

应用数值模拟法研究隐伏岩溶区水文地质条件

—以北京大兴研究区为例

南天¹, 李星宇¹, 李鹏², 王新娟², 谢振华², 邵景力¹

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 北京市水文地质工程地质大队, 北京 100195)

摘要: 大兴迭隆起地区岩溶水为北京市地下水资源的重要组成部分。为了查明南苑-通县断裂以及永定河断裂的水文地质性质, 以大兴迭隆起地区隐伏岩溶水系统为研究对象, 利用GMS地下水数值模拟软件, 建立了岩溶地下水系统模型。分别将研究断层设置为侧向隔水边界和侧向透水边界的条件进行模拟计算, 对比分析了不同水文地质条件下观测水位与模拟水位的拟合效果, 结合水量均衡分析表明, 南苑-通县断裂、永定河断裂均为侧向隔水性质的断裂, 研究区岩溶含水系统主要来源于上覆第四系松散层的垂向越流补给。研究表明, 数值模拟法在研究隐伏型岩溶含水系统水文地质条件具有一定的优势。

关键词: 数值模拟法; 水量均衡; 越流补给; 边界条件; 岩溶地下水; 大兴迭隆起; 北京地区

中图分类号: P641 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)03-0143-05

Application of the Groundwater Flow Simulation to Study the Hydrogeological Conditions in the Covered Karst Area - a case study in Daxing, Beijing

NAN Tian¹, LI Xing-yu¹, LI Peng², WANG Xin-juan², XIE Zhen-hua², SHAO Jing-li¹

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Hydrogeological and Engineering Geological Team of Beijing, Beijing 100195, China)

Abstract: In the overlapping uplift area of Daxing, the karst water is a significant component of groundwater resources in Beijing. In order to characterize the hydrogeological conditions of Nanyuan-Tongxian fault and Yongding River fault, a groundwater flow model was developed to simulate the covered karst system in the overlapping uplift area of Daxing using the groundwater numerical simulation software GMS. Both faults were simulated as the impervious boundary and permeable boundary in the model. The fitting effect between observed and simulated heads and water balance of the system were analyzed under the two conditions, which indicated that both faults are impervious fault. The recharge of karst water aquifer is the leakage from overlying Quaternary porous aquifer. The research shows that numerical simulation method has advantages in the study of hydrogeological conditions of covered karst system.

Key words: numerical simulation; water balance; leakage; boundary conditions; karst groundwater; overlapping uplift area of Daxing; Beijing

我国北方岩溶水的主要形态为岩溶大泉, 其分布集中于奥陶系和寒武系的石灰岩、白云岩含水层中^[1]。按照补给特征, 岩溶地下水系统可分为隐伏型和裸露型^[2]。北方隐伏型岩溶水系统规模大、资源要素构成和转换关系复杂、环境质量较脆弱^[3], 岩溶发育受构造控制, 补径排条件难以通过地面工作探查明晰^[4]。

目前隐伏型岩溶地区的边界性质、含水层发育情况、构造特征以及富水性特征等水文地质条件主要通过钻探以及浅层地震法、高密度电阻率法和探地雷达方法^[5]进行勘查。由于岩溶溶隙、裂隙发育不均一, 钻探手段需要的作业量极大, 耗费人力物力, 成本较高。对于岩溶水水循环特征的调查, 目前以化学示踪法为主, 一般所用化学示踪剂为易溶性

收稿日期: 2013-09-20 修回日期: 2014-04-21 网络出版时间: 2014-05-08

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.031.html>

基金项目: 国家“973”计划项目(2010CB428804); 北京岩溶水资源勘查评价工程, 专题类第一项: 数值模拟(BJYRS-ZT-01-01)

作者简介: 南天(1986), 男, 河北石家庄人, 博士研究生, 主要从事地下水科学与工程方面研究工作。E-mail: sky1986sky@aliyun.com

通讯作者: 邵景力(1959), 男, 山东滕州人, 教授, 从事水文地质专业教学与科研工作。E-mail: jshao@cugb.edu.cn

盐类离子、氢氧同位素等^[9]。国内外关于地表泉水或浅层地下水氢氧稳定同位素研究成果丰富^[7,9],但对深层地下水氢氧稳定同位素的研究不多,其中一个重要的制约因素是难以同时获取不同类型深层地下水水样^[10]。在具备一定基础资料的条件下,通过数值模拟的方法,利用条件假设、均衡分析、典型观测孔水位变化分析等手段对隐伏岩溶水水文地质条件进行分析^[8],已经成为一种高效、便捷的方法^[9]。

本文以北京市水文地质工程地质大队开展实施的“北京岩溶水资源勘查评价工程——大兴迭隆起岩溶水流数值模型”项目为支撑,拟以岩溶地下水系统作为研究对象,利用 GMS 软件建立了三维地下水水流模型,对模型边界性质进行分类模拟,从而判定南苑-通县断裂以及永定河断裂的水文地质性质。

1 研究区水文地质条件

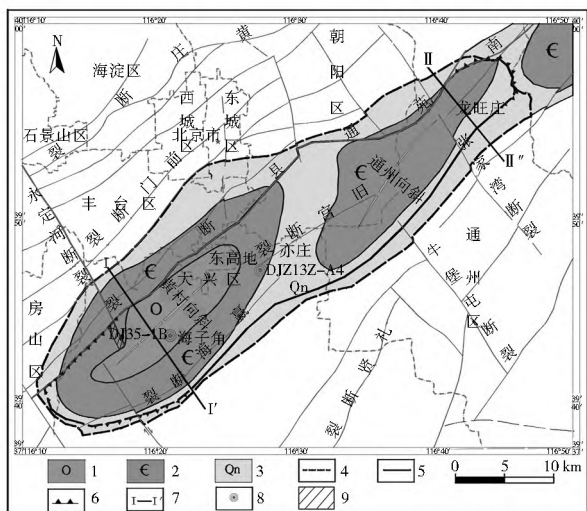
大兴迭隆起地区位于北京市南部,其范围主要包括大兴-丰台-朝阳-通县一线,面积约 767 km²,见图 1。研究区岩溶水隐伏于第四系岩层以下,主要由奥陶系、寒武系和青白口系岩溶含水岩组构成,受区内黄村向斜、通州向斜以及南苑-通县断裂、永定河断裂等构造控制。

上覆第四系地层由西南向东北厚度逐渐增加,第四系底部由 10~15 m 左右较连续的黏土层组成。岩溶含水层在黄村向斜地区核部为奥陶系冶里组、亮甲山组,翼部依次为寒武系炒米店组、张夏组、馒头组、昌平组、青白口系景儿峪组和长龙山组,奥陶系以灰岩、白云岩为主,在黄村镇一带富水性较好;在通州向斜,岩溶含水层核部为寒武系馒头组,翼侧依次为寒武系昌平组、青白口系景儿峪组和长龙山组,寒武系馒头组以泥岩夹多层泥质白云岩为主,富水性较差;昌平组以泥晶灰岩为主,在龙旺庄一带富水性较好。黄村向斜与通州向斜通过寒武系长龙山组相连接。岩溶含水层底界以及四周为青白口系下马岭组泥页岩,相对阻水。受开采条件影响,奥陶系岩溶水自西北流向东南,寒武系岩溶水流自西南流向东北。

区内控制岩溶含水层的主要断裂为南苑-通县断裂和永定河断裂。南苑-通县断裂位于研究区西北缘,南起南苑村附近,向北经南苑、南磨房、定福庄东,北至平安疃,长 110 km,断裂性质尚未明确。由大兴向斜地区剖面图 2 可知,南

苑-通县断裂两侧 600 m 深度以下,岩溶含水层相联系,可能存在水力联系^[11,12]。由通州向斜地区剖面图 3 可知,断裂两侧分别为相对隔水的古近系地层和岩溶含水层,可知南苑-通县断裂在通州地区相对隔水。

永定河断裂沿永定河河谷延伸,为物探推测的隐伏正断裂。断裂北起军庄,向南东经永成庄与南苑通县断裂斜交于立垡村后延伸至后辛庄一带,总体走向北西 32°。目前,对永定河断裂的水文地质性质也有不同认识:一种观点认为断裂带内基岩破碎,裂隙发育,岩溶含水层主要通过断裂带接受上覆第四系含水层的越流补给;另一种观点认为岩溶含水层主要通过永定河断裂接受来自西山地区的侧向补给。



1-奥陶系;2-寒武系;3-青白口系;4-模型边界;5-基岩含水层隔水边界;6-岩溶含水层的通用水头边界;7-剖面位置及编号;8-观测孔位置;9-永定河断裂带

图 1 大兴迭隆起岩溶水系统地质构造¹

Fig. 1 Geological structure of the overlapping uplift karst water system in Daxing

研究区第四系含水层主要接受大气降雨补给,年均降雨量为 536 mm 左右(1960 年-2010 年)。在研究区内分布有新河、大兴念坛、北臧村和宋庄镇四个灌区,每年接受 1 330 万 m³ 的地下水回灌量。此外,第四系含水层还接受来自永定河附近年均 1 638 万 m³ 的侧向补给。岩溶含水层则以接受第四系的越流补给为主。研究区主要排泄为人工开采,总开采量约 2.051 08 m³/a,其中基岩水开采量为 0.231 08 m³/a。

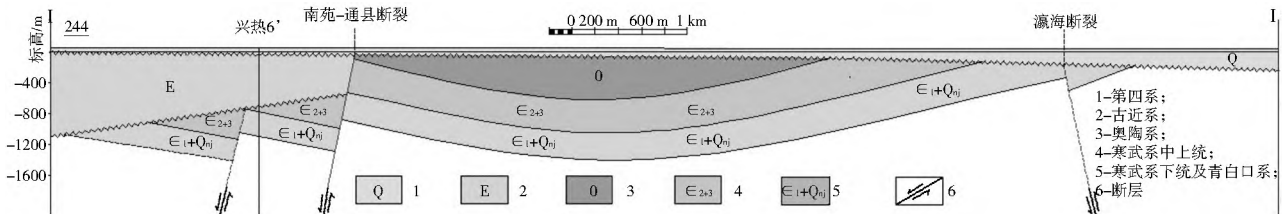


图 2 大兴向斜剖面 N-Nc

Fig. 2 Syncline section N-Nc of Daxing syncline

2 研究方法

2.1 地下水流模型

根据研究区的水文地质条件,岩溶含水层与第四系含水层有着良好的水力联系,故将第四系含水层和岩溶含水层视为一个统一的地下水流系统进行概化模拟。确定

的模型范围为 767 km²,在垂向上概化为 5 层结构:第四系潜水含水层;第四系承压水含水层;奥陶系承压含水层;寒武系中上统承压含水层;寒武系下统及青白口系承压水含水层。

¹ 根据北京市地质勘查技术院“北京市平原区基岩立体地质调查报告”改编。

利用 GMS 地下水数值模拟软件^[13], 将研究区总体剖分为 100 m × 100 m 的网格, 总体剖分为 5 层, 每层 430 行、560 列, 在第四系含水层每层有效活动单元格 76 748 个, 岩溶含水层每层有效单元格 55 560 个, 网格剖分示意图见图 4(由于第四系含水层厚度相对岩溶含水层差距较大, 示意图

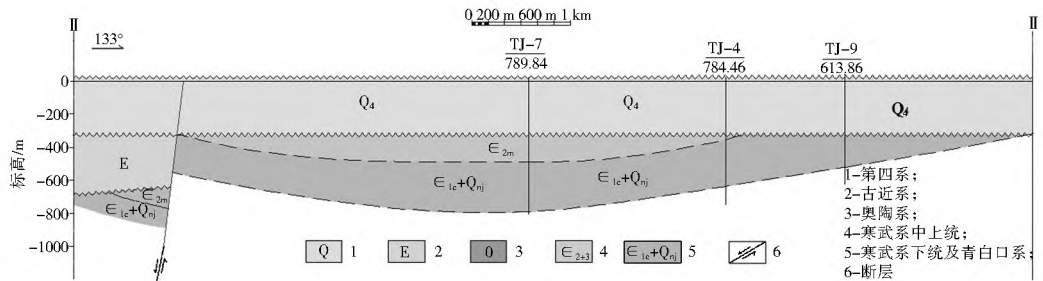


图 3 通州向斜剖面 0-0c

Fig. 3 Syncline section 0-0c of Tongzhou

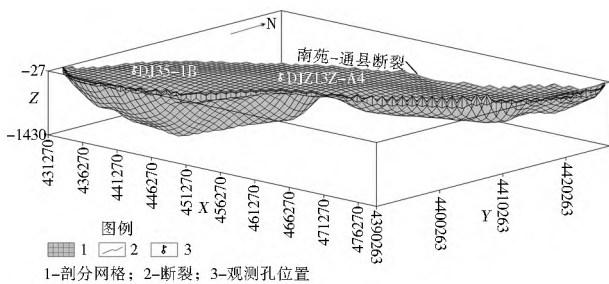


图 4 研究区网格剖分示意图

Fig. 4 Schematic diagram of mesh discretization in the study area

模型第四系根据岩性条件和流场情况, 将西北部流入边界、东部和南部流出边界设为通用水头边界, 其余为隔水边界。岩溶含水层西北部永定河道段设为通用水头边界, 其余为隔水边界^[14-15]。

根据研究区含水层埋藏条件、岩溶发育情况以及地下水补径排条件、地下水位动态、地下水流场特征等差异, 对研究区各含水层进行参数赋值。第四系潜水含水层水平渗透系数变化范围为 6~ 10 m/d, 给水度变化范围为 0.12~ 0.21, 承压含水层水平渗透系数变化范围为 10~ 100 m/d, 储水率为 $1 \times 10^{-5} \sim 8 \times 10^{-4}$ 。岩溶含水层为本次模拟的重点区域, 其水平渗透系数分区见图 5、表 1, 垂向渗透系数根据岩性分布情况设定为水平渗透系数的 1/1 000~ 1/10 000, 岩溶水储水率为 $1 \times 10^{-7} \sim 8 \times 10^{-6}$ 。模型识别阶段以调整垂向补排强度及边界条件为主, 以参数调节为辅。

2.2 断层的处理

(1) 南苑-通县断裂。按通用水头边界处理, 即从外部水源进入或流出计算单元的水流量与该计算单元水头和外部水源水头之差成正比。其数学表达式为:

$$Q = C_b (h_o - h_i) \tag{1}$$

式中: Q 为外部水源进入计算单元的流量; C_b 为外部水源与计算单元间的水力传导系数; h_o 为外部水源的水头(m); h_i 为计算单元水头(m)。在模拟过程中可以通过改变计算单元水头和外部水源水头差 Δh ($\Delta h = h_o - h_i$), 来调整研究区边界性质和边界流量: 当 $\Delta h = 0$ 时, 边界可视为隔水边界; 当 $\Delta h \neq 0$ 时, 研究区边界可视为三类边界^[16]。

仅展示了模型的立体结构)。以 2000 年 1 月地下水位作为模拟的初始地下水位, 2000 年 1 月- 2012 年 9 月为模型的识别期。以一个月为一个应力期进行模拟。最终建立了大兴迭隆起地区非均质、垂向各项异性、空间三维结构、非稳定地下水流模型。

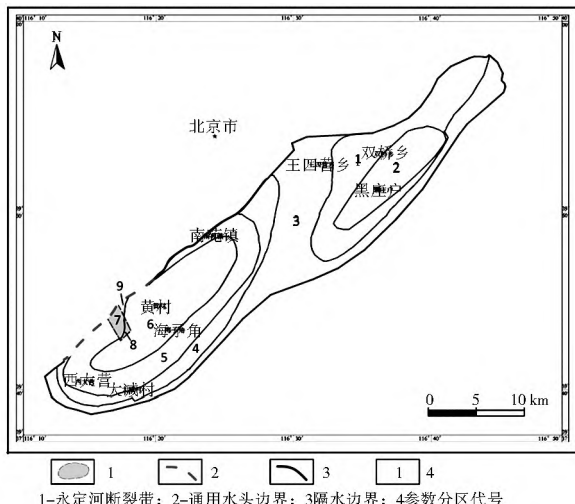


图 5 岩溶含水层渗透系数分区

Fig. 5 Hydraulic conductivity zonations in the karst water aquifer

(2) 永定河断裂影响带。对其进行独立的参数设置, 该影响带范围为长 5 000 m、宽 1 000 m 的区域。将该断裂带分别设定为侧向隔水和侧向透水两种边界条件, 再分别运行模型, 对模拟水位和观测水位进行拟合, 结合水均衡分析, 即可判断永定河断裂的水文地质性质。

表 1 岩溶含水层渗透系数(K) 识别结果

Table 1 Hydraulic conductivity values in the Ordovician karst water aquifer

分区代号	奥陶系含水层	寒武系中上统含水层	寒武系下统及青白口系含水层
1	0.005	0.005	1
2	10	10	10
3	0.001	0.001	1
4	0.01	0.01	1
5	0.08	13.68	13.68
6	15.48	13.68	13.68
7	0.08	13.68	13.68
8	15.48	13.68	13.68
9	0.08	13.68	13.68

2.3 地下水均衡方程

为了深入研究南苑-通县断裂和永定河断裂的水文地质性质以及断层对岩溶含水层补排关系的影响,结合岩溶含水层水均衡情况对断裂进行分析。

研究区岩溶地下水水量均衡方程可表示为:

$$Q_{\text{天补}} + Q_{\text{侧向流入}} - Q_{\text{开采}} - Q_{\text{侧向流出}} = Q \quad (2)$$

式中: $Q_{\text{天补}}$ 为岩溶含水层透过“天窗”得到的上覆第四系越流补给量; $Q_{\text{侧向流入}}$ 为岩溶含水层侧向边界流入量; $Q_{\text{侧向流出}}$ 为岩溶含水层侧向边界流出量; $Q_{\text{开采}}$ 为岩溶含水层地下水开采量; Q 为含水层地下水储存变化量。

3 结果分析与讨论

3.1 南苑-通县断裂边界性质的确定

通过调整计算单元水头和外部水源水头差 Δh , 对南苑-通县断裂分别做隔水边界处理和通用水头边界处理, 并进行模拟运算, 得到岩溶含水层典型观测孔(观测孔位置见图 1)的水位过程线与模拟值的拟合效果见图 6、图 7 和表 2, 岩溶含水层水量均衡计算结果见表 3。其中孔 DJ35-1B 位于研究区奥陶系含水层中部, DJZ13Z-A4 位于寒武系中上统含水层中部, 表 2 中 ΔH_1 为隔侧向水边界条件下拟合误差; ΔH_2 为透水边界条件下拟合误差。从表 2 可以看出如下情况。

(1) 当断层为隔水边界时, 奥陶系观测孔前期拟合效果较好, 后期模拟值较观测值偏大, 整体与实际观测值相差较小, 平均误差为 0.47 m。寒武系中上统观测孔拟合效果较好, 与实际观测值差别较小, 平均误差约为 0.5 m。由水量均衡情况(表 3)可知, 岩溶含水层完全由上覆第四系含水层进行越流补给。岩溶含水层年均整体亏损 24.74 万 m^3 , 与实际情况相符。

(2) 当断层为透水边界时, 奥陶系含水层观测孔前期拟合效果较好, 中后期模拟值有较明显的上升, 与实际观测值偏差较大, 平均误差为 0.83 m。寒武系含水层观测孔模拟

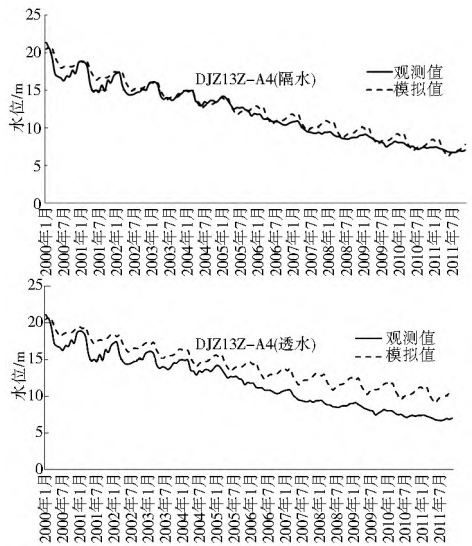


图 7 DJZ13Z A4 孔拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of observed and simulated heads in the borehole DJZ13Z A4

值与实际观测值偏差随时间持续增大, 拟合效果较差, 平均误差为 2.27 m。由水均衡情况(表 3)可知, 岩溶含水层的补给除上覆第四系的越流补给外, 还通过南苑-通县断裂边界获得约 243 万 m^3 的侧向补给, 岩溶含水层呈正均衡, 与岩溶含水层水位持续下降的事实不符。

综上所述, 研究区南苑-通县断裂应为隔水断裂。

表 2 不同边界条件拟合误差

Table 2 Fitting errors under different boundary conditions

误差	DJ35-1B	DJZ13Z-A4	平均
$\Delta H_1 / \text{m}$	0.47	0.5	0.485
$\Delta H_2 / \text{m}$	0.83	2.27	1.55
$\Delta H_3 / \text{m}$	0.55	1.75	1.15

表 3 不同边界条件下岩溶含水层水量均衡表

Table 3 Water balance of karst water aquifer under different boundary conditions

补排项	边界隔水条件下		边界透水条件下	
	岩溶含水层/万 m^3	比例 (%)	岩溶含水层/万 m^3	比例 (%)
越流补给	2 310.28	100	2 310.28	90.5
侧向补给	0		242.89	9.5
小计	2310.28		2553.17	
开采	2335.02	100	2335.02	99.8
侧向排泄	0		5	0.2
小计	2335.02		2340.02	
补排差	-24.74		213.15	

3.2 永定河断裂性质的确定

将永定河断裂段分别设置为侧向隔水边界和侧向透水边界两种情况进行模拟, 得到的模拟水位与观测水位过程线拟合效果见图 8, 水位拟合误差见表 2 (ΔH_3 为永定河断裂带透水边界条件下的拟合误差), 岩溶含水层永定河断裂带水均衡情况见表 4。分析可知:

(1) 当断裂带设为侧向隔水边界时, 模拟水位与观测水

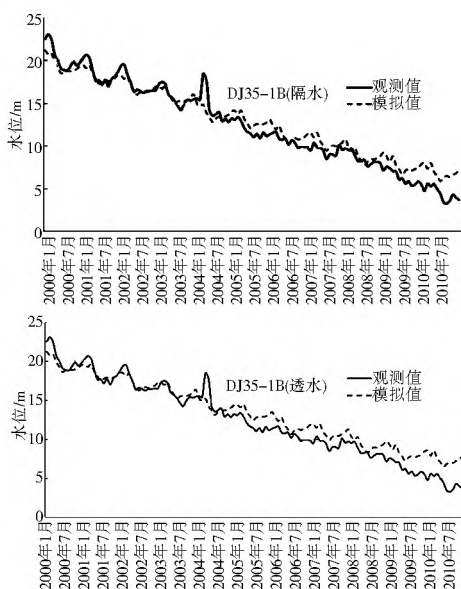


图 6 DJ35-1B 孔拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of observed and simulated heads in the borehole DJ35-1B

位拟合效果较好。由水均衡情况可知,岩溶含水层主要接受上覆第四系的越流补给,补给量约为 62.07 万 m³, 约占总补给量的 74%, 另有部分侧向补给, 含水层整体呈负均衡, 年均亏损量约为 0.65 万 m³, 与实际情况相符合。

(2) 当断裂带设为侧向透水边界时, 奥陶系含水层观测孔拟合效果与永定河断裂段整体为隔水边界的情况相比误差略大; 寒武系含水层观测孔模型模拟水位与实际观测水位偏差较大, 拟合效果较差, 平均误差为 1.75 m。由水均衡情况(表 4)可知, 岩溶含水层的补给除上覆第四系越流补给外, 增加了约 183.24 万 m³ 的侧向补给, 岩溶含水层整体为正均衡, 而这与岩溶含水层水位持续下降的事实不符。

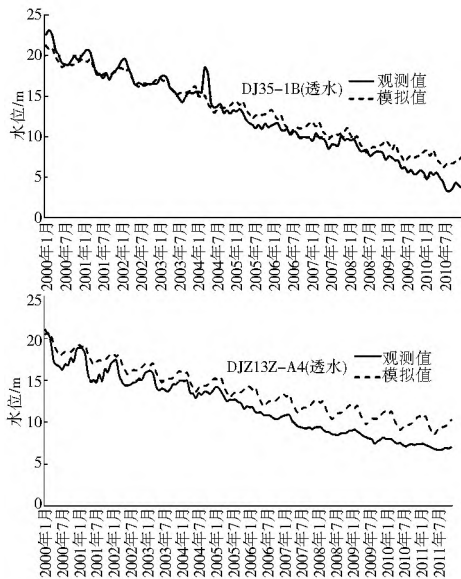


图 8 永定河断裂带透水情况下观测孔拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves of observed and simulated heads under the conditions of permeable boundary in the Yongding River fault area

综上所述可以判断, 研究区永定河断裂段为侧向隔水边界。

表 4 永定河断裂带不同边界条件下岩溶含水层水量均衡表

Table 4 Water balance of karst water aquifer in the Yongding River fault area under different boundary conditions

补排项	边界隔水条件下 岩溶含水层永定 河断裂带/万 m ³	比例 (%)	边界透水条件下 岩溶含水层永定 河断裂带/万 m ³	比例 (%)
越流补给	62.07	73.95	58.63	24.24
侧向补给	21.87	26.05	183.24	75.76
小计	83.94		241.87	
开采	37.72	44.59	37.72	59.85
侧向排泄	46.87	45.01	25.30	40.15
小计	84.59		63.02	
补排差	-0.65		178.85	

3.3 讨论

本次模拟通过改变模型的边界类型, 利用模拟水位过程线与观测水位线的拟合效果和水平衡计算结果为依据, 判断出大兴迭隆起地区南苑-通县断裂和永定河断裂均为侧向隔水断裂。为研究地质结构复杂地区的水文地质条件提供了一种快速、有效的方法即数值模拟法。但是, 由于研究区观测孔较少, 且距离断层较远, 水位过程线拟合效果偏差偏大。

因此, 今后还应收集断裂带附近观测孔水位与模型模拟水位进行拟合, 对数值模拟法的适用性和可靠性进行验证。

本文所用假设均建立在含水介质相对均匀且岩性相对单一的理想条件下。然而岩溶地区的地质结构和水文地质条件极为复杂, 因此在含水层介质为非均质各向异性的条件下, 应用该方法时需结合实际情况慎重考虑。

参考文献(References):

[1] 张宗祜, 李烈荣. 中国地下水资源[M]. 北京: 中国地图出版社, 2004. (ZHANG Zong hu, LI Lie rong. Groundwater Resource in China[M]. Beijing: Sinomap Press of China, 2004. (in Chinese))

[2] 方向清, 傅耀军, 华解明, 等. 北方岩溶地下水系统模式及特征[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2011, 38(2): 286-291. (FANG Xiang-qing, FU Yao-jun, HUA Jie-ming, et al. Patterns and Characteristics of Karst Groundwater in North China [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2011, 38(2): 286-291. (in Chinese))

[3] 梁永平, 王维泰. 中国北方岩溶水系统划分与系统特征[J]. 地球学报, 2010, 31(6): 860-868. (LIANG Yong-ping, WANG Wei-tai. System Partition and Characteristics of Karst Groundwater in North China [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2010, 31(6): 860-868. (in Chinese))

[4] 廖资生. 北方岩溶的主要特征和岩溶储水构造的主要类型[M]. 北京: 地质出版社, 1978. (LIAO Zi-sheng, Features and Types of Karst Water Reservoir in North China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1978. (in Chinese))

[5] 李大虎. 探地雷达在探测地下隐伏岩溶中的应用[J]. 重庆工学院学报(自然科学), 2009, 23(2): 50-54. (LI Da-hu. Application of Ground Penetrating Radar in Detecting Karst Hidden under the Pier [J]. Journal of Chongqing Institute of Technology (Natural Science), 2009, 23(2): 50-54. (in Chinese))

[6] 马致远. 环境同位素方法在平凉市岩溶地下水研究中的应用[J]. 地质评论, 2004, 50(4): 433-439. (MA Zhi-yuan. Application of Studying Karst Groundwater with Environmental Isotope Method in Pingliang City [J]. Geological Review, 2004, 50(4): 433-439. (in Chinese))

[7] 张慧, 张新基. 水文地质学中的环境同位素[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006. (ZHANG Hui, ZHANG Xin-ji. Environmental Isotopes in Hydrogeology [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2006. (in Chinese))

[8] 王恒纯. 同位素水文地质概论[M]. 北京: 地质出版社, 1991. (WANG Heng-chun. Hydrogeological Conspectus on Isotopes [M]. Beijing: Geological Press, 1991. (in Chinese))

[9] Leybourne M I, C lark ID, Goodfellow W D. Stable isotope geochemistry of ground and surface waters associated with undisturbed massive sulfide deposits; constraints on origin of waters and water-rock reactions [J]. Chemical Geology, 2006, 231: 300-325.

[10] 虎维岳, 郑刚, 闫兰英. 应用化学示踪技术探查深部岩溶发育特征研究[J]. 中国岩溶, 2010, 29(2): 205-211. (HU Wei-yue, ZHENG Gang, YAN Lan-ying. Study of Characteristics of Deep Karst Development with the Application of Chemical Tracer Technique [J]. Carsologica Sinica, 2010, 29(2): 205-211. (in Chinese))

(下转第 213 页)

- Ser. A, 1995, 10(2): 146-154. (in Chinese)
- [5] 洪滴. 公伯峡水电站右岸旋流泄洪洞的选型[J]. 水力发电, 2004, 30(8): 22-24. (HONG Di. Type Selection of Gyration flow Spillway Tunnel in the Right Bank of the Gongboxia Hydropower Station[J]. Water Power, 2004, 30(8): 22-24. (in Chinese))
- [6] 汪振, 牛争鸣, 李嘉. 水平旋流泄洪洞的综合水力特性[J]. 西安理工大学学报, 2007, 23(1): 14-19. (WANG Zhen, NIU Zhengming, LI Jia. Synthetical Hydraulic Characteristics of Level Rotary Discharge Tunnel[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2007, 23(1): 14-19. (in Chinese))
- [7] 李忠义, 陈霞, 陈美法. 导流洞改建为孔板泄洪洞水力学问题研究[J]. 水利学报, 1997, (2): 1-7. (LI Zhongyi, CHEN Xia, CHEN Meifa. Study on Hydraulic Problems of Spillway Tunnels with Orifices Reformed from Diversion Tunnel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, (2): 1-7. (in Chinese))
- [8] 林秀山, 沈凤生. 小浪底水利枢纽孔板泄洪消能研究[J]. 水利水电技术, 2000, 30(1): 52-54. (LIN Xiushan, SHEN Fengming. Study on Multi-orifices Energy Dissipation for Xiaolangdi [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2000, 30(1): 52-54. (in Chinese))
- [9] 时启燧. 高速水气两相流[M]. 中国水利电力出版社, 2007. (SHI Qisui. High Speed Water-air Two phase Flow[M]. Water Conservancy & Power Press, 2007. (in Chinese))
- [10] 董兴林, 郭军, 肖白云. 高水头大流量旋流竖井式泄洪洞的设计研究[J]. 水利学报, 2000, (11): 27-31. (DONG Xinglin, GUO Jun, XIAO Baiyun. Design Principle of High Head and Large Discharge Vortex Drop Spillway[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, (11): 27-31. (in Chinese))
- [11] 宁黎元, 熊书宁. 数值模拟查明地下水系统隐伏边界位置及其性质方法探讨[J]. 贵州地质, 2012, 29(1): 48-51. (NING Liyuan, XIONG Shuning. Study on the Hidden Boundary Location and Its Property of Groundwater System By Numerical Simulation [J]. Guizhou Geology, 2012, 29(1): 48-51. (in Chinese))
- [12] Panagopoulos G. Application of MODFLOW for simulating groundwater flow in the Trifilia karst aquifer, Greece [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 67: 1877-1889.
- [13] 吕晓俭, 李宇. 北京市通州区龙旺庄隐伏灰岩水源地勘查与评价研究[J]. 水文地质工程地质, 1999, (2): 17-21. (LV Xiaojian, LI Yu. Investigation and Evaluation Research of Long Wangzhuang Concealed Limestone Water Source in Tongzhou District Beijing [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1999, (2): 17-21. (in Chinese))
- [14] 赵起超, 王晓红. 北京市大兴县念坛水源地供水水文地质详查报告[R]. 1993. (ZHAO Qichao, WANG Xiaohong. Detailed Report on Water-supply Hydrogeology in Niantan Water Source, Daxing, Beijing [R]. Hydrogeological and Engineering Geological Team of Beijing, 2001. (in Chinese))
- [15] 祝晓彬. 地下水模拟系统(GMS)软件[J]. 水文地质工程地质, 2003, (5): 53. (ZHU Xiaobin. Groundwater Modeling System (GMS) Software [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2003, (5): 53. (in Chinese))
- [16] McDonald M G, Harbaugh A W. A modular three-dimensional finite difference groundwater flow model [R]. Techniques of Water-Resources Investigations of USGS. Book 6, Chapter A1. 1988.
- [17] Harbaugh A W, MODFLOW-2005, The U S Geological Survey Modular Ground Water Model: The Ground Water Flow Process, the U S Geological Survey Techniques and Methods 6-A16 [R]. Reston, Virginia: the U S Geological Survey, 2005.
- [18] 薛禹群, 吴吉春. 地下水动力学(第三版) [M]. 北京: 地质出版社, 2010. (XUE Yiqun, WU Jichun. Groundwater Dynamics (third edition) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010. (in Chinese))

(上接第 147 页)