

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2024.03.001

大口径单井注抽试验求参过程中井底流和 混溶效应的综合影响

文章, 朱 棋

WEN Zhang, ZHU Qi

中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074

School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China

摘要: 单井注抽(single-well push-pull, SWPP)试验因其成本低、周期短以及操作简单的优点,被广泛用于求取含水层弥散度等水文地质参数。依托干旱半干旱区常用的大口径井开展 SWPP 试验,常面临井底流渗漏和井筒混溶效应共同的影响。为此,本研究构建了同时考虑井底流和混溶效应的 SWPP 试验三阶段溶质运移模型,利用有限差分法对模型进行求解,并利用前人的渗流和溶质运移模型解析解验证其准确性,随后依托该模型探究大口径井附近渗流特征及井尺寸对 SWPP 试验的影响机制。研究结果表明:(1)新提出的考虑井底流的 SWPP 试验模型对抽水过程降深以及井壁处溶质运移过程的刻画,同前人解析解匹配良好,表明了该模型构建及求解的准确性;(2)随着井筛长度的逐渐减小,井底流对含水层整体流场的影响程度逐渐增大,流场从径向逐渐转变为球形流场;(3)粗井径相比细井径,注入阶段井中的溶质 BTC(Breakthrough curve, 穿透曲线)值更小,但抽出阶段的溶质 BTC 更大,井中混溶过程相比井底渗漏过程对 SWPP 试验的影响更为显著;(4)当井深小到井径的一半左右时产生类球形流场,井底的渗漏过程相比混溶过程对 SWPP 试验可能存在更为显著的影响;(5)对于本研究设置的模拟场景,即使不存在井底流,前人的解析解由于忽略井筒混溶,对弥散度的解译仍存在 152.5% 的误差,而随着井底埋深逐渐减小,井底流导致前人解析解的误差也逐渐增大。

关键词: 单井注抽试验; 大口径; 井底流; 混溶效应; 有限差分法

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2024)-03-0435-10

Wen Z and Zhu Q. 2024. Combined Effects of Bottom Flow and Wellbore Mixing on the Single-well Push-pull Test Using Large-diameter Well. *South China Geology*, 40(3): 435-444.

Abstract: The single-well push-pull (SWPP) test is widely used for determining hydrogeological parameters such as dispersivity coefficient due to its advantages of low cost, short duration, and simple operation. Conducting SWPP experiments in large-diameter wells, commonly used in arid and semi-arid regions, often faces the combined effects of leakage at the well bottom and wellbore mixing. To address this, this study constructed a three-stage solute transport model for the SWPP test that considers both the influences of flow at the well bottom and wellbore mixing effects. The model was solved using the finite difference method, and its accuracy was verified against the analytical solutions of previous seepage and solute transport models. Subsequently, the study explored the seepage characteristics near large-diameter wells and the impact

收稿日期: 2024-07-08; 修回日期: 2024-08-19

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年基金项目(No.42022018),湖北省重点研发计划项目(No.2022BCA073)

第一作者: 文章(1982—),男,教授,主要从事地下水动力学及溶质反应迁移研究, E-mail: wenz@cug.edu.cn, ORCID: 0000-0001-9672-3219

mechanism of well size on the SWPP test based on this model. The research results showed that: (1) The newly proposed SWPP test model, which considers well bottom flow, matches well with previous analytical solutions in depicting the drawdown process during pumping and the solute transport process at the well screen, indicating the accuracy of the model's construction and solution. (2) As the length of the well screen gradually decreases, the influence of the well bottom flow on the entire flow field gradually increases, changing the flow field from radial to spherical. (3) Compared to a small well diameter, a larger well diameter results in a smaller breakthrough curve (BTC) value for solutes during the injection phase, but a larger BTC during the extraction phase, indicating that the mixing process within the well has a more significant impact on the SWPP test than the leakage process at the well bottom. (4) When the well depth is about half of the well diameter, creating a quasi-spherical flow field, the leakage process at the well bottom may have a more significant impact on the SWPP test than the mixing process. For the simulated scenarios set in this study, even in the absence of bottom flow, the previous analytical solution, due to the neglect of wellbore miscibility, still have an error of 152.5% in the interpretation of dispersivity coefficient. Moreover, as the burial depth of the wellbore bottom gradually decreases, the error in the previous analytical solution caused by the bottom flow also increases gradually.

Key words: single-well push-pull test; well with large diameter; well bottom flow; mixing effect; finite difference method

精准获取含水层中污染物运移相关的水文地质参数,对于预测地下水污染物运移过程、制定水质保护措施具有重要的意义(薛禹群和吴吉春, 1999; Lin J J et al., 2023)。当前获取地下水污染物运移参数往往借助“井”这一媒介,常用方法包括注入井-观测井试验和单井注抽(Single-well push-pull, SWPP)试验。其中,SWPP试验是在同一口试验井中先后注入、抽出示踪剂,并监测示踪剂浓度随时间变化的穿透曲线(Break through curve, BTC)的过程,通过场地实测 BTC 和理论模拟 BTC 之间的拟合反演出目标含水层的孔隙度、弥散度等溶质运移相关参数,可广泛应用于除低渗介质以外的多种介质类型的含水层,相比注入井-观测井试验,具有成本更低、操作更简便、花费时间更短的优势(李旭, 2020)。对于 SWPP 试验,除保证试验开展过程中示踪剂的精准投放与测定外,针对 SWPP 试验开发准确的 BTC 解译模型是参数精确反演的保障。

在干旱半干旱地区,0.5~2 m 的大口径开采井较为普遍(江思珉等, 2010),井管的储水量对抽水试验的影响已受到广泛关注(Papadopoulos and Cooper, 1967; 文章等, 2009)。对于厚度较大的含

水层,出于节省成本的考虑,大口径开采井的井筛往往无法完全贯穿含水层,与此同时,这类井的井底也往往不采取封堵措施,这就引发了众多学者关于大口径“井底流”,即部分地下水流从井底而非井壁进入井筒的研究,这其中就涉及对井周流场的刻画(Gupta and Singh, 1988),井筒及井周地下水降深表达式的开发与求解(Barua and Hoffmann, 2005; Singh, 2007)以及井壁附近表皮效应影响下的井流动力学过程(Barua and Bora, 2010)等内容研究。这些研究均表明,井底流的存在导致已有的 Theis 井流模型或是井储模型(Papadopoulos and Cooper, 1967)等经典井流模型在刻画抽水过程中的流场或降深时,存在无法忽视的误差,例如在常规水文地质条件及井筒工艺下能导致渗透系数高达 88% 的求取误差(Barua and Hoffmann, 2005)。这个误差还体现在,井筛长度减小 1 倍,能导致井底流量在一定的抽水时长后增加超过 1 倍以上(Singh, 2007),反映出井底流的重要性。

在地下水资源紧缺地区,上述大口径供水井常常用于开展井流试验,这其中也包括目标含水层中的 SWPP 试验,来服务于地下水污染防治工

作中溶质运移相关参数的获取。考虑到 SWPP 试验模型的准确性对于参数获取的重要性, 已有的研究对 SWPP 试验开展了大量的模型开发与求解工作, 尤其是含水层和井筒相关的单一或多因素耦合作用下的 SWPP 试验模型。这些因素包括地下水周围流(Wang Q R et al., 2021; 李旭等, 2022; 苏世林等, 2024)、弱透水层越流(刘玉舒等, 2020; Wang Q R et al., 2020; Zhu Q et al., 2020)、微生物堵塞(阳畅等, 2023)、非达西渗流(Wang Q R et al., 2017)、非完整井(Chen Y and Wang Q R, 2021)、井筒混溶效应(Wang Q R et al., 2018; Shi W G et al., 2020; 2022)及其和井壁表皮效应的耦合(顾昊琛和凡倩莹, 2023; Shi W G et al., 2023)等等。部分上述模型已考虑到井筒中储存的水体引起的示踪剂混溶过程, 即由于井筒中水的体积不能忽略而导致井中溶质浓度随抽注过程不断发生变化的过程, 例如肖勋等(2020)通过数值模拟研究表明, 当井筒半径由 3 cm 增加至 6 cm, 忽略井筒中混溶过程时, 含水层中溶质浓度能出现 18%~45% 的计算误差。尽管这些模型已经关注到井筒混溶过程的影响, 但一方面井筒还远远达不到上文提到的大口径井的尺寸, 另一方面这些 SWPP 试验模型的研究也并未考虑井筒与含水层在井底处的水流交互过程。有关大口径抽水井附近渗流相关的研究已经表明, 忽略井底流会导致大口径井筒和含水层之间水流交换量计算的显著误差, 而水流作为 SWPP 试验中溶质运移的唯一载体, 其必然影响 SWPP 试验求参的准确性。因此, 有必要在已有的大口径井流模型基础上, 进一步开发能同时考虑井底流及溶质混溶过程的 SWPP 试验新模型。

对于大口径抽水井附近的渗流过程, 较为经典的模型求解方法是通过将井周划分为井壁附近和井底附近两块区域, 并引入傅里叶变换等解析方法进行求解(Barua and Hoffmann, 2005; Barua and Bora, 2010)。将渗流模型“两区”的求解思路应用于溶质运移模型时, 两区界面处的溶质连续性方程会加剧模型求解的非线性难度, 这是前人仅考虑 SWPP 井壁附近溶质运移过程的解析法(Shi W G et al., 2020; Chen Y and Wang Q R,

2021)难以解决的。与解析法不同, 数值法不依赖于从数学的角度对控制方程进行硬解, 其网格或节点的刻画方式更加有利于大口径井底流 SWPP 试验模型所需要的分区求解需求。

综上所述, 尽管 SWPP 试验当中的各类因素的影响机制已得到充分认识, 且各类 SWPP 试验解析模型已被广泛开发, 但大口径 SWPP 试验在井筒混溶效应影响下, 井底流对求参过程的影响还不明确, 且该情形下的 SWPP 试验解译模型尚且难以通过前人的解析方法进行准确求解。为此, 本研究将首先构建大口径 SWPP 试验渗流与溶质运移数学模型, 依托 matlab 代码对井壁和井底附近区域进行剖分, 并采用有限差分的手段对模型进行求解。随后, 通过现有的模型结果对该新模型进行校验, 并利用该模型的模拟结果揭示井底流对大口径 SWPP 试验求参精确度的影响机制。

1 分析方法

1.1 大口径 SWPP 试验数值模型的建立

以承压含水层为例, 假定该含水层均质各向异性、等厚且径向无限延伸, 不存在垂向上的入渗补给。大口径井并未完全揭露含水层且井底透水, 井底以下存在一定的集水区域。在含水层所有区域, 渗流均满足达西定律。初始水位为静止且水平状态, 所用的示踪剂为 NaCl, 即发生吸附和反应的惰性示踪剂。本研究的 SWPP 试验分为三个阶段, 分别为示踪剂的注入阶段、驱赶阶段和抽出阶段, 三者依次发生(图 1), 其中驱赶阶段使用纯水将井筒中残留的示踪剂进一步驱赶至含水层中, 前人研究表明了设置该过程的重要性(Hebig et al., 2015; Wang Q R et al., 2017)。

(1) 大口径井 SWPP 试验地下水渗流模型

依托上述假设条件, 首先构建大口径井稳定流 SWPP 试验地下水渗流模型, 如图 1 所示, 构建 r - z 的柱坐标系, 坐标原点位于井轴与承压含水层底部的交点, 则地下水渗流连续性方程可描述为:

$$K_r \frac{\partial^2 H_p}{\partial r^2} + \frac{K_r}{r} \frac{\partial H_p}{\partial r} + K_z \frac{\partial^2 H_p}{\partial z^2} = \mu_s \frac{\partial H_p}{\partial t}, \quad p = 1, 2 \quad (1)$$

$$H_1 = H_2 = H_0, t = 0 \quad (2)$$

$$H_2 = H_0, r \rightarrow \infty \quad (3)$$

$$\frac{\partial H_2}{\partial z} = 0, z = 0, r > r_w \quad (4)$$

$$\frac{\partial H_2}{\partial z} = 0, z = M, r > r_w \quad (5)$$

$$\frac{\partial H_1}{\partial r} = 0, r = 0, 0 < z < b \quad (6)$$

$$\frac{\partial H_1}{\partial z} = 0, z = 0, 0 < r < r_w \quad (7)$$

$$H_1 = H_w, z = b, 0 < r < r_w \quad (8)$$

$$H_1 = H_2, r = r_w, 0 < z < b \quad (9)$$

$$K_r \frac{\partial H_1}{\partial r} = K_r \frac{\partial H_2}{\partial r}, r = r_w, 0 < z < b \quad (10)$$

式(1)中, r 和 z 分别为径向和垂向的坐标值(L), t 为时间(T), K_r 和 K_z 分别为径向和垂向上的渗透系数(L/T), μ_s 为单位弹性给水度(1/L), H 为承压含水层的水头(L), i 指示井筒附近不同区域的序号, 如图 1 中的“①”和“②”所示, $p=1$ 为井底区域, 即 $r = 0 \sim r_w, z = 0 \sim b$ 的区域, 其中 b 为井底至含水层底板的距离(L); $p=2$ 为井壁附近区域, 即 $r = r_w \sim \infty, z = 0 \sim M$ 的区域。式(2)为模型的初始条件, 即初始两个区域的水头均等于初始水头 H_0 (L); 式(3)~(5)分别为区域 2 的外边界、下边界和上边界条件; 式(6)和(7)分别为区域 1 的左边界和下边界条件, M 为含水层的厚度(L); 式(8)为区域 1 的上边界条件, 其中 H_2 为井筒中的水头(L); 式(9)和(10)分别为区域 1 和 2 在交界位置的水头和流速连续性边界。本文考

虑大口径井的井储效应, 且流入井中的水通量由井壁和井底两部分的通量组成, 其表达式为:

$$2\pi r_w(M-b)K_r \frac{\partial H}{\partial r} \Big|_{r=r_w} + \sum_0^{r_w} d(\pi r^2)K_z \frac{\partial H}{\partial z} \Big|_{z=b} + \pi r_w^2 \frac{\partial H_w}{\partial t} = Q \quad (11)$$

式中, 假定套管的尺寸相比井筒可以忽略, Q 为 SWPP 第三阶段抽水的速率(L³/T), 对于第一、二阶段的注水, 式(11)中等号右边则为 $-Q$ 。

(2)大口径井 SWPP 试验溶质运移模型

在上述地下水渗流模型的基础上, 进一步开发此情景下的 SWPP 试验溶质运移模型, 其表达式为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(D_{rr} \frac{\partial C_p}{\partial r} + D_{rz} \frac{\partial C_p}{\partial z} - v_r C_p \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zr} \frac{\partial C_p}{\partial r} + D_{zz} \frac{\partial C_p}{\partial z} - v_z C_p \right] = \frac{\partial C_p}{\partial t} \quad (12)$$

式(12)中, C_p 代表区域 1 或 2 中的示踪剂浓度(M/L³); v_r 和 v_z 分别为章节 1.1 中求得水头后再利用达西定律求得的地下水实际流速(L/T); D_{rr} 、 D_{rz} 、 D_{zr} 、 D_{zz} 分别为径向或垂向主轴上弥散系数在彼此方向上的分量(L²/T), 表达式分别为:

$$D_{rr} = \alpha_L \frac{v_r^2}{|v|} + \alpha_T \frac{v_z^2}{|v|} \quad (13)$$

$$D_{rz} = D_{zr} = (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_r \cdot v_z}{|v|} \quad (14)$$

$$D_{zz} = \alpha_L \frac{v_z^2}{|v|} + \alpha_T \frac{v_r^2}{|v|} \quad (15)$$

上述溶质模型控制方程搭配下列初始条件和边界条件:

$$C_1 = C_2 = 0, t = 0 \quad (16)$$

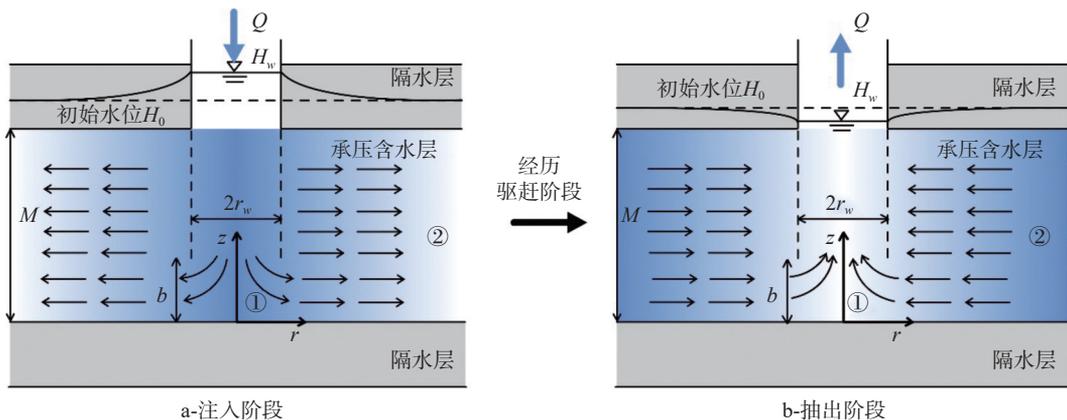


图 1 大口径井 SWPP 试验示意图
Fig. 1 Schematic diagram of SWPP test in Large-Diameter Well

$$C_2 = 0, r \rightarrow \infty \quad (17)$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial z} = 0, z = 0, r > r_w \quad (18)$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial z} = 0, z = M, r > r_w \quad (19)$$

$$\frac{\partial C_1}{\partial r} = 0, r = 0, 0 < z < b \quad (20)$$

$$\frac{\partial C_1}{\partial z} = 0, z = 0, 0 < r < r_w \quad (21)$$

$$C_1 = C_w, z = b, 0 < r < r_w \quad (22)$$

$$C_1 = C_2, r = r_w, 0 < z < b \quad (23)$$

$$D_r \frac{\partial C_1}{\partial r} = D_r \frac{\partial C_2}{\partial r}, r = r_w, 0 < z < b \quad (24)$$

式(16)~(24)类比地下水渗流模型中的式(2)~(10), 同样的, C_w 为井筒中示踪剂的浓度 (M/L^3)。SWPP 试验的三个阶段中, 井筒内均发生混溶效应, 因此井壁处的边界条件沿用 Wang Q R et al. (2018) 中的质量守恒原理进行刻画。三阶段井筒浓度的表达式分别为:

$$V_{w,inj} \frac{dC_w(t)}{dt} = Q_{inj} [C_0 - C_w(t)], 0 < t \leq t_{inj} \quad (25)$$

$$V_{w,cha} \frac{dC_w(t)}{dt} = Q_{cha} [0 - C_w(t)], t_{inj} < t \leq t_{inj} + t_{cha} \quad (26)$$

$$V_{w,ext} \frac{dC_w(t)}{dt} = \sum_b^M -2\pi r_w \theta \alpha_L |v_{r,w}| \frac{\partial C(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=r_w} dz + \sum_0^{r_w} d(\pi r^2 |v_{z,w}|) \frac{\partial C(r,t)}{\partial r} \Big|_{z=b}, t_{inj} + t_{cha} < t \leq t_{inj} + t_{cha} + t_{ext} \quad (27)$$

其中 t_{inj} 、 t_{cha} 和 t_{ext} 分别代表注入阶段、驱赶阶段和抽出阶段的时长(T); $V_{w,inj}$ 、 $V_{w,cha}$ 以及 $V_{w,ext}$ 分别为注入、驱赶及抽出阶段井中水的体积 (L^3); $v_{r,w}$ 和 $v_{z,w}$ 分别为井壁和井底处的地下水实际流速 (L/T); θ 为孔隙度(-); $C_w(t)$ 为井中示踪剂随时间

的变化浓度 (M/L^3); Q_{inj} 和 Q_{cha} 分别为注入和抽出阶段的速率 (M/L^3)。

1.2 大口径 SWPP 试验数值模型的求解

对于式(1)~(27), 两区界面处的连续性耦合等复杂情形导致模型难以通过解析的方式求解。因此, 本研究引入有限差分方法, 首先将图1中井周的两个区域进行空间网格剖分, 以井壁附近的2号区为例, 仿照前人井流模型的对数网格剖分方法 (Wen Z et al., 2009; Meng X M et al., 2015; Wang Q R et al., 2017), 将 $r = r_w \sim \infty, z = 0 \sim M$ 的区域在径向上剖分为:

$$r_i = (r_{i-1/2} + r_{i+1/2})/2, i = 1, 2, \dots, N \quad (28)$$

其中:

$$\log_{10}(r_{i+1/2}) = \log_{10}(r_w) + i \left[\frac{\log_{10}(r_e) - \log_{10}(r_w)}{N} \right], i = 1, 2, \dots, N \quad (29)$$

随后, 以同样的对数网格剖分方法, 将2号区在径向上进行 $z = 0 \sim b$ 以及 $z = b \sim M$ 两段剖分, 其中 $z = b$ 附近为对数网格的最密集处, 向 $z = b$ 以及 $z = 0$ 的顶底方向网格逐渐变粗, 这有利于井底附近的渗流与溶质运移方程求解过程的收敛性。对于1号区, 径向上 $r = 0 \sim r_w$ 使用式(28)和(29)的剖分方式, 垂向上则和2号区共用网格。

经过上述网格剖分后, 式(1)和(11)可分别表示为如下的差分格式:

$$\frac{dH_{i,j}}{dt} = \frac{K_r M}{S \cdot dr} \left(\frac{H_{i-1,j} - H_{i,j}}{dr} - \frac{H_{i,j} - H_{i+1,j}}{dr} \right) + \frac{K_r M}{S \cdot r} \frac{H_{i,j} - H_{i+1,j}}{dr} + \frac{K_z M}{S \cdot dz} \left(\frac{H_{i,j-1} - H_{i,j}}{dz} - \frac{H_{i,j} - H_{i,j+1}}{dz} \right) \quad (30)$$

$$\frac{dC_{i,j}}{dt} = \frac{1}{rdr} \left\{ \left[r_{i-1/2} \left(D_{rr(i-1/2,j)} \frac{C_{i-1,j} - C_{i,j}}{dr} + D_{rz(i,j-1/2)} \frac{C_{i,j-1} - C_{i,j}}{dz} - v_{r(i-1/2,j)} C_{i-1,j} \right) \right] - \left[r_{i+1/2} \left(D_{rr(i+1/2,j)} \frac{C_{i,j} - C_{i+1,j}}{dr} + D_{rz(i,j+1/2)} \frac{C_{i,j} - C_{i+1,j}}{dz} - v_{r(i+1/2,j)} C_{i,j} \right) \right] \right\} + \frac{1}{dz} \left\{ \left[D_{zr(i-1/2,j)} \frac{C_{i-1,j} - C_{i,j}}{dr} + D_{zz(i,j-1/2)} \frac{C_{i,j-1} - C_{i,j}}{dz} - v_{z(i,j-1/2)} C_{i,j-1} \right] - \left[D_{zr(i+1/2,j)} \frac{C_{i,j} - C_{i+1,j}}{dr} + D_{zz(i,j+1/2)} \frac{C_{i,j} - C_{i+1,j}}{dz} - v_{z(i,j+1/2)} C_{i,j} \right] \right\} \quad (31)$$

在式(29)和式(30)中, 将 $H_{i,j}$ 和 $C_{i,j}$ 视为因变量, 时间 t 视为自变量, 其它项均视为常数, 则上述两式具有严格的常微分方程 (Ordinary

differential equation, ODE), 即 $dx/dt=k*x+b$ 的格式。在离散情况下, 这样类型的 ODE 可以通过众多版本的 Matlab 软件中的刚性积分器

ODE15s 来求解 (Shampine and Reichelt, 1997; Shampine et al., 1999; Mathias et al., 2008)。ODE15s 是一个变阶方法, 它采用自适应时间步长, 这些步长会不断调整, 以确保每一步的数值误差始终低于某个指定的容差。因此, 本研究围绕式(1)~(30)的大口径井 SWPP 试验模型开发了一套有限差分代码, 结合前人研究的取值, 并经过一系列的尝试, 当设定径向及垂向网格剖分数超过 50, 影响半径 r_e 超过 100 m 后, 模拟结果的最大变幅低于 10^{-6} , 因此将这两个值用于模型的网格剖分及计算。

2 模型准确性的验证

由于前人并未开发大口径井 SWPP 试验相关的模型, 因此本研究寻找最接近该模型的解析解作为验证用的基准解。对于地下水渗流模型的验证, 本文选取 Singh (2007) 的大口径非完整井抽水试验模型解析解, 该解不考虑井储效应, 因此本研究将式(11)修正为式(32), 再将其抽出阶段的降深值同 Singh (2007) 的解析解值进行验证。

$$2\pi r_w K_r (M - b) \left. \frac{\partial H}{\partial r} \right|_{r=r_w} = Q \quad (32)$$

对于大口径井 SWPP 试验溶质运移模型的验证, 本研究选取 Huang J Q et al. (2010) 的常规井

径的非完整井 SWPP 试验解析解作为基准解, 为贴近该解的场景, 本研究不考虑驱赶阶段, 且将井径调整为可忽略的尺寸并进而忽略井中的混溶效应, 来同该解析解进行对比验证。

图 2 是本研究的流场和溶质运移数值解同前人的解析解验证对比图, 其中, 图 2a 是新提出的数值解同 Singh (2007) 解析解在一次抽水过程中降深的对比结果, 模型中使用主要参数取值分别为 $M=10$ m, $b=5$ m, $K_r=1 \times 10^{-4}$ m/s, $K_z=5 \times 10^{-5}$ m/s, $Q=100$ m³/d, 从图中可以看出, 在井筒内以及不同的径向距离处, 两者的降深值匹配良好, 证明了该数值解流场刻画的准确性。图 2b 是新提出的数值解同 Huang J Q et al. (2010) 的解析解在井壁处的溶质 BTC 对比结果, 模型中使用主要参数取值分别为 $\alpha_r=0.01\alpha_L$, $t_{inj}=3$ d, $t_{ext}=5$ d, 其余均和图 2a 中的取值一致, 从图中可以看出, 不同弥散度情形下两者井筒内溶质的值匹配良好, 证明了该研究提出的 SWPP 试验溶质运移模型的准确性。

3 讨论

3.1 大口径井附近流场特征解析

基于该研究提出的模型, 通过调整井底至含水层底部的距离 b , 设置不同的井筛长度, 刻画井壁及井底附近的地下水流场要素。结果如图 3 所

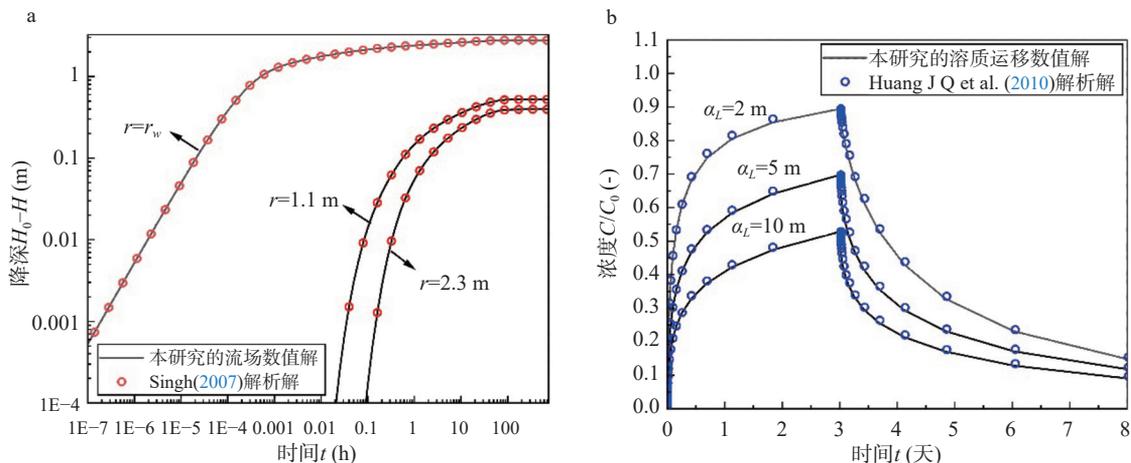


图 2 本研究的流场数值解 (a)、溶质运移数值解 (b) 同前人的解析解验证对比图

Fig. 2 The comparison chart of the proposed numerical solutions for flow field (a) and solute transport (b) with the analytical solutions of previous studies

a. 一次抽水过程中同 Singh (2007) 的解析解在不同径向位置处 (r) 含水层顶板降深值的对比; b. 一次单井注抽过程中不同弥散度 (α_L) 取值下同 Huang J Q et al. (2010) 解析解在井壁处的溶质 BTC 的对比

示, 图 3a、3b、3c 分别为 $b=8\text{ m}$ 、 5 m 、 2 m 时大口径井附近地下水水流场等水头线及流线示意图, 其中彩色实线为等水头线, 带箭头黑线为流线。结果表明, 随着井筛长度的减小, 流场发生了显著的变化, 传统的沿径向汇入井中的流场形态逐渐变为球形辐射状流场, 即逐渐趋近于 Schroth and Istok (2005) SWPP 试验研究中的球形流场。这同时反映出, 随着井筛长度的逐渐减小, 井底附近具有越来越大的给水范围, 井底流对含水层整体流场的影响程度逐渐增大。可以预见, 对于井径较

大导致施工困难, 进而孔深较浅的情形 (Barua and Hoffmann, 2005), 甚至会出现井底汇水能力超过井筛的现象。因此, 本质上当井底的汇水面积相比井筛无法忽略时, 井底流对流场的影响也就需要重点被考虑。然而, 实际当中井底往往会出现细颗粒沉淀现象, 井底附近的渗透性相较井壁附近偏低, 且井壁相比井底, 其附近的滤料、筛管等造成的井损也更为明显, 这些均是本研究模型尚未进行考虑的, 后续有待结合实际情形进行模型的优化。

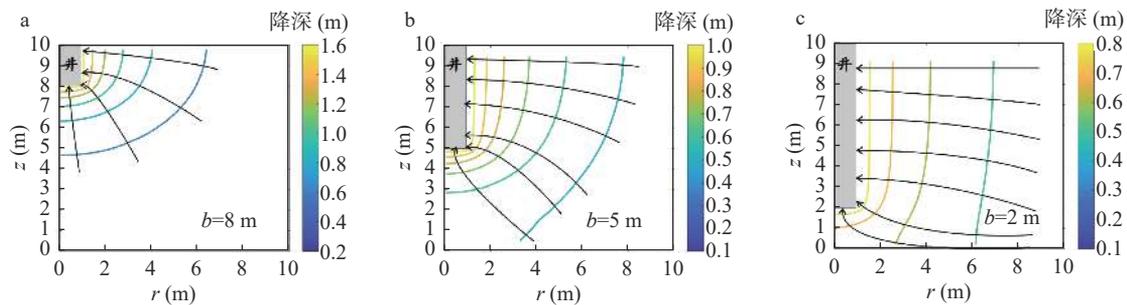


图 3 不同井筛长度下大口径井附近地下水水流场等水头线及流线示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the head line and streamline of groundwater flow field near large-diameter well under different well screen lengths

3.2 井径对 SWPP 试验结果的影响

考虑到井底面积同井壁面积的相对大小对大口径井 SWPP 试验的影响, 本研究首先通过改变模型中的井底面积来观察井筒中溶质 BTC 的变化, 同时, 进一步设置不同的抽注水速率, 观察不同抽注水强度情形下井径对 SWPP 试验的影响。设置参数如下: $b=5\text{ m}$, $\alpha_L=2\text{ m}$, 其余参数取值与图 2 一致。结果如图 4a 所示, 1 m 的井径 (r_w) 相比 0.1 m 的井径, 注入阶段的溶质 BTC 值更小, 但是抽出阶段的溶质 BTC 更大。对于注入阶段这一方面是因为井径越大, 井中溶质混溶过程越显著, 即注入阶段的溶质浓度达到最大值所需时间更久, 直观体现在更大的井径 BTC 上升更慢; 另一方面, 井径越大, 井底的溶质“泄露”量越多, 这也是造成 BTC 上升更慢的部分原因。对于抽出阶段, 由于更小的井径可以加速井筒与含水层之间的物质传输, 0.1 m 井径相比 1 m 井径的情形, 其溶质在注入和驱赶阶段已经扩散至更远的范围, 在注入质量一定的情况下示踪剂稀释程度

更明显, 0.1 m 井径的情形中回收的溶质浓度比 1 m 井径情形的更低。

此外, 图 4a 还表明, 增大抽注水速率将显著减小井径差异带来的溶质 BTC 曲线的差异, 这是因为较大的抽注水速率加速了井筒中溶质的混溶过程, 削弱了井径差异带来的影响。值得注意的是, 图 4a 表明井径增大促进的井筒-含水层溶质传输过程, 相比井径减小加速的井筒-含水层溶质传输过程, 并未占主导作用, 这可能是因为 1 m 井径对应的井底面积相比 5 m 井筛对应的井筒侧面积在溶质传输过程中并不占优势。

3.3 井深对 SWPP 试验结果的影响

为进一步探究大口径井的井底流对 SWPP 试验的影响, 本文从井深入手, 通过在模型中调整井筛长度 (l), 观察井底流的影响。模型参数设置为 $Q=200\text{ m}^3/\text{d}$, $r_w=1\text{ m}$, 其余参数设置同章节 3.2 一致。结果如图 4b 所示, 在注入阶段, 井筒中溶质的 BTC 值随井深的减小而增大, 而抽出阶段则相反。尽管井深的减小使井底流相比井壁流对

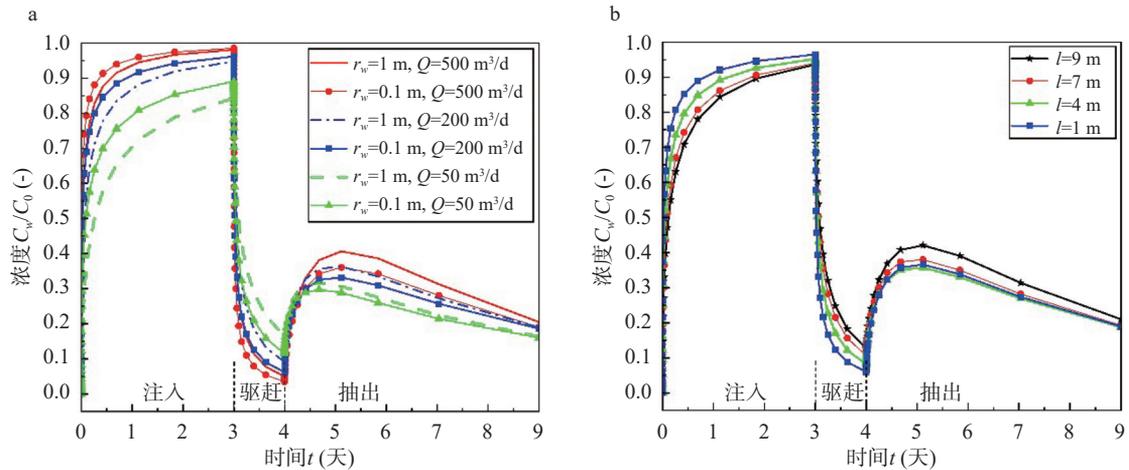


图4 不同抽注水速率(Q)、不同井径(r_w) (a)和不同井底埋深(l) (b)情形下SWPP试验各阶段的溶质BTC曲线

Fig. 4 Solute BTC curves at different stages of SWPP test at different pumping rates/well radius (a) or with different well bottom depths (l) (b)

SWPP 试验的影响更加明显,但并未在注入阶段加速溶质的“渗漏”损失,而是导致井中水的体积变小进而加速了混溶过程,产生的效果和图4a结果相似。这再一次体现出大口径井SWPP试验中,混溶效应对参数解译的影响大于井底流的影响。此外,井底面积为 πr_w^2 ,井壁面积为 $2\pi r_w l$,以半径 $r_w=1$ m的大口径井为例,多数情况下井底面积要显著小于井壁面积;只有当井深小到井径的一半左右而产生类球形流场时,井底流对SWPP试验的影响性将会逐渐超过井中混溶过程的影响性。

在理解了大口径井的井深对SWPP试验影响的基础上,本研究针对该模型的具体应用场景,进一步探讨大口径井不同井深情形下新模型同前人模型解译结果上的区别,来反映新模型的优势。

首先,利用本研究提出的考虑井底流和井筒混溶过程的SWPP数值解,令 $\alpha_L=2$ m、 $r_w=1$ m,且其它参数与上述章节一致,得到的结果为基准值,再利用图2b提到的Huang J Q et al. (2010)解析解为前人模型的代表,并同基准值拟合从而反求出新的弥散度 α'_L 值。表1为不同井底埋深(l)情形下,利用Huang J Q et al. (2010)解析解求得的 α'_L 值及其与 $\alpha_L=2$ m的实际值之间的误差,即 $(\alpha'_L - \alpha_L) / \alpha_L$ 。结果表明,即使是 $l=10$ m的不产生井底流的完整井,其井筒混溶效应仍然导致前人模型产生152.5%的反演误差。随着井底埋深逐渐减小,井底流对井筒和含水层之间的物质传输影响比重逐渐加大,反演误差也逐渐增大。这些结果表明了本研究开发的大口径含井底流的SWPP试验模型的重要性。

表1 不同井底埋深下解析解求出的弥散度及其误差

Table 1 The dispersivity coefficient and its error calculated from the previous analytical solutions under different well bottom burial depth conditions

井底埋深(l)(m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
α'_L (m)	7.3	6.96	6.77	6.53	6.28	5.98	5.74	5.55	5.31	5.05
反演误差(%)	265.0	248.0	238.5	226.5	214.0	199.0	187.0	177.5	165.5	152.5

4 结论

本研究针对大口径井SWPP试验往往需要同时考虑井中混溶与井底流双重影响的问题,构建

了同时考虑上述两因素的SWPP试验注入-驱赶-抽出三阶段溶质运移模型,利用有限差分法,将渗流与溶质运移方程离散为易于被Matlab软件中刚性积分器ODE15s求解的形式。随后,模型求解出的数值解分别同前人的渗流和溶质运移模型

解析解进行相互验证,依托模型模拟值,探究大口径井附近渗流特征及井尺寸对 SWPP 试验的影响机制,得到的结论如下:

(1)新提出的考虑井底流的 SWPP 试验模型对抽水过程降深的刻画,同 Singh (2007) 解析解的值能够很好地匹配;该模型对井壁处溶质运移过程的刻画,同 Huang J Q et al. (2010) 解析解的值同样能够很好地拟合,表明了该模型构建及求解的准确性。

(2)随着井筛长度的逐渐减小,井底附近具有越来越大的给水范围,井底流对含水层整体流场的影响程度逐渐增大,流场从径向逐渐转变为球形流场。

(3)粗井径相比细井径,注入阶段井中的溶质 BTC 值更小,但是抽出阶段的溶质 BTC 更大,一般情形下,井中混溶过程相比井底渗漏过程对 SWPP 试验的影响更为显著。

(4)井深的减小同井径的减小类似,对 SWPP 试验的影响具有相同的影响机制,但当井深小到井径的一半左右时产生类球形流场,井底的渗漏过程相比混溶过程对 SWPP 试验可能存在更为显著的影响。

(5)对于本研究设置的模拟场景,当不存在井底流的影响时,前人的解析解由于不考虑井筒混溶作用,对弥散度的解译仍然存在 152.5% 的误差,而随着井底埋深逐渐减小,井底流导致前人解析解的误差也逐渐增大。

参考文献:

顾昊琛,凡倩莹.2023.混合效应和表皮效应对单井注抽试验的影响机理[J].安全与环境工程,30(2):156-162.

江思珉,周念清,施小清,郑茂辉.2010.利用大口径井抽水初期试验数据确定含水层参数[J].工程勘察,38(9):32-35.

李旭.2020.抽/注水井附近非均质介质中溶质运移机理及数值模拟研究[D].中国地质大学博士学位论文.

李旭,苏世林,文章,许光泉.2022.单井注抽试验测算地下水流速的数值分析[J].地球科学,47(2):633-641.

刘玉舒,戴焱君,刘洋,王全荣.2020.考虑弱透水层的单井注抽试验解析模型研究[J].安全与环境工程,27(6):1-6.

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[J].地球科学,49(1):288-298.

文章,黄冠华,李健,詹红兵.2009.承压含水层中大口径井附近非达西流的线性化近似解与数值解[J].水利学报,40(7):863-869.

肖勋,施文光,王全荣.2020.井内混合效应与尺度效应对注入井附近溶质径向弥散过程的影响[J].地球科学,45(4):1439-1446.

薛禹群,吴吉春.1999.面临 21 世纪的中国地下水模拟问题[J].水文地质工程地质,(5):1-3.

阳畅,刘洋,刘世强,陈思,王全荣.2023.微生物堵塞对单井注抽试验的影响机理[J].安全与环境工程,30(1):199-204+220.

Barua G, Bora S N. 2010. Hydraulics of a partially penetrating well with skin zone in a confined aquifer[J]. Advances in Water Resources, 33(12): 1575-1587.

Barua G, Hoffmann M R. 2005. Theory of Seepage into an Auger Hole in a Confined Aquifer[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 131(5): 440-450.

Chen Y, Wang Q R. 2021. The Effect of Boundary Conditions on the Single-Well Push-Pull Test in a Partially Penetrated Well[J]. Journal of Hydrology, 603(1): 127035.

Gupta C P, Singh V S. 1988. Flow regime associated with partially penetrating large-diameter wells in hard rocks[J]. Journal of Hydrology, 103(3-4): 209-217.

Hebig K H, Zeilfelder S, Ito N, Machida I, Marui A, Scheytt T J. 2015. Study of the effects of the chaser in push-pull tracer tests by using temporal moment analysis[J]. Geothermics, 54: 43-53.

Huang J Q, Christ J A, Goltz M N. 2010. Analytical solutions for efficient interpretation of single - well push - pull tracer tests[J]. Water Resources Research, 46(8): W08538.1-W08538.16.

Lin J J, Ma R, Sun Z Y, Tang L S. 2023. Assessing the connectivity of a regional fractured aquifer based on a hydraulic conductivity field reversed by multi-Well pumping tests and numerical groundwater flow modeling[J]. Journal of Earth Science, 34(6): 1926-1939.

Mathias S A, Butler A P, Zhan H B. 2008. Approximate solutions for Forchheimer flow to a well[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 134(9): 1318-1325.

Meng X M, Shao J Y, Yin M S, Liu D F, Xue X W. 2015.

- Low velocity non-Darcian flow to a well fully penetrating a confined aquifer in the first kind of leaky aquifer system[J]. *Journal of Hydrology*, 530: 533-553.
- Papadopoulos I S, Cooper Jr H H. 1967. Drawdown in a well of Large Diameter[J]. *Water Resources Research*, 3(1): 241-244.
- Schroth M H, Istok J D. 2005. Approximate solution for solute transport during spherical-flow push-pull tests[J]. *Ground Water*, 43(2): 280-284.
- Shampine L F, Reichelt M W. 1997. The MATLAB ODE Suite[J]. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 18(1): 1-22.
- Shampine L F, Reichelt M W, Kierzenka J A. 1999. Solving Index-1 DAEs in MATLAB and Simulink[J]. *SIAM Review*, 41(3): 538-552.
- Shi W G, Wang Q R, Zhan H B. 2020. New Simplified Models of Single-Well Push-Pull Tests With Mixing Effect[J]. *Water Resources Research*, 56(8): e2019WR026802.
- Shi W G, Wang Q R, Salihu Danlami M. 2022. A novel analytical model of solute transport in a layered aquifer system with mixing processes in the reservoirs[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(45): 67953-67968.
- Shi W G, Wang Q R, Zhan H B, Zhou R J, Yan H T. 2023. A general model of radial dispersion with wellbore mixing and skin effects[J]. *Hydrology and Earth System Science*, 27(9): 1891-1908.
- Singh S K. 2007. Semianalytical model for drawdown due to pumping a partially penetrating large diameter well[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(2): 155-161.
- Wang Q R, Jin A H, Zhan H B, Chen Y, Shi W G, Liu H, Wang Y. 2021. Revisiting simplified model of a single-well push-pull test for estimating regional flow velocity[J]. *Journal of Hydrology*, 601: 126711.
- Wen Z, Huang G H, Zhan H B. 2009. A numerical solution for non-Darcian flow to a well in a confined aquifer using the power law function[J]. *Journal of Hydrology*, 364(1): 99-106.
- Wang Q R, Shi W G, Zhan H B, Gu H C, Chen K W. 2018. Models of Single-Well Push-Pull Test With Mixing Effect in the Wellbore[J]. *Water Resources Research*, 54(12): 10155-10171.
- Wang Q R, Wang J X, Zhan H B, Shi W G. 2020. New model of reactive transport in a single-well push-pull test with aquitard effect and wellbore storage[J]. *Hydrology and Earth System Science*, 24(8): 3983-4000.
- Wang Q R, Zhan H B, Wang Y X. 2017. Single-well push-pull test in transient Forchheimer flow field[J]. *Journal of Hydrology*, 549: 125-132.
- Zhu Q, Wen Z, Jakada H. 2020. A new solution to transient single-well push-pull test with low-permeability non-Darcian leakage effects[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 234: 103689.