

注入时间和静水压力对孔隙热储层中Cl运移影响

赵丽, 黄尚峥, 张庆, 卢宇灿, 金毅, 王心义, 邢明飞

Effect of injection time and hydrostatic pressure on chloride migration in a porous geothermal reservoir

ZHAO Li, HUANG Shangzheng, ZHANG Qing, LU Yucan, JIN Yi, WANG Xinyi, and XING Mingfei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202206026>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

竹节桩复合地基沉桩施工超孔隙水压力研究

A study of the excess pore water pressure during pile-sinking construction of nodular pile composite foundation

叶俊能, 周晔, 朱瑶宏, 刘干斌 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 103-103

裂隙宽度空间变异性及泄漏条件对网络裂隙中DNAPLs运移影响研究

Effects of spatial variability of fracture width and leakage conditions on the migration of DNAPLs in network fractures

常兴, 骆乾坤, 邓亚平, 马雷, 钱家忠 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 174-181

胶东典型花岗岩热储地下水水化学特征及热储研究

A study of the hydrochemical characteristics and geothermal water of typical granite geothermal reservoir in the Jiaodong area

王晓翠, 孙海龙, 袁星芳 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 186-194

川藏铁路康定隧址区地热水成因及其工程影响分析

An analysis of the genesis and engineering influence of geothermal water in the Kangding tunnel site of the Sichuan-Tibet Railway

张云辉, 李晓, 徐正宣, 常兴旺, 黄, 多吉 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 46-53

西宁盆地地热水特征及回灌结垢风险

Characteristics of geothermal water in the Xining Basin and risk of reinjection scaling

赵振, 秦光雄, 罗银飞, 晁嘉豪, 耿松鹤, 张亮 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 193-204

基于微地震数据的增强型地热储层参数及采热的数值模拟研究

A study of numerical simulations for enhanced geothermal reservoir parameters and thermal extraction based on microseismic data

马子涵, 邢会林, 靳国栋, 谭玉阳, 闫伟超, 李四海 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 190-199



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202206026

赵丽, 黄尚峥, 张庆, 等. 注入时间和静水压力对孔隙热储层中 Cl⁻运移影响 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(2): 189-197.
ZHAO Li, HUANG Shangzheng, ZHANG Qing, et al. Effect of injection time and hydrostatic pressure on chloride migration in a porous geothermal reservoir[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 189-197.

注入时间和静水压力对孔隙热储层中 Cl⁻运移影响

赵 丽^{1,2}, 黄尚峥^{1,2}, 张 庆^{1,2}, 卢宇灿¹, 金 毅¹, 王心义¹, 邢明飞^{1,2}

(1. 河南理工大学资源环境学院, 河南焦作 454000; 2. 陕西省煤矿水害防治技术
重点实验室, 陕西西安 710077)

摘要: 迄今为止, 注入时间和静水压力对溶质在深层承压地热水中的运移规律影响研究少有报道。通过模拟 35 °C 的低温地热环境, 开展了注入时间 1, 2, 3, 4, 5 h 以及静水压力 0, 6, 9 MPa 条件下 Cl⁻的运移柱模拟试验。采用 CXTFIT 2.1 软件进行数值模拟, 探讨了孔隙型热储砂土中 Cl⁻的运移规律和影响因素。结果表明: 在模拟的低温孔隙型热储层中, 不同注入时间和静水压力下, Cl⁻的运移曲线均呈正态对称分布, 一维对流弥散(CDE)模型也可较好地表征其穿透曲线, 因此溶质扩散过程符合菲克定律。注入时间的不同, 会引起 Cl⁻的穿透曲线、运移参数发生变化, 这与不同注入时间条件下溶质注入总量、柱内溶质浓度差以及分子扩散能力不同有关。在不同静水压力条件下, 弥散系数从 0 MPa 的 25.22 cm²/h 增加到 9 MPa 的 36.13 cm²/h, 分子扩散系数、机械弥散系数以及弥散度也随之增大, 因此溶质的弥散作用随静水压力的增大而增强。研究结果对于丰富地下水的溶质运移理论具有重要意义。

关键词: 低温孔隙地热水; 注入时间; 静水压力; 氯离子; 运移规律

中图分类号: P314

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)02-0189-09

Effect of injection time and hydrostatic pressure on chloride migration in a porous geothermal reservoir

ZHAO Li^{1,2}, HUANG Shangzheng^{1,2}, ZHANG Qing^{1,2}, LU Yucan¹, JIN Yi¹,
WANG Xinyi¹, XING Mingfei^{1,2}

(1. Institute of Resources & Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China;
2. Shaanxi Key Laboratory of Prevention and Control Technology for Coal Mine Water Hazard, Xi'an, Shaanxi
710077, China)

Abstract: Few studies have focused on the effects of injection time and hydrostatic pressure on the solute transport in porous geothermal reservoirs to date. The chloride displacement experiments were individually carried out at 35 °C at the injection time of 1 h, 2 h, 3 h, 4 h and 5 h individually through the simulated columns packed with the thermal reservoir fine sand. Column experiments were performed at 35 °C at hydrostatic pressure of 0, 6 and

收稿日期: 2022-06-15; 修订日期: 2022-08-28 投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室开放基金项目(2021SKMS04); 2021年度河南省科技攻关计划项目(212102310502; 212102310061); 2022年度河南省高等学校重点科研项目(22B610002); 河南理工大学博士基金项目(B2022-38); 河南省高校科技创新团队项目(21IRTSTHN007)

第一作者: 赵丽(1977-), 女, 教授, 博士(后), 硕士生导师, 主要从事地下水污染与防治研究。E-mail: zhaoli@hpu.edu.cn

通讯作者: 张庆(1976-), 男, 高级工程师, 博士, 硕士生导师, 主要从事水文地质、工程地质及地热开发利用研究。

E-mail: zhangqing@hpu.edu.cn

9 MPa individually. By using the one-dimensional CDE model in the CXTFIT 2.1 software, the migration law of Cl^- and its influencing factors in the studied matrix were examined. The results show that the Cl^- breakthrough curves under different injection time and hydrostatic pressure are symmetrically distributed, and they can all be well described by the CDE model. Thus, the solute dispersion can conform to the Fick's law in the simulated low-temperature pore geothermal water. The breakthrough curve and transport parameters of Cl^- are highly correlated with the injection time due to the variations of the total amount of solute mass injected, concentration differences and molecular diffusion ability in the studied geothermal water. In addition, the value of D increases from 25.22 cm^2/h at 0 MPa to 36.13 cm^2/h at 9 MPa, combining with the increasing molecular diffusion coefficient, dispersion coefficient and dispersivity with hydrostatic pressure. Hence, the solute hydrodynamic dispersion in the simulated sandy column are enhanced with the increasing hydrostatic pressure. The results are of great significance to enrich the theory of solute transport in groundwater.

Keywords: low temperature pore geothermal water; injection time; hydrostatic pressure; chloride; migration law

自 20 世纪 80 年代起, 深层承压地热水的开采强度持续增加, 导致其长期处于超采状态, 环境地质和水质问题日趋严重, 如局部地区地面沉降、地下水水位下降、深层地热资源枯竭及水质恶化等^[1-4]。除此之外, 地热开采会引起孔隙型热储层中压力、孔隙率、渗透率等参数的变化^[5-6]。探索溶质在深层承压地热水中的运移规律、影响因素及机理, 是深层承压地热水水质研究的重要理论基础, 也是国内外研究的热点问题之一。

为了研究溶质在地下水中的迁移规律, 并获得与其相关的物理化学参数, 国内外学者广泛开展了众多室内外物理模型试验以及建立了一系列的溶质运移理论和模型。在多孔介质溶质运移物理试验方面, 室内柱模拟试验已成为获取含水层重要物理化学参数如孔隙度、弥散度、化学反应速率和吸附解吸系数等的重要水文地质方法, 溶质浓度、非均质性、渗流速度等对穿透曲线和水动力学参数的影响研究较多^[7-12]。在多孔介质溶质运移理论模型方面, 先后发展了一系列应用广泛的理论和数值模型, 包括对流弥散模型(ADE)、两区模型(TRM)、连续时间随机游走模型(CTRW)等, 其中 ADE 模型和 TRM 模型被广泛应用于一维均质砂柱溶质运移试验中^[13-14]。Zaheer 等^[15]使用氯化钠进行示踪试验, 并引入 ADE、TRM、CTRW、FADE 等模型, 结果表明以上模型均可以很好地拟合其运移过程。Wu 等^[16]、Jin 等^[17]通过物理试验和数值模拟研究了在均质和非均质条件下浓度梯度对流体运移的影响, 指出浓度密度变化会影响孔隙水的流动、溶质阻滞系数和衰减系数的变化。赵丽等^[18]、张庆等^[19]研究了不同地热环境下 NO_3^- 和氨氮的运移机

制, 发现硝酸盐的弥散系数随温度升高而增加, Peclet 数则相反, 由弥散引起的溶质运移作用随温度升高而逐渐增强。迄今为止, 注入时间和静水压力对深层承压地热水中溶质的运移规律影响研究少有报道。

开封凹陷区是华北地热资源条件较好的区域, 深层地热资源丰富, 埋深 600 ~ 1 000 m 的地热井数量较多, 热水温度多在 30 ~ 50 $^{\circ}\text{C}$ 。随着该埋深范围的热储层地下水资源开发利用程度加大, 水质恶化、水温降低等环境水文地质问题逐渐突显^[20-21]。本文以新近系明化镇组热储层的细砂作为填充介质, 根据当地的地热梯度及实测地热水温度, 选择在 35 $^{\circ}\text{C}$ 低温地热环境下开展不同注入时间(1 ~ 5 h)和静水压力(0 ~ 9 MPa)下 Cl^- 运移模拟试验, 并使用一维对流弥散(CDE)模型对溶质运移参数进行拟合计算, 进一步研究探讨 Cl^- 在深层承压地热水中的运移机制, 这对于丰富地下水溶质运移理论具有重要意义。

1 试验和方法

1.1 试验材料和装置

试验所用砂土取自河南省新密县曲梁乡王沟村沟谷新近系明化镇组热储层土。运用环刀法, 测得原样的容重为 1.86 g/cm^3 ; 岩样粒度小于 75 μm 的占比为 13.7%, 75 ~ 250 μm 占比为 69.2%, 大于 250 μm 为 17.1%。以《工程地质手册》为依据, 试验使用的岩样为细砂。岩样的具体物理性质见表 1。

试验设备采用的是 316 L 型不锈钢材料, 可耐受 20 MPa 高压, 其内径 7 cm、柱长为 50 cm, 两端皆由法兰盘进行密闭连接, 连接的法兰盘中心设有直径 1 cm 的进、出水口, 柱体内壁进行拉毛处理, 以避免出

表 1 岩样的物理性质

Table 1 Physical properties of rock samples

测定指标	数值
密度/(g·cm ⁻³)	2.52
吸湿水/%	2.78
含水率/%	13.15
pH(水土比2.5:1)	8.60~8.90

现侧壁流。进、出水管采用内径为 2 mm 的高压不锈钢管。不锈钢柱体外壁包裹有电加热套,内置测温电子元件,可保证柱体内的恒温环境(≤85 °C,精度±0.2 °C)。在不锈钢柱底部中心的进水口处连接一台恒流恒压泵,保证试验过程中进口水压和流量的稳定,在其出口处连接有回压阀和回压缓冲容器等装置,使柱体内部的高静水压环境得以保持稳定(≤20 MPa)。通过电子控制单元和计算机对模拟柱的进、出口压力、温度、流量进行检测、显示和记录。试验装置见图 1。

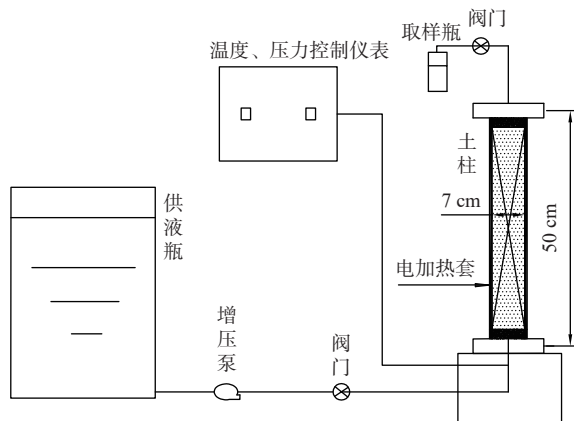


图 1 溶质运移模拟装置简图

Fig. 1 Schematic diagram of solute transport simulator

本试验采用分层装填法填充模拟柱,每装填 5 cm 的岩样就进行夯实,避免出现明显的分层,下一次放入岩样前将夯实的岩样表面进行抓毛。岩样填充之前需在柱子上、下端放置 30 μm 的滤布和加入约 5 cm 厚的石英砂,滤布作为反滤层可以起到防止岩样砂粒堵塞进、出水孔的作用,石英砂可以避免进液不均匀现象的发生。测得土柱容重为 1.46 g/cm³,采用称重法测得土柱的孔隙度为 0.4。

试验开始前,在常压和常温条件下,利用恒流恒压泵,以自下而上的水流方式,使用去离子水对模拟柱进行饱水以驱逐模拟柱中的空气以及岩样表面附着的杂质,待柱内形成稳定的流场、淋出液的电导率在 100 μS/cm 以下后,将静水压力、温度调整到试验所需值,从而能够有效模拟研究区地下水的高静水压力

和地热环境。

1.2 试验方法

首先在温度为 35 °C 条件下开展不同注入时间的氯离子穿透试验。使用恒流恒压泵将淋滤液从土柱底端注入柱内,达西流速均值为 6.24 cm/h,注入时间分别为 1, 2, 3, 4, 5 h。当淋滤液注入时间达到设定时间后更换为去离子水,淋出液 Cl⁻浓度达到背景值时结束试验。然后在 35 °C、注入时间为 3 h 的条件下分别开展静水压力为 0, 6, 9 MPa 的氯离子穿透试验。试验期间按照设置的时间间隔对氯离子的穿透及驱替的全过程进行取样,测得 Cl⁻浓度、电导率、TDS 等指标,试验周期约为 10~12 h。淋滤液采用去离子水和优级纯的氯化钠配置,淋滤液中 Cl⁻质量浓度 C₀ 为 200 mg/L。

1.3 分析方法

试验用水为蒸馏水(电导率小于 5 μS/cm),电导率、溶解性总固体(TDS)采用梅特勒测定仪测试。氯化物浓度测定采用硝酸银滴定法。

2 溶质运移模型与拟合

2.1 溶质运移的一维对流弥散方程(CDE)

本试验中,溶质使用的是保守性溶质 Cl⁻,不易发生吸附、化学反应和衰变。由于试验模型为一维多孔介质土柱,故可采用一维对流弥散方程表征 Cl⁻的运移过程:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

式中: C——t 时刻 x 处的溶质浓度/(mg·L⁻¹);

D_L——纵向弥散系数/(cm²·h⁻¹);

V——孔隙流速/(cm·h⁻¹);

t——时间/h;

x——距注入点的距离/cm。

式(1)利用 Laplace 变化求解得出半无限长多孔介质柱体定浓度注入污染物问题的解析解:

$$C = \frac{C_0}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x-Vt}{2\sqrt{D_L t}} \right) + \exp \left(\frac{Vx}{D_L} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x+Vt}{2\sqrt{D_L t}} \right) \right] \quad (2)$$

式中: C₀——注入溶质的浓度/(mg·L⁻¹);

erfc()——余误差函数;

exp()——e 为底的指数函数。

2.2 数值模拟和运移参数求解

本试验数据拟合软件采用的是美国盐滞土实验室研发的 CXTFIT 2.1。根据实际测得的 Cl⁻穿透曲线

(BTC), 对一维溶质运移的对流-弥散方程的反问题进行求解, 并采用非线性最小二乘优化方法求得溶质的纵向弥散系数 D_L 、孔隙流速 V 等参数。

3 结果与分析

3.1 不同注入时间下 Cl 的运移试验和数值模拟

3.1.1 注入时间 4, 5 h 的 Cl 运移曲线

注入时间 4, 5 h 的 Cl 穿透曲线如图 2 所示, 在流量稳定、淋滤用液 Cl 质量浓度不变的情况下, 淋出液 Cl 的质量浓度经历了背景值附近波动、迅速上升、稳定 3 个阶段。当淋出液中 Cl 的质量浓度比 C/C_0 达到 0.9 时, 其增加速度明显减缓。当采用去离子水作为淋滤用液时, Cl 浓度迅速下降。溶质的穿透和驱替过程运移曲线基本对称, 表明 Cl 在运移过程中与岩样几乎没有发生吸附解吸、离子交换等物理或化学作用, 仅存在与去离子水的混合置换。

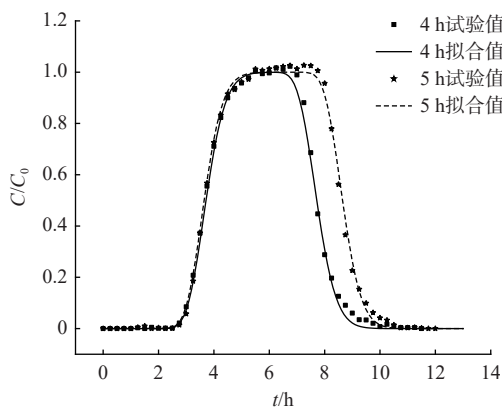


图 2 注入时间 4, 5 h 下运移拟合结果对比

Fig. 2 Comparison of fitting results of migration at injection times of 4 h and 5 h

注入时间 4, 5 h 条件下, 淋出液中 Cl 的质量浓度均在 2.5 h 时开始上升, $C/C_0 \geq 98\%$ 的时间点分别为 5.27, 5.30 h, 两者的运移曲线在完全穿透前几乎重

合。随着注入时间的增加, 淋出液中 Cl 的峰值停留时间延长。值得注意的是, C/C_0 开始下降的时间差与溶液注入时间差相同, 时间间隔均为 1 h, 说明注入时间的延长并不会使 Cl 和岩样之间的吸附解吸和离子交换作用增强。两者的运移曲线在试验后期均出现“拖尾”现象, 尤其在 9~10 h 的拟合数据出现偏离, 这应当与岩样的非均质性以及密度流相关^[22-27]。

3.1.2 注入时间 1, 2, 3 h 的 Cl 运移曲线

由图 3 可以看出, 不同注入时间的溶质运移曲线有以下现象: (1) 溶质注入时间为 1, 2, 3 h 的 Cl 运移均呈现正态的单峰曲线。注入时间 3 h 开始穿透的时间点为 2 h, 明显早于其它注入时间的初始穿透时间点, 这应当与在孔隙流速 V 略高情况下的溶质弥散作用增强有关(表 2); (2) 注入时间为 1, 2, 3 h 时, C/C_0 实测最大值分别为 0.57, 0.86, 0.91, 峰值到达时间从 4 h 延长到 4.75 h, 表明溶质注入时间会影响峰值及其峰值到达时间; (3) 注入时间 1~2 h 条件下, Cl 的实测 C/C_0 峰值要高于拟合峰值。原因是 Cl 注入时间较短, 去离子水的提前注入致使孔隙结构中流体的微观速度发生变化, 且有流速不均匀现象的发生^[28]。

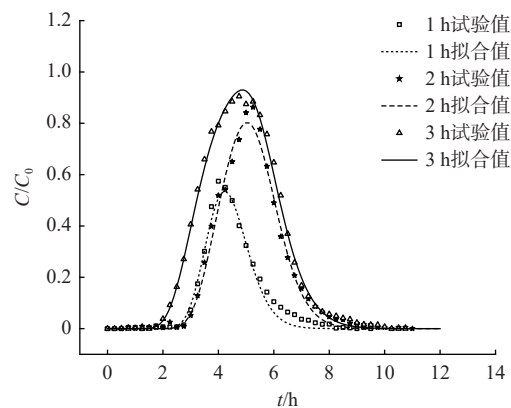


图 3 注入时间 1, 2, 3 h 下运移拟合结果对比

Fig. 3 Comparison of fitting results of migration at injection times of 1 h, 2 h and 3 h

表 2 不同注入时间 Cl 穿透曲线 CDE 拟合参数值

Table 2 CDE fitting parameters of Cl penetration curve at different injection times

注入时间 /h	达西流速 /($\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$)	填充土柱的孔隙度	CDE模型			弥散度/cm	机械弥散系数 /($\text{cm}^2\cdot\text{h}^{-1}$)	Peclet数	分子扩散系数 /($\text{cm}^2\cdot\text{h}^{-1}$)
			纵向弥散系数 /($\text{cm}^2\cdot\text{h}^{-1}$)	孔隙流速 /($\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$)	R^2				
1			10.68	12.88	0.981	0.829	10.637	60.3	0.043
2			11.28	12.1	0.99	0.932	11.235	53.635	0.045
3	6.24	0.45	25.22	15.03	0.996	1.678	25.119	29.798	0.101
4			7.221	13.31	0.997	0.542	7.191	92.162	0.029
5			7.097	13.57	0.998	0.523	7.069	95.604	0.028

注: $\lambda = D_L/V$; $D_h = D_L - D_i$; $Pe = VL/D_i$; $D_i = Vd/Pe$ 。其中, λ ——弥散度/cm; D_i ——分子扩散系数/($\text{cm}^2\cdot\text{h}^{-1}$); D_h ——机械弥散系数/($\text{cm}^2\cdot\text{h}^{-1}$); Pe ——Peclet数; d ——填充砂土的平均粒径/cm, 取 0.2 cm; L ——柱子长度/cm, 取 50 cm。

3.1.3 注入时间对Cl⁻运移参数的影响

注入时间1~5 h的Cl⁻运移参数见表2。水动力弥散系数作为研究地下水溶质运移的一个重要参数,在溶质运移过程中起着决定性的作用。在不同注入时间下,水动力弥散系数也不尽相同。根据拟合的纵向弥散系数可知,在注入时间从1 h延长至2,3 h时,纵向弥散系数分别为10.68, 11.28, 25.22 cm²/h,呈增大趋势;在3 h延长至4,5 h时,纵向弥散系数降低到7.221, 7.097 cm²/h。表明溶质的注入时间是引起弥散系数变化的因素之一,当注入时间达到某个时间点后,弥散系数保持稳定,这与柱体内部溶质的浓度梯度密切相关。

水动力弥散包括分子扩散和机械弥散。注入时间1~5 h下的机械弥散系数 D_h 均占弥散系数的99.6%,因此此次试验条件下溶质的弥散作用以机械弥散为主。当注入时间为3 h时,机械弥散系数为25.119 cm²/h,明显大于其它注入时间条件,这与该条件下孔隙流速略高有关(孔隙流速为15.03 cm/h)。与此同时,注入时间3 h的弥散系数、弥散度 λ 分别为25.22 cm²/h和1.678 cm,与其它注入时间相比,水动力弥散作用明显增强,这应当与模拟的地热水中Cl⁻浓度梯度较大有关^[29-31]。

3.2 不同静水压力下Cl⁻的运移模拟

在注入时间为3 h条件下,开展不同静水压力下(6, 9 MPa)Cl⁻运移试验,并与静水压力0 MPa进行对比分析。

3.2.1 模拟装置压力测试

在6, 9 MPa条件下测得试验过程中模拟柱进口、出口压力变化情况,见图4。由该图可知,在试验过程中,进口压力始终大于出口压力,进口压力与出口压力的相对差值为0.02 MPa,绝对差值为0.01~0.04 MPa,压力差变化小,模拟的静水压力环境条件稳定,故该装置的恒压环境稳定。

3.2.2 6 MPa下Cl⁻运移曲线

静水压力6 MPa时,淋出液Cl⁻的运移曲线呈近似正态分布(图5),穿透时间为2.5 h,与0 MPa下Cl⁻的运移曲线相似,表明高静水压力下Cl⁻与岩样之间的吸附解吸和离子交换作用也可忽略。静水压力为0, 6 MPa时, C/C_0 最大值分别为0.91, 0.86,峰值到达时间分别为4.75, 5.00 h。静水压力6 MPa下,淋出液中Cl⁻的质量浓度比下降,峰值到达时间延长,穿透后期Cl⁻的“拖尾”时间较长,表明此静水压力下溶质弥散作用增强,静水压力对溶质运移过程具有一定影响。

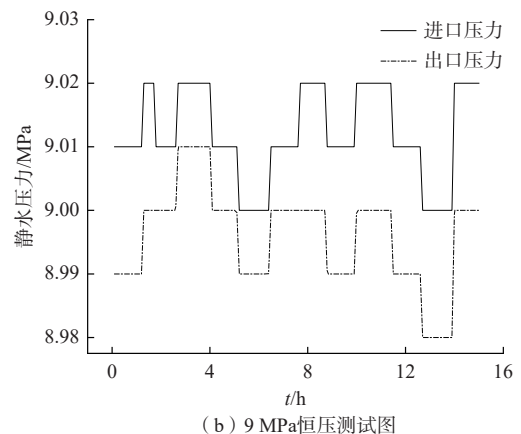
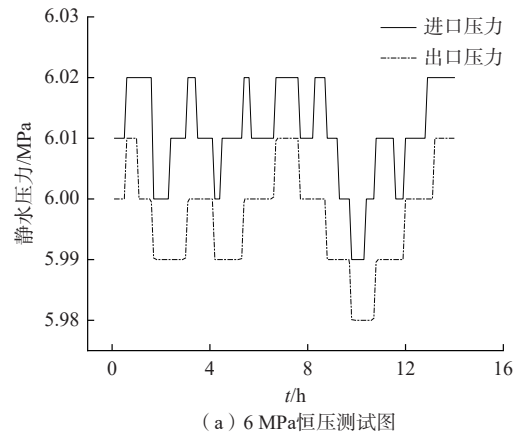


图4 穿透试验过程模拟柱进口、出口压力变化图

Fig. 4 Pressure change diagram of inlet and outlet of simulation column during the penetration test

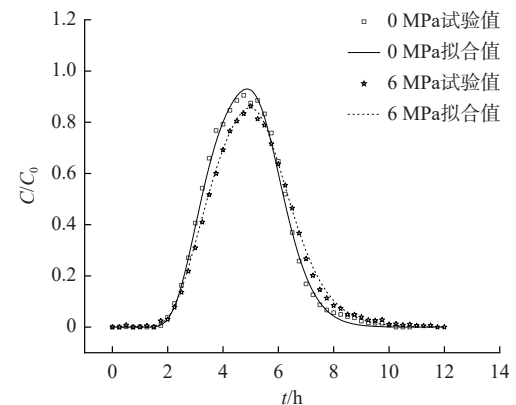


图5 静水压力0, 6 MPa下运移拟合结果对比

Fig. 5 Comparison of migration fitting results under hydrostatic pressures of 0 MPa and 6 MPa

3.2.3 不同静水压力下Cl⁻运移曲线

静水压力为6, 9 MPa时, C/C_0 最大值分别为0.86, 0.89,均小于0 MPa下峰值浓度比(图6)。在静水压力9 MPa下,开始穿透时间为2.25 h,早于0, 6 MPa下的对应时间,故静水压力升高致使溶质的弥散作用进一步增强。静水压力9 MPa下的运移曲线同样呈正

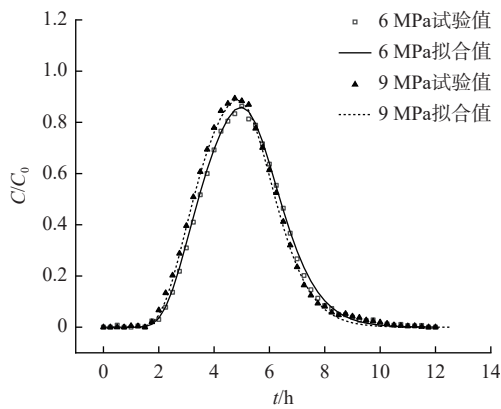


图 6 静水压力 6, 9 MPa 下运移拟合结果对比

Fig. 6 Comparison of migration fitting results under hydrostatic pressures of 6 MPa and 9 MPa

表 3 不同静水压力 Cl⁻ 穿透曲线 CDE 拟合参数值

Table 3 CDE fitting parameters of Cl⁻ penetration curves under different hydrostatic pressures

静水压力 /MPa	达西流速 /($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)	填充土柱的孔隙度	CDE模型		弥散度 /cm	机械弥散系数 /($\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)	Peclet数	分子扩散系数 /($\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)
			纵向弥散系数/($\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)	R^2				
0			25.22	0.996	1.678	25.119	29.798	0.101
6	6.24	0.45	32.29	0.998	2.316	32.161	21.586	0.129
9			36.13	0.994	2.38	35.985	21.007	0.145

增加到 6 MPa 的 2.316 cm、9 MPa 的 2.380 cm, 弥散系数从 0 MPa 的 25.22 cm^2/h 增加到 6 MPa 的 32.29 cm^2/h 、9 MPa 的 36.13 cm^2/h , 表明弥散作用随静水压力的增加而增强。总体来说, 高静水压力下的溶质弥散作用强于常压, 表明含水层承压环境的不同是引起各含水层内部弥散作用发生变化的因素之一。

4 讨论

注入时间和静水压力的变化对溶质在孔隙型热储层中的穿透、驱替过程及运移参数均有重要影响。

注入时间的不同, 会引起溶质注入总量、柱体内部浓度梯度变化, 从而导致穿透曲线、运移参数发生改变。CDE 模型的拟合相关系数 R^2 随注入时间的延长而增加, 但总体上一维对流弥散模型可以对不同注入时间下 Cl⁻ 的运移过程很好地拟合。说明在均质多孔介质中, 不同注入时间下 Cl⁻ 的运移过程符合菲克定律。注入时间越长, 溶质注入总量越大, 峰值及峰值到达时间分别增大、延缓, 峰值停留时间延长。当溶质注入时间达到临界点后, 峰值及峰值到达时间趋于稳定。由图 2 和图 3 可知, 注入时间 3 h 下, 开始穿透时间早于其它注入时间; 由表 2, 此注入时间条件下弥散系数、孔隙流速同样大于其它注入时间条件, 其中在注入时间 3 h, 静水压力为 6, 9 MPa 的试验条件下

态分布, 进一步说明静水压力的增强不会对 Cl⁻ 和岩样之间的吸附解吸与离子交换作用产生影响。静水压力为 6, 9 MPa 时, 穿透曲线后期出现的“拖尾”现象都要比 0 MPa 时更为明显。

3.2.4 静水压力对 Cl⁻ 的运移参数的影响

静水压力 0, 6, 9 MPa 下的 Cl⁻ 运移参数, 如弥散系数、Peclet 数、弥散度等见表 3。弥散度作为含水层重要的水文地质参数, 可用来描述各含水层中溶质弥散作用^[32]。张小文等^[33]、袁伟等^[34]开展含水层野外弥散试验, 利用观测孔接收法计算纵向弥散度, 结果显示新近系承压水、第四系承压水的纵向弥散度均大于第四系潜水。本模拟试验中, 弥散度从 0 MPa 的 1.678 cm

弥散系数也同样较高, 原因是注入时间 3 h 下模拟柱内部浓度梯度最大^[35-36]。注入时间 1~3 h、4~5 h 下运移参数的变化表明单一溶液注入时间增加到一定值后, 溶质运移中弥散作用逐渐稳定, 对流作用增强。这对于研究突发水污染事故时, 污染物泄露时间在地下水中的迁移规律及风险识别具有重要意义。

含水层内部静水压力的变化同样会影响溶质的弥散和对流作用。CDE 模型对不同静水压力下 Cl⁻ 的运移过程拟合精度均较高 (R^2 均在 0.99 以上), 试验后期出现的“拖尾”现象同样得到很好的拟合, 说明在均质多孔介质中, 6, 9 MPa 静水压力下 Cl⁻ 的穿过程也符合菲克定律。由图 5 和图 6 知, 静水压力 6, 9 MPa 下, Cl⁻ 运移曲线后期出现的“拖尾”现象比 0 MPa 时明显, C/C_0 也均小于 0 MPa; 且从表 3 可得, 随静水压力增加, 水动力弥散系数、弥散度增大, 弥散作用增强, 这是因为在静水压力作用下, 柱体内部饱和度增加, 对流作用减弱, 弥散作用得到加强^[37-38]。随着深层承压水和地热水的开采, 赋存环境发生改变, 长期效应下, 深层承压水和地热水水质污染现象不可忽视, 故研究溶质在不同静水压力下的运移规律, 对于丰富溶质运移理论及防治深层承压水、地热水污染具有重要意义。

5 结论

(1) 在模拟的孔隙型热储层中, 不同注入时间和

静水压力下的 Cl 运移曲线均呈对称分布,表明不同注入时间和静水压力下,Cl 在运移过程中与岩样间的吸附解吸、离子交换等物理或化学作用可以忽略。8 组运移模拟试验穿透曲线拟合精度均较高(相关系数 R^2 在 0.980 ~ 0.998),说明在均质多孔介质中,不同注入时间和静水压力下 Cl 的运移过程均符合菲克定律。

(2)在不同注入时间下,Cl 在模拟孔隙型热储层中的穿透曲线和水动力学参数均有明显不同,这与孔隙流速及柱体内部浓度梯度密切相关。当注入时间为 3 h 时,弥散系数、弥散度、分子扩散系数最大,分别为 25.22 cm²/h, 1.678 cm, 0.101 cm²/h,此时柱内浓度梯度大于其它注入时间,水动力弥散作用最强。随着注入时间的增加,柱内的溶质浓度梯度减小,溶质运移中分子扩散作用趋于稳定,对流作用增强,且 CDE 模型拟合精度提高, R^2 从 0.980 增高到 0.998。

(3)在不同静水压力下 Cl 运移曲线和运移参数同样具有差异性。9 MPa 的穿透时间早于 6 MPa,其运移后期的“拖尾”现象也比 6 MPa 明显;弥散系数和分子扩散系数分别从 6 MPa 的 25.22 cm²/h 和 0.101 cm²/h 增高到 9 MPa 的 36.13 cm²/h 和 0.145 cm²/h。表明溶质弥散作用随静水压力的增加而增强。

参考文献 (References) :

- [1] 朱菊艳,郭海朋,李文鹏,等.华北平原地面沉降与深层地下水开采关系[J].南水北调与水利科技,2014,12(3):165 - 169. [ZHU Juyan, GUO Haipeng, LI Wenpeng, et al. Relationship between land subsidence and deep groundwater yield in the North China Plain[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(3): 165 - 169. (in Chinese with English abstract)]
- [2] WANG Xinyi, ZHAO Li, LIU Xiaoman, et al. Temperature effect on the transport of nitrate and ammonium ions in a loose-pore geothermal reservoir[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 124: 59 - 66.
- [3] JIANG Lei, BAI Li, ZHAO Yan, et al. Combining InSAR and hydraulic head measurements to estimate aquifer parameters and storage variations of confined aquifer system in Cangzhou, North China plain[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(10): 8234 - 8252.
- [4] BAI Lin, JIANG Liming, ZHAO Yong, et al. Quantifying the influence of long-term overexploitation on deep groundwater resources across Cangzhou in the North China Plain using InSAR measurements[J]. *Journal of*

- Hydrology*, 2022, 605: 127368.
- [5] 马致远,侯晨,席临平,等.超深层孔隙型热储地热水回灌堵塞机理[J].*水文地质工程地质*, 2013, 40(5): 133 - 139. [MA Zhiyuan, HOU Chen, XI Linping, et al. Reinjection clogging mechanism of used geothermal water in a super-deep-porous reservoir[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2013, 40(5): 133 - 139. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 赵亚洲,庞忠和,马智博,等.地热储多场多相数值模拟与介尺度技术进展[J].*科技促进发展*, 2020, 16(增刊1): 359 - 366. [ZHAO Yazhou, PANG Zhonghe, MA Zhibo, et al. Advance research on multi-field and multi-phase simulation of geothermal reservoir[J]. *Science & Technology for Development*, 2020, 16(Sup1): 359 - 366. (in Chinese with English abstract)]
- [7] NIELSEN K K, NELLIS G F, KLEIN S A. Numerical modeling of the impact of regenerator housing on the determination of Nusselt numbers[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 65: 552 - 560.
- [8] BHATTACHARYA P, JACKS G, AHMED K M, et al. Arsenic in groundwater of the Bengal delta plain aquifers in Bangladesh[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2002, 69(4): 538 - 545.
- [9] WANG Quanrong, GU Haochen, ZHAN Hongbin, et al. Mixing effect on reactive transport in a column with scale dependent dispersion[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 582: 124494.
- [10] 黄健,单慧媚,彭三曦,等.水动力因素对砷在河砂中迁移影响的柱试验与模拟[J].*水文地质工程地质*, 2022, 49(2): 195 - 206. [HUANG Jian, SHAN Huimei, PENG Sanxi, et al. Influence of hydrodynamic factors on the migration of arsenic in river sand: column experiment and models[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(2): 195 - 206. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 陈星欣,白冰,于涛,等.粒径和渗流速度对多孔介质中悬浮颗粒迁移和沉积特性的耦合影响[J].*岩石力学与工程学报*, 2013, 32(增刊1): 2840 - 2845. [CHEN Xingxin, BAI Bing, YU Tao, et al. Coupled effects of particle size and flow rate on characteristics of particle transportation and deposition in porous media[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(Sup1): 2840 - 2845. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 曹孟雄,陈刚,胡成.初始浓度分布对一维含水层中溶质运移的影响[J].*中国环境科学*, 2021, 41(5):

- 2226 – 2231. [CAO Mengxiong, CHEN Gang, HU Cheng. Impact of initial concentration distribution on solute transport in the one-dimensional aquifer[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(5): 2226 – 2231. (in Chinese with English abstract)]
- [13] BOND W J, WIERENGA P J. Immobile water during solute transport in unsaturated sand columns[J]. *Water Resources Research*, 1990, 26(10): 2475 – 2481.
- [14] PADILLA I Y, YE H T C J, CONKLIN M H. The effect of water content on solute transport in unsaturated porous media[J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(11): 3303 – 3313.
- [15] ZAHEER M, WEN Zhang, ZHAN Hongbin, et al. An experimental study on solute transport in one-dimensional clay soil columns[J]. *Geofluids*, 2017, 2017: 1 – 17.
- [16] WU Mingchang, HSIEH P C. Analytical modeling of solute transport in a two-zoned porous medium flow[J]. *Water*, 2022, 14(3): 323.
- [17] JIN Guangqiu, HAO Yongfei, WEI Jie, et al. The effect of density-driven flow on the transport of high-concentration solutes in the hyporheic zone[J]. *Hydrological Processes*, 2021, 35(1): e13949.
- [18] 赵丽, 张庆, 刘小满, 等. 地热环境下 NO_3^- 在多孔介质中的运移机制研究[J]. *安全与环境学报*, 2015, 15(5): 320 – 324. [ZHAO Li, ZHANG Qing, LIU Xiaoman, et al. Migration mechanism of NO_3^- in the porous media based on the geothermal environment[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015, 15(5): 320 – 324. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 张庆, 赵丽, 王心义. NH_4^+ 在孔隙型地热水中的运移机制研究[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(4): 74 – 78. [ZHANG Qing, ZHAO Li, WANG Xinyi. Study on the transportation mechanism of NH_4^+ in the porous geothermal water[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(4): 74 – 78. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 林学钰, 王心义, 廖资生. 地下热流系统及其开发工程配置——以河南省开封市区为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2008, 38(6): 913 – 919. [LIN Xueyu, WANG Xinyi, LIAO Zisheng. The geothermal fluid system and its exploitation engineering scheme: Taking Kaifeng area, Henan Province as example[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2008, 38(6): 913 – 919. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 齐玉峰, 王现国, 王关杰, 等. 开封凹陷区地热资源开发利用与保护[J]. *地下水*, 2007, 29(4): 77 – 79. [QI Yufeng, WANG Xianguo, WANG Guanjie, et al. Development and protection of geothermal resources in Kaifeng depression[J]. *Ground Water*, 2007, 29(4): 77 – 79. (in Chinese with English abstract)]
- [22] NEUMAN S P, TARTAKOVSKY D M. Perspective on theories of non-Fickian transport in heterogeneous media[J]. *Advances in Water Resources*, 2009, 32(5): 670 – 680.
- [23] LANGEVIN C D, GUO Weixing. MODFLOW/MT3DMS-based simulation of variable-density ground water flow and transport[J]. *Ground Water*, 2006, 44(3): 339 – 351.
- [24] WOOD M, SIMMONS C T, HUTSON J L. A breakthrough curve analysis of unstable density-driven flow and transport in homogeneous porous media[J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(3): 1 – 9.
- [25] SIMMONS C T, FENSTEMAKER T R, SHARP J M J. Variable-density groundwater flow and solute transport in heterogeneous porous media: Approaches, resolutions and future challenges[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2001, 52(1/2/3/4): 245 – 275.
- [26] 张建桥, 窦智, 张学羿. 多孔介质粒径变异系数对污染物运移的影响[J/OL]. *地球科学*. [Http://Kns.cnki.net/Kcms/setail/42.1874.p.200211101.1909.016.html](http://Kns.cnki.net/Kcms/setail/42.1874.p.200211101.1909.016.html). [ZHANG Jianqiao, DOU Zhi, ZHANG Xueyi. Effect of coefficient of variation of particle size of porous media on contaminant transport[J/OL]. *Earth Science*. [Http://Kns.cnki.net/Kcms/setail/42.1874.p.200211101.1909.016.html](http://Kns.cnki.net/Kcms/setail/42.1874.p.200211101.1909.016.html). (in Chinese with English abstract)]
- [27] 周鸿翔, 郑延丰, 吴劳生, 等. 孔隙尺度多孔介质流体流动与溶质运移高性能模拟[J]. *水科学进展*, 2020, 31(3): 422 – 432. [ZHOU Hongxiang, ZHENG Yanfeng, WU Laosheng, et al. Pore-scale simulations of fluid flow and solute transport in porous media by high-performance Lattice Boltzmann Method[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(3): 422 – 432. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 张兴昊, 林丹彤, 胡黎明. 基于等效孔隙网络模型的水动力弥散数值模拟[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(12): 1906 – 1914. [ZHANG Xinghao, LIN Dantong, HU Liming. Numerical simulations of hydrodynamic dispersion based on an equivalent pore network model[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2022, 62(12): 1906 – 1914. (in Chinese with English abstract)]
- [29] SIMMONS C T, PIERINI M L, HUTSON J L. Laboratory investigation of variable-density flow and solute transport in unsaturated-saturated porous media[J]. *Transport in*

- [Porous Media](#), 2002, 47(2): 215 – 244.
- [30] YU Chuang, WANG Hui, WU Zexiang, et al. Analytical solution for pollutant diffusion in soils with time-dependent dispersion coefficient[J]. [International Journal of Geomechanics](#), 2019, 19(10): 04019109.
- [31] 叶逾, 蔡芳敏, 谢一凡, 等. 系统维度对变密度溶质运移的影响研究[J]. [水文地质工程地质](#), 2022, 49(1): 146 – 153. [YE Yu, CAI Fangmin, XIE Yifan, et al. Effect of the system dimensionality on variable-density solute transport[J]. [Hydrogeology & Engineering Geology](#), 2022, 49(1): 146 – 153. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 苑绍东, 张文杰, 袁姗姗. 溶质运移的弥散度取值试验研究[J]. [岩土力学](#), 2020(增刊2): 1 – 6. [YUAN Shaodong, ZHANG Wenjie, YUAN Shanshan. Dispersion values in solute migration tests[J]. [Rock and Soil Mechanics](#), 2020, (Sup2): 1 – 6. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 张小文, 袁伟, 王川. 吉林省长山水源地主要含水层野外弥散试验研究[J]. [城市地质](#), 2020, 15(4): 394 – 403. [ZHANG Xiaowen, YUAN Wei, WANG Chuan. Field dispersion test of main aquifers in Changshan water source area of Jilin Province[J]. [Urban Geology](#), 2020, 15(4): 394 – 403. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 袁伟, 云智汉. 承压含水层野外弥散试验实施方法研究——以吉林某水源地为例[J]. [城市地质](#), 2019, 14(3): 74 – 80. [YUAN Wei, YUN Zhihan. Study on implementation method of field dispersion test for confined aquifer: Taking a water source area in Jilin as an example[J]. [Urban Geology](#), 2019, 14(3): 74 – 80. (in Chinese with English abstract)]
- [35] KHUZHAYOROV B, USMONOV A, LONG N M A, et al. Anomalous solute transport in a cylindrical two-zone medium with fractal structure[J]. [Applied Sciences](#), 2020, 10(15): 5349.
- [36] 饶登宇, 白冰. 溶质运移中多孔介质弥散度影响因素的 SPH 模拟研究[J]. [水利学报](#), 2019, 50(7): 824 – 834. [RAO Dengyu, BAI Bing. Study on the factors affecting dispersity of porous media by SPH simulation in solute transport[J]. [Journal of Hydraulic Engineering](#), 2019, 50(7): 824 – 834. (in Chinese with English abstract)]
- [37] 刘春卿, 杨劲松, 陈小兵, 等. 石河子垦区灌耕灰漠土饱和-非饱和土壤水动力弥散试验研究[J]. [灌溉排水学报](#), 2008, 27(1): 39 – 42. [LIU Chunqing, YANG Jinsong, CHEN Xiaobing, et al. Hydrodynamic dispersion coefficient of saturated-unsaturated soil in Shihezi irrigation areas[J]. [Journal of Irrigation and Drainage](#), 2008, 27(1): 39 – 42. (in Chinese with English abstract)]
- [38] 任长江, 王建华, 赵勇, 等. 改进的水动力参数模型在非饱和土壤溶质运移问题中的应用[J]. [水动力学研究与进展 A 辑](#), 2018, 33(4): 480 – 489. [REN Changjiang, WANG Jianhua, ZHAO Yong, et al. Application of improved hydrodynamic parameters model for solute transport problem in unsaturation soil[J]. [Chinese Journal of Hydrodynamics](#), 2018, 33(4): 480 – 489. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳