

文章编号 :1000-9833(2008)04-0008-04

# 佳木斯市江北地下水水源地数值模拟研究

李 勤<sup>1</sup>,郑永胜<sup>2</sup>,刘连成<sup>2</sup>

(1. 黑龙江省地质环境监测总站 佳木斯分站,佳木斯 154002; 2. 吉林大学 应用技术学院,长春 130022)

**摘 要:**利用佳木斯市江北水源地水文地质勘探实际资料,通过数值模拟,对该区地下水资源量进行了评价和预报。主要步骤是:水文地质模型的概化;数学模型的建立及其解法;模型的校正;模型的验证及预报。实践证明,用数值模拟法评价地下水开采资源是一种快速有效的方法,对该区地下水资源评价和预报有一定的指导意义。

**关键词:**数值模拟;地下水水源地;开采条件;评价预报

**中图分类号:**TV211.12 **文献标识码:**A

## Numerical Simulation Study of Groundwater in North River of Jiamusi City

LI Qin<sup>1</sup>, ZHENG Yong-sheng<sup>2</sup>, LIU Lian-cheng<sup>2</sup>

(1. Jiamusi Branch Station of Heilongjiang Province Geological Environmental Monitoring Head Station, Jiamusi 154002, China; 2. College of Applied Technology, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Using the reality data of hydrological prospecting of sources amount of groundwater in north river of Jiamusi City, the paper makes an evaluation and forecast to groundwater resources in the area through numerical simulation. The primary steps are summary of hydrological model, the building up and solution of mathematics model, the correcting of model, the verify and forecast of model. With a long-range accumulation of groundwater observation material through practice certification, numerical simulation method is a fast and effective method to evaluate groundwater resources, it has fixed guiding sense to evaluate and forecast to groundwater resources in the area.

**Key words:** numerical simulation; groundwater; mining condition; evaluate and forecast

近十几年来,随着佳木斯市用水量的不断增加,地下水资源被大量开采,造成佳木斯市地下水水位逐年下降,地下水资源量急剧减少,为了满足城市发展的需要,拟在远离城区的松花江北岸建一特大型供水水源地。水源地勘探面积 71 km<sup>2</sup>,设计开采量为 22 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d。拟建水源地紧依松花江,为傍河型水源地。依据水源地类型和具体水文地质条件,在取得各项水文地质参数的基础上,采用有限单元数值模拟法对该区地下水允许开采资源进行评价与预报<sup>[1]</sup>。

### 1 水文地质模型的概化

在工作区 1:10 000 勘探面积(71 km<sup>2</sup>)的基础

收稿日期:2008-10-15;修订日期:2008-10-27

基金项目:黑龙江省计划委员会计划项目((2000)1086)

作者简介:李 勤(1968-),女,黑龙江佳木斯人,工程师,主要从事水文地质、工程地质、环境地质调查与监测工作。

上,除去北部边界处小部分面积,选定的计算面积为 49.72 km<sup>2</sup>,其具体形状及三角剖分图见图 1。

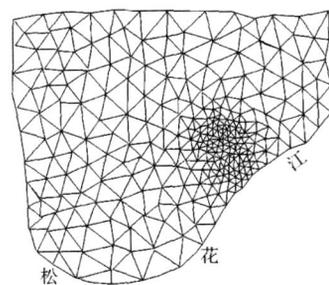


图 1 计算区三角剖分图

Fig. 1 Picture of trigonometric cut apart in the calculating area

因计算区位于松花江漫滩区,除南边界(松花江)为一类边界外,其余边界均概化为二类边界;西、北部边界为地下水主要径流补给边界,概化为流量边界<sup>[2]</sup>。

计算区的底边界为侏罗系泥岩,概化为隔水边界,顶部有降水、灌溉水及渠道水的渗入补给,而非

补给期又通过蒸发排泄地下水。

以上为计算区的主体边界条件。

计算区的内部结构为非均质各向同性的潜水含水层,局部可视为均质。其地下水水力坡度较缓,含水层厚度大,开采降深小,地下水为层流运动且为平面二维流。根据上述水文地质模型的概化,可以建立相应的数学模型。

### 2 数学模型的建立及其解法

#### 2.1 数学模型的建立

根据水文地质模型,计算区地下水水流数学模型为非均质各向同性的潜水平面流、非稳定流数学模型<sup>[3]</sup>。即

$$\frac{\partial}{\partial K} \left[ K(H - B) \frac{\partial H}{\partial X} \right] + \frac{\partial}{\partial Y} \left[ K(H - B) \frac{\partial H}{\partial Y} \right] + \sum_{i=1}^n Q_i (x - x_i)(y - y_i) = \mu \frac{\partial H}{\partial t}$$

$$H(x, y) |_{t=0} = H_0(x, y), (x, y) \quad D_2 t = 0$$

$$K(H - B) \frac{\partial H}{\partial n} |_{r_2} = -q(x, y, t), (x, y) \quad r_2$$

$$H(x, y, t) |_{r_1} = H_1(x, y, t), (x, y) \quad r_1$$

式中  $K, \mu$  分别为潜水含水层的渗透系数和给水度;  $H, H_0, H_1$  分别为潜水水位,潜水初始水位和一类边界水位;  $B$  为潜水含水层的底板标高;  $Q_i$  为点  $(x_i, y_i)$  处的水井开采量;  $W$  为含水层的源汇项(即地下水垂向补给量和除井孔开采量以外的各项消耗量);  $X, Y$  为计算区某点坐标;  $q(x, y, t)$  为二类边界单宽流量;  $t$  为计算时段;  $r_1, r_2$  为分别为为一类边界和二类边界;  $f$  为函数。

#### 2.2 数学模型的求解方法

上述模型采用有限单元法求解,对计算区  $D$  进行三角剖分和线性插值,应用迦辽金有限单元法把上述连续求解的数学模型离散成如下的常微分方程组,并与初始条件一起组成以  $H$  为未知量的方程组

$$\begin{cases} [A][H] + [D] \left\{ \frac{\partial H}{\partial t} \right\} = \{F\} \\ H(x, y, 0) = H_0(x, y) \end{cases}$$

将上式对时间取隐式差分,将其离散并整理成如下代数方程组

$$[B][H] = \{C\} \quad \text{其中 } [B] = [A] + \frac{1}{\Delta t}[D]$$

$$\{C\} = \{F\} + \frac{1}{\Delta t}[D][H] - \left[ [A] + \frac{1}{\Delta t}[D] \right]$$

式中  $[A]$  为导水矩阵;  $[A]$  为一类边界上的导水矩阵;  $[D]$  为储水矩阵;  $[D]$  为一类边界上的储水矩阵。

$$A_{i,j} = (b_i b_j + c_i c_j) k \tilde{H}$$

$$\tilde{H} = \frac{1}{3} [(H_i - B_i) + (H_j - B_j) + (H_k - B_k)]$$

式中  $b, c$  为三角形三顶点坐标表示的几何量。

$$b_1 = \frac{1}{2}(y_j - y_k), c_2 = \frac{1}{2}(x_k - x_1)$$

式中  $(x, y)$  为节点坐标;  $p$  为与  $ij$  关联的三角形个数;  $\Delta$  为三角形单元面积;  $\{F\}$  水量列阵;  $\{H_0\}$  为初始水位列阵;  $\{H_1\}$  为一类边界水位列阵;  $\{H\}$  待求水位列阵;  $\Delta t$  为时间步长。

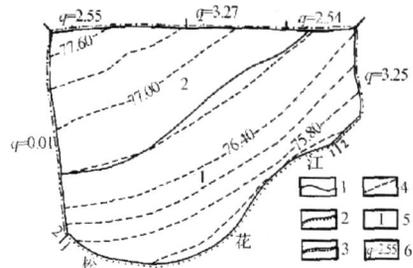
整个计算过程采用 Fortran77 语言编写程序,并在 IBM 系列兼容机上运行求解。

### 3 模型的校正

#### 3.1 基本数据

对计算区 49.72 km<sup>2</sup> 的面积进行三角形单元剖分,三角形单元总数为 560 个,其中最小单元面积为 0.002 7 km<sup>2</sup>,最大单元面积 0.396 3 km<sup>2</sup>;结点总数为 303 个,其中二类边界点 26 个,一类边界点 18 个。

根据区内现有的地下水位观测资料及水文、气象、农业开采量、农田灌溉等方面的资料,结合地下水位总体特征,对模型识别选取受天然因素影响较小的 2000 年 6 月 30 日至 7 月 10 日作为模型校正的时段。该时段的农业开采量是根据实际调查统计的结果,按时段将农业开采量分配到相应的单元上并计算其开采强度,地下水蒸发量、降水入渗量及灌溉水回渗量均为前期工作成果及本次野外试验取得的参数计算而得。依据本区具体水文地质条件,结合试验取得参数,将该区划分为 2 个参数分区(图 2),并给出了各分区的参数初值。



1—参数分区界线 2—一类水位边界 3—二类流量边界  
4—含水层底板等值线 5—参数分区号 6—二类边界单宽流量(m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d)(等值线单位:m)

图 2 水文地质概念模型图

Fig. 2 Picture of hydrological concept

#### 3.2 校正结果

经校正微分方程和边界条件正确,其拟合程度较高,在 303 个结点水位计算值与实测值的绝对误差 < 0.5 的占 93%。曲线的拟合情况见图 3。

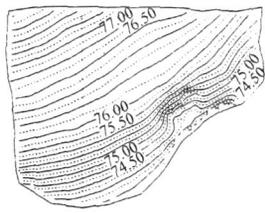


图3 识别第一时段末流场拟合图(2000年7月2日)

Fig. 3 Flow field function of the first time stage end of distinguish (July 2 of 2000)

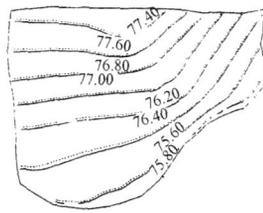


图4 验证第四时段末流场拟合图(2000年10月31日)

Fig. 4 Flow field function of the fourth time stage end of verify (Oct. 31, 2000)

#### 4 模型的验证

模型的验证时段为2000年7月至10月31日,分4个时段来验证校正后的数学模型的可靠性。其中农业开采量、天然排泄量及补给量等数据均通过统计、试验取得。

模型验证结果采用反映梯度场变化的曲线及反映降深场变化的拟合曲线验证(图4、表1及图5)。

由图、表显示,无论在点上还是面上,水位拟合都较理想,拟合误差达到国家标准<sup>[4]</sup>(GB/J14497-93)、《地下水资源管理工作要求》中对数值模型拟合误差精度的要求,故所建立的地下水数学模型完全可以用于地下水位预报。

表1 验证阶段观测孔水位拟合表

Table1 Observation hole water level function of verify stage

第一时间段				第二时间段			
节点	计算水位 / m	实测水位 / m	拟合误差 / m	节点	计算水位 / m	实测水位 / m	拟合误差 / m
14	74.950	75.200	- 0.250	14	75.562	75.860	- 0.298
181	75.746	75.760	- 0.014	181	76.033	76.150	- 0.117
47	74.761	74.720	0.041	47	75.540	75.550	- 0.010
138	76.309	76.420	- 0.111	138	77.103	76.970	0.133
215	77.081	76.920	0.161	215	77.521	77.500	0.021

第三时间段				第四时间段			
节点	计算水位 / m	实测水位 / m	拟合误差 / m	节点	计算水位 / m	实测水位 / m	拟合误差 / m
14	75.824	75.650	0.174	14	75.568	75.490	0.078
181	76.221	76.460	- 0.239	181	76.072	76.460	- 0.388
47	75.870	75.520	0.350	47	75.553	75.210	0.343
138	77.005	77.130	- 0.125	138	76.836	77.320	- 0.484
215	77.770	77.790	- 0.020	215	77.615	77.960	- 0.345

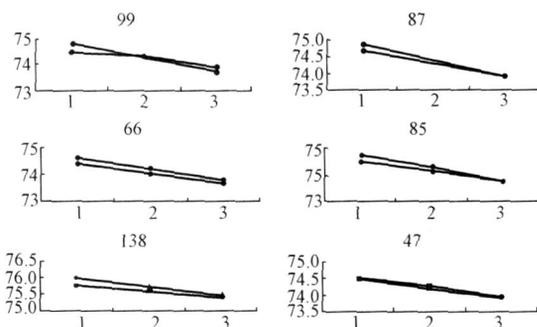


图5 验证阶段观测孔水位拟合图

Fig. 5 Observation hole water level function of verify stage

## 5 预报

### 5.1 拟定预报方案<sup>[5]</sup>

依据地下水补给条件,井间干扰程度和气象、水文等综合因素,拟定如下两种开采方案:

(1) 在已施工的探采结合井基础上,按需水量要

求,13眼井组成上、下干扰井组。此外,新设6组干扰井组,总开采量为  $22 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,预报从2000年11月到2011年4月水位及流场变化趋势。

(2) 在一方案基础上,部分井成单井,总开采量仍为  $22 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

### 5.2 预报阶段资料处理

#### 5.2.1 初始流场与预报时段<sup>[6]</sup>

根据多年动态观测资料分析,该区高水位期一般出现在每年的10月份,低水位期出现在4月份。故选择2000年10月31日的水位作为初始流场,0.5a做为一个时段,即从2000年10月31日到2001年4月30日为第一时段,再从2001年的5月1日到2001年10月31日为第二时段,依此类推,直到2011年4月30日共21个时段。

#### 5.2.2 边界条件的处理<sup>[7]</sup>

第一类边界的处理,是利用实测动态资料推出;第二类边界分两种情况处理,原排泄边界因受开采

影响转化为补给边界,原补给边界流量以调参时的基数,考虑到未来开采降深加大会影响到边界,其边界降深、补给量均采用断面法计算给出。

5.2.3 源汇项处理

降水量采用历史降水量系列重现法,选择了1971~1980年降水量为偏小系列,以提高开采量保证程度。潜水蒸发量因开采后地下水的下降已超过本区潜水蒸发量临界深度,故该项视为零。

农业开采量、灌溉入渗量等因年际变化不大,均视为常数。

5.3 预报成果

第一方案开采时段地下水逐渐下降,在第十一时段(第五年)开采流场趋于稳定,中心水位降为9.83 m,见图6。

第二方案预报结果也是在第十一时段(即第五年)开采流场趋于稳定,中心水位降为9.48~9.55 m。

结合水资源均衡计算结果,据开采条件下补给量计算<sup>[8]</sup>,降水入渗量和侧向径流等补给量约10 ×

10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,开采条件下,水源地开采后水位下降约10 m。流场改变,江水位高于地下水位,初步估算开采条件下江水补给量可达20 ×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d以上。仅占江水枯水期流量的3%,当水源地运行5 a之后,开采漏斗中心地下水位达基本稳定,且无论丰水期还是枯水期都出现正均衡(表2、表3),说明补给有保障,建新水源地可行。

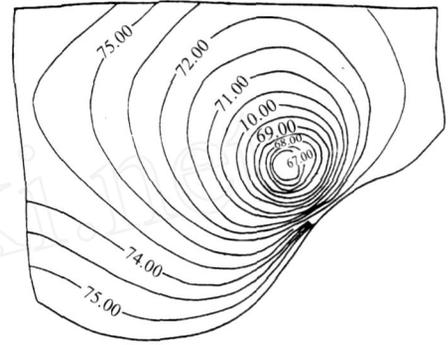


图6 第一方案预报第十一时段末水位流场图  
Fig.6 Water level flow field picture of the eleventh time stage end of the first plan forecast

表2 预报阶段第十一时段水量均衡表

Table 2 Capacity for water balanced table of the eleventh time stage of forecast stage

方案	补给量 $Q_{补} / m^3 \cdot d^{-1}$			消耗量 $Q_{消} / m^3 \cdot d^{-1}$				开采量 $Q_{开} / m^3 \cdot d^{-1}$	$\mu F - \frac{H}{t}$
	$Q_{降}$	$Q_{侧}$	$Q_{河}$	$Q_{灌}$	$Q_{蒸}$	$Q_{农}$	$Q_{出}$		
一	0	51 346.16	198 738.71	0	0	0	0	223 865.00	+26 219.87
二	0	51 346.16	206 688.26	0	0	0	0	224 457.80	+33 576.62

表3 预报阶段第十二时段水量均衡表

Table 3 Capacity for water balanced table of the twelfth time stage of forecast stage

方案	补给量 $Q_{补} / m^3 \cdot d^{-1}$			消耗量 $Q_{消} / m^3 \cdot d^{-1}$				开采量 $Q_{开} / m^3 \cdot d^{-1}$	$\mu F - \frac{H}{t}$
	$Q_{降}$	$Q_{侧}$	$Q_{河}$	$Q_{灌}$	$Q_{蒸}$	$Q_{农}$	$Q_{出}$		
一	16 454.40	52 948.69	238 486.45	35 696.51	0	59 950.20	0	223 865.00	+59 770.85
二	16 454.40	52 948.69	258 360.32	35 696.51	0	59 950.20	0	224 457.80	+79 051.92

6 结 语

通过前述水文地质模型的概化<sup>[9]</sup>、数学模型的建立及其解法、模型的校正、模型的验证,可见用数值模拟地下水资源是最佳方法,其值完全可以满足精度要求。

参考文献:

[1] 文再弼,李丽英,左力军,等.黑龙江省佳木斯市江北水源地水文地质勘探报告[R].佳木斯:黑龙江省地质环境监测总站佳木斯分站,2002.  
[2] 薛禹群.地下水动力学[M].北京:地质出版社,2003.39-45.

[3] 孙讷正.地下水流的数学模型和数值方法[M].北京:地质出版社,1981.126-190.  
[4] 《供水水文地质手册》编写组.供水水文地质手册(第三册:地下水资源评价)[K].北京:地质出版社,1990.385-449.  
[5] 薛禹群,谢春红.水文地质学的数值法[M].北京:煤炭工业出版社,1980.  
[6] 李俊亭.地下水数值模拟[M].北京:地质出版社,1989.  
[7] 陈崇希,唐仲华.地下水流动问题的数值方法[M].武汉:中国地质大学出版社,1990.  
[8] 罗焕炎,陈雨孙.地下水运动的数值模拟[M].北京:中国建筑工业出版社,1988.  
[9] 李竞生.含水层参数识别方法[M].北京:地质出版社,2003.