

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2020.0082

樊帅,夏强,邓英尔,等. 侧向有界条件下垂向环流井水动力场模拟[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(4): 149-158.
FAN S, XIA Q, DENG Y E, et al. Numerical simulation of vertical circulation well under lateral boundary conditions[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(4): 149-158. (in Chinese)

侧向有界条件下垂向环流井水动力场模拟

樊帅, 夏强, 邓英尔, 肖先煊

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘要:分析现有的侧向无界条件下垂向环流井水动力场数学模型与解析解, 基于 MODFLOW 建立侧向有界条件下的数值模型, 模拟多组不同抽注流量和抽注段间距的情景, 绘制水头误差分布图、前向追踪流线图和地下水流量占比图, 通过对比分析论证了侧向边界对水头、流线形态和流量占比的影响。结果表明: 随着流量增大以及抽注段间距增大, 垂向环流井水动力场循环范围增大, 边界对垂向环流井水动力场影响逐渐明显, 流线越接近侧向边界, 其形态由椭圆形趋近于矩形, 且最外围均衡区内地下水交换量占比降低趋势明显; 提出无量纲参数, 进一步定量地分析侧向边界对流场的影响。

关键词:垂向环流井; 数值模型; 水动力场; 含水层修复; 侧向边界

中图分类号: X523 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Numerical simulation of vertical circulation well under lateral boundary conditions

FAN Shuai, XIA Qiang, DENG Yinger, XIAO Xianxuan

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The influence of the lateral boundary conditions on the hydrodynamic field of the vertical circulation well is focused on. The mathematical model and analytical solution under the existing lateral unbounded conditions are analyzed. Based on MODFLOW, the numerical model under the condition of lateral boundedness is established, which simulates the multiple sets of different pumping flow and sampling intervals. The error distribution map, the forward trace streamline diagram and the groundwater flow ratio map show the influence of the lateral boundary on the head, streamline morphology and flow ratio, respectively. The results show that: with the increase of flow rate and the spacing of the pumping section, the circulation range of the hydrodynamic field of the vertical circulation well increases, the influence of the boundary on the hydrodynamic field of the vertical circulation well is gradually obvious, the flow line is closer to the lateral boundary, the shape is close to a rectangle by an ellipse, and the proportion of groundwater exchange in the outermost equilibrium zone is reduced; the influence of the lateral boundary on the flow field is further analyzed quantitatively by proposing dimensionless parameters.

Key words: vertical circulation well; numerical model; hydrodynamic field; aquifer remediation; lateral boundary

收稿日期: 2019-10-14 修回日期: 2019-12-10 网络出版时间: 2019-12-20

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20191219.1640.010.html>

基金项目: 国家自然科学基金(41502237; 41172277); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研究课题(SKLG2017Z014)

作者简介: 樊帅(1995—), 男, 河南漯河人, 主要从事地下水数值模拟与环境地质研究。E-mail: 847105441@qq.com

通信作者: 夏强(1982—), 男, 重庆人, 讲师, 博士, 主要从事地下水科学与工程与数值模拟等研究。E-mail: xiaqiang2012@cdut.cn

垂向环流井(vertical circulation well, VCW)是指一竖直井既有抽水段又有注水段,两部分由栓塞隔开,利用水泵在抽水段从含水层抽取地下水,再将水导入注水段,并注入含水层,从而形成环流^[1]。在侧向无界的承压含水层条件下,已有学者^[2-4]研究了其水动力场的影响范围和去除污染物效率等。该装置目前主要应用于两方面。(1)含水层修复^[5-6],如:Gvirtzman 等^[7]通过向垂向环流井中曝气形成密度差去除地下水中挥发性有机化合物(VOCs);白静等^[8]在实验室条件下通过向地下水循环井中连续曝气形成锥形修复区域,用来模拟去除地下水中的硝基苯、苯和萘;孙冉冉等^[9]利用地下水循环井技术去除含水层中的甲基叔丁基醚。(2)含水层参数估算^[10-11],如:Kabala^[12]通过单井测试和求解牛顿-拉夫逊迭代算法,得到局部含水层水平水力传导率、垂直水力传导率及储水率;Zlotnik 等^[13]通过稳态垂向环流井试验对高渗透率、非均质薄含水层的水平水力传导率进行统计分析。

垂向环流井的影响范围一直为学者所关注^[14-16]。在渗透性均质各向同性的含水层中,Zlotnik 等^[1]利用解析计算得到垂向环流井的径向影响范围可达到 5 倍的抽注段间距,而在垂向上的影响范围达到 2 倍抽注段间距。Jin 等^[15]通过改变含水层的渗透性各向异性比,发现降水漏斗形态受各向异性比的影响显著,确定了垂向环流井水动力场的循环半径随各向异性比的减小而增大。Xia 等^[17]利用四阶龙格-库塔算法进行质点追踪,实现了有地下水背景流条件下的垂向环流井水动力场分区的可视化,并论证了参数对各分区大小的影响。前人的研究均假定含水层侧向无界,未考虑侧向边界对水动力场的影响,但若开展垂向环流井的室内试验,通常是在试验箱(槽)内进行,在有限的范围却相对较大的流量条件下,侧向边界对水动力场的影响不可忽略,本文即针对这个问题,主要通过数值模拟结合解析计算的方法,分析论证侧向边界影响下不同流量大小、不同环流井抽注段设计等条件下的垂向环流井水动力场。

1 垂向环流井的动力学解析计算

建立的垂向环流井数学模型基于以下假设条件:(1)环流井设置于承压含水层。(2)含水层侧向无界。(3)天然条件含水层中地下水不流动,即无地下水背景流^[9]。模型示意及涉及参数见图 1。

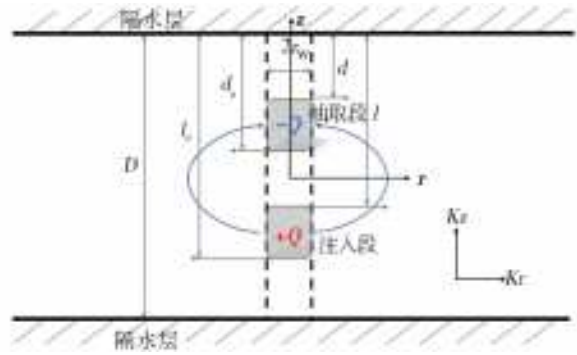


图 1 侧向无限承压含水层垂向环流井示意图
Fig. 1 Schematic diagram of vertical annular well in the laterally infinite confined aquifer

地下水流动的控制方程由 Bear^[18]给出

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot K \nabla h \quad (1)$$

式中: K 为渗透系数,m/s。 S_s 是由 $S_s = \rho g(\alpha + \varphi\beta)$ 表示的贮水率,1/m,其中: ρ 为水的密度,kg/m³; g 为重力加速度,m/s²; α 为多孔介质压缩系数,1/MPa; φ 为孔隙度; β 为水的压缩系数,1/MPa。 t 为时间,s。 h 为测压水头,m,由 $h = z + p/\rho g$ 决定, p 为压力,Pa; z 为流域中的垂直坐标。在稳态的情况下,公式可以简化为

$$\nabla \cdot K \nabla h = 0 \quad (2)$$

在不考虑区域自然梯度地下水流场以及井壁效应的情况下,稳态模拟的相应边界条件表示为

$$\frac{\partial h}{\partial r} = \begin{cases} 0 & 0 > z > d_c \\ \frac{-Q}{2\pi r_w K |d_c - d|} & d > z > d_c \\ 0 & d_c > z > l \\ \frac{Q}{2\pi r_w K |l_c - l|} & l > z > l_c \\ 0 & l_c > z > D \end{cases} \quad (3)$$

式中: D 为含水层厚度; r_w 为抽水井管半径; d_c 和 d 为抽取段顶部和底部距离含水层表面的距离; l_c 和 l 为注入段顶部和底部距离含水层表面的距离; Q 为抽注水速率。

Zlotnik 等^[1]推导得出了均质各向异性含水层中垂向环流井引起的水头降深解析解为

$$s(r, z) = -\frac{q}{2} \left[\sin h^{-1} \left(\frac{z-+}{\rho} \right) - \sin h^{-1} \left(\frac{z--}{\rho} \right) + \sin h^{-1} \left(\frac{z+-}{\rho} \right) - \sin h^{-1} \left(\frac{z++}{\rho} \right) \right] \quad (4)$$

式中: $\sin h^{-1}(x) = \ln((1+x^2)^{1/2} + x)$; $q = Q/4\pi K_r \Delta$,
 $\Delta = d - d_c/2 = l - l_c/2$; $z_{++} = z + \Delta L/2 + \Delta$; $z_{+-} = z + \Delta L/2 - \Delta$; $z_{-+} = z - \Delta L/2 + \Delta$; $z_{--} = z - \Delta L/2 - \Delta$; $\alpha = (K_r/K_z)^{1/2}$; $\rho = r/\alpha$ 。

2 数值模型与参数设定

2.1 模型建立与参数取值

考虑室内试验尺度,建立垂向环流井参考模型,模型长、宽均为 1.02 m,高度为 1 m。平面上将环流井布置在中心处,模型一共被剖分为 65 行、65 列、10 层,模型的网格大小由井轴向外围逐渐过渡,由 $cell_1: 0.005\text{ m} \times 0.005\text{ m}$ 到 $cell_2: 0.03\text{ m} \times 0.03\text{ m}$,再到 $cell_3: 0.035\text{ m} \times 0.035\text{ m}$,共细分为 3 个级别,细分区域大小见图 2。使用美国地质调查局(USGS)开发的 ModelMuse 软件建立地下水数值模型。

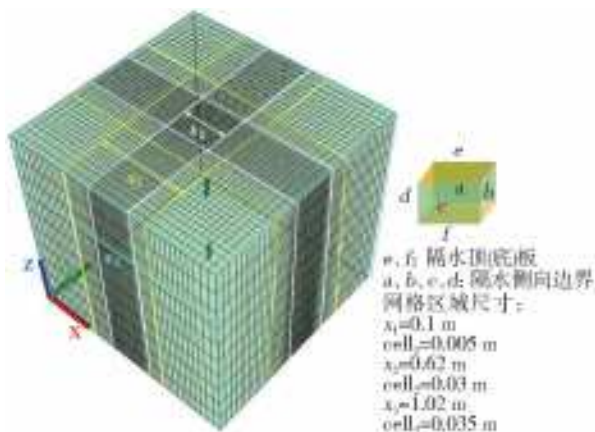


图 2 模型网格剖分与边界条件设置

Fig. 2 Model meshing and boundary conditions setting diagram

模型所涉及的主要边界条件为垂向环流井中的注水段和抽水段,它们为给定流量边界,用 ModelMuse 中 FHB(flow and head boundary package)模块来概化,模型箱四周为无流量通量边界,模型顶部与底部为隔水顶板和隔水底板,初始水头高度即为模型顶部承压层所在的高度。

参考模型的参数设定见表 1。

表 1 参考模型参数取值

Tab. 1 Reference model parameter values

| 参数 | 数值 |
|---|--------------------|
| 井半径 r_w/m | 0.05 |
| 含水层厚度 D/m | 1 |
| 影响半径 r'/m | 0.51 |
| 抽取段上、下底部距含水层表面距离 $d, d_e/m$ | 0.3, 0.4 |
| 注入段上、下底部距含水层表面距离 $l, l_e/m$ | 0.7, 0.8 |
| 抽取段和注入段中心点距离 $\Delta L/m$ | 0.4 |
| 流量 $Q/(m^3 \cdot h^{-1})$ | 0.1 |
| 水平、垂直水力传导率 $K_r, K_z/(cm \cdot s^{-1})$ | 1×10^{-3} |
| 各向异性比 K_r/K_z | 1 |

注:各参数含义见图 1。

2.2 参考模型模拟结果

在流量 $Q=0.1\text{ m}^3/h$ 时,提取了参考模型在 $z=-0.05\text{ m}$ 、 -0.25 m 深处不同水平距离的水头值数值模拟结果,与相同条件下利用式(4)计算取得的水头值解析解进行对比,见图 3。

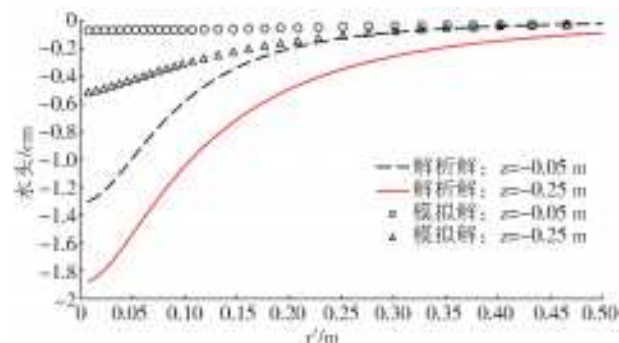


图 3 参考模型不同深度水头值模拟解与解析解的对比

Fig. 3 Comparison of simulated and analytical solutions for water head values at different depths of the reference model

由图 3 可以看出:在 $z=-0.05\text{ m}$ 和 $z=-0.25\text{ m}$ 处,模拟解水头改变趋势与解析解水头改变趋势相同,均在 VCW 附近降水水头形态明显,随着径向距离的增加,水头降深逐渐减小;在径向距离大于 0.3 m 时,水头值模拟解与解析解拟合度逐渐增加。环流井附近拟合出现误差有两个原因:(1)靠近井附近数值模型运算误差所致,软件在运行时按有限差分法处理井流,实质上是作为四面一维流入的叠加,在水力学条件上不等于实际井流,随着径向远离井距离的增加,对比误差逐渐消失^[19-20]。(2)与网格剖分的尺寸有关,单元格尺寸越细化,拟合误差越小。

3 不同抽注流量的水动力场对比

3.1 水头的模拟值与解析解误差分布特征

垂向环流井水头解析解是在无侧向边界条件下取得的,而在数值模拟中则考虑了侧向边界的影响,对比分析水头模拟值与解析解的误差,可评价侧向边界对水动力场的影响。为此进行 3 组不同抽注流量的计算,分别为 $Q=0.001\text{ m}^3/h$ 、 $Q=0.01\text{ m}^3/h$ 和 $Q=0.1\text{ m}^3/h$ 。图 4 给出了 3 组不同抽注流量条件下,在不同深度 $z=-0.05\text{ m}$ 、 -0.25 m ,模拟水头与解析水头相对误差分布。

相对误差计算公式如下:

$$\epsilon = (H_n - H_a) / H_a \quad (5)$$

式中: H_n 为数值模拟计算得到的水头值; H_a 为解析解计算的水头值。

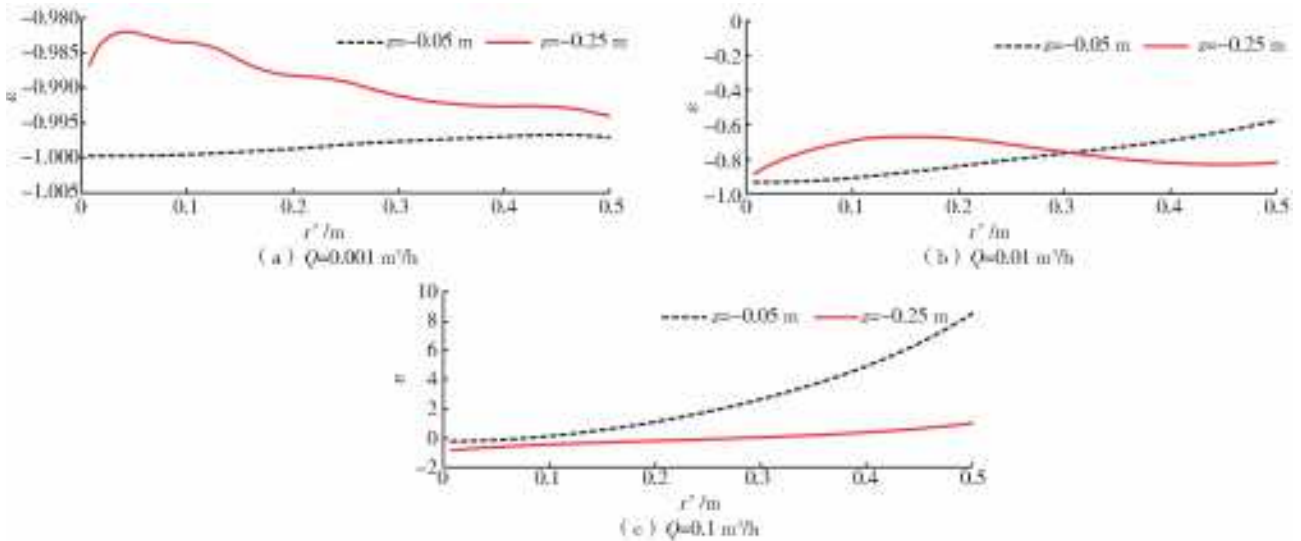


图 4 不同抽注流量、不同深度情况下水头模拟值与解析解相对误差 ϵ 对比
 Fig. 4 Comparison of the relative error ϵ between the simulated head and analytical solution under different pumping flow rates and different depths

图 4 中(a)、(b)、(c)3 种情况对比,在 $Q=0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ 时相对误差最大,其在 $z=-0.05 \text{ m}$ 处相对误差为正,在另外两种情况下相对误差均为负,随着径向距离的增加, $Q=0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ 时的相对误差逐渐增大,其余两种情况下相对误差逐渐减小;在 $z=-0.25 \text{ m}$ 处, $Q=0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ 时相对误差由负转换为正,其他两种情况下均为负,同样 $Q=0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ 时的相对误差最大,相对误差由负转为正且逐渐增大。由图 4(a)、(b)两种情况在 $z=-0.05 \text{ m}$ 处对比,随着径向距离的增加,相对误差逐渐减小;在 $z=-0.25 \text{ m}$

处对比,随着深度增加,水头压力增加,相对误差相比于 $z=-0.05 \text{ m}$ 处整体逐渐减小。这反映出随着流量增大,相对误差逐渐增大,侧向边界对垂向环流井水动力场的影响逐渐明显。

3.2 地下水流线

在 ModelMuse 中通过 MODPATH 程序使用前向追踪进行流线模拟,均在坐标 $(0, 0, -0.7)$ 注水段所在位置释放流线质点,得到 3 种不同流量情况下水动力场的流线形态,为更好地展示垂向环流井流线形态,模型展示的为 $y=0, x-z$ 方向上的剖面,见图 5。

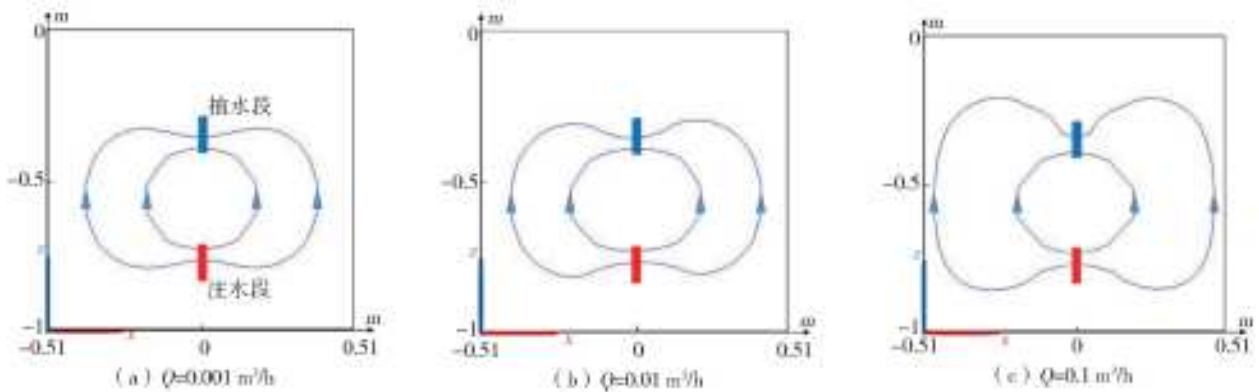


图 5 不同流量 $y=0$ 剖面上垂向环流井流线

Fig. 5 Streamline diagram of vertical circulation well at different flow rates when $y=0$

图 5 显示了随着流量变化,垂向环流井流线形态的变化。分析可知:流线以环流井抽注段所在位置为对称轴循环,在 3 种流量条件下,释放流线位置均相同;在 $Q=0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,质点水平方向最远迁移到了 $x=0.41 \text{ m}$ 的位置,垂向上最远流动到 $z=-0.85 \text{ m}$ 的位置;在 $Q=0.001 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,水平、垂向的最远距离仅为 $x=0.32 \text{ m}$, $z=-0.76 \text{ m}$;在 $Q=$

$0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,流线形态接近于扁平状,垂向上影响范围相比于其他两种情况同样较大。由此可见,随着流量增大,垂向环流井水动力场循环范围增大,流线形态因边界影响发生变化,侧向边界对垂向环流井水动力场的影响逐渐明显。

3.3 水均衡分析

通过建立水均衡区,获取均衡区内的地下水流

量,可进一步论证在侧向有界条件下,垂向环流井水动力场特点。均衡区的划分见图 6(a),其中:1号均衡区处于中心,平面面积为 0.05 m×0.05 m,垂向环流井也在 1号均衡区内;2号均衡区为平面面积

0.11 m×0.11 m 扣除 1号均衡区面积的环形区域;以此类推,3号均衡区为 0.21 m×0.21 m 扣除 2号面积的环形区域。6个均衡区的高度都为整个模型高度。

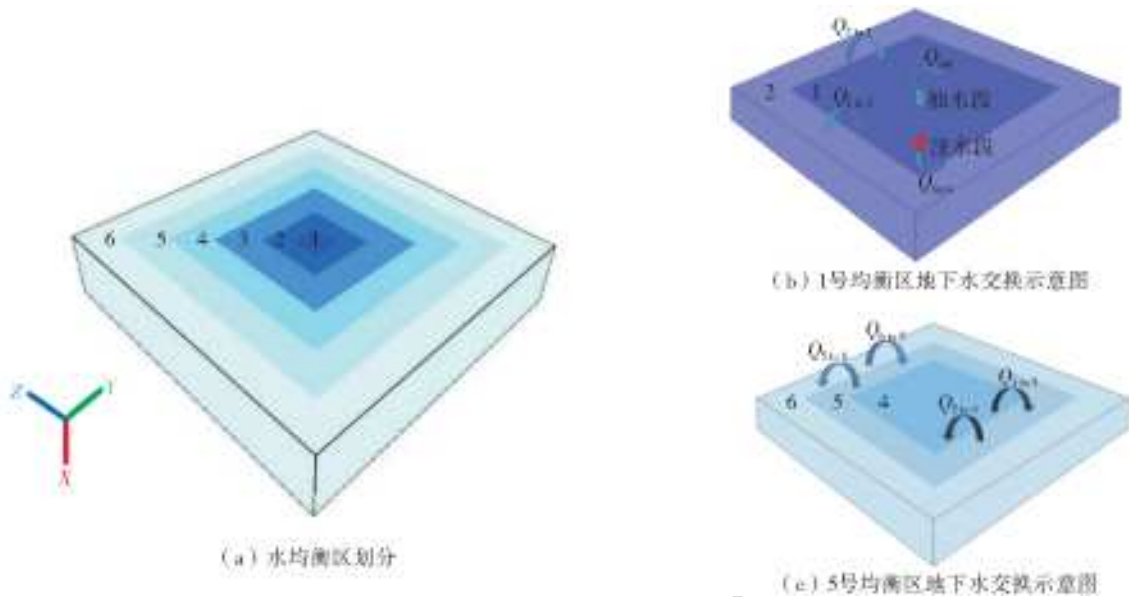


图 6 水均衡区划分与地下水交换示意图

Fig. 6 Schematic diagram of water balance zone division and groundwater exchange

以 1号和 5号均衡区为例说明均衡区内的流量组成,见图 6(b)、(c)。

1号和 5号均衡区地下水交换量见表 2、3。

表 2 1号均衡区地下水交换量数值

Tab. 2 Numerical table of groundwater exchange quantity in No. 1 equilibrium area 单位:m³/h

| 均衡区 | IN 1号 | IN 2号 |
|---------|-------|-------|
| From 1号 | — | 0.065 |
| From 2号 | 0.063 | — |

表 3 5号均衡区地下水交换量数值

Tab. 3 Numerical table of groundwater exchange quantity in No. 5 equilibrium area 单位:m³/h

| 均衡区 | IN 4号 | IN 5号 | IN 6号 |
|---------|---------|---------|---------|
| From 4号 | — | 0.028 8 | — |
| From 5号 | 0.028 8 | — | 0.014 4 |
| From 6号 | — | 0.014 4 | — |

注:在 Q=0.1 m³/h 时地下水交换量形式,“—”表示无。

提出均衡区内地下水交换量占垂向环流井流量的比值来量化侧向边界对垂向环流井动力场的影响,η的计算为

$$\eta = Q_z / Q_{vcw} \quad (6)$$

式中:Q_z为各均衡区内的地下水交换量,m³/h;Q_{vcw}为垂向环流井流量,m³/h,即为图 6(b)中的 Q_{out}。对于 1号均衡区 Q_z为 0.065 m³/h 为图 6(b)中的 Q_{out},对于 5号均衡区 Q_z为 0.028 8 m³/h 为

图 6(c)中的 Q_{in5}所示。在 ModelMuse 中可利用 ZONEBUDGET 程序来实现水均衡分析,它可以获取各均衡区内的流入、流出量。开展 3组流量的水均衡区地下水交换量占比计算,结果见图 7。

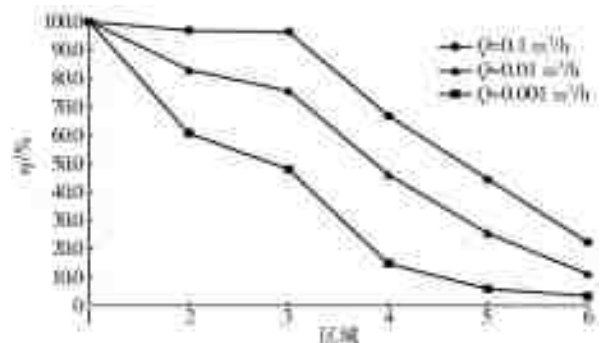


图 7 不同流量条件下各均衡区地下水交换量占比 η 变化曲线

Fig. 7 Variation curve of groundwater exchange ratio η in each equilibrium area under different flow rates conditions

从图 7 可以看出,1号均衡区为垂向环流井所在的位置,此时地下水循环的流量为 100%。随着区域范围向外围扩大,地下水的流量在逐渐减小。随着流量的增大,每个区域内地下水的流量会有差异,其中流量越小,在外围均衡区的地下水流量越少,反之流量越大,外围区域地下水流量越多。可以看出,Q=0.001 m³/h 时外围 6号均衡区地下水流量占比只有 3.3%,Q=0.1 m³/h 时外围 6号均衡区地下水流量占比达到 22.3%,其主要原因是随着流量的变大,垂向环流井的影响半径增大,从而在同

一区域中不同流量情况下地下水流量的多少不一样。随着划分区域的扩大,在 $Q=0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,由 4 号均衡区到 6 号均衡区垂向环流井地下水的流量占比递减趋势较陡且接近于线性,而在其他两种流量情况下,地下水的流量占比递减趋势相对平缓,由此反映出了随着流量增大,侧向边界对垂向环流井均衡区内地下水交换量的影响增大。

4 不同抽注段布置的水动力场对比

影响垂向环流井水动力场大小的因素除了流量大小的影响,还包括抽注段间的距离等,因此通过改变抽注段位置来分析侧向边界对垂向环流井水动力场的影响。本次数值模拟为后期室内试验提供基本参考,为使后期室内试验在改变垂向环流井参数时操作方便,选择固定注水段位置不变,通过改变抽取段位置的方式来分析边界对垂向环流井水动力场的影响。

4.1 水头的模拟值与解析解误差分布特征

图 8 给出了在不同深度 z 在 -0.05 、 -0.25 m 下,改变 3 组不同抽注段距离,水头模拟结果与解析解对比的相对误差分析。

图 8 中(a)、(b)、(c)为 3 种不同抽注段间距离情况对比,由于流量相同只改变抽注段间距离,水头相对误差整体改变趋势相同,均趋近于指数形式。在图 8(a) $d \sim d_c = 0.2 \sim 0.3 \text{ m}$ 时相对误差最大,在 $z = -0.05 \text{ m}$ 处,相对误差为正,另外两种情况下相对误差均由负到正,随着径向距离的增加,三种情况下的相对误差均趋近于指数形式逐渐增大;在 $z = -0.25 \text{ m}$ 处三种情况下相对误差均由负转换为正,同样 $d \sim d_c = 0.2 \sim 0.3 \text{ m}$ 时的相对误差最大,且随着径向距离增加相对误差呈指数形式逐渐增大。总体反映出了抽注段间距离增大,相对误差增大,侧向边界对垂向环流井水动力场的影响逐渐明显。

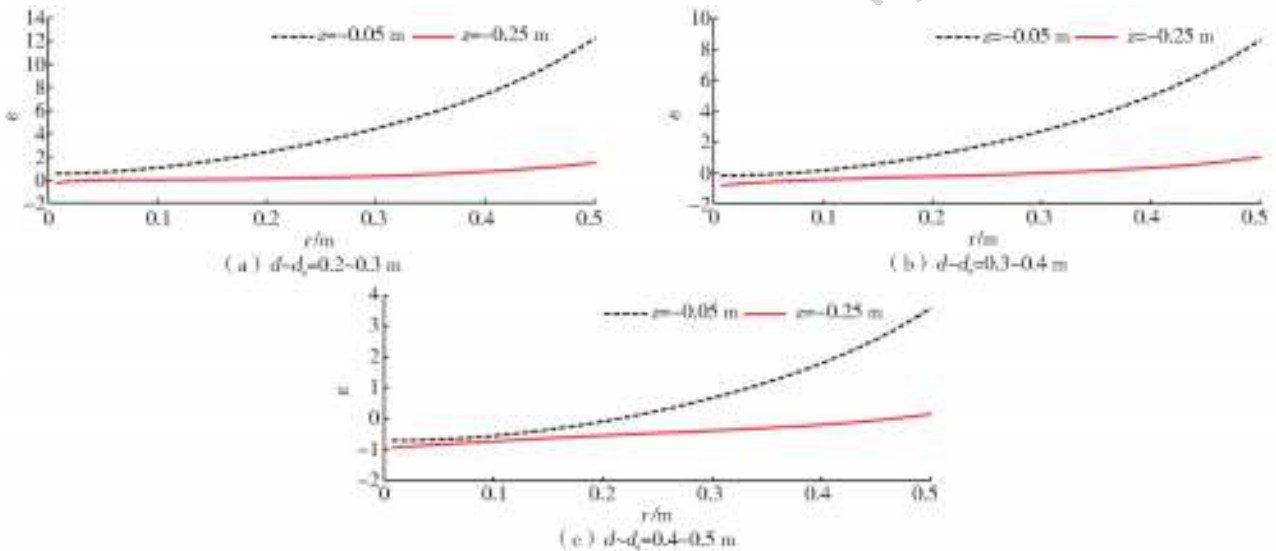


图 8 不同抽注段距离、不同深度情况下模拟解与解析解相对误差 ϵ 对比

Fig. 8 Comparison of the relative error ϵ between the simulated head and analytical solution under different pumping distances and different depths

4.2 地下水流线

模拟得到 3 种不同抽注段间距离下水动力场的

流线形态,图 9 展示垂向环流井沿 $x-z$ 方向的流线情况。

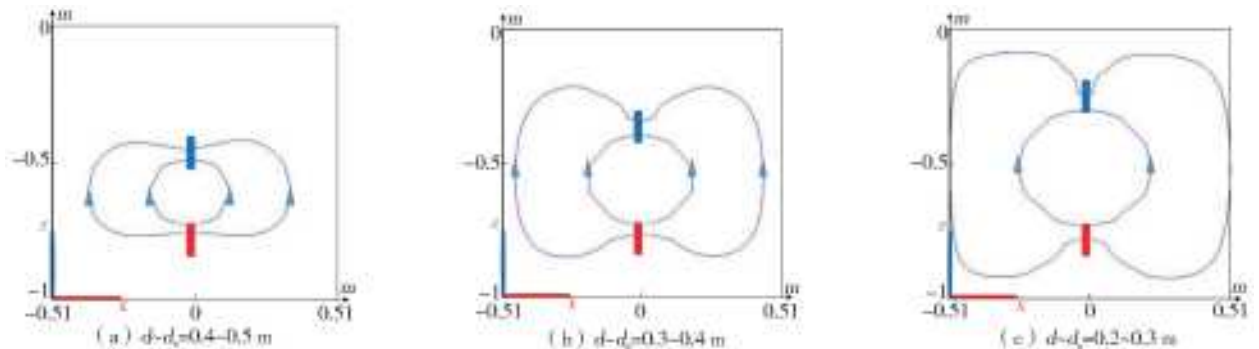


图 9 $x-z$ 方向不同抽注段距离垂向环流井流线

Fig. 9 Streamline diagram of vertical circulation well at different pumping distances when $y=0$

图9显示了改变垂向环流井抽注段间距离时流线形态的变化。3种抽注段间距离改变情况下,释放流线的位置相同,但收集流线的位置不同,收集流线位置分别为:(a)(0,0,-0.4)处、(b)(0,0,-0.3)处和(c)(0,0,-0.2)处。在 $d\sim d_c=0.2\sim 0.3$ m时,质点水平方向最远迁移距离到 $x=0.51$ m的位置,垂向上最远迁移距离到 $z=-0.93$ m的位置,而 $d\sim d_c=0.4\sim 0.5$ m时,水平、垂向的最远迁移距离仅为 $x=0.33$ m, $z=-0.77$ m,在抽注段距离较大情况下,最外侧流线紧贴于边界回流至抽取段,形状趋近于矩形,垂向上影响范围相比于其他两种情况同样较大。可见,抽注段间距离增大,垂向环流井水动力场循环范围增大,流线形态因边界影响发生变化,从而侧向边界对水动力场的影响逐渐明显。

4.3 水均衡分析

由此可绘制出每个区域内水量交换量占垂向环流井流量的比值 η ,见图10。

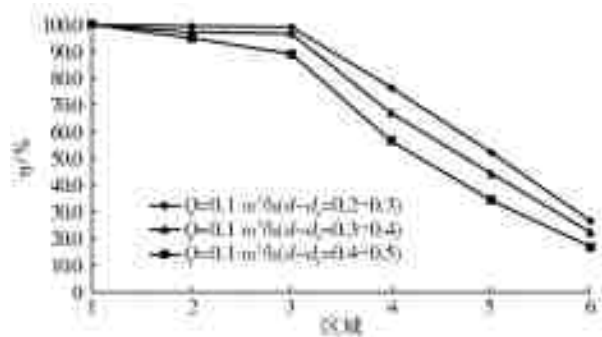


图10 不同抽注段距离下各均衡区地下水交换量流量占比 η 变化曲线

Fig. 10 Variation curve of groundwater exchange ratio η in each equilibrium area under different pumping distances conditions

由图10可以得出,随着抽注段之间距离的增加,不同区域内地下水的流量也随之增加,在图中可以看出 $d\sim d_c=0.4\sim 0.5$ m时外围6号均衡区地下水流量占比只有16.9%, $d\sim d_c=0.2\sim 0.3$ m时外围6号均衡区地下水流量占比达到26.6%,其主要原因是随着抽注段间距离的增加,垂向环流井的水动力场影响范围增大,从而在同一区域内,不同抽注段间距离下地下水流量的总量不同。抽取段 $d\sim d_c=0.2\sim 0.3$ m时,同样在4号均衡区至6号均衡区地下水的流量所占比以趋近于斜率较大的线性形式递减,大于其他两种情况下地下水流量所占比的递减趋势,由此反映出了随着抽注段间距离的增加,侧向边界对垂向环流井均衡区内地下水交换量的影响增大。

5 边界对流场影响的定量分析

上述水头值与水均衡的分析表明边界对垂向环流井水动力场有较大影响,为进一步量化这样的影响,以便为室内试验条件下VCW模型设计提供参考,分别提出了反映模型相对大小的 α 值和反映抽注段相对长度的 β 值。

5.1 模型相对大小的 α 值

反映模型尺度与环流井流量相对大小的 α 值计算公式为

$$\alpha = R^3 / Q \quad (7)$$

式中: R 为模型立方体边长的一半,m; Q 为垂向环流井的流量, m^3/h ,则 α 的量纲为时间,s,与长度无关。 α 值越大表明相同流量下模型尺度越大,或相同的模型条件下流量越小; α 值越小表明相同流量下模型越小,或相同的模型条件下流量越大。

保持流量为 $Q=0.1$ m^3/h 不变情况下构建不同尺度的数值模型,对应的 R 和 α 参数见表4。

表4 不同模型尺度 α 参数
Tab. 4 α parameters at different model scales

| R/m | 0.5 | 0.8 | 1 | 1.2 | 1.5 |
|--------------|------|------|-------|-------|-------|
| α | 1.25 | 5.13 | 10.00 | 17.30 | 33.78 |

对于不同尺度的模型,分别建立不同空间位置的水头观测点,并与解析解对比得出相对误差 ϵ ,由于解析解在 $z=0$ 时存在计算误差,因此不对该空间位置的水头误差,结果见图11。

由图11可知:当固定流量大小、抽注段中心点距离和抽注段长度时,持续改变模型的大小尺度,不同空间位置的相对误差 ϵ 改变趋势相同,整体概化为随着 α 增大,相对误差 ϵ 逐渐减小;在 z/R 值相同的空间深度下,随 r/R 值的增大,水头监测点距离垂向环流井距离越远,相对误差 ϵ 变化的区间越小;当 α 大于18时,相对误差均趋于0,此时边界对垂向环流井水动力场的影响逐渐减小,当 α 大于30可近似为模型的边界条件与解析解假设的侧向无限边界条件相符。

5.2 模型抽注段间距改变的修正系数

反映模型抽注段位置与模型尺度相对大小的 β 值,计算公式为

$$\beta = \Delta L / R \quad (8)$$

其中: ΔL 为抽注段中心点的距离,m; R 同上; β 为无量纲。 β 值越大表明相同模型尺度下抽注段间距越大,或抽注段间距相同的条件下模型尺度越小; β 值

越小表明相同模型尺度下抽注段间距越小,或抽注段间距相同的条件下模型尺度越大。

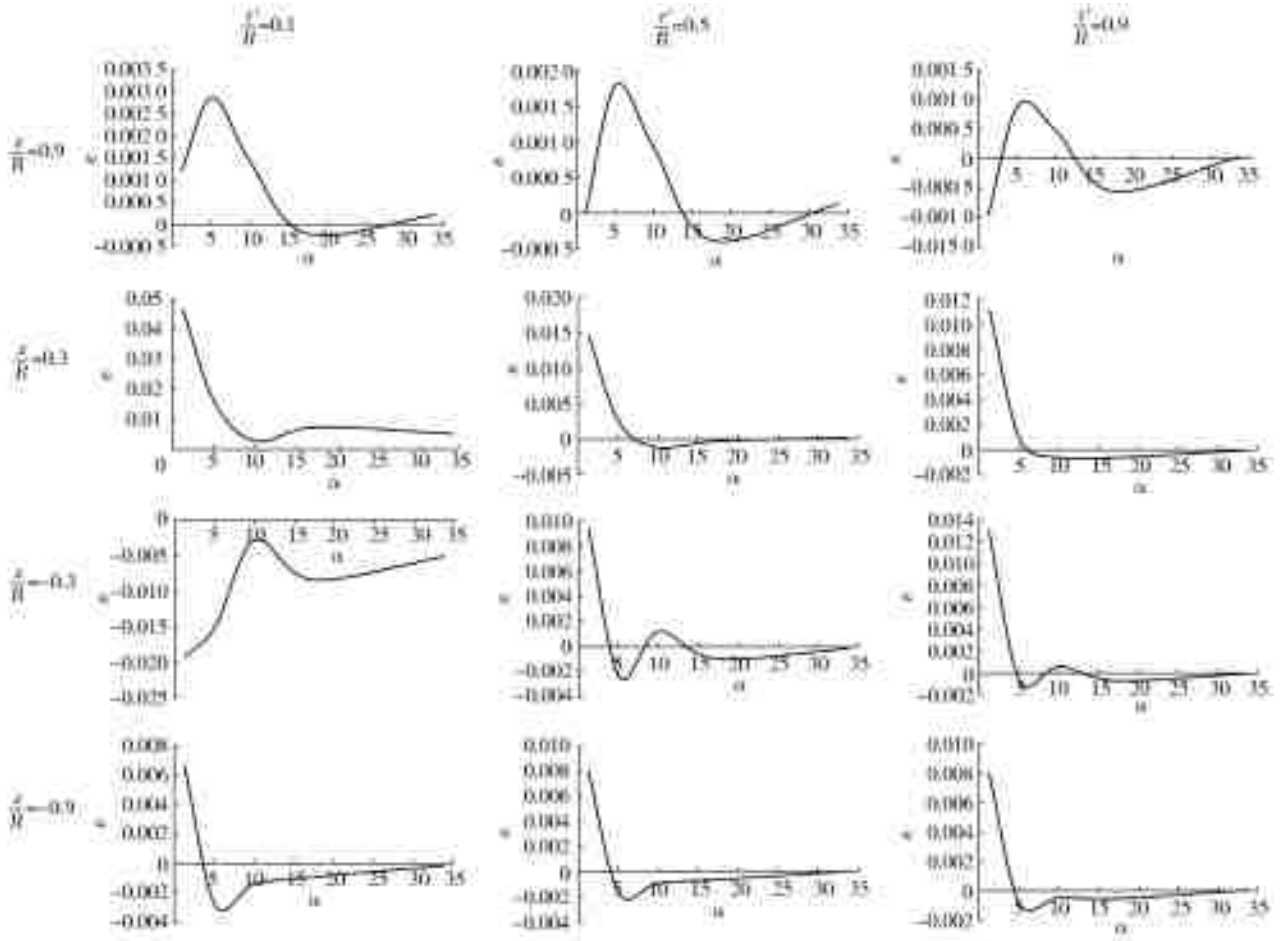


图 11 12 个点上误差随模型相对大小变化

Fig. 11 Diagram of variation of error with relative size of model at 12 points

保持流量为 $Q=0.1 \text{ m}^3/\text{h}$,在模型大小 $R=1 \text{ m}$ 不变情况下,构建不同 ΔL 尺度的数值模型,对应的 β 参数见表 5。

表 5 不同模型尺度 β 参数

Tab. 5 β parameter at different model scales

| $\Delta L/\text{m}$ | 0.1 | 0.3 | 0.6 | 0.9 | 1.2 |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| β | 0.1 | 0.3 | 0.6 | 0.9 | 1.2 |

对于不同尺度的模型,分别建立不同空间位置的水头观测点,并与解析解对比得出相对误差 ϵ ,同样 $z=0$ 时不作为水头监测点,结果见图 12。

由图 12 可知:当流量大小、模型大小和抽注段长度不变时,在同一空间位置下,持续增大 β ,相对误差 ϵ 均逐渐增大;在 $\beta < 0.8$ 的区间内,相对误差 ϵ 变化的趋势较为平缓,此时边界对垂向环流井水动力场影响较小;当 $\beta > 0.8$ 时,相对误差 ϵ 变大的趋势递增,同样论证了侧向有界对垂向环流井水动力场的影响,对于解析解的无侧限边界可以为 VCW 水动力场循环提供充分的水源补给,而侧向

有界限制了外界对 VCW 的水源补给。因此得出在限定范围内, $\beta < 0.8$ 为垂向环流井长度设计的最优区间。

6 结论

(1)流量改变。随着流量增大,模拟值与解析解对比相对误差增大,流线质点在水平方向和垂向上迁移距离增大,在 $x-z$ 方向上的位置由 $x=0.32 \text{ m}$, $z=-0.76 \text{ m}$ 移动到 $x=0.41 \text{ m}$, $z=-0.85 \text{ m}$,流线形态由椭圆形逐渐趋近于扁平状;随着均衡区由内向外逐渐扩大,均衡区地下水交换量占比逐渐减小,流量增大,最外围均衡区地下水占比由 3.3% 增加到 22.3%,但均衡区内地下水交换量占比减小趋势大于流量较小时的趋势。由此可见,流量增大,侧向边界对垂向环流井水动力场影响逐渐明显。

(2)抽注段间距改变。随着抽注段间距增大,模拟值与解析解对比相对误差增大,流线质点在水平方向和垂向上迁移距离增大,在 $x-z$ 方向上的位置

由 $x=0.33\text{ m}$, $z=-0.77\text{ m}$ 移动到 $x=0.51\text{ m}$, $z=-0.93\text{ m}$, 流线形态由椭圆形逐渐趋近于矩形; 随着均衡区由内向外逐渐扩大, 均衡区地下水交换量占比逐渐减小, 抽注段间距增大, 最外围均衡区地

下水占比由 16.9% 增加大 26.6%, 但均衡区内地下水交换量占比减小趋势大于抽注段间距较小时的趋势。由此可见, 抽注段间距增大, 侧向边界对垂向环流井水动力场影响逐渐明显。

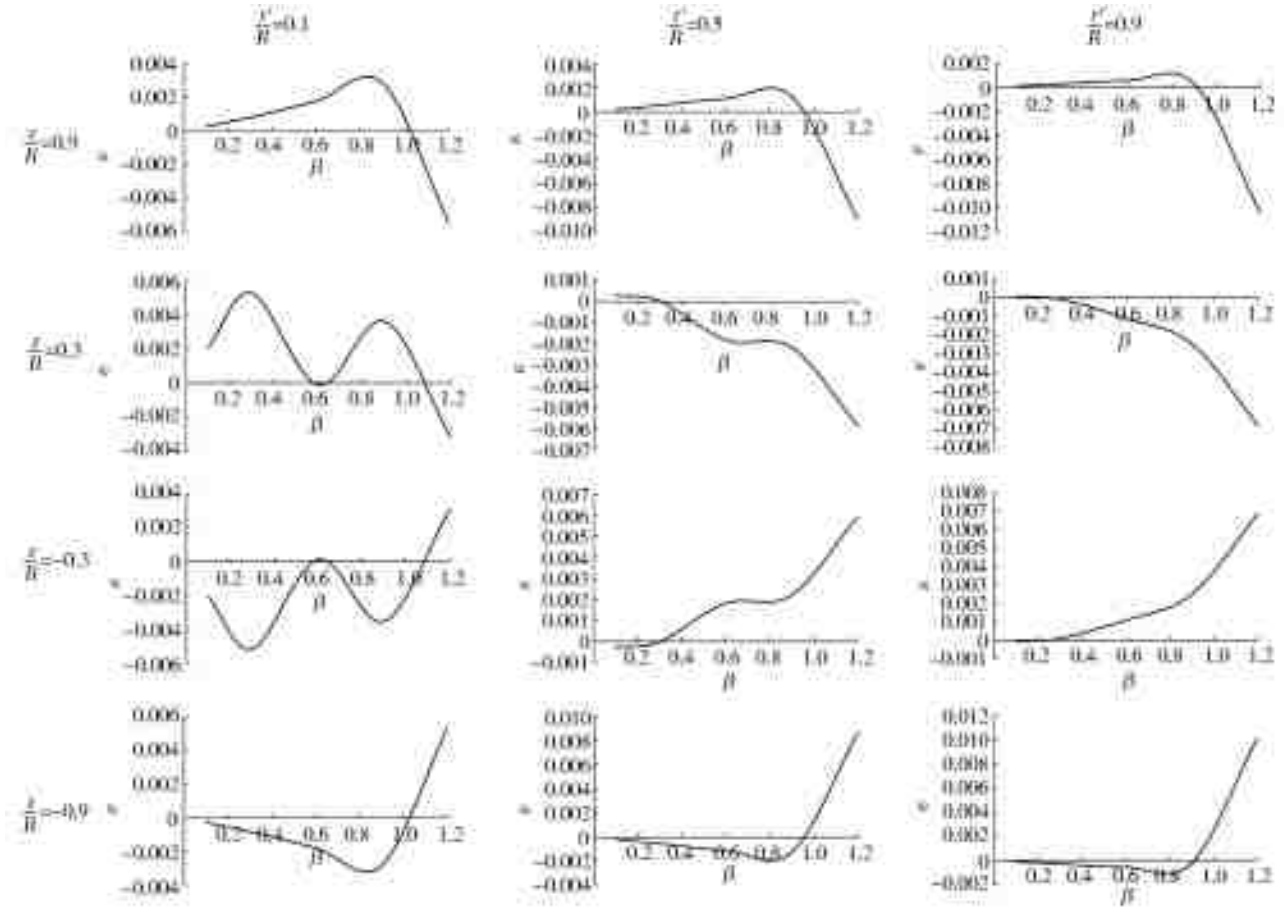


图 12 12 个点上误差随抽注段相对长度变化

Fig. 12 Diagram of variation of error with relative length of pumping section at 12 points

(3) 总体而言, 在同等条件下, 抽注段间距改变, 对环流井水动力场循环范围的影响大于流量改变时对环流井水动力场循环范围的影响。

(4) 改变模型尺度大小, 在一定误差范围内, 当 α 大于 18 时边界对垂向环流井水动力场的影响逐渐减小; 在一定模型尺度限定条件下, 改变模型抽注段间距, 当 β 小于 0.8 时边界对垂向环流井水动力场影响较小, 其垂向环流井长度的设计更合理。

参考文献:

[1] ZLOTNIK V A, LEDDER G. Theory of dipole flow in uniform anisotropic aquifers[J]. Water Resources Research, 1996, 32(4): 1119-28. DOI: 10. 1029/95wr03813.
 [2] PHILIP R D, WALTER G R. Prediction of flow and hydraulic head fields for vertical circulation wells. [J]. Ground Water, 2010, 30(5): 765-773. DOI: 10. 1111/j. 1745-6584. 1997. tb00166. x.

[3] KNOX R C, SABATINI D A, HAEWELL J H, et al. Surfactant remediation field demonstration using a vertical circulation well[J]. Ground Water, 1997, 35. DOI: 10. 1111/j. 1745-6584. 1997. tb00166. x.
 [4] CHRIST J A, GOLTZ M N, HUANG J. Development and application of an analytical model to aid design and implementation of in situ remediation technologies[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1999, 37(3-4): 295-317. DOI: 10. 1016/s0169-7722(99)00002-9.
 [5] CHEN L, KNOX R C. Using vertical circulation wells for partitioning tracer tests and remediation of DNAPLs[J]. Ground Water Monitoring and Remediation, 1997, 17 (3): 161-168. DOI: 10. 1111/j/1745-6592. 1997. tb00591. x.
 [6] ZHAO Y S, QU D, ZHOU R, et al. Efficacy of forming biofilms by Pseudomonas migulae AN-1 toward in situ bioremediation of aniline-contaminated aquifer by groundwater circulation wells[J]. Environmental Sci-

- ence & Pollution Research, 2016. DOI: 10. 1007/s11356-016-6737-7.
- [7] GVIRTZMAN H, GORELICK S M. The concept of in-situ vapor stripping for removing VOCs from groundwater[J]. *Transport in Porous Media*, 1992, 8(1): 71-92. DOI: 10. 1007/BF00616893.
- [8] 白静, 孙超, 赵勇胜. 地下水循环井技术对含水层典型 NAPL 污染物的修复模拟[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(1): 78-85. DOI: 10. 13198/j. issn1001-6929. 2014. 01. 12.
- [9] 孙冉冉, 杨再福, 汪涛, 等. 地下水循环井技术处理土壤和地下水中甲基叔丁基醚研究[J]. *环境工程*, 2017, 35(9): 186-91. DOI: 10. 13198/j. issn1001-6929. 2014. 01. 12.
- [10] BODIN J, ACKERER P, BOISSON A, et al. Predictive modelling of hydraulic head responses to dipole flow experiments in a fractured/karstified limestone aquifer: Insights from a comparison of five modelling approaches to real-field experiments[J]. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, 2012, 454-455. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2012. 05. 069.
- [11] ROOS G N. Development of the dipole flow and reactive tracer test (DFRTT) for Aquifer Parameter Estimation[D]. 2009.
- [12] KABALA Z J. The dipole flow test: A new single-borehole test for aquifer characterization[J]. *Water Resources Research*, 1993, 29(1): 99-107. DOI: 10. 1029/92wr01820.
- [13] ZLOTNIK V A, ZURBUCHEN B R, PTAK T. The steady-state dipole-flow test for characterization of hydraulic conductivity statistics in a highly permeable aquifer; Horkheimer Insel Site, Germany[J]. *Ground Water*, 2010, 39(4): 504-16. DOI: 10. 1111/j. 1745-6584. 2001. tb02339. x.
- [14] ZLOTNIK V A, ZURBUCHEN B R. Dipole probe: design and field applications of a single-borehole device for measurements of vertical variations of hydraulic conductivity [J]. *Ground Water*, 2010, 36(6): 884-93. DOI: 10. 1111/j. 1745-6584. 1998. tb02095. x.
- [15] JIN Y, HOLZBECHER E, SAUTER M. Dual-Screened vertical circulation wells for groundwater lowering in unconfined aquifers[J]. *Ground Water*, 2016, 54(1): 15-22. DOI: 10. 1111/gwat. 12331.
- [16] PEURSEM D V, LEDDER G, ZLOTNIK V. The kinematic flow structure for the gvirtzman-gorelick in Situ VOC remediation system[J]. *Transport in Porous Media*, 1998, 30(3): 363-376. DOI: 10. 1023/A: 1006579503405.
- [17] XIA Q, ZHANG Q, XU M. Visualizing hydraulic zones of a vertical circulation well in presence of ambient flow[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2019, 159(8): 151-60. DOI: 10. 5004/dwt. 2019. 24098.
- [18] BEAR J. *Dynamics of fluids in Porous Media*, 764 p [M]. Elsevier, New York, 1972. DOI: 10. 1097/00010694-197508000-00022.
- [19] JIN Y, HOLZBECHER E, SAUTER M. A novel modeling approach using arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) method for the flow simulation in unconfined aquifers [J]. *Computers & Geosciences*, 2014, 62(jan.): 88-94. DOI: 10. 1016/j. cageo. 2013. 10. 002.
- [20] 夏强, 王旭升, 鲁林波. 利用 MODFLOW 模拟井流的误差特征[J]. *工程勘察*, 2007(10): 32-50, 40. DOI: CNKI:GCKC. 0. 2007-10-006.