Geographical Science Research 地理科学研究, 2026, 15(5), 965-975
Published Online October 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/gser
https://doi.org/10.12677/gser.2026.155087

Hans汉斯

江汉平原高砷地下水研究进展

沈　力

长江大学资源与环境学院，湖北　武汉

收稿日期：2026年9月14日；录用日期：2026年10月19日；发布日期：2026年10月29日

摘　要

江汉平原是我国湿润河湖平原原生高砷地下水研究的重要区域，其砷富集过程受沉积环境、含水层结构和地表水－地下水交换共同控制。本文梳理区域调查、长期监测、沉积物培养、同位素示踪及数值模拟等研究，评述砷的时空分布、载砷矿物转化、有机质作用和碳氮硫耦合过程。现有证据表明，含砷铁氧化物的还原溶解是主要释砷途径，有机质的来源与反应活性决定电子供给，微生物介导的铁硫转化同时控制砷的释放与再固定。水文扰动改变氧化剂和有机碳输入，使不同井深、场地和季节呈现差异化响应；甲基化、孔隙水非均一性及微塑料相关作用拓展了传统无机砷研究框架。目前，局部观测向区域规律外推、不同过程的通量分配及治理长期稳定性仍存在不足。未来应加强分层连续监测、多形态砷测定及实验与模型联合约束，推动由浓度分布描述向过程定量和动态风险管理转变。在综合不同研究结论的基础上，本文进一步从水文扰动驱动的Fe-S-C-N耦合角度提出统一的概念模型，并讨论由井点证据向区域风险推断进行尺度升级的可行路径。

关键词

江汉平原，高砷地下水，水文地球化学，有机质，微生物，地表水－地下水相互作用

Research Progress on High-Arsenic Groundwater in the Jianghan Plain

Li Shen

College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan Hubei

Received: September 14, 2026; accepted: October 19, 2026; published: October 29, 2026

Abstract

The Jianghan Plain is an important setting for studying geogenic arsenic enrichment in humid alluvial-lacustrine aquifers in China. This review synthesizes regional surveys, long-term monitoring, sediment incubation experiments, isotope tracing, and numerical modeling to evaluate arsenic

文章引用: 沈力. 江汉平原高砷地下水研究进展[J]. 地理科学研究, 2026, 15(5): 965-975.
DOI: 10.12677/gser.2026.155087

distribution and the processes governing its mobilization. Reductive dissolution of arsenic-bearing iron oxides is a major release pathway, while organic matter sources and reactivity regulate electron supply. Microbially mediated iron and sulfur transformations can promote either arsenic release or sequestration. Hydrological disturbances alter the delivery of oxidants and organic carbon, producing contrasting responses across depths, sites, and seasons. Recent investigations of methylated arsenic, porewater heterogeneity, and potential microplastic-related effects extend the conventional inorganic arsenic framework. Key uncertainties concern regional extrapolation, quantitative allocation of process-specific fluxes, and the long-term stability of mitigation measures. Future work should integrate depth-resolved monitoring, arsenic speciation, and experimentally constrained transport models to support dynamic risk assessment and sustainable groundwater management. Synthesizing findings from various studies, this paper further develops a unified conceptual model from the perspective of Fe-S-C-N coupling driven by hydrological perturbations, and methodological pathways are discussed for upscaling from well-scale evidence to regional risk inference.

Keywords

Jianghan Plain, High-Arsenic Groundwater, Hydrogeochemistry, Organic Matter, Microorganisms, Surface Water-Groundwater Interaction

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

地下水中的砷并非都来自人为污染，相当一部分与含水层自身的地质条件有关。天然沉积物中原本就含有一定量的砷，当地下环境中的 pH 和氧化还原状态发生改变时，部分砷会从固相中迁出并进入地下水。也就是说，沉积物总砷含量不高，并不能完全排除地下水出现砷富集的可能。已有研究通常将富砷地下水环境概括为两种典型类型，一类是近中性且还原性较强的冲积含水层，另一类则多见于干旱地区的高 pH 含水层。由于两类含水层的环境条件不同，砷进入地下水的过程及相应防控措施也有所差别[1]。江汉平原雨量充足、河网密布，浅层地下水却检出大面积砷异常，这也说明区域水资源总量充足，并不代表饮用水质天然安全[2]。

江汉平原高砷地下水的研究重点也在不断变化。早期工作更多关注哪些地区存在高砷地下水，以及这些地下水具有怎样的水化学特征。随着长期监测和实验研究的开展，水位变化、氧化还原条件、微生物活动以及铁、硫、氮等元素循环逐渐成为研究的重要内容。连续监测发现，同一口井中的砷浓度也可能随时间发生明显变化，部分监测井表现出较强的季节性[3] [4]。这意味着一次采样得到的结果更多反映的是采样时的水质状况，并不一定能够代表该井长期的砷水平。近几年，相关研究又延伸到弱透水层中的孔隙水，并开始讨论砷与新型污染物之间可能存在的联系。与此同时，研究对象也不再局限于地下水，而是逐渐涉及沉积物、地表水以及农田等不同介质。综合考虑，仅用“还原环境导致砷富集”很难完整解释江汉平原的实际情况。

本文采用叙述性综述的方法，对截至 2026 年 9 月 12 日能够检索到的相关中英文期刊文献进行了整理。检索过程中主要使用“江汉平原(Jianghan Plain)”和“高砷地下水(groundwater arsenic)”等关键词，并进一步与有机质、铁、硫、氮、微生物、水文交换和风险预测等主题词进行组合。初步获得文献后，再通过期刊官方网站、出版社数据库、PubMed 和 DOI 记录核对论文题名、作者及出版信息。对于与本文

主题关系较为密切的代表性研究，则继续查阅其引用的相关文献，以补充检索结果，并尽可能梳理江汉平原高砷地下水研究的发展脉络。

2. 区域环境与时空分布

2.1. 沉积环境与含水层结构

江汉平原位于长江中游，区域地层为第四纪冲积、湖积交互沉积物为主，区内含水层具有较为明显的多层结构。不同岩性地层的水文地质性质差别较大，其中砂层的渗透性较好，地下水主要在这些层位中运移；粉砂和黏土层的渗透性相对较差，但对有机质以及部分活性矿物具有较强的吸附和保存能力。这种砂层与细粒层交错分布的地层结构，使砷在地下环境中的赋存、释放和迁移过程变得更加复杂。已有钻孔沉积物研究发现，砷在地下水和沉积物中的分布与地层的垂向变化密切相关，仅把地下介质看成均一地层，很难解释实际观测到的砷分布特征[5]。因此，富砷细粒层既可能是物质储库，也可能通过界面交换影响相邻砂质含水层，不能仅以取水砂层自身的总砷含量判断地下水风险。

从整个区域来看，江汉平原地下水系统还可以进一步划分为浅层潜水、中部不同层位的承压水以及深部承压水。已有研究发现，随着含水层埋深增加，现代水补给和人为活动造成的影响总体上逐渐减弱，但部分中部含水层中仍容易出现原生砷与铁、锰、铵等组分共同富集的现象[6]。不同研究对“深井”或“深层地下水”的划分标准并不完全相同，因此不能简单按照井深把样品统一划分为“浅层”和“深层”，还需要结合井筛位置、地层结构以及含水层类型进行判断，否则容易得到看似矛盾的结论。

2.2. 水化学特征与空间分布

Gan 等对 186 个地下水样品进行分析后发现，发现高砷地下水主要分布在沿河 10~45 m 井段，水化学类型以 HCO_3-Ca·Mg 型为主，多表现为近中性 pH、低氧化还原电位和较高有机碳。在所采集的样品中，约 87%的砷浓度高于 10 μg/L，最高达到 2330 μg/L [2]。需要注意的是，这一比例只代表该研究所选样点及含水层的情况，并不能作为整个江汉平原居民饮水井的砷超标率。沙湖原种场的研究结果有所不同，27 个地下水样品的平均砷浓度为 74.39 μg/L，其中 25 m 井深处浓度最高，为 580.77 μg/L，且水中 As (III)含量普遍高于 As (V) [7]。

上述研究结果存在一定差异，这与采样位置、井深和采样季节等因素有关，因此不能简单据此判断区域地下水砷污染是在加重还是减轻。沉积物中，砷的富集往往伴随着细颗粒、有机质以及铁铝组分的增加，但这种相关关系并不能说明砷只受某一种载体控制。Sun 等沿沉积剖面对砷形态、荧光有机质和微生物群落进行了综合分析，发现即使在同一沉积柱中，反应条件也存在差别[8]。

表 1 列出不同研究尺度的代表性证据。其用途是展示样本背景和结论边界，不构成统一空间总体的统计汇总。比较时应统一总砷与形态砷、过滤与未过滤样、检出限、浓度单位以及采样季节等口径。

2.3. 季节变化与长期变化的区分

Duan 等在 2012 年 5 月至 2014 年 4 月期间，对 39 口监测井和两条河流进行了逐月监测。结果显示，其中 5 口井的砷浓度基本稳定，23 口井存在明显的季节性变化，另外 11 口井除季节波动外，还呈现出一定的上升趋势[3]。因此可见，即使处于同一区域，不同监测井中砷浓度随时间的变化也并不一致。如果仅在丰水期和枯水期进行采样，很难判断这种变化究竟属于短期波动，还是长期变化趋势。

Schaefer 等的研究发现，地下水砷浓度的明显波动与水力梯度变化以及含氧、含硝酸盐地表水进入含水层有关，氧化剂进入含水层后可能使砷浓度在一段时间内下降[4]。但是降雨、水位升高、地下水补给和氧化前锋到达监测井并不同步，抽水与沟渠水位维持也会改变季节响应。因此，“雨季高、旱季低”

Table 1. Representative studies of high-arsenic groundwater in the Jianghan Plain and their scope
表 1. 江汉平原高砷地下水代表性研究及其适用范围

研究	对象与方法	主要证据	适用边界
Gan 等[2]	186 个地下水样品；水化学与同位素	样本中约 87%超过 10 μg/L；最高 2330 μg/L	样点集合结果，不等于全平原超标率
Duan 等[3]	39 口井；2012~2014 年逐月监测	稳定、季节波动及叠加上升趋势并存	监测井群的时序分类
Duan 等[5]	4 个钻孔、逾 100 个沉积物样品	地层结构与固相砷形态联合分析	固相储库不等于水相浓度
Zheng 等[9]	季度水化学与 dsrB 基因分析	硫酸盐还原参与季节性砷迁移	基因丰度不能直接换算反应速率
袁晓芳等[10]	长江、汉江沿岸；碳同位素与 DOM	两类沿岸地下水甲基砷富集过程有差异	适用于所研究水体和形态
Lan 等[11]	沙湖 10、25、50 m 井段；同位素混合	不同层段的补给来源存在差异	相对深井不等于区域深部含水层

注：表内数值均为对应论文的研究结果，未跨研究合并；浓度单位为 μg/L，井深单位为 m。

只能描述部分观测，不能替代对补给路径、停留时间及反应滞后的分析。

3. 砷富集的化学与微生物机制

3.1. 含砷矿物还原与固液再分配

含砷铁氧化物的还原溶解被认为是江汉平原地下水中砷释放的重要机制。在还原条件下，铁氧化物发生溶解，原先吸附或共沉淀于矿物中的砷随之进入地下水，同时伴有 As(V)还原、吸附位点改变以及次生矿物生成等过程。沉积物砷形态分析可以反映固相中砷的赋存情况，而氧化还原交替培养实验进一步发现，砷在固相和水相之间存在释放与再固定过程[5] [12]。Duan 等发现，部分深于 15 m 的沉积物即使不补充外源碳，仍然可在多个氧化还原循环中释放砷，说明内源有机质具有维持还原反应的潜力[12]。

需要避免将地下水中砷与溶解铁的弱相关解释为铁还原机制不存在。两者进入水相后会经历不同强度的再吸附、硫化物沉淀及矿物转化，固相反应与水相浓度并非一一对应。Deng 等通过培养实验发现，不同深度沉积物的微生物组成和铁矿物转化存在然差异，已经释放的砷在后期还可能被新形成的铁硫化物重新固定[13]。因此，判断砷的实际释放情况还需要结合 Fe(II)、溶解硫化物以及固相铁、砷形态进行分析，仅比较总铁与总砷的相关性，很难判断究竟是砷释放较少，还是释放后又发生了较强的固定。

3.2. 有机质来源与反应活性

有机质可以通过为微生物提供代谢底物、参与电子传递以及影响矿物表面络合等方式参与砷的迁移。鲁宗杰等利用三维荧光和平行因子分析，对江汉平原地下水中的类腐殖质和类蛋白组分进行了识别，认为腐殖质的电子传递以及 As-Fe-DOM 之间的相互作用可能促进砷迁移[14]。但是，荧光组分与砷之间存在相关关系，只能为机制分析提供一定依据，尚不足以说明特定三元络合物的实际含量，荧光强度也不能直接代表可利用有机碳的通量。

Yu 等结合碳同位素和水文监测发现，地表补给和浅部弱透水层均可能向含水层输入有机碳[15]；这一结果与内源碳培养实验并不矛盾，前者侧重外源有机碳的输入，后者则反映沉积物自身有机质维持反应的能力。Yang 等发现，季风期和非季风期的 DOM 组成及碳同位素特征存在变化，表明即使 DOC 浓度相近，有机质组成及其生物可利用程度也可能有所不同[16]。

3.3. 微生物作用

目前，江汉平原高砷地下水中的微生物研究已不再局限于群落组成，而是逐渐关注其实际功能。Ye等结合沉积物生物标志物和细菌群落结构，发现不同深度的有机质组成及微生物群落存在明显差别[17]。高杰等从当地含水层中分离出具有砷、铁还原能力的菌株，并通过与原位沉积物共同培养发现，这些菌株能够促进铁和砷的释放，为微生物参与释砷提供了更直接的实验依据[18]。

不过，微生物具有耐砷能力，并不代表其一定利用砷进行呼吸代谢，某类微生物的存在也不能说明相应过程在实际含水层中占主导。群落丰度、功能基因、基因表达和实际反应速率所代表的意义并不相同。此外，纯培养或外加底物可能会强化部分菌株的作用，因此实验结果仍需结合现场底物条件和水力停留时间进行判断。今后的研究还需要进一步明确不同微生物在具体环境下对砷释放和固定的实际作用。

3.4. 硫循环的促释与固砷

硫酸盐还原对砷迁移的影响并不是单一的，不能简单认为这一过程有利于除砷。Zheng 等结合季度水化学、硫酸盐还原功能基因和微生物群落进行分析，发现季节性输入的硫酸盐参与生物还原后，产生的还原态硫能够促进含砷铁氧化物发生非生物还原，从而影响砷的释放[9]。徐雨潇等分离得到的DesulfovibrioJH-S1 同时具有硫酸盐和铁还原能力，可以影响载砷水铁矿的转化。值得注意的是，该菌株不能直接还原 As (V)，说明砷的释放也可能通过矿物载体的变化间接发生[19]。

Gao 等在江汉平原沉积物培养实验中发现，砷浓度经历了先升高、短暂降低、随后再次升高的变化，同时检测到了硫代砷形态[20]。这表明少量新生成的铁硫化物并不足以使砷长期稳定下来。结合 Deng 等发现的后期固砷现象来看，硫循环最终是促进砷释放还是固定砷，与活性铁和硫化物含量、矿物形成过程以及反应时间都有关系[13]。因此，投加硫酸盐或有机底物的修复设想必须检验全过程砷形态与反弹行为，不能用单一时间点的去除率代表长期效果。

3.5. 氮循环与砷甲基化

地下水中氮、砷的共同富集可能与含氮有机质矿化有关，同时也受到硝酸盐、铁等电子受体转化的影响。张振超等结合水化学、同位素和聚类分析发现，从补给区到排泄区，氮转化对砷释放的影响并不相同[21]。在氧化条件较强的补给区，硝酸盐的存在会在一定程度上限制铁氧化物还原；进入还原环境后，氮循环与铁循环之间的关系随之发生变化。因此，铵可以作为判断地下水环境状态的参考指标，但砷与铵浓度相关并不能说明铵直接导致砷释放，高铵也不能在缺少示踪证据的情况下直接归因于农业污染。

袁晓芳等在研究长江和汉江沿岸地下水后发现，两地甲基砷的富集过程存在差别：长江沿岸与产甲烷过程的关系更明显，而汉江沿岸则更多与小分子活性有机质发酵有关[10]。Xu 等对江汉平原和江北平原的比较也表明，有机质转化、铁硫循环及甲烷相关过程在不同地区的作用组合并不一致[22]。这些结果使地下水砷研究不再局限于总砷，但不同地区得到的机制仍不能直接套用。对于砷甲基化，也需要结合其产物形态、稳定性和迁移特征判断实际风险，不能仅根据甲基砷含量的增加认为总体风险有所降低。

4. 水文扰动与跨介质迁移

4.1. 补给路径与氧化还原

水文过程对地下水砷的影响并不只是稀释。地表水入渗时会带入氧和硝酸盐，使 Fe (II)发生氧化，并形成新的铁氧化物吸附砷；而随水进入的有机质，在氧化剂逐渐消耗后又可能促进还原反应。Huang 等将抽水、垂向渗漏及生物地球化学反应纳入反应运移模型，用于分析河岸含水层砷浓度的季节变化[23]。这类模型可以判断不同过程共同作用时能否解释实际观测，但模型拟合较好并不能说明只有这一种反应

路径。

Zhang 等根据氢氧同位素和 Cl/Br 关系发现，浅层地下水受河塘水交换以及农业、养殖土壤入渗的影响较明显，而较深地下水更多受到侧向补给影响[24]。Lan 等在 2025 年对沙湖地区的研究中，通过二端元混合模型分析不同水体的补给来源，结果显示低砷浅层地下水与地表水补给关系较密切，而高砷中、深层地下水更多受到降水优先通道和邻近含水介质补给的影响[11]。因此，地下水靠近池塘并不能说明深层高砷主要来自池塘水或池塘有机碳，确定水体来源也不能直接确定其中有机碳的来源。

4.2. 弱透水层孔隙水与抽水影响

细粒层除了会影响地下水的渗流路径，其内部孔隙水的释放也会对邻近含水层的水化学组成产生影响。Qiu 等(2025)对江汉平原黏土质沉积物进行了连续和分段孔隙水提取。结果发现，自由水与结合程度较高的孔隙水在化学组成上存在差别，砷、铵等溶质的测定结果也会受到释放水体组成的影响[25]。因此，不同压力或离心条件获得的孔隙水不能无条件视为可直接比较的“原位地下水”。这一方法学问题对推断弱透水层砷储库和通量尤其重要。

2026 年的后续研究进一步通过固结模拟，将渗透性质随时间的变化以及孔隙水地球化学差异纳入模型。结果显示，沉积物排水量增加并不一定对应溶质释放量的同步增加[26]。因此，在分析抽水对地下水砷的影响时，除了考虑高砷水沿井筛和越流通道的迁移，还要考虑细粒层内部孔隙水的释放及其成分变化。不过，实验条件下得到的结果还不能直接用于估算整个江汉平原的释砷量，仍需要结合实际压降、有效应力、沉积层厚度和排水边界等条件进行判断。

4.3. 新污染物关联

2026 年的相关研究发现，江汉平原地下水中存在微塑料与砷共存的现象，并分析了微塑料表面对砷的固定作用，以及微塑料衍生 DOM 对含砷铁氧化物还原的可能影响[27]。但目前相关研究仍较少，微塑料与砷之间的相互作用还不能直接说明其对区域地下水砷释放的实际影响。今后还需结合实际环境条件，进一步研究微塑料对砷吸附和释放的影响，同时避免采样和分析过程中产生塑料污染。

4.4. 地下水与农田分布链

Yu 等对江汉平原地下水－土壤－水稻系统的研究表明，即使地下水和土壤中的砷含量总体较低，砷的生物可利用性及食物摄入途径仍可能产生一定的健康风险，弱结晶铁铝氧化物结合态砷也可能是生物可利用砷的重要来源[28]。因此，地下水砷含量、土壤总砷含量与稻米砷暴露之间并不是简单的线性关系。在评价地下水灌溉影响时，应综合考虑灌溉水来源、灌溉量、土壤氧化还原条件、作物品种以及稻米中砷的形态，同时应区分模型评价结果与实际暴露情况，避免将局部农田的研究结果直接推广到整个江汉平原。

4.5. 不同研究结论的辨析与概念模型

现有研究中有几组结果表面上并不一致，但将其放到“水文扰动－电子受体消耗－矿物转化”的连续过程中，可以得到较为统一的解释。例如，地表水补给在短时间内可携带 O_2 和 NO_3^- 进入含水层，促进 Fe (II)氧化并形成新的铁氧化物，从而增强砷的吸附，使地下水砷浓度下降[4] [23]；但随着氧化剂逐渐耗尽，补给水带入的活性有机质又可能为微生物还原过程提供电子供体，促进含砷铁氧化物还原溶解，使砷重新释放[15] [16]。同样，硫酸盐还原既可能通过还原态硫促进铁矿物转化和砷释放，也可能在硫化物和活性铁充足时形成 FeS 等次生矿物并重新固定砷[13]。因此，“补给降低砷”与“补给促进释砷”、

“硫循环促释”与“硫循环固砷”并非必然互相否定，更可能对应不同反应阶段、物质配比和水力停留时间。

据此可构建一个以水文过程为外部驱动、以 Fe-S-C-N 循环为内部反应网络的概念图(图 1)。降雨、河塘交换、抽水和水位变化首先控制 O_2、NO_3^-、SO_4^{2-} 及活性有机碳的输入，随后不同电子受体按其可利用程度依次参与反应。有机碳为微生物代谢提供电子，Fe(III)氧化物还原溶解释放其表面或晶格中结合的砷；硫酸盐还原产生的硫化物则具有“双向作用”，既可能促进矿物还原和硫代砷形成，也可能通过铁硫化物和其他次生矿物使砷重新进入固相。氮循环一方面通过 NO_3^- 等电子受体影响还原序列，另一方面其矿化产物 NH_4^+可作为强还原和有机质转化环境的伴随指标。最终观测到的砷浓度是这些过程在特定井深、沉积相、补给路径和反应时间上的综合结果，这也解释了不同井点、不同季节甚至同一井不同阶段出现相反变化的原因。

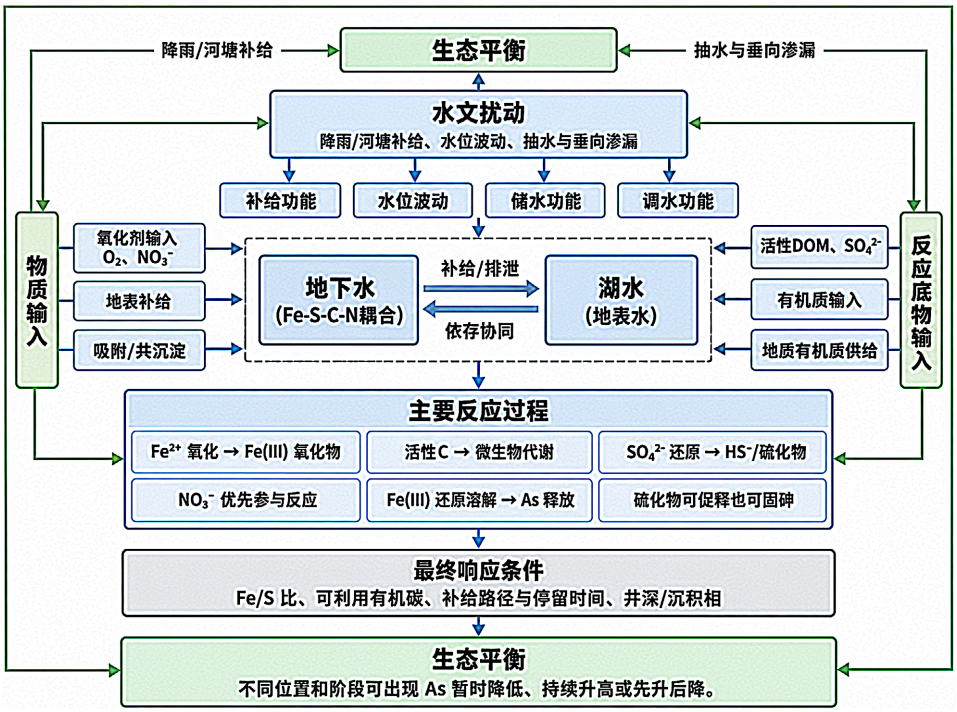

Figure 1. Conceptual model of hydrologically driven Fe-S-C-N coupling controlling arsenic mobilization and retention in the Jianghan Plain
图 1. 江汉平原水文驱动下 Fe-S-C-N 耦合作用调控砷迁移释放与固持的概念模型

5. 主要不足与研究展望

已有研究表明，江汉平原高砷地下水的形成受多种因素共同影响，但不同地区和不同条件下的主控因素存在差异。目前的研究主要集中在局部监测井、典型钻孔和室内培养实验，不同沉积环境下的水文地质条件、有机质和矿物组成存在差异，因此相关研究结果仍具有一定的局限性。今后还需要从以下几个方面开展进一步研究。

5.1. 建立分层长期观测体系

根据沉积相、含水层结构和地下水补排条件进行分区，并合理布设监测井，记录井筛位置、洗井条件、过滤孔径和检出限等信息，同时开展地下水位、抽水量及砷形态的长期监测。在洪水期、集中抽水

期以及水位变化明显的时期适当增加采样频率。对于同一监测井的连续观测数据，应区分季节变化和长期变化趋势，并保留低于检出限数据的原始记录，从而分析地下水砷含量长期变化的主要影响因素。

5.2. 尺度升级：从井点证据到区域风险

江汉平原高砷地下水研究面临的关键方法学问题，是如何把井点、钻孔和局部剖面的认识转换为区域尺度的风险信息。这种“尺度升级(upscaling)”不能简单等同于对砷浓度做平面插值，因为不同含水层、沉积相、井筛深度和补排条件之间并不具有同质性。更合理的做法是先按照水文地质单元进行分层，再在层内建立空间关系，并明确模型可外推的边界。

在方法上，可形成三条互补路线。第一，地统计学和 GIS 插值适合利用有限井点恢复空间连续性，并可通过克里金方差等指标表达空间不确定性，但对垂向结构、非平稳分布和突变边界的处理能力有限[29]。第二，可解释机器学习能够同时利用 NH_4^+、Eh、主要离子、水位、地貌和含水层类型等多源变量识别非线性关系，已有研究已验证其在洪泛平原地下水砷风险预测中的潜力[30]；但实际应用必须防止空间邻近样本造成的数据泄漏，并检验跨季节、跨含水层和跨区域的可迁移性。第三，可在典型水文地质单元上建立反应运移模型，再利用机器学习代理模型近似大量参数组合下的模拟结果，以降低情景分析和不确定性传播的计算成本。地下水污染模拟领域的综述表明，代理模型已广泛用于不确定性分析、监测优化和管理决策，但其可靠性依赖于高保真模拟样本、参数空间覆盖以及独立验证[31] [32]。

针对江汉平原，可采用“点–层–区”的分级：首先统一井筛位置、采样季节、过滤方式和检出限等基础信息，并依据沉积相和含水层结构划分建模单元；随后在各单元内分别建立空间统计、机器学习或过程模型，采用空间分块而不是随机划分进行交叉验证；最后利用独立井、跨季节数据和不同模型之间的一致性进行外部检验。区域成果应优先表达高砷发生概率、预测区间和模型适用范围，而不是给出看似精确的单一浓度面。这样的尺度升级既能保留局部机理证据，也能为高风险井筛查、供水层选择和抽水情景管理提供更直接的依据。

5.3. 区域预测与模型验证

Xiao 等利用 GIS 空间插值和分区方法研究了江汉平原水体和土壤中砷的空间分布，为区域砷污染识别提供了依据[29]。Fan 等采用可解释机器学习方法，选取铵、氧化还原电位以及相关离子等指标，对洪泛平原地下水砷污染风险进行预测，并验证了模型在其他洪泛平原地区的适用性[30]。与传统空间插值方法相比，机器学习能够综合考虑多种水化学指标，但模型中的变量重要性主要反映其对预测结果的贡献，并不能直接说明变量与地下水砷之间存在因果关系。

在区域尺度应用中，模型评价可采用空间分块和跨季节验证的方法，避免相邻监测井或同一监测井的重复样本同时出现在训练集和验证集中，从而导致模型性能被高估。同时，除整体准确率外，还应关注高风险井的漏判情况、模型概率校准效果及其适用范围。模型预测结果可用于辅助筛选需要优先检测的井点，但对于实际供水井，仍需对砷及相关水质指标进行实际检测，不能直接以邻近井的检测结果或模型预测结果代替。

5.4. 联合过程模型与风险管理

反应运移模型应结合水位、保守示踪物和主要氧化还原组分，对不同矿物反应过程进行比较分析。机器学习方法可用于分析非线性关系，并识别重点监测区域，两种方法可利用独立数据进行验证。针对极端气候、灌溉和地下水开采变化，应结合不同情景分析地下水砷浓度的变化及响应时间。表 2 总结了目前需要重点研究的问题及相应的治理措施。

Table 2. Priority questions and validation strategies for high-arsenic groundwater in the Jianghan Plain
表 2. 江汉平原高砷地下水优先研究问题与验证思路

待解决问题	建议验证方式	可支持的决策	研究依据
季节波动与长期上升如何区分	分层井群连续观测；区分周期项与趋势项	检测时段与复测频率	[3] [4]
内外源碳各贡献多少	碳源示踪与原位浓度培养；电子收支	补给区有机物输入管理	[12] [15] [16]
硫循环何时促释或固砷	活性铁–硫化物梯度实验；固液形态追踪	原位调控条件与反弹评价	[9] [13] [20]
细粒层释水是否改变砷通量	应力–孔隙水分级表征与耦合运移模拟	抽水强度及层间越流管理	[25] [26]
低砷水源是否长期可靠	抽水情景验证；独立井与跨季节测试	水源层选择与供水运行	[6] [30]

注：验证方式为本文基于已有证据提出的研究建议，不代表这些方案均已在江汉平原完成现场验证。

6. 结论

(1) 江汉平原高砷地下水在不同地区、不同含水层及不同季节存在明显差异。近中性还原环境、载砷矿物和有机质是影响地下水砷富集的重要因素，但局部地区的研究结果不能直接代表整个江汉平原。

(2) 含砷铁氧化物的还原溶解是地下水中砷释放的重要途径，同时砷浓度还受到吸附、次生矿物形成以及硫循环等过程的影响。有机质、微生物以及碳、氮、硫循环共同影响砷的释放和固定，因此不能仅根据单一指标判断砷的富集机制。

(3) 地表水与地下水之间的水文交换会改变水体来源以及氧化剂和有机碳的输入，从而影响地下水中砷的迁移和转化。弱透水层孔隙水、砷甲基化以及微塑料对砷迁移的影响仍需要进一步研究。

(4) 今后的研究应加强不同含水层的长期连续监测，并结合砷形态分析、实验研究和模型模拟，进一步研究地下水砷的迁移转化过程。对于安全供水和除砷技术，还应重点关注不同水文条件下的长期稳定性。

参考文献

[1] Smedley, P.L. and Kinniburgh, D.G. (2002) A Review of the Source, Behaviour and Distribution of Arsenic in Natural Waters. *Applied Geochemistry*, **17**, 517-568. https://doi.org/10.1016/s0883-2927(02)00018-5

[2] Gan, Y., Wang, Y., Duan, Y., Deng, Y., Guo, X. and Ding, X. (2014) Hydrogeochemistry and Arsenic Contamination of Groundwater in the Jianghan Plain, Central China. *Journal of Geochemical Exploration*, **138**, 81-93. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.12.013

[3] Duan, Y., Gan, Y., Wang, Y., Deng, Y., Guo, X. and Dong, C. (2015) Temporal Variation of Groundwater Level and Arsenic Concentration at Jianghan Plain, Central China. *Journal of Geochemical Exploration*, **149**, 106-119. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.12.001

[4] Schaefer, M.V., Ying, S.C., Benner, S.G., Duan, Y., Wang, Y. and Fendorf, S. (2016) Aquifer Arsenic Cycling Induced by Seasonal Hydrologic Changes within the Yangtze River Basin. *Environmental Science & Technology*, **50**, 3521-3529. https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04986

[5] Duan, Y., Gan, Y., Wang, Y., Liu, C., Yu, K., Deng, Y., *et al*. (2017) Arsenic Speciation in Aquifer Sediment under Varying Groundwater Regime and Redox Conditions at Jianghan Plain of Central China. *Science of The Total Environment*, **607**, 992-1000. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.011

[6] Du, Y., Deng, Y., Ma, T., Lu, Z., Shen, S., Gan, Y., *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

[7] 邬建勋, 余倩, 蒋庆肯, 等. 江汉平原高砷地下水与含水层沉积物的地球化学特征[J]. 地质科技情报, 2019, 38(1): 250-257.

[8] Sun, Y., Lan, J., Chen, X., Ye, H., Du, D., Li, J., *et al*. (2021) High Arsenic Levels in Sediments, Jianghan Plain, Central China: Vertical Distribution and Characteristics of Arsenic Species, Dissolved Organic Matter, and Microbial Community. *Journal of Geochemical Exploration*, **228**, Article 106822. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106822

[9] Zheng, T., Deng, Y., Wang, Y., Jiang, H., Xie, X. and Gan, Y. (2020) Microbial Sulfate Reduction Facilitates Seasonal

Variation of Arsenic Concentration in Groundwater of Jianghan Plain, Central China. *Science of The Total Environment*, **735**, Article 139327. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139327

[10] 袁晓芳, 李林倩, 张彦鹏, 等. 江汉平原地下水中甲基砷的富集过程: 碳同位素与溶解性有机质三维荧光光谱的指示[J]. 地球科学, 2024, 49(11): 3917-3929.

[11] Lan, Y., He, Y., Yu, Q. and Song, Q. (2025) Delineating Sources of Groundwater Recharge in an Arsenic-Affected Aquifer in Jianghan Plain Using Stable Isotopes. *Hydrological Processes*, **39**, e70050. https://doi.org/10.1002/hyp.70050

[12] Duan, Y., Schaefer, M.V., Wang, Y., Gan, Y., Yu, K., Deng, Y., *et al*. (2019) Experimental Constraints on Redox-Induced Arsenic Release and Retention from Aquifer Sediments in the Central Yangtze River Basin. *Science of The Total Environment*, **649**, 629-639. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.205

[13] Deng, Y., Zheng, T., Wang, Y., Liu, L., Jiang, H. and Ma, T. (2018) Effect of Microbially Mediated Iron Mineral Transformation on Temporal Variation of Arsenic in the Pleistocene Aquifers of the Central Yangtze River Basin. *Science of The Total Environment*, **619**, 1247-1258. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.166

[14] 鲁宗杰, 邓娅敏, 杜尧, 等. 江汉平原高砷地下水中 DOM 三维荧光特征及其指示意义[J]. 地球科学, 2017, 42(5): 771-782.

[15] Yu, K., Gan, Y., Zhou, A., Liu, C., Duan, Y., Han, L., *et al*. (2018) Organic Carbon Sources and Controlling Processes on Aquifer Arsenic Cycling in the Jianghan Plain, Central China. *Chemosphere*, **208**, 773-781. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.188

[16] Yang, Y., Yuan, X., Deng, Y., Xie, X., Gan, Y. and Wang, Y. (2020) Seasonal Dynamics of Dissolved Organic Matter in High Arsenic Shallow Groundwater Systems. *Journal of Hydrology*, **589**, Article 125120. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125120

[17] Ye, H., Yang, Z., Wu, X., Wang, J., Du, D., Cai, J., *et al*. (2017) Sediment Biomarker, Bacterial Community Characterization of High Arsenic Aquifers in Jianghan Plain, China. *Scientific Reports*, **7**, Article No. 42037. https://doi.org/10.1038/srep42037

[18] 高杰, 郑天亮, 邓娅敏, 等. 江汉平原高砷地下水原位微生物的铁还原及其对砷释放的影响[J]. 地球科学, 2017, 42(5): 716-726.

[19] 徐雨潇, 郑天亮, 高杰, 等. 江汉平原浅层含水层中土著硫酸盐还原菌对砷迁移释放的影响[J]. 地球科学, 2021, 46(2): 652-660.

[20] Gao, J., Zheng, T., Deng, Y. and Jiang, H. (2021) Microbially Mediated Mobilization of Arsenic from Aquifer Sediments under Bacterial Sulfate Reduction. *Science of The Total Environment*, **768**, Article 144709. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144709

[21] 张振超, 梁莹, 许洁, 等. 高砷地下水中氮循环对砷释放过程的影响[J]. 地球科学, 2024, 49(9): 3428-3439.

[22] Xu, Y., Liu, D., Yuan, X., Yang, Y., Li, T., Deng, Y., *et al*. (2024) Deciphering the Spatial Heterogeneity of Groundwater Arsenic in Quaternary Aquifers of the Central Yangtze River Basin. *Science of The Total Environment*, **929**, Article 172405. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172405

[23] Huang, K., Liu, Y., Yang, C., Duan, Y., Yang, X. and Liu, C. (2018) Identification of Hydrobiogeochemical Processes Controlling Seasonal Variations in Arsenic Concentrations within a Riverbank Aquifer at Jianghan Plain, China. *Water Resources Research*, **54**, 4294-4308. https://doi.org/10.1029/2017wr022170

[24] Zhang, Y., Yu, Q., Shi, C., Li, P. and Niu, H. (2023) Environmental Isotopes and Cl/Br Ratios Evidences for Delineating Arsenic Mobilization in Aquifer System of the Jianghan Plain, Central China. *Journal of Earth Science*, **34**, 571-579. https://doi.org/10.1007/s12583-020-1096-1

[25] Qiu, W., Ma, T., Du, Y., Zheng, B., Peng, Z., Shang, R., *et al*. (2025) Inhomogeneous Porewater Geochemistry in Unconsolidated Argillaceous Sediments: Implications for Porewater Extraction Protocols and Characterization of Solute Mobilization. *Chemical Geology*, **685**, Article 122813. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2025.122813

[26] Qiu, W., Du, Y., Ma, T., Liu, W., Liu, Y., Bu, X., *et al*. (2026) Impact of Argillaceous Sediment Consolidation on Groundwater Quality Evolution: New Insights from Numerical Simulations of Porewater and Solute Release. *Journal of Hydrology*, **674**, Article 135466. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2026.135466

[27] Liu, S., Li, C., Bundschuh, J., Gao, X., Li, H., Shi, W., *et al*. (2026) The Potential Role of Groundwater Microplastics on Arsenic Cycling in Alluvial Aquifers: Insights from Links of DOM Characteristics and Microbial Community. *Environmental Pollution*, **407**, Article 128821. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2026.128821

[28] Yu, H., Ma, T., Du, Y., Shen, S. and Han, Z. (2022) Distribution, Bioavailability, and Human Health Risk Assessment of Arsenic in Groundwater-Soil-Rice System in the Jianghan Plain, Central China. *Environmental Science and Pollution Research*, **29**, 16193-16202. https://doi.org/10.1007/s11356-021-16497-4

[29] Xiao, T., Muhammad, A.M., Pan, X., Wang, Y., Guangming, H. and Tang, Z. (2022) Spatial Distribution and Risk

Identification of Arsenic Contamination in Water and Soil through Gis-Based Interpolation Techniques in Jianghan Plain, Central China. *Frontiers in Environmental Science*, **10**, Article ID: 1001862. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1001862

[30] Fan, R., Deng, Y., Du, Y. and Xie, X. (2024) Predicting Geogenic Groundwater Arsenic Contamination Risk in Floodplains Using Interpretable Machine-Learning Model. *Environmental Pollution*, **340**, Article 122787. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122787

[31] Luo, J., Ma, X., Ji, Y., Li, X., Song, Z. and Lu, W. (2023) Review of Machine Learning-Based Surrogate Models of Groundwater Contaminant Modeling. *Environmental Research*, **238**, Article 117268. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117268

[32] Xu, R. and Zhang, D. (2024) Forward Prediction and Surrogate Modeling for Subsurface Hydrology: A Review of Theory-Guided Machine-Learning Approaches. *Computers & Geosciences*, **188**, Article 105611. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2024.105611