

文章编号:1004-5589(2003)01-0069-04

## Modflow 在华北平原区地下水库模拟中的应用

王 宏<sup>1</sup> 娄华君<sup>2</sup> 邹立芝<sup>1</sup>

1. 吉林大学环境与资源学院, 长春 130026; 2. 中国科学院地理研究所, 北京 100101

**摘 要** 通过分析华北平原地下水系统的动态特征及其含水层的分布特点, 应用 Modflow 软件, 建立了华北平原地下水系统数学模型。根据对该模型的识别分析结果, 得出华北平原由于地下水超采, 地下水位降低, 增加包气带的厚度, 从而腾出了地下水库容。据此提出充分利用含水层的地下空间, 修建地下水库, 调蓄外来水资源的设想。

**关键词** Modflow; 地下空间; 降落漏斗; 地下水库

**中图分类号**: P641.2

**文献标识码**: A

### 引 言

模块化三维有限差分地下水流动模型(The modular finite difference groundwater flow model, 简称 Modflow)是由美国地质调查局开发、用来模拟地下水流动和污染物迁移等特性的计算机程序。目前, Modflow 是世界范围内广泛应用模拟地下水流的程序, 其特点为: (1) Modflow 所用的有限差分方法容易理解并且适用于许多现实条件; (2) Modflow 可以用于一维、二维、准三维和三维模型; (3) 数据输入格式基本理论和每一个模块都经过了广泛验证; (4) 模块化结构便于用户根据实际需要添加程序, 完善功能和与其它应用软件如 Suffer、Excel 等结合; (5) Modflow 模拟的结果可以用许多软件如 Suffer、AutoCAD 等显示和处理, 而且其本身的三维可视化结果也便于用户理解和应用。这个软件的优点是在数值模拟过程中, 把各个步骤紧密地连接起来, 从开始建模、输入和修改各类水文地质参数与几何参数、运行模型、反演校正参数一直到现实输出结果, 使整个过程从头到尾系统化、规范化。因此, 应用三维可视化技术, 直观表达隐伏于华北平原地下地质体的空间特征, 充分认识并开发该研究区的地下空间, 修建地下水库, 调蓄外来水资源<sup>[1]</sup>。

### 1 研究区的地质概况

研究区(河北平原)与太行山/燕山丘陵地带相

接, 由京津以南平原、冀东平原和廊坊地区以北三县平原构成, 总面积约 7.2 万 km<sup>2</sup>。河北平原在构造上隶属华北断凹带, 堆积了巨厚的新生界, 其中第四系厚度 350~450 m, 凹陷区 500 m 以上, 主要由冲积、湖积作用所构成。本区处于干旱半干旱季风型气候区, 年降雨量在 500~550 mm, 平原中部降雨量较少, 一般在 450~500 mm 之间, 降水量 70%~80%集中在夏季, 多以暴雨形式出现, 十年九旱是河北平原的气候总特征<sup>[2]</sup>。该区地面辽阔, 地形复杂, 总的地势西北高东南低, 从西北到东南大致成半环状逐级下降。根据本区地质地貌特征, 可以把华北平原分为三个区: 山前冲积洪积平原区、中东部冲积、湖积平原区和滨海平原区。各区含水层厚度由小变大, 地下水流动方向自西向东, 无论从深部还是浅部看, 平原区地下水呈现自上而下、自西向东的整体推进性。由山前冲积扇上部粗大的卵砾石到平原区的含水层, 由粗砂细砂和粉砂构成, 向下游颗粒逐渐变细, 并出现粘土夹层, 地下水补给条件逐步变差。河北平原 3 个主要的地下水位降落漏斗处于同一冲湖积含水层系统, 其中以冀枣衡 2 个漏斗最大, 漏斗中心水位埋深分别为 75.65 m 和 56.10 m。由于地下水超采, 各漏斗之间地下水相互补给而产生夷平作用, 导致漏斗中心发生了偏移, 并有合成一个大漏斗的趋势<sup>[3]</sup>。

#### 1.1 水文地质条件

该平原第四系松散岩层自上而下共划分 4 个含

收稿日期: 2002-07-30

作者简介: 王 宏(1974-), 女, 辽宁朝阳人, 硕士研究生, 主要从事水文地质研究。

水组。第一含水组底界埋深 40~60 m,称为浅层地下水,以下 3 个含水层统称为深层地下水。山前平原无咸水分布,通俗称全淡水区,含水介质以砾石、卵石和粗中砂为主,导水系数大于  $2\,000\text{ m}^2/\text{d}$ ,单位出水量  $20\sim50\text{ m}^3/\text{h}$ 。中部滨海平原浅层地下水的淡水体,主要分布在古河道带发育区,含水层以细砂和细粉砂为主,导水系数为  $300\sim500\text{ m}^2/\text{d}$ ,单位出水量  $5\sim10\text{ m}^3/\text{d}$ 。滨海平原为浅层咸水分布区,浅层淡水只是零星分布。浅层咸水含水层以粉砂为主,厚度小于 10 m,单位出水量  $1\sim3\text{ m}^3/\text{h}$ ,导水系数  $10\sim50\text{ m}^2/\text{d}$ 。深层地下水主要分布于中部平原和滨海平原,其中以第二、第三含水组为主,厚度大约为 60~250 m,富水性较好,单位出水量为  $5\sim10\text{ m}^3/\text{d}$ 。由于河北平原的水资源主要以地下水为主,近年来的开采量逐年增加,造成了全平原范围内的地下水位下降,同时也引起一些其它地质环境问题。为此有必要对该区地下水系统进行科学管理,变害为利,改善地质环境<sup>[4]</sup>。

## 1.2 地下水库的形成条件

所谓地下水库是指地下水富集区,如冲积扇、河谷、古河道、盆地、向斜等地貌、构造和岩石地层控制的地下水富集场所。这里所说的地下水库是自然形成的地下水富集区。由于人类的过量开采,降低了地下水位,增加了包气带的厚度,腾出了地下水库容。而辟建地下水库必备的水文地质条件是:一定的含水层厚度,最好大于 10 m;较大的分布面积,最好大于  $100\text{ km}^2$ ;含水层粒度较粗,储水或给水性强,储水系数一般大于  $0.20\text{ m}^2/\text{d}$ ;导水性好,导水系数一般大于  $500\text{ m}^2/\text{d}$ ,特别是地下水含水层与河水有密切的补、排关系。在冲积扇、河谷等地区的地下水库,由于与河水联系密切,补给快、恢复快,在短期内即可获得较快的补偿恢复,开发利用价值很大。由于河北平原独特的水文地质条件和地形特征,提出修建地下水库的设想<sup>[4]</sup>。

## 2 地下水库的数值模拟

### 2.1 水文地质概念模型

研究区西部山前地带为单一潜水含水层,而该区的中东部为多层含水层。第一含水层为潜水,是主要研究的含水层。第二、三、四含水层是承压含水层,通过弱透水层与潜水有水力联系,由于研究程度较低,把几组承压含水层概化为一层,这样就把一个

复杂的多组含水层系统概化为只有越流的单一潜水含水层系统。由于本区西部为山前平原与太行山山脉的交接处,该边界接受山区基岩地下水和河流冲积扇群第四系潜流的侧向补给,故确定为流量边界。本区南、北两边界是根据地下水流场确定的两条流线,作为隔水边界。东部边界浅层地下水主要以垂直交替为主,水平径流滞缓,所以处理为零流量边界。忽略含水层给水度的垂向变化以及不同含水层之间可能存在的垂向水量交换,将研究区含水层统一概化为有越流非均质,各向同性的平面二维潜水非稳定流含水层。

### 2.2 地下水流数值模拟模型

根据上述水文地质概念模型,可建立本区的数学模型,如下式所示:

$$\frac{\partial h}{\partial x} \left[ k(h-b) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k(h-b) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{k}{m} (h-h_0) + W - e = \mu \frac{\partial h}{\partial t} \quad (x, y), t > 0$$

$$\frac{h}{t} = 0 = h_0 \quad (x, y)$$

$$k(h-b) \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_n = q(x, y, t) \quad (x, y), t > 0$$

$$\frac{\partial h}{\partial n} \Big|_2 = 0$$

式中:  $h$  为水面高程(m),  $b$  为含水层底板高程(m),  $q(x, y, t)$  为边界单宽流量,  $k$  为渗透系数,  $\mu$  为含水层储水系数,  $n$  为内法线。

### 2.3 地下水流数值模拟模型求解

本文利用 Modflow 软件,采用逐次超松弛叠代法(SOR)对上述数学模型进行求解。本区采用规则网格的有限差分法,求解以上定解问题。考虑管理区范围和精度的要求,全区按照  $10^4 \times 10^4\text{ m}$  的正方形网格剖分,计 38 行,30 列,共 960 个网格,计算区包括 611 个网格,其中边界网格 106 个(流量边界网格 41 个,隔水边界网格 65 个)。本模型采用了强隐式叠代法求解线性方程组,计算工作是在 VAX—11/750 计算机上完成的。

#### 水文地质参数的确定

根据水文地质条件,全区共分 5 个参数区,各区水文地质参数初值是根据河北平原以往研究成果,以及本次工作结果综合确定的<sup>[5]</sup>。根据本区岩性确定的参数值,如表 1 所示。

#### 边界条件的确定

西边界山前侧向补给量:根据 1981~1985 年各

表 1 水文地质参数一览表  
Tab. 1 The hydrological parameters

岩 性	给水度	降雨入渗补给系数	垂向渗透系数 ( $\times 10^{-3}$ )	水平渗透系数	灌溉回归系数
粘土	0.034 ~ 0.04	0.12 ~ 0.20	0.03 ~ 0.3	山前冲洪积扇轴部给定	以河北平原包气带岩性图为
亚粘土	0.04 ~ 0.055	0.2 ~ 0.25	0.3 ~ 0.45	100 ~ 900 ;	依据,参照灌溉回归系列值给
亚砂土	0.055 ~ 0.08		0.45 ~ 3	侧翼地带给定 0 ~ 100 ;	定:粘性土 0.07 ~ 0.1 ;
粉砂	0.08 ~ 0.13		1 ~ 5	扇前为 10 ~ 30 ;	砂性土 0.10 ~ 0.2 ;
中砂	0.13 ~ 0.15		5 ~ 7	中部平原 5 ~ 10 ;	复合岩性根据面积加权给出
				滨海平原 1 ~ 5	

季度等水位线图及其有关图件,根据达西定律,分别按平水年、丰水年、枯水年计算出平均每年各季度的侧向补给量,各年平均在  $1.7 \sim 2.5 \text{ m}^3/\text{d}$  (表 2)。

表 2 丰、平、枯水年各个季度山前侧向径流补给量

Tab. 2 The supply quantity from the hillsides in the wealthy, general and drial years

年 份	补 给 量(单位: $\text{m}^3/\text{d}$ )			
	一季度	二季度	三季度	四季度
丰水年	2.305	2.119	2.131	2.134
平水年	2.055	2.093	1.964	2.047
枯水年	1.894	1.918	2.038	2.212

### 源汇项的确定

根据各市、县有关部门的用水统计,全区工业、农业和生活总抽水量为  $95 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。农业灌溉回归水量是:深层及其浅层地下水农业用水量总和乘以灌溉回归系数,全区总回归量是  $15 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。河渠渗漏补给量是各河渠段的流量乘以河渠渗漏损失系数,本区渗漏补给量是  $3.55 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

降雨入渗补给量是降雨入渗补给系数乘以当地各季节降水量,本区降水补给量大约  $70 \sim 80 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。蒸发量及其越流量在给定参数的条件下由

程序自动算出,本区地下水蒸发极限深度 3.5 m。以上各量均以强度形式进入模型。

### 模型的识别

从水均衡、梯度场、降速场以及参数等方面进行拟合。图 1 反映了地下水梯度场拟合情况,可看出地下水梯度拟合程度较高,所建模型能比较真实地反映研究区地下水含水层的实际情况,模型运行稳定、可靠,可用来进行预测分析。

## 3 模型对华北平原地下水库运行可行性的预测

应用已建立的数值模型,进行研究区地下水均衡分析预测,评价地下水天然资源量和可开采资源量。由此计算表明:

(1) 研究区多年平均地下水补给资源量是  $130.479 \text{ 亿 m}^3$ ,截至 1995 年,地下水开采资源量已达  $113.4153 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,考虑近几年工农业用水量的增加,进一步证实了研究区的水资源严重超采<sup>[6]</sup>。

(2) 华北平原目前几个典型的下水位降落漏斗(石家庄漏斗,冀枣衡漏斗,沧州漏斗)腾出的地下库容,可以修建地下水库,作为调蓄外来水资源的地下介质空间<sup>[7]</sup>。因此,根据本次建模对华北平原含水

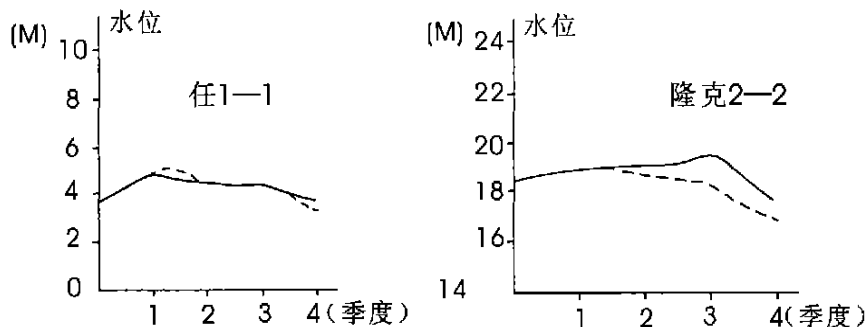


图 1 地下水梯度场拟合图

Fig. 1 The zone of gradient of groundwater

层特征的模拟分析,通过模型识别和区域分析,结合修建地下水库必备的水文地质条件,笔者认为该区具备修建地下水库的有利条件。所以设想在该区修建地下水库,无论是丰、平、枯水年都是可行的,同时地下水库对于开源节流,防止地质环境恶化均能起到积极作用。

### 参考文献

- 1 王志民,2001,海河流域水资源管理研究.天津:天津科学技术出版社
- 2 沈照理,施德鸿等,2000,华北平原地下水环境演化.北

京:地质出版社

- 3 彭汉兴,1998,环境工程水文地质学.北京:中国水利出版社
- 4 左大康,刘昌明,1985,华北平原水量平衡与南水北调研究文集.北京:科学出版社
- 5 李颖,李同斌,1998,水资源系统地下水系统数学模型研究.高校地质学报,(2):41~46
- 6 陈望和,1996,河北平原地下水.石家庄:河北地质出版社
- 7 王大纯,张人权,1986,水文地质学基础.北京:地质出版社

## The Application of Modflow Software in the Simulation for the Underground Reservoir of Huabei Plain

Wang Hong<sup>1</sup>, Lou Hua-jun<sup>2</sup>, Zou Li-zhi<sup>3</sup>

1. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130026, China;

2. Institute of Geographical Sciences and Nature Resources Research, Beijing, 100101, China

**Abstract** Based on the analyses of the dynamic feature of groundwater and distribution, and the feature of aquifers of the Huabei plain, with applying the Modflow software, the authors build the mathematical model of groundwater system. According to the results made by the identification and analysis with the model, the authors drew the conclusion that excessive exploitation of the groundwater has greatly depressed the groundwater level, enhanced the thickness of vadose zone and vacated the storage capacity of groundwater. Therefore, the authors suggest making full of exploiting underground-space, building underground reservoir and depositing outer water resources.

**Key words** Modflow; underground-space; draping filler; underground reservoir