

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.366>



非完整井下单井注抽试验数值模拟方法改进

顾昊琛¹, 王全荣^{1*}, 詹红兵²

1. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

2. 德克萨斯农工大学地质与地球物理系, 美国德克萨斯 77840

摘要: 单井注抽试验(SWIW 试验)具有成本低、耗时短、易操作等优点,被广泛用于获取野外含水层的弥散度等物理化学参数。然而,井筒附近的流场变化复杂,给模型求解带来不便,尤其是非完整井问题。针对非完整井 SWIW 试验问题,MODFLOW/MT3DMS 软件中包含 3 种模块:传统 WELL 模块、高渗透性 WELL 模块和 MNW 模块,分别代表 3 种常规的数值模拟方法。研究表明现有的这 3 个模块都存在一些假设条件,野外试验条件可能难以满足。为此,本研究提出一种新的计算方法,即将 MNW 模块中考虑井中溶质混溶的公式运用到高渗透性 WELL 模块上,通过一个参数反求案例的分析,证明 SWIW 试验模拟结果的精度得到提高。基于改进后的模型,探究传统模型中常用的两个假设条件的影响:忽略滤水管空间位置和假设试验过程中流场是稳定。结果表明:(1)非完整井井筒滤水管的位置对浓度结果的影响不可忽略;(2)含水层渗透系数与储水系数的比值较小时,稳定流场这个假设条件会带来误差。

关键词: 反求参数;径向弥散;溶质运移;数值模拟;环境地质。

中图分类号: P641.2

文章编号: 1000-2383(2020)02-685-08

收稿日期: 2018-12-09

An Improved Approach in Modeling Injection-Withdraw Test of the Partially Penetrating Well

Gu Haochen¹, Wang Quanrong^{1*}, Zhan Hongbin²

1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Department of Geology & Geophysics, Texas A&M University, Texas 77840, USA

Abstract: Single Well Injection-Withdraw (SWIW) test has been widely used to estimate physical and chemical parameters of aquifer due to its advantages of low budget, less time consuming and easy to operate. However, the complex flow fields near the wellbore pose challenges in solving the model of the SWIW test, especially for partially penetrating wells. Currently, three methods included in MODFLOW/MT3DMS were used to deal with this problem: traditional WELL module, high permeability WELL module and MNW module, which respectively represent three types of commonly used numerical methods. However, it was found that all of these models were based on assumptions which might not be satisfied in the actual applications. In this study, a new method was developed by coupling the MNW module and high permeability WELL module. The case studies demonstrated the accuracy of the new model of the SWIW test. Meanwhile, we employed the new model to investigate two assumptions included in the previous studies, and found that: (1) the influence of the well screen location on the results was not negligible. (2) The assumption of the steady-flow field used in the traditional mathematical model of SWIW will cause non-negligible errors when

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(No. 41502229);国家自然科学基金创新群体(No. 41521001);中央高校基本科研业务费专项资金摇篮计划(No. CUGL160407);中国地质调查局项目(Nos. DD20190263, DD2019040022)。

作者简介: 顾昊琛(1994—),男,硕士研究生,主要从事地下水流动及污染物迁移规律数值模拟研究。ORCID:0000-0002-9320-6897. E-mail: ghc7268@cug.edu.cn

***通讯作者:** 王全荣, ORCID:0000-0002-6560-6340。 E-mail: wangqr@cug.edu.cn

引用格式: 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.

the ratio of permeability coefficient to storage coefficient is small.

Key words: parameters estimation; radial dispersion; solute transport; numerical simulation; environmental geology.

1 研究背景

近年来,随着经济的快速发展,部分地区地表生态环境受到了严重的污染和破坏,致使地下水环境日益恶化.地下水赋存于孔隙介质中,其自净能力弱、循环周期长、吸附性强,因此一旦受到污染,很难在短时间内得到修复.为了降低修复成本且提高修复效率,首先要弄清含水层的弥散度、孔隙度、吸附与解析系数等物理化学参数,关于水文地质的参数反演的研究十分热门(陈晨等,2017;李霞等,2017).

在获取野外实际含水层的物理参数时,常用的两种试验方法为注入井—观测井试验和单井注抽试验(Single Well Injection and Withdraw test, SWIW 试验).SWIW 试验首先通过井将示踪剂注入含水层,过一段时间后,从同口井中将含水层中的溶液抽出,并分析抽出溶液的穿透曲线,从而获取含水层参数,如图 1. Tsang(1995)在 1995 年对比分析了几种计算含水层参数的方法,指出注入井—观测井试验需要有两口井,成本高且耗时长,尤其是当含水层的渗透性较弱或者观测井到注水井的距离较远时,这个缺点更加明显;而 SWIW 试验只需要一口井,成本低且耗时短,且适用于渗透性弱的含水层,具有更好的应用前景.

SWIW 试验属于径向弥散规律的研究范畴,许多国内外学者致力于 SWIW 试验的模型与实验研究,并已经取得了比较丰富的研究成果(Gouze *et al.*, 2008; Cvetkovic and Cheng, 2011; Istok, 2013). 1971 年, Gelhar and Collins(1971)针对完整

井问题推导出了 SWIW 试验近似解析解;Schroth and Istok(2005)将井假定为点源推导出了球形辐射流场下的解析解;Huang *et al.*(2010)进一步拓展了 Schroth and Istok(2005)的 SWIW 试验理论,推导了非完整井 SWIW 试验的解析解.然而这些解析解包含很多假设条件,例如流场是稳定的等等.于是近年来,数值模拟方法被广泛用于求解 SWIW 试验的数学模型,如 Mathias and Todman(2010)采用数值法研究了解析解中“稳定流流场”假设条件对结果的影响;Zheng and Wang(1999)利用 MODFLOW/MT3DMS 模型与 Gelhar 的解析解进行对比分析. MODFLOW 软件是由美国地质调查局的 McDonald and Harbaugh(1988)于 20 世纪 80 年代开发出来的一套三维有限差分地下水水流数值模拟软件.然而,现有的数值模型仍然存在一些不足.为此,本研究通过 MODFLOW/MT3DMS 数值模拟方法,研究现有模型的可能存在的误差,并提出改进的方法,从而提高 SWIW 试验的模拟精度.

2 现有 SWIW 试验模型原理

2.1 数学模型

描述非完整井 SWIW 试验中溶质运移过程的控制方程为:

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \eta_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial \eta_j} - v_i C \right) + I, \quad (1)$$

式中: C 是浓度 [ML^{-3}]; t 是时间 [T]; θ 是孔隙度 [无量纲]; η 是空间坐标, $i, j=1, 2$ 和 3 分别代表 x, y 和 z 轴; D_{ij} 为弥散系数张量 [L^2T^{-1}]; v_i 为地下水达

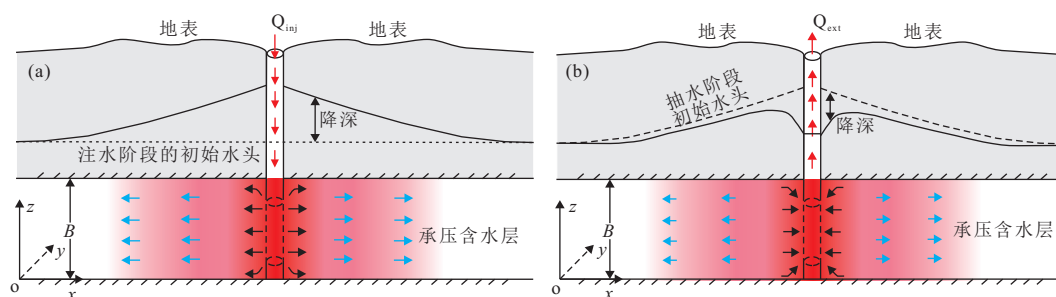


图 1 单井注抽试验概念模型示意图(Wang *et al.*, 2017)

Fig.1 The conceptual model of single well injection and extraction test

a. 注入过程; b. 抽取过程(初期); B 为厚度(m); 黑色箭头表示井筒附近水流方向, 蓝色箭头表示距离井较远的含水层水流方向, 红色深浅表示溶质浓度的高低

西流速 $[LT^{-1}]$, I 是源汇项 $[ML^{-3}T^{-1}]$, 包括生物地球化学反应. 对于实际问题, v_i 往往不是常数, 需要通过求解地下水流动方程来获取. 本文研究区范围为矩形, 示意图如图2所示, 在笛卡尔坐标系下, 初始条件与边界条件分别是:

第一阶段(注水):

$$C(x, y, z, t=0) = 0, \quad (2a)$$

$$\left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=0, M} = 0, \quad (2b)$$

$$C(|x|=L, y, z, t) = C(x, |y|=L, z, t) = 0, \quad (2c)$$

$$I_{inj}|_{x=0, z_b < z < z_t} = C_w \cdot q_{inj}. \quad (2d)$$

第二阶段(抽水):

$$C(x, y, z, t=0) = C_1, \quad (3a)$$

$$\left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=0, M} = 0, \quad (3b)$$

$$C(|x|=L, y, z, t) = C(x, |y|=L, z, t) = 0, \quad (3c)$$

$$I_{ext}|_{x=0, z_b < z < z_t} = -C_s \cdot q_{ext}, \quad (3d)$$

式中: I_{inj} 和 I_{ext} 分别表示注水阶段和抽水阶段井的溶质源汇项 $[ML^{-3}T^{-1}]$; q_{inj} 为注入溶液的单位体积的流量大小 $[T^{-1}]$; C_w 为注入的示踪剂溶质浓度 $[ML^{-3}]$; q_{ext} 为抽出溶液的单位体积的流量大小 $[T^{-1}]$; C_s 为抽取时刻井中的溶质浓度 $[ML^{-3}]$; L 为边界到井筒的距离 $[L]$; z_b 和 z_t 分别为井筒滤水管的底部和顶部高程, 滤水管各处的通量大小由模型计算得出; C_1 为第一阶段最后时刻的溶质场浓度 $[ML^{-3}]$.

目前, MODFLOW/MT3DMS 软件有3种方法来刻画 SWIW 试验的井流问题: 传统的 CW (Conventional Well) 模块、高渗透性 CW 模块和混合井 MNW (Multi-Node Well) 模块 (Neville and Tonkin, 2004). CW 模块假设井壁的流量与每一层的导水系数相关, 即线汇理论, 但该模型没有考虑井筒的高渗透性, 对于非完整井问题或当两个含水层间的水头差较大时, 模拟结果可能“失真” (黎明等, 2003; Harbaugh, 2005). 由于井筒渗透性远大于含水层的渗透性, 因此常假定井筒的渗透系数无限大来描述井筒中的水流过程, 该方法称为高渗透性 CW 方法. 然而, 对于数值模拟而言, 该方法有一个假设条件: 井筒网格尺寸与实际井筒尺寸相等 (Neville and Tonkin, 2004). 实际上, 限于计算机内存的大小、模拟软件的计算量等因素, 网格数量往往有限, 进而可能导致井网格面积远大于井筒的截面积, 于是便

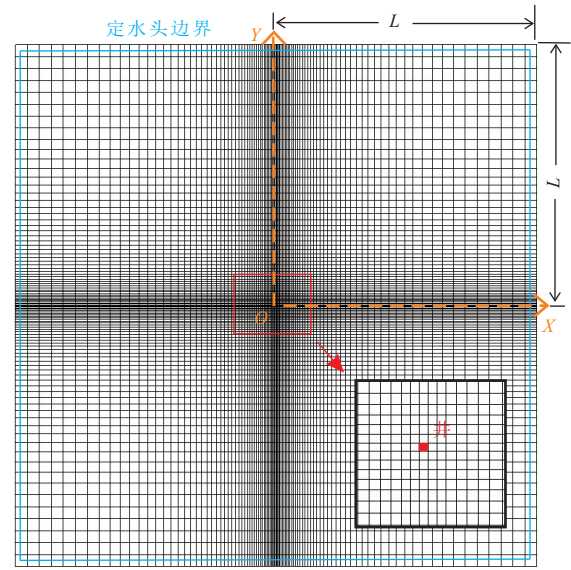


图2 网格系统平面示意图

Fig.2 Grid system in a plan view

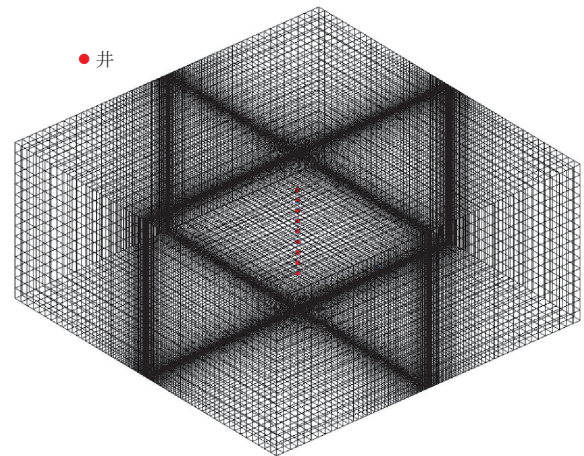


图3 网格系统三维示意图

Fig.3 Grid system in 3-D view

提出 MNW 模块来解决这一个问题. MNW 模块假设井筒渗透性远大于含水层的渗透性, 井筒水位的计算公式是 (Rorabaugh, 1953; Peaceman, 1983):

$$h_{well} = h_{cell} + A Q_n + B Q_n + C Q_n^P, \quad (4)$$

$$A = \frac{\ln\left(\frac{r_0}{r_w}\right)}{2\pi \sqrt{T_x T_y}}, \quad (5)$$

式中: h_{cell} 是井网格水头 $[L]$; h_{well} 是井筒水头 $[L]$, 即校正后的井水位; r_w 为实际井半径 $[L]$; r_0 为有效半径 $[L]$, $r_0 = 0.14 \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$, Δx 和 Δy 分别为 x 轴和 y 轴的单元格大小, 当 $\Delta x = \Delta y$ 时, $r_0 \approx 0.2 \Delta x$; Q_n 是第 n 层井网格与井之间的流量交换大小; A 是线

性含水层水头损失系数 $[TL^{-2}]$; B 是线性井筒水头损失 $[TL^{-2}]$; C 是非线性井筒水头损失 $[T^PL^{(3P-1)}]$, P 是指数; T_x 和 T_y 分别是 x 方向和 y 方向的导水系数 $[L^2T^{-1}]$. 本研究中 B 和 C 均取为0, A 由模型通过式(5)根据实际井半径大小自动计算.

MNW 模块中井筒内溶质浓度的计算公式为 (Zheng, 2010):

$$C_{\text{well}} = \frac{|Q_w|C_w + \sum_{i=1}^N |Q_i|C_i}{|Q_w| + \sum_{i=1}^N |Q_i|}, \quad (6)$$

式中: C_{well} 表示校正后井筒里的浓度 $[ML^{-3}]$; Q_w 为注入井的流量 $[L^3T^{-1}]$; C_w 是注入示踪剂的浓度 $[ML^{-3}]$; Q_i 为从第 i 层流出井筒的流量大小 $[L^3T^{-1}]$; C_i 是第 i 层的网格浓度 $[ML^{-3}]$; N 是多层井的总层数. 此式本质是以各层的流量大小作为权重, 计算井筒内的加权平均浓度.

2.2 模型不足

在模拟非完整井时, MODFLOW/MT3DMS 中的3个模块(CW 模块、高渗透系数 CW 模块、和 MNW 模块)代表着不同的边界类型. CW 模块为等流量边界条件, 高渗透系数 CW 模块和 MNW 模块属于等水头边界条件. 由于等水头边界条件考虑了井筒的高渗透性, 结果更加科学. 然而, MNW 模型需在网格面积大于井筒截面积的情况下才能运行, 即只有在 $r_0 > r_w$ 时才能被调用, 当 $\Delta x = \Delta y$ 时, 需要使得 $\Delta x = \Delta y > 5r_w$, 此时网格尺寸会远大于实际井筒尺寸. 这3种模型模拟 SWIW 试验结果的精度如何? 需要深入的探讨.

为了对比评价 MODFLOW/MT3DMS 中的3个模块的精度, 首先构建一组概念模型进行数值模拟和分析. 假设承压含水层范围为 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$, 厚 5 m , 初始水位 10 m , 初始浓度为0, 四周为定水头边界. 井径 $r_w = 0.1\text{ m}$, 渗透系数 $K = 2.4\text{ m/d}$, 纵向弥散度 $\alpha_L = 0.1\text{ m}$, 横向弥散度 $\alpha_T = 0.001\text{ m}$, 孔隙度 $\theta = 0.3$, 试验第一阶段向含水层持续注入溶质, 注水时间 $t_{\text{inj}} = 5\text{ h}$, 注水流量 $Q_{\text{inj}} = 1.0\text{ m}^3/\text{h}$, 抽水时间 $t_{\text{ext}} = 10\text{ h}$, 抽水流量 $Q_{\text{ext}} = -1\text{ m}^3/\text{h}$. 3种模型垂向上均匀划分为15层, 滤水管位于4到12层, 即在1到4 m的位置进行抽水与注水. 水平方向上为变网格划分, 且 $\Delta x = \Delta y$, 图2与图3为对应的模型示意图. CW 模块和高渗透性 CW 模块的网格剖分相同, 井筒网格的长宽均等于井的直径, 即 0.2 m , 而 MNW 模块的井网格的长度与宽度则大于井的直径, 本研究考虑两种网格系统: 0.5 m 和 1.0 m . 模型根据抽水阶段和注水阶段分为两个应力期, 根据井模块选

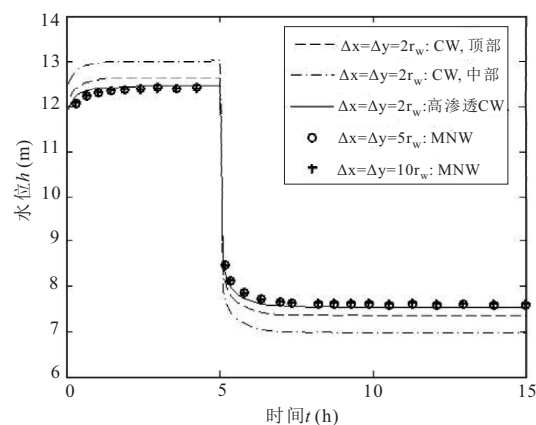


图4 3种模型井筒滤水管里的水位对比

Fig.4 Comparison of water level between three modules in the wellbore

择对应的溶质源汇项类型(WELL 和 MNW). 首先计算注水阶段的流场与溶质场, 然后将注水结束时的水头与浓度作为初始值代入第二个应力期, 继续计算. CW 模型提取滤水管顶部与中部两处的浓度, 而 MNW 模型由于井筒内溶质已经混合, 浓度处处相等, 只提取一处浓度.

图4为 MODFLOW 中3种模块的井筒水位结果对比. 对比发现, CW 模块不同井筒位置处的水位并不相同. 比如在抽水阶段, 井筒中部的水位要比顶部的低, 这与实际不符, 主要是因为 CW 模块没有考虑井筒的高渗透性. 而高渗透性的 CW 模块中, 不同的井筒位置水位是一致的, 因而结果更加符合实际. 同时, 在不同井网格系统下, MNW 模块的结果与高渗透性的 CW 模块的结果十分接近, 表明两者均能有效地刻画等水头边界, MNW 能有效地修正因网格过大引起的流场误差, 这与 Neville and Tonkin (2004) 的结论一致. 因此 MNW 和高渗透 CW 模块对 SWIW 试验的流场计算比较精确.

图5为 MODFLOW/MT3DMS 中3种模块在抽水阶段的井筒浓度计算结果. 结果表明: 不管是 CW 模块还是高渗透性 CW 模块, 滤水管顶部和中部的浓度不同, 即井筒内存在多个浓度数值. 对于 MNW 模块, 虽然不同井筒位置的浓度相等, 但是不同的网格剖分系统下井筒浓度差别很大, 说明 MNW 模块对于浓度问题的修正存在一定的误差. 总之, 对于非完整井的径向弥散问题, 这3种模型可能都存在误差.

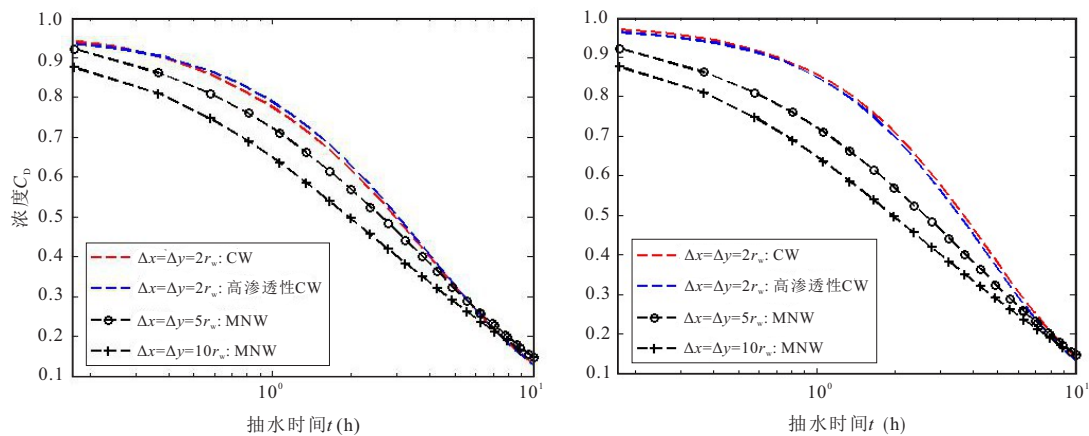


图5 3种模型井筒浓度对比图

Fig.5 Comparison of concentration between three modules in the wellbore

a. 井筒滤水管顶部; b. 井筒滤水管中部

3 模型改进

图4和图5表明,对于非完整井的SWIW试验,高渗透性CW模块与MNW模型均可以较好地刻画地下水的流动,然而,高渗透性CW模块没有考虑到溶质浓度的混合效应. MNW模型虽考虑了混溶效应,但是现有的MNW模型要求 $\Delta x = \Delta y > 5r_w$,而且MNW模型计算结果对网格剖分敏感性很强. 为此,本研究提出一种改进方法:在高渗透性CW模块的溶质场中加入对溶质浓度混合效应的考虑,即采用MNW模型里井筒浓度的计算公式(6),来计算高渗透性CW模块的井筒浓度. Zheng(2010)指出式(6)使得MNW模块具有模拟多节点井中的溶质运移能力. 对于多层的高渗透性CW模块,井内复杂的垂向流量交换使得这种以流量为权重的计算方法同样适用. 改进后的CW模型计算分为两步,第一步为常规的高渗透性CW模型计算,即运用MODFLOW/MT3DMS将流场与溶质场进行耦合计算;第二步是根据第一步的结果中每层网格的流量与浓度的数值,利用式(6)进行计算. 其基本计算处理与MNW类似. 改进后的模型可以用于反求参数,具体的求解方法有试算法和人工智能算法. 人工智能算法包括遗传算法、模拟退火算法等. 人工智能算法虽然计算效率高,但是常常会陷入局部最优解,需要深入研究. 本文采用试算法来反求参数.

目前,关于非完整井的SWIW模型的理论研究很少, Huang *et al.* (2010)推导出解析解,但其在推导的过程中采用了一些假设条件,如假定流速与含水层厚度相关,即:

$$v_r = \frac{Q}{2\pi r B}, \quad (7)$$

式中: v_r 是径向流速[L/T], Q 是井流量[L³/T]; r 是径向位置[L]; B 是含水层厚度[L],该流速计算结果与实际不符,可能引起误差. COMSOL数值模拟软件与MODFLOW/MT3DMS不同,它采用有限元法求解水流方程和溶质运移方程,井筒的渗透系数和弥散度设为无限大,用于描述井筒的高渗性. 因此,本研究以COMSOL软件的模拟结果为标准,研究改进后的高渗透CW模块、MNW模块和Huang *et al.* (2010)的解析解在反求参数中的精度.

首先,利用COMSOL数值模拟软件求解出一组穿透曲线数据,然后分别用MNW模块、改进后的高渗透性CW模块和Huang *et al.* (2010)的解析解去拟合这组数据进行求参,通过对比分析拟合的参数与实际COMSOL模型采用的参数来验证这些方法的精度. 假设含水层厚1.0 m,井半径0.2 m,滤水管位于0.5~1.0 m,孔隙度为0.3,弥散度为0.62 m,其他设定与2.2节相同. 拟合结果如图6所示,反求的参数如表1所示. 由结果可知,改进的高渗透性CW模块反求的参数与COMSOL模型参数十分接近,而相比之下, MNW模块反求出的弥散度更小. 这是因为当溶质总量相同时, MNW模块的井筒网格体积更大,由此计算的浓度数值就更小,因此需要减小弥散度使溶质更“集中”,减小弥散作用,从而提高抽水阶段的浓度; Huang *et al.* (2010)的解析解反求出的弥散度与本研究方法接近,但反求出的孔隙度却更大,且大于案例中的实际孔隙度0.3,这是因为Huang *et al.* (2010)采用式(7)计算流速,与

表 1 3 种模块反求的参数

Table 1 Parameters estimated by the three modules

	孔隙度	弥散度(m)
COMSOL 模型	0.3	0.62
改进后的高渗 CW 模型	0.3	0.60
Huang <i>et al.</i> (2010)的解析解	0.5	0.59
MNW 模型	0.3	0.45

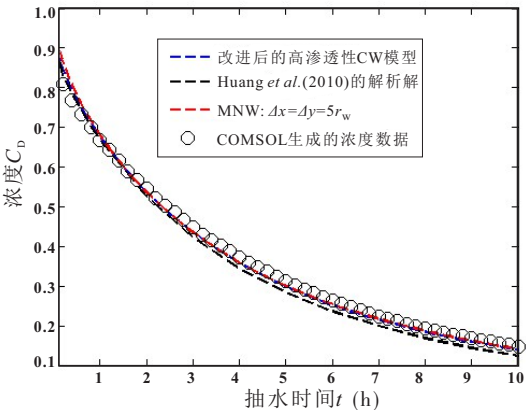


图 6 3 种模块拟合结果

Fig.6 The fitting results of the three modules

改进后的 CW 模块和 COMSOL 模型的计算流速的方法不同,因此需要通过调节孔隙度大小,来改变溶质运移方程中的孔隙水流速,才能较好地拟合数据. 以上结果证明,改进后的高渗透性 CW 模块能有效地提高非完整井 SWIW 试验模拟的精度.

4 结果与讨论

4.1 井滤水管位置对模拟结果的影响

现有的简化模型,往往假设井筒滤水管在含水层中的空间位置对结果的影响可以忽略不计. 为此,本研究通过改进后的高渗透性 CW 模块,探讨井筒滤水管位置对模拟结果是否有影响. 假设含水层范围 100 m×100 m,厚 7.5 m,滤水管设定 3 种位置分布,在垂向上分别位于:7.5~5.0 m、7.0~4.5 m、5.0~2.5 m,长度均为 2.5 m. 其他参数设置为:井径 $r_w=0.1$ m,渗透系数 $K=2.4$ m/d,储水系数 $S_s=5\times 10^{-4}$,纵向弥散度 $\alpha_L=0.1$ m,横向弥散度 $\alpha_T=0.001$ m,孔隙度 $\theta=0.3$,注水时间 $t_{inj}=5$ h,抽水时间 $t_{ext}=5$ h,注水流量 $Q_{inj}=1.0$ m³/h,抽水流量 $Q_{ext}=-1$ m³/h. 模型垂向上剖分为 15 层,因而 3 种滤水管分别位于 1 到 5 层、2 到 6 层、6 到 10 层.

图 7 是滤水管在不同位置下,通过改进后的高

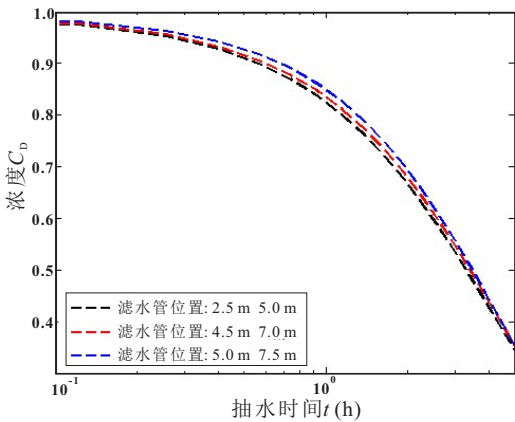


图 7 滤水管在不同位置下的计算结果对比

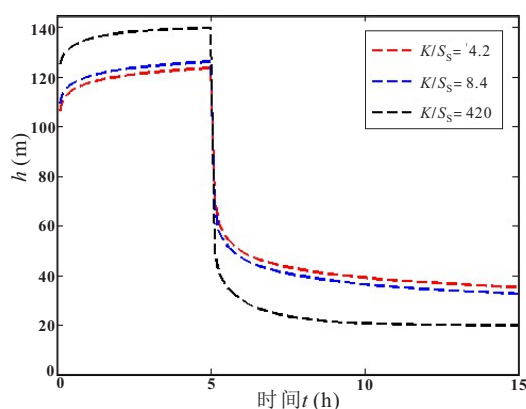
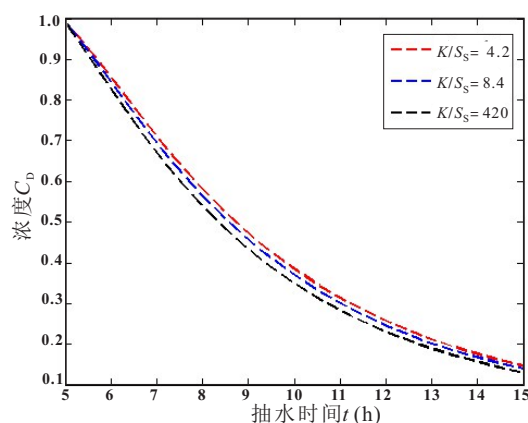
Fig.7 Results comparison of the new method under different inlet pipe positions

渗透性 CW 模块计算的结果对比. 结果表明滤水管越靠近隔水顶板,抽水阶段的浓度就越高. 这说明滤水管的位置会影响 SWIW 试验的浓度模拟结果,在实际的试验操作和参数反演中,应当格外注意滤水管的位置所在.

4.2 非稳定流场对 SWIW 模型的影响

现有的 SWIW 试验模型的另外一个假设条件是:SWIW 试验过程中流场是稳定的. 但正如图 1b 中所示,在抽水阶段初期,井附近的地下水流向可能会和远处的流向相反,此时的流场是不稳定的. Wang *et al.*(2017)针对完整井问题研究该假设条件对结果的影响,结果表明当含水层的导水系数较小时,该假设会产生不可忽略的误差. 对于非完整井问题,井筒附近的流场比完整井问题更复杂. 为此,本文采用改进后的高渗透性 CW 模块展开研究. 事实上,当含水层的渗透系数 K 较大或储水系数 S_s 较小时,井筒附近流场很快达到稳定,稳定流场假设条件带来的误差可能较小;而当渗透系数 K 较小或储水系数 S_s 较大,流场达到稳定的时间会变长,就会扩大该假设条件带来的误差. 因此,本研究基于 K/S_s 研究流场对 SWIW 试验结果的影响.

假设研究区范围为 51 m×51 m,厚 5 m,初始水头 80 m,四周是定水头边界,滤水管位于 1~4 m. 渗透系数 $K=0.004$ 2 m/h,井径 $r_w=0.1$ m,纵向弥散度 $\alpha_L=0.1$ m,横向弥散度 $\alpha_T=0.001$ m,孔隙度 $\theta=0.3$,注水时间 $t_{inj}=5$ h,抽水时间 $t_{ext}=10$ h,注水流量 $Q_{inj}=1.0$ m³/h,抽水流量 $Q_{ext}=-1$ m³/h. 模型垂向上均匀划分为 15 层. 选定 3 种储水系数 S_s : 1×10^{-3} , 5×10^{-4} , 1×10^{-5} 去模拟不同程度的非稳定流场,对

图8 不同 K/S_s 下的井筒水位图Fig.8 The water level in wellbore under different K/S_s 图9 不同 K/S_s 下的井筒浓度Fig.9 The concentration in wellbore under different K/S_s

应3种 K/S_s 的比值分别为:4.2,8.4,420.0.

图8是不同的 K/S_s 比值下计算得到的井水位.显然 K/S_s 直接影响井筒水位大小. K/S_s 越大,注水阶段的井水位会越高,而抽水阶段的井水位会越低.图9是对应抽水阶段井筒里的穿透曲线,结果表明 K/S_s 越小,同一时刻对应的浓度就越高.这是因为 K/S_s 的减小使非稳定流场作用增强,井附近的含水层能够储存或释放更多的溶液,因而溶质浓度会更高.因此,当含水层的渗透系数 K 较小、储水系数 S_s 较大时,非稳定流场对SWIW模型结果的影响不可忽略.

5 结语

SWIW试验作为一种简便高效的试验,能够快速高效地获取野外含水层的物理、化学参数.现有

解析解模型存在很多假设条件,在野外的试验中很难满足,由此导致结果存在误差.于是,近年来数值模拟被广泛用于计算SWIW试验模型,例如MODFLOW/MT3DMS软件.该软件中主要有3种方法用于求解该问题:传统WELL模块、高渗透性CW模块和MNW模块.研究表明这3种模型在模拟该试验时都存在一些假设条件:传统WELL模块没有考虑井筒的高渗透性;高渗透性CW模块和MNW模块虽都能较好的模拟非完整井SWIW试验的地下水流动问题,但溶质运移结果误差较大.为此,本研究通过对现有的高渗透性CW模块进行改进,将MNW模块中考虑井内溶质混溶的公式运用到高渗透性CW模块中,提高了SWIW试验模拟结果的精度.同时,利用改进后的模型探讨传统的解析解模型采用的假设条件是否合理.结果表明:(1)井筒滤水管的位置对浓度结果有影响,滤水管越靠近隔水顶板,抽水阶段的浓度会越高;(2)当含水层的渗透系数较小、储水系数较大时,非稳定流场的作用不能忽略.

参考前人的研究成果,本文采用达西公式来描述SWIW试验的流场变化规律,但实际上井筒内的流动规律十分复杂,现有的模型可能会带来误差,因此在未来研究中,建立一个更符合实际的井筒内水流模型(如N-S方程模型)意义重大.同时,本研究主要集中于宏观模型,没有考虑孔隙介质的微观结果.事实上,不论是地下水流动还是溶质运移,都发生在孔隙中,为此,我们正在开发孔隙尺度(Pore scale)模型,来深入研究SWIW试验中的物质运移规律.

References

- Chen, C., Wen, Z., Liang, X., et al., 2017. Estimation of Hydrogeological Parameters for Representative Aquifers in Jiangnan Plain. *Earth Science*, 42(5): 743—750(in Chinese with English abstract).
- Cvetkovic, V., Cheng, H., 2011. Evaluation of Single-Well Injection-Withdrawal Tests in Swedish Crystalline Rock Using the Lagrangian Travel Time Approach. *Water Resources Research*, 47(2):1—11. <https://doi.org/10.1029/2010WR009627>
- 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>
- Gouze, P., Le Borgne, T., Leprovost, R., et al., 2008. Non-

- Fickian Dispersion in Porous Media: 1. Multiscale Measurements Using Single-Well Injection Withdrawal Tracer Tests. *Water Resources Research*, 44(6):1—11. <https://doi.org/10.1029/2007wr006278>
- Harbaugh, A. W., 2005. The US Geological Survey Modular Ground-Water Model: the Ground-Water Flow Process. US Geological Survey, Reston VA, 253.
- 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). <https://doi.org/10.1029/2008wr007647>
- Istok, J. D., 2013. Push-Pull Tests for Site Characterization. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York.
- Li, M., Liu, W. B., Chen, C. X., 2003. Can MODFLOW Simulating the Groundwater Flow of Mixing Well? *Hydrogeology & Engineering Geology*, 30(5):116—117 (in Chinese).
- Li, X., Wen, Z., Liang, X., et al., 2017. Aquifer Parameter Estimation of Transient Pumping Test Based on Analytical and Numerical Method. *Earth Science*, 42(5): 743—750 (in Chinese with English abstract).
- Mathias, S. A., Todman, L. C., 2010. Step-Drawdown Tests and the Forchheimer Equation. *Water Resources Research*, 46(7). <https://doi.org/10.1029/2009WR008635>
- McDonald, B., Harbaugh, A. W., 1988. MODFLOW, A Modular Three-Dimensional Finite Difference Ground-Water Flow Model, US Geological Survey, Reston VA, 588.
- Neville, C. J., Tonkin, M. J., 2004. Modeling Multiaquifer Wells with MODFLOW. *Ground Water*, 42(6): 910—919. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2004.t01-9-x>
- Peaceman, D. W., 1983. Interpretation of Well-Block Pressures in Numerical Reservoir Simulation with Nonsquare Grid Blocks and Anisotropic Permeability. *SPE Journal*, 23(03): 531—543. <https://doi.org/10.2118/10528-pa>
- Rorabaugh, M. I., 1953. Graphical and Theoretical Analysis of Step-Drawdown Test of Artesian Well. *Proceedings of American Society of Civil Engineers*, 79(362).
- Schroth, M. H., Istok, J. D., 2005. Approximate Solution for Solute Transport during Spherical - Flow Push - Pull Tests. *Ground Water*, 43(2): 280—284. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.0002.x>
- Tsang, Y. W., 1995. Study of Alternative Tracer Tests in Characterizing Transport in Fractured Rocks. *Geophysical Research Letters*, 22(11): 1421—1424. <https://doi.org/10.1029/95gl01093>
- Wang, Q. R., Zhan, H. B., Wang, Y. X., 2017. Single-Well Push-Pull Test in Transient Forchheimer Flow Field. *Journal of Hydrology*, 549: 125—132.
- Zheng, C. M., Wang, P. P., 1999. MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model. *Army Corps of Engineers*, 169(4): 1196—1197. <https://doi.org/10.2214/ajr.169.4.9308495>
- Zheng, C. M., 2010. MT3DMS v5.3 Supplemental User's Guide. U. S. Army Corps of Engineers, Washington DC, 51.

附中文参考文献

- 陈晨, 文章, 梁杏等, 2017. 江汉平原典型含水层水文地质参数反演. *地球科学*, 42(5):728—733.
- 黎明, 刘文波, 陈崇希, 2003. MODFLOW 能模拟地下水混合井流吗? *水文地质工程地质*, 30(5): 116—117.
- 李霞, 文章, 梁杏等, 2017. 基于解析法和数值法的非稳定流抽水试验参数反演. *地球科学*, 42(5): 743—750.