https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.146



地表水-地下水相互作用对砷在浅层 地下水系统中运移的影响

余 倩1,张 宇2,董 听1,吴光伟3,李 平1

1. 中南民族大学资源与环境学院,湖北武汉 430074

2. 葛洲坝水务(天津)有限公司,天津 300356

3. 山东省国土空间生态修复中心,山东济南 250014

摘 要:地表水-地下水(SW-GW)相互作用对砷在浅层地下水系统中的运移至关重要,但其模式和强度对地下水中 砷运移的影响尚不清楚.本文针对江汉平原仙桃市沙湖原种场野外地下水三维监测试验场,开展野外监测和三维地下 水数值模拟.结果发现雨季地表水补给地下水,SW-GW相互作用强度较大,地下水砷浓度升高;旱季地下水补给地表 水,SW-GW相互作用强度减弱,地下水砷浓度降低.SW-GW相互作用模式与强度的季节转变导致地下水流速和流向 产生季节响应.模型估算出雨季和旱季地面以下10~25 m最大垂向砷交换量分别为457.2 mg/d、191.3 mg/d,地面以下 28 m处水平砷交换量分别为4 380.0 mg/d、1 385.6 mg/d.

关键词:地表水;地下水;砷;地下水流模型;江汉平原;环境工程.
中图分类号: P66
 文章编号: 1000-2383(2023)09-3420-12

收稿日期: 2022-04-15

Effect of Surface Water-Groundwater Interaction on Arsenic Transport in Shallow Groundwater of Jianghan Plain

Yu Qian¹, Zhang Yu², Dong Ting¹, Wu Guangwei³, Li Ping¹

1. College of Resources and Environmental Science, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China

2. Gezhouba Water Service Tianjin Co., Ltd., Tianjin 300356, China

3. Shandong Provincial Space Ecological Restoration Center, Jinan 250014, China

Abstract: Surface water-groundwater (SW-GW) interaction is critical for arsenic transport in shallow groundwater systems, but the role of its pattern and intensity on arsenic transport remains unclear. Field monitoring and numerical simulation were employed to identify the impact of surface water-groundwater interaction mode and intensity on arsenic transport in shallow groundwater of Shahu field site, Jianghan Plain. The results indicate that the surface water recharged into groundwater and had a relatively stronger intensity in the rainy season, which led to the higher arsenic concentration, and vice versa. The seasonal shift of surface water-groundwater interaction mode and intensity could cause the seasonal response of groundwater flow velocity and direction. It is estimated by the numerical simulation that the maximum vertical exchange mass of arsenic is 457.2 mg/d in rainy season and 191.3 mg/d in dry season and the maximum horizontal exchange mass of arsenic is 4 380.0 and 1 385.6 mg/d in rainy and dry season, respectively.

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(No. 41702245);中央高校基本科研业务费专项资金项目(No. CZQ21013).

作者简介:余倩(1986-),女,讲师,博士,主要从事地表水-地下水相互作用、地下水污染修复、溶质运移与化学反应的数值模拟等领域的研究.ORCID:0000-0002-6094-6354. E-mail: yuqian308@126.com

引用格式:余倩,张宇,董听,吴光伟,李平,2023.地表水-地下水相互作用对砷在浅层地下水系统中运移的影响.地球科学,48(9):3420-3431. **Citation:**Yu Qian, Zhang Yu, Dong Ting, Wu Guangwei, Li Ping, 2023. Effect of Surface Water-Groundwater Interaction on Arsenic Transport in Shallow Groundwater of Jianghan Plain. *Earth Science*, 48(9):3420-3431.

Key words: surface water; groundwater; arsenic; groundwater flow model; Jianghan Plain; environmental engineering.

0 引言

砷是国际公认的环境中危害性最大的致癌物 之一.目前全球大约有0.94~2.2亿人暴露在高砷 地下水地区(Singh et al., 2015; Podgorski and Berg, 2020),主要分布在孟加拉、柬埔寨、印度、中 国、墨西哥、智利、美国、阿根廷、越南、巴基斯坦、 尼泊尔等(Fendorf et al., 2010; Guo et al., 2014; Jha and Tripathi, 2021).中国约563万人受饮用高 砷地下水的影响,主要分布在山西、内蒙古、宁夏、 新疆、陕西和台湾地区(杨素珍等, 2008).以上地 区大多分布在西北部、西部干旱-半干旱环境脆弱 带,地表水资源匮乏,地下水资源被大量开采利 用.对于降雨充沛、江河环绕的江汉平原,近些年 高砷地下水问题也备受关注(陈兴平等, 2007).

地下水流动过程对高砷地下水的形成具有重 要影响.地下水水动力特征不同,其水化学特征也 不相同.近年来,越来越多的学者提出浅部沉积物 中砷的迁移释放受到地表水文过程和地下水流的 影响,水文过程与砷的运移密切相关(van Geen et al., 2008; Khan et al., 2016; Radloff et al., 2017). 造成地下水水动力特征变化的一个重要过程是地 表水与地下水(SW-GW)之间的相互作用.地表水 与地下水相互作用过程中,地表水位的波动必然导 致地下水流场的变化;同时,地表水与邻近含水层 之间的水量交换,不仅影响含水层的水化学组分, 而且影响地表水体的水化学组分(宋献方等,2007). 地表水与地下水相互作用过程中,影响砷在地下水 系统中运移的一个重要因素为:地表水-地下水相 互作用会改变地下水流动模式,调控地表水体和地 下水体的物理化学参数(Simpson and Meixne, 2012),加速砷的溶出或稀释砷的浓度.然而,地表 水-地下水相互作用具有明显的时空变化特征,既 表现为地下水补给地表水或地表水补给地下水,又 可表现为不同的作用强度(Xie et al., 2016).因此, 地表水-地下水相互作用的模式和强度不同,对应 砷在地下水系统中的运移过程也不同.定量刻画砷 在地下水系统运移过程中所受地表水-地下水相互 作用模式和强度的影响,数值方法被认为是最经 济、最有效的手段之一(Larsen et al., 2008; Sathe and Mahanta, 2019).前人针对江汉平原高砷地下水 的研究主要涉及高砷地下水水化学特征及演化 (Gan et al., 2014)、高砷地下水形成的主控因素 (Schaefer et al., 2016; Zheng et al., 2020)、地下水 流场变化对砷运移的影响(Duan et al., 2015; Gan et al., 2018)等.地表水-地下水相互作用模式和强 度对砷在地下水中运移影响的定量研究并未开展.

因此,本文以江汉平原仙桃市沙湖原种 场野外地下水三维监测试验场为研究区,利 用野外监测和室内模拟相结合的方法,定量 刻画不同地表水-地下水相互作用模式与强 度条件下砷在地下水系统中的运移规律.

1 研究区概况

江汉平原位于湖北省中南部,是由长江和汉 江冲积而成的平原.属亚热带季风气候,年降水 量约1 208 mm,集中在 6~8 月,年蒸发量约 1 379 mm, 年平均气温 16.9 ℃. 地层以第四系为 主,由上更新世(Q_b³)或全新世(Q_b)冲积和湖相 沉积物组成(Gan et al., 2014).根据地下水埋藏 条件、水动力特征和深度的不同,地下水系统可 划分为两大主要含水岩组:孔隙潜水含水岩组和 孔隙承压含水岩组.孔隙潜水含水岩组广泛分布 于江汉平原低平原中部区,含水岩性为亚砂土、 砂、淤泥质黏土等,透水性能较差,水位埋深0.5~ 2.0 m,含水层厚度约18~20 m,局部与地表水相 通.孔隙承压含水岩组分布面积较大,岩性主要为 淤泥质粉砂和砂,普遍含有较高量淤泥,夹有黏土 透镜体,其中粘土中包含有砾石,厚度约50~ 103 m,主要由上部孔隙潜水与周边侧流渗透补给.

沙湖试验场建于 2011年11月,位于江汉平原 东部,汉江下游南岸,共布设地下水监测点位12个 (图 1a).每个监测点设置 3个不同深度的监测井,分 别位于地面以下 10、25和 50 m.10 m和 25 m监测井 采用 Geoprobe 6620DT 钻机进行中空螺旋钻进成 井,50 m监测井采用泥浆钻进成井.地面以下 0~ 18 m为孔隙潜水含水层,主要岩性为黏土与粉质黏 土;18~50 m为孔隙承压含水层,主要岩性为细砂 和中粗砂(图 1b).东荆河、通顺河、屡丰河、奎阁河 及众多湖泊为研究区主要的地表水系,影响着地下 水的补给、径流与排泄,雨季地下水主要接受大气



降水和地表水的补给,通过蒸发排泄或向邻 单元格排泄;旱季地下水主要接受周边侧流 的渗透补给,向地表水体侧向排泄和向邻单 元格排泄以及抽水灌溉.地下水流的季节变 化对地下水砷浓度的变化产生显著影响.沙 湖试验场的详细描述见邓娅敏等(2015).

2 研究方法

2.1 水位监测

2018年10月至2020年10月,采用Leverlogger自动水位监测计(Solinst Levelogger, Model 3003,加拿大)对SY03、SY06、SY09、SY11四个 监测点位的不同深度监测井进行历时两年的水 位连续监测.同时放置一个相同型号的大气压力 监测探头于试验场SY02附近居民屋顶,用于实 时监测大气压力变化.所有监测探头的记录时间 间隔为6h,大气压力探头监测数据用于校正地 下水水位,水位以海拔高程单位(mASL)表示.

2.2 样品采集与测试

分别于2019年8月与2020年11月利用蠕动泵 以800 mL/min的速率采集地表水和地下水样品 (包括地面以下10、25和50 m监测井).采样前需对 监测井连续抽水约10 mins以获取新鲜水样.为除 去水样中的各种悬浮物,所有样品在现场均通过 0.45 μm滤膜,然后分成3份.第1份水样加入一滴 优级纯HCl,储存在100 mL干净的PET瓶中,并用 锡箔纸包裹,用于总碳和TOC分析;第2份水样不 加任何试剂直接保存在100 mL PET瓶中,用于主 要阴离子的分析;第3份水样加入优级纯硝酸至水 样的 pH<2.0,装在100 mL PET瓶中,用于总砷含



Fig.2 Sketch of model domian a.为平面示意;b.为剖面*A-A*'示意

量、主要阳离子和微量元素的分析.同时,采集 100 mL未经任何处理的水样装入干净的PET 瓶中,确保瓶中无气泡产生,用于氢氧稳定同位 素的测定;再采集500 mL未过滤水样用于碱度 分析.碱度在采样后24 h内采用酸式滴定法测 定,其他化学指标的测试在样品采集后一周之 内完成.所有样品均在4℃条件下冷藏保存.

利用便携式水质分析仪(HQ40D Field Case, HACH, USA) 现场测定地下水温度(T)、ORP、 pH、电导率(EC)、溶解氧(DO)等水质参数:利用便 携式分光光度计(HACH DR2010)现场测定水样中 氧化还原敏感元素(HS^- 、 Fe^{2+} 、 NH_4^+ -N、 NO_3^-)的含 量;阳离子的测定采用电感耦合等离子体原子发射 光谱(ICP-OES)(PerkinElmer Avio200,美国),分 析误差为±5%;阴离子的测定采用离子色谱(IC) (ics-2100, Thermo Fisher Scientific, 美国); 总溶解 砷浓度采用原子荧光光谱法(KDR-AFS1101Z,中 国)测定,检测限为1µg/L;总有机碳采用总有机碳 氮分析仪(Multi N/C 3100,德国)测定;微量元素采 用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)(PerkinElmer FLEXAR NEXION300X)进行测定.ICP-OES 和 ICP-MS 的平均分析误差均小于±10%. 稳定氢 氧同位素的组成采用水同位素分析仪(LGR, IWA-45EP,美国)进行分析,δ¹⁸O和δD值是相对于使用 V-SMOW 校准的内标物确定的,同位素组成以标 准 δ 表示法表示,表示与 V-SMOW 标准的千分之 差,δ¹⁸O 和 δD 的误差分别为±0.2‰ 和±0.6‰.主 量元素与 TOC 的分析在中南民族大学湖北重金 属污染控制工程技术中心进行;微量元素的分析 在中南民族大学武汉市催化与能源材料化学教育 部重点实验室完成;δ¹⁸O 和 δD 的分析在中国地质 大学生物地质与环境地质国家重点实验室完成.

2.3 数值模拟

本研究应用 MODFLOW 软件(McDonald and Harbaugh, 1988)建立沙湖试验场三维饱和非稳定 地下水流模型.模拟区范围选定为5.5 km(X方向) 长、5.0 km(Y方向)宽、50 m(Z方向)厚(图 2a),并 剖分为100列(X方向)、100行(Y方向)、9层(Z方 向)(图 2b),共90000个单元格.模型的4个侧边边 界定义为河流边界;底部边界定义为隔水边界;顶 部边界定义为净补给边界,由降水量减去蒸发量而 得.受条件所限,4条河流(通顺河、东荆河、屡丰 河、奎 阁河)水位数据参考 Du et al.(2018)和 Schaefer et al.(2016).四条河流河床底的高程 约为17~19 m,与地下水之间存在水力联系.

研究区的含水介质为细砂和中砂,隔水介质为 粉质粘土,地层岩性的空间分布较为均匀,因此孔 隙介质的渗透系数、孔隙度和给水度的初始值可以 参考经验值(表1),垂向上的渗透系数为水平方向 上的0.1倍,渗透系数K作为非稳定模型校正过程

表 I 地下水流模型中的水刀字参数表 Table 1 Hydraulic properties of aquifers used in model simulations					
	(m/d) ^a (初始值)	(m/d)(校正值)	$S_{\mathrm{s}}(\mathrm{S}^{-1})^{\mathrm{b}}$		
粉土	0.13/0.13	0.13/0.10	5×10^{-4}	0.21	0.51
砂	6.74/0.74	6.74/0.74	1×10^{-4}	0.07	0.40

注:^a引自Du et al.(2018);^b引自郭欣欣(2014);^c引自Healy and Cook(2002);^d引自Schaefer et al.(2016).



图 a 为河流水位,参考 Schaefer et al.(2016)

中最主要的参数.反复调节粉土、粘土和砂的 渗透系数,直到计算的地下水头与实际观测的 地下水头拟合效果最佳为止.

结果与讨论 3

3.1 地表水-地下水相互作用模式的识别

图 3 为地表水与地下水水位随时间变化序 列,从图3可看出,地表水与地下水水位季节性 响应明显,雨季(6~8月)水位升高,旱季(11至来 年2月)水位下降,河流最大水位差可达5m.屡丰 河因出现断流,形成多个无流动池塘,故而水位基 本保持一致且高于地下水位.10m监测井雨季和 旱季水位波动范围分别为21.8~23.2 m、20.3~ 22.8 m, 且靠近屡丰河监测井的水位(SY11)比 远离屡丰河监测井(SY03、SY06和SY09)的要 高. 25 m 和 50 m 监测井水位变化趋势与 10 m 监测井总体一致,但其水位低于10m监测井.

地表水与地下水水位的瞬时变化可用来识别 SW-GW相互作用模式.从地表水与地下水水位差 (d)的时间波动规律(图4a)可看出,雨季 d>0,指示 地表水补给地下水;旱季 d<0,指示地下水补给 地表水.此外,由垂直水力梯度随时间变化(图 4b)可知,10~25m含水层间的平均垂直水力梯度 均大于零(0.063~0.133),表明地下水流向始终垂 直向下,且其大小随季节波动明显.雨季河流水位 上升,地下水水位随之上升,10~25m垂直水力梯 度增大;反之,旱季河流水位下降,地下水水位亦 降低,垂直水力梯度减小.通顺河与25m含水层 之间的平均垂直水力梯度随季节呈正负交替,负 的最大值出现在旱季(1~3月,平均为-0.223), 正的最大值出现在雨季(7~9月,平均为0.158), 说明雨季和旱季 SW-GW 相互作用模式存在季节 性交替现象.以上结果均表明雨季呈现地表水补 给地下水的模式,旱季呈现地下水补给地表水的模 式.同时,平均垂直水力梯度的季节性变化暗示了 雨季SW-GW相互作用比旱季具有更高的强度.

3.2 地表水-地下水相互作用强度的估算

氢氧稳定同位素可被有效用来定量估算地表 水-地下水相互作用强度.从氢氧稳定同位素的季 节变化(图5)可看出:雨季和旱季所有地下水样品 均落在当地大气降水线(LMWL)(赵家成等,2009)



图4 平均地表水水位与地下水水位之差(a);平均水力梯度(b),黑色为通顺河与监测井SY05、SY06、SY11在25m深度处的 垂直水力梯度变化;红色为监测井SY03、SY06、SY09、SY11在10~25m的垂直水力梯度变化

Fig.4 Difference between surface water and groundwater level (a); the vertical hydraulic gradient between the Tongshun River and three adjacent monitoring wells SY05, SY06, SY11 (red circle) and between 10 m and 25 m of wells SY03, SY06, SY09, SY11(black rectangle) (b)







Fig.5 Stable hydrogen-oxygen isotope signatures of surface water, groundwater and precipitation in rainy season (a) dry season (b)

附近,指示地下水的大气降水来源.地表水的 δ^{18} O 与 δ^{2} H值(雨季降水和池塘水的 δ^{18} O 与 δ^{2} H值(豪季降水和池塘水的 δ^{18} O 与 δ^{2} H值(豪季降水和蒸发线附近,表明地表水主 要受大气降水和蒸发的影响.雨季10 m 监测井的 δ^{18} O 与 δ^{2} H值(平均值分别为-5.96‰、-37.11‰) 比25 m(平均值分别为-6.84‰、-43.30‰)和50 m (平均值分别为-6.74‰、-42.35‰)的高,靠近河 流的监测井更为明显,表明地表水-地下水相互作 用频繁,尤其是浅层地下水.与雨季不同,旱季25 m 监测井的 δ^{18} O 与 δ^{2} H值(平均值分别为-7.40‰、 -47.10‰)比10 m(平均值分别为-7.70‰、 -50.48‰)和50 m(平均值分别为-7.76‰、 -50.29‰)的高,指示旱季25 m地下水可能接受了 其他具有高强度蒸发能力水的补给(已在另 一篇待发表文章中讨论).

根据质量守恒定律,可定量估算地下水排泄至 河流中的比例,其质量守恒方程式为: $C_s \cdot Q_s = C_g \cdot Q_g + C_b \cdot (Q_s - Q_g);$ 式中 C_s 为河水监测点中 δ^{18} O的 值, C_b 为河流上游水中 δ^{18} O的值(参考Du et al., 2018), C_g 为监测点地下水中 δ^{18} O的值, Q_g 为地下水 排泄量, Q_s 为取样点河水流量(叶人源,2015).据上 式可推导出地下水排泄量占河水流量的百分比式: $f = (Q_g/Q_s) \cdot 100\% = (C_s - C_b)/(C_g - C_b) \cdot 100\%$.结 合雨季和旱季地表水与地下水的稳定氢氧同位素 组成,可分别算出雨季和旱季地下水排泄量占河水 流量的百分比f(图 6).从图6可知,雨季的f值均小



图6 地下水排泄量占河水流量百分比(f)的垂向分布

Fig. 6 Vertical distribution of groundwater discharge as a percentage of river flow (*f*)

于旱季(雨季10m、25m和50m的f均值分别为 7.2%、0.9%和25.6%,旱季10m、25m和50m的f 均值分别为38.0%、35.8%、51.0%),其原因是相比 于旱季,雨季地下水水位更高,河水流量更大,地表 水大量入渗补给地下水,因此地下水排泄量占河水 流量的比例较小.对比不同深度f值的分布,可看出 50 m含水层的f值最大(平均38.3%),25 m含水层 的f值次之(平均28.4%),10 m含水层的f值最小 (平均22.6%).这表明SW-GW相互作用对浅层地 下水的影响最显著.从图6中还可看出,不同位置 处,f值差异较大,表明SW-GW相互作用强度空间 变化显著.雨季地表水强烈补给地下水,10 m监 测井的f值均较小,25 m和50 m监测井的f值大多 较小、少部分监测井(SY06和SY07)稍大;而旱季 地下水补给地表水,10 m、25 m和50 m监测井的f 值均在空间上差异较大,SY09的f值最大,说明此 处地下水补给强烈,SY11的f值最小,是因为该 井位于屡丰河附近,而屡丰河水位始终高于地 下水位,因此该井位处始终接受地表水的补给.

3.3 数值模拟

3.3.1 模型校正 反复调节渗透系数,当粉土的水



Fig.7 Calibration results of groundwater flow model a. SY03;b. SY06;c. SY09;d. SY11;测点后面的字母:A表示浅层(即10m);B表示中层(即25m)

平、垂向渗透系数由 0.13 m/d、0.13 m/d 调整为 0.13 m/d、0.10 m/d时,模型计算水位与监测水位的 拟合效果最佳(图 7).从4个监测点位(SY03、SY06、SY09和SY11)的8个监测井孔(每个点位两个监测井,深度分别为10 m和 25 m)的拟合结果可看出:大部分监测井的拟合效果较好,且 25 m监测井的拟合效果优于10 m 监测井的.10 m 监测井的模型计算水位普遍比监测水位低 0.1~0.3 m,这是由于模型参数或边界存在整体误差所导致的.

3.3.2 地下水流速 图8展示了地面以下8m(Z= 18.5 m)和38 m(Z=-13.5 m)深度处,旱季(1月) 和雨季(8月)地下水流速和流向的季节变化.地下 水流速和流向随季节变化明显,雨季粉土层地下水 流速(最大水平地下水流速 V_{max}=0.0026 m/d)较砂 层小(V_{max}=0.18 m/d),垂向最大流速为0.006 4 m/ d;旱季地下水流速明显比雨季小(粉土层最大水平 地下水流速 $V_{max} = 0.0021 \text{ m/d}$, 砂层 $V_{max} = 0.1 \text{ m/d}$ $d, 垂向最大流速 V_{max} = 0.0064 \text{ m/d}$,这表明地表水 位的季节变化显著影响地下水流速的季节变化,雨 季更为明显.而地下水流速的变化直接反映SW-GW相互作用强度的变化,即雨季SW-GW相互作 用强度大,旱季SW-GW相互作用强度小.另外,距 离河岸50m以内,地下水水平流速较大,方向多变 且不均匀;距离河岸较远的单元,水平地下水流速 变小且相对均匀,说明越靠近河流,地下水受地 表水的影响越明显,SW-GW相互作用强度越大.

3.3.3 地下水流净交换量 通过模型可计算出相 邻两层含水层之间的净交换量(图9a),笔者发 现整个模拟期,净交换量方向始终垂直向下, 且雨季增加,旱季减小.随深度增加,垂向净交 换量逐渐减小,这是因为随深度增加,含水层 的垂向补给逐渐减小.X=2 km处,A-A'剖面 水平净交换量随季节波动明显(图9b),雨季增 加,旱季减小.对比水平净交换量和垂直净交 换量可发现,深层含水层水平净交换量远高于 垂向净交换量,故深层含水层以水平交换为主.

结合模型计算的垂直净交换量与实测的地下 水砷浓度,可大致估算出砷的垂直交换量.因L1-L3 及L4-L7的岩性相同(L1-L7指模型中含水层的垂 向分层),因此本文仅估算了L1-L4和L4-L6的砷垂 向交换量.雨季L1-L4、L4-L6的最大垂直净交换量 分别为9.8 m³/d、4.5 m³/d,对应深度处地下水砷浓 度的均值分别为46.5 µg/L和217.9 µg/L,由此可估 算 L1-L4、L4-L6最大砷交换量分别为 457.2 mg/d、 979.6 mg/d;旱季 L1-L4、L4-L6最大垂直交换量分 别为 4.4 m³/d 和 2.2 m³/d,地下水砷平均浓度分别 为 43.9 μg/L 和 119.9 μg/L,得到 L1-L4、L4-L6 砷交 换量分别为 191.3 mg/d 和 264.2 mg/d.同理可计算 出 L5-L7 砷的水平交换量 . *X*=2 km 位置处,雨季和 旱季地下水最大水平交换量分别为 9.5 m³/d、 6.4 m³/d,方向均指向通顺河;雨季和旱季对应位置 砷平均浓度分别为 459.8 μg/L 和 82.5 μg/L、 217.5 μg/L 和 83.3 μg/L,可估算出雨季 L5、L7 的砷 水平交换量分别为 4 374.0 mg/d和 786.2 mg/d;旱季分 别为1 385.6 mg/d和 530.5 mg/d,水平流向指向通顺河. **3.4 地表水-地下水相互作用模式与强度对砷** 运移的影响

据上述分析可知,雨季河流水位快速上升,高 于地下水位,河流侧向补给地下水,地表水-地下水 相互作用强度大;而旱季河流水位下降明显,低于 地下水位,地下水侧向补给河流,地表水-地下水相 互作用强度减弱.地表水-地下水相互作用模式与 强度的季节性转变影响砷在地下水中的运移.沙湖 试验场地表水和地下水中均富含溶解性有机质 (DOM, 地下水 DOM 平均值为 4.4 mg/L, 河流 DOM平均值为4.9 mg/L)(Yang et al., 2020),池塘 TOC平均值为3.4 mg/L.在微生物参与下,有机质 被氧化提供电子,促使SO42~、NO3~等发生还原(Islam et al., 2005; 王晶等, 2021; 徐雨潇等, 2021).试 验场地下水中SO42-、NO3-含量较低(平均值分别为 22.8 mg/L、2.5 mg/L), 而 HS⁻、NH₄⁺-N 含量很高 (平均值分别为21.3 µg/L、2.7 mg/L),充分表明地 下水的强还原条件以及含水层中普遍存在 SO42-、 NO3⁻的还原.学者普遍认为铁(氢)氧化物通过吸附 或共沉淀而成为含水层沉积物中的主要固砷矿物 (Swartz et al., 2004; Currell et al., 2011), 且铁(氢) 氧化物是江汉平原含水层中的主要固砷矿物(Duan et al., 2019; Yang et al., 2020).因此,雨季当地表水 (河流、湖泊、灌溉水)入渗补给含水层时,大量氧气 和新鲜有机质会被携带至含水层中,有机质被氧 化,溶解氧浓度降低至消耗殆尽,含水层还原性增 强,促使铁锰(氢)氧化物发生还原溶解,释放出其 表面上吸附的砷至地下水中,导致地下水中砷浓度 增加(图 10a)(雨季地下水砷浓度平均为 102 μg/L, 最高达1055 µg/L).此外,较大的地表水-地下水相 互作用强度(图6)会加速铁锰(氢)氧化物的还原溶



图8 Z=18.5 m和Z=-13.5 m深度处水平地下水流速特征((a)(c)为旱季,(b)(d)为雨季)以及X=1255 m处含水层垂直流 速分布特征((e)为旱季,(f)为雨季)

Fig.8 Distribution of horizontal groundwater velocity at the depth of 18.5 and -13.5 m below the ground surface, respectively ((a) (c) and (b) (d) stand for the dry and rainy season, respectively) and vertical groundwater velocity at X=1255 m ((e) and (f) stand for the dry and rainy season, respectively)





Fig. 9 Net exchange of groundwater flow

a. 各层之间的垂直水流净交换量,正值表示垂直向下,负值表示垂直向上;b. X=2 km处, A-A'剖面水平流交换量,正值表示方向指向通顺河, 负值表示方向指向东荆河



图 10 雨季(a)和旱季(b)时的地下水砷运移机理概化图 Fig.10 Conceptual map of arsenic transport in aquifers during the rainy (a) and dry season (b)

解及砷的释放,促进砷的迁移;然而,旱季随 地下水位下降,浅层地下水中溶解氧浓度升 高,含水层还原能力减弱,微生物活性下降, 使得砷被固定在铁(氢)氧化物表面上,地下 水中砷浓度降低(图10b)(旱季地下水砷的平 均浓度为75 μg/L),而且较弱的地表水-地下 水相互作用强度会减缓砷的释放及迁移.

4 结论

本文以江汉平原仙桃市沙湖原种场野外地 下水三维监测试验场为研究区,通过野外监测 和室内模拟,刻画 SW-GW 相互作用模式与强 度对砷在浅层地下水系统中运移的影响.结果 表明:SW-GW 相互作用模式发生季节性变化, 表现为雨季地表水补给地下水,旱季地下水补 给地表水,SW-GW 相互作用模式的转变使得 地下水流场发生改变;质量守恒结果显示雨季 地下水排泄量占河水流量的百分比小于旱季, 表明雨季具有更强的SW-GW相互作用强度; 地下水流速季节性响应明显,最高出现在8月 份,最低出现在2月份,地下水流速的季节性波 动间接表明SW-GW相互作用强度的季节性变 化;雨季地表水补给地下水,且补给强度较大, 促进铁锰(氢)氧化物的还原溶解及砷的释放, 导致地下水中砷浓度增加;旱季地下水补给地 表水,且补给强度减弱,促使砷被固定在铁 (氢)氧化物表面上,使得地下水中砷浓度降 低;模拟算得雨季10~25 m的最大垂向砷交换 量(457.2 mg/d)是旱季(191.3 mg/d)的两倍有 余.雨季 L5、L7 水平交换量(4 380.0 mg/d、 1385.6 mg/d)远高于旱季(786.2 mg/d、530.5 mg/d).

致谢:感谢匿名审稿专家提出的有益建议!

References

- Chen, X. P., Deng, Y. H., Zhang, Y. Z., et al., 2007. The Epidemiological Survey and Analysis to Arsenism in Nanhong Village of Plain Hubei Province. *Chinese Jour*nal of Control of Endemic Diseases, 22(4): 281-282 (in Chinese with English abstract).
- Currell, M., Cartwright, I., Raveggi, M., et al., 2011. Controls on Elevated Fluoride and Arsenic Concentrations in Groundwater from the Yuncheng Basin, China. *Applied Geochemistry*, 26(4): 540-552. https://doi. org/ 10.1016/j.apgeochem.2011.01.012
- Deng, Y. M., Wang, Y. X., Li, H. J., et al., 2015. Seasonal Variation of Arsenic Speciation in Shallow Groundwater from Endemic Arsenicosis Area in Jianghan Plain. *Earth Science*, 40(11): 1876-1886 (in Chinese with English abstract).
- Du, Y., Ma, T., Deng, Y. M., et al., 2018. Characterizing Groundwater/Surface-Water Interactions in the Interior of Jianghan Plain, Central China. *Hydrogeology Journal*, 26(4): 1047-1059. https://doi. org/10.1007/ s10040-017-1709-7
- Duan, Y. H., Gan, Y. Q., Wang, Y. X., et al., 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
- Duan, Y. H., Schaefer, M. V., Wang, Y. X., 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
- Fendorf, S., Michael, H. A., van Geen, A., 2010. Spatial and Temporal Variations of Groundwater Arsenic in South and Southeast Asia. *Science*, 328(5982): 1123– 1127. https://doi.org/10.1126/science.1172974
- Gan, Y. Q., Wang, Y. X., Duan, Y. H., et al., 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
- Gan, Y. Q., Zhao, K., Deng, Y. M., 2018. Groundwater Flow and Hydrogeochemical Evolution in the Jianghan Plain, Central China. Hydrogeology Journal, 26(5): 1609-1623. https://doi.org/10.1007/s10040 -018-1778-2
- Guo, H. M., Wen, D. G., Liu, Z. Y., et al., 2014. A Review of High Arsenic Groundwater in Mainland and Tai-

wan, China: Distribution, Characteristics and Geochemical Processes. *Applied Geochemistry*, 41: 196-217. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.12.016

- Guo, X. X., 2014. Arsenic Mobilization and Transport in Shallow Aquifer Systems of Jianghan Plain, Central China (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Healy, R. W., Cook, P. G., 2002. Using Groundwater Levels to Estimate Recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1): 91-109. https://doi.org/10.1007/s10040-001-0178-0
- Islam, F. S., Boothman, C., Gault, A. G., et al., 2005. Potential Role of the Fe(III)-Reducing Bacteria Geobacter and Geothrix in Controlling Arsenic Solubility in Bengal Delta Sediments. Mineralogical Magazine, 69(5): 865– 875. https://doi.org/10.1180/0026461056950294
- Jha, P. K., Tripathi, P., 2021. Arsenic and Fluoride Contamination in Groundwater: A Review of Global Scenarios with Special Reference to India. *Groundwater for Sustainable Development*, 13: 100576. https://doi.org/ 10.1016/j.gsd.2021.100576
- Khan, M. R., Koneshloo, M., Knappett, P. S. K., et al., 2016. Megacity Pumping and Preferential Flow Threaten Groundwater Quality. *Nature Communications*, 7: 12833. https://doi.org/10.1038/ncomms12833
- Larsen, F., Pham, N. Q., Dang, N. D., et al., 2008. Controlling Geological and Hydrogeological Processes in an Arsenic Contaminated Aquifer on the Red River Flood Plain, Vietnam. *Applied Geochemistry*, 23(11): 3099-3115. https://doi. org/10.1016/j. apgeochem.2008.06.014
- McDonald, M. G., Harbaugh, A. W., 1988. A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model. U.S. Geological Survey, Reston.
- Podgorski, J., Berg, M., 2020. Global Threat of Arsenic in Groundwater. Science, 368(6493): 845-850. https:// doi.org/10.1126/science.aba1510
- Radloff, K. A., Zheng, Y., Stute, M., et al., 2017. Reversible Adsorption and Flushing of Arsenic in a Shallow, Holocene Aquifer of Bangladesh. *Applied Geochemistry*, 77: 142-157. https://doi.org/10.1016/j. apgeochem.2015.11.003
- Sathe, S. S., Mahanta, C., 2019. Groundwater Flow and Arsenic Contamination Transport Modeling for a Multi Aquifer Terrain: Assessment and Mitigation Strategies. Journal of Environmental Management, 231: 166-181. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.057
- Schaefer, M. V., Ying, S. C., Benner, S. G., et al., 2016. Aquifer Arsenic Cycling Induced by Seasonal Hydrolog-

ic Changes within the Yangtze River Basin. *Environmental Science & Technology*, 50(7): 3521-3529. https:// doi.org/10.1021/acs.est.5b04986

- Simpson, S. C., Meixner, T., 2012. Modeling Effects of Floods on Streambed Hydraulic Conductivity and Groundwater - Surface Water Interactions. Water Resources Research, 48(2): W02515. https://doi.org/ 10.1029/2011wr011022
- Singh, R., Singh, S., Parihar, P., et al., 2015. Arsenic Contamination, Consequences and Remediation Techniques: A Review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 112: 247-270. https://doi. org/10.1016/j. ecoenv.2014.10.009
- Song, X. F., Liu, X. C., Xia, J., et al., 2007. Study on the Transformation Relationship between Surface Water and Groundwater in Huaisha River Basin Based on Environmental Isotope Technology. *Science in China (Series* D), 37(1): 102-110 (in Chinese with English abstract).
- Swartz, C. H., Blute, N. K., Badruzzman, B., et al., 2004. Mobility of Arsenic in a Bangladesh Aquifer: Inferences from Geochemical Profiles, Leaching Data, and Mineralogical Characterization. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(22): 4539-4557. https://doi.org/10.1016/j. gca.2004.04.020
- van Geen, A., Zheng, Y., Goodbred, S. Jr., et al., 2008. Flushing History as a Hydrogeological Control on the Regional Distribution of Arsenic in Shallow Groundwater of the Bengal Basin. *Environmental Science & Technology*, 42(7): 2283-2288. https://doi. org/ 10.1021/es702316k
- Wang, J., Xie, Z. M., Wang, J., et al., 2021. Influence of Bioreduction of Arsenic-Bearing Goethite by Bacteria under Sulfur Mediation on Migration and Transformation of Arsenic. *Earth Science*, 46(2): 642-651 (in Chinese with English abstract).
- Xie, Y. Q., Cook, P. G., Simmons, C. T., 2016. Solute Transport Processes in Flow - Event - Driven Stream -Aquifer Interaction. *Journal of Hydrology*, 538: 363– 373. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.031
- Xu, Y. X., Zheng, T. L., Gao, J., et al., 2021. Effect of Indigenous Sulfate Reducing Bacteria on Arsenic Migration in Shallow Aquifer of Jianghan Plain. *Earth Science*, 46(2): 652-660 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. Z., Guo, H. M., Tang, X. H., et al., 2008. Distribution of Abnormal Groundwater Arsenic in Hetao Plain, Inner Mongolia. *Earth Science Frontiers*, 15(1): 242-249 (in Chinese with English abstract).

- Yang, Y. J., Yuan, X. F., Deng, Y. M., et al., 2020. Seasonal Dynamics of Dissolved Organic Matter in High Arsenic Shallow Groundwater Systems. *Journal of Hydrol*ogy, 589: 125120. https://doi. org/10.1016/j. jhydrol.2020.125120
- Ye, R. Y., 2015. Interaction of Surface Water and Groundwater in Yili-Gongnaisi River Valley (Dissertation). Chang' an University, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Yu, K., Gan, Y. Q., Zhou, A. G., 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
- Zhao, J. C., Wei, B. H., Xiao, S. B., 2009. Stable Isotopic Characteristics of Atmospheric Precipitation from Yichang, Hubei. *Tropical Geography*, 29(6): 526-531 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, T. L., Deng, Y. M., Wang, Y. X., et al., 2020. Microbial Sulfate Reduction Facilitates Seasonal Variation of Arsenic Concentration in Groundwater of Jianghan Plain, Central China. Science of the Total Environment, 735: 139327. https://doi. org/10.1016/j. scitotenv.2020.139327

附中文参考文献

- 陈兴平,邓云华,张裕曾,等,2007.湖北南洪村饮水砷含量 及砷中毒调查.中国地方病防治杂志,22(4):281-282.
- 邓娅敏, 王焰新, 李慧娟, 等, 2015. 江汉平原神中毒病区地 下水砷形态季节性变化特征. 地球科学, 40(11): 1876-1886.
- 郭欣欣,2014. 江汉平原浅层含水层系统中砷释放与迁移过 程研究(博士学位论文). 武汉:中国地质大学.
- 宋献方,刘相超,夏军,等,2007.基于环境同位素技术的怀 沙河流域地表水和地下水转化关系研究.中国科学(D 辑),37(1):102-110.
- 王晶,谢作明,王佳,等,2021.硫介导细菌还原载砷铁矿对 砷迁移转化的影响.地球科学,46(2):642-651.
- 徐雨潇,郑天亮,高杰,等,2021. 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.地球科学,46 (2):652-660.
- 杨素珍,郭华明,唐小惠,等,2008.内蒙古河套平原地下水 砷异常分布规律研究.地学前缘,15(1):242-249.
- 叶人源,2015.新疆伊犁-巩乃斯河谷地表水与地下水转化 关系研究(硕士学位论文).西安:长安大学.
- 赵家成,魏宝华,肖尚斌,2009.湖北宜昌地区大气降水中 的稳定同位素特征.热带地理,29(6):526-531.