

doi:10.3799/dqkx.2014.117

地下水观测井井筒效应的多场耦合数值模拟

徐 亚¹, 薛祥山², 刘玉强^{1*}, 刘景财¹, 董 路¹

1. 中国环境科学研究院环境工程技术研究所, 北京 100012

2. 北京清控人居环境研究院有限公司, 北京 100085

摘要: 利用3种不同水流运移方程分别模拟井管附近不同区域的水流运动, 基于流量守恒原理实现不同流态区域边界的耦合, 建立了有代表性的观测井—含水层系统场景; 利用建立的耦合模型模拟了观测井—含水层系统中水头的分布, 基于模型模拟数据分析了观测井井筒存在对含水层局部水头分布及地下水水质采样和环境监测结果的影响; 还分析了地下水三维水流强度、观测井井径以及含水层介质参数等对井筒效应的影响规律; 井筒效应在粘土等渗透系数和比单位贮水系数相对较小的含水层介质中更为明显, 其影响随着三维水流强度及观测井井径的增加而增大; 进行了上述参数的敏感性分析, 指出对于同一参数其在不同区间的敏感性比例不同, 对于不同参数观测井井径的敏感性比例最大, 因此在地下水环境监测的工程实践中减小观测井井径是相对快速且有效提高监测和采样精度的方法。

关键词: 数学模型; 井筒效应; 观测井; 采样误差; 地下水。

中图分类号: P345

文章编号: 1000-2383(2014)09-1349-08

收稿日期: 2014-01-05

A Coupled Darcy-Brinkman-NS Simulation Model of Wellbore Effect of an Monitor Well

Xu Ya¹, Xue Xiangshan², Liu Yuqiang^{1*}, Liu Jingcai¹, Lu Dong¹

1. Institute of Environmental Engineering Technology, Chinese Research Academy of Environment Sciences, Beijing 100012, China

2. Tsinghua Holdings Human Settlement Environment Institute Co., Ltd., Beijing 100085, China

Abstract: In this paper, three different flow equations, namely, Darcy law, Brinkman equation and Navier-Stoke equation, are employed to simulate the water movement with different flow conditions within and around the wellbore in a confined aquifer. Based on the principles of continuity, three different flow equations are coupled. The coupled model is used to simulate the impact of wellbore in aquifer on the head distribution and water movement. Results indicate that the influence of wellbore increases with the strength of three-dimensional flow and wellbore diameter. In addition, being compared with the sandy soil aquifer, wellbore effect is more obvious in clay or similar aquifers with lower permeability and smaller storage coefficient. By conducting parameter sensitivity analysis, it also can be found that the sensitivity ratio differs in different value zones for the same parameter, while for different parameters, wellbore effect is more sensitive to well diameter than other parameters.

Key words: mathematical model; wellbore effect; monitor well; data bias; underground water.

0 引言

随着社会的迅速发展和科学技术水平的提高, 人类生产活动对地下水环境的影响越来越大, 一些对地下资源的不当开采和利用, 使得地下水水质和水量向着日趋恶化的方向发展 (Rosa *et al.*,

2009). 而另一方面, 地下水环境监测作为地下水水源地保护和防治中的重要环节, 却存在着水化学取样精度不高, 水质水位监测数据代表性差等诸多困难 (Giddings, 1987; Church and Granato, 1996). 有限井径的常规观测井井筒是造成这一问题的根源所在 (陈崇希, 2003). 早在 1962 年, Bennett and

基金项目: 国家环境保护公益性行业科研专项基金 (No. 201209022); 2012 年度院所基本科研业务专项基金 (No. 2012YSKY16).

作者简介: 徐亚 (1985-), 男, 助理研究员, 主要从事地下水数值模拟和地下水污染风险评估研究. E-mail: 104911697@qq.com

* 通讯作者: 刘玉强, E-mail: liuyq@craes.org.cn

Patten(1962)就指出具有较长滤管段的观测井井筒内会构成优先流通道,导致井筒内部和周边水头的重分布. 随后 Church and Granato(1996)通过分析同一场地的测压计式观测井和常规观测井数据,证实了常规观测井对周边流场和溶质场的影响以及可能导致的观测误差. 国内一些学者(Chen and Jiao, 1999; Cheng and Chen, 2005; 陈崇希和胡立堂, 2008)则基于等效渗透系数法,建立了井孔一含水层系统的水流模型,利用该模型分析了井管内的垂向水流及其流态,并分析了观测井内径、径距等因素对井筒效应的影响规律.

调查数据表明,我国地下水观测井内径小则 1 cm,大则 20 cm,且大多数为完整井或具有较长滤管长度的非完整井(徐亚等,2011). 因此,研究常规观测井周边水头和流量分布,及井筒效应的影响规律具有较高的科研价值和实践价值. 然而目前对井孔含水层的模拟,都基于达西渗流定律,忽略了井孔作为类裂隙介质其水流运移规律的特殊性及其对周边含水层系统的影响(Eungyu and Zhan, 2002, 2003; Cheng *et al.*, 2005). 这种影响在小尺度、微观的井孔一含水层模拟中体现得更为明显(陈崇希和胡立堂, 2011). 总的来说,对于井孔一含水层这种同时包含管道介质和多孔介质的含水层系统,其模拟方法包括 2 种:第 1 种是用一个水流控制方程同时描述井管水流和多孔介质渗流问题. 最典型的方法是 Chen and Jiao(1999)的等效渗透系数法,基于管流的能量损失方程,将井管中的非达西水流方程改写成达西定律的形式,从而将达西—非达西流统一到一个控制方程下. 第 2 种思路是用不同流态方程分别描述井管水流和多孔介质渗流,需要解决流态分区的划定以及分区边界的耦合问题. 如文章等(2008, 2009),分别基于 Izbash 和 Forchheimer 定律研究了越流含水层和承压含水层中抽水井附近非达西流问题,获得了该条件下水位降深的数值差分解.

本文拟基于第 2 种思路,首先基于雷诺数的判别依据,从水流连续性方程出发,推导不同水流区域的范围,确定不同流态区域的边界,在此基础上分别利用 Navier-Stokes 方程描述井管内部水流,利用 Brinkman 方程描述井管附近的高速渗流场,利用 Darcy 定律描述井管远端的低速渗流场,从而建立井孔一含水层系统水流运移的耦合模拟模型,并利用该模型模拟观测井井筒存在对局部水头分布的影响(此处称之为井筒效应),分析抽水井滤管长度、含

水层渗流参数以及观测井内径等因素对井筒效应的影响规律.

1 方法介绍

如前所述,文章等(2008)在研究中将井孔一含水层系统划分成 2 个区域:一个为达西渗流区域,另一个为非达西渗流区域. 实际上对于井筒内部的水流,用管流方程来描述更为合理. 因此笔者将整个观测井一含水层系统分为 3 个区域:(1)井孔内部为管流区域,用 Navier-Stokes 方程描述;(2)离井筒较远的地方水流较慢,可认为符合达西渗流方程;(3)两者之间的区域用 Brinkman 方程描述. 那么关键问题是如何确定 Brinkman 区域和 Darcy 区域的边界、不同流态界面上的边界赋值以及不同流态方程的耦合求解问题.

1.1 不同流态区域的划定

图 1 为井孔一含水层系统的概念图,含水层系统由一个抽水井、一个观测井和一个承压含水层构成. 其中抽水井以定流量抽水,以模拟自然界普遍存在的三维水流.

显然,管流区域即为井筒内部区域. 若以抽水井筒顶部正中心为空间坐标原点,垂直向上为 z 轴正方向,建立空间轴坐标系. 那么管流区域即为径距小于抽水井半径的区域.

对于 Darcy 渗流区域和 Brinkman 渗流区域,显然距离抽水井越远,则流速越小,水流由非达西流向达西流过渡. 若假定达西—非达西界面处距井轴的距离为 r_{br} ,该处渗透流速为 V_{br} ,则在近似假定稳定流情况下,径距等于 r_{br} 的断面上,其流量 Q 可以表达成:

$$Q = 2\pi \cdot m \cdot r_{br} \cdot V_{br}, \quad (1)$$

其中: Q ,抽水流量; m ,含水层厚度.

而水流的流态可根据雷诺数判定:

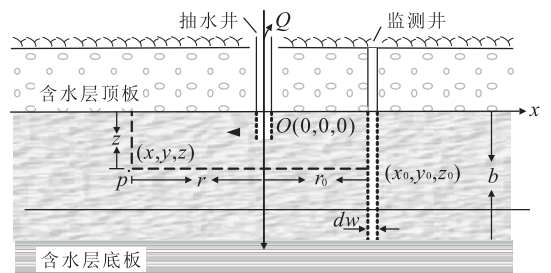


图 1 概念模型及坐标轴系统

Fig. 1 Conception model and the coordinate system

$$R_e = \frac{Vd}{\nu}, \quad (2)$$

其中: R_e , 雷诺数; V , 地下水渗流速度; d , 含水层颗粒特征直径; ν , 运动粘滞系数.

上式联立, 可得 r_{br} 的表达式如下:

$$r_{br} = \frac{(\frac{Q}{m})d}{2\pi\omega(R_e)_n}, \quad (3)$$

其中: $(R_e)_n$, 临界雷诺数, 取 1~10.

综上, 不同的流态区域可表示如下:

$$\Psi = \begin{cases} \Psi_{ns} = \Psi, & r < r_R; \\ \Psi_{br} = \Psi(r), & r_R \leq r \leq r_{br}; \\ \Psi_{dl} = \Psi(r), & r > r_{br}. \end{cases} \quad (4)$$

其中: Ψ_{ns} , 为管流区域; r , 轴距; r_b , 抽水井内径.

1.2 边界赋值

根据 1.1 的计算结果, 可以确定不同流态的分区, 不同分区的水头和流速分布分别服从 Darcy 定律、Brinkman 方程和 Navier-Stokes 方程. 确定好控制方程后, 还需明确其对应的边界方可求解. 其中研究区上下边界为隔水层边界, 外边界为定水头边界, 抽水井的流量已知, 那么关键是不同方程界面上的边界的赋值. 假定 Darcy-Brinkman 界面、Brinkman-Navier-Stokes 界面上的水头和流速是连续的.

在 Darcy 流区域, 地下水渗流速度较慢, 因此可以用基于达西定律的地下水运动控制方程描述其水头分布的规律(Eduard *et al.*, 2012):

$$\nabla \cdot (-\frac{\kappa}{\eta} \nabla \rho g H_{dl}) = Q_s, \quad (5)$$

其中: κ , 渗透率; η , 运动粘滞系数($\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$); Q_s , 每单位体积含水介质的体积流量($1/\text{s}$).

对于方程的左边界, 也即 Darcy-Brinkman 界面边界, 根据水流连续性方程, 其流速和水头应该等于 Brinkman 方程右边界的水头和流速, 因此其边界条件可表示为:

$$H_{dl} = P_{br} + D. \quad (6)$$

在管壁和达西区域内边界之间的区域, 水流速度较快, 其运动规律不服从用来描述线性渗流规律的达西定律, 因此采用高速非线性渗流的 Brinkman 方程描述该区域的水头和流速分布(Eduard *et al.*, 2012):

$$\begin{aligned} & \left[-\nabla \cdot \frac{(\nabla u_{br} + (\nabla u_{br})^T)}{\epsilon} \right] - \\ & \left[-u_{br} + \nabla p_{br} - F \right] = 0, \\ & \nabla \cdot u_{br} = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

根据上式, Brinkman 方程的变量同时包括流速

项和压力项, 因此对于 Brinkman 方程的右边界, 可用 Darcy 流速作为其边界约束, 即:

$$u_{br} = u_{dl} \partial \Omega, \text{Darcy-Brinkman 界面.} \quad (8)$$

同样的其左边界, 即 Navier-Stoke-Brinkman 边界, 可用 Navier-Stoke 方程的压力作为边界约束, 即:

$$p_{br} = p_{ns} \partial \Omega, \text{Brinkman-N-S 界面.} \quad (9)$$

Navier-Stoke 方程是流体力学中描述粘性牛顿流体的方程, 因此可用来描述井管中的水流运动, 其形式如下(Piquet and Queutey, 1992):

$$\begin{aligned} 0 &= -\nabla \cdot (\nabla u_{ns} + (\nabla u_{ns})^T) + \\ & p u_{ns} \cdot \nabla u_{ns} + \nabla p_{ns}, \\ \nabla \cdot u_{ns} &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

对于 Navier-Stoke 方程, 井口为流量边界, 根据抽水流量确定; 井孔下方为基岩, 即不透水边界; 井壁非滤管段为不透水边界; 井壁滤管段的边界约束则由 Brinkman 方程的流速给出, 即:

$$u_{ns} = u_{br} \partial \Omega, \text{Brinkman-N-S 界面.} \quad (11)$$

如此, 井孔及其附近区域的 3 种流态区域就可以耦合起来(图 2).

1.3 耦合方程的求解

传统的地下水模型软件, 包括 Visual Modflow、DHI Feflow 以及 GMS 都不涉及多种流态的耦合模拟, 而 Comsol 可以链接不同流态方程的接口, 实现不同流态区域的耦合, 并基于有限元法进行求解. 本模型是 3 个不同流态方程的耦合, 其中 Brinkman 方程和 Navier-Stoke 方程的求解变量是流速和水力压头, 而达西定律的求解变量只有水力压头. 由于 3 个方程形式和求解变量上的一致, 因此对耦合方程求解可能存在困难, Comsol 通过对

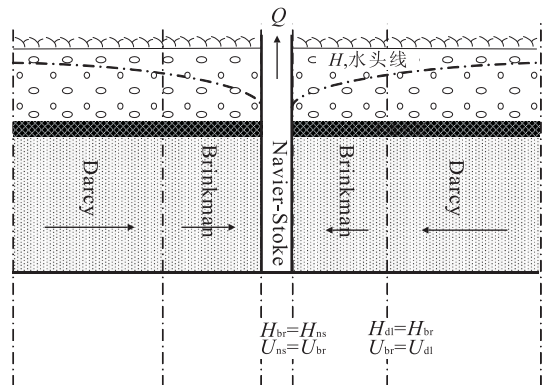


图 2 不同流态区域及内边界条件

Fig. 2 Different flow regimes and the inner boundary conditions

边界采用弱约束,可以解决不同物理场界面上不连续的问题。

2 算例分析

2.1 概念模型

为从理论上分析地下水观测井井孔效应对含水层水头动态的影响,及监测和采样误差产生的原因,笔者建立了有代表性的理想模型,如图 1 所示。模型由观测井、抽水井和承压含水层组成。其中承压含水层为均质等厚各向同性的理想含水层。观测井为完整观测井,抽水井为非完整井以定流量抽水模拟三维流的存在。

2.2 模型参数

主要的抽水井和含水层参数取值如表 1 所示。

表 1 含水层和井孔参数

Table 1 Main parameters of aquifer and wells

基本参数	值
含水层参数	
介质类型	粗砂
渗透系数(m/d)	30
含水层厚度(m)	50
单位储水量(m ⁻¹)	0.000 1
抽水井内径(m)	0.2
抽水流量(m ³ /d)	8 640
抽水井参数	
抽水时间(d)	10.289
抽水井位置	(x, y, z)=(0, 0, 0)
抽水井滤管长度(%)	
观测井内径(m)	0.2
观测井参数	
观测井位置	(x, y)=(2.18, 0)
观测井类型	完整井

在抽水初期,含水层水头降深随时间变化很明显,随着抽水继续进行,一段时间后,含水层中的降深变化逐渐放缓。为此,我们设置变时间步长因子为 1.09,模拟时段为 190,总时段长 10.496 d(此时,含水层中水头随时间变化很小,随后的模拟结果也证实了这一点)。

为研究井筒效应的影响因素,本研究设置 3 组实验,分别考虑井径大小、三维水流以及含水层介质性质对井筒效应的影响。其中第 1 组模型由 5 口井径分别为 0.2 cm、5 cm、10 cm 和 20 cm 的观测井组成;通过控制抽水井滤管长度来控制三维水流的强度,因此在第 2 组模型中设置了 5 口滤管长度分别为 1%、10%、25%、50%和 75%。含水层介质的性质主要体现在渗透系数和孔隙度上,因此设置了 4 组不同类型的介质,其渗流参数如表 2 所示。

表 2 不同组介质的渗流参数取值

Table 2 Hydrological conductivity and Specific storativity of different aquifer media

	类型 1	类型 2	类型 3	类型 4
含水层介质	细砂	中砂	粗砂	沙砾石
渗透系数(m/d)	7.5	15	30	60
比弹性储水系数(m ⁻¹)	7.5e-7	5e-6	1e-5	2e-5

2.3 模型范围及边界

外边界:为避免模型边界对内部流场产生明显影响,需保证模拟时段末,水头降深不波及边界,即边界水头降深 $s=0$ 即可。根据 THEIS 不稳定井流公式:

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx, \quad (12)$$

其中: $u=(r^2)/(4\alpha t)$; $\alpha=K/u_s$; r 代表观测点距抽水井的径距; K 代表含水层渗透系数; μ_s 代表含水层比弹性给水系数。

设模型范围为以 r_f 为内径的正十二边形,则 r_f 只需满足 $s(r_f t) \ll \infty$, ∞ 为无穷小量。根据表 1 中的参数进行试算,最后取定 $r_f=17\ 800$ m,即抽水井与边界距离为 17 800 m,模型区域为以 17 800 m 为内径的正十二边形。

对于模型内边界,即不同流态边界范围的确定根据第 2 节所述方法确定。

2.4 网格剖分

考虑到越靠近抽水井水头变化越剧烈,因此模型在平面上采用不等距的结点设置,结点距随着与抽水井的径向距离增大而增大, x 轴向总计设置 49 个结点,其中径距小于 80 m 的结点 21 个;垂向上,划分了 21 个模拟层,在含水层顶和底部均设置了结点,结点距均为 2.5 m;单层结点个数为 289 个,单层单元个数为 584 个;整个模型结点数为 289×21 个,单元数为 584×21 个。

3 分析和讨论

如前所述,在三维地下水含水层中插入具有有限井径的完整观测井井筒后,井筒内部会产生明显的垂向水流,影响井筒周围局部含水层的水头分布。水头降深是指在含水层中的水头在抽水 t 时间后,水头或压力的减小值。水头降深与 Comsol 的求解变量 p 的关系如式 13 所示。

$$S = \frac{p - p_0}{\rho g} + D, \quad (13)$$

其中: S 为水头降深, p_0 为压力初值.

3.1 模型基本精度验证

根据热传导的空间点汇理论, 无限空间点源开采引起的空间任一点的降深可用下式表示:

$$S = \frac{Q}{4\pi c \rho} \operatorname{erfc}\left(\frac{\rho}{2\sqrt{Kt/S_s}}\right), \quad (14)$$

其中, S 是点 (x, y, z) 处的降深, m ; Q 是开采量, m^3/s ; K 是渗透系数, m/s ; ρ 是观测点到开采点的空间距离 $(2\sqrt{x^2+y^2+z^2})$, m ; S_s 是储水系数, m^{-1} ; t 是开采的时间, s ; erfc 是余补误差函数. 该解析解仅适合于开采井为点汇而且没有渗透长度. 因此将耦合模型中抽水井滤管长度设置为含水层厚度的 1%, 可近似处理为点汇. 其他参数如表 2 所示. 图 3 为 6 个不同位置的观测点上, 解析解结果与耦合模型解结果的比较. 最大误差在时间步长 = 49, 径距 = 1.07 m 处, 该处绝对误差 $\nabla S = S_a - S_s = 0.117$, 相对误差 $\bar{S} = \nabla S/S_a = 1.66\%$. 可见模拟结果良好, 可利用建立的数值模型模拟渗流—管流的地下水流问题.

3.2 结果分析

图 4 为降深沿观测井井轴的分布, 越靠近顶板降深越大, 越靠近底板降深越小, 因此不同高度处存在着水头梯度. 不妨设观测井中底层降深为 S_b , 顶层降深为 S_t , 其差值为 ΔS_v , 分析观测井井径变化对 ΔS_v 的影响. 井径为 0.00 m、0.02 m、0.05 m、0.10 m 和 0.20 m 的观测井, 其顶底板降深 ΔS_v 分别为 10.4 m、10.0 m、6.6 m、2.7 m 和 0.1 m. 显然顶底板降深随着观测井井径增大而减小. 这可能是因为, 随着井径增大, 井筒的导水能力更强, 井筒下部能快速对上部形成补给, 从而降低井筒上部水头下降速度.

根据上述分析, 在含水层中加入观测井以后, 在

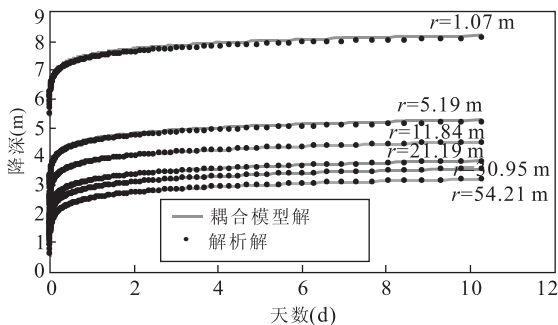


图 3 耦合模型解与解析解结果的比较

Fig. 3 Comparison between results of analytical model and coupled mathematical model

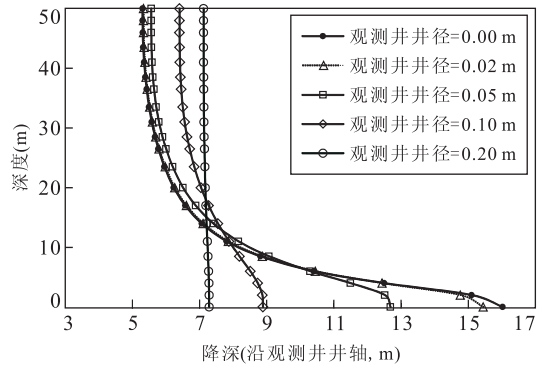


图 4 降深沿观测井井轴的分布

Fig. 4 Vertical distribution of drawdown along axis of monitor well

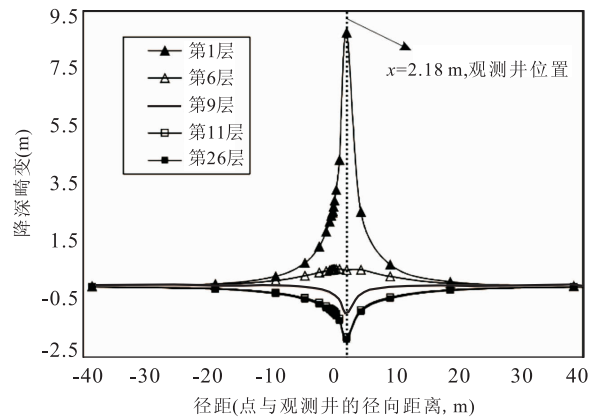


图 5 不同层降深畸变沿抽水井—观测井连线的分布

Fig. 5 Drawdown difference of different layers

垂向水头梯度作用下, 井筒内会形成明显的从下往上的垂向水流. 井筒上部的水头增大, 导致上部含水层对井筒的补给减小; 而井筒下部水头减小, 导致下部含水层对井筒的补给增大, 这样就使得观测井内部及其周边局部含水层的水头发生了重分布, 改变了天然流场. 若定义井径为零时, 含水层中任意位置 (x, y, z) 处的水头降深为 $S_0(x, y, z)$, 加入观测井后该位置处的水头降深变为 $S_L(x, y, z)$, 则可认为 $S = S_L - S_0$ 为井筒对含水层天然水头分布的影响, 此处我们将其定义为井筒效应影响下的降深畸变.

图 5 是模型第 1、6、9、11、16 和 21 层, 井径为 0.20 m 的观测井造成的降深畸变在 x 轴上的分布. 从图中可知, 观测井井筒效应造成的降深畸变表现为两个方面: 对于上部含水层, 由于井管内垂向水流的补给, 观测井内部及其周边降深减小, 且越靠近顶板减小得越多, 正的畸变越大; 对于下部含水层, 由于该段井管存在对上段井管的补给, 观测井内部极及其周边的降深增大, 且越靠近下部含水层, 负的畸

变越大. 若定义 $|S_{\Delta}(x, y, z, t)|$ 为降深畸变量, 则可发现在垂向上, 第 1 层的畸变量最大; 而在平面上, 观测井位置处的降深畸变最大. 因此在下文分析中, 若无特别说明本文所指的降深畸变皆为顶层的降深畸变. 同时定义相对畸变量 $\bar{S} = S/S_0$, 并认为 \bar{S} 大于 0.5% 区域为井筒效应的影响范围.

图 6 所示为考虑和不考虑井管附近非达西流时模拟结果的比较, 考虑观测井井径为 0.20 m, 抽水井滤管长度为 1% 的情景进行分析. 从图 6a 可知, 不考虑非达西流时, 模拟的水头降深结果偏小, 尤其在 $r_R \leq r \leq r_{br}$ 区域, 两者的误差高达 10.7%, 随着径距 r 逐渐增大, 其误差逐渐减小, 在径距 $r = 50$ m 处, 其误差已减小至 2.3%. 另外, 分析图 6b 可知, 不考虑非达西流时, 在 $r_R \leq r \leq r_{br}$ 区域模拟的降深畸变偏小(最大误差为 1.9%), 在 $r \geq r_{br}$ 区域, 模拟的降深畸变偏大(最大误差为 1.1%). 上述分析表明, 仅就本案例而言, 当距离大于 50 m(含水层厚度)时, 井筒附近非达西流的影响较小; 当距离大于 50 m 非达西流影响较大需要予以考虑, 分析三维水流强弱、观测井内径以及含水层介质特性对降深畸变量以及畸变范围的影响规律.

图 7 分别为抽水井滤管长度为 1%、10%、25%、50% 和 75% 时, 降深畸变沿观测井和抽水井连线上的分布. 从图 7 中可以看出抽水井的井筒效应明显受地下水三维水流的强度影响. 当抽水井滤管很长时, 含水层中的水基本以水平流动为主, 三维

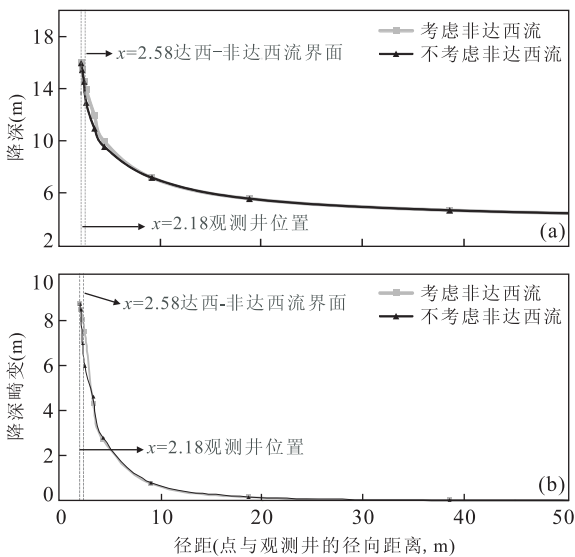


图 6 考虑达西流和不考虑达西流模拟结果比较

Fig. 6 Results with and without the consideration of Non-Darcy flow around the wellbore

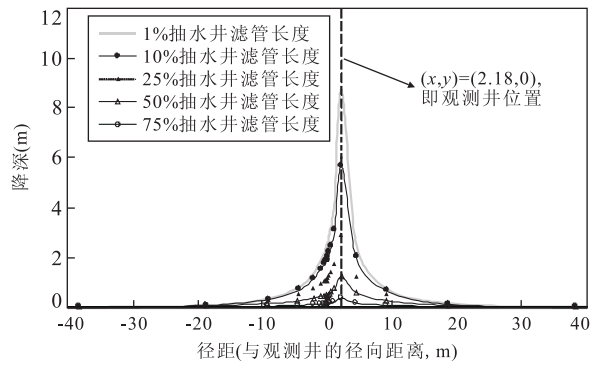


图 7 不同抽水井滤管长度条件下的降深畸变沿 x 轴的分布
Fig. 7 Drawdown difference along x axis with different lengths of pump well

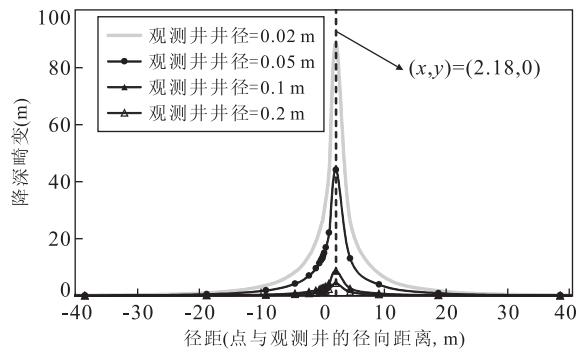


图 8 不同观测井内径条件下的降深畸变沿 x 轴的分布
Fig. 8 Drawdown difference along x axis with different diameters of monitor well

水流不明显, 此时观测井井筒效应的影响也较小, 降深畸变不明显. 如当抽水井滤管长度为 75% 时, 观测井中降深畸变为 0.36 m, 相对畸变量为 5.05%, 而当抽水井滤管长度分别为 50%、25%、10% 和 1% 时, 观测井中降深畸变分别为 1.25 m、2.90 m、5.70 m 和 8.74 m, 而对应的其降深畸变量分别为 14.75%、28.64%、43.94% 和 54.54%. 因此可以认为, 当抽水井为完整抽水井或为非完整抽水井但滤管长度大于含水层厚度的 75% 时, 观测井井筒造成的井筒效应可以忽略. 当抽水井滤管长度小于 75% 时, 含水层中存在明显的三维水流, 此时井筒效应的影响不可忽视, 观测井中获得的水头和水质数据应该谨慎使用.

井筒效应还受观测井内径大小影响, 图 8 所示为不同观测井井径时, 含水层顶层降深畸变沿 x 轴的分布. 可以看出随着观测井井径增大, 井筒效应的影响越明显. 如图 8 中井径为 0.02 m 的观测井, 其内部的降深畸变为 0.58 m, 而井径为 0.05 m、0.10 m 和 0.20 m 的观测井, 井筒内部降深畸变依次

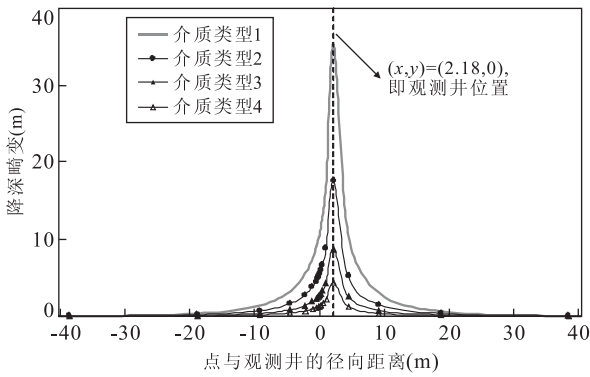


图 9 不同含水层介质条件下的降深畸变沿 x 轴的分布
Fig. 9 Drawdown difference along x axis with different aquifer media

为 3.34 m、7.14 m 和 8.74 m。而其相对畸变量则分别为:3.62%、20.84%、44.54%和 54.54%。4 口井的影响范围分别为:5.32 m、19.82 m、33.82 m 和 35.90 m。

为考虑含水层介质特性对井筒效应的影响,我们分别考虑了 4 种典型含水层介质:细砂、中砂、粗砂和砂砾石,其主要渗流参数值如表 2 所示。表中介质的渗透系数和比弹性贮水系数从介质 1 到介质 4 依次倍增,但渗透系数与比弹性贮水系数的比值保持不变。图 9 为不同含水层介质条件下,降深畸变沿 x 轴的分布。从图中可以看出从介质 4 到介质 1,随着其 K 和 S_e 的增加,井筒效应引起的降深畸变也越大,以观测井顶部为例,降深畸变从 4.32 m 逐渐变到 8.74 m、17.59 m 和 35.29 m。对应的相对畸变量也从 53.93%变为 54.54%、54.87%和 55.04%。

3.3 参数敏感性分析

采用参数敏感性比例,表征井筒效应相关参数的敏感性,即参数值变化对井筒效应的影响程度。参数的敏感性比例越大,说明其对井筒效应的影响越大。在进行观测井设计和安装时,就应该重点考虑这些参数,以减小观测井的井筒效应,从而提高采样和监测精度。模型参数变化的敏感性比例,采用下式计算:

$$SP = \frac{\frac{X_2 - X_1}{X_1} \times 100\%}{\frac{P_2 - P_1}{P_1} \times 100\%}, \quad (15)$$

其中:SR-Sensitivity Ratio,参数敏感性比例,无量纲; P_1 ,参数 P 变化前的取值; P_2 ,参数 P 变化后的取值; X_1 ,按 P_1 计算的相对降深畸变; X_2 ,按 P_2 计算的相对降深畸变。

表3分别为抽水井滤管长度、观测井内径和介

表 3 不同参数的敏感性比例计算
Table 3 Sensitivity ratio of different parameters

参数	变化区间			
	区间 1	区间 2	区间 3	区间 4
抽水井滤管长度	0.020	0.280	0.480	1.350
观测井井径	4.760	1.140	0.530	/
介质类型	0.003	0.006	0.011	/

注:区间 1、2、3 和 4 对于抽水井滤管长度指 1%、10%、25%、50%、75%;对于观测井井径指 0.02 m、0.05 m、0.10 m、0.20 m;对于介质类型指介质 1、2、3、4。

质类型 3 个参数的敏感性比例。从表中可以看出,同一参数在不同区间的敏感性不一样。如抽水井滤管长度这一参数,在 1%~10% 区间时敏感性比例为 0.02,而在 50%~75% 区间敏感性比例达到 1.35。总的来说观测井井筒引起的降深畸变对观测井内径更敏感,其敏感性比例为 0.53~4.76;其次为抽水井滤管长度,其敏感性比例为 0.02~1.35;最不敏感的为介质类型,敏感性比例为 0.003~0.011。

4 结论

在存在三维流的含水层中,同一水平位置不同高度上存在水头差,在这种水头差的作用下,若存在完整观测井则会在井筒内会形成明显的由下往上的垂直水流,垂直水流的存在会导致井筒外含水层中的水头发生重分布,井筒越大垂向水流流量越大,对外界含水层的影响,即降深畸变也越大。

降深畸变主要受三维水流强度、观测井内径和含水层介质渗流参数影响,三维水流越强,观测井内径越大,观测井井筒对含水层天然水头分布的影响越大;同时相比于卵石、砂石等渗透系数和比弹性贮水系数较大的介质,粘土或其他细颗粒地渗透性的含水层更容易受井筒效应的影响。

井筒效应对上述 3 个参数的敏感性程度不同,观测井内径更为敏感,通过减小观测井井径能快速有效地减小井筒效应,提高地下水监测和采样精度;同时对于同一参数,在不同区间内的敏感性比例也不同:抽水井滤管长度在 1%~10%、观测井井径在 0.1~0.2 m 范围内变动时,不能有效地改变井筒效应的影响程度和影响范围;而观测井井径从 0.10 m 调至 0.02 m、抽水井滤管长度从 75%调至 50%时能很好的减小井筒效应,进而提高观测井监测和采样精度。

References

- Bennett, G. D., Patten, E. P., 1962. Constant-Head Pumping Test of a Multi-Aquifer Well to Determine Characteristics of Individual Aquifers. *U. S. Geological Survey Water-Supply Paper 1536-G*, 181—203.
- Chen, C. X., 2003. Formation Mechanism of Water Level and Its Determination Method in Conventional Observation Wells for Three-Dimensional Groundwater Flow. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(5): 483—491 (in Chinese with English abstract).
- Chen, C. X., Hu, L. T., 2008. A Review of the Seepage-Pipe Coupling Model and Its Application. *Hydrogeology Engineering Geology*, 3: 70—75 (in Chinese with English abstract).
- Chen, C. X., Jiao, J. J., 1999. Numerical Simulation of Pumping Test in Multilayer Wells with Non-Darcian Flow in the Wellbore. *Ground Water*, 37(3): 465—474.
- Cheng, J. M., Chen, C. X., 2005. An Integrated Linear/Non-Linear Flow Model for the Conduit-Fissure-Pore Media in the Karst Triple Void Aquifer System. *Environmental Geology*, 47(2): 163—174.
- Cheng, Y., McVay, D. A., Lee, W. J., 2005. BEM for 3D Unsteady-State Flow Problems in Porous Media with a Finite-Conductivity Horizontal Wellbore. *Applied Numerical Mathematics*, 53(1): 19—37.
- Church, P. E., Granato, E., 1996. Bias in Groundwater Data Caused by Well-Bore Flow in Long-Screen Wells. *Groundwater*, 34(2): 262—273.
- Eduard, M., Igor, P., Sanja, M., 2012. Comparison between Darcy and Brinkman Laws in a Fracture. *Applied Mathematics and Computation*, 218(14): 7538—7545.
- Eungyu, P., Zhan, H. B., 2002. Hydraulics of a Finite-Diameter Horizontal Well with Wellbore Storage and Skin Effect. *Advances in Water Resources*, 25(4): 389—400.
- Eungyu, P., Zhan, H. B., 2003. Horizontal Well Hydraulics in Leaky Aquifers. *Journal of Hydrology*, 281(1—2): 129—146.
- Giddings, T., 1987. What is an Adequate Screen Length for Monitoring Wells? Opinion I. *Ground Water Monitoring Review*, 7(2): 96—97.
- Piquet, J., Queutey, P., 1992. Navier-Stokes Computations Past a Prolate Spheroid at Incidence—I. Low Incidence Case. *Computers & Fluids*, 21(4): 599—625.
- Rosa, C., Riccardo, B., Luca, F., 2009. Impact of Past Mining Activity on the Quality of Groundwater in SW Sardinia (Italy). *Journal of Geochemical Exploration*, 100(2—3): 125—132.
- Wen, Z., Huang, G. H., Li, J., et al., 2008. Approximate Analytical Solution of Non-Darcian Flow towards the Well in Confined Aquifer. *Journal of Hydraulic Engineering*, 39(7): 815—821 (in Chinese with English abstract).
- Wen, Z., Huang, G. H., Li, J., et al., 2009. A Numerical Solution of Non-Darcian Flow toward an Extended Well in a Confined Aquifer. *Journal of Hydraulic Engineering*, 40(4): 398—402 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y., Hu, L. T., Yi, B. Q., 2011. Advances in Numerical Simulation Methods of a “Well-Aquifer” System. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 38(4): 26—31 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈崇希, 2003. 三维地下水流中常规观测孔水位的形成机理及确定方法. *地球科学——中国地质大学学报*, 28(5): 483—491.
- 陈崇希, 胡立堂, 2008. 渗流—管流耦合模型及其应用综述. *水文地质工程地质*, 3: 70—75.
- 文章, 黄冠华, 李健, 等, 2008. 承压含水层中抽水井附近非达西流的近似解析解. *水利学报*, 39(7): 815—821.
- 文章, 黄冠华, 李健, 等, 2009. 承压含水层中扩展井附近非达西流数值解. *水利学报*, 40(4): 398—402.
- 徐亚, 胡立堂, 仪彪奇, 2011. 井孔—含水层系统数值模拟方法研究进展. *水文地质工程地质*, 38(4): 26—31.