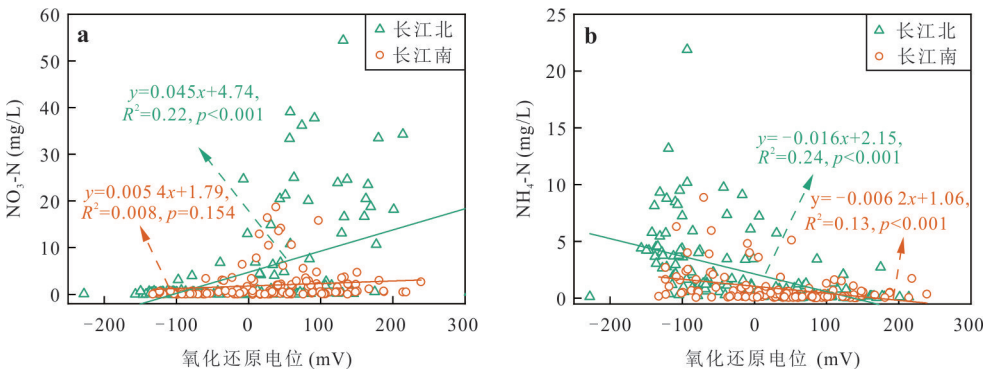


图5 长江南北两侧地下水样品中NO₃-N、NH₄-N与氧化还原电位的线性回归分析

Fig.5 Linear regression analysis of NO₃-N, NH₄-N and oxidation-reduction potential in groundwater samples from both sides of the Yangtze River

(Liang *et al.*, 2020; Kumar *et al.*, 2024). 因此, 本研究进一步探究了氮的不同富集特征和长江—潜水—承压水的补给—排泄模式之间的关系.

水流方向受水位梯度控制, 因此水位的高低可以用来判断水流方向. 当长江水位高于地下水位时, 长江补给地下水; 反之, 地下水则向长江排泄. 图6为高硝点位潜水—承压水—长江水位的变化图. 在枝江北、江陵北和嘉鱼2中, 除了江陵北的潜水, 其他的潜水和承压水水位均随长江水位变化而波动, 且二者之间的水位有相似甚至有时承压水位超过潜水位, 说明这些潜水和承压水与长江之间具

有较强的水力联系, 且二者之间有互通关系. 另外, 3个点位处的水流模式以长江补给潜水和承压水为主. 由图7可知, 枝江北、江陵北、监利1和嘉鱼2等地主要土地利用类型为耕地, 而研究区潜水埋深很浅, 一般在0.5~1.0 m, 潜水容易受地表来源的氮污染, 如地表施肥等农业活动造成土壤中的氮下渗至潜水中. 潜水与承压水的连通会使潜水中的氮向承压水中迁移, 使承压水中氮含量增加. 高溶解氧的江水对潜水和承压水的补给, 会使地下水中氮被氧化为 $\text{NO}_3\text{-N}$. 因此, 在潜水和承压水有氮污染且潜水—承压水—江水均连通、以江水补给为主的承压水中容易

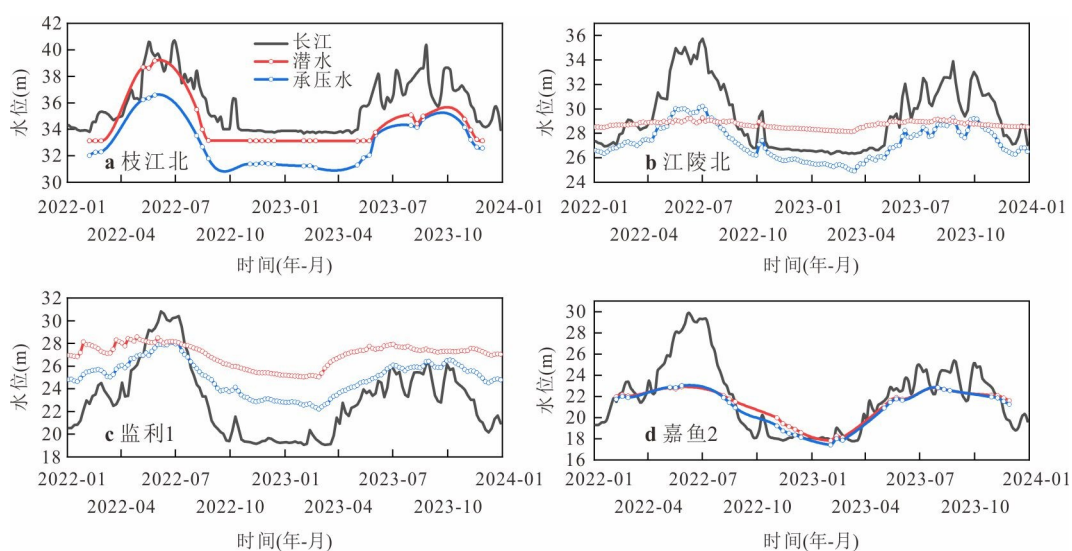


图6 高硝点的潜水—承压水—长江水位变化

Fig.6 Water level changes of the phreatic groundwater-the confined groundwater-the Yangtze River with high nitrate

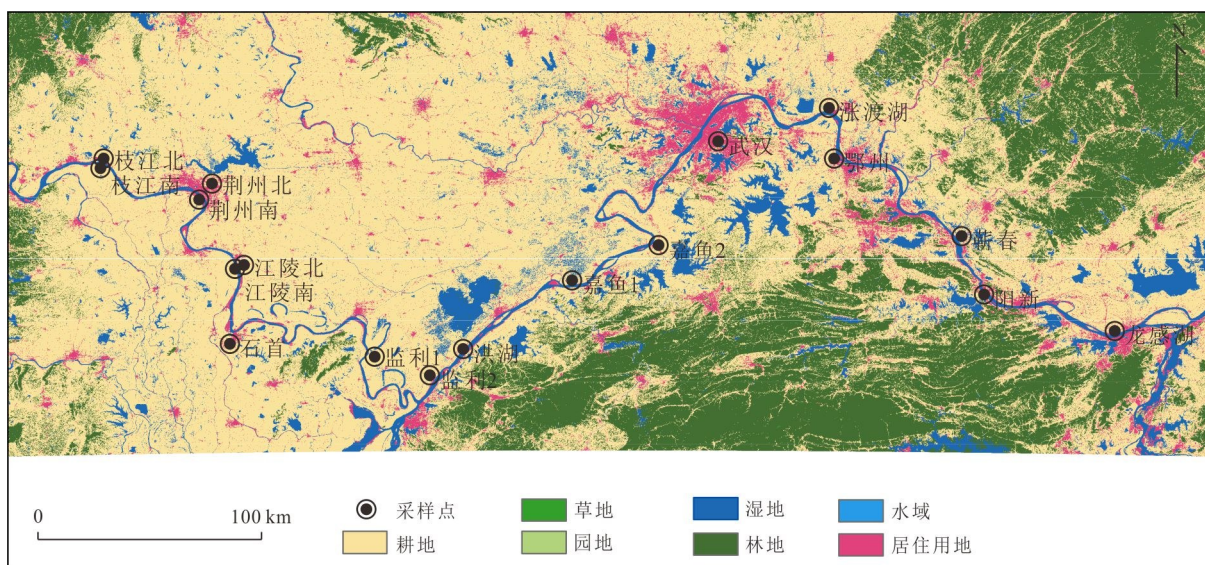


图7 2023年研究区土地利用类型

Fig.7 Land use types in the study area in 2023

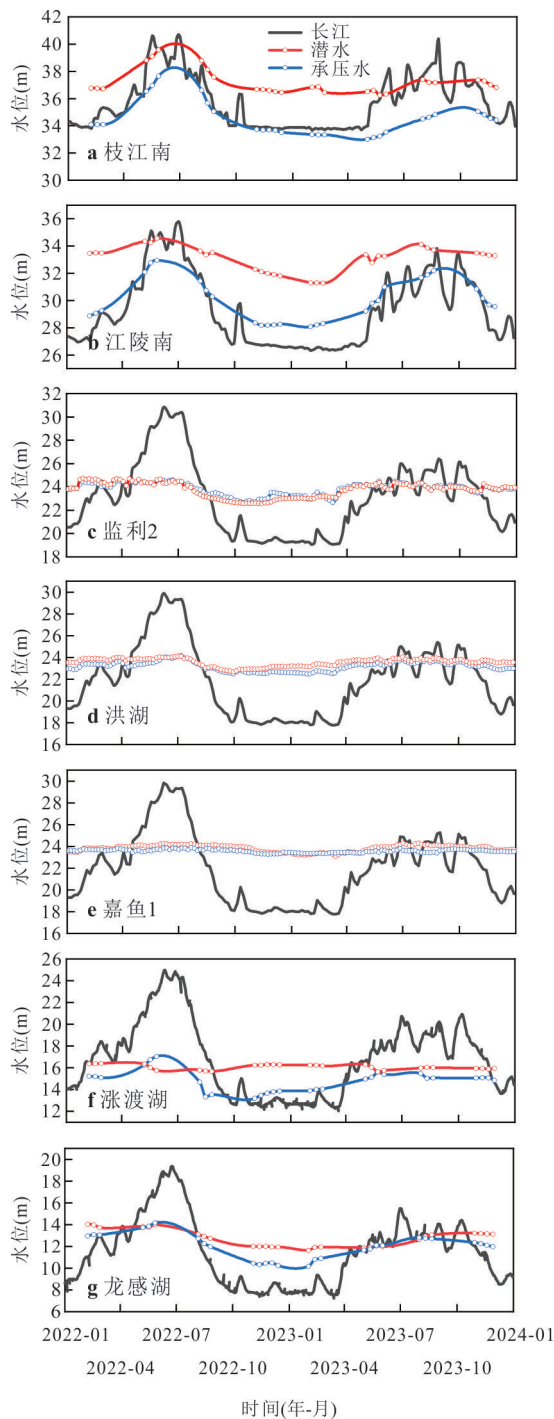


图8 高氨点的潜水—承压水—长江水位变化

Fig.8 Water level changes of the phreatic groundwater-the confined groundwater-the Yangtze River with high ammonia content

富集高浓度的 $\text{NO}_3\text{-N}$.

另外,监利1的潜水和承压水水位随长江水位变化呈现出较小幅度的波动,且二者之间没有交集,说明此处的潜水和承压水与长江之间的水力联系较弱,主要以地下水向长江排泄为主,且二者之

间没有连通性.因此,此处虽然潜水中有较高浓度的 $\text{NO}_3\text{-N}$,但是承压水中只有较高浓度的 $\text{NH}_4\text{-N}$.近年来较多文献报道了关于江汉平原长江古河道地层中存在高浓度的 $\text{NH}_4\text{-N}$,由地层中的有机氮矿化形成(Du *et al.*, 2017; Sun *et al.*, 2021),这也解释了监利1承压水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的来源.

高氨区中潜水—承压水—长江水位关系如图8所示.在枝江南和江陵南中,潜水和承压水均随江水呈现同频的变化,说明二者与长江之间有一定的水力联系,但是潜水和承压水水位均普遍高于江水水位,且一直是潜水位高于承压水位,说明二者以向长江排泄为主,长江水携带的溶解氧无法进入潜水和承压水中,导致地下水呈还原环境.另外,潜水和承压水之间存在2 m以上的差距,说明二者的水力联系很弱.

在监利2、洪湖和嘉鱼1中,潜水和承压水水位基本持平,且不随长江水位变化而波动,说明该点位中潜水和承压水之间有水力联系,但与长江之间基本无水力联系,潜水和承压水不受外界影响,处于还原环境.

在涨渡湖和龙感湖点位中,潜水和承压水位随长江水位变化而呈现出较小的波动,且二者之间的水位高低有交替的变化,说明二者与长江之间具有较弱的水力联系,且二者之间具有较好的联通性.

综合高氨区的潜水—承压水—长江的水力关系发现,承压水的高氨区主要出现在潜水—承压水—江水间水力联系较弱或地下水向长江排泄为主的水流模式下.即便潜水中有较高的 $\text{NH}_4\text{-N}$,也不能下渗至承压水中.因此,承压水中高氨区不是来源于地表和长江,只能来源于地质成因(Du *et al.*, 2020; Liang *et al.*, 2022).

由图7可知,荆州、石首、武汉、鄂州、蕲春、阳新等点位主要位于居住用地,人造地表的不透水性可能会影响地表的氮源进入潜水中,导致地下水中总氮浓度较低.

3 结论

本文调查研究了长江中游临江潜水和承压水中氮的浓度和形态分布,分析了潜水—承压水—江水间的连通和补排关系,揭示了氮的富集特征及其与水流模式之间的关系,主要结论如下.

(1)长江中游临江地下水氮的富集差异性较大,研究区识别出高硝区、高氨和低氮区三种氮的

赋存模式; $\text{NO}_3\text{-N}$ 富集区主要位于武汉的上游区域, 而 $\text{NH}_4\text{-N}$ 富集区更普遍, 存在于整个长江中游。

(2) 长江中游北侧地下水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的富集主要受氧化还原电位的调控, 而南侧地下水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的富集受水文地质条件、外源氮输入及其他地球化学过程的共同调控。

(3) 高硝区富集区主要出现在潜水有氮污染且潜水—承压水—江水均连通、以江水补给为主的承压水。

(4) 高氨区主要出现在潜水—承压水—江水间水力联系较弱或地下水向长江排泄为主的承压水中, 不受地表氮污染的影响。

References

- Chen, J., Qian, H., Wu, H., 2017. Nitrogen Contamination in Groundwater in an Agricultural Region along the New Silk Road, Northwest China: Distribution and Factors Controlling Its Fate. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(15): 13154–13167. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8881-0>
- Du, Y., Deng, Y. M., Ma, T., et al., 2020. 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>
- Du, Y., Ma, T., Deng, Y. M., et al., 2017. Sources and Fate of High Levels of Ammonium in Surface Water and Shallow Groundwater of the Jiangnan Plain, Central China. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 19(2): 161–172. <https://doi.org/10.1039/C6EM00531D>
- Gan, Y. Q., Zhao, K., Deng, Y. M., et al., 2018. Groundwater Flow and Hydrogeochemical Evolution in the Jiangnan Plain, Central China. *Hydrogeology Journal*, 26(5): 1609–1623. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1778-2>
- Guo, H. M., Li, G. H., Zhang, D. Y., et al., 2006. Effects of Water Table and Fertilization Management on Nitrogen Loading to Groundwater. *Agricultural Water Management*, 82(1–2): 86–98. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.033>
- Hu, M. Y., Zhou, P. J., Chen, C. Q., 2023. Study on Coupling of Typical Elements in Surface Water and Groundwater in the Middle Reaches of the Yangtze River, China. *Journal of Hydrology*, 626: 130298. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130298>
- Kiel, B. A., Cardenas, M. B., 2014. Lateral Hyporheic Exchange throughout the Mississippi River Network. *Nature Geoscience*, 7(6): 413–417. <https://doi.org/10.1038/ngeo2157>
- Kumar, B. S. K., Sridevi, B., Sarma, V. V. S. S., et al., 2024. Isotopic Evidence of Denitrified Nitrate in Groundwater beneath Intensive Agriculture and Exchange with Estuary (Godavari, India). *ACS ES&T Water*, 4(8): 3521–3531. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.4c00338>
- Liang, Y., Ma, R., Nghiem, A., et al., 2022. Sources of Ammonium Enriched in Groundwater in the Central Yangtze River Basin: Anthropogenic or Geogenic? *Environmental Pollution*, 306: 119463. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119463>
- Liang, Y., Ma, R., Wang, Y. X., et al., 2020. Hydrogeological Controls on Ammonium Enrichment in Shallow Groundwater in the Central Yangtze River Basin. *Science of the Total Environment*, 741: 140350. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140350>
- Liu, X. C., Beusen, A. H. W., Van Beek, L. P. H., et al., 2018. Exploring Spatiotemporal Changes of the Yangtze River (Changjiang) Nitrogen and Phosphorus Sources, Retention and Export to the East China Sea and Yellow Sea. *Water Research*, 142: 246–255. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.06.006>
- Liu, Y. Y., Liu, C. X., Nelson, W. C., et al., 2017. Effect of Water Chemistry and Hydrodynamics on Nitrogen Transformation Activity and Microbial Community Functional Potential in Hyporheic Zone Sediment Columns. *Environmental Science & Technology*, 51(9): 4877–4886. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b05018>
- Niu, B. B., Wang, H. H., Loáiciga, H. A., et al., 2017. Temporal Variations of Groundwater Quality in the Western Jiangnan Plain, China. *Science of the Total Environment*, 578: 542–550. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.225>
- Sun, L. Q., Liang, X., Jin, M. G., et al., 2021. Ammonium and Nitrate Sources and Transformation Mechanism in the Quaternary Sediments of Jiangnan Plain, China. *Science of the Total Environment*, 774: 145131. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145131>
- Zhou, Y., Wang, Y. X., Li, Y. L., et al., 2013. Hydrogeochemical Characteristics of Central Jiangnan Plain, China. *Environmental Earth Sciences*, 68(3): 765–778. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1778-9>
- Zuo, R., Zheng, S. D., Liu, X., et al., 2023. Groundwater Table Fluctuation: A Driving Force Affecting Nitrogen Transformation in Nitrate-Contaminated Groundwater. *Journal of Hydrology*, 621: 129606. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129606>