

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.02.010

地热井井间干扰模拟研究——以重庆观音峡背斜东翼为例

吕玉香^{1,2}, 蒋 晶², 杨平恒¹, 谢 斌², 胡 伟²

(1. 西南大学 地理科学学院, 重庆 400715; 2. 重庆市地质矿产勘查开发局 208 水文地质工程地质队, 重庆 400700)

摘要:岩溶含水介质的地下水模拟与应用是水文地质工作中的热点与难点。基于 Visual Modflow 软件平台, 选用重庆观音峡背斜东翼静观片区作为研究对象, 利用区内 3 口地热井(ZK1、ZK1-1、ZK3)多次抽水试验资料, 建立数值模拟模型, 预测分析了不同条件下新增地热井与已有 ZK1 井井间干扰程度。结果表明: 当新增井与 ZK1 井的距离和新增井开采量分别为 1 km 和 500 m³/d, 2 km 和 1 000 m³/d, 5 km 和 1 500, 2 000, 2 500 m³/d 时, 对 ZK1 附近流场均无影响; 当新增井与 ZK1 井的距离和新增井开采量分别为 1 km 和 1 000 m³/d, 2 km 和 1 500 m³/d, 5 km 和 3 000 m³/d 时, ZK1 井水头分别下降 19, 13 和 8 m。说明地热井井间距越小, 开采量越大, 对相邻井产生干扰的可能性越大, 反之越小, 同时说明利用 Visual Modflow 模型模拟地热水流场特征, 预测地热井干扰程度这一方法是可行的。

关键词:地热; 井间干扰; 数值模拟; Visual Modflow; 观音峡背斜

中图分类号: P641

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2019)02-093-11

Simulation of interwell interference in geothermal well —take the east wing of Guanyinxia anticline in Chongqing as an example

LYU Yuxiang^{1,2}, JIANG Jing², YANG Pingheng², XIE Bin², HU Wei²

(1. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400700, P. R. China;

2. 208 Hydrogeological Team under the Chongqing Geological Bureau of geology and Minerals Exploration, Chongqing 400700, P. R. China)

Abstract: Groundwater simulation and application of karst water-bearing medium are hot spots and difficulties in hydrogeological work. In this research, Jingguan area in the east wing of the Guanyinxia anticline was selected as the research object, and the multiple pumping test data of 3 geothermal wells were obtained. Based on Visual Modflow software platform, the numerical simulation model was established, and interwell interference degree of the geothermal well with the exexisting UK1 in different conditions was calculated. The results show that: when the distance between a new drill and ZK1 and its mining amount is 1 km and 500 m³/d, 2 km and 1 000 m³/d, 5 km and 1 500 m³/d, 2 000 m³/d and 2 500 m³/d, respectively, there is no effect on the flow field near the ZK1; when the distance between a new drill and

收稿日期: 2018-10-02

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0502302); 重庆市国土局科研项目(KJ-2016015)。

Supported by the National Key Research and Development Program of China(2016YFC0502302) and Scientific Research Project of Chongqing Land and Resources Bureau (KJ-2016015).

作者简介: 吕玉香(1984—), 女, 西南大学博士研究生, 高级工程师, 主要从事水文地质科研与生产工作, (E-mail) lvyx02@163.com。

ZK1 and its mining amount is 1 km and 1 000 m³/d, 2 km and 1 500 m³/d, 5 km and 3 000 m³/d, the water head of ZK1 well decreases by 19 m, 13 m and 8 m respectively, illustrating that the smaller the spacing of geothermal wells and the larger the mining volume, the greater the probability of interference with adjacent wells. It proves feasible to simulate the characteristics of geothermal flow field using the Visual Modflow model.

Keywords: geothermal; interwell interference; numerical simulation; visual modflow; guanyinxia anticline

地热井井间干扰是指某一地热井抽(放)水时,对相邻地热井的水量、水位及水温等产生影响的现象。重庆作为著名的温泉之都,其地热资源丰富,品质优良,地热水资源开发带来的经济效益也令人瞩目。然而,在地热水资源勘查开发中,井间干扰现象普遍存在,其干扰程度如何?合理的井间距是多少?目前鲜有研究,这对合理布井和开发也造成了一定的困难。由于地热水主要赋存于深部岩溶含水介质中,具有高度的非均质性和各向异性,定量刻画其地下水水流特征,便成为多年来水文地质工作的热点与难点,因此,开展地热水水流特征模拟研究,定量评估地热井间的干扰程度,具有重要的科学与现实意义。

Visual Modflow 软件是由加拿大 Waterloo Hydrogeologic Inc 在美国地质调查局 Modflow 软件(1984 年)的基础上应用可视化技术开发研制的,其基本原理就是应用有限差分法对渗流场进行离散求解,得到离散点上的近似值,它已广泛应用于模拟二维、三维饱和流状态下的水流和污染物运移,如刘淑琴等^[1]以挥发酚为例,建立了地下水流运动和污染物迁移数学模型,利用 Visual Modflow 中的 Modflow 和 Mt3dms 模块求解,对气化炉闭炉后的污染物迁移规律进行了数值模拟,结果拟合性良好;朱常春等^[2]基于 Visual Modflow 软件分析了相邻矿山干扰开采对地下水水流场的影响;刘永良等^[3]基于 Visual Modflow 软件准确预测鹤壁矿区寺湾矿矿井涌水量和水位降深。

目前,针对孔隙介质,地下水数值模拟较为成熟,而针对管道-裂隙-空隙三重介质并存的岩溶含水系统,其应用相对较少。不少学者在系统概化和模块改进等方面进行了尝试与探索,并取得了一定的成效:1998 年,成建梅等^[4]以广西环江北山岩溶含水系统为例,建立岩溶管道-裂隙-孔隙三重介质地下水模型;2013 年,Gallegos 等^[5]以室内水箱模型为基础,应用 Modflow-CFP 探索岩溶管道水流模拟方法;2014 年,肖斌等^[6]基于 Modflow 对岩溶管道概化进行探讨,从理论上阐述不同模块概化岩溶管道的优缺点;赵良杰等^[7]以 Modflow 为基础,以广西寨底岩溶地下河系统为实例,对比分析不同方法概化岩溶管道结构,认为相对 Drain 模块而言,应用 River 模块概化模拟岩溶管道更加精确。目前国内对深层地热水数值模拟研究较少,为此,笔者选用地热勘查程度较高的重庆观音峡背斜北段东翼静观片区作为研究对象,尝试利用 Visual Modflow 软件建立该片区的地下水流数值模拟模型,预测分析不同开采方案下的井间干扰程度,以期地为地热资源勘查合理布井提供依据。

1 研究区概况

研究区位于重庆市北碚区东北部,嘉陵江东岸,面积 45 km²。地势总体趋势北东高,向南西延伸逐渐降低,属亚热带季风气候,极端最高气温 42 ℃ 左右,极端最低气温 -2 ℃ 左右,年均降雨量 1 000 mm 以上。本区属于长江水系,嘉陵江为长江流域主要支流,切割深度 400~500 m,为本区最低侵蚀基准面。本区处于观音峡背斜北段东翼,主要发育第四系(Q)、侏罗系(J)、三叠系(T)地层(图 1)。区内地热水热储层为三叠系下统嘉陵江组(T_{1j})和中统雷口坡组(T_{2l}),热储盖层为三叠系上统须家河组(T_{3xj})和侏罗系(J),热储下部隔水层为三叠系下统飞仙关组(T_{1f}),其中主要热储层为三叠系下统嘉陵江组第二、三、四段(T_{1j}²⁺³⁺⁴),次要热储层为三叠系下统嘉陵江组一段(T_{1j}¹)及中统雷口坡组(T_{2l})。研究区已成功施工地热井 3 口,分别为 ZK1、ZK1-1、ZK3(表 1),其钻井热储层的柱状对比图见图 2,各井的主要出水段分别为 T_{1j}²⁺³⁺⁴、T_{1j}²、T_{1j}²⁺³,其岩性主要为灰岩、白云质灰岩及白云岩,据钻井过程中水文地质观测,由于灰岩、白云岩中岩溶管道发育具有极大的空间异质性,致使相邻区域统一地层的钻井涌水量差异较大。完井后各井分别进行了抽(放)水试验,其降深及对应的出水量差异极大(表 1),以此为基础计算出的渗透系数差别也较大。

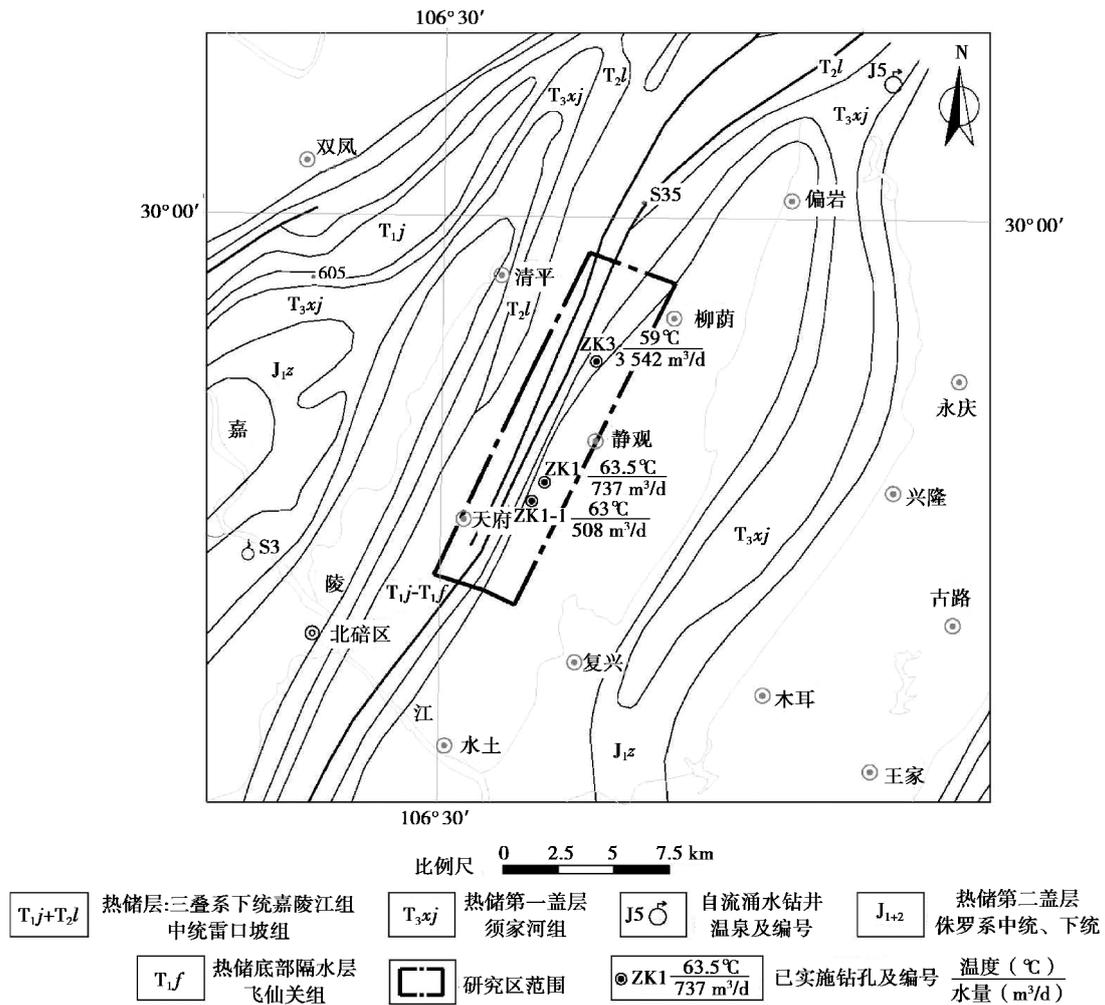


图 1 研究区地热地质简图

Fig. 1 The schematic of geothermal geology in the study area

表 1 研究区已施工钻孔统计表

Table 1 Statistics of construction drilling in the study area

地热井名称	井口坐标	井口标高/ m	主要热储层及岩性	水温/ °C	流量/ (m ³ ·d ⁻¹)	降深/ m	影响半径/ m	渗透系数/ (m·d ⁻¹)
ZK1	106°32'18.33", 29°52'24.68"	325.8	T _{1j} ²⁺³⁺⁴ 灰岩、白云质 灰岩、白云岩	63.5	474.47	127.0	357.07	0.079 0
ZK1-1	106°32'3.93", 29°51'56.81"	350.0	T _{1j} ² 白云岩	63.0	296.35	457.2	446.00	0.009 5
ZK3	106°32'00", 29°45'30"	390.0	T _{1j} ²⁺³ 灰岩、白云质灰 岩、白云岩	59.0	3 542.00	60.0	543.00	0.820 0

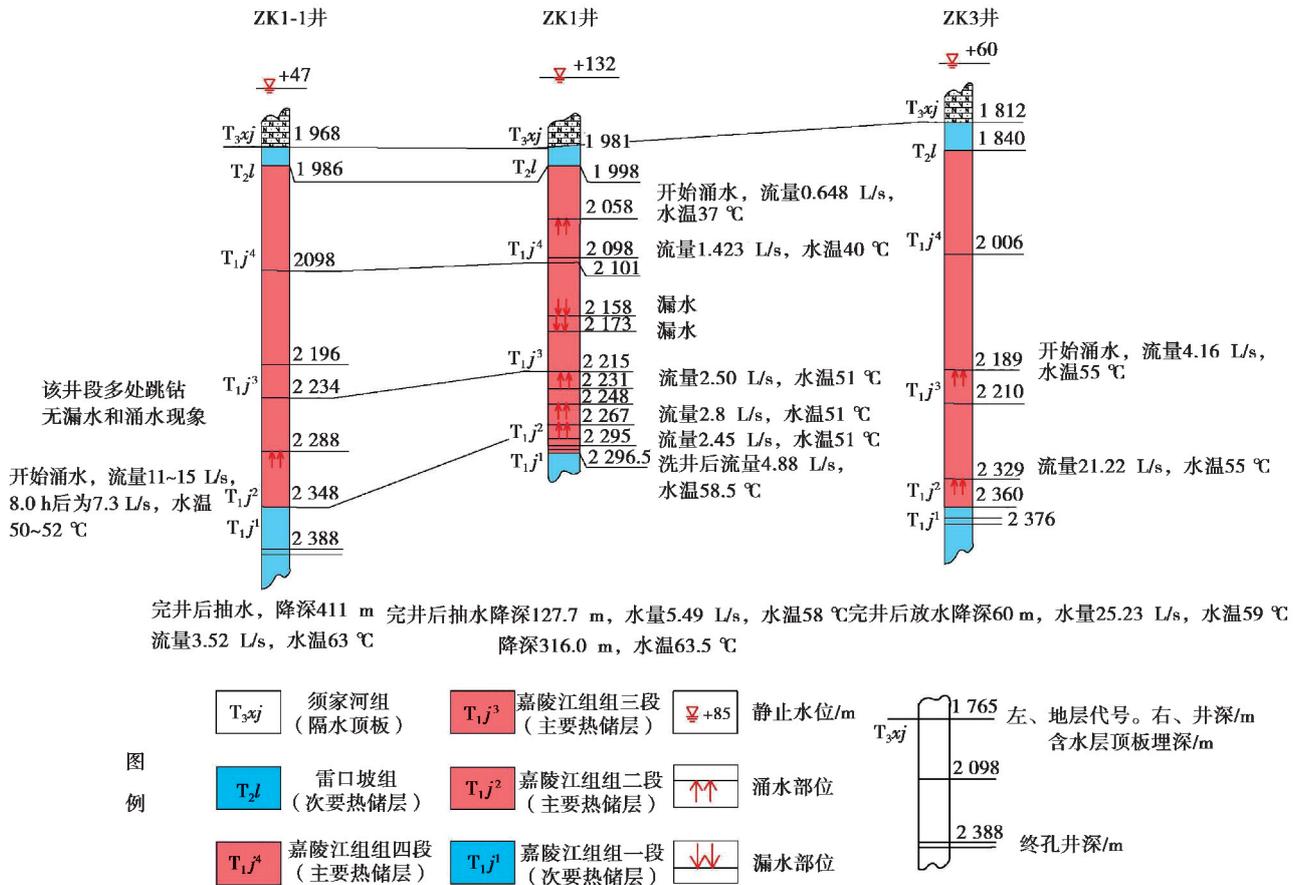


图 2 钻井热储层柱状对比图
Fig. 2 Columnar contrast of hot reservoir in drills

2 概念模型的建立

2.1 水文地质概念模型

水文地质概念模型是对水文地质条件的简化, 是对地下水系统的科学概化^[8], 研究区地热水热储层为嘉陵江组(T_{1j})和雷口坡组(T_{2l}), 也是本次模拟研究的目的层, 整体上该含水层可概化成非均质-各向异性的潜水-承压水含水层。

研究一个目标系统对地下水的影响时, 当周边没有第一类边界条件或者距离较远时, 可以以目标系统的边界为基础往四周延伸 3~5 km 作为模拟区的边界, 概化为二类流量边界^[9-10]。因此, 模型的南、北两侧作为二类流量边界进行处理。含水层上部 $J+T_{3xj}$ 地层和下部的 T_{1f} 地层, 作为隔水层处理。研究区边界概化如图 3 所示。

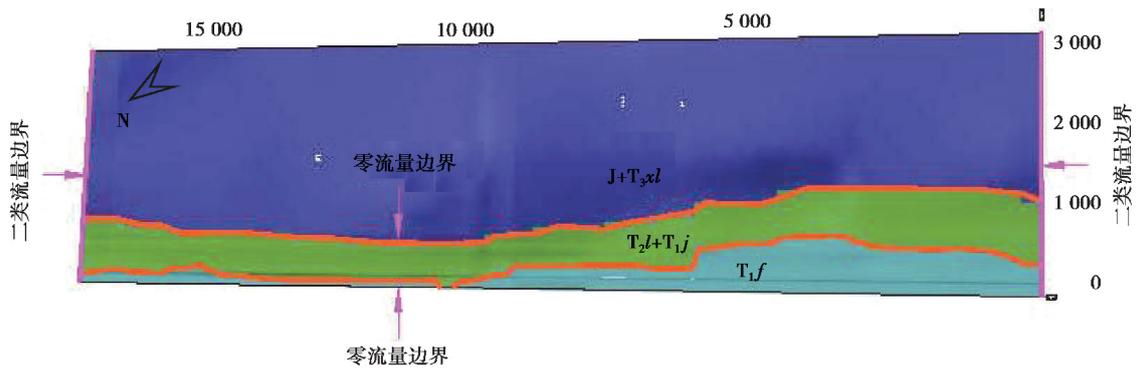


图 3 研究区边界条件概化

Fig. 3 The sketch of boundary conditions of the study area

2.2 数学模型的建立

根据水文地质概念模型及含水岩组的水力性质,可将模拟区地下水流概化成非均质各向同性、非稳定地下水系统,并建立相应的数学模型:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = u_s \frac{\partial h}{\partial t}, \\ h(x, y, t) |_{t=0} = h_0(x, y), (x, y) \in D, \\ h(x, y, z, t) |_{\Gamma_1} = h(x, y, z, t), (x, y, z) \in \Gamma_1, t \geq 0, \\ k \frac{\partial h}{\partial n} |_{\Gamma_2} = q(x, y, z, t), (x, y, z) \in \Gamma_2, t > 0. \end{cases}$$

式中: k_x, k_y, k_z 分别为渗透系数在 x, y, z 方向的分量, m/d ; h 为地下水水位, m ; W 为单位体积流量,用以表示流进源或流出汇的水量; u_s 为含水岩组的储水率, L/m ; $h_0(x, y, z)$ 为已知水位分布, m ; t 为时间, h ; D 为模拟区范围; Γ_1 为一类边界; Γ_2 为二类边界; n 为边界上的外法线方向; q 为二类边界上的已知流量分布。

2.3 网格的剖分

根据 Visual Modflow 地下水流数值模型要求,将模型 3 层采用网格剖分,并对 ZK1、ZK1-1、ZK3 地热井所在位置进行网格细分,平面上将计算区域剖分成为 75 行 29 列,共 2 175 个网格。

2.4 参数的初值

利用 ZK1 井 2010 年 1 月 19 日~22 日、ZK1-1 井 2012 年 11 月 25 日~28 日、ZK3 井 2016 年 12 月 17 日~20 日抽(放)水试验获取水文地质参数初值(表 1)。3 口井渗透系数差异很大,分析其直接原因是深部白云岩、灰岩中岩溶管道、岩溶裂隙等(岩溶发育程度)发育极不均一,即具有极大的空间异质性。但受目前勘查技术手段及深井钻探成本的限制,无法详细了解整个研究区(3 个钻井以外)的深部岩溶发育情况,故采用插值法确定区域渗透系数。插值后生成渗透系数等值线图作为参数初值,目标含水层的渗透系数为 $0.01 \sim 0.82 m/d$ (图 4)。

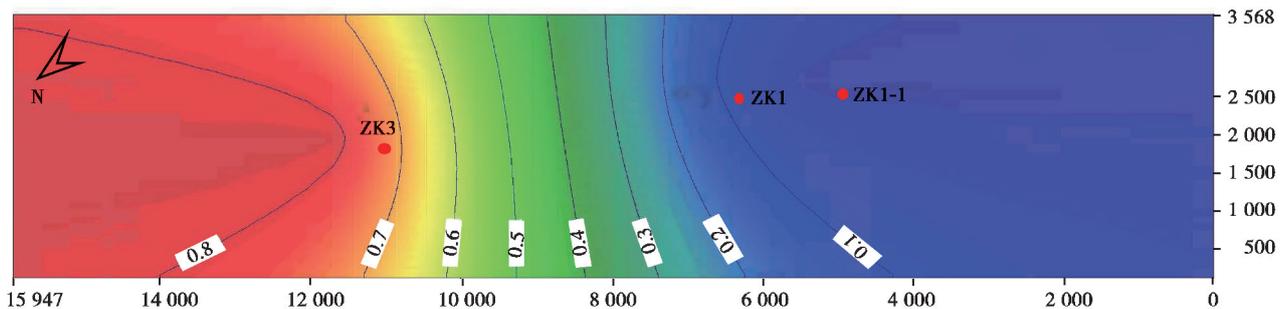


图 4 目标含水层的渗透系数等值线图(单位: m/d)

Fig. 4 Osmotic coefficient contour map of the target aquifer (unit: m/d)

2.5 模型的识别与验证

模型识别与检验的目的是检验所建数学模型在识别与验证期受各种因素激励后地下水动力场与实测值时空分布的一致性,分析数学模型对地下水系统的行为和功能的适应性,深化对水文地质条件的认识,确定水文地质参数^[11-12]。

利用 ZK1 井 2010 年 12 月、ZK1-1 井 2013 年 7 月、ZK3 井 2017 年 5 月抽(放)水试验资料对模型进行识别和验证。通过调整水文地质参数和边界条件,使计算的水头值与实测的水头值之差最小,以取得最佳的拟合效果。ZK1、ZK1-1 水头观测值与计算值的偏离误差见图 5~6 及表 2~3。

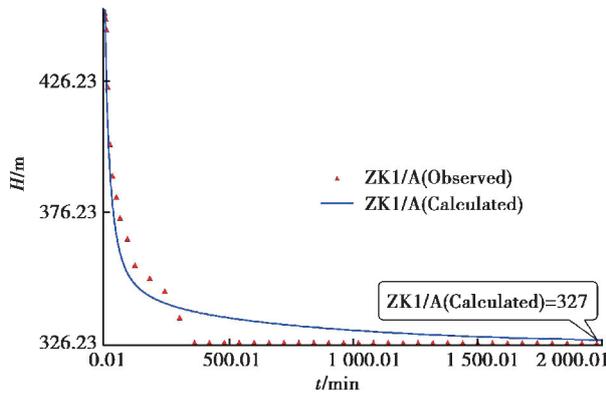


图 5 ZK1 井水头计算值与观测值拟合曲线
Fig. 5 The calculation and observation value fitting curve of the ZK1 well

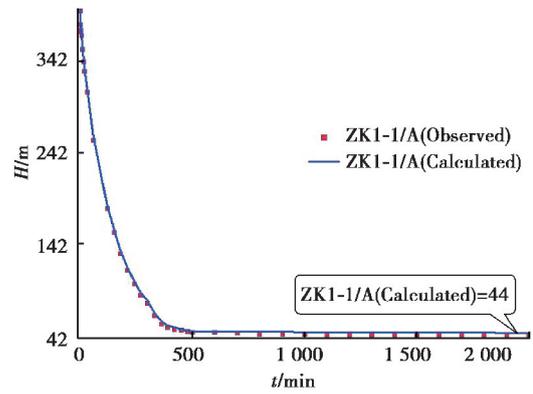


图 6 ZK1-1 井水头计算值与观测值
Fig. 6 The calculation and observation value fitting curve of the ZK1-1 well

表 2 ZK1 井水头计算值与观测值对比表

Table 2 Comparison of water head calculation value and observation value of ZK1 well

t/min	ZK1 水头计算值/m	ZK1 水头观测值/m	偏差/m
0.01	453.33	452.00	1.33
20.00	391.00	402.00	-11.00
120.00	348.74	356.00	-7.26
240.00	341.45	346.00	-4.55
360.00	338.21	326.50	11.71
600.00	334.56	326.46	8.10
960.00	331.35	326.40	4.95
1 200.00	329.94	326.36	3.58
1 500.00	328.66	326.31	2.35
1 800.00	327.80	326.26	1.54
平均	352.50	351.43	1.08

表3 ZK1-1井水头计算值与观测值对比表

Table 3 Comparison of water head calculation value and observation value of ZK1-1 well

t/min	ZK1-1 水头计算值/m	ZK1-1 水头观测值/m	偏差/m
0.00	397.00	397.00	0.00
20.00	334.00	331.00	3.00
120.00	184.00	181.00	3.00
240.00	101.00	98.00	3.00
360.00	57.00	54.00	3.00
500.00	46.00	45.00	1.00
600.00	46.00	44.80	1.20
1 200.00	45.00	42.10	2.90
1 500.00	45.00	42.00	3.00
1 800.00	45.00	42.00	3.00
平均	130.00	127.69	2.31

通过数据分析,ZK1 观测值与计算值的残差均值为 1.08 m,ZK1-1 观测值与计算值的残差均值为 2.31 m,说明模型的拟合程度较好。

通过反复调整参数,识别了研究区的水文地质条件,确定了模型结构、参数,在此基础上,对研究区含水层的模拟水头值与初始水头值进行对比分析(图7)。通过模型识别,模型的水头动态曲线与实测的水头曲线达到了较好的拟合,两者的动态变化过程也比较吻合,模拟的流场基本反映了地下水流的现状特征,流场拟合情况较好。其成果可以用于在不同干扰条件下地下水流场预测。

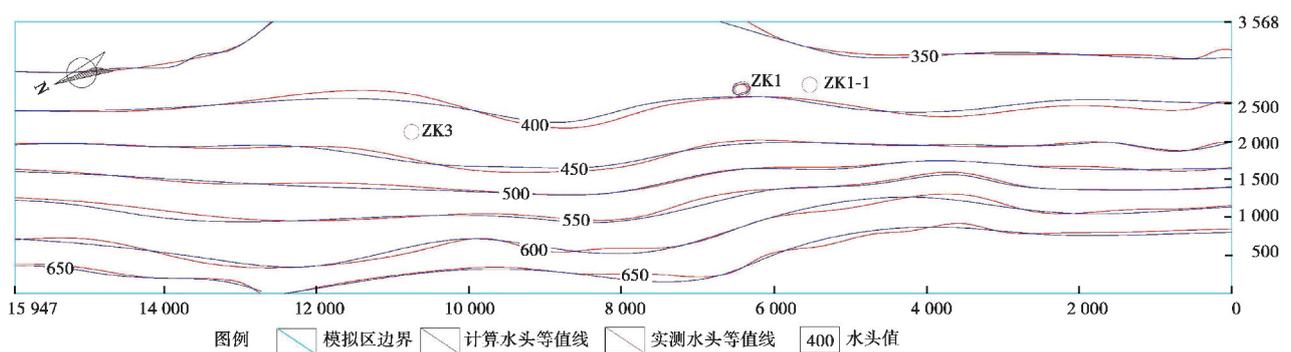


图7 识别阶段地热水水头高度拟合图(单位:m)

Fig. 7 The fitting figure of the geothermal water in recognition phase (unit: m/d)

2.6 识别的结果

通过模型的识别和验证,获得了含水层的水文地质参数,水平渗透系数 $K_{xx} = K_{yy} = 0.011 \text{ 0 m/d}$,垂直渗透系数 $K_{zz} = 0.001 \text{ 1 m/d}$,每年降雨补给量 500 mm。

3 模型预测

地热井井间距和开采量是影响井间干扰的重要因素,笔者拟通过改变地热井的井间距和开采量,预测不同条件下地热水流场的变化。本次假定在区内增加一个钻孔,其开孔层位均为侏罗系中统上沙溪庙组(J_2s^2),终孔层位为三叠系下统嘉陵江组第一段(T_{1j}^1),当该井开采时,其余现有钻井均不开采。拟定了 3 种开采方案,对假定新增的钻井设置不同的井间距与开采量(表 4),预测不同方案下区内地下水场变化,从而判定新增井是否对现有 ZK1 井产生干扰。

表 4 不同开采方案下模拟区地下水流场的变化
Table 4 Variation of groundwater flow field under different mining schemes

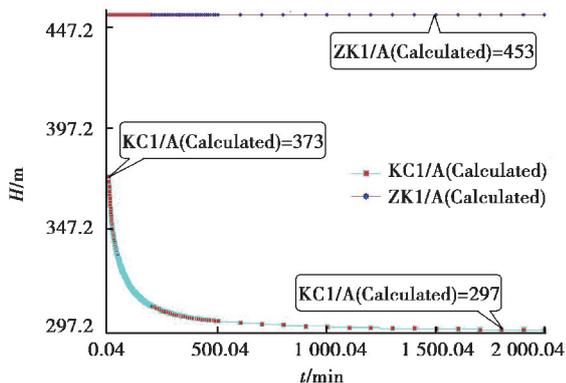
方案	拟布开采井 编号	与 ZK1 井间距/ km	假定开采量/ ($m^3 \cdot d^{-1}$)	流场变化情况
1	KC1	1	500	无变化
			1 000	有影响
2	KC2	2	1 000	无变化
			1 500	有影响
3	KC3	5	1 500	无变化
			2 000	无变化
			2 500	无变化
			3 000	有影响

按照拟定的开采方案,运用识别和验证的地下水流数值模型进行模拟,预测了拟定开采井对已有井 ZK1 的影响(图 8)。

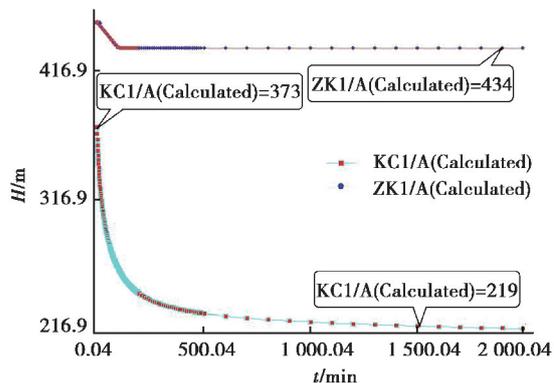
由图 8(a)(b)可知,当距离 ZK1 井 1 km 的 KC1 井开采量为 $500 m^3/d$ 时,约 8.0 h 后以 KC1 井为中心形成降落漏斗,水头约下降 76 m,ZK1 井水头未发生变化,始终维持在 +453 m 左右,对 ZK1 附近流场无影响;假定开采量为 $1 000 m^3/d$,约 14.0 h 后以 KC1 井为中心会形成降落漏斗,水头约下降 154 m,ZK1 井地下水头也发生变化,即以 ZK1 井为中心形成降落漏斗,约 1.6 h 后水头约下降 19 m,对 ZK1 井产生干扰。

由图 8(c)(d)可知,当距离 ZK1 井 2 km 的 KC2 井假定开采量为 $1 000 m^3/d$ 时,约 10.0 h 后以 KC1 井为中心形成降落漏斗,水头约下降 115 m,ZK1 井水头未发生变化,始终维持在 +453 m 左右,对 ZK1 附近流场无影响;假定开采量为 $1 500 m^3/d$ 时,约 20.0 h 后以 KC2 井为中心会形成降落漏斗,水头约下降 154 m,ZK1 号井水头也发生变化,即以 ZK1 井为中心形成降落漏斗,约 1.6 h 后水头约下降 19 m,对 ZK1 井产生干扰。

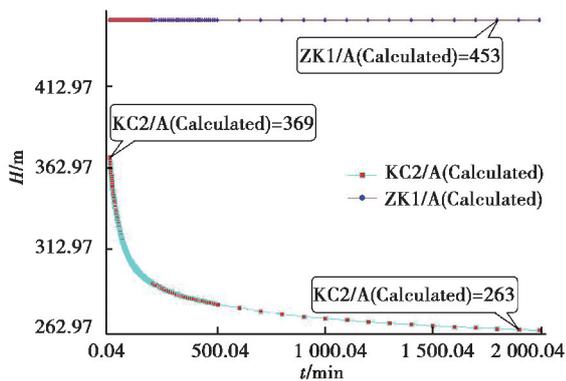
由图 8(e)~(h)可知,当距离 ZK1 井 5 km 的 KC3 井假定开采量为 $1 500, 2 000, 2 500 m^3/d$ 时,分别在约 25.0, 28.0, 30.0 h 后以 KC3 井为中心形成降落漏斗,水头分别会下降 58, 111, 165 m,ZK1 井水头均未发生变化,对 ZK1 附近流场均无影响;假定开采量为 $3 000 m^3/d$ 时,以 KC3 井为中心会形成降落漏斗,约 31.0 h 后水头约下降 111 m,ZK1 井水头也发生变化,即以 ZK1 井为中心形成降落漏斗,约 3.5 h 后水头约下降 8 m,对 ZK1 井产生干扰。



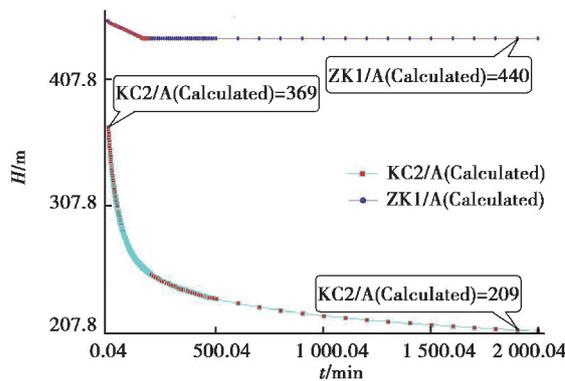
(a) 抽水量500 m³/d时KC1井对ZK1井影响



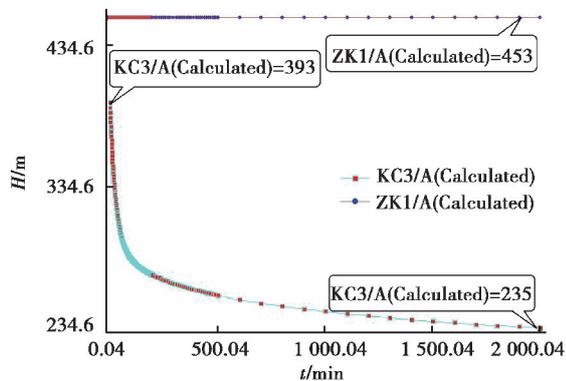
(b) 抽水量1 000 m³/d时KC1井对ZK1井影响



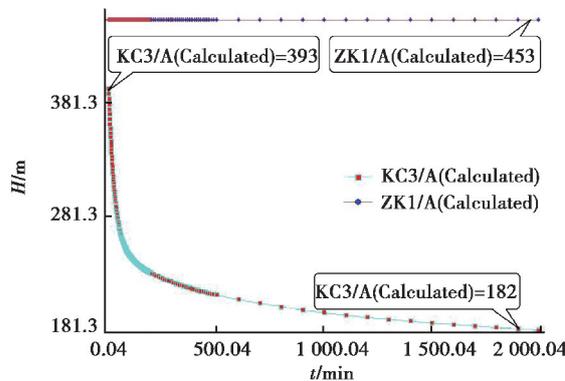
(c) 抽水量1 000 m³/d时KC2井对ZK1井影响



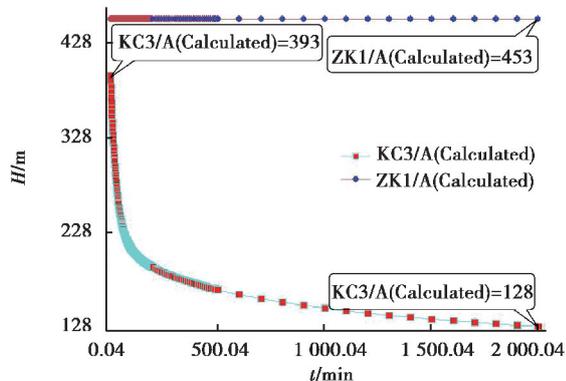
(d) 抽水量1 500 m³/d时KC2井对ZK1井影响



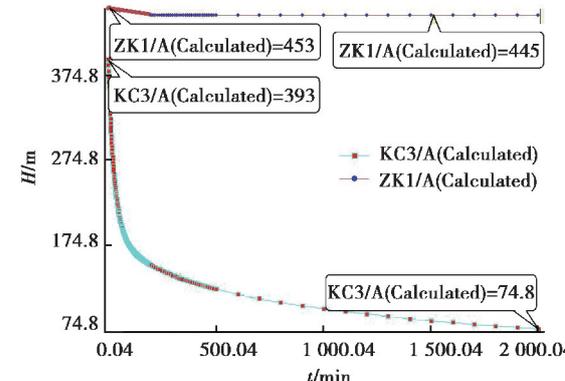
(e) 抽水量1 500 m³/d时KC3井对ZK1井影响



(f) 抽水量2 000 m³/d时KC3井对ZK1井影响



(g) 抽水量2 500 m³/d时KC3井对ZK1井影响



(h) 抽水量3 000 m³/d时KC3井对ZK1井影响

图 8 拟布地热井不同开采方案下对 ZK1 井的影响

Fig. 8 The effects of the mining well to be installed on ZK1 under different mining schemes

4 结论与展望

4.1 结论

应用 Visual Modflow 软件建立了观音峡背斜静观片区的地热水水流数值模型,利用后期抽水试验资料对模型进行识别和验证,确定了静观片区地热水模型结构和水文地质参数,在此基础上预测了不同条件下的井间干扰程度:

1)在距已有地热井 ZK1 井 1 km 处布置钻孔,按 500 m³/d 开采,对 ZK1 附近流场无影响;按 1 000 m³/d 开采,以 ZK1 井为中心会形成降落漏斗,约 1.6 h 后水头约下降 19 m。

2)在距已有地热井 ZK1 井 2 km 处布置钻孔,按 1 000 m³/d 开采,对 ZK1 附近流场无影响;按 1 500 m³/d 开采,以 ZK1 井为中心会形成降落漏斗,约 2.5 h 后水头约下降 13 m。

3)在距已有地热井 ZK1 井 5 km 处布置钻孔,按 1 500,2 000,2 500 m³/d 开采,对 ZK1 附近流场无影响;按 3 000 m³/d 开采,以 ZK1 井为中心会形成降落漏斗,约 3.5 h 后水头约下降 8 m。

模拟结果表明,地热井井间距越小、开采量越大,对相邻井产生干扰的可能性越大,反之越小,这与水文地质规律也是相符的,说明利用 Visual Modflow 模型模拟地热水流场特征,预测地热井干扰程度这一方法是可行的。

4.2 展望

目前国内对深层地热水数值模拟研究较少,笔者尝试利用 Visual Modflow 软件建立该片区的地下水流数值模拟模型,预测分析不同开采方案下的井间干扰程度,得到了预期的结论,为地热资源勘查合理布井提供了方法与理论参考。

地热井井间干扰也受到岩溶含水介质特征(岩溶管道的连通性)、补径排条件、抽水时间等因素的影响,笔者未考虑这些因素,这也是下一步研究的目标。另外,由于岩溶含水介质的极大空间异质性,在其他地区建模过程中,需尽可能收集地热钻探编录、物探、水文地质观测等资料,获取尽可能多的水文地质参数,提高模型预测的准确性。

参考文献:

- [1] 刘淑琴,董贵明,杨国勇,等.煤炭地下气化酚污染迁移数值模拟[J].煤炭学报,2011,36(5):796-801.
LIU Shuqin, DONG Guiming, YANG Guoyong, et al. Numerical simulation of phenol migration for underground coal gasification[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(5): 796-801. (in Chinese)
- [2] 朱常春,韩玉杰,刘佩贵,等.相邻矿山干扰开采对地下水流场的影响分析[J].地下水,2014,36(4):99-102.
ZHU Changchun, HAN Yujie, LIU Peigui, et al. Analysis on influence of interfering exploitation in the adjacent Mine mountains on groundwater[J]. Underground Water, 2014, 36(4): 99-102. (in Chinese)
- [3] 刘永良,潘国营.基于 Visual Modflow 的岩溶水疏降流场模拟和涌水量预测[J].河南理工大学学报(自然科学版),2009,28(1):51-54.
LIU Yongliang, PAN Guoying. Mine inflow prediction and numerical simulation on descending flow field of karst water based on Visual Modflow [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2009, 28(1): 51-54. (in Chinese)
- [4] 成建梅,陈崇希.广西北山岩溶管道-裂隙-孔隙地下水流数值模拟初探[J].水文地质工程地质,1998,25(4):50-54.
CHENG Jianmei, CHEN Chongxi. Preliminary numerical study of karst conduit fissure pore groundwater flow in Beishan area in Guangxi province[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1998, 25(4): 50-54. (in Chinese)
- [5] Gallegos J J, Hu B X, Davis H. Simulating flow in karst aquifers at laboratory and sub-regional scales using MODFLOW-CFP[J]. Hydrogeology Journal, 2013, 21(8): 1749-1760.
- [6] 肖斌,许模,曾科,等.基于 Modflow 的岩溶管道概化与模拟探讨[J].地下水,2014,36(1):53-55,78.

- XIAO Bin, XU Mo, ZENG Ke, et al. Study on karst conduit generalization and simulation[J]. Groundwater, 2014, 36(1): 53-55,78. (in Chinese)
- [7] 赵良杰,夏日元,杨杨,等.基于 MODFLOW 的岩溶管道水流模拟方法探讨与应用[J].中国岩溶,2017,36(3):346-351.
ZHAO Liangjie, XIA Riyuan, YANG Yang, et al. Discussion and application of simulation methods for karst conduit flow based on MODFLOW[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(3): 346-351. (in Chinese)
- [8] 徐凤.基于 Visual MODFLOW 的西南岩溶区某项目地下水污染运移模拟研究[D].合肥:合肥工业大学,2014.
XU Feng. Study of groundwater contamination transport simulation on a project in southwest karst area based on visual MODFLOW[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [9] 安瑞瑞,张永波,朱君.地下水数值模拟中4条人为边界模型处理[J].人民黄河,2014,36(3):61-63,79.
AN Ruirui, ZHANG Yongbo, ZHU Jun. Four artificial boundary model processing in numerical simulation of groundwater[J]. Yellow River, 2014, 36(3): 61-63,79. (in Chinese)
- [10] 沈媛媛,蒋云钟,雷晓辉,等.地下水数值模拟中人为边界的处理方法研究[J].水文地质工程地质,2008,35(6):12-15.
SHEN Yuanyuan, JIANG Yunzhong, LEI Xiaohui, et al. Research on disposal method of artificial boundary condition in numerical simulation of groundwater flow[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2008, 35(6): 12-15. (in Chinese)
- [11] 孙爱华.Visual MODFLOW 在八五三农场地地下水数值模拟中的应用[D].哈尔滨:东北农业大学,2008.
SUN Aihua. Application of Visual MODFLOW to assessment of groundwater resources in Farm 853 [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- [12] 紫琳琳.内蒙集宁大理岩地下水数值模拟[D].石家庄:石家庄经济学院,2015.
ZI Linlin. Numerical simulation of groundwater in the inner Mongolian jining marble [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang School of Economics, 2015. (in Chinese)

(编辑 张 苹)