

基于可变水文地质参数的地下水系统数学模型

刘玉珍^{1, 2}, 王本德¹, 姜英震²

(1. 大连理工大学土木水利学院, 辽宁 大连 116024; 2. 辽宁省水利水电科学研究院, 辽宁 沈阳 110003)

摘要:以辽宁省平原区为研究背景,建立了典型区地下水系统数学模型。提出了可变的开采含水层等效渗透系数和平均给水度的水文地质参数模拟方法,对常规分区法进行了改进,并应用于建立的数学模型中,提高了模型精度。用修正有限元法对数学模型进行数值离散,利用 Visual Basic 软件编制计算程序,对地下水系统进行模拟,取得了较好的模拟结果。建立的模型为进一步研究辽宁省平原区地下水状况和可持续利用提供了条件,研究方法对同类地区的模型研究具有重要参考价值。

关 键 词:地下水;数值模拟;水文地质参数;有限元

中图分类号: P641 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2009)03-0398-05

地下水是一种宝贵的自然资源,同时又是环境的基本要素^[1]。实际的地下水系统具有地形起伏多变、含水层厚度不均、结构复杂、水文地质参数的时空变异性明显等特征。数学模型对这些特征有相对合理的表征,是对真实地下水系统的仿真和模拟^[2]。随着计算机技术的快速发展,数值计算方法在地下水资源分析评价中得到逐步推广^[3~8]。该领域学者对地下水系统数值模拟的工作程序、步骤方面达成一致,强调对水文地质条件合理概化的重要性。对某系统的地下水进行资源评价,必须在对其水文地质条件进行必要概化的基础上,建立能够准确描述该系统水流运动特征的数学模型^[1]。

近年来,虽然有很多数值法用于地下水资源评价的实例,但地下水系统是一个复杂的系统,在应用中,因评价区域水文地质条件的差异,使得数值模拟方法在边界条件处理、水文地质参数分区,以及计算时段划分等方面均有不同。水文地质参数的模拟是地下水系统数值模拟中面临的最大问题,在模型实际应用中,参数识别可概括为分区法和插值法^[9~12],分区法即根据水文地质条件进行分区,每个区域内的水文地质参数被概化为一个定值。该方法较为简单,在中国广为应用。当研究区面积不大或参数分区较多时,这种方法是有一定精度的^[13]。但也存在一定的局限性,第一,当实际研究区面积很大时,即使参数分区已经很多,精度也会大大降低;第二,由于含水介质是在特定的历史时期特定的地质条件下沉积形成的,具有一定的成层性^[13],在地下水开发利用过程中,随着地下水埋深的变化,对应的开采层在发生变化,随之发生变化的含水层水文地质参数没有被反映出来。基于这种情况,本文结合辽宁省平原区典型实例,建立了地下水系统数学模型,在对其水文地质参数模拟时,以分区法为前提,充分考虑以上两方面问题,提出了一种新的模拟方法,用动态可变的含水层等效渗透系数和平均给水度来模拟水文地质参数,试图减少常规的水文地质参数分区法给地下水数值模拟带来的模拟误差。

辽宁省是中国北方地区水资源严重短缺的省份,中部平原区人口密集、工农业发达,水资源供需矛盾突出,选取的典型研究区域为秀水河河谷平原区,位于辽宁省中部,属于傍辽河干流发育的冲洪积河谷平原,总面积 995 km²。该区域为河谷平原区第四系松散岩类孔隙水,基本以冲积、冲洪积物为主,沉积连续,厚度较大,呈现出山前冲洪积扇、冲洪积平原构成的冲洪积物地下水水文地质特征,在平原区具有很强的代表性。

收稿日期: 2008-05-05

作者简介: 刘玉珍(1966-),女,辽宁北票人,教授级高级工程师,博士,主要从事水资源及农田水利方面的研究。

E-mail: lnskylyz@163.com

1 地下水系统数学模型的建立

依据二维地下水运动偏微分方程,在地下水资源系统概化的基础上,根据质量守恒定律及能量守恒定律,建立系统的数学模型:

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = Q_T(x, y, t) + Q_U(x, y, t) + Q_E(x, y, t) \quad (x, y) \in \Omega \quad t > 0 \quad (1)$$

$$h(x, y, t) \big|_{t=0} = h_0(x, y) \quad (x, y) \in \Omega_1 \quad (2)$$

$$h(x, y, t) \big|_{\Gamma_1} = h_1(x, y, t) \quad (x, y) \in \Gamma_1 \quad t \geq 0 \quad (3)$$

$$\Omega_1 = \Omega + \Gamma_1 + \Gamma_2 \quad (4)$$

式中 h 为地下水位; μ 为含水层给水度; t 为时间; Q_T 为侧向补排量; Q_U 为垂向补排量; Q_E 为越层补排量; h_0 为初始水位; h_1 为第一类边界水位; Ω 为计算区域; Γ_1 为第一类边界; Γ_2 为第二类边界。

地下水系统数学模型的求解思路是,利用抽水试验资料及地质钻孔资料,初步确定水文地质参数,利用数值法求解数学模型,对地下水资源系统进行数值模拟,利用实测数据进行结果检验,再对参数进行修订。对研究区地下水资源系统进行剖分,将边值问题进行离散、变化和整理,逐个建立内节点和二类边界节点的单节点修正有限元方程,采用隐式时间差分格式,得到地下水资源系统数值模拟模型。

$$A_{n \times m} h_m \times 1 + C_{n \times m} \frac{dh}{dt} = F_n \times 1 \quad (5)$$

式中 A 为导水矩阵,与单元剖分的几何尺寸、含水层厚度、渗透性能等有关; h 为节点水头列向量; C 为储水矩阵; F 常量矩阵,包括单元内井和节点抽水流量、开采量、二类边界补给量等; n 为计算节点数,包括内节点和二类节点; m 为总节点数。

2 水文地质参数的初步确定

首先根据水文地质资料,进行地下水类型分区。如果开采含水层中的地下水具有自由水面,同大气降水、地表水体、土壤水发生水力联系,则为潜水类型区;如果开采含水层上覆有不透土层,地下水补给来自开采含水层的弹性释水和地下径流,则为承压水类型区;如果开采初期,地下水类型属承压水,当开采一段时间后,地下水头降至开采含水层顶板之下,地下水具有自由水面,但同大气降水、地表水体、土壤水不发生水力联系,则为承潜水类型区,地下水是由承压水过渡为无压层间水。

对水文地质参数的模拟,以开采层的等效渗透系数和平均给水度作为计算参数。由于地下含水层是在特定的历史时期特定的地质条件下沉积形成的,具有一定的成层性,在地下水开发过程中,随着地下水埋深的变化,对应的开采层在发生变化,含水层的水文地质参数也应随之发生变化。因此为了减少常规的水文地质参数分区法给地下水数值模拟带来的模拟误差,本文提出以变化的等效渗透系数和平均给水度来模拟研究区的水文地质参数,具体方法及步骤如下:

(1) 根据钻孔资料估算各点不同降深条件下的等效渗透系数和平均给水度值,并分别确定各点的1、3、6 m等各种降深与10 m降深的等效渗透系数和平均给水度值的初步关系。

(2) 根据各点建立的不同降深时的参数关系和地层条件,进行参数关系类型分区,再对每个分区的所有钻孔数据进行统计分析,确定该区的渗透系数和给水度随水位降深变化的关系曲线,并绘制分区图。不同线型的平面分布反映了地层的空间沉积模式。

(3) 研究区水文地质参数在平面范围内存在趋势性变化,因此本文对常规的等值分区法进行改进,以等效渗透系统和平均给水度等值线模拟这种趋势变化。根据钻孔资料估算的经验值并参考抽水试验数据绘制等值线图。等值线图基本反映了古河道、河间洼地等富水或贫水地域的变化,反映了地层的沉积环境。

(4) 根据等值线图 and 分区图, 分别确定各个剖分节点的 10 m 降深等效渗透系数和平均给水度值以及等效渗透系数和平均给水度随水位变化的关系曲线类型, 用于地下水系统数值模拟中。

根据实际资料分析, 位于辽宁省中部的秀水河河谷平原区包括潜水类型区和承压水类型区。开采含水层的平均给水度随水位变化的关系和等效渗透系数随水位变化的关系均分 8 个类型区。各类型区的函数关系曲线为

$$\bar{\mu} = \mu_{10}(A_1 e^{C_1 H} + B_1 \ln H) \quad (6)$$

$$\bar{K} = K_{10}(A_2 e^{C_2 H} + B_2 \ln H) \quad (7)$$

式中 $\bar{K}$ 、 $\bar{\mu}$ 分别为开采含水层的等效渗透系数、平均给水度; K_{10} 、 μ_{10} 分别为水位降深 10 m 的等效渗透系数、平均给水度; H 为水位降深; A_1 、 B_1 、 C_1 、 A_2 、 B_2 、 C_2 分别为各个分区的参数值, 如表 1 所示。图 1 和图 2 分别绘出了给水度等值线示意图和给水度随水位变化的线型分区示意图。

表 1 不同分区水文地质参数

Table 1 Hydrological-geological parameters of sub-area

分区 代号	给水度参数			分区 代号	渗透系数参数		
	A_1	B_1	C_1		A_2	B_2	C_2
11	1	0	0	11	1	0	0
12	0.7277	0	0.0284	12	0.4970	0	0.0680
13	0.5252	0.2325	0	14	1.0991	-0.0467	0
14	1.5022	-0.2608	0	15	1.0770	0	-0.0072
22	0.0025	0	0.6254	21	1	0	0
23	0.1848	0.4403	0	22	0.5654	0	0.0541
24	1.1969	-0.0939	0	24	16.1537	-6.9873	0
25	4.7339	0	-0.1397	25	2.4419	0	-0.0845

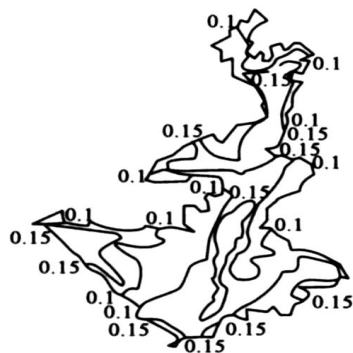


图 1 水位降深 10 m 的给水度等值线示意图

Fig. 1 Isoline map of specific-yield with water level embedded at 10-meter depth



图 2 给水度随水位变化的线型分区示意图

Fig. 2 Variation of specific yield with water level

3 模型识别与检验

根据不规则网格剖分的基本原则, 对研究区的地下水资源系统进行区域不规则网格剖分, 将系统剖分成 896 个单元, 547 个节点, 其中内节点 351 个, 一类边界节点 34 个, 二类边界节点 162 个。

考虑地下水资料情况, 选择资料较完整的一个典型年为计算时段, 以 9 月 26 日为计算起始日, 次年 9 月 26 日为计算截止日。综合考虑水田泡田、大田用水、土壤冻结、封冻、河汛等因素, 将计算时段划分为 9 个。根据建立的数学模型, 采用赛德尔叠代法求解。以区域内水位变化趋势和节点水位误差进行模型校正和检验。9 月 26 日至次年 4 月 26 日为模型参数校正时段, 通过计算, 校正后的参数与初步确定的参数基本吻合。再以 4 月 26 日至 9 月 26 日为模型验证时段, 根据校正后的模型进行水位模拟, 对各节点水位误差进行统计, 其中

绝对误差小于 0.1 m 的节点数占 23 %, 小于 0.5 m 的占 76 %, 小于 1 m 的占 96 %, 水位流场拟合结果见图 3 所示。从模拟检验结果和流场分布来看, 计算值与实测值吻合较好, 模型的精度较高。

根据识别检验后的数学模型, 模拟计算地下水资源量, 结果见表 2。总补给量为 12 279.3 万 m³, 总排泄量为 11 165.7 万 m³。其中降雨入渗占总补给量的 56 %, 是主要补给源。地下水的主要消耗量为一类边界排泄量和潜水蒸发量。补给量略大于排泄量, 差值为 1 113.6 万 m³, 占总补给量的 9 %, 采补基本均衡。

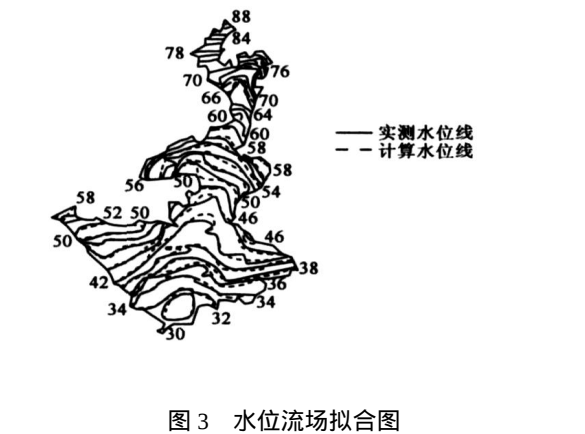


图 3 水位流场拟合图

Fig. 3 Fitting curves for water level with flow field

表 2 地下水资源量模拟计算结果

Table 2 Results of groundwater resources modeling

项 目	补给量 / 万 m ³	项 目	排泄量/ 万 m ³	补排量差 / 万 m ³
降雨入渗补给量	6 842.3	潜水蒸发量	3 211.0	
井灌回渗补给量	186.4	井灌水田开采量	1 044.5	
井渠灌渗漏补给量	111.0	井灌麦田开采量	807.1	
坑泡渗漏补给量	1 049.0	井灌菜田开采量	829.0	
内河渗漏补给量	690.4	井灌其它开采量	337.4	
排干渗漏补给量	4.5	坑泡养鱼用水量	1 130.7	
灌溉干渠渗漏量	29.8	乡镇用水量	32.0	
二类河道边界补给	278.4	村屯用水量	359.7	
山丘边界补给	1 003.2	一类边界排泄量	3 414.3	
一类边界补给	2 084.3			
合 计	12 279.3		11 165.7	1 113.6

4 结 论

- (1) 依据辽宁省中部地区水文地质特征构建了地下水系统数值模型, 运用修正有限元法进行模型求解, 该模型较好地反映了客观地质原型。
- (2) 提出的以可变的含水层等效渗透系数和平均给水度来模拟水文地质参数的方法, 对常规的分区法进行了改进。建立的水文地质参数随地下水位变化的关系在一定程度上反映了地层的空间沉积模式; 以等值线的方式描述水文地质参数在平面内的趋势性变化, 基本反映了古河道、河间洼地等富水或贫水地域的变化, 反映了地层的沉积环境。
- (3) 根据模拟计算结果, 现状开采条件下, 典型区地下水资源补给量与排泄量基本平衡, 该模型可用于各种开采条件下的方案预测与评价分析, 对同类地区的模型研究及评价工作具有一定的参考价值。

参考文献:

[1] 钱家忠, 吴剑锋, 朱学愚, 等. 地下水资源评价与管理数学模型的研究进展[J]. 科学通报, 2001, 46(2): 99 - 103. (QIAN Jia-zhong, WU Jian-feng, ZHU Xue-yu, et al. Advances in mathematical model of groundwater resources and management[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(2): 99 - 103. (in Chinese))

[2] 郝治福, 康绍忠. 地下水系统数值模拟的研究现状和发展趋势[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(1): 77 - 81. (HAO Zhi-fu, KANG Shao-zhong. Current situation and development trend of numerical simulation of groundwater system[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(1): 77 - 81. (in Chinese))

[3] 张久川, 任树梅, 马明, 等. 基于 GIS 的地下水资源可持续性评价[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 35 - 39. (ZHANG Jiu-chuan, REN Shu-mei, MA Ming, et al. Evaluation of the sustainability of groundwater resources using GIS[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(8): 35 - 39. (in Chinese))

[4] 薛禹群, 吴吉春. 面临 21 世纪的中国地下水模拟问题[J]. 水文地质工程地质, 1999, 26(5): 1 - 3. (XUE Yu-qun, WU Ji-chun. Problems of groundwater modeling in china facing 21 st century[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1999, 26(5): 1 - 3. (in Chinese))

[5] 高佩玲, 雷廷武, 张石峰, 等. 新疆阿图什哈拉峻地区地下水系统模型研究[J]. 水利学报, 2004, 35(4): 61 - 66. (GAO Pei-ling, LEI ting-wu, ZHANG Shi-feng, et al. Study on groundwater system model of Halajun Area in Xinjiang Autonomous Region[J]. Journal of Hy-

- draulic Engineering, 2004, 35(4): 61 - 66. (in Chinese))
- [6] 赵书明. 有限元数学模型在水资源评价中的应用[J]. 电力勘测, 2000(2): 29 - 33. (ZHAO Shu-ming. Application of finite element mathematical model to water resource evaluation[J]. Electric Power Survey, 2000(2): 29 - 33. (in Chinese))
- [7] 韩再生. 地下水资源数值法计算技术要求[J]. 水文地质工程地质, 1999, 26(4): 47 - 49. (HAN Zai-sheng. Introduction on technical requirements for numerical method of groundwater resources evaluation[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1999, 26(4): 47 - 49. (in Chinese))
- [8] 张蔚榛. 地下水非稳定流计算和地下水资源评价[M]. 北京: 科学出版社, 1983. (ZHANG Wei-zhen. Unsteady-flow calculation and resource evaluation of groundwater[M]. Beijing: Science Press, 1983. (in Chinese))
- [9] YEH W G. Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology: The inverse problem[J]. Water Resources Research, 1986, 22(2): 95 - 108.
- [10] CLIFTON P M, NEUMAN S P. Effects of Kriging and inverse modeling on conditional simulation of the Avra Valley aquifer in Southern, Arizona[J]. Water Resources Research, 1982, 18(4): 1215 - 1234.
- [11] 鲍卫锋, 黄介生, 闫华, 等. 基于分布式参数模型的地下水数值模拟[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 25 - 28. (BAO Wei-feng, HUANG Jie-sheng, YAN Hua, et al. Numerical simulation of groundwater based on distributed parameter model[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(5): 25 - 28. (in Chinese))
- [12] 宋西平, 寇广潮. 地下水数值模拟面参数和水文参数研究的重要性[J]. 地下水, 2001, 23(2): 63 - 64. (SONG Xi-ping, KOU Guang-chao. Importance of the study on numerical simulation interface parameters and hydrology parameters for groundwater[J]. Groundwater, 2001, 23(2): 63 - 64. (in Chinese))
- [13] 陈彦, 吴吉春. 含水层渗透系数空间变异性对地下水数值模拟的影响[J]. 水科学进展, 2005, 16(4): 482 - 487. (CHEN Yan, WU Ji-chun. Effect of the spatial variability of hydraulic conductivity in aquifer on the numerical simulation of groundwater[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(4): 482 - 487. (in Chinese))

Mathematical model for groundwater system based on the variable hydro-geological parameters

LIU Yu-zhen^{1,2}, WANG Ben-de¹, JIANG Ying-zhen²

(1. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Research Institute of Water Resources and Hydropower of Liaoning Province, Shenyang 110003, China)

Abstract: Taking the plain area in Liaoning province as example, This paper establishes a mathematical model for groundwater system in typical area, presents a variable hydro-geological parameters simulation method about the equivalent permeability coefficient of aquifer and average specific yield, and shows an improvement about the routine zoning method, which is used in the constructed model to increase the precision of the model. We use the modified finite element method to numerically discrete to the model, and establish the calculation program by using Visual Basic. The simulation result is better for the groundwater. The constructed model provides condition for the research of the sustainable utilization of groundwater in the plains in Liaoning province. This method provides significant reference for the model research on similar area.

Key words: groundwater; numerical simulation; hydro-geological parameters; finite element