

地下水数值模拟计算与预测

郭锐

(辽宁省水文局, 沈阳 110003)

摘要: 为了保障阜新地下水的开采量能够满足阜新供水的需求, 针对阜新凌河地下水状况进行了预测。以阜新凌河地下水源地为例, 建立地下水流数学模型, 运用该模型对地下水流系统进行预测。应用 GMS 软件, 用有限差分法的 MODFLOW 程序进行求解。在 1 方案总计 6.42 万 m^3/d 和 2 方案总计 8.42 万 m^3/d 的开采情景下, 分别预测 2015 年阜新凌河地下水状况。结果表明所建立的数学模型能够较为真实地刻画研究区地下水系统的特征, 仿真性强。从而得出文中所提出的两种方案均可行。

关键词: 凌河; 地下水; 数值模拟计算; 开采预测

中图分类号: TV211.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)02-0295-04

Numerical Simulation and Prediction of Groundwater Sources

GUO Rui

(Hydrological Bureau of Liaoning Province, Shenyang 110003, China)

Abstract: In order to guarantee the quantity of groundwater exploitation to meet the demand for the water supply of Fuxin, Ling River groundwater condition in Fuxin was predicted. Groundwater source area of Ling River was set as an example, a groundwater flow model was used to predict groundwater flow system. It was solved using the finite difference method modflow program of applying GMS software. Under a programs of 64 200 m^3/d and the program of 84 200 m^3/d mining scenarios groundwater conditions of Ling River in Fuxin were predicted in 2015. The results show that the mathematical model can more realistically describe the characteristics of groundwater systems, and the simulation is strong. We can come to a conclusion that the proposed two schemes are feasible based on the prediction results.

Keywords: Ling River; groundwater; numerical simulation; mining prediction

大凌河是辽宁省沿渤海西部的河流, 发源于建昌县, 流经朝阳、北票、义县等市县, 流域面积 23 837 km^2 , 河长 397 km。流域 97% 的面积处于辽西低山丘陵区, 荒山秃岭, 水土流失严重, 河流含沙量大, 气候干旱, 是辽宁省内严重的资源性缺水地区, 且暴雨集中, 洪水来时陡涨陡落。通过查阅相关资料得知^[1], 研究区内的含水层主要有: 全新统冲洪积砂砾石孔隙潜水含水层、上更新洪冲积砂砾石承压含水层和层状岩类裂隙水。

为了满足阜新市需水的要求, 现需要对现有 1 号水源井渗渠进行改造, 以增加 1 号水源井供水量; 在义县铁路桥至锦阜高速公路桥之间新建 2 处水源井, 其中一处拟在铁路下游 600 m 新建 2 水源、另一处在锦阜高速公路桥上游 550 m 新建 3 水源, 新建及改造

的水源达到满足向凌河水源地一泵站供水条件要求, 供水能力达到 6 万 m^3/d 。为了保障地下水开采量的可行性, 需要对凌河地下水状况进行预测。

1 水文地质概念模型

水文地质概念模型是根据建模的目的, 简化实际水文地质条件并组织相关数据, 以便能够分析地下水系统, 为建立地下水流数值模型提供依据^[2]。通过对研究区水文地质条件的概化, 确定模型的范围和边界条件、水文地质结构、地下水流场、水文地质参数与源汇项, 为建立地下水数值模型奠定基础。本次数值模拟采用 GMS 软件, 用有限差分法的 MODFLOW 程序求解。

1.1 研究区范围

研究区位于义县大凌河河谷平原区, 北侧西起万

佛堂以东、经双台子—头沟屯—红墙子—平房子、东至星星屯；南侧西起四方台、经前五里南—八家子、东至西地沟，东西长约 18.5 km、南北长约 8 km；为一个完整的河谷平原水文地质单元，面积 122 km²。

1.2 含水层结构概化

根据区内水文地质调查情况，第四系含水层为研究对象，第四系厚度 3~14 m，研究区地下水总的径流方向是沿着大凌河方向自西向东。地下水在多孔介质中的流动符合质量守恒定律和达西定律；本次模拟只考虑上层第四系含水层，忽略垂向水量交换，故将该区地下水运动概化为平面二维流；由于介质的非均匀性造成水文地质参数随空间变化，体现了系统的非均质性，因而可概化为非均质、各向同性含水层。

表 1 研究区边界条件

边界分段号	边界性质	说明
AB	补给边界(二类边界)	大凌河河床潜流经过此边界补给研究区
BC,DE,FG,HI,JA	隔水边界(二类边界)	第四系地层与山区基岩交界处
CD,GH,IJ	补给边界(二类边界)	支流河谷补给研究
EF	排泄边界(二类边界)	大凌河河床潜流经过此边界排泄出研究区

2 地下水流数学模型及求解

2.1 地下水流数学模型

根据水文地质概念模型，将研究区地下水流系统概化为非均质、各向同性、二维、潜水非稳定地下水流系统^[3]，运用式(1)进行计算：

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(T \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}(T \frac{\partial H}{\partial y}) + w = S \frac{\partial H}{\partial t} & \text{在 } \Omega \text{ 上} \\ H(x, y, 0) = H_0(x, y) & t=0, (x, y) \in \Omega \\ H(x, y, t) |_{r_0} = q(x, y, t) & t \geq 0, (x, y) \in \Gamma_1 \\ T \frac{\partial H}{\partial n} |_{r_2} = q(x, y, t) & t \geq 0, (x, y) \in \Gamma_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中： H_0 ——水头初始值(m)； ∂ ——第一类边界 Γ_1 上的已知函数； q ——第二类边界 Γ_2 上的单位宽度侧向径流量(m²/d)； n ——边界 Γ_2 的外法线方向； T ——导水系数(m/d)； S ——贮水系数； w ——单位时间在垂向从单位体积含水层中流入或流出的水量(m³)，包括，降水入渗补给地下水量和位于相应单元的抽、水量。

2.2 数学模型的求解

本次地下水数值模拟采用了当前国际上利用较广的 GMS 软件。GMS(Groundwater Modeling System) 是美国 Brigham Young 大学环境模拟研究实验室开发的先进的、基于概念模型的地下水环境模拟软件。GMS 全面包括了模拟地下水流每一个阶段所需的工

因此将评价区含水系统概化为非均质各向同性、平面二维非稳定流地下水模型。

1.3 研究区边界条件概化

垂向边界：上部边界为潜水面，是位置不断变化的水量交换边界，有降水入渗和人工开采等；下部以白垩纪砂岩作为隔水底板，概化为隔水边界。

侧向边界：AB, EF 为大凌河河谷平原区边界，概化为定流量边界，AB 边界接受研究区外的地下潜流，为入流边界，研究区范围内地下水经过 EF 边界，以地下潜流形式排出研究区，EF 为出流边界；CD, GH, IJ 为支流河谷平原与大凌河干流河谷平原交接处，概化为定流量边界，均为入流边界；BC, DE, FG, JA 为第四系地层与山区基岩交界处，概化为零流量边界(表 1)。

具，如边界概化、建模、后处理、调参、可视化^[4]。

运用基于有限差分法的 modflow 程序求解以上微分方程的定解问题。根据评价区水文地质结构和源汇项的特征，选择 MODFLOW 中相应的子程序包来实现地下水流的模拟。

2.3 空间离散

计算区面积为 122 km²，利用 GMS 的 3 D GRID 模块实现网格剖分。共剖分矩形网格单元 2 684 个，每个单元个面积 195 m×235 m。模拟期为 2011 年 1 月 1 日—2012 年 4 月 30 日，以 1 天为 1 个应力期，1 天 1 个时间步长。2012 年 5 月 1 日—2015 年 12 月 31 日为预测期，1 个月为 1 个应力期，1 天 1 个时间步长。初始水位流场采用 1 月 1 日水文观测数据，对比流场采用 4 月 20 日实测值。

2.4 水文地质参数分区及初值的确定

用于地下水流模型的水文地质参数主要有两类，一类是用于计算各种地下水补排量的参数和经验系数，如大气降水入渗系数；另一类是含水层的水文地质参数，主要包括潜水含水层的渗透系数和给水度^[5]。

本次计算所采用的参数有渗透系数、给水度、降水入渗系数等参数，主要是根据区内勘察和现有资料确定，根据参数分布规律和渗流场特征，对各项参数进行分区。

降水入渗系数的大小与包气带岩性、地下水埋深、降水量、降水强度、降水前土壤含水量、地形地貌、

地面植被等因素有关^[6],前两者起主导作用。通过对这些因素分析,将研究区分为 4 个降水入渗分区。分区 2 为大凌河河漫滩地段,地下水埋深浅、地表岩性粗降水入渗系数稍大,取值 0.25~0.3;分区 1 与分区 3 为河流阶地降水入渗系数较分区 1 稍小,分区 1 地面坡度较分区 3 大,因此分区 3 降水入渗系数取值较分区 1 稍大,分区 1 系数取值 0.18~0.22,分区 3 取值 0.2~0.25;分区 4 为义县县城范围,为硬覆盖区,降水入渗系数最小,取值 0.15~0.18。

渗透系数与给水度是通过抽水试验资料计算得到,参考已有评价结果^[7],结合各种岩性的经验渗透系数值,综合确定各计算分区渗透系数及给水度的大致取值范围。

表 2 渗透系数与给水度初值

分区名	渗透系数/(m·d ⁻¹)	给水度
分区 1	50~80	0.08~0.12
分区 2	140~180	0.1~0.15
分区 3	180~365	0.15~0.2
分区 4	140~180	0.1~0.15
分区 5	80~120	0.1~0.15
分区 6	50~70	0.05~0.1
分区 7	50~70	0.1~0.15
分区 8	5~20	0.05~0.1

2.5 研究区源汇项的确定

研究区孔隙含水层主要接受河道渗漏补给、地下径流侧向补给、降水入渗补给^[8];地下水主要消耗于人工开采和地下水侧向径流排泄,由于研究区潜水蒸发微弱,忽略潜水蒸发量计算。

1) 河流渗漏补给量。天然条件下,河流侧向补给量随年份和丰枯季节变化。在模型处理时将其概化为 RIVER 边界,水位根据义县水位站监测数据差值确定,模型 RIVER 模块自动计算地表水与地下水的水力联系强度,河流渗漏补给量采用达西定律由模型自动识别计算。

2) 地下水侧向补给量。根据达西定律,各个流量边界段侧向径流量按如下公式计算:

$$Q_c = K \cdot I \cdot B \cdot M \cdot \Delta T \quad (2)$$

式中:Q_c——地下水侧向径流量(10⁴ m³/a);K——含水层渗透系数(m/d);I——水力坡度;B——断面宽度(m);M——含水层厚度(m);ΔT——计算时间(d)。

根据公式(2),依据动态观测资料确定边界流量随时间的变化趋势,根据不同时期流场选取各段的水力梯度,根据给定的水文地质参数初值,计算给定时间变化的侧向补给(排泄)量。

3) 降水入渗补给量:降水入渗补给是本区地下水的重要补给源,其入渗量与降水量、潜水水位埋深和包气带岩性有关。降水入渗补给量的计算采用公式:

$$p_r = p \cdot \alpha \cdot F \times 10^{-1} \quad (3)$$

式中:p_r——降水入渗补给量(万 m³);p——降水量(mm);α——降水入渗补给系数(无因次);F——计算区计算面积(km²)。

模型中,以日降水量按照不同分区,不同降水入渗系数以 Recharge 的形式面状补给地下水。

4) 地下水开采量:扣除丰安用水 80 万 m³/a,合计取水 1 525.1 万 m³/a,折成日量为 41 784 m³/d。

5) 地下水侧向排泄量:计算方法同地下水侧向补给量。

6) 水位、降水量采用义县水文站数据。

2.6 数学模型的识别和验证

由于对目的层的水文地质条件有比较清楚的认识,各水文地质参数初值范围也比较客观,通过细致的调参拟合,模型识别取得了较好的结果,参数识别结果见下表。计算流场与识别流场基本相同。

表 3 降水入渗系数识别结果

分区名	降水入渗系数
分区 1	0.18
分区 2	0.25
分区 3	0.20
分区 4	0.15

表 4 渗透系数与给水度识别结果

分区名	渗透系数/(m·d ⁻¹)	给水度
分区 1	50	0.10
分区 2	150	0.13
分区 3	365	0.18
分区 4	150	0.15
分区 5	100	0.1
分区 6	50	0.08
分区 7	60	0.13
分区 8	10	0.08

2.7 模拟计算区地下水可动用的储存量的计算

按照区域水文地质条件,模拟计算区含水层厚度一般为 3~5 m,计算分区给水度在 0.08~0.18 之间,模拟计算区面积为 122 km²,用以下公式进行计算:

$$W = 1/3 \times h \times \mu \times F \quad (4)$$

式中:W——地下水可动用的储存量(m³);h——地下水水面以下含水层厚度(m);μ——区域给水度;F——计算面积(m²)。

含水层厚度采用 4 m, 给水度采用 0.16, 计算得模拟计算区地下水可动用的储存量为 2 603 万 m^3 。

2.8 地下水状况预测

由于研究区渗透系数较大, 水源区开采主要是袭夺地表径流量, 河道水是控制研究区地下水可开采量的主要因素, 在义县站 95% 水位 (59.42 m) 保证率下, 按连续枯水年降雨情况对水源井不同开采条件下, 对研究区地下水状况进行预测。

2.8.1 地下水状况预测开采 1 方案 现状 3、4 号井关闭, 现状 2 号井开采 0.42 万 m^3/d 、改 1 井开采 1.4 万 m^3/d 、新 2 井 1.9 万 m^3/d 、新 3 井 2.7 万 m^3/d , 总计 6.42 万 m^3/d 的开采情景下, 预测 2015 年研究区地下水状况。

按照预报方案采用非稳定流模型进行模型模拟, 可以得出研究区 2015 年汛期与非汛期地下水水流场演变趋势。在方案 1 条件下, 研究区范围内, 在新 3 井与现 2 井附近形成了漏斗区, 但是漏斗区面积很小, 汛期 (6—9 月) 0.2 km^2 漏斗最大直径 585 m, 非汛期 (10—4 月) 0.24 km^2 漏斗最大直径 780 m, 降深小于 1.0 m, 说明新井开采对研究区地下水动态的影响不大。整体上枯水期地下水水位较丰水期略有下降, 但是下降不明显, 说明降水不是研究区地下水的主要补给源, 侧向入流与河道渗漏控制着研究区的地下水补给。

在方案 1 条件下, 汛期河道渗漏量 78 441 m^3/d , 占总开采量的 74.0%, 需袭夺河水 0.908 m^3/s 。非汛期河道渗漏量 91 011 m^3/d ; 占总开采量的 85.9%, 需袭夺河水 1.053 m^3/d 。年内水均衡量为 -1 979 m^3/d , 为负均衡, 年均量为 72.2 万 m^3 , 可见区内补给量小于消耗量, 需动用储存量 (按可动用储存量的 60% 计算), 年均量仅占可动用储量的 4.6%。可见区内水源地取水 6.42 万 m^3/d 是可行的。

2.8.2 地下水状况预测开采 2 方案 新建 2、3 号井与改 1 号井以设计流量开采, 即, 改 1 井开采量 1.4 万 m^3/d 、新 2 井 1.9 万 m^3/d 、新 3 井 2.7 万 m^3/d 、现状 2 号井开采量 0.42 万 m^3/d , 现状 3、4 号井以原有开采量 1 半开采, 即: 现 3 井开采 1.2 万 m^3/d 、现 4 井 0.8 万 m^3/d 。总计 8.42 万 m^3/d 的开采情景下, 2015 年研究区地下水状况。

按照预报方案采用非稳定流模型进行模型模拟, 可以得出研究区 2015 年汛期与非汛期地下水水流场演变趋势。在方案 2 条件下, 新 3 号井与现 2 井范围形成漏斗, 漏斗面积汛期 (6—9 月) 0.18 km^2 漏斗最大直径 580 m, 非汛期 (10—4 月) 为 0.33 km^2 , 漏斗最大直径 877 m, 降深小于 1.0 m; 现 3 井附近虽然没有

形成闭合漏斗, 但是开采区降深加大, 有形成漏斗的趋势。整体上枯水期地下水水位较汛期略有下降, 但是下降不明显。

汛期河道渗漏量 84 561 m^3/d , 占地下水实际开采量 67.1%, 需袭夺河水 0.979 m^3/s ; 非汛期河道渗漏量 99 313 m^3/d , 占地下水实际开采量 78.8%, 需袭夺河水 1.149 m^3/s 。年内水均衡量为 -2 981 m^3/d , 为负均衡, 年均量为 108.8 万 m^3 , 可见区内补给量小于消耗量, 需动用储存量, 年均量占可动用储量的 4.2%。可见区内水源地取水 8.42 万 m^3/d 是可行的。

3 结论

通过对地下水计算流场和流场的拟合统计分析, 说明含水层结构、边界条件概化、水文地质参数的选取及源汇项的选取的是合理的, 所建立的数学模型较为真实地刻画了研究区地下水系统的特征, 仿真性强, 可以运用该模型进行地下水流系统的预测。

本文为了保障阜新地下水的开采量能够满足阜新供水的需求, 针对阜新凌河地下水状况进行了预测。由于研究区渗透系数较大, 水源区开采主要是袭夺地表径流量, 河道水是控制研究区地下水可开采量的主要因素, 在义县站 95% 水位 (59.42 m) 保证率下, 按连续枯水年降雨情况对水源井不同开采条件下, 对阜新凌河 2015 年地下水状况进行预测, 从而得出两方案可见区内水源地取水 6.42 万 m^3/d 和可见区内水源地取水 8.42 万 m^3/d 均是可行的。

参考文献:

- [1] 贾金生, 田冰, 刘昌明. Visual MODFLOW 在地下水模拟中的应用[J]. 河北农业大学学报, 2003, 26(2): 71-78.
- [2] 马驰, 石辉, 卢玉东. MODFLOW 在西北地区地下水资源评价中的应用[J]. 干旱区资源与环境, 2006(2): 89-93.
- [3] 丁元芳, 迟宝明, 易树平, 等. Visual MODFLOW 在李官堡水源地水流模拟中的应用[J]. 水土保持研究, 2006, 13(5): 99-102.
- [4] 王金生, 王长申, 滕彦国. 地下水可持续开采量评价方法综述[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 525-533.
- [5] 李勤奋, 方正. 上海市地下水可开采量模型计算及预测[J]. 上海地质, 2000(2): 36-43.
- [6] 魏鸿. 开封市地下水资源供求预测研究[J]. 地下水, 2001, 23(4): 168-169.
- [7] 赵凤双. 地下水开采量与可开采量探析[J]. 农业与技术, 2008, 27(5): 97-97.
- [8] 师幸生. 太原市地下水开采量控制目标探讨[J]. 山西水利, 2008, 24(4): 21-23.