

文章编号: 1009-6248 (2003) 02-0087-06

山西奇村地热田资源评价

黄卫星^{1,2}, 尹立河³, 王晓勇³

(1. 山西省地勘局水环处, 山西 太原 030001; 2. 中国地质大学地学院, 北京 100083;
3. 陕西省地勘局第二水文队, 陕西 渭南 715104)

摘要: 山西奇村地热田开采已有30年历史, 从1988年大量开采地热水以来, 使浅层热水生产井水温持续下降。本文建立了奇村地热田的概念模型, 利用LUMPFIT软件, 采用热田多孔抽水试验资料, 对地热田在不同热水开采量下, 地下水位降深及温度变化进行了预测, 提出了合理的开采量, 对地热田开采有重要指导意义。

关键词: 奇村地热田; 模拟; 预测

中图分类号: P314. 1 **文献标识码:** A

奇村地热田从1972年发现至今已有30年历史, 根据调查, 1973年, 3眼井开采量是: $310 \text{ m}^3/\text{d}$, 水温 $62 \sim 63 \text{ }^\circ\text{C}$; 1988年7眼井的开采量达到 $620 \text{ m}^3/\text{d}$; 1991年10眼地热井的开采量达到 $1300 \text{ m}^3/\text{d}$ 。到目前为止奇村共有疗养院14家, 热水井11眼, 室内热水游泳池4个, 床位1000张, 总开采量达 $500 \text{ m}^3/\text{d}$, 加上热田北部农灌井开采热水, 2002年热水开采量达到 $2000 \text{ m}^3/\text{d}$ 。1992年利用井口、井中测温发现热田范围已在缩小, 西部边界附近热水井水位、水温下降(奇村地热井水温从1982年的 $56.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 降为 $20.7 \text{ }^\circ\text{C}$), 据2002年访问调查, 工疗热水井水温从1992年的 $63 \text{ }^\circ\text{C}$ 降为 $45 \text{ }^\circ\text{C}$ 。上述情况反映奇村地下热水已过量开采, 笔者利用多孔抽水试验资料, 对地热田的开采量、水位进行拟合, 预测不同开采量下整个系统的水位及水温变化, 提出了合理的开采利用方案。

1 地热田自然地理概况

奇村地热田位于山西省忻州市西北16 km (图

1), 该区属温带大陆性半干旱气候, 多年平均气温 $9 \text{ }^\circ\text{C}$, 多年平均降水量 474 mm , 多年平均蒸发量为 1800 mm 。热田南部较近河流为南云中河, 属子牙河水系, 长 18 km , 由西向东汇入滹沱河。热田位于南北开阔的平川区, 海拔 $825 \sim 850 \text{ m}$, 西部为云中山, 最高峰海拔 1503 m , 东部为金银山, 最高点海拔为 1279 m 。相对高差 678 m 。

2 地热田地质概况

2.1 地质概况

地热田基底为滹沱群大石岭组, 岩性为硅质结晶白云岩、千枚岩、钙质石英岩, 厚度 $700 \sim 900 \text{ m}$ 。由于北北东向及北东向导热断裂作用, 使深部地热补给第四系孔隙含水层, 浅层第四系孔隙热储层为中更新统砂层、砂卵砾石层, 分布于地热田中部与南部, 共6层, 厚度 $10 \sim 20.5 \text{ m}$, 埋深 $16 \sim 28 \text{ m}$, 井口水温 $20.9 \sim 72.4 \text{ }^\circ\text{C}$, 单位涌水量 $11.1 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$, 水化学类型为 $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4\text{-Na}$ 和 Cl-Na 型。中深层第四系孔隙热储层厚 34 m , 已有8眼热水井井口水

收稿日期: 2003-02-24; 修回日期: 2003-04-02

作者简介: 黄卫星(1957-), 男, 高级工程师, 中国地质大学地学院在读地质工程专业硕士, 长期从事水文地质环境地质调查研究工作。

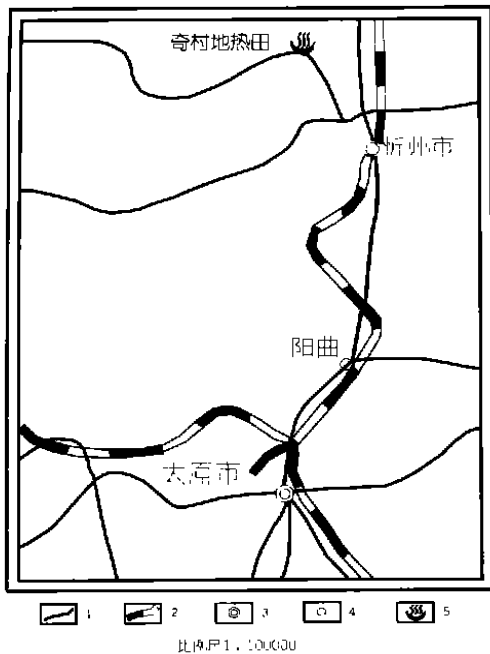


图1 奇村地热田交通位置图

Fig.1 Communication map of Qicun geothermal field

1. 公路; 2. 铁路; 3. 省会城市; 4. 城市; 5. 地热田

温 $26.6 \sim 75.6^{\circ}\text{C}$ ，水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca} \cdot \text{Na}$ 型，其中有两眼分布在热田南部，分布于热田北部的两眼井揭露深度大，温度也相应增高^①。

2.2 热田地温场特征

利用热田区 26 眼水井（浅井 18 眼、中深井 8 眼）进行了井口水温测量（图 2），以 20°C 水温为界，1988 年圈定热田面积 2.5 km^2 ，1992 年圈定热田面积 1.63 km^2 ，减小 0.87 km^2 。以 20 m 埋深的井中水温（ 20°C ）测量圈定热田面积，1986 年热田面积为 1.62 km^2 ，1992 年为 1.27 km^2 ，减小 0.35 km^2 。1992 年利用电阻率填图，以电阻率 $30\Omega\text{m}$ 封闭等值线圈定地热田面积 1.61 km^2 ，热田中心电阻率最小值为 $5.9\Omega\text{m}$ 。以 12 组水化学样品中 Cl^- 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 含量等值线圈定热田面积约 2.3 km^2 ，以综合方法圈定的面积 2 km^2 作为奇村地热田面积。

从 T-f (Z) 井温曲线（图 3）可以看出：30 m 以浅热储层在地热田中心井孔揭露深度浅，热储厚度小，但初见水温高，达 $43.9 \sim 63^{\circ}\text{C}$ ，见图中 q1、

q3、q6、q7 曲线，反映了热田中心为基岩隆起区，断裂导热通道直接和孔隙含水层接触；从热田中心向东北方向推移，浅部含水层水温明显降低，见曲线 q15、q17、q19。中深层地热井分布在热田中心偏北位置，热储在垂向上具有明显的分带性，45~65 m 深度反映出热水侧向对流补给特征，见 q9、q12、q13、q6 曲线。靠南部曲线 q9、q12 反映离补给源近，温度高的特征。

2.3 地下热水动态特征

2.3.1 水位

奇村地热田从 1972 年至今已开采 30 年，开采量在逐年增加，1988 年调查时发现，洗浴高峰时，热田中心区会形成一小降落漏斗，面积约 0.3 km^2 ，中心水位降 2~4 m。特别是从 1991 年以来已形成超采地热水的格局，地下水位出现大面积的下降，下降期主要集中在每年夏季的浴疗高峰期 6~9 月份，其中 7 月份下降最大，10 月至翌年 3 月份水位逐渐回升，但最终还是开采大于补给，地下水位不能及时恢复。从奇村中学热水长观孔 1982~1990 年地下水位的观测明显反映出这一特征，该孔 1982 年最大月均水位降为 4.68 m（7 月份），12 月水位只回升了 1.8 m；1990 年最大月均水位降为 6.11 m，12 月回升了 2.14 m，可见从 1982 年至 1990 年水位持续下降了 1.09 m，年均下降 0.14 m。据调查，从 1992 年至 2002 年热田中心水位又下降了约 1.8 m，年均下降 0.18 m。

2.3.2 水温

在水位的持续下降过程中，外围冷水不断渗入，奇村中学长观孔水温 1982 年 56.2°C ，到 1990 年下降到 43.1°C ，由于 1990~1991 年新打热水井 3 眼，增加开采量 $680 \text{ m}^3/\text{d}$ ，使该热水井 1992 年的水温降为 20.7°C ，从此停止使用。据最近调查，工疗热水井成井水温 63°C ，1992 年调查时仍为 63°C ，从 1992~2002 年水温降为 45°C 。

2.3.3 水质

从 1992 年与 1988 年相同热水井、相同季节水质分析结果可看出：1992 年热水中 Cl^- 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 含量在热田中部有所增加，在热田边界有所减少。

①黄卫星，王平波，杨艳萍，等．山西省忻州奇村地热田资源评价报告，1993。

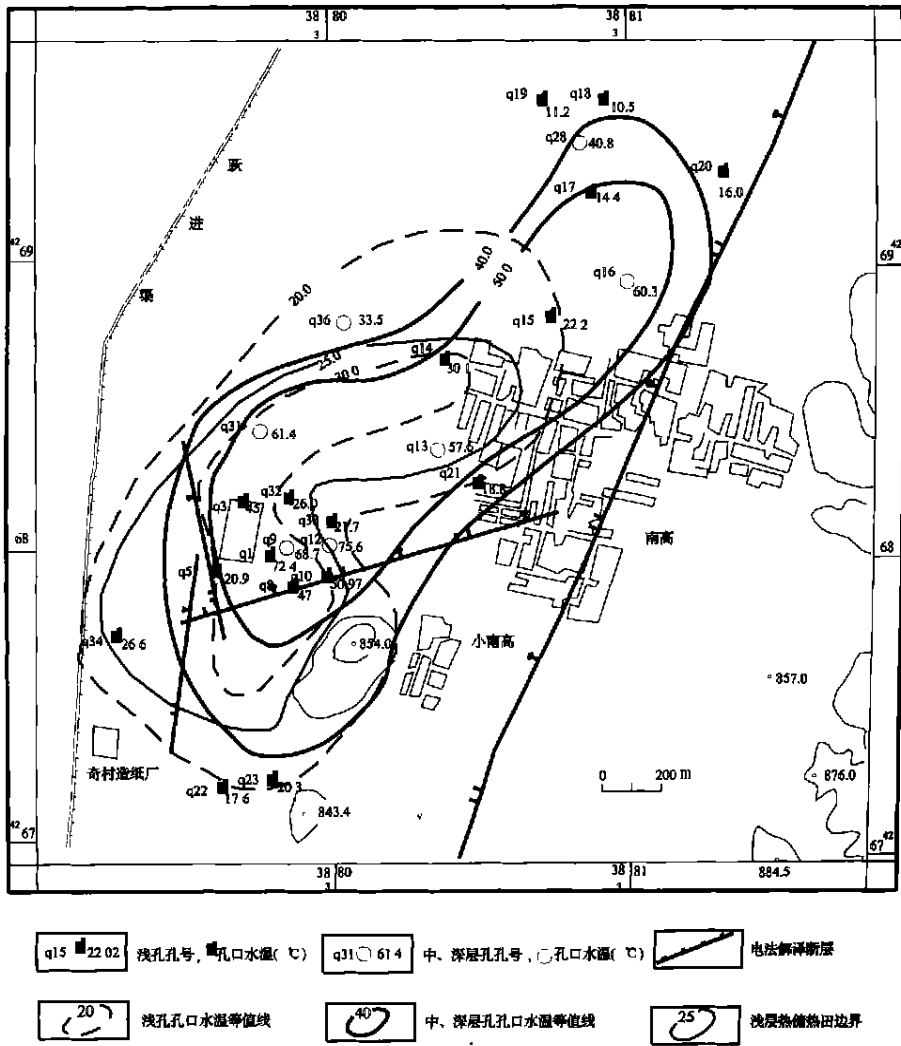


图 2 山西奇村地热田井口水温等值线图

Fig. 2 Iso-temperature map of Qicun geothermal field

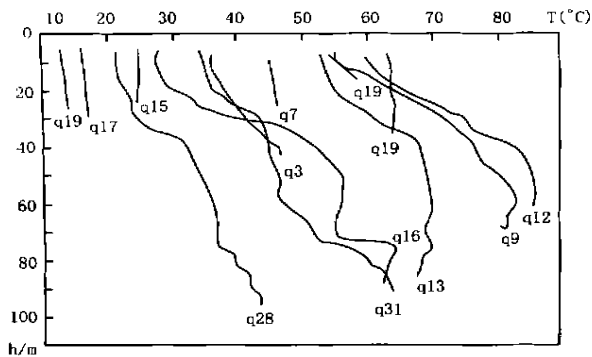


图 3 山西奇村地热田 $T-h(z)$ 井温曲线图

Fig. 3 Temperature log profile of Qicun geothermal field

3 地下热水资源评价

3.1 地热田概念模型

3.1.1 地下热水补给运移特征

奇村地下热水的补给源主要来自大气降水, 热田东西两侧均为山区, 东部山区汇水面积狭小, 对地下水热水的补给作用有限, 西部云中山区基岩裸露, 裂隙发育, 汇水面积大, 为地下水热水的主要补给源。从西部云中前大断裂入渗并参与深循环的地下水, 随循环深度的增加温度升高, 比重降低, 在压力水头作用下, 沿基岩隆起部位的断裂裂隙垂直上涌, 侧向补给上覆第四系松散层 (冷含水层), 在第四系孔隙含水层中冷、热水混合, 从而形成第

四系孔隙含水层。逐渐形成沿断裂带热水上涌部位水温高，而远离断裂带水温逐渐降低，以及底部水温高、上部水温低的断裂裂隙热储系统（图4）。

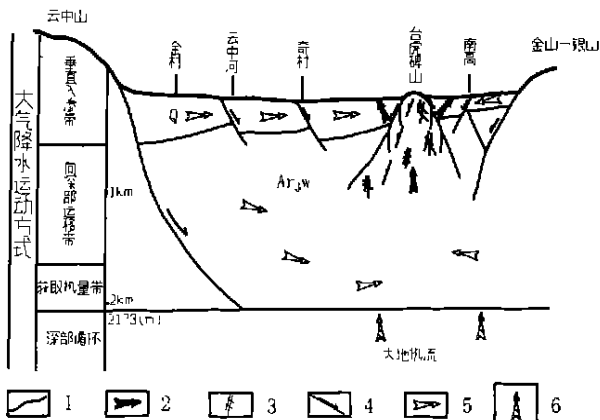


图4 奇村地热田地下水运移示意图

Fig. 4 Schematic map of geothermal water transportation

- 1. 地质界线; 2. 热水; 3. 基岩裂隙;
- 4. 断层; 5. 冷水; 6. 大地热流

3. 1. 2 热水基础温度推算

奇村地热水属低温-中低温，故选择钾镁温标公式：

$$t = \frac{4418}{13.98 - \lg(c_1/c_2)} \quad (1)$$

式中： t ——热水基础温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）；

c_1 ——水中钾离子浓度（ mg/l ）；

c_2 ——水中镁离子浓度（ mg/l ）。

选取 q10 井（深 22.69 m，水温 50.97°C ）作为区内代表性井孔，因为该孔抽取的地下热水为基岩裂隙水，混入的冷水极少，可代表深部涌上的地下热水。钾离子含量（ 10.8 mg/l ），镁离子含量（ 4.1 mg/l ），代入公式计算得奇村地下热水基础温度为 115°C 。

3. 2 地热资源评价

LUMPFIT 软件已在世界上许多低温地热田被用来模拟和预测水位变化，软件利用非线性最小二乘迭代法拟合观测的水位数据。图 5 是 LUMPFIT 软件的原理简图，此软件包括 3 容器和每个容器间的传导器（图 5）。每个容器的容水能力用参数 K 表示，当地热田一定质量的水被抽取后，热田的压力变化为 $\Delta P = m/K$ 。当相邻两个容器产生 ΔP 的压力差后，两个容器会产生水力联系，其交换量为 $q =$

$\sigma \Delta P$ 。第一个容器模拟地热田的核心部分—地热井分布区；第二个容器代表地热的外围地区；第三个容器表示与地热田热储层有水力联系的更远更深的部分。如果地热系统是个封闭系统，则 $\sigma = 0$ ；如果地热系统是个开放系统，则最后一个容器与一个定水头的补给源相连。通常情况下，开放型模型预测的结果较乐观，而封闭型模型的结果较悲观，现实情况介于两者之间^[1]。

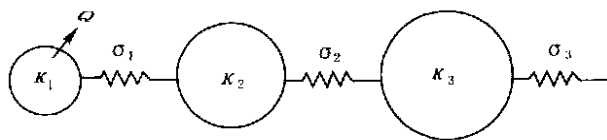


图5 LUMPFIT 结构示意图

Fig. 5 Schematic map of LUMPFIT

假定地热田由 N 部分组成的开放系统，以 Q 的恒定开采量进行开发，地热田水位（或压力）则可用下面的公式表示。

$$P(t) = \sum_{j=1}^N Q \frac{A_j}{L_j} [1 - e^{-L_j t}] \quad (2)$$

其中， N 值为 1, 2, 3, ...; Q 为热田的开采量（ kg ）； A_j 、 L_j 和 B 都是 K_j 和 σ 的函数。如果为一个封闭系统则地热田的压力变化为。

$$P(t) = \sum_{j=1}^N Q \frac{A_j}{L_j} [1 - e^{-L_j t}] + QBt \quad (3)$$

LUMPFIT 将自动进行水位拟合，直到取得最佳拟合效果为止。下面利用抽水试验的数据进行水位拟合，抽水试验采用同一抽水量进行，持续了大约 50 h。模拟的结果见图 6。这些参数可以用来计算地热田的体积、面积和渗透系数等参数。每个容器的代表容水能力的参数 K 在液相地热田有两种形式：一种形式与液体/岩石的压缩系数有关；另一种则受潜水控制。在第一种情况下：

$$K = V\rho c_t \quad (4)$$

其中 V 代表地储的体积（ m^3 ）， ρ 代表地热水的密度（ kg/m^3 ）， c_t 表示液体/岩石的总压缩系数。第二种情况：

$$K = \frac{A\phi}{g} \quad (5)$$

其中 A 表示地储层的面积（ m^2 ）， ϕ 表示热储的孔隙度（%）， g 表示重力加速度。

根据以上公式计算得出，第一部分即地热井分

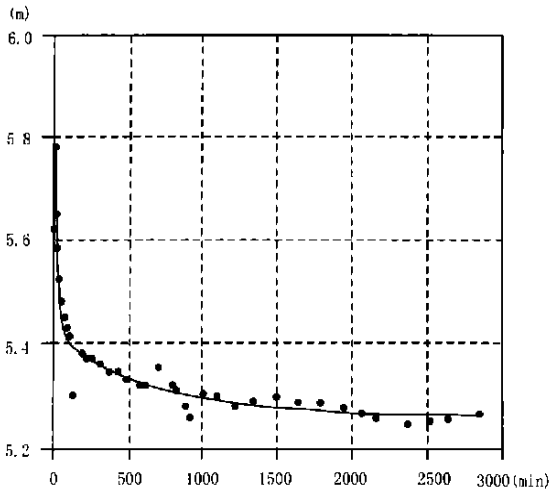


图 6 实测水位和模拟水位对比图

Fig. 6 Measured water lever vs simulated water level
点代表实测水位点; 线表示模拟水

布区的面积为 2.2 km², 与其有水力联系的地区即模型的第二部分面积为 67 km²。整个系统的渗透系数为 10 m/d, 导水系数为 317 m²/d, 以上这些数据均与实际情况和与抽水试验得出的参数吻合。

模拟的主要目的是预测在不同的开采情况下, 地热田的水位变化。下面对 3 种开采方案进行了预测: ①保持现在的开采量, 即 1 150 m³/d; ②将开

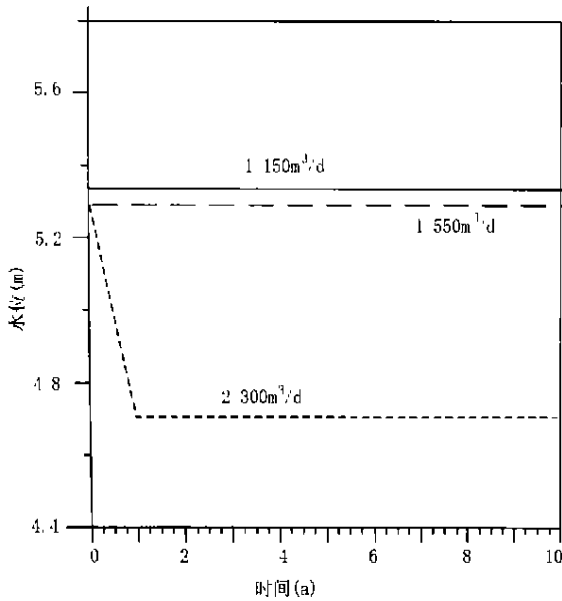


图 7 不同开采量下热田的水位变化

Fig. 7 Simulated water level under different production scenarios

采量增加一倍为 2 300 m³/d; ③开采量为 1 550 m³/d。图 7 为连续开采 10 年后整个系统的水位变化, 在第一种情况下, 水位下降约 0.5 m, 在第二种情况下, 水位下降大约为 1.2 m, 第三种情况下水位下降为 0.65 m。从图 7 中可以看出, 水位下降的速度缓慢, 反映出奇村地热田是一个开放的系统, 地热水有丰富的补给源, 这与上述的模型得出的参数一致。

从以上的模拟中可以看出, 在地热田的开采过程中, 最大的问题不是水量, 而是水温。可以根据公式 (6) 对不同开采量下温度的变化进行预测。

$$E_{\text{开采}} = \frac{P_{\text{冷水}}}{P_{\text{总}}} E_{\text{冷水}} + \frac{P_{\text{热水}}}{P_{\text{总}}} E_{\text{热水}} \quad (6)$$

其中 $E_{\text{开采}}$ 为井口热水的焓, $E_{\text{冷水}}$ 和 $E_{\text{热水}}$ 分别是含水层冷水和混合前热水的焓。 $P_{\text{冷水}}$ 和 $P_{\text{热水}}$ 分别是冷水和热水的开采量。其中冷水的焓为 17°C 的水的焓, 即温度为热田外围冷水的温度。根据地热温标, 热水的温度约为 108°C, 故热水的焓采用 108°C 下水的焓。开采量 $P_{\text{总}}$ 采用抽水量, 即 13 kg/s。经计算 $P_{\text{热水}} = 9 \text{ kg/s}$ 。根据上面公式对不同开采量, 地热井的水温变化进行了预测 (图 8)。由图可以看出开采量每增加 1 kg/s, 温度下降大约 2°C。必须指出以下预测的温度是冷、热水充分混合后的温度。在实际情况下, 如果短时间开采量增加剧烈, 冷、热水尚未充分混合, 则水温的下降可能会比预测的低许多。根据温度 (结合开采量) 预测, 1 550 m³/d 可作为热田的最优开采量。

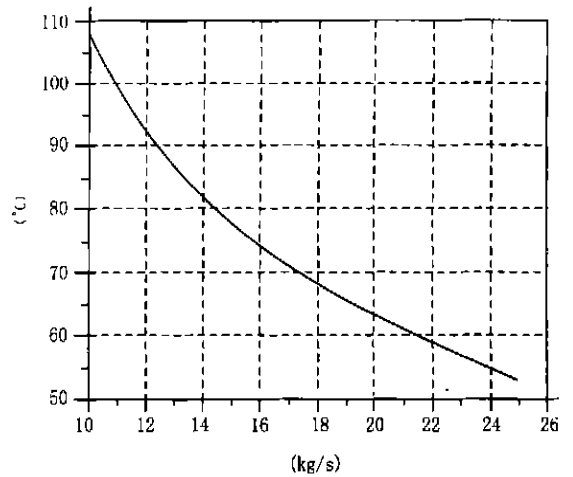


图 8 不同开采量下热田的温度变化

Fig. 8 Temperature curve under different production rates

4 结论和建议

(1) 山西奇村地热田是一个低温地热田, 热田面积约 2 km^2 , 地热水温度约 $40 \sim 85 \text{ }^\circ\text{C}$ 。地热田热水产量增加显著, 从 1973 年的 $310 \text{ m}^3/\text{d}$ 到 2002 年 $2\ 000 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

(2) 利用 LUMPFIT 对抽水试验数据进行了模拟, 根据模型参数计算出地热田的面积约 2.2 km^2 , 渗透系数为 10 m/d , 导水系数为 $317 \text{ m}^2/\text{d}$, 与抽水试验的数据基本吻合。

(3) 利用 LUMFIT 对不同开采量下水位变化进行了预测, 如果保持抽水试验的抽水量, 经过长期开采后 (10 年), 水位下降约 0.5 m 。若开采增加一倍, 则水位下降约为 1.2 m 。

(4) 利用热焓守恒定律, 计算出不同开采量下温度的变化。开采量每增加 1 kg/s , 温度约下降 2

$^\circ\text{C}$ 。根据温度变化曲线, 得出热田的最优开采量为 $1\ 550 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

(5) 统一管理热田, 关闭用于灌溉的地热井。加强地热田的监测, 主要的监测系数包括开采量、水位和水温。定期采取水样分析水化学变化, 这些变化可能预示地热田的温度和补给源发生了变化。

(6) 为了更加全面地了解地热的特征, 更好的指导地热资源利用与开发, 建议开展数字模拟软件, 如美国加里福尼亚大学的 TOUGH2 进行多参数拟合, 对单井和整个地热系统进行模拟, 预测。

参考文献:

- [1] Axelsson G. Simulation of pressure response data from geothermal reservoirs by lumped parameter models. Fourteenth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Jan. 1989, Stanford university, 257-263.

Assessment of geothermal resources for Qicun geothermal field in Shanxi

HUANG Wei-xing^{1,2}, YIN Li-he³, WANG Xiao-yong³

(1. Shanxi Geological Survey, Taiyuan, 030001, China; 2. China Geoscience University, Beijing, 100083, China; 3. The Second Hydrogeological Team of Shanxi Province, Weinan 715104, China)

Abstract: Qicun geothermal field has been developed for more than 30 years. Water temperature drops quickly since large exploitation beginning in 1988. Conceptual model of Qicun geothermal field has been constructed and LUMPFIT is used to predict waterlevel drawdown under different production rates based on multiple well pumping test data as well as temperature prediction. Based on those predictions, reasonable development plan has been put forward, which is critical to future development of Qicun geothermal field.

Key words: Qicun geothermal field; simulation; prediction