

# 唐山市古冶区地下水数学模型研究及应用

李大鸣, 孙仲谋, 张弘强, 李彦卿, 卜世龙, 贾明灏, 栗琪程  
(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 基于地下水动力学理论,建立了唐山市古冶区地下水数学模型,并对模型参数及边界条件进行确定。通过模拟得到研究区域内全年地下水变化情况及其流场分布,其中水位变差及地下水流向与当地实际相符,说明该模型合理、可靠。同时计算得到研究区域内近年地下水补排量,将其与储变量比较可知,在近年取排水条件下,地下水供给难以满足当地取水需求。对此,在不同径流量保证率下,提出相应的建议采水方案,以保证唐山市古冶区地下水取水需求。

**关键词:** 地下水; 数学模型; 补排量; 储变量; 采水方案

**中图分类号:** TV138 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)19-0072-05

## Application of Groundwater Mathematical Model for Guye District, Tangshan City

LI Da-ming, SUN Zhong-mou, ZHANG Hong-qiang, LI Yan-qing,  
BU Shi-long, JIA Ming-hao, LI Qi-cheng

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University,  
Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Based on the characteristics of the groundwater system in Guye District of Tangshan City, a mathematical model was developed, and the model parameters and groundwater boundary conditions were discussed. The model was used to verify the year-round groundwater level changes and the groundwater flow fields. The results were closed to the field observations, which indicated that the model was reasonable and reliable. The recharge and discharge amount of groundwater in Guye District were also calculated. The results showed that the groundwater storage in the Guye District had failed to meet the water requirements in the area in recent years. Water extraction schemes under different guarantee rates of runoff were proposed to solve the problem.

**Key words:** groundwater; mathematical model; recharge and discharge amount; variable storage amount; water extraction scheme

20世纪70年代,数值模拟开始应用在地下水运动问题中,成为其运动规律研究中不可或缺的工具<sup>[1]</sup>。随着科学技术水平的提高,尤其是计算机技术的发展,出现了一大批地下水数值模拟软件,这大大促进了地下水数值模拟的进展<sup>[2-4]</sup>。

唐山市古冶区因为其特有的地下水文条件、历史发展因素及其迫切的地下水保护需求,成为了我国北方工业城市加强地下水保护、改善城市生态环境的典型代表。为探究古冶区地下水系统运动规律,笔者以三维渗流方程为基本理论,采用非结构网

格划分单元,建立了古冶区地下水动力学模型。通过模拟研究区域内的地下水变化,得到了地下水补排量与入流条件的关系,进而将补排量与储变量进行对比分析,以提出相应的建议采水方案。

## 1 地下水数值计算理论

### 1.1 基本方程

地下水数学模型以三维渗流方程为基础,沿水深方向积分为二维渗流连续方程和运动方程。

三维渗流方程为:

$$S_s \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + q \quad (1)$$

式中: $H$ 为地下水水头; $K_x$ 、 $K_y$ 、 $K_z$ 为 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的渗流系数; $S_s$ 为含水层比储水系数; $t$ 为时间; $q$ 为地下水源汇流项。

沿水深方向积分为分层二维渗流连续方程:

$$S_k \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + q_k \quad (2)$$

分层二维渗流运动方程为:

$$\begin{cases} Q_x = h_{kx} K_x \frac{\partial H}{\partial x} \\ Q_y = h_{ky} K_y \frac{\partial H}{\partial y} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $k$ 表示分层地下水相关变量; $h_k$ 为分层间距; $q_k$ 为包含垂向渗流的源和汇。

### 1.2 数学模型离散方程

模型采用非结构网格进行单元划分,将连续方程离散为单元中心与周边通道的水量平衡关系,离散方程为:

$$H_j^{n+\Delta t} = H_j^n + \frac{\Delta t}{S_j} \left( \sum_i Q_i^n L_i + q_j \right) \quad (4)$$

式中: $H_j^n$ 为 $n$ 时刻 $j$ 单元的水头; $Q_i^n$ 为 $n$ 时刻 $i$ 通道的单位宽度流量; $L_i$ 为 $i$ 通道的宽度。

将运动方程离散为两单元中心水头差作用产生的单位宽度流量,离散方程为:

$$Q_i^n = h_i K_i \frac{\Delta H_i^n}{\Delta d_i} \quad (5)$$

式中: $d_i$ 为 $i$ 通道两侧单元中心到通道中心距离之和。

## 2 古冶区地下水数学模型构建

### 2.1 研究区域概况

古冶区地处唐山市中心城区东部,南北长约

27.2 km、东西宽约 21.2 km,全区总面积为 263 km<sup>2</sup>,人口约 40 万人,地势北高南低,由东向西倾斜。由于大量采掘地下煤炭和矸石,该地区形成了其特有的人工地貌——塌陷低洼地。

### 2.2 模型网格划分

古冶区辖 5 个街道、3 个乡、2 个镇,模型采用非结构网格沿辖区边界进行单元划分,共得到 2 989 个单元、2 793 个节点、5 781 条通道。

### 2.3 模型参数及边界

#### 2.3.1 模型参数确定

##### ① 降水入渗系数

唐山市平原地区降水入渗量与降水量的关系见图 1,周边山区河川基流量与降水量的关系见图 2。

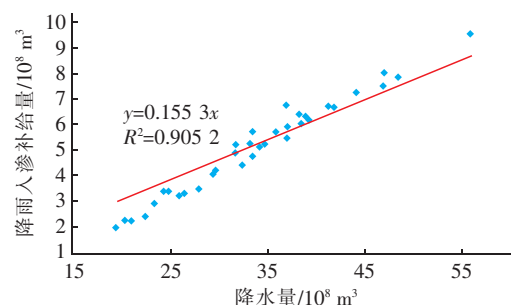


图1 唐山市平原地区降水入渗量与降水量的关系

Fig. 1 Relationship between infiltration and precipitation in plain area of Tangshan City

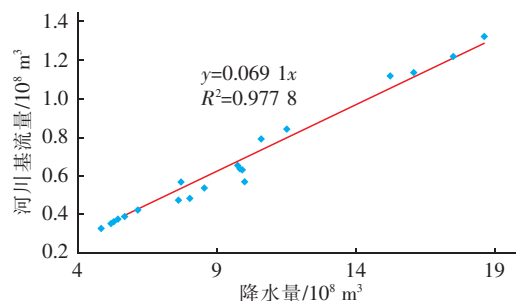


图2 唐山市周边山区河川基流量与降水量的关系

Fig. 2 Relationship between river base flow and precipitation in mountain area around Tangshan City

综合考虑古冶区地质条件,并参照周边区域降水入渗系数,将古冶区平原地区降水入渗系数确定为 0.150、山区降水入渗系数确定为 0.068。

##### ② 垂向渗流系数

古冶区地下水主要以蒸发和地下径流渗透为主,补给主要靠大气降水和河水渗透。按埋藏条件、岩性特征等,将研究区域划分为 5 个主要工程地质层,土层主要有填土、粉质黏土、粉砂、黏土、石灰岩

等。结合当地资料,将垂向渗流系数确定为  $0.05 \sim 4.0 \text{ m/d}$ ,给水度确定为  $0.124 \sim 0.152$ 。

### ③ 水平渗透系数

古冶区北部由变质岩类裂隙含水岩组和岩浆岩类裂隙含水岩组相间构成,中南部为松散岩类裂隙含水岩组。综合地形、地质和岩类范围,将古冶区划分为8个主要的水平渗透系数评价区域,如图3所示。水平渗透系数分区赋值如表1所示。

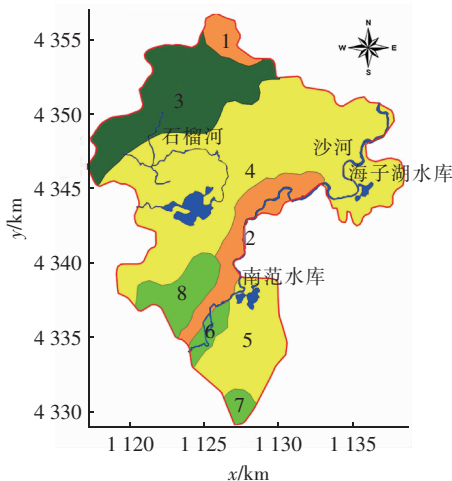


图3 古冶区水平渗透系数分区

Fig. 3 Partitions of horizontal percolation coefficients of Guye District

表1 古冶区水平渗透系数分区赋值

Tab. 1 Horizontal seepage coefficients of partitions of Guye District

分区号	渗透系数/( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ )	给水度	入渗系数
1、2、3	160	0.124	0.068
4、5	236.79	0.138	0.150
6、7、8	572.3	0.152	0.150

### ④ 地下水位埋深

古冶区在1975年形成以黑鸭子为中心的地下水漏斗。1980年后,由于开滦唐家庄矿、徐家楼矿的投产以及巍峰山水源开采,又形成以前张亭子为中心的地下水漏斗。两个漏斗合称为古冶区第四系浅层水水位下降漏斗,漏斗区面积为  $175.7 \text{ km}^2$ 。

结合古冶区水文地质图可得,古冶区中部地下水埋深为  $5 \sim 10 \text{ m}$ 、南部地下水埋深为  $3 \sim 5 \text{ m}$ 。

### 2.3.2 模型边界条件

模型边界条件即为古冶区地下水系统的补给项和排泄项,补给项主要包括降水入渗补给、河川渗漏补给以及水库灌溉渗漏补给,排泄项主要为人工开

采排泄。

### ① 降水条件

由于古冶区降水资料匮乏,故参照周边雨量站数据进行计算。其中,滦南县、滦县、唐山市城区、丰润区和迁安市各雨量站累计月降雨过程见图4。

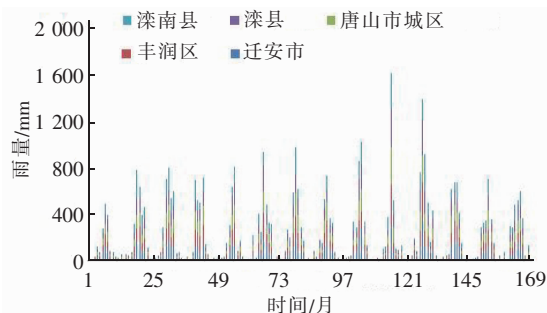


图4 各雨量站累计月降雨过程

Fig. 4 Accumulated monthly rainfall

### ② 河流渗漏补给

古冶区入境河流沙河隶属滦河水系,沙河在古冶区境内有1条支流万山河。万山河是古冶区东部的1条排水渠道,流域面积为  $31.5 \text{ km}^2$ 。沙河年平均入境流量为  $4302 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,近期每年自陡河水库经石榴河调水  $500 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,主要用于生活用水和农业灌溉。

### ③ 水库灌溉渗漏补给

古冶区有两座水库,南范水库为采矿塌陷形成的小型水库,设计库容为  $300 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,现可利用水面约为  $66.7 \text{ hm}^2$ ;海子湖水库为小型水库,设计库容为  $400 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,现可利用水面约为  $73.3 \text{ hm}^2$ 。在模型中,水库按灌溉区域渗漏对地下水进行补给。

### ④ 人工开采排泄

古冶区辖6座矿井,其用水来源主要为地下水。古冶区自来水厂共有25眼井,分布在3个位置:其中巍峰山和石佛口共14眼,井深在30m左右;海德源共11眼,井深在40m左右。动水位均在40m左右,2015年—2017年地下水位每年下降4m,2015年以前地下水位每年下降1m。自来水厂年供水量为  $2300 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,其中生活用水占75%、工业用水占15%左右,其余为自用水。2013年,张亭子漏斗处自来水厂年供水量为  $2300 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,黑鸭子漏斗处大庄坨井群年取水量为  $1274 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

## 3 结果与分析

### 3.1 地下水变化及分析

采用多年平均月降雨量、多年平均入流量及

2013 年取水量进行模拟计算,得到研究区域全年地下水水位变化,如图 5 所示。

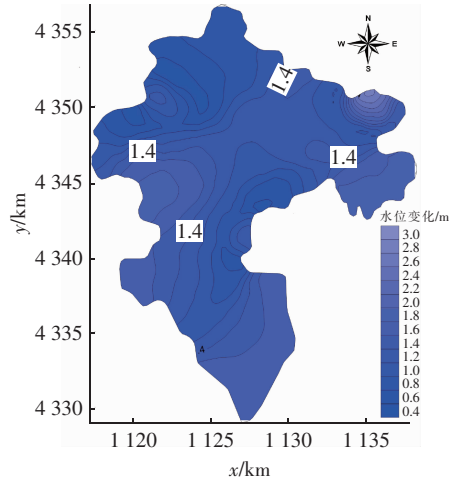


图 5 全年地下水水位变化

Fig. 5 Change of groundwater level in one year

由图 5 可得,研究区域全年地下水水位变化在 3.5 m 以内,其中变化最大的位置为张亭子漏斗区。由于张亭子漏斗区有规模较大的自来水厂,导致水位变化均达到 2 m 以上,最大值可达 3.2 m 以上,且变化梯度较大。北部山区由于取水点稀疏,水位变化较小。提取主要取水位置的地下水全年变化过程,如图 6 所示。可知,经过一年时间,范各庄矿、吕家坨矿、广信公司地下水水位稍有提高,其余各主要取水点水位均有所下降,其中自来水厂水位下降最多,可达 3 m。水位变化计算结果与各取水点提供的全年水位变化基本一致,说明数学模型适用于古冶区的水文地质情况。

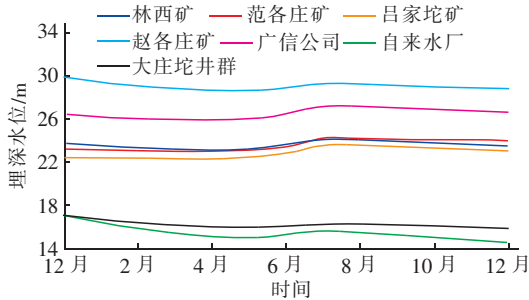


图 6 主要取水位置的地下水水位变化过程

Fig. 6 Change process of groundwater level at main water extraction location

通过模拟计算,得到研究区域地下水流场,如图 7 所示。古冶区地下水有两个主要汇水区,即东北部的张亭子漏斗区和中部的黑鸭子漏斗区,这也与

实际情况相符。此外,张亭子漏斗区有向西扩展延伸的趋势。

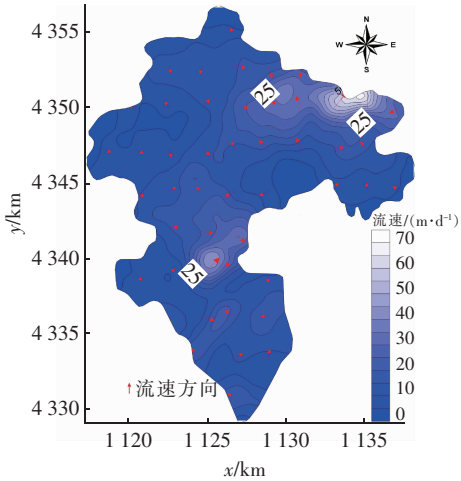


图 7 地下水流场

Fig. 7 Groundwater flow field

3.2 年均量变化及分析

选择古冶区平均雨量、平均径流量和 2013 年取排水条件下的年蓄变量,其计算结果见表 2。其中侧向流入量表示由研究区域边界处流入研究区域内的水量,侧向流出量表示由研究区域通过边界流出的水量。

表 2 2013 年取排水条件下的年蓄变量计算结果

Tab. 2 Results of variable storage amount under water extraction and drainage conditions in 2013

项 目	均衡项目	均衡量/ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> · a <sup>-1</sup> )
平均径流 补给量	降水入渗补给量	5 619.77
	侧向流入量	502.24
	河道渗漏补给量	1 892.84
	水库灌溉补给量	1 089.50
	合计	9 104.35
排泄量	地下水开采量	6 784.00
	侧向流出量	505.00
	合计	7 289.00
统计量	补排量	1 815.35
	储变量	1 590.05
	均衡误差	225.30

表 2 中补排量表示平均径流补给量与排泄量的差,储变量表示当年水文地质条件下当地地下水应当的储存变化量。比较补排量与储变量可得:在 2013 年取排水条件下,研究区域内地下水补排量大于储变量,说明当地地下水资源可以满足取水需求,



且有12.41%的结余。

随着当地经济的发展,近年取排水条件较2013年有所变化。选取平均雨量、近年取排水条件为计算条件,分别在平均径流量及25%、50%、75%、95%径流量保证率下进行计算。结果表明,在平均径流量及25%、50%、75%、95%径流量保证率下储变量分别为 $1\,243.3 \times 10^4$ 、 $1\,274.67 \times 10^4$ 、 $1\,227.07 \times 10^4$ 、 $1\,194.38 \times 10^4$ 、 $1\,168 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ ,补排量分别为 $616.921 \times 10^4$ 、 $1\,024.55 \times 10^4$ 、 $405.57 \times 10^4$ 、 $-19.18 \times 10^4$ 、 $-361.74 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。可知,在平均雨量和近年取排水条件下,随径流量保证率增大储变量缓慢减小,基本稳定在 $1\,200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 左右,而补排量下降迅速。同时,在所计算的保证率下,研究区域内补排量均小于储变量,说明近年古冶区取水量增大,使得当地地下水资源难以满足取水要求。在平均径流量情况下,补排量仅为储变量的一半,说明当地地下水资源紧张,急需增加新的水资源进行补充以满足取水需求。在25%径流量保证率条件下,补排量稍小于储变量,说明当地地下水资源不能满足取水要求,但缺口不大。在50%径流量保证率条件下,补排量远小于储变量,说明当地地下水资源难以满足当地取水需求。在75%、95%的径流量保证率条件下,补排量为负值,说明当地地下水超采,取水量超出合理范围。

结合不同径流量保证率下的计算结果,为促进当地地下水资源合理开采,保证当地取水需求,建议当径流量处在25%保证率时,可以适当调整当地取水过程;当径流量处在50%保证率时,可以适当补充新的水源;当径流量处在75%和95%保证率时,可以考虑协调各矿区取水量。

#### 4 结论

① 基于地下水动力学理论,建立唐山市古冶区地下水数学模型。模拟结果与当地实际情况基本吻合,表明所建立数学模型能够符合当地实际水文地质条件,计算结果是合理、可靠的。

② 模拟计算了研究区域内2013年的地下水补排情况,得到了地下水水位变化趋势及流场分布。同时,选取研究区域内近年的取水条件,模拟计算了不同径流量保证率条件下的地下水补排量与储变量。结果表明,在近年取排水条件下,该地区地下水难以满足取水需求。

③ 结合计算结果,建议古冶区在径流量较大

(即保证率较低)的年份,可适当调整取水过程以满足当地取水要求;在径流量较小的年份,可考虑控制、协调各矿区取水量;在一般径流量的年份,可考虑开拓水源,增加取水途径。

#### 参考文献:

- [1] 马秀媛,于峰,李景龙. 区域地下水动态数值模拟[J]. 岩土力学,2006,27(S1):131-136.  
Ma Xiuyuan, Yu Feng, Li Jinglong. Numerical simulation of local groundwater [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006,27(S1):131-136(in Chinese).
- [2] 周奇,岑国平,冀鹏,等. 采用 Visual Modflow 研究机场场区地下水渗流场[J]. 中国给水排水,2011,27(11):51-54.  
Zhou Qi, Cen Guoping, Ji Peng, et al. Study on groundwater seepage field in airfield with Visual Modflow [J]. China Water & Wastewater, 2011,27(11):51-54(in Chinese).
- [3] Hsieh B B, Zakikhani M, Martin W D. Development of a regional 3-D groundwater modeling system for the Savannah River Nuclear Site, South Carolina [J]. Groundwater Management, 2014,37(7):315-319.
- [4] 魏晓燕,张保祥,李旺林,等. 肥城盆地岩溶地下水系统数值模拟[J]. 中国农村水利水电,2015(11):59-64.  
Wei Xiaoyan, Zhang Baoxiang, Li Wanglin, et al. Research on the numerical simulation of karst groundwater in Feicheng Basin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(11):59-64(in Chinese).



作者简介:李大鸣(1957—),男,河北枣强人,博士,教授,博士生导师,研究方向为水力学、河流动力学、海岸工程及数值计算。

E-mail: lidaming@tju.edu.cn

收稿日期:2019-02-12