

# 哈密盆地多层含水系统地下水流数值模拟

胡宏韬,林学钰 ( 长春科技大学,吉林 长春 130026)  
蔡青勤,姜 军 ( 新疆地矿局第二水文队,新疆 昌吉 831100)

**摘要:**对具有多层含水结构的哈密盆地地下水系统,提出了一类考虑弱透水层弹性释水作用的地下水流耦合数学模型。利用实际资料的数值模拟结果表明,与忽略弱透水层弹性释水作用的数学模型相比,其精度提高、更符合实际的水文地质条件,为定量评价多层越流系统地下水资源提供了一种实用可靠的数值方法。  
**关 键 词:**越流;弱透水层;弹性释水;数值模拟  
**中图分类号:**P641.2      **文献标识码:**A

## 1 引言

山前冲洪积扇、溢出带和冲洪积平原含水层系统是组成西北地区地下水盆地最基本的水文地质单元。在盆地中存在着山前大厚度潜水含水层和平原区潜水、承压水多层结构越流含水层系统。如何概化和建立合理可靠的水文地质概念模型和数学模型,是该区地下水资源评价中最基本但又十分复杂的问题。对此类多层含水层越流系统,常用的耦合建模方法是将弱透水层视为上、下含水层的越流通道,而忽略弱透水层弹性释水作用<sup>[1,2]</sup>,本文以哈密盆地为例,通过对实际资料的分析和研究,提出了一类考虑弱透水层弹性释水作用的多层越流系统地下水流耦合数学模型,并用有限元法进行了数值模拟。

## 2 水文地质条件概述

哈密盆地为一新生代的构造凹陷带,新生代地层广泛分布。区内第四系潜水含水层分布于区内北部,面积约 200 km<sup>2</sup>。岩性为卵砾石、砂砾石,厚度 50~100 m,渗透系数 60~70 m/d,导水系数 4 300~6 500 m<sup>2</sup>/d。第四系多层结构承压含水层分布于区内南部,含水层岩性为砂砾石、砂及粘性土互层,厚度为 15~60 m,渗透系数 12~50 m/d,导水系数 320~4 500 m<sup>2</sup>/d。下伏第三系含水层岩性为砂砾岩、砂岩,含水层总厚度为 30~50 m,导水系数 340~760 m<sup>2</sup>/d。在第三系承压含水层顶部分布有厚约 5~70 m 的弱透水层,岩性为泥岩、含砾泥岩。勘探

资料表明,第四系地下水与第三系地下水水力联系密切,越流关系明显,在集中开采区尤为如此。

## 3 数学模型和数值方法

对具有多层结构的越流系统,概化建模时,应将其视为一个整体流动系统来考虑,可把含水层中的地下水流动视为水平二维流动,而将弱透水层内的水流视为一维垂向流动。

### 3.1 数学模型的建立

根据上述水文地质条件特征,可将该区含水层系统概化为三层结构,即上层由区内北部的第四系孔隙潜水和南部的孔隙承压水混合组成透水性较强的第四系含水层;下层为透水性相对较弱的第三系承压含水层,上、下层之间通过弱透水层越流作用产生水力联系<sup>[3]</sup>。考虑弱透水层弹性释水作用时,可建立区内地下水越流系统的耦合数学模型。

#### 3.1.1 上、下含水层

$$\left\{ \begin{aligned} & -\frac{\partial}{\partial x} \left[ (T_1 \cos^2 \theta + T_2 \sin^2 \theta) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \\ & 2 \frac{\partial}{\partial x} [(T_1 - T_2) \sin \theta \cos \theta \frac{\partial h}{\partial y}] + \\ & -\frac{\partial}{\partial y} [(T_1 \sin^2 \theta + T_2 \cos^2 \theta) \frac{\partial h}{\partial y}] + V + W = E \frac{\partial h}{\partial t} \\ & x, y \in G, t \geq 0, \\ & h(x, y, 0) = h_0(x, y) \quad x, y \in G, \\ & h(x, y, t)|_{\text{轴}} = h_1(x, y, t) \quad x, y \in \text{轴}, t \geq 0, \\ & (T_1 \cos \theta_{\alpha} + T_2 \sin \theta_{\beta}) \frac{\partial h}{\partial x} + (T_1 \sin \theta_{\alpha} + T_2 \cos \theta_{\beta}) \frac{\partial h}{\partial y} |_{\text{轴}} \\ & = -q(x, y, t) \quad x, y \in \text{轴}, t \geq 0, \end{aligned} \right.$$

式中:  $T_1 = T_{\text{承压1}}$  (承压区),  $T_1 = K_1(h - B)$  (潜水区);  $T_2 = T_{\text{承压2}}$  (承压区),  $T_2 = K_2(h - B)$  (潜水区);  $h$  为上、下含水层的水头函数,  $B$  为潜水含水层底板标高;  $E = \mu^*$  (承压区),  $\mu$  (潜水区);  $V = V_1$  (上层),  $V_2$  (下层),  $V_1, V_2$  分别为弱透水层流入上、下层的渗透速度(越流强度);  $W$  为源汇项;  $K_1, K_2$  分别为最大主渗透系数和最小主渗透系数;  $T_{\text{承压1}}, T_{\text{承压2}}$  分别为最大主导水系数和最小主导水系数;  $\theta$  为最大主渗透方向的方向角;  $n_x, n_y$  分别为  $x, y$  方向的单位向量; 轴、轴 分别为一类和二类边界;  $G$  为渗流区;  $q$  为单宽流量。

3.1.2 中间弱透水层

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial z}(K \frac{\partial H}{\partial z}) = \mu \frac{\partial H}{\partial z}, \\ H(x, y, z, t) \big|_{z=0} = H_0(x, y, z), \\ K \frac{\partial H}{\partial z} = -V_1(x, y, t) \text{ (在弱透水层顶)}, \\ K \frac{\partial H}{\partial z} = V_2(x, y, t) \text{ (在弱透水层底)}, \end{cases}$$

式中  $H$  —— 弱透水层水头;  
 $H_0$  —— 弱透水层初始水位;  
 $K$  —— 弱透水层的渗透系数;  
 $\mu$  —— 弱透水层单位弹性给水度;  
 $z$  —— 弱透水层垂向坐标。

对于中间层弱透水层, 其弹性释水作用主要发生于开采层与弱透水层中的水头降速大的时期, 如集中开采区的开采前期, 此时的水头降速较大, 越流量主要是弱透水层中的释放量; 随着开采时间的增大, 开采层与弱透水层中的水头降速越来越小, 弱透水层的弹性释放量也越来越小, 所以开采后期的越流量主要是补给层中的越流量, 说明了中间层弱透水层的弹性释水具有时变性。

3.2 数学模型的求解

对于上述多层含水系统的数学模型, 可将模型 (I) 中上、下含水层, 通过模型 (II) 耦合构成一个描述多层含水系统完整的数学模型。具体可用 Galerkin 有限元法将上述偏微分方程定解问题离散求解<sup>[4]</sup>, 其中对弱透水层数学模型的定解问题采用一维有限无法处理; 对于上、下含水层的定解问题采用三角形单元法计算; 即用 Galerkin 有限元法构造基函数、形成 Galerkin 有限元的基本方程, 可得其矩阵表达形式如下:

$$[G] \{H\} + [S] \{dH/dt\} = \{E\} + \{B\},$$

式中  $[G]$  —— 导水矩阵;  
 $\{H\}$  —— 未知水头列矩阵;  
 $[S]$  —— 储(给)水矩阵;

$\{dH/dt\}$  —— 结点水头对应于时间一阶导数的列矩阵;

$\{E\}$  —— 源汇项矩阵;

$\{B\}$  —— 边界列矩阵。

对此一阶常微分方程组, 将一阶导数有限差分化, 取全隐格式, 最后可得上述矩阵方程的全隐式格式:

$$([G] + C[S]) \{H^{t+\Delta}\} = \{SH\} + \{E\} + \{B\},$$

其中:  $\{SH\} = C[S] \{H^t\}$ ,  $C = 1/\Delta$ 。

在给定的初始条件和边界条件下, 可以计算出式中各个系数矩阵和向量, 然后逐时段求解各计算结点的水头值, 进而求解出各结点各时段的水头值。

4 数值模拟及结果分析

4.1 数值模拟

根据模拟区的水动力条件、含水介质特征及现状开采布局等, 将上、下含水层进行平面上三角形剖分, 全区上、下层共剖分 446 个结点, 786 个单元; 弱透水层对应上、下层剖分结点在垂向上剖分为 4 个线性单元, 5 个结点。根据含水介质特征及历次抽水试验资料, 将计算区划分为 26 个参数分区, 灌溉回渗、降雨入渗、开采强度、蒸发排泄及泉流排泄等也同时进行分区, 弱透水层划分为 15 个渗透系数分区。

模型识别选取 1996 年 8 月 5 日至 1997 年 4 月 5 日。应用统测水位的计算结果表明, 上、下层观测孔水位拟合误差的绝对值小于 0.5 m 的分别占总观测孔的 86.7% 和 85%, 计算水位与实测水位拟合的相对误差均小于 3%; 为验证识别的模型参数及边界条件的正确性, 用上述的反演参数和相应的数学模型, 再选用 1997 年 4 月 5 日至 1997 年 8 月 5 日的水位资料正演计算, 此时上、下层观测孔水位拟合误差的绝对值小于 0.5 m 的分别占总观测孔的 85% 和 80%, 计算水位与实测水位拟合的相对误差均小于 3.5%。计算点(计 223 个)、长观孔(计 60 个)拟合结果见表 1, 典型观测孔 G14、G47 水位拟合曲线见图 1a、图 2a。

表 1 模型模拟水位拟合结果

项 目	上层第四系孔隙潜水、承压水				下层第三系孔隙裂隙承压水			
	识别时段	验证时段	识别时段	验证时段	识别时段	验证时段	识别时段	验证时段
	计算点	长观孔	计算点	长观孔	计算点	长观孔	计算点	长观孔
总点(孔)数	223	60	223	60	223	60	223	60
绝对误差<0.5 m 的节点数	194	52	191	51	190	51	187	48
所占百分比/%	87	86.7	85.7	85	85.2	85	83.9	80
绝对误差<1 m 的节点数	223	60	223	60	223	60	223	60
所占百分比/%	100	100	100	100	100	100	100	100
相对误差	<3%		<3.5%		<3%		<3.5%	

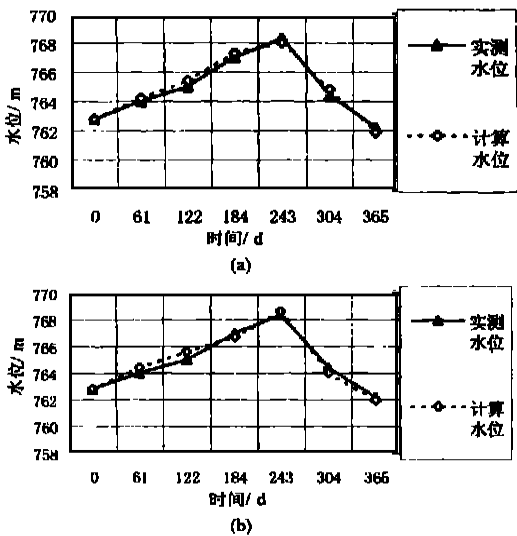


图1 G14孔水位拟合曲线

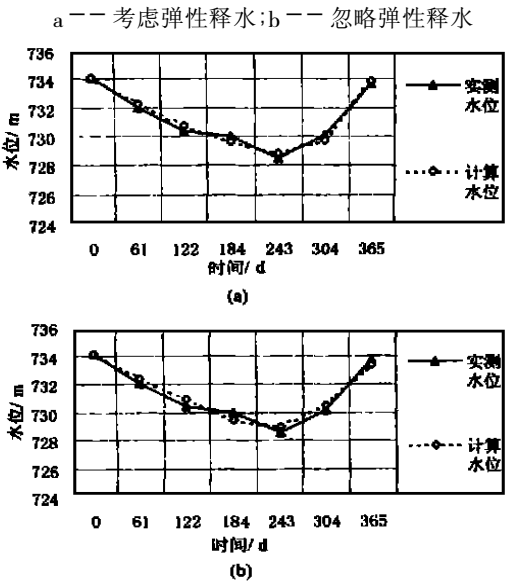


图2 G47孔水位拟合曲线

a——考虑弹性释水;b——忽略弹性释水

为弄清弱透水层弹性释水作用对区内数值计算精度的影响程度,本次模拟时,对忽略弱透水层弹性释水作用时的模型同时进行了计算,即在模型(Ⅰ)中将“V”用“ $b(h_1-h_2)$ ”替代,其中 $b=K/M$ , $h_1$ 、 $h_2$ 分别为上、下层的水位(下层中, $h_1$ 取下层值, $h_2$ 取上层值;上层中 $h_1$ 取上层值, $h_2$ 取下层值)。此时,模型(Ⅱ)即消失,上、下含水层的耦合是通过越流项 $b(h_1-h_2)$ 实现,弱透水层仅仅是起到越流通道的作用。在全区剖分网格、参数分区等完全一致时的计算结果表明,识别时段上、下层观测孔水位拟合误差的绝对值小于0.5 m的分别占总观测孔的72%和70%,计算水位与实测水位拟合的相对误差均小于5%;验证时段,上、下层观测孔水位拟合误差的绝对值小于0.5 m的均占总观测孔的70%,计算水位与

表2 模型模拟水位拟合结果

项 目	上层第四系孔隙潜水、承压水				下层第三系孔隙裂隙承压水			
	识别时段		验证时段		识别时段		验证时段	
	计算点	长观孔	计算点	长观孔	计算点	长观孔	计算点	长观孔
总点(孔)数	223	60	223	60	223	60	223	60
绝对误差<0.5 m的节点数	169	43	164	42	157	42	159	42
所占百分比/%	75.8	72	73.5	70	70.4	70	71.3	70
绝对误差<1 m的节点数	223	60	223	60	223	60	223	60
所占百分比/%	100	100	100	100	100	100	100	100
相对误差	<5%		<5%		<5%		<5%	

观测孔实测水位拟合的相对误差也均小于5%。计算点、长观孔拟合结果见表2,典型观测孔水位拟合曲线见图1b、图2b。

4.2 模拟结果分析

对研究区地下水流的数值模拟再现了模拟时段内(1996-08-05~1997-08-05)哈密盆地浅层第四系孔隙潜水、承压水和深层第三系孔隙、裂隙承压水及弱透水层中地下水流场变化过程(其中,计算区内观测孔最大水位降深达8.10 m)。由于在不同的模拟时段内,区内地下水开采量及农业灌溉回渗量等都有较大的变化,而所建模型均能有较好的仿真效果,说明模型参数选取的任意性小,模型较为合理可靠。

反演求得的模型参数与实际抽水试验资料基本一致,反映了含水介质的空间变化规律,符合实际水文地质条件;模拟计算所得的各项资源量与该区水均衡计算的各均衡项吻合很好;由对比计算结果可见,(水位拟合结果表1、表2及水位拟合曲线图1、图2)考虑弱透水层弹性释水作用时,水位拟合效果更好,观测孔水位计算值更逼近实测值,所以,若忽略区内弱透水层弹性释水作用会给计算精度带来较大影响。

5 结论

a. 区内具有多个弱透水夹层的第四系孔隙含水层组,由于夹层多为透镜体状分布,不能形成稳定、连续的弱透水层,加之实际开采多为混合采水,且井孔较多,各层水位基本一致,使实际的含水层组已变成较为均一含水层,故将其概化成潜水、承压水混合含水层,再与下层第三系承压含水层耦合建模,能够正确反映实际水文地质条件和水流特征。

b. 对比计算表明,所建模型在考虑弱透水层弹性释水作用时能更好地反映该越流含水系统内上、下部含水层总的水位动态变化规律,与忽略弱透水层弹性释水作用时概化的模型相比精度提高、更符合实际问题,能更为真实地反映哈密盆地地下水流的动态特征。

文章编号 1001-1986(2001)03-0032-04

# 煤矿矿坑排水对水环境影响信息系统

## ——以山东淄博煤矿为例

张建立, 魏加华, 余运波 (中国地质大学, 北京 100083)  
刘瑞恩, 周 宏 (辽河油田供水公司水文地质研究所, 辽宁 盘锦 124010)

**摘要:**在简要介绍煤矿矿坑排水对水环境影响信息系统基础上,着重阐述了系统中各模块的功能。该系统具有 Windows 风格,功能较强,操作灵活,方便实用。并以山东淄博煤矿矿坑排水为例,显示了淄博煤矿矿坑排水及受其影响的地表水和地下水的特征。

**关 键 词:**矿井排水;水位;水质;信息系统

**中图分类号:**P641.4 **文献标识码:**A

## 1 引言

煤矿开采产生了大量的矿坑排水,对地表及地下水环境产生了一定的影响,这方面的研究越来越受到重视<sup>[1,2]</sup>,如美国专门成立了矿坑排水研究小组(Mining Group),将其纳入政府行为。为了综合、直观地了解与矿坑排水有关的地质、水文地质以及受其影响的地表水及地下水等的信息,评价对水环境的影响状况,有必要开发煤矿矿坑排水对水环境影响的信息系统,给决策人员提供依据。

关于煤矿矿坑排水对水环境影响信息系统,目前还没有人进行专门的研究。美国 Scientific Software 公司开发了对水化学数据处理的软件;曹中初等开发了煤矿水文地质信息系统<sup>[3]</sup>,对煤矿有关水文地质信息进行管理;宣华等人开发了水环境质量评价的可视化系统<sup>[4]</sup>,对河流的污染状况进行评价。这些系统只是对水文地质信息、水化学信息和水质评价的一些方面进行研究,对于煤矿矿坑排水

对水环境综合影响的可视化研究还很欠缺。

本文以山东淄博煤矿为例,开发出了具有 Windows 风格、功能较强、操作灵活、方便实用、可供推广的煤矿矿坑排水对水环境影响信息系统。

## 2 系统特点

### 2.1 数据格式灵活

采用电子表格形式编辑、修改数据,构件为 Flbook1,当选择数据按钮时,打开数据窗口,将数据按规定格式(如水位、水量或水质各组分)放至 Flbook1。它自动封装了 Excel 的部分功能,可灵活选取、拷贝、计算、作图等。也可方便另存为文本格式、电子表格格式等。克服了 DBGrid 构件或 Foxbase 数据库数据选取、浏览等不灵活的特点。

另外,考虑到数据有时间特性及空间特性,数据存放格式为每个井点一个数据文件,包含这个井点的历年的数据信息(水位、水量、水质等)。当需要空间特征时,可通过筛选得到所需资料,如选定某些井

收稿日期:2000-05-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(49632090)

作者简介:张建立(1974—),男,中国地质大学博士研究生,从事环境地质研究。

## 参考文献

- [1] 王金生,李同斌等. 洪积扇潜水与冲洪积平原多层结构潜水承压水水流模型研究[J]. 水文地质工程地质, 1996, 23(1): 30—34.
- [2] 宋雷,李同斌等. 地下水资源经济管理[J]. 世界地质, 1998,

17(2): 51—54.

- [3] 薛禹群主编. 地下水动力学原理[M]. 北京:地质出版社, 1986.
- [4] 李俊亭主编. 地下水流数值模拟[M]. 北京:高等教育出版社, 1989.

## Numerical simulation of groundwater for multi-layer aquifer system in Hami Basin

HU Hong-tao, LIN Xue-yu (Changchun University of Science and Technology, Changchun 130026, China)

CAI Qing-qin, JIANG Jun

(The Second Team of Hydrogeology & Engineering Geology of Xinjiang BGMR, Changji 831100, China)

**Abstract:** A coupled mathematical model of groundwater in which the elastic yield of aquitard is considered in Hami basin is presented for its multi-layer structural groundwater system. The result of numerical simulation indicates that the model is more precise and conforming to the real hydrogeological condition, comparing with omitting the action of the aquitard's elastic yield. The model provides a practical and reliable numerical method for the quantitative evaluation of multi-layer leaky aquifer system.

**Key words:** leakage; aquitard; elastic yield; numerical simulation