

# 重庆南温泉背斜地下热水可持续开发研究\*

罗云菊, 刘新荣, 刘东燕

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:**重庆南温泉背斜南温泉、小泉及桥口坝地下热水开发点为一个地下热水系统,过去由于缺乏对地下热水的可持续开发研究,各开发点盲目开采,使得有名的天然南温泉、小泉枯竭。目前开发商正在桥口坝开发地下热水,为了避免重蹈覆辙,及合理开发和保护地下热水资源环境可持续发展,必须进行地下热水可持续开发研究。在分析南温泉背斜地下热水系统物理模型的基础之上,建立相应的有限元模型,并采用实测水位与模拟水位对比进行模型校正,当模拟水位与实测水位相近时,所得的模型是符合客观实际的。采用此模型模拟不同可持续开发方案下,桥口坝地下热水的最大开采量,并对不同开发方案进行分析优选,得到最佳的可持续开发方案。

**关键词:**南温泉背斜; 地下热水; 数学模型; 可持续开发; 开采量

**中图分类号:**P641 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2005)06-0039-05

## Research on Sustainable Exploration of the Geothermal Water in Nanwenquan Anticline of Chongqing

LUO Yun - ju, LIU Xin - rong, LIU Dong - yan

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** The geothermal water of Nanwenquan, Xiaoquan and Qiaokouba is a whole geothermal water system in Nanwenquan anticline of Chongqing. In the past, due to lack of study on sustainable exploration of the geothermal water, the source of geothermal water from Nanwenquan and Xiaoquan was drying up. Now, three enterprises are exploiting the geothermal water in Qiaokouba. There must be a sustainable exploration for the geothermal water, in order to utilize and protect the geothermal water resource. The geothermal water in the three exploiter's areas was quantitatively studied on sustainable exploitation by finite element numerical simulation. The geological mode was generalized and the mathematical model was established. Then, the simulative water level obtained was compared with the actual one, and the mathematical model was identified and adjusted. The right mathematical model has been acquired when the simulative water level obtained was approximate to actual water level. The infiltration of geothermal water was simulated under two schemes of exploitation conditions. An optimum scheme has been obtained by analysis. The maximal yield of exploitation was acquired under sustainable exploitation of the geothermal.

**Keywords:** Nanwenquan anticline; geothermal water; mathematical model; sustainable exploration; yield

南温泉地下热水系统,是指储存于南温泉背斜内的地下热水,包括南温泉、小泉及背斜南端的桥口坝地下热水。南温泉背斜位于重庆,其由北向南从重庆中部穿过,南北延伸长45 km,东西宽2 km。南温泉、小泉是文明遐迩的地下热水旅游区,但由于缺乏地下热水可持续开发研究,不能科学开发利用和

\* 收稿日期:2005-05-25

基金项目:重庆市应用基础研究项目(8020)

作者简介:罗云菊(1973-),女,布依族,贵州贵定人,讲师,博士生,主要从事岩土工程与地质工程研究。

保护地下热水,地下热水的开采呈现盲目混乱状况,导致天然南温泉、小泉 20 世纪 90 年代初完全枯竭,今日的南温泉、小泉均通过钻孔取水维持旅游业的正常运转。目前,开发商正在南温泉、小泉以南约 16 km 的桥口坝地区开发地下热水。桥口坝地下热水与南温泉、小泉为统一的地下热水系统——南温泉地下热水系统。且此系统的地下热水是沿含水层由北往南流,南温泉、小泉位于水流的上游,桥口坝为下游。如桥口坝地下热水开采不合理,南温泉、小泉将会遭到更为严重的破坏。地下热水是不可再生的矿产资源,一旦破坏将不可恢复。在进行地下热水开发时必须坚持可持续发展的战略原则。为了避免重蹈天然南温泉、小泉枯竭的覆辙,进行南温泉背斜地下热水可持续开发研究是迫在眉睫之事。

### 1 区域水文地质条件

南温泉背斜分布区,地势北高南低。背斜北端、中部及南端分别有长江(江水面海拔高程 167 m)及花溪河(河水水位约 209.5 m)、清水河(水位标高 200 m)自东向西穿过,最终汇入长江,见图 1。本区从背斜轴部到两翼,依次出露飞仙关组( $T_{IV}$ )到侏罗系( $J$ )地层,见图 2。本区  $T_{2I}$  较薄与  $T_{IV}$  无明显界限,区域地质上表示为:  $T_{2I} + T_{IV}$ 。由勘察表明,由于各地层的岩性特点差异使得  $T_{2I} + T_{IV}$  为地下热水含水层,其中  $T_{IV}^2$  为主要含水层段,  $T_{IV}^1$  次之,  $T_{IV}^3$ 、 $T_{IV}^4$  及  $T_{2I}$  较弱;夹于两翼  $T_{2I} + T_{IV}$  之间的  $T_{IV}$  成为弱透水层,两翼  $T_{2I} + T_{IV}$  之外的  $T_{IV}$  为相对隔水层<sup>[1]</sup>。

本区地下热水属  $SO_4 - Ca$  或  $SO_4 - Ca \cdot Mg$  型微咸水,矿化度 2.16 ~ 2.62 g/l, pH 值为 7.6 ~ 7.7。地下热水主要来源于重庆以北,与南温泉背斜呈斜鞍相接同属一个背斜系统的铜锣峡背斜北端岩溶露头区大气降水补给,在  $T_{2I} + T_{IV}$  埋深约 2 000 m 处加温,形成地下热水<sup>[1]</sup>;之后,顺  $T_{2I} + T_{IV}$  由北往南流,于南温泉背斜北端流入南温泉背斜,往南流经背斜中部南温泉、小泉地区,最终流入背斜末端桥口坝<sup>[2]</sup>。南温泉背斜  $T_{2I} + T_{IV}$  埋藏浅,埋深起伏不大,地下热水以由北往南的二维水平流为主<sup>[3]</sup>。

### 2 数学模型建立

在上述水文地质条件下,将  $T_{2I} + T_{IV}$  概化为热水含水层,背斜中部夹于两翼  $T_{2I} + T_{IV}$  之间的  $T_{IV}$  为弱透水层,  $T_{3VI}$  和  $T_{2I} + T_{IV}$  底部的  $T_{IV}$  分别作为隔水顶、底板,即相对的隔水层。东西两翼及背斜末端  $T_{2I} + T_{IV}$  与  $T_{3VI}$  的分界线作为隔水边界线,北端为定水头边界。为了更接近实际,反映本区水文地质特征,使计算的结果比较符合实际,采用有限元数值模拟,从水资源量定量的角度研究南温泉背斜地下热水可持续开发。根据此水文地质条件,即物理模型,建立相应的数学模型,其数学模型由地下热水流动的偏微分方程、初始条件及变水头定水头边界条件确定。

在本区水文地质条件中,含水层为多孔或裂隙介质,根据水量均衡原理地下热水流动的二维有限元数学模型可用方程式(1)的偏微分方程来表示:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_{xx} \times m \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{yy} \times m \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \sum = \mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (x, y) \in \Omega \quad (1)$$

初始条件为初始水头边界,其由方程式(2)描述:



图 1 研究区水文地质简图

地层	地层代号	地层厚度	图例	地层岩性
侏罗系	J	300-800	••••••••	砂岩、泥岩
三叠系须家河组	$T_{3VI}$	360-540	••••••••	厚层砂岩
三叠系雷口坡组	$T_{2I}$	20	••••••••	中厚层白云岩
三叠系嘉陵江组第四段	$T_{IV}^4$	100	••••••••	中厚层白云岩 夹白云质灰岩
三叠系嘉陵江组第三段	$T_{IV}^3$	150	••••••••	中厚层白云质 灰岩夹白云岩
三叠系嘉陵江组第二段	$T_{IV}^2$	109	••••••••	灰岩、白云岩、 盐溶角砾岩互层
三叠系嘉陵江组第一段	$T_{IV}^1$	170-175	••••••••	薄-中厚层石灰 岩含泥质灰岩
三叠系飞仙关组	$T_{IV}$	500	••••••••	泥岩、泥质灰岩 不等厚互层

图 2 研究区地层岩性综合柱简图

$$H|_{t=0} = H_0(x, y) \quad (x, y \in \Omega) \quad (2)$$

变水头边界,即水头值随时间变化,其为方程(3):

$$H|_{B_1} = H_1(x, y, t) \quad (t > 0) \quad (3)$$

定水头边界的流量与地下热水在  $x, y$  坐标轴向上的变化量相等,且不随时间变化,因而定水头边界条件可用方程(4)表示:

$$\left[ k_{xx} \times m \frac{\partial H}{\partial t} \cos(n, x) + k_{yy} \times m \frac{\partial H}{\partial t} \cos(n, y) \right]_{B_2} = q \times m \quad t > 0 \quad (4)$$

故本区地下热水运动的有限元数学模型由方程(1)~(4)来描述。

式中: $H$ 为水头函数, $m; K_{xx}, K_{yy}$ 分别为各向异性含水层  $X, Y$  方向的渗透系数,  $m/d; m$  为含水层的厚度,  $m; H_0$  为初始时刻水头分布,  $m; H_1$  为变水头边界  $B_1$  上已知水头,  $m; q$  为水量边界  $B_2$  上侧单宽补给流量,  $m^3; \varepsilon$  为垂向渗流强度;  $\Omega$  为渗流区域;  $\mu$  为储水系数;  $n$  为渗流区边界的外法线方向。

### 3 数学模型校正

南温泉钻孔热水受常温水影响较小,其水位最能反应南温泉背斜地区地下热水渗流场的水位变化状况,利用所建立的数学模型,模拟1991~1995年南温泉的水位,并和实测水位进行对比,同时在实验所得参数初值基础上结合水文地质条件,分别增加或减少0.1、0.005个数量级来调整参数  $K_x$  和  $K_y, \mu$  变化很小以实验所得为准,直到模拟结果比较接近实际观测值为此,以此校正模型。模型参数初值,是根据重庆南江水文队1986年小泉宾馆地下热水勘查抽水试验资料,计算和分析得到。初始水头由水位监测资料及水力坡度推算确定。模拟水位与实测水位对比见图3。由图3可知,模拟水位与实测水位比较接近,说明经过多次调整后得到了符合客观实际的数学模型<sup>[5,6]</sup>,此时的参数值为本区比较符合客观实际的参数值(表1)。

表1 水文地质参数

参 数	渗透系数 $K/m \cdot d^{-1}$		储水系数( $\mu$ )
	垂直于背斜轴线方向( $K_{xx}$ )	平行于背斜轴线方向( $K_{yy}$ )	
I ( $T_{2l} + T_{1j}^{3+4}$ )	1.24	4.329	0.000 95
II ( $T_{ij}^2$ )	1.736	4.556	0.000 95
III ( $T_{ij}^1$ )	0.84	3.905	0.000 95
IV ( $T_{ij}$ )	0.28	2.65	0.000 85



图3 南温泉模拟水位与实际观测水位对比图

### 4 可持续开发方案设计

地下热水资源开采,开采量必须小于补给量才能保证地下热水资源环境可持续发展,因而开发之前需计算补给量。

#### 4.1 天然补给量

重庆南温泉地下热水主要是沿背斜轴部顺  $T_{2l} + T_{1j}$  自北向南纵向流动。地下热水的补给来源,显然就是由径流量构成。因而有:

$$Q = F \times T_{yy} \times J \quad (5)$$

式中: $F$ 为背斜北端  $T_{1j} + T_2$  的过水断面宽度,约为1 807.5 m; $J$ 为天然条件下背斜北端的水力坡度,约为0.35%; $T_{yy}$ 为平行于背斜轴线方向的导水系数( $T_{yy} = K_{yy} \times m$ ),由重庆南江水文队抽水实验得到  $T_{yy}$  值约为1 048  $m^2/d$ <sup>[2]</sup>。于是计算得补给量  $Q$  为6 629.91  $m^3/d$ 。

#### 4.2 开发方案

温泉背斜除南温泉、小泉地下热水开发外,目前,开发商正在南温泉以南,背斜南端桥口坝开发地下热水。背斜各处地下热水为一个统一的热热水系统,各点在开发地下热水时必须进行可持续性开发规划,避免盲目开采导致开采过量,使地下热水枯竭,或花溪河、清水河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,使闻名遐迩的南温泉、小泉永远消失。

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。”<sup>[7]</sup> 地下热水资源是不可再生资源,在进行地下热水开发时必须坚持可持续发展的战略原则<sup>[8]</sup>。在计算研究区地下热水的补给量基础之上,采用符合客观实际的数学模型,模拟相同的渗流条件、初始条件及边界条件(即同一数学模型)下,不同开采时段开采量不一样的开发方案下地下热水渗流场,从而得到不同方案桥口坝地下热水最大开采量,并对开采方案进行对比分析,优选出最佳的开发方案<sup>[9]</sup>。

4.2.1 开发方案一 南温泉、小泉维持已有开采量,即南温泉开采量为 $1\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$ ,小泉为 $700\ \text{m}^3/\text{d}$ ,模拟桥口坝以不同开采量开采时地下热水渗流场,从而得到此方案中桥口坝的最大开采量。

南温泉、小泉维持已有开采量,桥口坝以 $2\ 000\sim 4\ 800\ \text{m}^3/\text{d}$ 的量开采30年,2036年各开发点水位见表2。为了地下热水可持续开发,避免常温水补给地下热水,在开采地下热水时,地下热水的最低水位必须高于花溪河209.5 m的水位和清水河200.0 m的水位。桥口坝地下热水开采量为 $4\ 600\ \text{m}^3/\text{d}$ 时,开采井水位高于花溪河水位2.7 m以上,高于清水河水位0.57 m;当开采量为 $4\ 800\ \text{m}^3/\text{d}$ 时,开采井水位低于清水河水位0.08 m,见表2。由此知 $4\ 800\ \text{m}^3/\text{d}$ 的开采量过大,桥口坝开采量只能在 $4\ 600\ \text{m}^3/\text{d}$ 范围内。

表2 以开发方案一开采2036年各开发点水位状况

桥口坝开采量/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	2 000	4 000	4 500	4 600	4 800
桥口坝开采井水位/m	207.96	202.51	200.95	200.57	199.92
南温泉水位/m	213.98	212.77	212.22	212.22	211.99
小泉水位/m	214.33	213.17	212.63	212.61	212.41

在桥口坝以 $4\ 600\ \text{m}^3/\text{d}$ 开采量开采,南温泉、小泉以及桥口坝开采井的水位变化情况见图4,由图可看出在2011年时,各开发点水位开始趋于稳定,2016年时水位基本稳定,到2036年时水位很稳定,此时的水位为稳定水位,继续以此量开采,水位不会再有变化。桥口坝开采量小于 $4\ 600\ \text{m}^3/\text{d}$ 时,30年后水位必定为稳定水位,此时的水位均高于花溪河水位和清水河水位,同样满足可持续发展要求。

小泉、南温泉维持已有的开采量时,桥口坝最大开采量为 $4\ 600\ \text{m}^3/\text{d}$ 。

4.2.2 开发方案二 随着人民生活水平提高,对旅游业的需求日益增大,5年后,南温泉、小泉需要增加开采量才能满足旅游发展的需求,而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。由目前南温泉、小泉旅游状况分析,2010~2015年南温泉、小泉开采量分别增加 $300\ \text{m}^3/\text{d}$ ,即南温泉开采量 $1\ 300\ \text{m}^3/\text{d}$ 、小泉 $1\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$ ;2015年后分别增加 $500\ \text{m}^3/\text{d}$ ,即南温泉开采量 $1\ 500\ \text{m}^3/\text{d}$ 、小泉 $1\ 200\ \text{m}^3/\text{d}$ 足以<sup>[10]</sup>。

南温泉、小泉不断增加开采量情况下,桥口坝以不同的量开采地下热水,开采30 a时水位较稳定,桥口坝开采井、南温泉、小泉的水位见表3。由表3可知,此开采方案下桥口坝开采量不能为大于 $3\ 300\ \text{m}^3/\text{d}$ 。如以 $3\ 500\ \text{m}^3/\text{d}$ 开采,2030年南温泉、小泉的水位分别为209.14 m、209.47 m,分别低于花溪河水位0.36 m和0.03 m;因此大于 $3\ 300\ \text{m}^3/\text{d}$ 的量开采是会导致常温水补给地下热水,破坏地下热水的可持续发展。

表3 开发方案二2036年各开发点水位状况

桥口坝开采量/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	2000	2500	3000	3300	3500
桥口坝开采井水位/m	207.14	205.52	203.89	202.82	202.11
南温泉水/m	211.67	210.72	210.23	209.57	209.14
小泉水位/m	211.98	211.03	210.55	209.89	209.47

如果以小于 $3\ 300\ \text{m}^3/\text{d}$ 的量 $3\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$ 开采,2036年,桥口坝开采井水位高于清水河水位3.89 m;南温泉、小泉的水位分别高于花溪河水位0.73 m、1.05 m,这未能充分开发利用地下热水,仍能以比

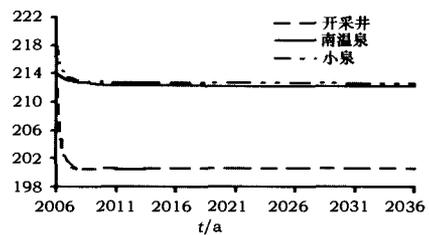


图4 开采方案一桥口坝开采量为 $4\ 600\ \text{m}^3/\text{d}$ 地下热水水位变化曲线图

3 000 m<sup>3</sup>/d 大的量开采。开采量为 3 300 m<sup>3</sup>/d, 2036 年, 桥口坝最低水位高于清水河水位 2.82 m; 南温泉水位高于花溪河水位 0.07 m; 小泉水位高于花溪河水位 0.39 m, 见表 2。以 3 300 m<sup>3</sup>/d 的量开采既能充分开发利用地下热水, 又能保证地下热水可持续发展。桥口坝 3 300 m<sup>3</sup>/d 的开采量为开采方案二的最大和最佳开采量。

开采方案二, 桥口坝以 3 300 m<sup>3</sup>/d 的开采量开采, 2036 年南温泉背斜地下热水渗流场, 见图 5。

#### 4.3 最佳可持续开发方案

这两种开发方案中, 从两个方面来分析可得到第二种开发方案为最佳开发方案: 即社会经济不断发展, 相应的人民对旅游业的需要不断增强, 因而南温泉、小泉的开采量需要增加, 但其增加量与旅游业发展同步, 是逐步增加。而自然旅游环境有一个饱和度, 旅游的人次必须控制在一定范围以内, 这样才能使环境可持续性发展, 因此南温泉、小泉旅游业不能无限制的扩大。南温泉、小泉, 开采量在 5 年、10 年之后大概需要增加 300 m<sup>3</sup>/d、500 m<sup>3</sup>/d 就足够; 另一方面, 在第二种开发方案下, 桥口坝的最大可开采量为 3 300 m<sup>3</sup>/d, 目前有三家单位正在此开采地下热水, 总的可开采量为 3 300 m<sup>3</sup>/d, 每家可获 1 100 m<sup>3</sup>/d 开采量, 而此开采方案在 5 年后南温泉、小泉的开采量也分别为 1 000 m<sup>3</sup>/d 以上, 这样 5 家开采单位的开采量相差不大, 旅游业得到均衡发展。

## 5 结语

南温泉背斜南温泉、小泉及桥口坝开发点是一个统一的地下热水系统, 各地下热水开发点在进行开发时必须坚持可持续发展的原则。通过数值模拟定量研究不同的开发方案, 并进行分析优选, 得到最佳的可持续开发方案。由最佳开发方案可知, 南温泉、小泉, 因旅游业发展的需要不断增加开采量, 及南温泉背斜地下热水资源环境可持续发展的条件下, 桥口坝的最大开采量为 3 300 m<sup>3</sup>/d。由此研究也表明了, 南温泉背斜地下热水补给量丰富, 在不影响南温泉、小泉地下热水资源环境可持续发展的前提下, 桥口坝有可观的地下热水可持续开采量。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Hadzisehovic - Munevera, Dancig - Adam, Miljevic - Nada, Sipka - jislava. Geothermal - water characteristics in the Surdulica Aquifer[J]. Ground Water, 1995, (33) 1: 26-32.
- [3] 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选集[C]. 北京科学技术出版社, 1991.
- [4] Grassi S, Gianelli G, Toro B. Studies of low - temperature hydrothermal systems[J]. Energy Sources, 1994, 16(3): 13-17.
- [5] Olowoker D. O.; Nwosu. D. I. Numerical studies on crack growth in a steel tubular T - joint [J]. International Journal of Mechanical Science, 1997, 39(7): 859-871.
- [6] 周华君. 河流海岸工程水动力数值模拟的基本过程[J]. 重庆建筑大学学报, 2001, 23(5): 1-5.
- [7] 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.
- [8] 张秀江. 重庆水资源现状与可持续利用对策[J]. 重庆建筑大学学报, 2001, 23(5): 37-40.
- [9] Kamil Kaygusuz; Abdullah Kaygusuz. Geothermal energy in Turkey; the sustainable future[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2004, (8) 6: 545-563.
- [10] Manoglou. E; Tsartas. P; Markou. A. Geothermal energy sources for water production - socio - economic effects and people's wishes on Milos island: a case study[J]. Energy Policy. 2004, 32(5): 623-633.

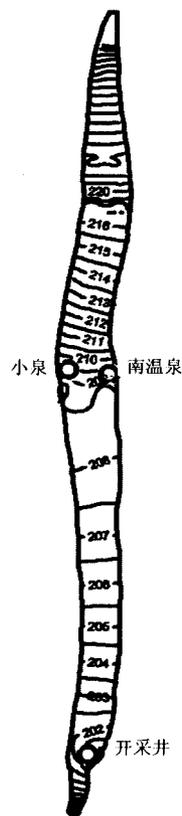


图 5 开采方案二桥口坝开采量 3 300 m<sup>3</sup>/d 2036 年地下热水渗流场