

基于数值模拟的含水层参数识别

赵宝峰¹, 康卫东², 祝田多娃¹, 马莲净¹

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西北大学 地质学系, 陕西 西安 710069)

摘要: 利用地下水流数值模拟软件 Modflow 耦合大型抽水试验和长观孔水位两个模型的方法, 对含水层参数进行了识别与校验, 该方法求得的含水层参数避免了只利用抽水试验模型校验所带来的不确定性。同时利用抽水实验数据进行抽水与恢复的全过程曲线拟合, 水位降深模拟相对误差小于 6%, 并且对均衡水量、泉水的溢出量以及未流场拟合程度进行了分析, 均衡水量模拟相对误差最大为 2.6%, 泉水溢出量模拟相对误差最大为 8.14%, 未流场拟合程度也较好, 从而提高了含水层参数的准确性。实例研究表明, 这种求参方法精度高、切实可行, 可以推广到其他的含水层参数确定中。

关键词: 含水层参数; 抽水试验; 长观孔; 数值模拟; 水量均衡; 泉

中图分类号: P641.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2009)04-0409-04

Aquifer Parameter Recognition Based on Numerical Simulation

ZHAO Bao-feng¹, KANG Wei-dong², ZHUTIAN Duo-wa¹, MA Lian-jing¹

(1. School of Environmental Sciences and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract: A modeling method which takes advantage of Groundwater Simulation Software (Modflow) coupled with large scale pumping test and long-term observation well is proposed to identify and validate aquifer's parameter. This method avoids the uncertainty of obtained aquifer's parameter which existed in model validation of only conducting pumping test. In addition, when the global curve of pumping and recovering is fit by pumping test data, the relative error would be less than 6% in draw down simulation, water balance accounting, overflow of spring as well as the simulation of flow field fit which improved accuracy of acquiring aquifer's parameter. The maximum relative error of water balance is 2.6%, the maximum relative of spring is 8.14%. The fact testifies that the method is high accurate and practical. The important is that it would provide experience to other research of the aquifer parameter calculation.

Key words: aquifer parameter; pumping test; long-term observation well; numerical simulation; balance of water; spring

0 引言

含水层参数的确定是地下水资源评价、数值模拟、开发利用与保护以及科学管理的重要基础, 但是确定含水层参数却是一个非常复杂的过程。现在常用的计算方法有利用抽水试验反求^[1-2]、利用地下水长观资料求解^[3]、利用全过程曲线拟合法确定等^[4], 这些方法在求解含水层参数的时候, 都存在着一定的不确定性^[5-8]。笔者在以往的研究基础上, 利用抽水试验和长观水位资料, 借助计算机数

值模拟技术, 对全过程曲线进行拟合, 并且对泉的溢出量和水均衡量等进行了分析, 确定的含水层参数与实际较为符合。

1 模拟反求含水层参数

1.1 研究区概况及水文地质参数

研究区域为内蒙古高原低山丘陵区内的一个半封闭的小型内陆盆地, 摩楞河是区内主要河流, 流向由北向南, 呈蛇曲状纵贯全区。研究区位于摩楞河河谷, 区内含水层结构简单, 为第四系单一结

收稿日期: 2008-12-25

基金项目: 高等学校学科创新引智计划项目(B08039)

作者简介: 赵宝峰(1981-), 男, 陕西咸阳人, 工学博士研究生, 从事三水转化及水资源调控研究。E-mail: sunman1220@163.com

构孔隙潜水含水层,岩性单一,沿河谷呈带状分布,其厚度从上游至下游逐渐变厚,一般为 20~53 m,最厚为 75 m。

为了初步获取含水层水文地质参数,在研究区内进行了大型群孔抽水试验、多观测孔抽水试验、垂直渗透试验、给水度试验和水动态观测。

1.2 地下水流数学模型的建立

根据地下水系统特征以及含水层结构和地下水补径排条件等,研究区水文地质条件可概化为如下概念模型(图 1):补给边界 A₁、A₂ 位于河谷上游,入流量为摩楞河、忽少沟的河谷断面地下水径流量;隔水边界 B₁~B₃ 由河谷两侧基岩组成,风化裂隙水量小可忽略;排泄边界 C 位于河谷下游;面源 D₁ 为降水、洪水和农业灌溉水面状入渗;线源 E 为河流垂直线状入渗;面汇 D₂ 为主要发生在河谷下游地区的面状蒸发;线汇 F 为在摩楞河与忽少沟交汇地段的泉集河;点汇 G 主要为居民的灌溉用井。

含水层结构概化:计算区含水层为结构单一的上更新统一全新统(Q₃₊₄)砂砾石层,中间没有连续的隔水层,下伏风化基岩为含水层隔水底板,整个计算区为单层潜水含水层。

计算区边界条件概化:整个计算区边界由流入边界、隔水边界和变流量出流边界构成(图 2)。

据上述条件概化,计算区地下水运动可用以下数学模型来描述

$$\begin{cases} -\frac{\partial}{\partial x}\left(k(h-Z_b)\frac{\partial h}{\partial x}\right)-\frac{\partial}{\partial y}\left(k(h-Z_b)\frac{\partial h}{\partial y}\right)+W_r-W_s-E_t-\sum_i Q_i\delta(x-x_i,y-y_i)=\mu\frac{\partial h}{\partial t} \\ h(x,y,0)=h_0(x,y) & (x,y)\in D \quad \text{水位初始条件} \\ h(x,y,t)=h_1(x,y,t) & (x,y)\in \Gamma_1 \quad \text{水位边界条件} \\ k(h-Z_b)\frac{\partial h}{\partial n}=0 & (x,y)\in \Gamma_2 \quad \text{隔水边界条件} \\ k(h-Z_b)\frac{\partial h}{\partial n}=\alpha(h-h_0)+q_0 & (x,y)\in \Gamma_3 \quad \text{变流量边界条件} \end{cases}$$

式中: h 为含水层水位(m); $h_0(x,y)$ 为含水层初始水位(m); $h_1(x,y,t)$ 为一类边界的水位(m); Z_b 为含水层底板高程(m); k 为含水层渗透系数(m/d); μ 为含水层给水度; W_r 为含水层垂向综合补给强度(包括降水、洪水与灌溉水等渗漏补给, m/d); W_s 为泉水溢出强度(m/d); E_t 为地下水蒸发排泄强度(m/d); Q_i 为第 i 个节点开采井流量(m³/d); Γ_1 为水位边界; Γ_2 为隔水边界; Γ_3 为变流量边界; n 为边界上的外法线方向; α 为变流量边界流量衰

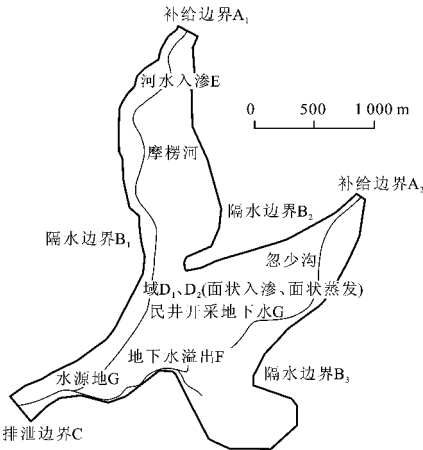


图 1 水文地质概念模型
Fig. 1 Hydrogeological Conceptual Model

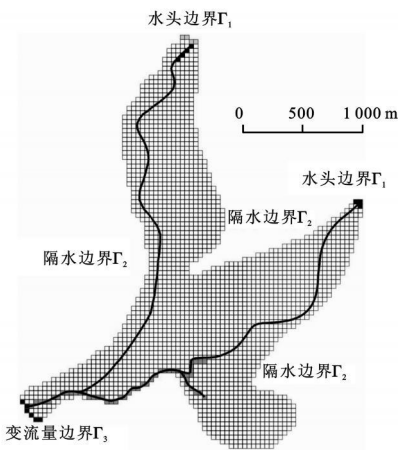


图 2 模拟计算区域及边界条件概化
Fig. 2 Simulation of Calculating Region and Conceptualization of Boundary Condition

减系数; q_0 为变流量边界初始单宽流量(m²/d)。

地下水流数值计算选用瑞士联邦苏黎世工学院开发的 Processing Modflow Pro 集成软件系统中的 MODFLOW 模块(包括模型剖分、插值、计算、数据录入、数据输出等前处理、后处理功能)^[9-11]。

1.3 含水层参数的识别

模型校验过程分为 2 个阶段,首先用大型抽水试验对抽水试验井所影响的局部范围进行含水层参数识别;在此基础上,以大型抽水试验井区地层参数作为基准参数,用地下水动态和统测水位场对全计算区含水层参数及边界条件进行识别^[12-13]。两阶段的模拟模型(即抽水试验模拟模型与长观水位模拟模型),在含水层参数识别过程中采用了联合求解的方法,在含水层边界及源汇项等相同的条

件下,通过反复调试以提出能匹配于两个模拟模型的含水层参数。

模型校验期为 2005 年 4 月 5 日到 10 月 2 日,历时 180 d;校验期间的大型抽水试验为 8 月 9 日到 31 日,共 22 d(其中抽水 12 d,水位恢复 10 d)。模型校验的初始水位场采用 2005 年 4 月 5 日的统测水位场。

2 含水层参数识别

2.1 水位拟合

在模型校验过程中,用所采集抽水试验数据较好地对抽水试验的全过程进行了模拟,水位降深模拟相对误差小于 6%(图 3);对全计算区进行模拟时,长观孔水位的最大拟合差为 0.17 m,平均拟合差为 0.04 m(图 4)。

2.2 均衡水量

由表 1 可以看出,研究区地下水主要的补给量

为上游边界流入量和洪水补给量,分别占到总补给量的 30.83%和 43.11%;研究区地下水排泄的主要途径为泉水溢出量和下游边界流出量,分别占总排泄量的 24.97%和 58.87%。通过水均衡计算,研究区现状年的地下水总补给量为 3 988 m³/d,总排泄量为 4 344 m³/d;通过数值模拟计算,研究区现状年的地下水总补给量为 3 957 m³/d,总排泄量为 4 457 m³/d,补给量拟合差为 0.78%,排泄量拟合差为 2.60%,拟合程度较好。地下水补给量小于排泄量,含水层处于负均衡状态,这是由于均衡期处于枯水年,补给量不足所造成的。

表 1 研究区地下水资源均衡统计

Tab. 1 Balance of Groundwater Resource in Research Region					
补排量	边界流入量	河水及降水入渗量	洪水入渗量	灌溉入渗量	合计
补给量/ (m ³ ·d ⁻¹)	1 220	962	1 706	69	3 957
补排量	开采量	泉水溢出量	地下水蒸发量	边界流出量	合计
排泄量/ (m ³ ·d ⁻¹)	452	1 113	268	2 624	4 457

2.3 泉水溢出量校验

利用数值模型对泉流量进行了校验,5 月底、6 月底与 10 月初的实测泉流量平均值分别为 1 261、799、1 065 m³/d,模拟的泉流量分别为 1 159、864、1 068 m³/d,相对拟合差为 0.28%~8.14%(表 2)。

表 2 实测与模拟泉水溢出量

Tab. 2 Measured and Simulated Spillage of Spring				
时间	2005 年 5 月底	2005 年 6 月底	2005 年 10 月初	
实测泉流量/(m ³ ·d ⁻¹)	1 261	799	1 065	
模拟泉流量/(m ³ ·d ⁻¹)	1 159	864	1 068	

2.4 流场拟合

拟合水位场采用 10 月 2 日的实测水位场,拟合结果见图 5,由图 5 可以看出通过数值模拟所计算出的流场图与实测流场图拟合度较好。

2.5 含水层参数分布的合理性

在调试含水层参数过程中,将计算区域分成了 12 个参数分区(图 6),并将各参数分区的参数列表(表 3),I、II 和 IV 分区的渗透系数最大,为 235~380 m/d,这是由于这 3 个分区内位于主河道,含水层岩性主要为砾砂混卵石,颗粒粗大、结构松散、渗透性良好;I、II、VII、VIII 和 IX 分区的渗透系数为 100~180 m/d,这是因为这 5 个分区内含水层主要为河道洪积物,其渗透性一般;V、X、XI 和 XII 分区的渗透系

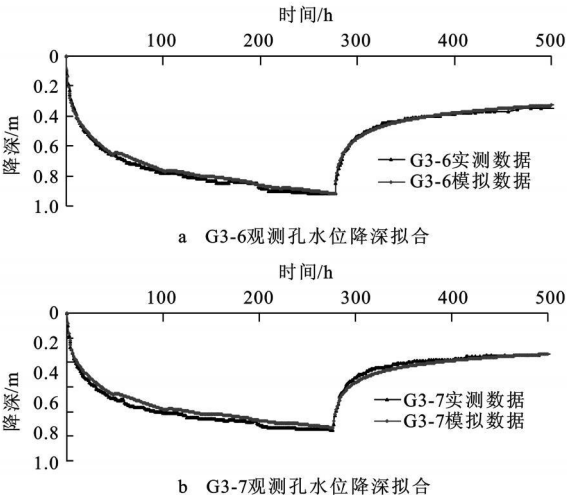


图 3 大型抽水试验观测孔(部分)水位降深拟合
Fig. 3 Observation Well (Part) Drawdown Fitting in the Large Scale Pump Test

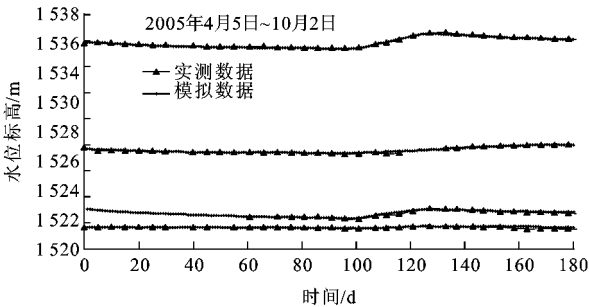


图 4 长期观测孔水位拟合
Fig. 4 Water Level Fitting in Long-term Observation Well

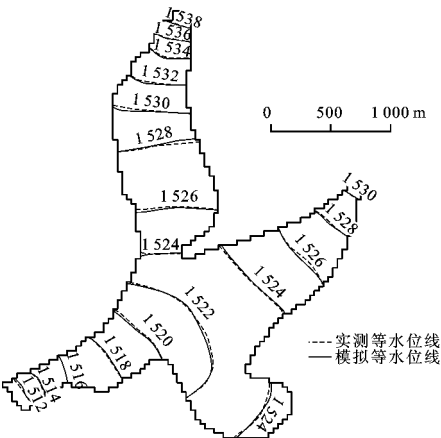


图 5 2005 年 10 月 2 日流场拟合
Fig. 5 Flow Field Fitting in Oct 2nd, 2005

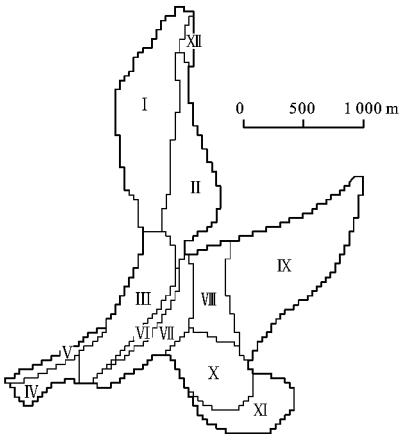


图 6 计算区含水层参数分布
Fig. 6 Aquifer Parameters Distribution
in Calculating Region

表 3 含水层参数分区数据

Tab. 3 Distributed Districts Data of Aquifer Parameters						
分区编号	I	II	III	IV	V	VI
渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	170	280	235	380	60	180
给水度	0.18	0.20	0.20	0.28	0.13	0.18
分区编号	VII	VIII	IX	X	XI	XII
渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	160	120	100	60	2	20
给水度	0.18	0.16	0.16	0.13	0.10	0.10

数为 2~60 m/d, 含水层岩性主要为坡积的基岩风化碎屑及充填其内的黏性土, 其厚度薄、导水性较弱。由此可以看出, 通过数值模拟计算出的各分区含水层渗透系数与前期勘察结果较为一致。

3 结语

(1)由抽水试验水位降深拟合曲线和长观孔水位降深拟合曲线可以看出, 求得的参数能够很好地

匹配 2 个模拟模型。同时, 在曲线拟合过程中采用了抽水期间和水位恢复期间的全部观测资料, 在保证实测水位与计算水位误差平方和最小、计算曲线与实测曲线拟合度最佳的情况下, 使得所求含水层参数的唯一性和可靠性大大提高。

(2)通过对实测均衡水量和模拟均衡水量的分析, 无论补给量拟合差还是排泄量拟合差均小于 3%, 说明由数值模拟计算出的均衡水量与实际较为一致。

(3)利用两次的实测泉流量对数值模拟的结果进行了校验, 相对拟合差较小。

(4)将数值模型计算出的末流场与实际末流场进行了拟合度分析, 两个流场的拟合程度较好。

通过对抽水试验观测孔水位降深、长观孔水位动态、地下水均衡和泉的溢出量等方面对模型进行了校验, 效果良好, 得出的水文地质参数更加真实可信, 因此这种方法也可以应用于其他的含水层参数识别。

参考文献:

[1] 刘志峰, 林洪孝, 许向君, 等. 小范围群井与单井抽水试验推求水文地质参数的比较分析[J]. 地质与勘探, 2007, 43(1): 94-97.

[2] 石中平. 单孔稳定抽水试验水位恢复资料确定含水层参数[J]. 西安工程学院学报, 2000, 22(2): 71-74.

[3] 王华军, 李 娟. 利用地下水长观资料求解含水层参数[J]. 地下水, 2007, 29(6): 78-81.

[4] 肖长来, 梁秀娟, 崔建铭, 等. 确定含水层参数的全程曲线拟合法[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2005, 35(6): 751-755.

[5] 胡伏生, 陈连竹, 万 力, 等. 含水层参数不确定性与地下水开采量可靠性评价[J]. 南京大学学报: 自然科学, 1999, 35(6): 675-682.

[6] 房佩贤, 卫中鼎, 廖资生. 专门水文地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1996.

[7] 李佩成. 地下水动力学[M]. 北京: 农业出版社, 1993.

[8] 陈雨孙, 颜明志. 抽水试验原理与参数测定[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.

[9] 李俊亭. 地下水流数值模拟[M]. 北京: 地质出版社, 1992.

[10] 郭东屏, 张石峰. 渗流理论基础[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1994.

[11] 杨青春, 卢文喜, 马洪云. Visual Modflow 在吉林省西部地下水数值模拟中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(3): 67-69.

[12] 宋晓梅, 陈兆炎. “迭代法”求水文地质参数的原理及应用[J]. 安徽地质, 1999, 9(2): 123-126.

[13] 邹正盛, 郑清洁. 求水文地质参数的计算机配线法[J]. 工程勘察, 2001(6): 30-32.