

https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.148



非完整井对单井注抽试验测算地下水流速影响机理

苏世林^{1,2}, 李旭^{2,1*}, 郭强¹, 张海涛^{2,3}, 许光泉², 朱棋⁴

1. 煤炭开采水资源保护与利用全国重点实验室, 北京 100011
2. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽淮南 232001
3. 合肥综合性国家科学中心能源研究院, 安徽合肥 230071
4. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430078

摘要: 为了探究非完整井结构对单井注抽试验测算地下水流速的影响机理, 采用 COMSOL Multiphysics 软件建立非完整井条件下的单井注抽试验数值模型, 分析了非完整井滤管长度与位置对穿透曲线的影响. 同时开展了非完整井单井注抽试验室内试验研究, 并利用数值模型拟合示踪剂穿透曲线来进一步验证模型的可靠性. 结果表明: 滤水管长度越短, 示踪剂穿透曲线早期浓度越低; 滤水管位置越靠近含水层上部, 穿透曲线早期的浓度越高; 参数反演误差分析表明数值模型能较好地反演地下水流速、孔隙度以及弥散度. 总体而言, 非完整井附近复杂流场导致溶质空间的不均匀分布, 进而对穿透曲线有显著影响, 增大传统完整井模型的参数反演误差; 而本文建立的非完整井单井注抽试验模型拟合精度高, 能够适用于非完整井条件下的单井注抽试验.

关键词: 非完整井; 穿透曲线; 地下水流速; 溶质运移; 水文地质.

中图分类号: P641.2

文章编号: 1000-2383(2024)01-288-11

收稿日期: 2021-12-30

Effect Mechanistic of Partially Penetrating Well on Single-Well Push-Pull Tests for Groundwater Velocity Estimation

Su Shilin^{1,2}, Li Xu^{2,1*}, Guo Qiang¹, Zhang Haitao^{2,3}, Xu Guangquan², Zhu Qi⁴

1. State Key Laboratory of Groundwater Protection and Utilization by Coal Mining, Beijing 100011, China
2. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China
3. Institute of Energy, Hefei Comprehensive National Science Center, Hefei 230071, China
4. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

Abstract: For the purpose of analyzing the influencing mechanism of partially penetrating well on single-well push-pull (SWPP) tests, this study employed COMSOL Multiphysics to develop a numerical model of SWPP test, in which the impacts of the length and location of screen on breakthrough curves (BTCs) were investigated. Meanwhile, a laboratory experiment of SWPP test with partially penetrating well was conducted, verifying the reliability of the proposed model by fitting the observed and simulated BTCs. The results show that a shorter screen length leads to a lower concentration of BTC in the early stage;

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (No.42102293); 安徽省自然科学基金青年项目 (No.2108085QD165); 安徽高校自然科学研究重点项目 (Nos. KJ2020A0316, KJ2021A0441); 安徽高校协同创新项目 (No.GXX-2021-017); 煤炭开采水资源保护与利用全国重点实验室开放基金 (No. WPUKFJJ2019-11).

作者简介: 苏世林 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事地下水数值模拟研究. ORCID: 0000-0002-0941-2752. E-mail: sshilin214@163.com

* **通讯作者:** 李旭, ORCID: 0000-0002-7746-8598. E-mail: lixu@aust.edu.cn

引用格式: 苏世林, 李旭, 郭强, 张海涛, 许光泉, 朱棋, 2024. 非完整井对单井注抽试验测算地下水流速影响机理. 地球科学, 49(1): 288-298.

Citation: Su Shilin, Li Xu, Guo Qiang, Zhang Haitao, Xu Guangquan, Zhu Qi, 2024. Effect Mechanistic of Partially Penetrating Well on Single-Well Push-Pull Tests for Groundwater Velocity Estimation. *Earth Science*, 49(1): 288-298.

meanwhile a shorter unscreened segment near the top of aquifer results in a lower concentration in the early stage. Additionally, the error analysis of parameter inversion indicates that the numerical model is quantified for the estimations of groundwater flow velocity, porosity and dispersion by fitting BTCs. Overall, the complicated flow field in the vicinity of partially penetrating wells leads to a non-uniform spatial distribution of solute, which has a significant effect on the BTCs and increases the parameter inversion error if using the traditional fully penetrating well model. Nevertheless, the SWPP test model developed in this paper has high fitting accuracy and can be applied to SWPP test under partially penetrating conditions.

Key words: partially penetrating well; breakthrough curve; groundwater velocity; solute transport; hydrogeology.

0 引言

随着地下水人工回灌、核废料储存等需求不断增加,以及大量废弃矿井和机井、封堵不良钻孔等尚未有效处置,导致浅、中、深层地下水污染问题时常发生,对含水层水量、水质安全尤其是深层地下水资源和地下水环境保护提出了更现实的要求(施小清等,2012;张蔚等,2013;庞忠和等,2017;束龙仓等,2017;张艳等,2018)。目前,对地下水资源进行科学评价和管理是解决上述问题的有效途径,而准确获取区域地下水流速是解决上述问题的重要前提(范春辉等,2017;Wang and Zhan,2019;李旭等,2022)。然而,传统的注入-观测井试验获取地下水流速时至少需要不在一条直线上的3口井,成本高且耗时长(Hall *et al.*, 1991;Chen *et al.*, 2017;Li *et al.*, 2019)。而单井注抽试验(Single-well push-pull test, SWPP 试验)仅通过同一口井进行注抽示踪剂,获取并拟合示踪剂的穿透曲线,即可获取含水层的地下水流速,有效地克服了传统示踪试验高成本、操作复杂以及周期长的问题(Gelhar and Collins, 1971;Li *et al.*, 2019;顾昊琛等,2020)。该试验在应用过程中分为3个阶段:第一阶段为注入示踪剂;第二阶段为示踪剂在区域地下水流作用下自由迁移;第三阶段为抽水并监测示踪剂的浓度变化。

为了准确反演地下水流速,许多学者建立了相应 SWPP 试验理论模型,通过解析公式计算或者数值反演的方法来获取地下水流速(Leap and Kaplan, 1988;Paradis *et al.*, 2018, 2019;李旭等,2022)。例如,Leap and Kaplan(1988)在传统 SWPP 试验理论基础上提出利用三阶段 SWPP 试验获取地下水流速的方法并建立了近似解析模型,结果表明 SWPP 试验的解析模型可以近似地获取地下水流速;Paradis *et al.*(2018,2019)对 Leap and Kaplan(1988)的方法进行了改进,通过加入考虑注入阶段地下水流的作用,研究表明模型考虑注入阶段的地下水流作用能够提高计算精度。Matsumoto *et al.*(2020)利用上

述模型结合氢氧同位素示踪技术计算了日本北海道地区地下水流速;尽管该模型能够较为精确反演地下水流速,但也存在一定的缺陷,例如李旭等(2022)通过数值模拟研究发现含水层的弥散度越大,Leap and Kaplan(1988)提出的近似解的误差越大。此外,Li *et al.*(2019)建立了考虑表皮效应的 SWPP 试验数值模型,通过拟合穿透曲线发现表皮效应会增大参数反演误差。

上述研究均是基于完整井而建立的理论模型,然而在实际应用中由于含水层较厚,抽/注水井时常不能贯穿整个含水层,形成非完整井结构,导致井筒附近渗流场发生不规则变化(图1),从而改变 SWPP 试验的溶质迁移规律并引起参数反演的误差增大(Huang *et al.*, 2010;顾昊琛等,2020)。因此,非完整井结构对 SWPP 试验的影响机理有待进一步研究。本文将系统开展非完整井条件下 SWPP 试验模型及室内试验研究,主要包括:(1)利用 COMSOL Multiphysics 软件建立并求解非完整井条件下的 SWPP 试验数值模型,通过与已有的模型进行对比,验证模型的准确性;(2)根据计算结果分析非完整井的滤管长度与位置对 SWPP 试验的穿透曲线以及溶质空间分布规律的影响机制;(3)开展相应的室内试验,利用数值模型拟合实测穿透曲

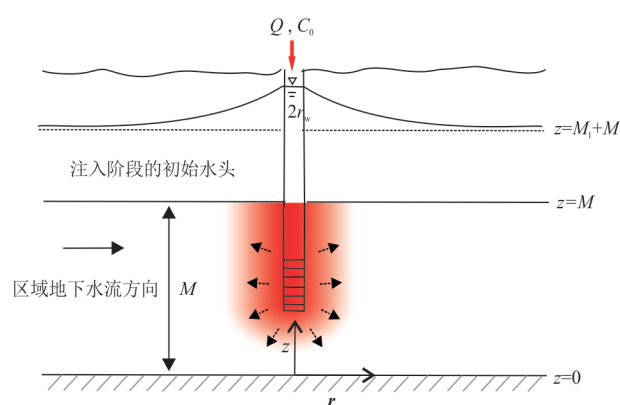


图1 非完整井示意图

Fig.1 Schematic diagram of partially penetrating well

线,进一步分析和验证利用数值模拟反演地下水流速的可行性.

1 数值模型建立与求解

由于抽/注水井为非完整井且假定井半径为 r_w , 滤水管长度为 B , 承压含水层水平无限延伸且厚度为 M , 注入的示踪剂为惰性溶质, 因此在 SWPP 试验过程中抽/注水井附近的地下水为三维流动, 故 SWPP 试验过程中示踪剂的对流弥散方程可以表示为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} (D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial C}{\partial z} - \\ & v_x C) + \frac{\partial}{\partial y} (D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial C}{\partial z} - \\ & v_y C) + \frac{\partial}{\partial z} (D_{zx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial C}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} - \\ & v_z C) \end{aligned} \quad (1)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, r_w < r < \infty, t > 0, \quad (2)$$

式中: C 为示踪剂的浓度 [ML^{-3}]; t 为时间 [T]; D_{ij} 分别为水动力弥散系数的张量 [L^2T^{-1}]; v_i 为含水层沿 i 方向的地下水达西流速, i 可以表示为 x, y, z 方向 [LT^{-1}]; r 为离井的径向距离 [L]. 模型中, 地下水为稳定流, 承压含水层左右边界设定为定水头边界, 含水层的上下边界为隔水边界, 分别为:

$$H(x, y)|_{S_1} = H_1, H(x, y)|_{S_2} = H_2, \quad (3)$$

$$K \frac{\partial H}{\partial n}|_{S_3} = 0, K \frac{\partial H}{\partial n}|_{S_4} = 0, \quad (4)$$

$$v_x = -KJ/\theta = v_d/\theta, \quad (5)$$

式中: S_1 和 S_2 是定水头边界, 如图 2 所示, 数值模型中水头分别设置为 H_1 和 H_2 ; S_3 和 S_4 为隔水边界; n 表示为边界 S_3 和 S_4 的外法线方向; v_x 为区域地下水流的实际流速 [LT^{-1}]; v_d 为达西流速 [LT^{-1}]; θ 为含水层的有效孔隙度 [-]; K 是含水层的渗透系数 [LT^{-1}]; J 是含水层的水力梯度 [-]. 实际地下水流速可通过改变 S_1, S_2 的水头并利用达西定律计算获得. 模型中抽/注的质量通量为:

$$N_0 = \frac{Q\rho}{2\pi r_w B}, \quad (6)$$

式中: N_0 为 SWPP 试验注/抽过程中井筒滤管单位面积进出的地下水质量通量 [$\text{ML}^{-2}\text{T}^{-1}$]; ρ 为地下水的密度 [ML^{-3}]; Q 为注抽/阶段的流量 [L^3T^{-1}], 注入阶段 Q 为正值, 抽出阶段为负值; r_w 为滤水管半径 [L]; B 为滤水管长度 [L].

另外, 对于溶质运移模型的初始条件:

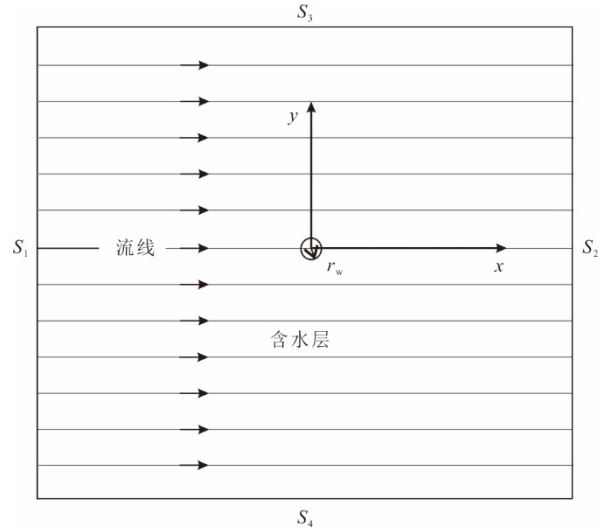


图 2 地下水水流示意图

Fig.2 Groundwater flow diagram

$$C_1(r, 0) = C_2(r, 0) = 0, r \geq r_w, \quad (7)$$

在注入阶段井内边界条件为:

$$C_1(r_w, t) = C_0, 0 < t < t_{inj}, \quad (8)$$

式中: C_0 为注入阶段示踪剂在井筒内的浓度 [ML^{-3}]; t_{inj} 为注入阶段的时间 [T].

由于在抽水阶段示踪剂进入滤管的流速会受到区域地下水流的影响, 使得示踪剂不均匀进入井筒. 因此在本数值模型中采用积分加权方法计算井筒内实际平均浓度, 表达式为:

$$\bar{C}_{pump} = \frac{\iint_{s_w} v_w C_w}{\iint_{s_w} v_w}, r = r_w, t_{drift} < t < t_{pump}, \quad (9)$$

式中: \bar{C}_{pump} 是井筒内示踪剂的平均浓度 [ML^{-3}]; s_w 是井筒内滤管的侧面积 [L^2]; v_w 为井筒滤管上不同位置的地下水流速 [LT^{-1}]; C_w 为井筒滤管上不同位置的示踪剂的浓度 [ML^{-3}].

本模型的范围为 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m} \times 4 \text{ m}$, 利用 COMSOL Multiphysics 软件建立非完整井条件下 SWPP 试验数值模型. 本模型网格采用自由四面体网格剖分, 抽注水井附近网格加密, 共有 577 020 个四面体网格, 如图 3 所示. 模型的主要参数设置为: $\theta = 0.3$, $Q_{inj} = 10 \text{ m}^3/\text{d}$, $Q_{pump} = -10 \text{ m}^3/\text{d}$, $t_{inj} = 6 \text{ h}$, $t_{ext} = 24 \text{ h}$, $M = 4 \text{ m}$. Wang and Zhan (2019) 利用 Laplace 变换以及 Green 函数获得 SWPP 两阶段稳定流模型的半解析解. 为了进一步验证本模型的准确性, 本文将不考虑地下水流速 ($H_1 = H_2$) 且完整井条件下的数值模型计算结果与 Wang and Zhan (2019) 的 SWPP 试验的解析解

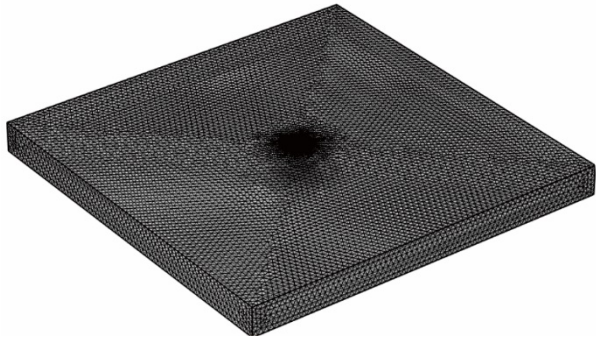


图 3 网格剖分三维示意图

Fig.3 Mesh generation in 3-D view

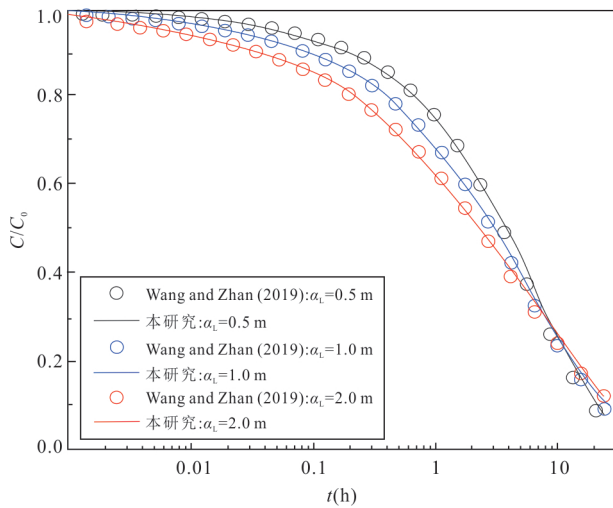


图 4 数值解与 Wang and Zhan (2019) 解析解的穿透曲线对比

Fig.4 Comparison of breakthrough curves between the numerical and analytical solutions Wang and Zhan (2019)

模型进行对比验证。如图 4 所示,数值模拟获得的穿透曲线与 Wang and Zhan (2019) 的计算结果很好地吻合,验证了数值模型的准确性。

2 结果与讨论

利用上述构建的 SWPP 试验理论模型,通过设置不同的参数来分析在不同地下水流速条件下滤水管长度及位置对 SWPP 试验穿透曲线以及示踪剂的空间分布特征的影响机理,其默认模型参数见表 1。

2.1 地下水流速对穿透曲线影响

对于非完整井的复杂条件下,没有相应 SWPP 试验解析模型来计算地下水流速,因此主要是通过拟合穿透曲线获取地下水流速。由于不同地下水流

表 1 模型中默认参数取值

Table 1 Default parameter values used in the model

参数	符号	值
含水层宽度(m)	W	50
含水层长度(m)	L	50
含水层厚度(m)	M	4
滤管长度(m)	B	2
含水层有效孔隙度	θ	0.3
含水层的渗透系数(m/d)	K	8
边界 S_1 的水头(m)	H_1	21.08
边界 S_2 的水头(m)	H_2	20
纵向弥散度(m)	α_L	0.1
注入与抽取的流量(m^3/d)	Q	15, 15
注入阶段时间(h)	t_{inj}	2
自由迁移时间(h)	t_{drift}	48
抽水阶段时间(h)	t_{pump}	48

速会导致溶质羽的运移情况发生改变,进而改变穿透曲线变化特征,因此有必要分析穿透曲线在非完整井条件下对地下水流速的响应程度。本研究地下水流速 v_d 分别设置为 $2.0 \times 10^{-6} m/s$ 、 $2.5 \times 10^{-6} m/s$ 、 $3.0 \times 10^{-6} m/s$ 、 $4.0 \times 10^{-6} m/s$ 、 $4.5 \times 10^{-6} m/s$ 、 $5.0 \times 10^{-6} m/s$ (Li *et al.*, 2019), 滤水管长度分别为 2 m (非完整井)、4 m (完整井)。模型其他参数设置为: $\alpha_L = 0.1 m$, $\theta = 0.3$, $Q_{inj} = 15 m^3/d$, $Q_{pump} = -15 m^3/d$ 。图 5 为完整井、非完整井条件下不同流速时示踪剂的穿透曲线,可以发现完整井和非完整井条件下地下水流速均对穿透曲线有较大影响,流速较小时,穿透曲线曲线呈现出单调衰减,地下水的流速越小则早期穿透曲线的浓度越高,这主要是由于地下水流速越小溶质羽迁移距离越近,导致抽水阶段抽水井附近示踪剂浓度越高。流速较大时,穿透曲线早期阶段有峰值显现(图 5b),且峰值的浓度随着地下水流速的增加而减小。此外,从图 5 中可以看出非完整井会导致 SWPP 试验的穿透曲线早期阶段浓度变低,穿透曲线会随流速的增大更早向第二类曲线转变,例如,当 $v_d = 2.5 \times 10^{-6} m/s$ 时,穿透曲线类型发生了明显变化。这主要是由于非完整井结构改变抽注水井附近的溶质运移规律,进而导致 SWPP 试验的穿透曲线发生较为明显的变化。

2.2 非完整井结构对穿透曲线的影响

2.2.1 非完整井长度 当抽/注水井没有贯穿整个含水层,只有部分的含水层能够通过滤管进出水,这势必会导致井筒附近的水流场发生变化,从而改变溶质的运移规律(顾昊琛等, 2020)。因此,本文通

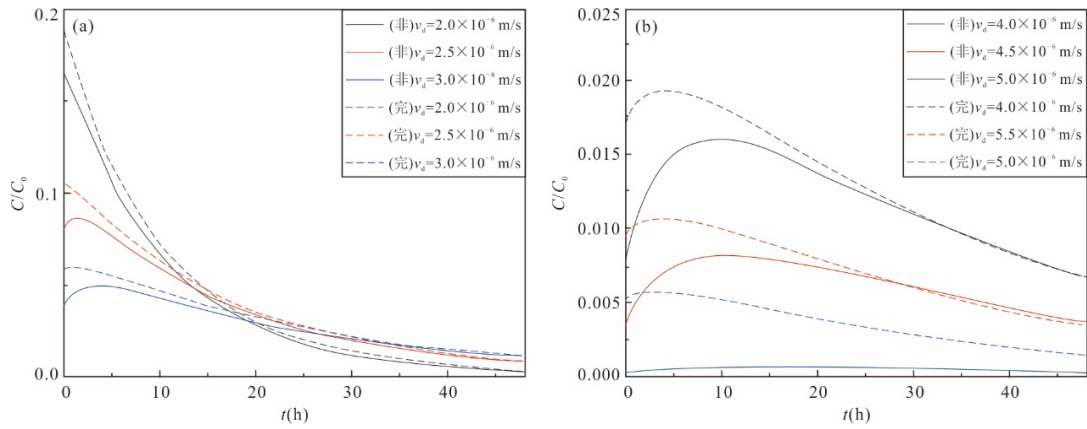


图 5 完整井、非完整井不同流速的穿透曲线

Fig.5 BTCs of fully and partially penetrating wells at different groundwater flow velocities
a. 低流速; b. 高流速

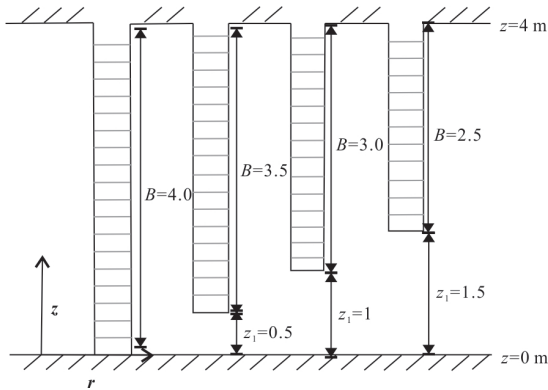


图 6 不同滤水管长度布置图

Fig.6 Layout of different filter pipe lengths

过改变滤水管长度来分析非完整井对 SWPP 试验穿透曲线的影响. 模型中滤水管的长度分别设置为 4 m

(完整井)、3.5 m、3 m 及 2.5 m, 而滤水管位置对应为 0~4 m、0.5~4 m、1~4 m 及 1.5~4 m (图 6), 其他参数见表 1. 图 7 为小流速 (2×10^{-6} m/s) 和大流速 (5×10^{-6} m/s) 两种条件下不同滤水管长度的 SWPP 试验穿透曲线. 从图中可以看出, 滤水管的长度对穿透曲线有明显的影响. 当地下水流速较小时, 滤水管长度越长, 示踪剂穿透曲线在早期浓度越高, 后期浓度越低. 对于较大地下水流速条件下, 滤水管长度越短, 穿透曲线浓度越低, 且峰值也不断减小. 这主要是由于在注入流量相同的条件下, 滤水管长度越短, 径向的地下水流速越大, 导致溶质在横向上迁移的距离越远 (详见下文 2.3 节). 因此, 溶质在自由迁移阶段受到地下水流的作用, 使得井筒附近溶质的浓度减小, 进而导致在抽水阶段穿透曲线浓度降低.

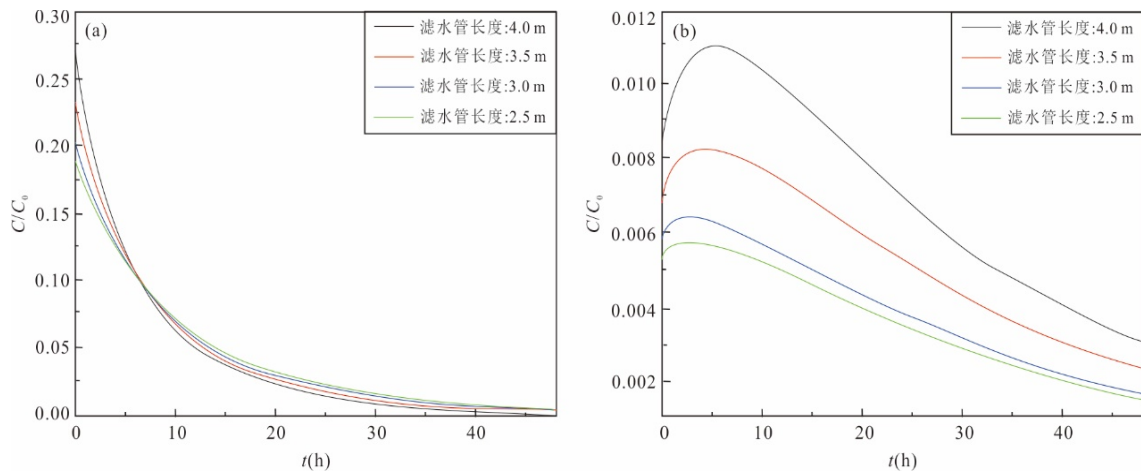


图 7 不同滤水管长度情况下的 SWPP 试验的穿透曲线

Fig.7 Breakthrough curves of SWPP tests for different lengths of filter pipe
a. 低流速; b. 高流速

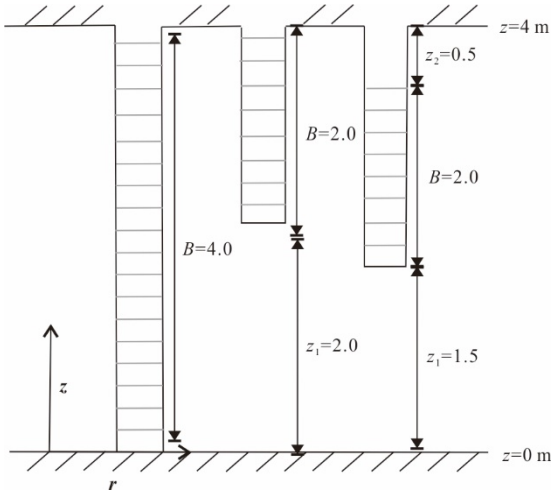


图 8 不同滤水管位置布置图
Fig.8 Different locations of filter pipe

2.2.2 非完整滤管位置 为了分析滤水管的位置对 SWPP 试验的影响,本文通过改变滤水管的位置来分析其对 SWPP 试验穿透曲线的影响.模型中滤水管长度为定值 2.0 m,位置分别位于 0~4 m(完整井)、2~4 m 及 1.5~3.5 m 处,如图 8 所示,其他参数见表 1.图 9 为小流速(2×10^{-6} m/s)和大流速(5×10^{-6} m/s)两种条件下不同滤水管位置 SWPP 试验的穿透曲线.由图 9 可知,在滤水管位置由承压含水层顶端不断向下移动过程中,穿透曲线早期溶质浓度不断减小,且在较大流速条件下穿透曲线的峰值也不断减小.结果表明非完整井滤管位置对 SWPP 试验有较大影响,其穿透曲线表现出不同的特征.

2.3 非完整井附近溶质的空间分布规律

为了进一步分析非完整井结构对 SWPP 试验获取地下水流速的影响机理,本文通过绘制注/抽水井附近溶质时空分布浓度等值线图,来揭示 SWPP 试验过程中非完整井附近的溶质分布规律.模型中滤水管的长度设置为 4 m(完整井)、3.5 m、3 m、2.5 m,位置对应设置为 0~4 m、0.5~4 m、1~4 m、1.5~4 m(图 6).图 10a 和图 10b 分别是 $v_d=2 \times 10^{-6}$ m/s 时注入阶段结束($t_{inj}=2$ h)和抽水井阶段开始($t_{pump}=0$ h)时不同滤水管长度条件下溶质空间分布浓度等值线图.从图中可以看出,当注/抽水井为非完整井时,注入阶段结束后,井底部溶质羽呈辐射状,这与完整井条件下的溶质羽的柱状分布明显不同.此外,通过对比不同滤水管长度条件下溶质空间分布浓度等值线图,可以发现滤水管长度越小溶质的横向迁移范围越大、而纵向迁移范围越小,这也是导致 SWPP 试验穿透曲线发生变化的主要原因.同时,示踪剂在注入过程中受到了区域地下水流场作用,导致溶质羽沿地下水流方向下游相比向上游迁移范围更大,使得溶质羽在空间上显示出不对称性(图 10a).这也进一步证实了 Paradis *et al.*(2019)认为 SWPP 试验注入阶段区域地下水流的作用不能忽视.对比图 10a 与图 10b,可以看出示踪剂在自由迁移阶段的作用下不断向下游迁移,溶质羽在对流弥散的作用下浓度不断减小,其基本形态没有发生明显变化,但溶质羽中心浓度在对流弥散的作用下不断减小.

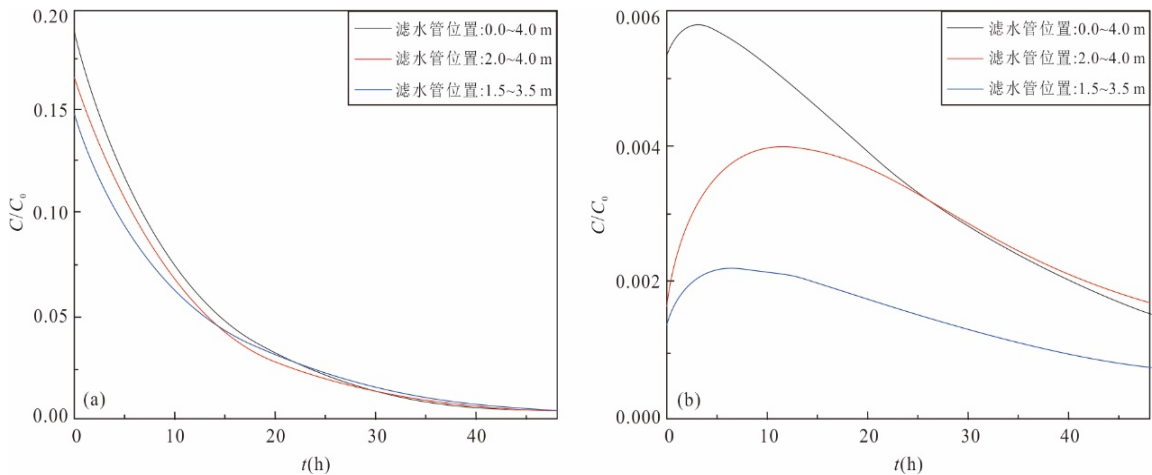


图 9 不同滤水管位置情况下的 SWPP 试验的穿透曲线
Fig.9 Breakthrough curves of SWPP tests for different location of filter pipe
a.低流速;b.高流速

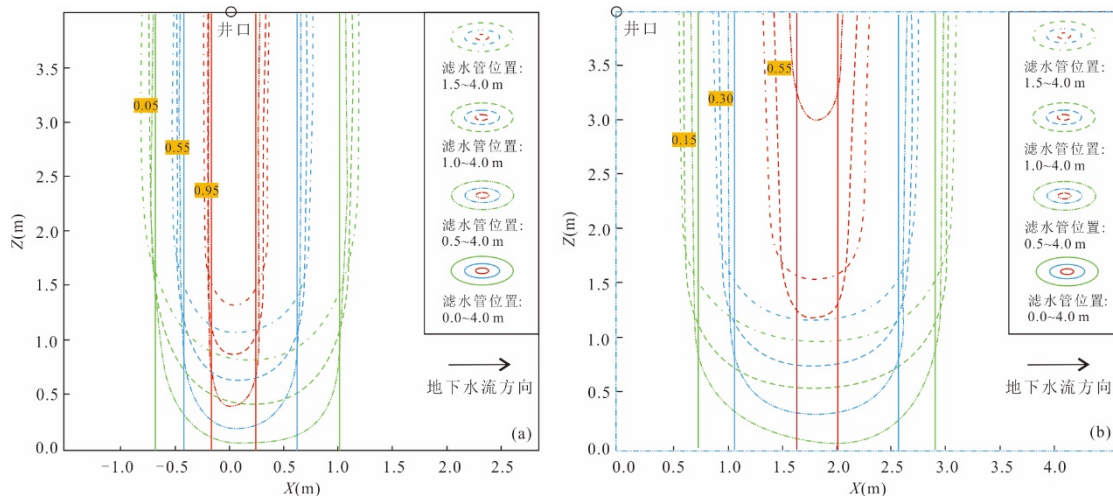


图 10 注入阶段结束(a)和抽水阶段开始(b)时溶质空间分布浓度等值线图

Fig.10 Contour map of the spatial distribution of solutes at the end of the injection phase (a) and at the beginning of the pumping phase (b)

3 室内试验结果与分析

3.1 室内试验设计

为了进一步验证模型的可靠性,本研究开展了非完整井条件的室内 SWPP 试验.实物装置如图 11 所示,有机玻璃管安装在矩形槽中心,位于含水层段管壁均匀分布出水孔来模拟抽、注水井的滤管,同时抽/注水井不贯穿整个含水层,仅有部分含水层能够通过滤水管进/出水,含水层厚度为 20 cm,滤管长度为 10 cm;试验前,将石英砂填入矩形槽装置中,填充压实,上覆一层粘土层,模拟承压含水层系统;介质填充完毕后,对其进行饱水,待饱水完毕后,保持两端水头固定,直到水流达到稳定状态,利用量筒测算含水层的地下水流速,根据达西定律可获取含水层的渗透系数 K ,多次试验取平均 K 为 $0.000\ 551\ \text{m/s}$;选取 NaCl 溶液作为示踪剂,进行示踪试验.试验主要操作步骤如下:

(1) 注入阶段:矩形槽两端水头差分别为 1.5 cm,并形成稳定的地下水流场;用容量瓶配置 NaCl 溶液,浓度为 $0.256\ 8\ \text{mol/L}$ ($15\ \text{g/L}$),并测量电导率;在初始时刻通过蠕动泵将 NaCl 溶液从井中定流量 ($3.26\ \text{mL/s}$) 注入,持续 2 min.

(2) 自由迁移阶段:停止注入 NaCl 溶液,使 NaCl 溶液随地下水的流动自由迁移,时间为 25 min.

(3) 抽水阶段:自由迁移阶段完成后,调整蠕动泵流量,定流量 ($3.26\ \text{mL/s}$) 从井中抽水,用小烧杯取少量的水样,按时间顺序编号;利用电导率仪监测示踪剂的浓度,当浓

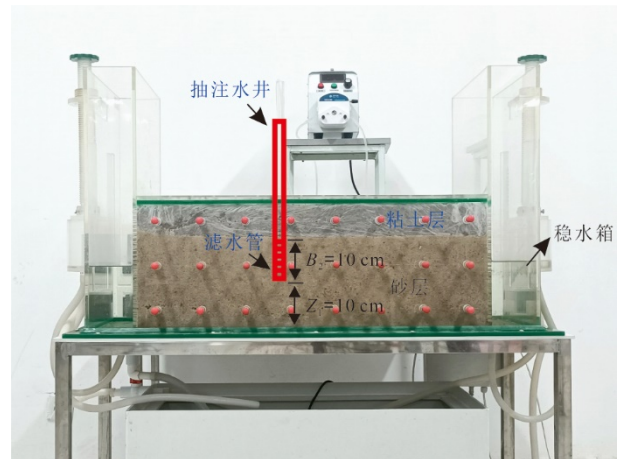


图 11 试验装置示意图

Fig.11 Schematic diagram of the experimental setup

度达到含水层背景值时停止,并记录相应时刻的数值,绘制示踪剂浓度变化曲线.

本文分析了 2 种条件下 SWPP 试验示踪剂穿透曲线的变化规律:(1)不同地下水流速,即在注入阶段矩形槽两端水头差分别为 1.0 cm、1.5 cm 以及 2.0 cm,对应地下水流速分别为 $6.89 \times 10^{-6}\ \text{m/s}$ 、 $1.03 \times 10^{-5}\ \text{m/s}$ 、 $1.37 \times 10^{-5}\ \text{m/s}$,其他试验设置不变;(2)不同迁移时间,即在第二阶段迁移时间分别设置为 10 min、15 min 以及 30 min,其他试验设置不变.

3.2 试验结果与参数反演

由图 12 可以发现,随着地下水流速增大,抽水阶段示踪剂的初始浓度不断减小,与数值模拟的结果一致.此外,对比不同自由迁移时间条件下的穿透曲线(图 13),发现随着迁移时间的增长,抽水阶

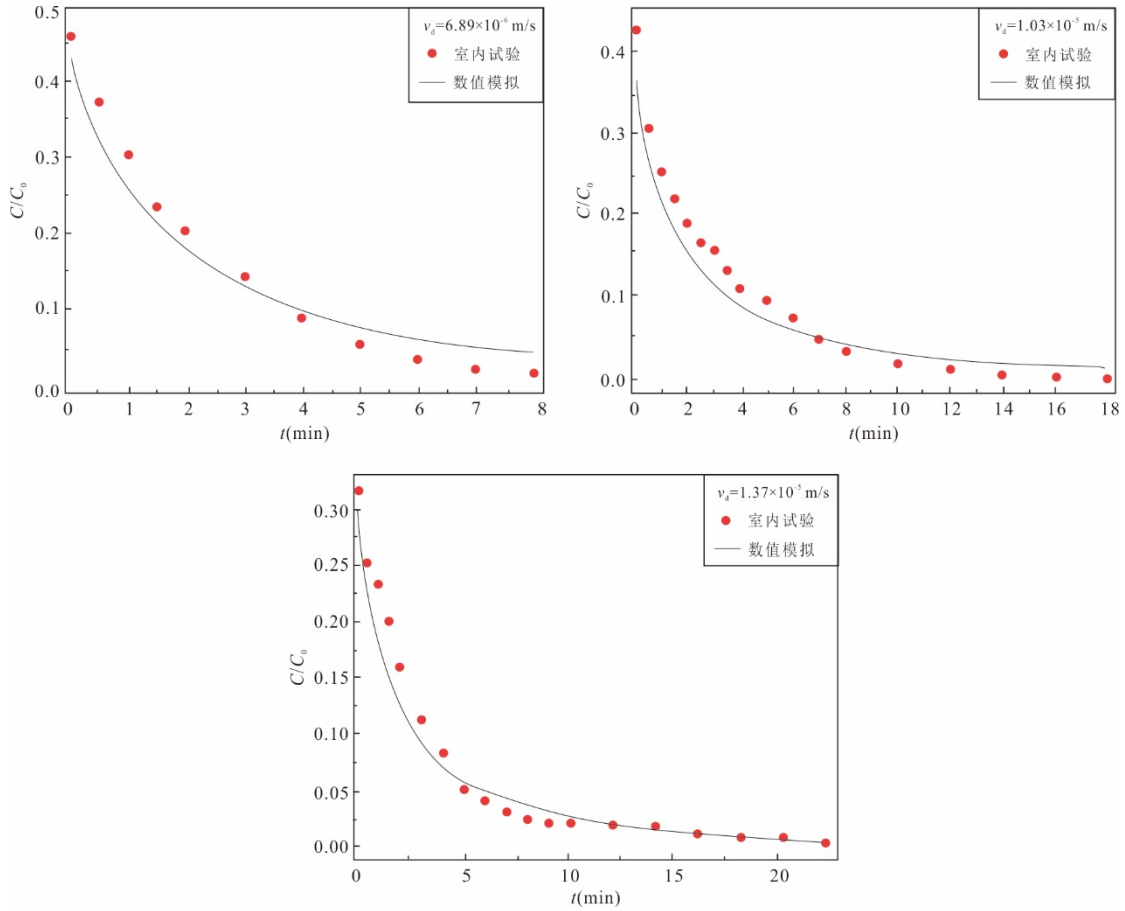


图 12 不同地下水流速($t_{\text{drift}}=25 \text{ min}$)条件下实测数据拟合

Fig.12 Fitting of observed data with different groundwater velocities ($t_{\text{drift}}=25 \text{ min}$)

段示踪剂的初始浓度不断减小,主要原因为第二阶段自由迁移时间越长,示踪剂溶质羽运向下游迁移距离越远,井筒附近的示踪剂浓度越低,故在相同地下水流作用下,抽水阶段的示踪剂浓度越小.为了验证非完整井SWPP试验数值模型的可靠性以及利用数值模拟反演地下水流速的可行性,本研究将室内试验模型的相关参数代入数值模型,分3个阶段进行模拟计算.通过该模型拟合示踪剂穿透曲线来反演含水层水文地质参数,本文通过试算法不断识别模型中的相关参数,如图12、图13所示.

SWPP试验模型包括3个拟合参数,分别为地下水流速(v_d)、有效孔隙度(θ)以及纵向弥散度(α_L).图12、图13为SWPP试验示踪剂穿透曲线实测与数值模型拟合结果,为了判断拟合优度,本文利用决定系数 r^2 来表征,其表达式为:

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (C_{\text{obs}} - C_{\text{sim}})^2}{\sum_{i=1}^N (C_{\text{obs}} - \bar{C}_{\text{obs}})^2}, \quad (10)$$

式中: C_{obs} 和 C_{sim} 分别为溶质的实际观测值和模拟值 $[\text{ML}^{-3}]$; \bar{C}_{obs} 是所有实际观测值的平均值 $[\text{ML}^{-3}]$; N 为实际观测的样本个数.

结果显示决定系数 r^2 的值为0.900~0.978,表明不同条件下数值模型拟合实测数据精度较高.表2、表3为数值模拟计算结果,不同地下水流速条件下砂层的弥散为0.017~0.018 m,平均为0.0177 m,有效孔隙度为0.425~0.435,平均为0.430;不同迁移时间条件下砂层的弥散为0.0145~0.0200 m,平均为0.0175 m,有效孔隙度为0.428~0.440,平均为0.435,且地下水流速为 $8.954 \times 10^{-6} \sim 9.643 \times 10^{-6} \text{ m/s}$,平均为 $9.298 \times 10^{-6} \text{ m/s}$.

为了进一步验证SWPP试验的参数计算误差,定义了相对误差参数 $E_v = |v_d - v_{\text{obs}}|/v_{\text{obs}}$, $E_\theta = |\theta - \theta_{\text{obs}}|/\theta_{\text{obs}}$,其中 v_d, v_{obs} 分别为地下水流速的模拟和观测值, $\theta, \theta_{\text{obs}}$ 分别为有效孔隙度的模拟和观测值,且 E_v 与 E_θ 为地下水流速与有效孔隙度的相对误差,该参数反映计算值与实际值之间的差异程度.其中承压含水层地下水流速利用量

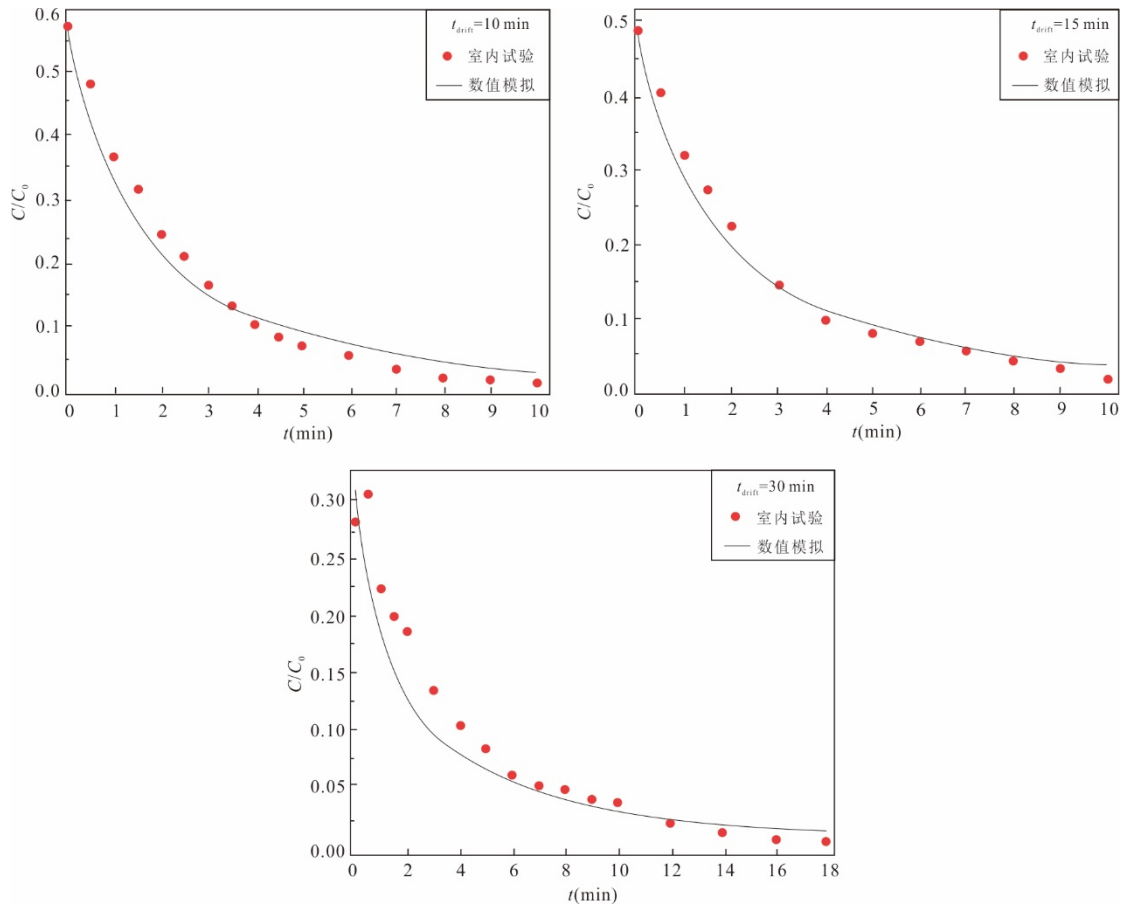


图 13 不同自由迁移时间($v_d=1.03 \times 10^{-5}$ m/s)条件下实测数据拟合
 Fig.13 Fitting of observed data with different rest times ($v_d=1.03 \times 10^{-5}$ m/s)

表 2 不同地下水流速数值模拟结果

Table 2 Numerical simulation results with different groundwater velocities

室内实测值			数值模拟值			r^2	$E_v(\%)$	$E_\theta(\%)$
$t_{rest}(\text{min})$	$v_{obs}(\text{m/s})$	θ_{obs}	$v_s(\text{m/s})$	θ	$\alpha_L(\text{m})$			
25	6.89×10^{-6}	0.443	7.576×10^{-6}	0.435	0.017	0.953	9.96	1.81
25	1.03×10^{-5}	0.443	9.643×10^{-6}	0.430	0.018	0.933	6.38	2.93
25	1.37×10^{-5}	0.443	1.309×10^{-5}	0.425	0.018	0.949	4.48	4.06

表 3 不同自由迁移时间数值模拟结果

Table 3 Numerical simulation results with different rest times

室内实测值			数值模拟值			r^2	$E_v(\%)$	$E_\theta(\%)$
$t_{rest}(\text{min})$	$v_{obs}(\text{m/s})$	θ_{obs}	$v_s(\text{m/s})$	θ	$\alpha_L(\text{m})$			
10	1.03×10^{-5}	0.443	9.298×10^{-6}	0.437	0.014	0.978	9.73	1.35
15	1.03×10^{-5}	0.443	8.954×10^{-6}	0.440	0.020	0.975	13.07	0.68
30	1.03×10^{-5}	0.443	9.643×10^{-6}	0.428	0.018	0.900	6.38	3.39

筒测算获得,实际有效孔隙度采用体积置换法获得.不同条件下平均 E_v 与 E_θ 分别为 8.33% 与 2.37%,计算结果显示该试验的计算误差较小,表明利用 SWPP 试验可以较为精确地获取含

水层的地下水流速、有效孔隙度以及弥散度.

4 结论

本文利用 COMSOL Multiphysics 软件建立了

非完整井条件下三维 SWPP 试验数值模型,分析了非完整井结构对 SWPP 试验穿透曲线的影响,以及非完整井附近 SWPP 试验过程中溶质的分布规律,并且验证了模型的准确性.开展了不同流速以及不同自由迁移时间条件下的室内 SWPP 试验,进一步来验证模型可靠性以及非完整井对 SWPP 试验获取地下水流速的影响机理.主要结论如下:

(1)不同区域地下水流速会导致 SWPP 试验的穿透曲线发生明显变化,大流速时穿透曲线早期阶段会有峰值,且流速越大,穿透曲线浓度越小;非完整井结构会导致穿透曲线在早期时的浓度明显偏低,说明非完整井对 SWPP 试验影响较大,实际应用过程不容忽视.

(2)当地下水流速较小时,滤水管长度越小,穿透曲线在早期阶段浓度越低,后期浓度越高;地下水流速较大时,滤水管长度越小,穿透曲线浓度越小;此外,非完整井滤管在不同位置,穿透曲线也会发生明显的变化,其主要原因是非完整井附近的溶质发生不规则的迁移.

(3)非完整井附近的不规律径向溶质运移,对 SWPP 试验的穿透曲线有显著影响,必然导致传统的完整井 SWPP 试验模型的参数反演误差增大,本文建立的非完整井 SWPP 试验模型能够很好刻画非完整井附近复杂的溶质运移规律,在实际应用时拟合决定系数均大于 0.900,且地下水流速与有效孔隙度的计算平均误差为 8.33% 和 2.37%,说明参数反演的误差较小,进一步验证了非完整井 SWPP 试验模型的可靠性.

References

- Chen, K. W., Zhan, H. B., Yang, Q. A., 2017. Fractional Models Simulating Non-Fickian Behavior in Four-Stage Single-Well Push-Pull Tests. *Water Resources Research*, 53(11): 9528–9545. <https://doi.org/10.1002/2017wr021411>
- Fan, C.H., Gao, Y.L., Fan, Q., 2017. Regression Analysis of Flow Velocity and Initial Concentration about Repair Lead Contaminated Groundwater with Permeable Reactive Barrier. *Journal of Shaanxi University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 35(2): 23–27, 55 (in Chinese with English abstract).
- Gelhar, L. W., Collins, M. A., 1971. General Analysis of Longitudinal Dispersion in Nonuniform Flow. *Water Resources Research*, 7(6): 1511–1521. <https://doi.org/10.1029/wr007i006p01511>
- Gu, H.C., Wang, Q.R., Zhan, H.B., 2020. An Improved Approach in Modeling Injection-Withdraw Test of the Partially Penetrating Well. *Earth Science*, 45(2): 685–692 (in Chinese with English abstract).
- Hall, S. H., Luttrell, S. P., Cronin, W. E., 1991. A Method for Estimating Effective Porosity and Ground-Water Velocity. *Groundwater*, 29(2): 171–174. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1991.tb00506.x>
- Huang, J. Q., Christ, J. A., Goltz, M. N., 2010. Analytical Solutions for Efficient Interpretation of Single-Well Push-Pull Tracer Tests. *Water Resources Research*, 46(8): W08538. <https://doi.org/10.1029/2008wr007647>
- Leap, D. I., Kaplan, P. G., 1988. A Single-Well Tracing Method for Estimating Regional Advective Velocity in a Confined Aquifer: Theory and Preliminary Laboratory Verification. *Water Resources Research*, 24(7): 993–998. <https://doi.org/10.1029/wr024i007p00993>
- Li, X., Su, S.L., Wen, Z., et al., 2022. Numerical Analysis of Estimating Groundwater Velocity through Single-Well Push-Pull Test. *Earth Science*, 47(2):633–641 (in Chinese with English abstract).
- Li, X., Wen, Z., Zhan, H. B., et al., 2019. Skin Effect on Single-Well Push-Pull Tests with the Presence of Regional Groundwater Flow. *Journal of Hydrology*, 577: 123931. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123931>
- Matsumoto, S., Machida, I., Hebig, K. H., et al., 2020. Estimation of Very Slow Groundwater Movement Using a Single-Well Push-Pull Test. *Journal of Hydrology*, 591: 125676. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125676>
- Pang, Z.H., Kong, Y.L., Pang, J.M., et al., 2017. Geothermal Resources and Development in Xiongan New Area. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 32(11): 1224–1230 (in Chinese with English abstract).
- Paradis, C. J., McKay, L. D., Perfect, E., et al., 2018. Push-Pull Tests for Estimating Effective Porosity: Expanded Analytical Solution and In Situ Application. *Hydrogeology Journal*, 26(2): 381–393. <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1672-3>
- Paradis, C. J., McKay, L. D., Perfect, E., et al., 2019. Correction: Push-Pull Tests for Estimating Effective Porosity: Expanded Analytical Solution and In Situ Application. *Hydrogeology Journal*, 27(1): 437–439. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1879-y>
- Shi, X.Q., Jiang, B.L., Wu, J.C., et al., 2012. Numerical Analysis of the Effect of Leakage Rate on Dense Non-Aqueous Phase Liquid Transport in Heterogeneous Porous Media. *Advances in Water Science*, 23(3): 376–

- 382 (in Chinese with English abstract).
- Shu, L.C., Zhang, Y.J., Xu, Y., et al., 2017. Experimental Studies on Gas-Clogging Characteristics during Groundwater Artificial Recharge. *Advances in Water Science*, 28(5): 756–762 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q. R., Zhan, H. B., 2019. Reactive Transport with Wellbore Storages in a Single-Well Push-Pull Test. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(4): 2207–2223. <https://doi.org/10.5194/hess-23-2207-2019>
- Zhang, W., Shi, X.Q., Wu, J.F., et al., 2013. Impacts of the Spatial Variation of Permeability on the Transport of Dense Non-Aqueous Phase Liquids in Porous Media. *Geological Journal of China Universities*, 19(4): 677–682 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Xu, B., Liu, X.H., 2018. Groundwater Contamination and Human Health Risk Assessment in Jinghui Irrigation District, Shaanxi Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 48(5): 1451–1464 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 范春辉, 高雅琳, 樊琼, 2017. 流速和初始浓度对可渗透反应墙修复模拟铅污染地下水的回归分析研究. *陕西科技大学学报(自然科学版)*, 35(2): 23–27, 55.
- 顾昊琛, 王全荣, 詹红兵, 2020. 非完整井下单井注抽试验数值模拟方法改进. *地球科学*, 45(2):685–692.
- 李旭, 苏世林, 文章, 等, 2022. 单井注抽试验测算地下水流速的数值分析. *地球科学*, 47(2):633–641.
- 庞忠和, 孔彦龙, 庞菊梅, 等, 2017. 雄安新区地热资源与开发利用研究. *中国科学院院刊*, 32(11): 1224–1230.
- 施小清, 姜蓓蕾, 吴吉春, 等, 2012. 非均质介质中重非水相污染物运移受泄漏速率影响数值分析. *水科学进展*, 23(3): 376–382.
- 束龙仓, 张永杰, 许杨, 等, 2017. 地下水人工回灌气相堵塞特征的试验研究. *水科学进展*, 28(5): 756–762.
- 张蔚, 施小清, 吴剑锋, 等, 2013. 渗透率空间变异性对重非水相流体运移的影响. *高校地质学报*, 19(4): 677–682.
- 张艳, 徐斌, 刘秀花, 2018. 陕西省泾惠渠灌区地下水污染与人体健康风险评价. *吉林大学学报(地球科学版)*, 48(5): 1451–1464.