

doi:10.3799/dqkx.2017.062

基于解析法和数值法的非稳定流抽水试验参数反演

李 霞, 文 章*, 梁 杏, 马 腾, 陈 晨

中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

摘要:含水层的水文地质参数是进行地下水资源计算、地下水污染防控等所必需的基础数据,结合数值模拟技术进行含水层参数反演很有必要。按照1:5万水文地质调查规范在江汉平原仙桃市杨林尾镇复兴水厂不同含水层位开展抽水试验,包括深层含水层单孔抽水试验以及浅层含水层中群孔(2孔)抽水试验。对于单孔抽水试验,应用第1类越流系统井流理论进行参数反演;对于群孔抽水试验,推导了特定综合井函数,并利用特定标准曲线匹配法和直线图解法求解了含水层参数。随后利用FEFLOW软件建立了相应数值模型,拟合了含水层参数。结果表明:浅层含水层的渗透系数变化范围为 $21.66\sim54.00\text{ m/d}$,贮水率变化范围为 $1.28\times10^{-5}\sim8.00\times10^{-4}\text{ m}^{-1}$;深层含水层渗透系数变化范围为 $1.27\sim7.00\text{ m/d}$,贮水率变化范围为 $3.90\times10^{-6}\sim5.00\times10^{-6}\text{ m}^{-1}$ 。对于深层承压含水层而言,越流补给量较大。采用数值模拟方法结合抽水试验数据求参,综合考虑了含水层结构,拟合效果好,所得结果更加可靠。

关键词:江汉平原;抽水试验;解析法;数值模拟;含水层参数;水文地质。

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2017)05-0743-08

收稿日期: 2016-11-06

Aquifer Parameter Estimation of Transient Pumping Test Based on Analytical and Numerical Methods

Li Xia, Wen Zhang*, Liang Xing, Ma Teng, Chen Chen

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

Abstract: The aquifer parameters are the necessary basis data for calculation of groundwater resources and prevention of groundwater pollution, therefore it is necessary to invert the parameters with numerical method. According to the standard of 1:50 000 hydrogeological survey, two pumping tests with single pumping well in deep aquifer and two pumping wells in shallow aquifer were conducted at Fuxing Water Works at Yanglinwei Town of Xiantao City in Jianghan plain. The theory of first kind of leakage system was adopted to estimate the parameters in deep aquifer. For the shallow aquifer, a comprehensive well function was derived and the parameters were obtained by using the special type curve matching method and straight line method. In addition, the FEFLOW software has also been used to develop a numerical model for the pumping tests. The parameters were also estimated by the numerical model associated with the pumping test data. The results indicate that the hydraulic conductivity and the specific storage coefficient of the shallow confined aquifer are $21.66\sim54.00\text{ m/d}$ and 1.28×10^{-5} to $8.00\times10^{-4}\text{ m}^{-1}$, respectively. The hydraulic conductivity and the specific storage coefficient for the deep confined aquifer are $1.27\sim7.00\text{ m/d}$ and 3.90×10^{-6} to $5.00\times10^{-6}\text{ m}^{-1}$, respectively. The leakage from the third aquitard layer is significant, which should be taken into account for the analysis of the pumping test. In this paper, the numerical model is developed to estimate the aquifer parameters associated with the pumping test data, the structure of the aquifer was considered in detail in the numerical model. The good agreement between the simulated results and the measured data indicate that the results obtained from the numerical simulation are reliable.

Key words: Jianghan plain; pumping test; analytical method; numerical simulation; aquifer parameter; hydrogeology.

基金项目:中国地质调查局项目(Nos.12120114069301, DD20160255)。

作者简介:李霞(1993—),女,硕士研究生,主要从事水文地质研究工作,ORCID:0000-0002-5730-5126.E-mail: lixiacug@126.com

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

引用格式: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.

0 引言

含水层的水文地质参数(如渗透系数 K 、贮水系数 μ 等)是进行地下水资源计算、地下水污染防治等所必需的基础数据,因此,开展水文地质参数的研究对于查明研究区地下水运动规律、区域水文地质条件、水文地质勘探、地下水的开发利用保护以及水资源评价有着重要的意义(唐依民和肖江,2001;赵宝峰等,2009a;刘颖等,2015).通常野外抽水试验是求取水文地质参数的重要手段(Neuman,1975;Van Camp and Walraevens, 2009; Zech *et al.*, 2015; Sahin, 2016),根据现场稳定流抽水试验资料确定含水层水文地质参数是野外水文地质工作中经常采用的有效方法之一(薛禹群和朱学愚,1999;周志芳等,1999;Raymond *et al.*, 2011).然而对于一个钻孔抽水试验而言,水位达到“稳定”或“拟稳定”需要相当长的时间,抽水试验成本较高.因此,在水文地质调查过程中,有必要重点采用非稳定阶段抽水试验数据进行含水层参数反演(聂庆林等,2009;李培月,2011).

现有关于利用非稳定抽水试验获取含水层参数的解析研究大多以经典 Theis 井流为基础,然而 Theis 井流理论条件要求非常苛刻,引入了一系列假设条件,这些假设条件对于实际野外场地条件难以全部满足,因此,利用 Theis 井流理论获取的含水层参数可能会有一定偏差.随着科学技术的发展,数值法成为解决地下水问题的重要方法(Liu *et al.*, 2009; 赵宝峰等, 2009b).数值模型能更精确地模拟出地下水的实际运动状态(杨威,2007; 赵旭,2009; 郝健,2012).因此,有必要结合数值模拟技术进行含水层参数反演(赵德君,2005; 陈晓恋等,2014).

对于非稳定流抽水试验参数计算问题,目前国内外研究者较多,理论完善(郭建青等,2009; Liu *et al.*, 2009).本文综合采用了解析法和数值法(FE-FLOW),分别获得了研究区主要含水层的渗透系数

K 及贮水系数 μ ,研究结果对江汉平原地下水资源评价具有重要指导意义,同时可以为类似含水层参数反演提供方法借鉴.

1 研究区概况

1.1 研究区自然概况

研究区位于湖北省中部仙桃境内杨林尾镇复兴水厂,自白垩纪以来,该区一直受新华夏系构造活动所控制,形成了新华夏系第二沉降带江汉一级沉降区.研究区地层岩性主要为第四系松散堆积物,岩性成因多样,厚度不一,全新统为漫滩相的粘土、粉质粘土及湖冲积相的淤泥质土(厚 5~20 m),为现代河漫滩相及湖相堆积,广泛覆盖于本工作区域.更新统为冲积、冲积灰色、灰绿色、黄灰色细砂、中砂、粗砂、卵砾石并夹有少量粉质粘土.

该区地下水主要赋存于第四系松散堆积物的孔隙中,根据地层岩性可划分为孔隙潜水含水层、浅层孔隙承压含水层、弱透水层和深层孔隙承压含水层(表 1).孔隙潜水含水层主要为第四系全新统(Q_4)粉质粘土,该含水层透水性较差,持水性好,释水性较差,单位涌水量一般为 $1.0 \sim 1.5 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$,水位埋藏浅,一般水位埋深为 $0.5 \sim 2.0 \text{ m}$,局部与地表水直接相通,因而其水位、水温、水质均受地表水影响明显,水质较差,水位、水温动态受季节控制明显,水量贫乏,无实际供水意义.孔隙潜水含水层的主要补给来源于大气降水.浅层孔隙承压含水层主要由上、中更新统岩层组成,上更新统为细砂与中砂互层,底部为粗砂夹砾石;中更新统由粗砂夹卵砾石组成.浅层孔隙承压水的补给来源主要包括上部孔隙潜水下渗补给、下部深层孔隙承压水的顶托补给以及西部邻区含水系统的侧向径流补给.浅层孔隙承压水水量较丰富,埋藏较浅,较易开采,是区内地下水主要开采层位.弱透水层由下更新统的粉质粘土组成,且夹有少量的细砂.深层孔隙承压含水层主要

表 1 研究区钻孔岩性及含水层划分

Table 1 The borehole lithology and aquifer division of the study area

分层	底板标高(m)	层厚(m)	岩性	含水层划分
第 1 层	-40	40	粉质粘土	孔隙潜水含水层
第 2 层	-100	60	细砂、中砂、卵砾石	浅层孔隙承压含水层
第 3 层	-138	38	粉质粘土夹细砂	弱透水层
第 4 层	-160	22	细砂、中砂、粗砂夹少量粉质粘土	深层孔隙承压含水层

注:以地面为基准面.

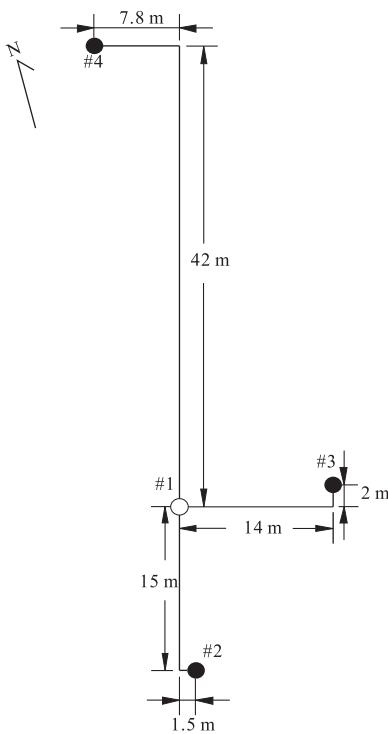


图 1 研究区各井平面分布

Fig.1 The plan distribution of wells in study area

由下更新统灰色、灰绿色、黄灰色细砂、中砂和粗砂组成,下更新统下部的岩性有半固结的特点,中间夹有粉质粘土透镜体和泥质胶结物,形成局部隔水带。深层孔隙承压水的补给来源主要为上部孔隙潜水的越流补给,少量来自于邻区含水系统侧向径流补给。研究区地势北高南低,地下水总的径流方向为由北向南,径流缓慢。该研究区地下水的排泄方式较多,其中孔隙潜水的排泄方式主要包括蒸发排泄、向地表水体排泄、人工开采以及向邻区径流排泄等;浅层孔隙承压水、弱透水层及深层孔隙承压水排泄方式主要有向邻区含水层侧向径流排泄、向孔隙潜水垂向排泄(越流排泄)以及人工排泄等。

1.2 研究区抽水试验概况

研究区位于江汉平原仙桃市杨林尾镇复兴水厂,试验场共分布#1、#2、#3、#4 共 4 眼抽水井, #2、#3、#4 为复兴水厂原有抽水井,3 眼井井深均为 100 m,如图 1 所示,原有的 3 眼井滤水管深度为 40~100 m,井径 23 cm,其中#2 和#3 为目前整个复兴镇的供水井, #4 为备用井,其中#2 和#3 每天上、下午各抽水 2 h, #1 为新打的钻孔,深 201 m,井径 33 cm,其滤水管深度为 138~160 m。经计算, #2 与#4 之间距离为 57.75 m, #3 与#4 之间距离为 45.55 m,其他井间距离参见图 1。根据#1 钻孔岩性资

料可知该区主要由第四系粘土、粉砂、细砂、粗砂、砾砂组成,钻孔岩性资料及含水层划分见表 1。

2 野外抽水试验设计

本次研究共进行了两次抽水试验,抽水试验的观测井和抽水井均分布在第四系砂砾含水层中,且抽水量也主要来自第四系砂砾含水层。第 1 次抽水试验中, #2、#3 井同时等流量抽水,流量为 $50 \text{ m}^3/\text{h}$,观测井是#4 井,含水层厚度为 60 m,初始静止水位埋深为 3.12 m,为浅层孔隙承压含水层抽水,抽水时间是 2015 年 12 月 24 日 7:36~10:01;第 2 次抽水试验中,抽水井和观测井同为#1,抽水流量为 $41 \text{ m}^3/\text{h}$,含水层厚度为 22 m,初始静止水位埋深为 3.12 m,为深层孔隙承压含水层抽水,抽水时间是 2016 年 3 月 25 日 17:36 至 2016 年 3 月 26 日 11:30。在抽水期间,使用 Solinst Levelogger 水位自计器对观测井中水位进行了监测。

3 解析法求取参数

3.1 解析法求浅层含水层水文地质参数

3.1.1 特定标准曲线对比法 由于浅层含水层为群孔抽水试验,不能直接套用现有井流理论。为此,笔者利用叠加原理推导针对本次抽水试验的标准曲线(陈晓恋等,2016)。特定标准曲线对比法是通过绘制观测井实测 $s-t$ 双对数曲线与理论曲线对比来确定含水层参数的方法。#2、#3 滤水管上部岩性主要是粉质粘土,两井所对应含水层近似概化为承压含水层。#2 和#3 抽水时,对#4 观测孔中的水位都有影响, #2、#3 同时抽水时对#4 水位降深存在影响,根据井流叠加原理, #4 观测孔任意点的水位降深可表达为:

$$s =$$

$$\frac{Q}{4\pi T} W_m(u_1) = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ W(u_1) + W \left[u_1 \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 \right] \right\} = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ W \left(\frac{r_1^2}{4\pi t} \right) + W \left[\frac{r_1^2}{4\pi t} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 \right] \right\}, \quad (1)$$

式中: Q 为抽水流量 (m^3/d); $W(u)$ 为 u 的井函数; $W_m(u_1)$ 为综合主井函数; r_1 为#2、#3、#4 的距离 (m); r_2 为#3、#4 的距离 (m); t 是计算降深的时刻 (s); 比值 r_2/r_1 对于本次试验为常量。与 Theis

井函数类似,综合主井函数 $W_m(u_1)$ 只要绘制了标准曲线,结合抽水试验水位实测降深数据便可以采用标准曲线匹配法求解含水层参数(陈晓恋等,2016)。通过特定标准曲线匹配法,平移两曲线得到的结果如图 2 所示。

图 2a 为实测的 $s-t$ 双对数曲线,图 2b 为标准曲线 $W_m(u_1) - \frac{1}{u_1}$ 的双对数曲线。选择 $t=10$ s, $s=1$ m, $W_m(u_1)=19.80$, $1/u_1=0.12$ 为匹配点, 抽水流量为 $50 \text{ m}^3/\text{h}$, $r_1=45.55 \text{ m}$, 得到导水系数 T 为 $1890.76 \text{ m}^2/\text{d}$, 渗透系数 K 为 31.51 m/d , 贮水系数 μ_e 为 3.70×10^{-3} , 压力传导系数 a 为 $5.38 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{d}$ 。

3.1.2 特定直线图解法 本次试验有两个抽水井并且等流量同时抽水,含水层中任意点的降深为:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[W\left(\frac{r_1^2}{4at}\right) + W\left(\frac{r_2^2}{4at}\right) \right], \quad (2)$$

式中: r_1 为 #2、#3、#4 的距离; r_2 为 #3、#4 的距离。显然, r_1 小于 r_2 , 当 $\frac{r_1^2}{4at} \leqslant 0.01$, $\frac{r_2^2}{4at} > 0.01$ 时, 则公式(2)可以写为:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[\ln \frac{2.25at}{r_1^2} + W\left(\frac{r_2^2}{4at}\right) \right]. \quad (3)$$

若

$$\ln \frac{2.25at}{r_1^2} \geqslant W\left(\frac{r_2^2}{4at}\right), \quad (4)$$

则公式(3)可以近似写为:

$$s \approx \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25at}{r_1^2} = \frac{2.3Q}{4aT} \lg \frac{2.25a}{r_1^2} + \frac{2.3Q}{4aT} \lg t. \quad (5)$$

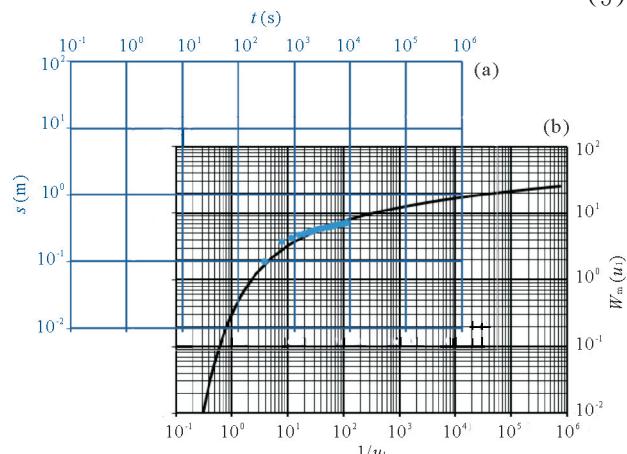


图 2 特定标准曲线匹配

Fig.2 The matching diagram of specific standard curve

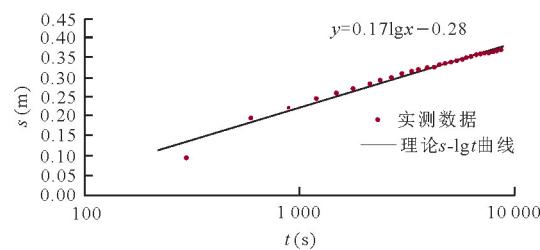


图 3 特定直线图解法匹配

Fig.3 The matching diagram of cooper-Jacob method

表 2 解析法求取浅层孔隙承压含水层参数结果

Table 2 The estimated results of aquifer parameters in the shallow confined aquifer with analytical method

方法	$K(\text{m/d})$	贮水系数	贮水率(m^{-1})
标准曲线配比法	31.51	3.70×10^{-3}	6.17×10^{-5}
直线图解法	21.66	7.70×10^{-4}	1.28×10^{-5}

公式(5)为一直线,其斜率 m 为:

$$m = 0.183 \frac{Q}{T}, \quad (6)$$

此直线与 $\lg t$ 轴的交点值 t_0 为:

$$t_0 = \frac{r_1^2}{2.25a} = 0.445 \frac{r_1^2}{a}. \quad (7)$$

作出实测曲线且绘制理论 $s-\lg t$ 曲线如图 3 所示,为了判断 $s-\lg t$ 曲线所作出的直线段为第几直线段,需参考标准曲线对比法中第 1 次抽水试验中求得的压力传导系数值,依据 #4 观测井数据算出的压力传导系数为 $5.38 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{d}$, 而 #4 距各抽水井最大距离 r_2 为 57.80 m , 由 $\frac{r_2^2}{4at} \leqslant 0.01$ 可得 $t \geqslant 13418.3 \text{ s}$, 然后 #4 的 $s-\lg t$ 曲线将转为第 2 直线段, 由于整个抽水时间集中在第 1 直线段, 由此可知图 3 上的直线段为第 1 直线段, 拟合理论曲线的斜率为 0.17, 与 $\lg t$ 轴的交点 $t_0 = 10^{0.28}_{0.17} = 47.14 \text{ s}$, 抽水流量为 $50 \text{ m}^3/\text{d}$, 代入公式(6)、(7) 得到导水系数 T 为 $1299.41 \text{ m}^2/\text{d}$, 渗透系数 K 为 21.66 m/d , 贮水系数 μ_e 为 7.70×10^{-4} 。综上所述, 解析法求取浅层孔隙承压含水层参数结果见表 2。

3.2 解析法求深层含水层水文地质参数

由于深层孔隙承压含水层是 #1 单井抽水, 在抽水中后期水位基本趋于稳定, 从试验数据可以判断出该含水层存在越流补给, 本文应用第 1 类越流系统井流理论结合 Aquifer Test 软件对数据进行拟合, 选择 Hantush-Jacob 分析方法, 与泰斯方法类似, 沿 Y 轴的 $W(u, r/B)$ 与沿 X 轴的 $1/u$ 形成的

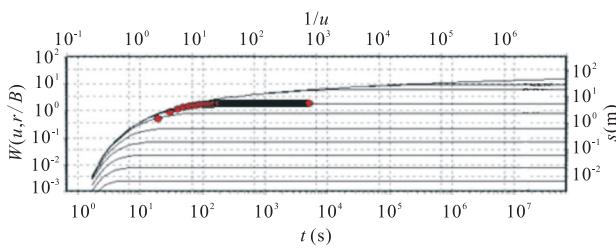


图 4 第 1 类越流系统水流模型匹配

Fig.4 The matching type curve for the flow model in the first kind of leaky aquifer

双对数坐标与实测的 $s-t$ 双对数曲线进行拟合, 拟合结果如图 4 所示。

图 4 中当 $r/B=0.5$ 时所对应的标准曲线为最佳拟合曲线, 拟合后得到导水系数为 $27.90 \text{ m}^2/\text{d}$, 渗透系数为 1.27 m/d , 贮水系数为 8.66×10^{-5} 。

4 数值法求取参数

为了更加准确地研究该区水文地质特征, 本文利用 FEFLOW (finite element subsurface flow system) 软件进行三维地质建模, 并对模型进行识别。通过模拟得到该研究区的最佳水文地质参数, 可为以后合理开发利用地下水资源提供科学依据。

4.1 含水层结构划分

笔者根据前述内容对研究区钻孔岩性、水文地质条件等进行分析与总结, 参照含水层渗透性、地下水动态特征等对含水层结构进行概化: 含水层自上而下依次概化为孔隙潜水含水层、浅层孔隙承压含水层、

弱透水层、深层孔隙承压含水层(表 1)。因研究区是针对浅层孔隙承压含水层和深层孔隙承压含水层进行的抽水试验, 所以主要对浅层孔隙承压含水层和深层孔隙承压含水层进行了研究; 由于研究区范围较小, 且主要含水层的岩性和模拟区的变化程度较小, 因此将含水层概化为均质、各向异性的介质, 将模型概化为三维承压含水层中的非稳定流模拟问题。

4.2 边界条件与初始条件

本次模拟主要根据 #1 岩性资料并结合抽水资料和试验场地实际情况进行建模, 模型范围是以各抽水井 (#1、#2、#3) 为中心, 向四周长宽各延伸 500 m(排除抽水井对边界的影响) 的区域为研究区, 研究区范围为 $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ 。

模型共分为 4 层, 模型上边界一层为粉质粘土层(层厚 40 m), 该粘土层与上层空气有物质和能量交换, 表面为自由面, 由于模拟时间(抽水水位下降到最小值)较短, 浅层抽水试验模拟时长为 2.40 h, 深层抽水试验模拟时长 16.20 h, 由于不考虑大气降水入渗、蒸发排泄等因素, 故上边界不作处理, 默认为隔水边界; 下边界为一层粉质粘土(层厚 0.06 m), 该层粘土颗粒直径较小, 致密且坚硬, 呈固结状态, 故将其默认为隔水边界。由于本次研究区以抽水井为中心向四周各延伸 500 m, 且抽水时间较短, 抽水井对模拟区边界处水位基本没有影响, 故将侧向模拟边界设为隔水边界。

模型初始水头设置为 -3.12 m (以地面为基准面)。两次抽水试验模型结构相同。

4.3 网格剖分与参数赋值

对于每一个层位, 笔者使用 GridBuilder 算法进

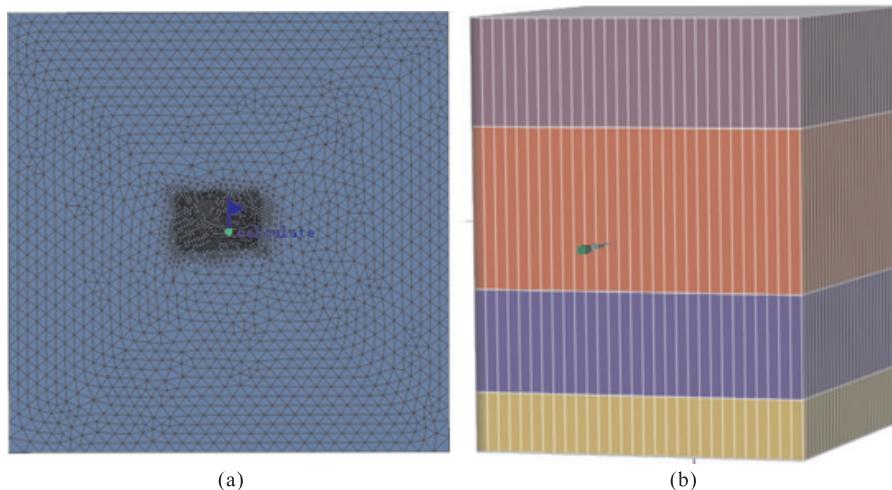


图 5 含水层网格剖分(a)和含水层三维地质模型(b)

Fig.5 The mesh discretization of aquifers in plan view (a) and 3-D view of aquifer geological model (b)

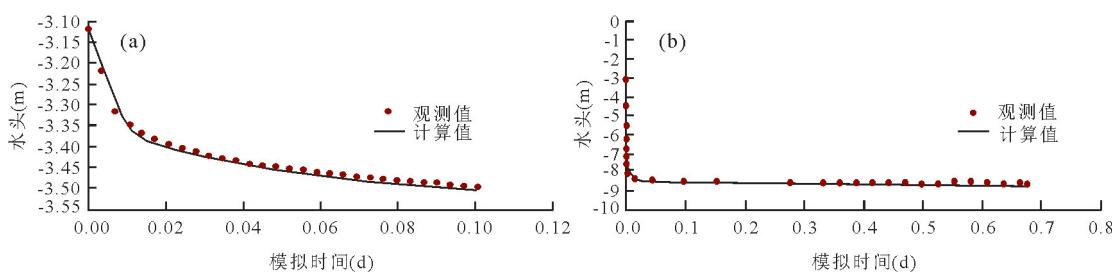


图 6 浅层(a)和深层(b)孔隙承压含水层最佳拟合效果

Fig.6 The simulation results for the hydraulic head in the shallow pore (a) and deep pore (b) confined aquifer

行三角形网格剖分,每一层剖分结点为 4 193 个,单元网格为 8 268 个,4 层共剖分 25 158 个结点和 41 340 个单元网格;其中主要对抽水井附近进行网格加密(图 5a),利用研究区已有的钻孔资料,对研究区内各含水层的底板标高进行有效的控制,生成了 1 000 m×1 000 m×160 m 的三维地质模型(图 5b)。

非主要含水层的初始渗透系数和贮水系数是结合《水文地质手册》并根据含水层岩性等资料进行参数赋值,而主要含水层的初始参数是解析算法求得的参数值,且浅层孔隙承压含水层参数是特定标准曲线和直线图解法所求参数的均值(表 2),由于本次模拟的 4 个抽水井距离较近,且该区地势平坦,岩性分布均匀,故在水平方向上不再进行参数分区。

4.4 模拟结果

选用两次抽水试验时间(水位降到最低值)为模拟期,依次对浅层孔隙承压含水层、深层孔隙承压含水层和弱透水层进行参数反演,时间步长由软件通过误差迭代自行控制。在模型识别中,主要依据观测孔的计算水位和观测水位的差值来调整渗透系数 K 、贮水率 S_s 等参数,通过反复调试,得到各含水层最佳拟合效果(图 6),从图 6 可以看出模型模拟值和观测值吻合效果较好,拟合后主要含水层的水文

地质参数见表 3。

4.5 模拟结果分析

为了研究模型的可靠性,需要更进一步探讨含水层之间的水力联系和水量交换情况,从而确定深层孔隙承压含水层抽水试验的越流补给来源。

4.5.1 浅层孔隙承压含水层抽水试验分析 对于浅层孔隙承压含水层抽水试验,针对整个模拟期,其含水层地下水均衡见表 4。由表 4 可知本次抽水试验的抽水量主要来自于该层含水层的弹性释放量。

4.5.2 深层孔隙承压含水层抽水试验越流量分析 对于深层孔隙承压含水层抽水试验,针对整个模拟期,其含水层地下水均衡见表 5。从表 5 可以看出深层孔隙承压含水层抽水试验抽水量主要来自于层间水量交换,即抽水量主要来自第 3 层弱透水层的越流补给,同时还有少量来自于该层的弹性释放量,越流量为 629.10 m³,自身弹性释放量为 36.09 m³,弱透水层对应的垂向渗透系数为 0.80 m/d(表 3)。

4.6 参数汇总

将以上不同方法所得到的结果进行汇总,如表 6 所示。结果表明:浅层孔隙承压含水层的渗透系数变化范围为 21.66~54.00 m/d,贮水率变化范围为 $1.28 \times 10^{-5} \sim 8.00 \times 10^{-4}$ m⁻¹;深层孔隙承压含水层的渗透系数变化范围为 0.70~5.40 m/d,贮水率变化范围为 $5.00 \times 10^{-6} \sim 8.00 \times 10^{-4}$ m⁻¹。

表 3 各主要含水层拟合后水文地质参数

Table 3 The estimated aquifer parameters with the numerical simulation

含水层	K_x (m/d)	K_y (m/d)	K_z (m/d)	贮水系数	贮水率 S_s (m ⁻¹)
浅层孔隙承压含水层	54.00	54.00	5.40	3.20×10^{-2}	8.00×10^{-4}
深层孔隙承压含水层	7.00	7.00	0.70	1.10×10^{-4}	5.00×10^{-6}
弱透水层	1.00×10^{-3}	1.00×10^{-3}	0.80	7.60×10^{-4}	2.00×10^{-5}

表 4 浅层孔隙承压含水层抽水试验水均衡

Table 4 The corresponding period budget for shallow confined aquifer pumping test

层	流出量(m ³)	流入量(m ³)	自身弹性释放量(m ³)
浅层孔隙承压含水层	0.03	228.10	227.99

表5 深层孔隙承压含水层抽水试验各主要含水层水均衡

Table 5 The corresponding period budget for main aquifer of deep confined aquifer pumping test

层	流出量(m^3)	流入量(m^3)	自身弹性释放量(m^3)
弱透水层	720.77	492.83	228.01
深层孔隙承压含水层	665.19	629.10	36.09

表6 解析法与数值法参数结果汇总

Table 6 The summarization of aquifer parameters estimated by analytical and numerical methods

含水层	方法	K(m/d)	贮水率(m^{-1})
浅层孔隙承压含水层	特定标准曲线配比法	31.51	6.17×10^{-5}
浅层孔隙承压含水层	特定直线图解法	21.66	1.28×10^{-5}
浅层孔隙承压含水层	数值模拟法	54.00	8.00×10^{-4}
深层孔隙承压含水层	Hantush-Jacob 法	1.27	3.90×10^{-6}
深层孔隙承压含水层	数值模拟法	7.00	5.00×10^{-6}

层渗透系数变化范围为 $1.27 \sim 7.00 \text{ m/d}$, 贮水率变化范围为 $3.90 \times 10^{-6} \sim 5.00 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 。对于本次抽水试验求参, 数值法所得结果更加可靠, 因为解析法拟合随意性较大, 且考虑的情形比较理想, 没有考虑实际含水层为多个含水层的组合, 而数值法更能刻画含水层的实际结构和地下水的真实运动状态, 所以综合考虑数值法所得结果更加可靠。

5 结论

(1) 利用解析法计算得到浅层孔隙承压含水层渗透系数变化范围为 $21.66 \sim 31.51 \text{ m/d}$, 贮水率变化范围为 $1.28 \times 10^{-5} \sim 6.17 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$; 深层孔隙承压含水层的渗透系数为 1.27 m/d , 贮水率为 $3.90 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 。

(2) 数值法拟合的浅层孔隙承压含水层渗透系数为 54.00 m/d , 贮水率为 $8.00 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$; 深层孔隙承压含水层的渗透系数为 7.00 m/d , 贮水率为 $5.00 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ 。第3层弱透水层对应的垂向渗透系数为 0.80 m/d 。

(3) 深层孔隙承压含水层抽水试验的抽水量主要来自于第3层弱透水层的越流补给, 有少量来自于该层本身的弹性释放量。

不带观测孔的抽水试验由于在抽水过程中受井中储水效应、抽水井附近表皮效应、井损等因素的影响, 使得观测的水位降深与传统的理论模型结果存在较大偏差, 本文采用解析方法和数值方法相结合对含水层参数进行了反演, 大大增加了结果的可靠度。

References

Chen, X.L., Wen, Z., Hu, J.S., et al., 2016. Application of Nu-

merical Simulation and Analytical Methods to Estimate Hydraulic Parameters of Foundation Pit in Hydropower Stations. *Earth Science*, 41(4): 701—710 (in Chinese with English abstract).

Chen, X.L., Zhang, M.Y., Wen, Z., et al., 2014. Application of Numerical Simulation to Estimate the Hydraulic Parameters in Fractured Media: A Case Study in Emergency Water Area of Qitaihe City, Heilongjiang Province. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 41(5): 32—37, 56 (in Chinese with English abstract).

Guo, J.Q., Zhou, H.F., Li, Y., et al., 2009. The Linear-Analytical Method of Estimating Aquifer Parameters from Unsteady Pumping Test Data. *China Rural Water and Hydropower*, (4): 18—21 (in Chinese with English abstract).

Hao, J., 2012. Numerical Simulation Study of Groundwater by FEFLOW in Baojixia Irrigation on Loess Plateau (Dissertation). Northwest A & F University, Yangling (in Chinese with English abstract).

Li, P.Y., 2011. Comparative Study on the Methods for Determining Hydrogeological Parameters in Leaky Confined Aquifers by Transient Flow Pumping Test (Dissertation). Chang'an University, Xi'an, 9—20 (in Chinese with English abstract).

Liu, H.J., Hsu, N.S., Lee, T.H., 2009. Simultaneous Identification of Parameter, Initial Condition, and Boundary Condition in Groundwater Modelling. *Hydrological Processes*, 23(16): 2358—2367. doi:10.1002/hyp.7344

Liu, Y., Shao, J.L., Chen, C.S., 2015. Hydrogeological Parameter Estimations for Slug Test in Sloping Confined Aquifer. *Earth Science*, 40(5): 925—932 (in Chinese with English abstract).

Neuman, S.P., 1975. Analysis of Pumping Test Data from

- Anisotropic Unconfined Aquifers Considering Delayed Gravity Response. *Water Resources Research*, 11 (2): 329—342.doi:10.1029/wr011i002p00329
- Nie, Q.L., Gao, G.D., Xuan, H.S., et al., 2009. Methods of Determining Parameters of a Confined Aquifer with Pumping Tests. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 36 (4): 37—40, 49 (in Chinese with English abstract).
- Raymond, J., Therrien, R., Gosselin, L., et al., 2011. A Review of Thermal Response Test Analysis Using Pumping Test Concepts. *Ground Water*, 49 (6): 932—945. doi:10.1111/j.1745—6584.2010.00791.x
- Sahin, A.U., 2016. A New Parameter Estimation Procedure for Pumping Test Analysis Using a Radial Basis Function Collocation Method. *Environmental Earth Sciences*, 75 (3): 1—13. doi:10.1007/s12665—015—5079—y
- Tang, Y.M., Xiao, J., 2001. The Characteristic Parameters of Groundwater System in Mining Area—The Hydrogeological Significance and Function of the System. *Hydrogeology and Engineering Geology*, (6): 26—29 (in Chinese with English abstract).
- van Camp, M.V., Walraevens, K., 2009. Pumping Test Interpretation by Combination of Latin Hypercube Parameter Sampling and Analytical Models. *Computers & Geosciences*, 35 (10): 2065—2073. doi:10.1016/j.cageo.2008.12.011
- Xue, Y.Q., Zhu, X.Y., 1999. Groundwater Dynamic. Geological Publishing House, Beijing, 66—72 (in Chinese).
- Yang, W., 2007. Numerical Simulation Research of Groundwater with FEFLOW in the West of Jilin Province (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Zech, A., Arnold, S., Schneider, C., et al., 2015. Estimating Parameters of Aquifer Heterogeneity Using Pumping Tests—Implications for Field Applications. *Advances in Water Resources*, 83: 137—147. doi: 10.1016/j.advwatres.2015.05.021
- Zhao, B.F., Kang, W.D., Zhutian, D.W., et al., 2009a. Aquifer Parameter Recognition by Combining Simulation of Pumping Test and Water Level of Long-Term Observation Well. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39 (3): 482—486 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, B.F., Kang, W.D., Zhutian, D.W., et al., 2009b. Aquifer Parameter Recognition Based on Numerical Simulation. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 31 (4): 409—412 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, D.J., 2005. The Three-Dimensional Numerical Simulation for Groundwater System in Jianghan Plain (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X., 2009. Numerical Simulation Study of Groundwater Based on FEFLOW and GIS Technology in Xianyang City (Dissertation). Northwest A & F University, Yangling (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z.F., Tang, R.L., Wang, B., 1999. Determination of Hydrogeological Parameters of Leaky Aquifer Based on Pumping Test Data of Partially Penetrating Well near the Boundary. *Journal of Hohai University*, 27 (3): 5—8 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈晓恋,文章,胡金山,等,2016.解析法与数值法在水电站防渗墙效果评价中的运用.地球科学,41(4):701—710.
- 陈晓恋,张美雁,文章,等,2014.裂隙含水层水文地质参数反演——以黑龙江七台河市应急水源地为例.水文地质工程地质, 41(5):32—37,56.
- 郭建青,周宏飞,李彦,等,2009.分析非稳定流抽水试验数据的改进直线解析法.中国农村水利水电, (4):18—21.
- 郝健,2012.基于FEFLOW的宝鸡峡原上灌区地下水数值模拟研究(硕士学位论文).杨凌:西北农林科技大学.
- 李培月,2011.非稳定流抽水试验确定越流承压含水层水文地质参数方法对比研究(硕士学位论文).西安:长安大学,9—20.
- 刘颖,邵景力,陈家润,2015.基于微水试验倾斜承压含水层水文地质参数的推估.地球科学,40(5):925—932.
- 聂庆林,高广东,轩华山,等,2009.抽水试验确定承压含水层参数方法探讨.水文地质工程地质,36(4):37—40,49.
- 唐依民,肖江,2001.矿区地下水系统特征参数——系统域值的水文地质意义及作用.水文地质工程地质,6:26—29.
- 薛禹群,朱学愚,1999.地下水动力学.北京:地质出版社, 66—72.
- 杨威,2007.基于FEFLOW的吉林西部地下水数值模拟研究(硕士学位论文).长春:吉林大学.
- 赵宝峰,康卫东,祝田多娃,等,2009a.抽水试验和长观水位联合模拟确定含水层参数.吉林大学学报:地球科学版,39(3):482—486.
- 赵宝峰,康卫东,祝田多娃,等,2009b.基于数值模拟的含水层参数识别.地球科学与环境学报,31(4):409—412.
- 赵德君,2005.江汉平原地下水系统三维数值模拟(硕士学位论文).武汉:中国地质大学.
- 赵旭,2009.基于FEFLOW和GIS技术的咸阳市地下水数值模拟研究(硕士学位论文).杨凌:西北农林科技大学.
- 周志芳,汤瑞凉,汪斌,1999.基于抽水试验资料确定含水层水文地质参数.河海大学学报(自然科学版),27(3): 5—8.