

文章编号:1000-582X(2004)11-0092-05

MODFLOW 在重庆小泉地区地下热水 可持续开发中的应用*

罗云菊,刘新荣,刘东燕,王桂林,文海家

(重庆大学土木工程学院,重庆 400030)

摘要:在论述小泉地区水文地质条件基础之上,概化并建立 MODFLOW 数学模型,并采用 MODFLOW 软件模拟地下热水渗流场,识别 MODFLOW 数学模型,当所得的模拟水位与实测水位比较接近时,说明所建立的 MODFLOW 数学模型是正确的,同时也说明了 MODFLOW 软件在地下热水开发中是可行的。再由此模型模拟不同开采条件下未来的地下热水渗流场,最终得到小泉地区地下热水可持续开采量。

关键词:MODFLOW 模型;地下热水;可持续开发;渗流场

中图分类号:P641.69

文献标识码:A

Modflow (“modular three - dimensional finite - difference Ground - water flow model”的简称)是由美国地质调查局(V. S. Genocidal survey)的 McDonald 和 Harbaugh 于 20 世纪 80 年代开发的一套用于孔隙介质中地下水三维有限差分法数值模拟软件^[1]。Modflow 软件从开发至今在科研、生产、工业、环保、城乡发展规划、水资源利用等许多行业和部门得到了广泛的应用,成为最为普及的地下水运动数值模拟的计算机程序^[2]。虽然 Modflow 软件本身仅限于模拟地下水在孔隙介质中的流动,但大量实际工作表明只要使用得当,Modflow 也可以用于解决许多地下水在裂隙介质中流动的问题^[3]。为此,尝试采用 Modflow 软件定量研究小泉地区地下热水的可持续开发,取得较为理想的效果。

1 小泉地区地下热水水文地质条件

小泉地区位于重庆东南郊,是文明遐迩的南温泉风景旅游区的一个重要组成部分。小泉地区所在地为狭长条形 T_{3xj} 长石石英砂岩低山山脉与 T_{1j} 岩溶槽谷构成的“平行岭谷”地貌。区内花溪河由东侧流入,向北西汇入长江,河水位标高约 209.5 m,见图 1。本区属亚热带季风性湿润气候,多年平均气温 18.4℃,最高气温 44℃,多年平均降雨量 1 008 mm,年降雨量 80%集中在 5 - 10 月。

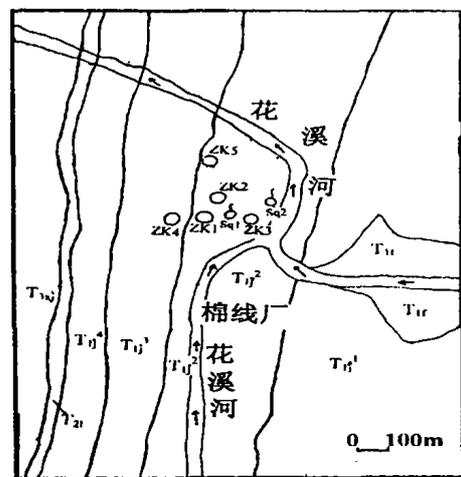


图 1 小泉地区水文地质略图

本区位于南温泉背斜西翼,从东到西(背斜轴部到西翼),依次出露飞仙关组(T_{1r})泥岩,嘉陵江组(T_{1j})白云岩、盐溶角砾岩、灰岩,雷口坡组(T_{2j})白云质灰岩,须加河组(T_{3xj})砂岩地层,见图 1。其中 T_{1j} 分四段, T_{1j}^4 、 T_{1j}^3 主要分别为白云岩,白云质灰岩; T_{1j}^2 为灰岩、白云岩与盐溶角砾岩互层,且 T_{1j}^2 地层上下部各有一层含泥质水云母粘土岩隔水保温层; T_{1j}^1 主要为薄~中厚层石灰岩。 T_{1j}^2 岩性特点为地下热水赋存提供了有利条件, T_{1j}^2 为地下热水含水层。

南温泉背斜轴线大致呈 NNE 方向延伸,南北延伸

* 收稿日期:2004-06-22

作者简介:罗云菊(1973-),女,布依族,贵州贵定人,重庆大学讲师,博士研究生,主要从事岩土工程与地质工程科研和教学工作。

长 45 km,在小泉和背斜末端桥口坝处均略有转折,平面展布近“S”形。背斜东翼缓,西翼陡,为两翼不对称的斜歪背斜。南温泉背斜这种“S”形态特征和上述地层特点使两翼地下热水成为相对独立的体系,且在小泉处形成相对稳定的“热水池”^[4]。

在本地区无断层发育,岩层走向 NNE。近背斜轴部主要有 2 组节理裂隙发育,与层面平行的一组裂隙发育最显著,此裂隙宽大,无充填,其构成地下热水由北向南运动的主要导水通道;另一组与层面垂直,裂隙细小,多呈闭合状,此裂隙导水能力较弱。

小泉地区地下热水以泉和钻孔(如 ZK1、ZK2、ZK3、ZK4、ZK5)的形式出露地表,见图 1。温泉出露是由于含水层 T_{ij}^2 被河流切割所至,其出露于横切背斜构造的花溪河河谷底部,泉口出露标高 210 ~ 218 m,出露地层为 T_{ij}^2 地层。

小泉地下热水属 $SO_4 - Ca$ 或 $SO_4 - Ca \cdot Mg$ 型微咸水,矿化度 2.16 ~ 2.62g/L, pH 值为 7.6 ~ 7.7。又由重庆南江水文队 1984 年在小泉宾馆地下热水勘察所得的地下热水化学成分及 O^{18} 、D 分析,地下热水主要来源于重庆以远(约 280 km)的北边岩溶露头区大气降水补给,之后沿铜锣峡背斜(铜锣峡背斜和南温泉背斜呈斜鞍相接,它们同属一个背斜系统)程波浪式起伏的 T_{ij}^2 地层向南流,在 T_{ij}^2 埋深约 2 000 m 处加温,形成地下热水;之后,顺 T_{ij}^2 地层继续由北往南流,于南温泉背斜北端(铜锣峡背斜和南温泉背斜呈斜鞍相接处)流入南温泉背斜,往南流经背斜中部小泉地区,最终流入背斜末端桥口坝地区^[5]。在南温泉背斜 T_{ij}^2 地层埋藏浅,且埋深起伏不大,地下热水以由北往南的二维水平流为主。

根据重庆南江水文队放射性氙、 ^{14}C 同位素测试结果表明地下热水的形成年龄在 50 a 以上,即大气降水在重庆以北补给地下水形成地下热水到流入小泉地区至少需 50 a 时间。因而在小泉地区开发地下热水不会受到近 50 a 大气降水的影响。小泉地区北边未进行地下热水的开发,故小泉地区地下热水补给量未发生变化,由南江水文队的监测结果表明补给量满足南温泉背斜北端慈母山温泉(离小泉地区约 11 km)地下热水水位约 240 m 的水量条件。

2 建立数学模型

2.1 模型概化

由小泉地区的地下热水水文地质条件,将 T_{ij}^2 概化为热水承压含水层, T_{ij}^1 和 T_{ij}^3 分别作为隔水顶底板,即相对隔水层,两侧即 T_{ij}^2 与 T_{ij}^1, T_{ij}^3 地层分界处

作为隔水边界,小泉地区北端为定水头边界,南端为变水头边界。故除北端及两侧外,其余的是可变水头单元。地下热水由北往南流,水力坡度为 0.16 % ~ 0.38 % 之间,其为中低温热水,计算时作液相考虑。

2.2 数学模型

因为本区地质条件复杂,各部位水文地质特征有差异,为了更接近实际,反映本区水文地质特征,使计算结果比较符合实际,笔者采用 MODFLOW 软件,进行有限差分数值模拟,从水资源量定量的角度研究小泉地区地下热水的可持续性开发,在水文地质条件概化基础之上(根据物理模型),建立相应的 MODFLOW 数学模型。

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(k_{xx} \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_{yy} \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_{zz} \frac{\partial H}{\partial z}) + w = \mu \frac{\partial H}{\partial t} & (x, y, z) \in \Omega & (1) \\ H|_{t=0} = H_0(x, y, z) & (x, y, z) \in \Omega & (2) \\ H|_{B_1} = H_1(x, y, z, t) & t > 0 & (3) \\ \left[\begin{array}{l} k_{xx} \frac{\partial H}{\partial t} \cos(n, x) + k_{yy} \frac{\partial H}{\partial t} \cos(n, y) + \\ k_{zz} \frac{\partial H}{\partial t} \cos(n, z) \end{array} \right]_{B_2} = qm\gamma & t > 0 & (4) \end{cases}$$

上式中: H 为水头函数; K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} 分别为各向异性含水层 X, Y, Z 方向的渗透系数 (md^{-1}); H_0 为初始时刻水头分布 (m); H_1 为第一类边界 B_1 上已知水头 (m); q 为第二类边界 B_2 上的单宽补给流量 ($m^3 d^{-1}$); w 为单位体积流出或流进的水量 ($m^3 d^{-1}$); μ 为含水介质的贮水率 (m^{-1}) (μ^* 贮水系数, $\mu^* = \mu M, M$ 为含水厚度), Ω 为渗流区域; B_1 和 B_2 分别是它的第一类和第二类边界; n 为渗流区边界的外法线方向。

采用向后有限差分法,对上述数学模型进行离散,即可获得计算单元 (i, j, k) 地下热水渗流计算的有限差分公式。如果所有的流量项均以某一时间段长的结束时间 tm 为准,则有方程(5):

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\ & CR_{i-\frac{1}{2},j,k} (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i+\frac{1}{2},j,k} (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\ & CR_{i,j,k-\frac{1}{2}} (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j,k+\frac{1}{2}} (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) + \\ & P_{i,j,k} h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = \\ & \mu_{i,j,k} (\Delta r_i \Delta l_i \Delta v_k) \cdot (h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}) / (t_m - t_{m-1}) \end{aligned} \quad (5)$$

其中: CR 为相邻终点之间的水力传导系数 ($m^2 d^{-1}$); h 为计算单元之间水头 (m); p 为与外部源汇有关的常量 ($m^3 d^{-1}$); μ 为计算单元的贮水率 (m^{-1}); tm 为时间段结束时的时间 (d)。

3 区域离散及模型求解

本区含水层厚 110 m, 地下热水补给区主要在北边岩溶露头区, 于 T_{1j}^2 埋藏约 2 000 m 处加温, 之后, 顺 T_{1j}^2 地层由北往南流; 在小泉地区 T_{1j}^2 地层埋藏浅, 且埋深起伏不大, 地下热水以由北往南的二维水平流为主, 温泉出露是由于含水层 T_{1j}^2 被花溪河切割所致; 且本区纵向上水文地质条件未发生变化, 故只划分为一层(即 $K=1$)。分为 40 行、22 列, 共 880 个单元, 研究区网格剖分如图 2 所示。

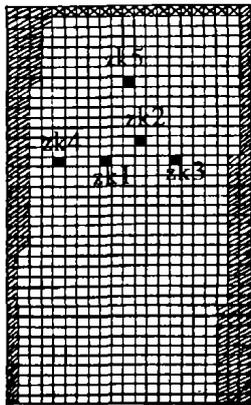


图 2 研究区剖分图

本次计算调用的子程序包有专门进行水井抽水和注水水量、水位计算的水井子程序(wel), 整个模拟过程分为 20 a。计算单元的属性用一个三维整型数组(IBOVND)来定义, 每个单元对应模型中的一个单元, 对计算单元的规定如下:

定水头计算单元 $IBOVND(i, j, k) = -1$

不透水和无效计算单元 $IBOVND(i, j, k) = 0$

变水头计算单元 $IBOVND(i, j, k) = 1$

式(5)经过整理后得到如下形式:

$$[G] \{h\} = \{B\}$$

其中 $[G]$ 为水头系数矩阵; $\{h\}$ 为所求水头列向量, $\{B\}$ 表示各个方程中所有常数项和已知项。在 MODFLOW 中系数矩阵和右侧项 $\{B\}$ 是通过各个软件包建立起来, 采用迭代法对 $\{h\}$ 进行求解^[2]。

4 数学模型识别

进行数学模型识别, 除了边界条件已确定之外, 还需获得: 渗透系数 K 和贮水系数 μ^* , 以及初始水头分布。

本次模拟所采用的水文地质参数初值, 是笔者利用四川省地矿局南江水文队(现重庆南江水文队), 1986 年在小泉地区进行地下热水单孔及干扰井群抽水实验资料, 进行参数计算和分析, 以及参照《水文地

质手册》经验值确定。最终的水文地质模型参数值, 由模型识别校正之后确定。

初始水头确定。根据小泉地区 1991 年钻孔地下热水监测资料, 以及水力坡度推算出钻孔以外其余单元的地下热水水位, 利用该水位作为初始水位赋给计算模型各个单元, 进行稳定流模拟, 模拟出的结果作为计算模型初始水头。

定水头值确定。根据南江水文队历年来在小泉地区以北约 11 km 的慈母山温泉水位监测值约 240 m, 再结合水力坡度推算确定小泉地区定水头值。

模型识别。利用建立的数学模型, 模拟小泉地区 1991 ~ 1995 年地下热水渗流场(小泉地区在 1991 年以后进行地下热水监测)。小泉 ZK4 钻孔水温 45 °C, 且比较稳定, 受常温水影响比较小, 其水位最能反应小泉地区地下热水渗流场的水位变化状况, 故把模拟所得的 ZK4 钻孔水位与实际监测水位进行对比, 修正边界, 调整参数, 校正模型。在抽水实验所得参数及边界条件基础之上, 分析区域实际水文地质条件, 通过网格剖分来拟和实际边界; Kz, μ^* 变化很小, 以实验所得数值为准; 结合水文地质条件 Ky, Kx 分别通过增加或减少 0.1 和 0.005 个数量级来调整, 直到模拟得到的结果比较接近实际观测值为此, 见图 3。从图 3 可知, ZK4 钻孔模拟水位与实际观测水位比较接近, 说明经过多次校正后得到一个比较符合客观实际的 MODFLOW 数学模型。此时的参数为本区比较符合客观实际的参数值(表 1), 边界概化是正确的; 同时也证明了 MODFLOW 软件在地下热水水流运动的研究中是可行的。

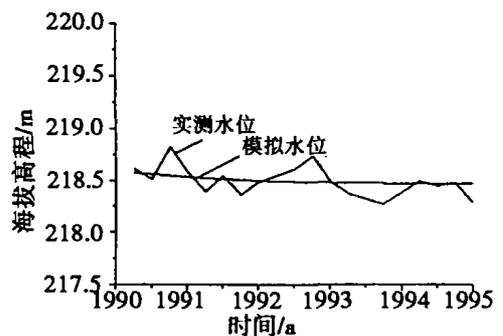


图 3 小泉地区 ZK4 钻孔模拟水位与实际观测水位对比图

表 1 水文地质参数

渗透系数 $K(m/d)$ ($T=K \cdot M$)			储水系数 (μ^*)
平行于背斜 轴线方向(Ky)	垂直于背斜 轴线方向(Kx)	纵向渗透 系数(Kz)	
9.52	0.454	0.000 011	0.000 055

5 地下热水资源可持续性开发

随着人民生活水平提高, 对旅游业的需求日益增

大,相应地地下热水开采也在增加,而小泉地区如果过量开采地下热水,会出现 2 种情况,一种是地下热水枯竭;另一种情况是花溪河的常温水倒灌补给地下热水,影响地下热水的水质、水温,从而破坏地下热水生态环境,使闻名遐迩的小泉消失。

环境与发展是当今国际社会普遍关注的重大问题。1987 年世界环境与发展委员会在《我们共同的未来》中提出可持续发展的概念,即“满足当代人的需求,又不能损害了子孙后代满足其需求能力的发展。”^[6] 地下热水资源是不可再生资源,在进行地下热水开发时应该坚持可持续发展的战略原则。

小泉地区在开采地下热水时,地下热水的最低水位必须高于花溪河水位,花溪河水位 209.5 m(枯水季节水位),而洪水季节水位会上涨到 210.5 m 左右。因而小泉地区地下热水开采,最低水位必须高于 210.5 m,才能确保花溪河常温水不会补给地下热水,确保小泉地区地下热水开采的可持续发展。本工作采用 MODFLOW 软件建立的符合客观实际的数学模型,模拟不同开采条件下地下热水渗流场,从而得到小泉地区地下热水可持续开采的开采量。

小泉地区共 5 个钻孔采水,其中除 ZK5 钻孔离另 4 个钻孔有一定距离之外,其它 4 个相对集中,南江水文队 1984 年进行群孔抽水实验表明:这 4 个钻孔在共同抽水时产生干扰作用,水位降深大;如 5 个钻孔同时抽水,这 4 个钻孔开采水量相对 ZK5 不能太大,否则会产生局部水位大降深^[7]。在开采过程中,各个钻孔采水量的大小,应满足不产生局部水位大降深的条件。

目前,小泉地区地下热水的开采量约 700 ~ 800 m³/d。如果小泉地区旅游业迅速扩大,热水的需求量成倍地增长,通过 MODFLOW 软件模拟这 5 个钻孔同时抽水,在不同开采条件下地下热水渗流场。不同开采条件见表 2,表 2 不同开采方案是在目前 5 孔实际抽水量差的比例,以及 1984 年小泉宾馆地下热水勘察抽水实验所得 5 孔同时抽水在不产生局部水位大降深的条件下每孔井抽水量变化范围的基础之上制定的,它满足不产生局部水位大降深的条件。不同开采方案开采 20 a,其 ZK4 钻孔地下热水水位变化状况见图 4。

表 2 群孔开采方案一览表(开采量单位:m³/d)

钻孔编号	第一方案	第二方案	第三方案	第四方案
ZK1	100	150	250	250
ZK2	200	300	450	450
ZK3	350	500	600	700
ZK4	300	450	500	600
ZK5	650	1 000	1 200	1 200
总开采量	1 600	2 400	3 000	3 200

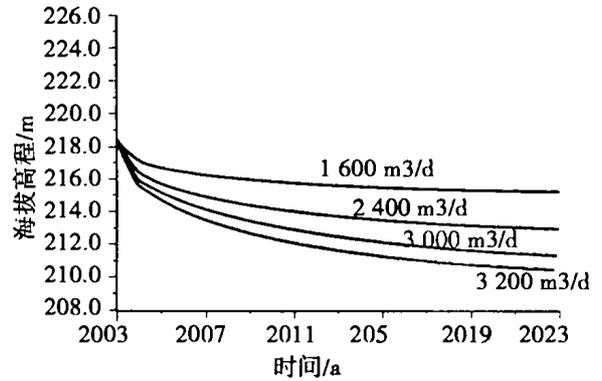


图 4 5 孔开采不同开采量下 ZK4 钻孔 20 年水位变化图

小泉 ZK4 水温最高 45 ℃,水温、水位均较稳定,而且在目前小泉地区地下热水的实际开采条件下,ZK4 钻孔相对其它 5 个钻孔水位略低;本次开采方案设计不同开采条件下,地下热水渗流场中 ZK4 钻孔水位也最低;故判断小泉地区不同开采方案下水位何时趋于稳定,由 ZK4 钻孔水位变化来判断最为正确。

由 ZK4 钻孔地下热水水位变化状况图 4 可知,由 5 个钻孔共同采水,总开采量为 1 600 m³/d、2 400 m³/d、3 000 m³/d、3 200 m³/d,开采 20 a 后,水位均趋于稳定。

开采量为 1 600 m³/d 时,开采 20 a 后,ZK4 钻孔水位降深近 3 m。开采量 2 400 m³/d,水位降深比较大,2023 年,最低水位 212.884 9 m,降深约 5.5 m。

当开采量为 3 000 m³/d 时,20 a 后,最低水位 211.292 8 m,降深约 7 m(图 4,图 5)。开采量 3 200 m³/d,2023 年,最低水位 210.439 4 m(图 5),降深达 8 m。

因为洪水季节花溪河水位将上涨到 210.5 m 左右,因而 3 200 m³/d 开采量最具有冒险性。为了确保常温水不会补给地下热水,开采量在 3 000 m³/d 范围内最好,3 000 m³/d 为最大开采量。

旅游地自然环境有一个饱和度,旅游人次不能无限制地增加,旅游业开发也必须控制在一定范围之内,这样才能使环境可持续发展。由目前小泉地区旅游状况分析,旅游人次再增加 2 倍足以,开采量为目前的 3 倍:2 400 m³/d 最佳。

小泉地区地下热水开采,采用群孔采水方式较好,这样才能避免地下热水局部水位大降深。如果采用单孔采水,假设 ZK4 钻孔为唯一的开采井,开采量为 2 400 m³/d,开采 20 a 后,水位为 205.33 m(见图 6)。比 5 个钻孔同时采水开采量为 3 000 m³/d 的水位 211.292 8 m 低近 6 m(见图 4、图 5),而且在开采井及其周围产生大降深,见图 6。

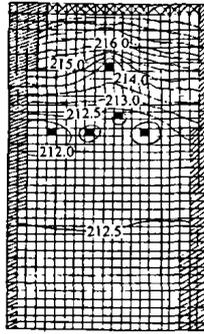


图5 五孔总开采量3000 m³/d时2003年
小泉地区地下热水渗流场

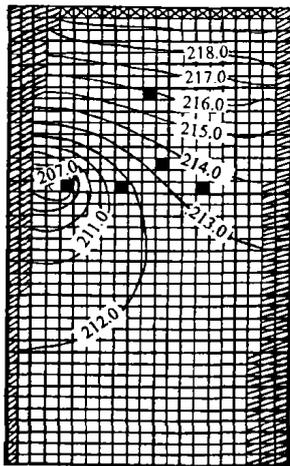


图6 单孔ZK4开采量2400 m³/d时2003年
小泉地区地下热水渗流场

小泉地区地下热水开采是为了旅游业的需要,而旅游这种性质,决定了地下热水开采是采用断续采水的方式。目前小泉地区地下热水采水时间最长的一天仅6~7 h。这样的采水方式有利于水井采水能力的恢复与调节。开采量3000 m³/d,开采20 a后,降深仅7 m,而含水层为承压含水层,有弹性释水的特性,因而最大开采量3000 m³/d能确保环境可持续发展。

6 结论

MODFLOW 软件在小泉地区地下热水可持续性开发中取得很好的效果,实践证明 MODFLOW 软件应用于地下热水数值模拟是可行的。

小泉地区地下热水开采,在开采量3000 m³/d范围内,能确保地下热水环境可持续发展,3000 m³/d是最大开采量;由旅游业发展状况分析最佳开采量为2400 m³/d。

参考文献:

- [1] 周念清,朱蓉,朱学愚. MODFLOW 在宿迁市地下水资源评价中的应用[J]. 水文地质工程地质,2000,32(6):9-13.
- [2] MICHAEL G MCDONALD, ARLEN W. Harbaugh, MODFLOW - A three dimension finite difference ground water flow model [M]. Washington: U. S. Government Printing Office,1998.
- [3] 朱冬林,聂得新,葛修润. 3D - Modflow 在模拟库岸滑坡工程地下水分布中的应用初探[J]. 岩土力学,2002,25(3):378-381.
- [4] 罗祥康,曾云松. 论重庆地热——“热水库”[A]. 第三次全国学术会议论文集[C]. 北京科学技术出版社,1991.
- [5] 李鸿举. 重庆小泉宾馆地下热水的水文地质特征及利用条件[J]. 四川地质学报,1987,7(1):21-27.
- [6] 中国21世纪议程管理中心,中国21世纪议程——中国21世纪人口、环境与发展白皮书[M]. 北京:中国环境科学出版社,1994.
- [7] JAMES L OSIENSKY, E. WILLIAMS. A Two - Dimensional MODFLOW Numerical Approximation of Mise - A - La - Masse Electrical Flow Through Porous Media [J]. Ground Water,1996,35(4):727-733.

Application of Modflow in Sustainable Exploration of Geothermal Water at Xiaoquan of Chongqing

LUO Yun-ju, LUI Xi-rong, LUI Dong-yan, WANG Gui-lin, WEN Hai-jia

(College of Civil Engineer Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: On the basis of sufficient discussion of hydrogeologic condition of geothermal water in the Xiaoquan area, authors a mathematical is studied with MODFLOW model is established, and then the geothermal water is studied with MODFLOW program. And the mathematical model is identified. The authors compare the simulative water level with actual water level. The MODFLOW program can study geothermal water, when the simulative water level approximated to actual water level, and the mathematical MODFLOW model is right. Geothermal water under condition of different exploitation is stndied with the MODFLOW program. Sustainable exploitation is achieved.

Key words: MODFLOW model; geothermal water; sustainable exploration; seepage