

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.102>



单井注抽试验测算地下水水流速的数值分析

李 旭¹, 苏世林¹, 文 章^{2*}, 许光泉¹

1. 安徽理工大学地球与环境学院,安徽淮南 232001

2. 中国地质大学环境学院,湖北武汉 430074

摘要:为了分析注入阶段地下水水流速及含水层弥散度对单井注抽试验解析模型测算地下水水流速的影响机理,通过采用GMS(groundwater modeling system)软件建立了单井注抽试验数值模型,通过与Leap and Kaplan(1988)近似解析模型计算结果对比分析上述因素对解析模型计算结果的影响。研究结果表明:地下水水流速越大或自由迁移阶段时间越长,近似解析模型计算的误差越大;注入阶段地下水水流速的作用对溶质羽质心迁移的影响较小,故近似解析模型中考虑注入阶段质心位移会导致计算误差增大;含水层弥散度越大,解析模型计算的误差越大。总体而言,注入阶段地下水水流速对近似解析模型计算结果影响较小,而弥散度有着显著的影响。

关键词:单井注抽试验;地下水水流速;穿透曲线;溶质运移;水文地质。

中图分类号: P641.2

文章编号: 1000—2383(2022)02—633—09

收稿日期:2021—09—02

Numerical Analysis of Estimating Groundwater Velocity through Single-Well Push-Pull Test

Li Xu¹, Su Shilin¹, Wen Zhang^{2*}, Xu Guangquan¹

1. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

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

Abstract: For the purpose of analyzing the influencing mechanism of groundwater flow velocity in the injection phase (GFVIP) and dispersivity on calculation of groundwater velocity, this study employed GMS (Groundwater Modeling System) to develop numerical models of single-well push-pull (SWPP) test, and the numerical results are compared with the approximately analytical ones of Leap and Kaplan (1988) to uncover the effects of GFVIP and dispersivity on the calculation accuracy of the analytical model. The results indicate that a larger groundwater velocity or a longer drift time results in a larger misestimation of groundwater velocity by the model of Leap and Kaplan (1988); GFVIP has little impact on the migration distance of solute plume centroid, thus the impact of GFIP on the approximately analytical model can be neglected. Additionally, a greater dispersivity results in a more significant calculation error by the model of Leap and Kaplan (1988). Overall, the GFVIP has limited influence on the calculation results by the approximately analytical model of Leap and Kaplan (1988), while dispersivity has remarkable influence on the estimation accuracy.

Key words: single-well Push-pull tests; groundwater velocity; breakthrough curves; solute transport; hydrogeology.

基金项目:安徽高校自然科学研究重点项目(No. KJ2020A0316);安徽理工大学引进人才基金(No.13200399)。

作者简介:李旭(1990—),男,讲师,主要从事地下水渗流及溶质运移数值模拟工作。ORCID:0000-0002-7746-8598. E-mail: lixu@aust.edu.cn

*通讯作者:文章, ORCID:0000-0001-9672-3219. E-mail: wenz@cug.edu.cn

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

Citation: Li Xu, Su Shilin, Wen Zhang, Xu Guangquan, 2022. Numerical Analysis of Estimating Groundwater Velocity through Single-Well Push-Pull Test. *Earth Science*, 47(02):633—641.

0 引言

近年来,我国部分地区的地下水环境问题日益恶化,对工农业生产、生态环境保护以及居民的饮用水安全等造成了严重的影响(张人权,2003;张艳等,2018;郑才庆等,2018;叶慧君等,2019)。为了能够有效保护和及时修复地下水资源,首先要了解含水层的弥散度、孔隙度、地下水水流速等物理参数(郑菲等,2015;范春辉等,2017;Wang and Zhan, 2019;蒋立群等,2021),尤其是准确获取地下水水流速对于区域水资源评价、污染物运移预测以及地下水修复等都具有极其重要的现实意义。目前获取地下水水流速主要是通过带有观测孔的示踪试验,该试验至少需要3口井,费用高昂,而且由于地下水水流速较小使得试验周期长(Hall *et al.*, 1991; Chen *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2019)。相比带观测孔的示踪试验,单井注抽试验(single-well push-pull test, SWPP试验)在同一口井内进行注入和抽取示踪剂,并监测示踪剂的浓度变化(Leap and Kaplan, 1988; Wang *et al.*, 2017),通过解析公式计算或者拟合穿透曲线即可获取有效孔隙度、地下水水流速等物理参数,且该试验具有操作简单、费用低以及耗时短等特点(Panteleit *et al.*, 2006; Matsumoto *et al.*, 2020)。SWPP试验测地下水水流速总共分为3个阶段:①将惰性示踪剂(例如NaCl溶液)通过抽水井注入含水层;②注入示踪剂随着地下水流向下游自由迁移;③利用同一个抽水井抽取地下水,将原先注入的示踪剂抽出来,并监测其浓度,获得示踪剂的穿透曲线,如示意图1所示。

为了解译SWPP试验结果,需要建立相应的数学模型(Leap and Kaplan, 1988; Haggerty *et al.*, 2001; Jutta *et al.*, 2002; Schroth and Istok, 2010)。Leap and Kaplan(1988)首次提出利用SWPP试验获取地下水水流速的方法,建立了SWPP测地下水水流速的近似解析模型,并开展了相关室内实验,结果表明SWPP试验的解析模型能够近似地获取地下水水流速。由于该模型是利用溶质羽的质心来进行建模和计算的,忽略水动力弥散作用,因此其计算结果必然与实际情况存在一定的误差。此外,Paradis *et al.*(2018)认为Leap and Kaplan(1988)的方法忽略注水阶段溶质羽的质心也会发生位移,主要是受到溶液注入和原始地下水水流场的作用,为此基于Leap and Kaplan(1988)的模型建立了考虑注水阶段地下

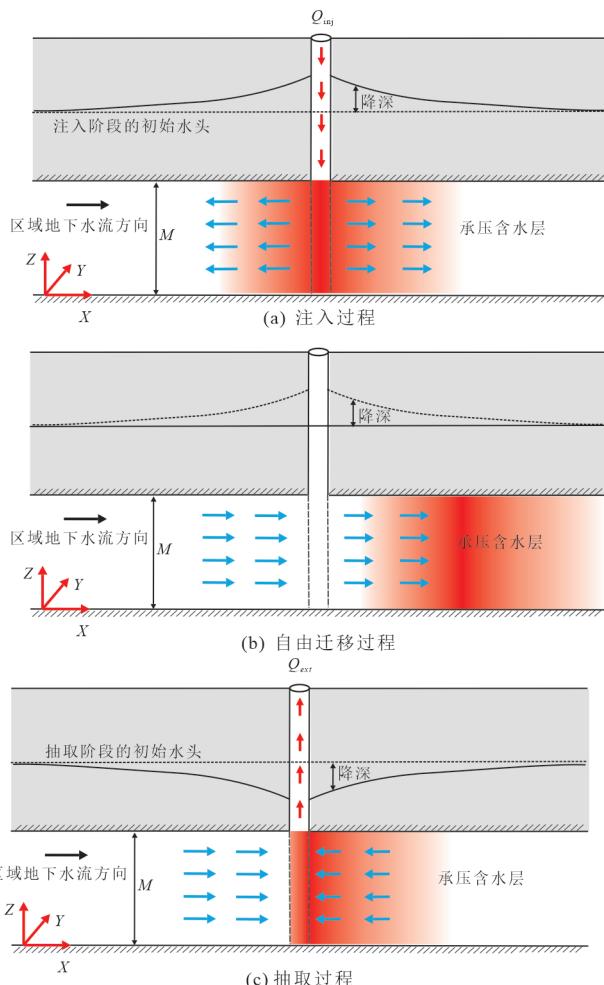


图1 单井注抽试验概念模型

Fig.1 Conceptual model of single-well push-pull test

水流速作用的近似解析模型。然而,实际溶液注入并不会导致溶质羽的质心发生位移,因此Paradis *et al.*(2019)对Paradis *et al.*(2018)的模型进行了修正,但是新修正的模型的可靠性还需要进一步验证。

上述表明,现有关于利用SWPP试验获取地下水水流速的模型均是在Leap and Kaplan(1988)基础上建立的高度概化的模型,时常忽略注入阶段地下水水流速、弥散等因素等影响,因此上述因素对SWPP试验的影响机理有待于进一步分析。为此,本文主要进行以下3个方面的探讨:(1)利用GMS软件的MODFLOW/MT3D模块建立三维SWPP试验数值模型;(2)利用数值模拟计算结果分析地下水水流速大小对穿透曲线的影响机理;(3)将本次数值模型结果与Leap and Kaplan(1988)、Paradis *et al.*(2019)的模型计算结果进行对比分析,探索地下水水流速的大小、注入阶段地下水水流速以及弥散作用等因素对解析模型计算结果的影响。

1 SWPP 试验数值模型的建立与求解

为了简化数学模型,本文基于如下假设条件:(1)溶质为惰性溶质;(2)承压含水层为等厚且水平无限延伸,其厚度为 M ;(3)注水井为完整井且半径为 r_w ;(4)注水井附近含水层为均质且各向同性;(5)示踪剂为定流量和定浓度注入,且定流量抽出;(6)存在一个稳定的原始地下水水流场.描述SWPP试验中溶质运移的控制方程为:

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

式中: C 为含水层中溶质的浓度 [ML^{-3}]; θ 为含水层的孔隙度 [—]; $x_i(i=1,2,3)$ 是空间坐标, $i,j=1,2,3$ 分别代表 x,y 和 z 轴, D_{ij} 分别为水动力弥散系数的张量 [L^2T^{-1}]; v_i 为含水层区沿 x,y,z 方向的地下水达西流速 [LT^{-1}]; I 为源汇项 [$ML^{-3}T^{-1}$]; t 为时间 [T].为了简化模型,本文的研究区范围为矩形,研究区的边界对溶质运移影响较小,可以忽略(Fernandez-Garcia et al., 2004),如图2,3所示,并利用GMS软件中的MODFLOW/MT3D模块建立了三维SWPP试验的模型.在MODFLOW/MT3D模块中井为源汇项(顾昊琛等,2020).MT3D模块采用块中心的优先差分网格来对研究区进行离散,其节点位于每个网格的中心,利用MODFLOW模块计算各节点的水头,代入MT3D模块进行计算.本模型MT3D模块采用HMOC(混合特征线方法)来求解计算,能够有效消除数值弥散以及数值震荡,提高计算效率与求解精度.因此SWPP试验的3个阶段的初始和边界条件为:

第一阶段(注水阶段):

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

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

$$I_{inj}|_{x=0,0 \leq z \leq M} = C_w \cdot q_{inj}. \quad (4)$$

第二阶段(自由迁移阶段):

$$C(x,y,z,0) = C_{inj}(x,y,z,t_{inj}), \quad (5)$$

$$C(|x|=L,y,z,t) = C(|y|=L,z,t) = 0, \quad (6)$$

$$I_{drift}|_{x=0,0 \leq z \leq M} = 0. \quad (7)$$

第三阶段(抽水阶段):

$$C(x,y,z,0) = C_{drift}(x,y,z,t_{drift}), \quad (8)$$

$$C(|x|=L,y,z,t) = C(|y|=L,z,t) = 0, \quad (9)$$

$$I_{pump}|_{x=0,0 \leq z \leq M} = -C_s \cdot q_{pump}, \quad (10)$$

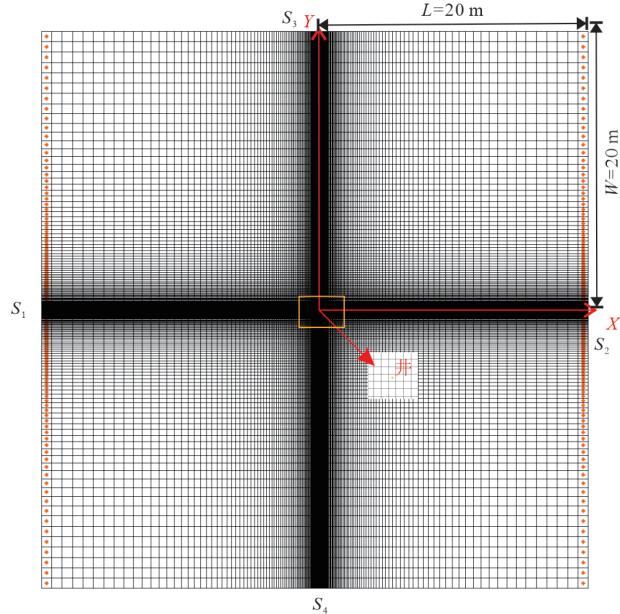


图2 网格剖分平面示意图

Fig.2 Mesh generation in a plan view

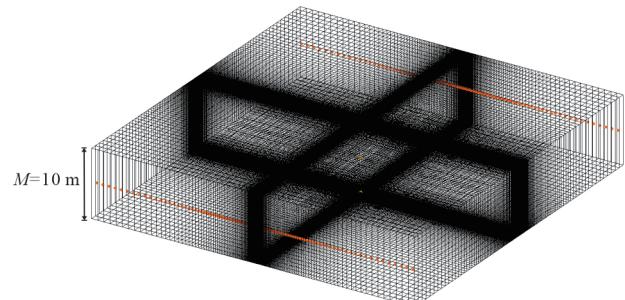


图3 网格剖分三维示意图

Fig.3 Mesh generation in 3D view

式中: I_{inj} 、 I_{drift} 和 I_{pump} 分别表示注水阶段、自由迁移阶段以及抽水阶段井的溶质源汇项 [$ML^{-3}T^{-1}$], q_{inj} 和 q_{pump} 分别为注入和抽出溶液的单位体积的流量 [T^{-1}]; C_w 和 C_s 分别为注水阶段和抽水阶段井中的溶质浓度 [ML^{-3}]; L 和 W 为研究区的长和宽的一半 [L]; M 为含水层的厚度 [L]; t_{inj1} 和 t_{drift1} 分别为注水和自由迁移阶段的最后时刻 [T]; C_{inj} 和 C_{drift} 分别为注水阶段和自由迁移阶段最后时刻的溶质场浓度 [ML^{-3}].为了建立一个稳定的地下水水流场,模型中承压含水层的左边界和右边界均为定水头边界,分别为:

$$H(x,y)|_{S_1} = H_1, H(x,y)|_{S_2} = H_2, \quad (11)$$

$$K \frac{\partial H}{\partial n}|_{S_3} = 0, K \frac{\partial H}{\partial n}|_{S_4} = 0, \quad (12)$$

$$v_x = -KJ/\theta = v_d/\theta, \quad (13)$$

式中: S_1, S_2, S_3 和 S_4 是模型的边界,为了构建稳定的地下水水流场, S_1 和 S_2 是设置为定水头边界,水头分别为 H_1 和 H_2 ; S_3 和 S_4 设置为隔水边界; v_x 为地下水的实际流速 [LT^{-1}]; v_d 为地下水的达西流速 [LT^{-1}]; K 是含水层的渗透系数 [LT^{-1}]; J 是含水层的水力梯度 [—]; n 为边界 S_3 的外法线方向.通过改变定水头边界 S_1 和 S_2 的水头 H_1 和 H_2 ,根据达西定律可以获得不同的地下水水流速.

本模型采用传统的 CW(Conventional Well)模块(顾昊琛等,2020),该模块假设井壁的流量与含水层的导水系数相关,即线汇理论.本模型的范围为 $40\text{ m} \times 40\text{ m} \times 10\text{ m}$,由于溶质迁移过程主要集中于抽、注水井附近,该范围的边界对 SWPP 试验的溶质运移影响可以忽略不计(Li et al., 2019).本模型有限差分的网格为 25 921 个,且在抽水井附近进行加密,如图 3 所示.模型的主要参数设置为: $\theta=0.3$, $Q_{\text{inj}}=15\text{ m}^3/\text{d}$, $Q_{\text{pump}}=-30\text{ m}^3/\text{d}$, $t_{\text{inj}}=6\text{ h}$, $t_{\text{ext}}=24\text{ h}$,以此建立了三维非稳定流 SWPP 试验数值模型.为了进一步验证本模型的可靠性,本文将与 Wang et al.(2018)SWPP 试验的解析模型进行对比验证.Wang et al.(2018)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.因此,本文将数值模型的特殊情况,即不考虑地下水水流速(即 $H_1=H_2$)的结果与 Wang et al.(2018)的计算结果进行对比.此外,为了忽略非稳定流对试验结果的影响,本模型中储水系数(S_s)设置较小的值为 10^{-6} .图 4 为弥散度 α_L 分别取 0.10 m 、 0.25 m 和 0.50 m 时数值模拟结果与 Wang et al.(2018)计算结果的对比图.结果显示数值模拟的穿透曲线能很好的吻合 Wang et al.(2018)的计算结果,由此可见本文数值模型是准确的,注水井附近的注/抽阶段数值弥散或数值震荡是可以忽略的.为了进一步验证模型在原始地下水水流场作用下的数值计算精度,尤其是自由迁移阶段,故定义 Peclet 常数($P_e=v\Delta x/D_L \approx \Delta x/\alpha_L$)和 Courant 常数($C=v\Delta t/\Delta x$),其中 Δx 为空间步长 [L], Δt 为时间步长 [T].通常数值模型的 $P_e \leq 2$ 和 $C \leq 1$ 时,数值弥散或数值震荡是可以忽略(Zhu et al., 2020).由于本模型网格为非均匀加密,且在抽水井附近进行加密,因此 Δx 最大值选取地下水水流速 $v_{\text{max}}=3.1 \times 10^{-6}\text{ m/s}$ 时溶质迁移最远处浓度为零的网格长度,即为 $\Delta x_{\text{max}}=0.059\text{ m}$,且 $\alpha_{L,\text{min}}=0.05\text{ m}$,则 $P_{e,\text{max}}=1.18$.此外,对于 Courant 常数, v_{max}

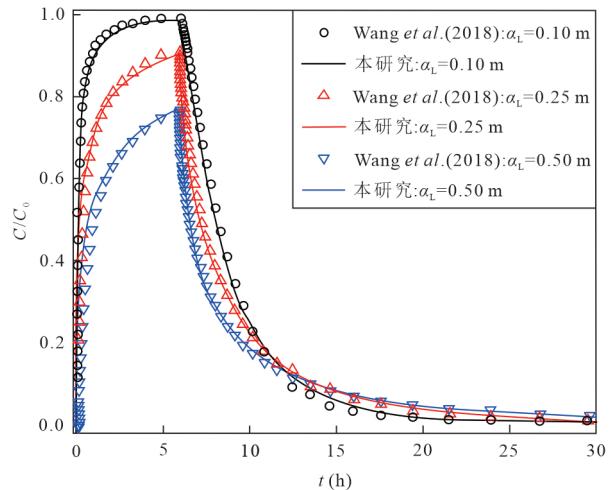


图 4 数值解与 Wang et al.(2018)的解析解对比图

Fig. 4 Comparison between the numerical solutions of this study and the analytical solutions of Wang et al. (2018)

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)	$2W$	40
含水层长度(m)	$2L$	40
含水层厚度(m)	M	10
储水系数	S_s	10^{-6}
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	21.33
边界 S_2 的水头(m)	H_2	20
纵向弥散度(m)	α_L	0.05
注入与抽取的流量(m^3/d)	Q	15, 30
注入阶段时间(h)	t_{inj}	2
自由迁移时间(h)	t_{drift}	36
抽水阶段时间(h)	t_{pump}	36

$=3.1 \times 10^{-6}\text{ m/s}$, $\Delta x_{\text{min}}=0.02\text{ m}$, $\Delta t_{\text{max}}=30\text{ min}$,则 $C_{\text{max}}=0.279$.本模型计算参数均在上述范围内,且 Peclet 常数和 Courant 常数均满足 $P_e \leq 2$ 和 $C \leq 1$ 的条件,因此本数值模型可以忽略数值弥散或数值震荡对参数计算精度的影响.

2 结果分析与讨论

利用上述验证的模型,计算分析地下水水流速大小对穿透曲线的影响,并将本次数值模型结果与 Leap and Kaplan(1988)、Paradis et al.(2019)的计算结果进行对比,分析地下水水流速和弥散作用对 SWPP 试验影响,模型参数见表 1.

2.1 地下水流速对穿透曲线影响

SWPP试验主要是通过利用获取的穿透曲线进行计算得到目标含水层的地下水水流速,因此,通过改变地下水水流速分析其对穿透曲线影响。地下水水流速 v_d 分别设置为 6×10^{-7} m/s、 9×10^{-7} m/s、 1.2×10^{-6} m/s、 1.5×10^{-6} m/s、 2.2×10^{-6} m/s、 2.5×10^{-6} m/s、 2.8×10^{-6} m/s、 3.1×10^{-6} m/s(Li et al., 2019)。模型其他参数设置为: $\alpha_L=0.05$ m, $\theta=0.3$, $Q_{\text{inj}}=15$ m³/d, $Q_{\text{pump}}=-30$ m³/d。结果发现(如图5)地下水水流速对试验的SWPP试验的穿透曲线有较大影响,该穿透曲线可以分为两种类型;第一种当较低流速(例如, $\leq 1.5 \times 10^{-6}$ m/s)下的穿透曲线(如图5a),该类型的曲线具有单调衰减的趋势。对于这种类型的穿透曲线,示踪剂浓度与区域地下水达西流速呈明显的负相关的关系,地下水的流速越大则早期穿透曲线的浓度越低,另外,地下水水流速越大则第一类穿透曲线的拖尾现象越明显。第二种,当流速较高,至少地下水水流速 $\geq 2.2 \times 10^{-6}$ m/s时穿透曲线早期阶段具有一个峰值,(如图5b)。从图中还可以看出到达峰值的时间随着地下水水流速的增加而增加,同时峰值的浓度随着地下水水流速的增加而减小。

2.2 解析模型计算误差对比分析

2.2.1 地下水流速对计算结果的影响 Leap and Kaplan(1988)提出利用SWPP试验的溶质羽的质心在3个迁移阶段过程中的位移的矢量之和为零来近似来计算地下水水流速,认为在抽取阶段抽回溶质的一半质量的时刻即为溶质羽的质心到达抽水井的时刻,其数学模型为:

$$r_1 + r_2 + r_3 = 0, \quad (14)$$

$$v_a t_{\text{drift}} + v_a t_a - \left(Q_{\text{pump}} / \pi \theta M \right)^{1/2} (t_a)^{1/2} = 0, \quad (15)$$

$$v_a = \frac{\left(Q_{\text{pump}} t_a \right)^{1/2}}{t_a + t_{\text{drift}}}, \quad (16)$$

$$m_a = \int_0^{t_a} C(t) Q_{\text{pump}} dt, \quad (17)$$

$$m = \int_0^{t_{\text{pump}}} C(t) Q_{\text{pump}} dt, \quad (18)$$

式中: r_1 为自由迁移阶段的溶质羽质心的迁移距离, $r_1=v_a t_{\text{drift}}$ [L]; r_2 为抽水阶段的溶质羽质心受到原始地下水作用迁移距离, $r_2=v_a t_a$ [L]; r_3 为抽水阶段的溶质羽质心受到抽水作用迁移距离, $r_3=(Q_{\text{pump}}/\pi \theta M)^{1/2} (t_a)^{1/2}$ [L]; Q_{pump} 是抽水的流量[L³T⁻¹]; t_a 是抽水阶段溶质羽的质心到达抽水井的时间[T]; t_{drift} 是第二阶段示踪剂随地下水水流自由运移的时间[T]; t_{pump} 是抽水阶段的时间[T]; v_a 为实际地下水流速[L T⁻¹]; m 为抽水阶段溶质的总质量[M]; m_a 为抽水阶段溶质的总质量的一半[M]。通过式(17)、

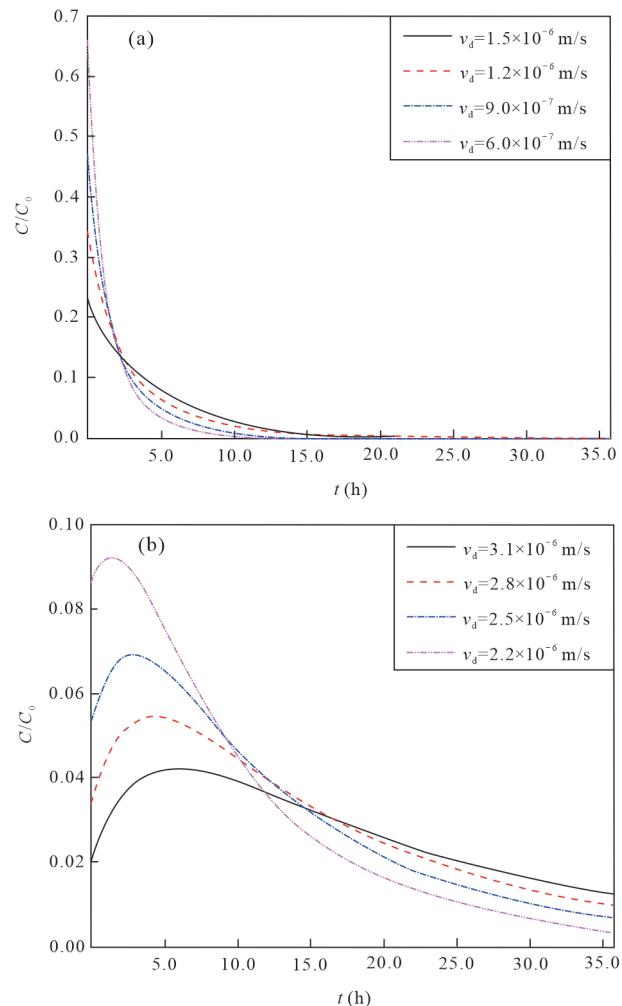


图5 不同流速情况下的SWPP试验的穿透曲线

Fig.5 Breakthrough curves of SWPP tests for different groundwater flow
a. 低流速情况;b. 高流速情况

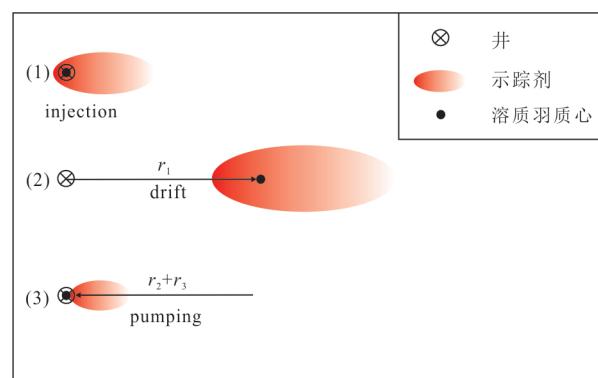


图6 SWPP试验计算地下水水流速平面示意图

Fig.6 The conceptual model of single-well push-pull test in a plan view
据 Paradis et al.(2018)修改

速[L T⁻¹]; m 为抽水阶段溶质的总质量[M]; m_a 为抽水阶段溶质的总质量的一半[M]。通过式(17)、

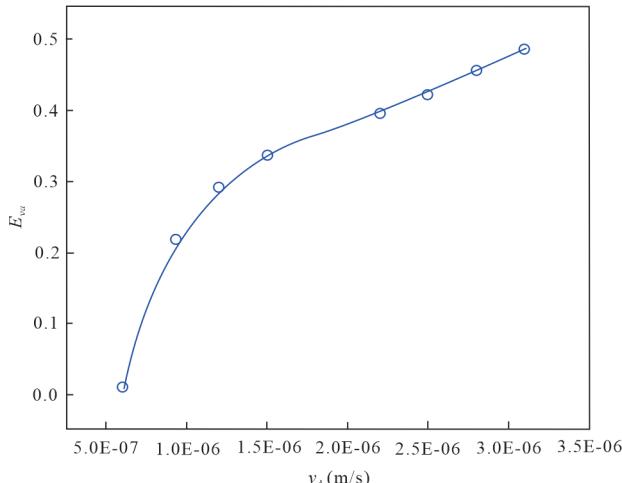


图 7 相对误差随地下水水流速变化图

Fig.7 Relative errors curves for different groundwater flow velocities

表 2 计算的地下水水流速

Table 2 Calculated groundwater velocities

t_{drift} (h)	t_a (h)	v_a (m/s)	v_x (m/s)	E_{va}
36	13.2	5.28×10^{-6}	1.03×10^{-5}	0.49
36	11.2	5.07×10^{-6}	9.33×10^{-6}	0.46
36	9.2	4.80×10^{-6}	8.33×10^{-6}	0.42
36	7.1	4.42×10^{-6}	7.33×10^{-6}	0.40
36	3.3	3.31×10^{-6}	5.00×10^{-6}	0.34
36	2.3	2.83×10^{-6}	4.00×10^{-6}	0.29
36	1.5	2.34×10^{-6}	3.00×10^{-6}	0.22
36	1.1	2.02×10^{-6}	2.00×10^{-6}	0.01

(18) 对数值模型计算的穿透曲线进行积分计算, 当 $m_a = 1/2m$ 时, 此时 t_a 即为抽水阶段溶质羽的质心到达抽水井的时间。通过分析解析模型计算的结果与数值模型中设置的地下水水流速进行对比分析, 以此来探索地下水水流速大小对解析法计算结果的影响机理。

利用式(16)~(17), 可以计算地下水水流速, 其结果见表 2。另外, 定义了一个相对误差参数 $E_{va} = |v_a - v_x|/v_x$, 其中 v_x 可以通过式(13)获得, 该参数反映计算值与实际值之间的差异程度。如图 7 所示, 实际地下水水流速值与解析的计算值存在一定的差异, 且地下水水流速越大, 相对误差函数则越大, 利用解析法计算的误差越大。这主要是由于地下水水流速增大, 溶质羽迁移越远, 导致部分示踪剂不能回收, 引起溶质羽质心位置发生变化。

2.2.2 自由迁移阶段时间对计算结果的影响

为了进一步确定迁移距离对计算结果的影响, 本文通

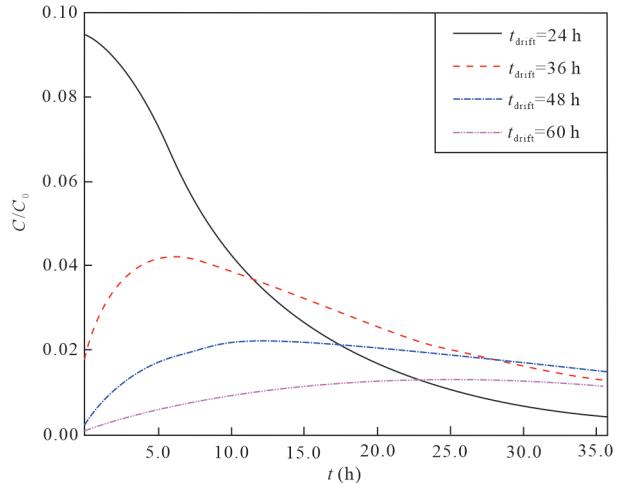


图 8 不同自由迁移时间情况下的 SWPP 试验的穿透曲线

Fig.8 Breakthrough curves of SWPP tests for different rest times

过改变自由迁移阶段的时间 t_{drift} , 来分析溶质羽迁移距离对解析模型计算误差的影响。在数值模型中, t_{drift} 分别设置为 24 h、36 h、48 h 以及 60 h, 其他参数见表 1。图 8 为不同自由迁移时间情况下的 SWPP 试验的穿透曲线。从图 8 中可以看出, 随着自由迁移时间的增长, 示踪剂的穿透曲线类型由第一类曲线向第二曲线转变。

图 9 为不同地下水水流速条件的相对误差 E_{va} 变化曲线。结果表明随着自由迁移阶段的时间增大, 解析模型的计算误差也不断增大。主要原因是由于自由迁移阶段的时间增大, 示踪剂迁移越远, 导致部分示踪剂不能回收, 引起解析模型计算误差增大, 也进一步表明在试验过程中溶质羽迁移过远产生较大的计算误差。因此, 为了避免较大的误差产生, 在实际的 SWPP 试验应用过程中第二阶段的时间不宜过长。此外, 在抽水过程中提高抽水量, 增大示踪剂的捕获范围。

2.2.3 注入阶段地下水水流速对计算结果影响

Leap and Kaplan(1988) 的解析模型中忽略注入阶段地下水水流对溶质迁移的影响。为此, Paradis *et al.* (2019) 在 Leap and Kaplan(1988) 的模型基础上提出了考虑注入阶段地下水水流速作用的 SWPP 模型, 其数学模型为:

$$r_{\text{inj}} + r_1 + r_2 + r_3 = 0, \quad (20)$$

$$v_a t_{\text{inj}} + v_a t_{\text{drift}} + v_a t_a - \left(Q_{\text{pump}} / \pi \theta B \right)^{1/2} \left(t_a \right)^{1/2} = 0 \quad (21)$$

$$v_a = \frac{\left(Q_{\text{pump}} t_a \right)^{1/2}}{t_a + t_{\text{drift}} + t_{\text{inj}}}, \quad (22)$$

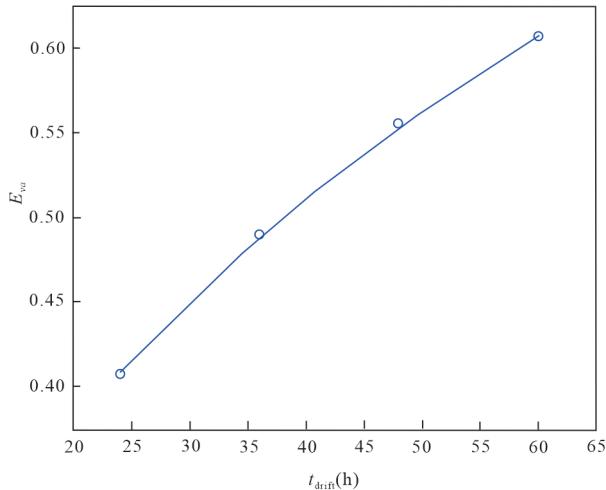


图9 相对误差随不同自由迁移阶段时间变化图

Fig.9 Relative errors curves for different rest times

式中: r_{inj} 为注入阶段受地下水水流作用下溶质羽质心的迁移距离, $r_{\text{inj}}=v_a t_{\text{inj}}$ [L].

图10为Leap and Kaplan(1988)和Paradis *et al.*(2019)两种模型不同地下水水流速条件下的相对误差 E_{va} 变化曲线.从图10可以看出,两种SWPP试验模型均表现出随着地下水水流速的增大,其计算的误差不断增大,且出现相同的变化趋势.此外,尽管Paradis *et al.*(2019)考虑了注入阶段地下水水流速的作用,但是从图10可以发现其计算的误差要高于Leap and Kaplan(1988)的解.这表明Paradis *et al.*(2019)假定在注入阶段质心偏移井筒的距离为 $v_a t_{\text{inj}}$,这一假设与实际情况存在一定的误差.其主要原因为尽管在注入阶段地下水水流会改变溶质羽的分布形态,但注水井附近的地下水水流基本上是径向流,对溶质羽质心的改变十分有限,溶质羽的质心没有较大范围的偏离井筒.总之,SWPP试验注入阶段地下水作用有限,利用 $v_a t_{\text{inj}}$ 来概化溶质羽的质心迁移距离会导致误差进一步增大,因此注入阶段原始地下水水流场作用在解析模型中的表现形式还有待进一步研究.

2.2.4 水动力弥散作用对计算结果的影响 上述的Leap and Kaplan(1988)及Paradis *et al.*(2019)的解析模型均忽略了含水层水动力弥散的作用.因此,有必要进一步探索水动力弥散对解析模型计算误差的影响机制.图11为不同弥散度情况下的SWPP试验的穿透曲线.模型中弥散度设置为: $\alpha_L=0.05 \text{ m}$ 、 0.10 m 及 0.15 m .从图11中可以看出,弥散度的大小会改变穿透曲线的类型.例如,当弥散度 $\alpha_L=0.10 \text{ m}$,穿透曲线的类型由第二类转变成为

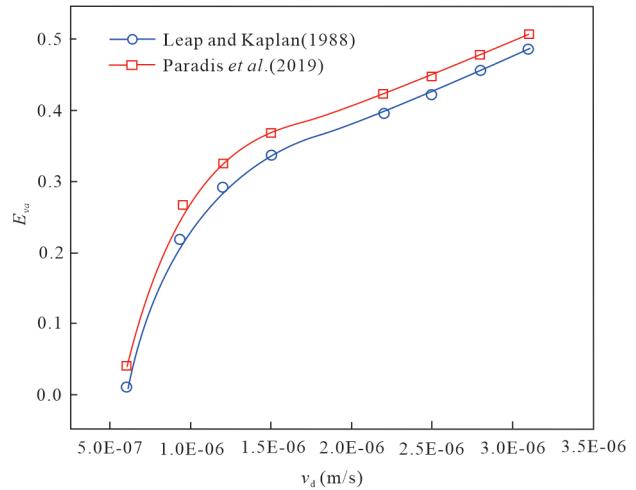
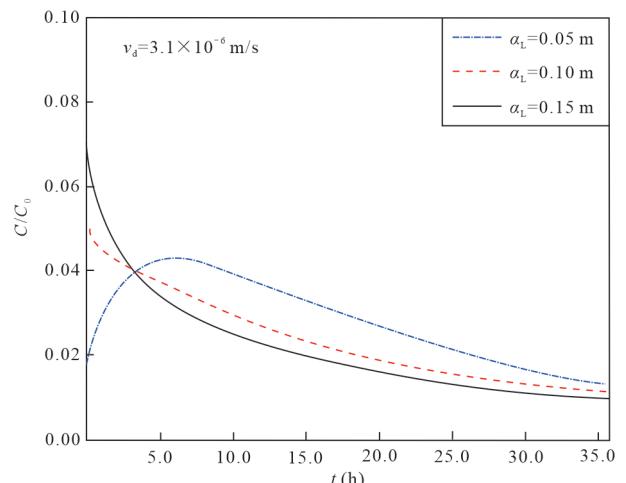
图10 两种模型对于不同地下水水流速条件下的相对误差 E_{va} 变化曲线Fig.10 Variation curve of relative error E_{va} of the two models under different groundwater velocity conditions

图11 不同弥散度情况下的SWPP试验的穿透曲线

Fig.11 Breakthrough curves of SWPP tests for different longitudinal dispersivities

了第一类.图12为不同弥散度条件的相对误差变化曲线.从图12可以看出,随着弥散度的增大,解析模型的计算误差也不断增大.主要原因是由于弥散度增大,示踪剂迁移范围越大,同时在径向和原始地下水水流场共同作用下,导致示踪剂溶质羽的质心位置发生变化,从而引起解析模型计算误差增大.

3 结论

由于SWPP试验相对于带观测井的示踪试验具有操作简单、成本低、效率高等优点,其解析模型已经被广泛应用于测定地下水水流速.本文通过建立

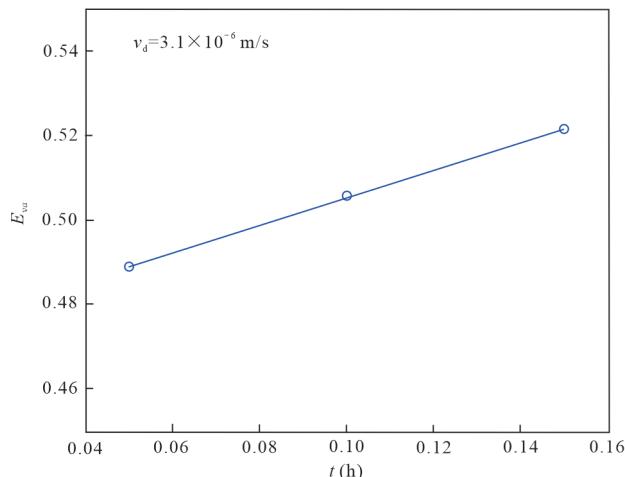


图 12 不同弥散度条件下相对误差的变化图

Fig.12 Relative errors curves for different longitudinal dispersivities

了 SWPP 试验数值模型, 分析了地下水流速的大小、注入阶段地下水水流速以及水动力弥散作用对 SWPP 试验的穿透曲线以及解析计算模型计算结果的影响机理。主要结论如下:

(1) 现有的解析模型计算的结果均与实际的情况存在一定的误差, 地下水流速越大或自由迁移阶段时间越长, 会导致溶质羽迁移的距离越远, 使得部分溶质无法回收, 引起误差增大。

(2) 注入阶段地下水水流速的作用对溶质羽质心迁移的影响较小, Paradis *et al.* (2019) 近似解析模型考虑注入阶段质心位移会导致参数反演误差进一步增大。

(3) 现有的解析模型均为高度概化的模型, 无法考虑水动力弥散的作用, 通过数值与解析计算结果对比, 也说明忽略弥散度会导致计算误差的产生, 且弥散度越大, 误差越大。

References

- Chen, K.W., Zhan, H.B., Yang, Q., 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*, (2): 23–27, 55 (in Chinese with English abstract).
- Fernandez-Garcia, D., Illangasekare, T.H., Rajaram, H., 2004. Conservative and Sorptive Forced-Gradient and Uniform Flow Tracer Tests in a Three-Dimensional Laboratory Test Aquifer. *Water Resources Research*, 40 (10):2709–2710. <https://doi.org/10.1029/2004WR003112>
- Gu, H.C., Wang, Q.R., Zhan, H.B., 2020. An Improved Approach in Modeling Injection-Withdrawal Test of the Partially Penetrating Well. *Earth Science*, 43(2):685–692 (in Chinese with English abstract).
- Haggerty, R., Fleming, S. W., Meigs, L. C., et al., 2001. Tracer Tests in a Fractured Dolomite: 2. Analysis of mass Transfer in Single-Well Injection-Withdrawal Tests. *Water Resources Research*, 37(5): 1129–1142. <https://doi.org/10.1029/2000WR900334>
- Hall, S.H., Luttrell, S.P., Cronin, W.E., 1991. A Method for Estimating Effective Porosity and Ground-Water Velocity. *Ground Water*, 29(2): 171–174. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(91\)91266-T](https://doi.org/10.1016/0148-9062(91)91266-T)
- Jinag, L.Q., Sun, R.L., Liang, X., 2021. Predicting Groundwater Flow and Transport in the Heterogeneous Aquifer Sandbox Using Different Parameter Estimation Methods. *Earth Science*, 46 (11): 4150–4160 (in Chinese with English abstract).
- Jutta, K., Oliver, P., Schroth, M.H., et al., 2002. Sulfate-Reducing Bacterial Community Response to Carbon Source Amendments in Contaminated Aquifer Microcosms. *Fems Microbiology Ecology*, (1): 109–118. [https://doi.org/10.1016/S0168-6496\(02\)00307-0](https://doi.org/10.1016/S0168-6496(02)00307-0)
- 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(24): 993–998. <https://doi.org/10.1029/WR024i007p00993>
- 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(12): 123931. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123931>
- Matsumoto, S., Machida, I., Hebig, K., et al., 2020. Estimation of Very Slow Groundwater Movement Using a Single-Well Push-Pull Test. *Journal of Hydrology*, 577(12): 125676. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125676>
- Panteleit, B., Kessels, W., Binot, F., 2006. Mud Tracer Test during Soft Rock Drilling. *Water Resources Research*, 42 (11):150–152. <https://doi.org/10.1029/2005WR004487>
- Paradis, C.J., Mekay, 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, 437–439. <https://doi.org/10.1007/s00429-019-01670-w>

- 10.1007/s10040-018-1879-y
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: 381—393. <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1672-3>
- Schroth, M.H., Istok, J.D., 2010. Models to Determine First-Order Rate Coefficients from Single-Well Push-Pull Tests. *Ground Water*, 44(2): 275—283. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00107.x>
- Wang, Q.R., Shi, W.G., Zhan, H.B., et al., 2018. Models of Single-Well Push-Pull Test with Mixing Effect in the Wellbore. *Water Resources Research*, 54: 10155—10171. <https://doi.org/10.1029/2018WR023317>
- 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-2018-181>
- Wang, Q.R., Zhan, H.B., Wang, Y., 2017. Single-Well Push-Pull Test in Transient Forchheimer Flow Field. *Journal of Hydrology*, 549: 125—132. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.066>
- Ye, H.J., Zhang, R.X., Wu, P., et al., 2019. Characteristics and Driving Factor of Hydrochemical Evolution in Karst Water in the Critical Zone of Liupanshui Mining Area. *Earth Science*, 44(9):2887—2898(in Chinese with English abstract).
- Zhang, R.Q., 2003. Characteristics of Groundwater Resources and Their Reasonable Development. *Hydrogeology & Engineering Geology*, (6): 1—5(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):167—180(in Chinese with English abstract).
- Zheng, C.Q., Zhi, G.Q., Li, T.F., et al., 2018. Analysis of Current Situation and Countermeasures of Groundwater Pollution in China. *Environmental Science Survey*, 37(S1): 49—52(in Chinese with English abstract).
- Zheng, F., Gao, Y.W., Shi, X.Q., et al., 2015. Influence of Groundwater Flow Velocity and Geological Heterogeneity on DNAPL Migration in Saturated Porous Media. *Journal of Hydraulic Engineering*, (8): 925—933(in Chinese with English abstract).
- Zhu, Q., Wen, Z., Zhan, H.B., et al., 2020. Optimization Strategies for in Situ Groundwater Remediation by a Vertical Circulation Well Based on Particle-Tracking and Node-Dependent Finite Difference Methods. *Water Resources Research*, 56(11):1—12.

附中文参考文献

- 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,43(2):685—692.
- 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,(2): 23—27,55.
- 蒋立群,孙蓉琳,梁杏,2021.含水层非均质性不同刻画方法对地下水水流和溶质运移预测的影响.地球科学, 46(11): 4150—4160.
- 张人权,2003.地下水资源特性及其合理开发利用.水文地质工程地质, (6): 1—5.
- 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): 167—180.
- 叶慧君,张瑞雪,吴攀,等,2019.六盘水矿区关键带岩溶水化学演化特征及驱动因子.地球科学,44(9):2887—2898.
- 郑才庆,支国强,李田富,等,2018.我国地下水污染现状及对策措施分析.环境科学导刊,37(S1):49—52.
- 郑菲,高燕维,施小清,等,2015.地下水水流速及介质非均质性对重非水相流体运移的影响.水利学报,(8): 925—933.