

西安地热田地热弃水回灌数值模拟研究

王贵玲¹⁾ 刘志明²⁾ 刘庆宣²⁾ 烟献军²⁾

(1) 南京大学地球科学系 210093 (2) 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 正定 050803)

摘要 本文在分析研究西安地热田西南地热开发区的地质构造、热储特征的基础上, 首次建立了回灌区地热系统三维数值模型, 完成了地热弃水回灌的数值模拟研究, 提出地热弃水回灌层位及回灌水量、回灌对热储层渗流场及温度场的影响等。

关键词 三维数值模型 地热回灌 西安

Modeling of Geothermal Reinjection in Xi'an Geothermal Field, West China

WANG Guiling¹⁾ LIU Zhiming²⁾ LIU Qingxuan²⁾ YAN Xianjun²⁾

(1) Department of Earth Science, Nanjing University, Nanjing 210093;

(2) Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Zhengding, Hebei 050803)

Abstract Geothermal resources are widely distributed in China. In recent years, a lot of research work has been carried out on the distribution, utilization, drilling, and exploration of geothermal resources. However, there is almost no record of geothermal reinjection in China. Based on geological characteristics, geophysical and geochemical features of Xi'an low-temperature geothermal field, this paper has established for the first time a 3-D numerical model to simulate the change of temperature and pressure after reinjection. The results show that making reinjection at the depth of 1 450 m to 2 300 m will benefit the reservoir pressure with no remarkable change in temperature.

Key words 3-D numerical model geothermal reinjection Xi'an

地热能属可再生资源, 它与核能、风能、太阳能、潮汐能被列为五大新能源, 地热能利用的最突出的特点是: 可再生性(并非是完全可再生)、清洁、开发利用投资小等, 地热专家称地热能可为 21 世纪能源(王贵玲等, 2000)。

西安地区地热资源分布广、储量大、开发利用历史悠久(王贵玲等, 1992)。这一巨大的能源库的科学、合理的开发利用, 将会对该区地方经济的发展起极大的促进作用。但是, 由于缺乏合理的规划, 近年来这一宝贵的资源正在遭到严重的破坏, 热储压力持续下降(郑灼华、王贵玲等, 1992)。为了合理开发利用西安地区热矿水资源, 延长地热田的开发利用寿命, 减少城市环境污染, 在综合研究的前提下, 选择西安地热田西南部开展地热弃水的回灌试验。

回灌试验区位于西安地热田西南的第 I 断块区(大雁塔断块), 靠近第 II 断块(小雁塔断块), 区内有 2 条主要构造断裂:

(1) 双水磨-等驾坡断裂: 断裂走向 NEE, 倾向 SE, 倾角约 80°, 属隐伏断裂, 隐伏于 1 000 m 之下, 顶部端点达上第三系上新统张家坡组上部。

(2) 皂河断裂: 其走向大体沿皂河延伸, 呈 NW 向, 倾向 SW, 据鱼化寨地热井论证人工浅震剖面解释, 断面倾角约 85°, 该断裂活动性较强, 影响到第四系中下部地层, 在南段韦曲一带有明显的 SiO₂、F 离子水化学和地温等地热异常。回灌区从上到下共发育 6 套地层(表 1)。

1 回灌层位及深度的确定

区内主要有第四系秦川群(Q₂₋₄qc)和三门组(Q_{1s})、第三系张家坡组(N_{2z})、蓝田灞河组(N_{2l}+b)、高陵群(N_{1gl})和白鹿塬组(E_{3b}) 6 个热储层段。

据钻井揭露, 蓝田灞河组(N_{2l}+b)地层从 1 450~2 307 m, 厚 857 m, 为一套河湖相沉积层。主要岩性为细砂岩、砂砾岩互层。其总体特征是砂

表1 回灌区地层结构表

Table 1 Stratum list of re-injection area

| 地层时代 | 层底深度/m | 厚度/m | 岩性描述及其它 |
|----------------------------|--------|------|---|
| 秦川群 Q ₂₋₄ qc | 500 | 500 | 上部为灰黄色粉质粘土夹砂层,中、下部为大段杂色、砂砾石与灰黄、褐黄色粉质粘土不等厚互层,砂层松、层厚,粘土软 |
| 三门组 Q _{1s} | 720 | 220 | 灰色粉质粘土、粘土与灰白色砂、含砾石砂不等厚互层,砂层厚薄不等且松散,粘土软。 |
| 张家坡组 N _{2z} | 1450 | 730 | 为一套河、湖相沉积。岩性为灰绿色、浅棕红色泥岩、砂质泥岩夹薄层灰色粉细砂岩不等厚互层,砂岩较松散 |
| 蓝田灞河组 N _{2l+b} | 2307 | 857 | 为一套河、湖相沉积。主要岩性为浅棕、棕紫色泥岩、砂质泥岩与灰白色细砂岩、砂砾岩互层。砂岩半固结,泥岩较软 |
| 高陵群 N _{1gl} | 3700 | 1493 | 为一套河、湖相沉积。主要岩性为大段棕红色、棕紫色泥岩、砂质泥岩夹薄层状灰色粉细砂岩。泥岩含钙结,较硬,砂岩较疏松。共有砂层77层,厚233m。本段为主要取水段,共下入滤水管15根,长度204m,水管主要分布在2423~2708m、2992~3096m、293~3438m 3个区间。 |
| 白鹿塬组 E _{3b} | 4006 | 306 | 岩性为紫色、棕褐色泥岩与含砾粗砂岩不等厚互层。共有砂层23层,厚98m。本段为主要取水段,下入滤水管度148m |

注:引自陕西省地矿局第一水文队,1996.西安地热普查报告。

岩颗粒较粗,半固结,较疏松,分选较差,次棱角状,泥质胶结,单层厚度1.5~10m,砂岩厚度及砂厚比相对较大。据测井数据,该段共有56层含水层,厚286.5m,约占地层总厚的33.4%(表2);含水层总孔隙度平均值变化范围为14.4%~27.8%;在1662.4~1854m之间含水层平均渗透率较大,在125~330m/d之间,最大渗透率为742m/d,并且该段含水层单层厚度较大;其它地段含水层除少数几层渗透率平均值在110m/d左右外,均小于70m/d;据相邻地热井单井抽水试验计算K值为0.38~0.47m/d。

高陵群热储层厚1393m,从2307m起至3700m止,该段地层以泥岩、砂质泥岩为主,夹薄层状粉、细砂岩,砂层共77层,厚233m,砂厚比为16.73%。据测井资料,含水层孔隙度较低,大部分小于10%,在3028.3~3451.9m段的含水层孔隙度在11%~18%之间;该热储层渗透率也较低,一般小于30m/d,只有2个含水层的渗透率大于100

表2 热储层特征表

Table 2 Character of heat reservoirs

| 热储层段 | 热储层厚度 m | 砂岩厚度 m | 砂厚比 % | 渗透率 m·d ⁻¹ |
|-------|------------|-----------|----------|--------------------------|
| 蓝田灞河组 | 857 | 286.5 | 33.4 | 125~330 |
| 高陵群 | 1495 | 233 | 15.6 | <30 |

注:引自陕西省地矿局第一水文队,1996.西安地热普查报告。

m/d。据区域资料,该热储层渗透系数为0.07~0.24m/d。

从以上资料看,蓝田灞河组热储层砂厚比大,孔隙度、渗透率高,而高陵群热储层相对来说砂厚比小,孔隙度、渗透率较低,加之,蓝田灞河组热储层为该地区主要开采层,开采量较大,年压力下降较快,因此拟选择蓝田灞河组热储层作为回灌层,回灌段选择在1450~2300m之间。

2 地热井回灌数值模拟^①

地热井回灌模拟区选定在I、II构造断块,即大雁塔大部分、小雁塔断块,面积约为98km²,地面平均标高约410m。该模型主要模拟选定的回灌目的层,即第三热储层段蓝田灞河组(N_{2l+b})^{②③}(王贵玲,1991,1992,1996)。

2.1 热储层温度校正和初始压力场、温度场的确定

西安地热井的测温数据是在非稳定状态下测得的,需要对这些资料进行校正才能使用。此次热储层温度校正工作采用以下经验公式^④:

$$t_i = 3.30H_i + 24.90 \quad (1)$$

式中: t_i 为地温(℃); H_i 为深度(100m)。

温度校正结果如表3所示。

各热储层的初始温度场如图1所示。

该地区的热储层压力测量数据较少,一般都采用测量地热井静水位的方法来观测热储层的压力变

① 天津市地矿局,地质矿产部水文地质工程地质研究所,1998.天津市塘沽区地热流体回灌研究。

② 王贵玲等,1993.西藏羊八井地热系统数值模拟研究.第二届天津地热学术研讨会论文集。

③ 王贵玲等,1994.集中参数模型及其在中低温地热系统模拟中的应用.第四届中国地热学术研讨会论文集。

表 3 各热储层部分井的地温校正表

Table 3 Temperature correction of heat reservoirs

| 点号 | 校正前温度/℃ | | | 校正后温度/℃ | | |
|------|---------|-------|-------|---------|---------|---------|
| | II | III | IV | II | III | IV |
| XR41 | 56.9 | 71.85 | 93.6 | 67.2852 | 78.1554 | 93.6 |
| 2 | 55 | 65.3 | 76.3 | 61.596 | 76.512 | 86.1315 |
| X31 | | 70.55 | 87.55 | | 70.55 | 88.5405 |
| XR24 | 49.5 | 66.8 | 77.3 | 56.5635 | 66.645 | 78.9375 |
| XR13 | 51.9 | 60.3 | 83.52 | 62.2395 | 71.6775 | 83.52 |
| 1 | 56.75 | 76 | 86.02 | 61.233 | 76 | 86.02 |
| 11 | 65 | 79.5 | 91.5 | 69.1365 | 81.726 | 95.4375 |

注:II 为第三系张家坡组(N_{2z})热储层;III 为蓝田灞河组(N_{2l+b})热储层;IV 为高陵群(N_{1gl})热储层。

化。所以采用以下公式计算压力值:

$$p = (H - h) \times \rho \times g \quad (2)$$

式中:H 为测压水头(m);h 为热储层顶板标高(m);ρ 为流体密度,取 998.28 kg/m³;g 为重力加速度,取 9.80665 N/kg。

由此计算出的各热储层的初始压力场如图 2。

2.2 概念模型

根据模拟区的热储层结构,模型用第二热储层段张家坡组(N_{2z})和第四热储层段高陵群(N_{1gl})来控制垂向上的热流场,这样模型中包含了 3 个热储层,这三个热储层的结构参数见表 4。

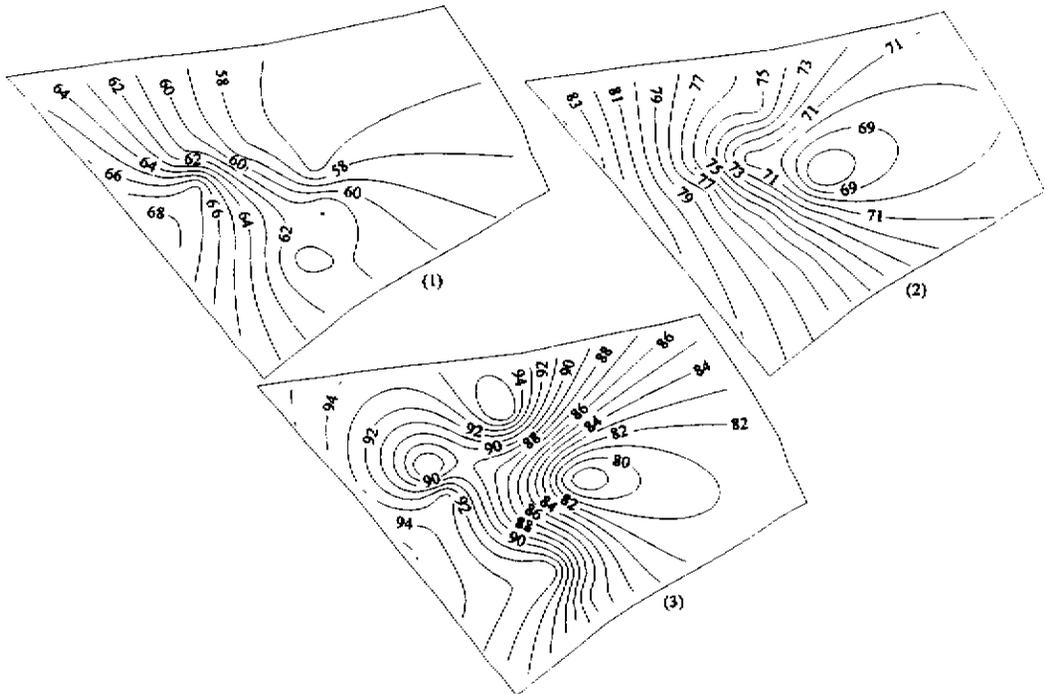


图 1 热储层初始温度场(℃)

Fig.1 Initial temperature map of heat reservoirs(℃)

(1)第 II 热储层 (2)第 III 热储层 (3)第 IV 热储层

(1)the second heat reservoir (2)the third heat reservoir (3)the fourth heat reservoir

表 4 热储层结构参数表

Table 4 Structure parameters of heat reservoirs

| 储层代号 | 地层 | 断块 | 顶板埋深 /m | 底板埋深 /m | 平均地层厚度/m | 砂厚比 /% |
|------|---------------------------|----|---------|---------|----------|--------|
| II | 张家坡组(N _{2z}) | I | 660.33 | 1368.75 | 708.42 | 14.91 |
| | | II | 641.16 | 1244.27 | 603.11 | 8.98 |
| III | 蓝田灞河组(N _{2l+b}) | I | 1368.75 | 2082 | 713.25 | 32.98 |
| | | II | 1244.7 | 1886.5 | 641.8 | 35.08 |
| IV | 高陵群(N _{1gl}) | I | 2082 | 2500 | 418 | 10.00 |
| | | II | 1886.5 | 2500 | 613.5 | 11.71 |

注:引自陕西省地质矿产局第一水文队.1996.西安地热普查报告.

根据初始温度场和压力场,模型的北部、西部、东部边界和南部边界可定为隔热隔水边界,在模型中识别过程中校正。

2.3 数学模型

根据流体质量守恒,流体运动三维流压力方程为以下偏微分方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_{xx} \frac{1}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy} \frac{1}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{zz} \frac{1}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial z}) = S_s \frac{1}{\rho g} \frac{\partial p}{\partial t} - Q \quad (3)$$

式中:K_{xx},K_{yy},K_{zz} 为沿主流方向渗透系数(m/s);p 为热储层压力(MPa);ρ 为流体密度(kg/m³);

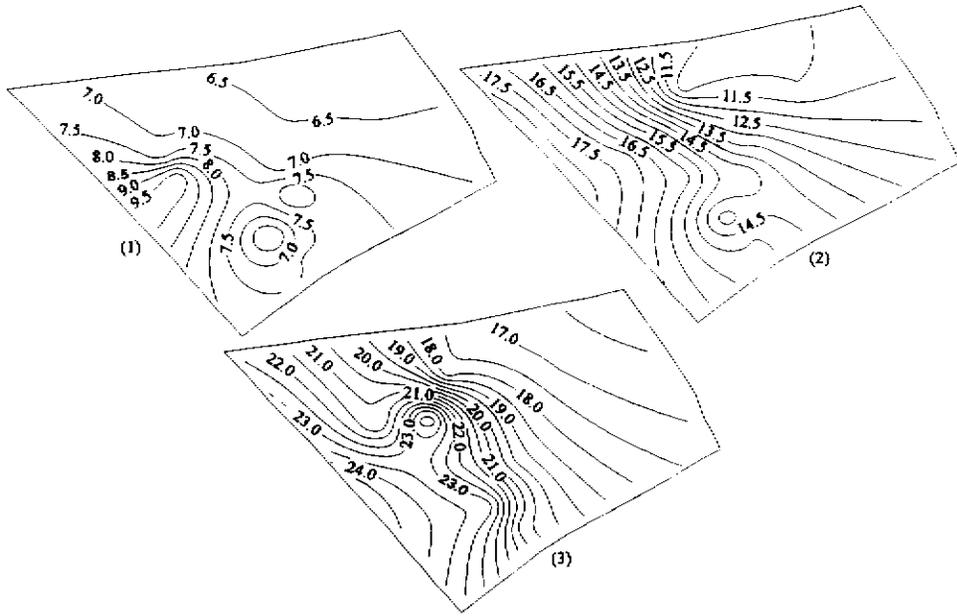


图2 各热储层 1998 年 1 月份压力场 (MPa)

Fig.2 Pressure map of heat reservoirs on January 1998 (MPa)

(1)第 II 热储层 (2)第 III 热储层 (3)第 IV 热储层

(1)-The second heat reservoir (2)-The third heat reservoir (3)-The fourth heat reservoir

g 为重力加速度 (N/kg); Q 为单位热储层厚度流体流量 ($m^3/s \cdot m$); S_s 为单位热储层厚度储水系数 (L/m); t 为时间 (s).

根据能量守恒定律, 流体三维流热运移方程表示为以下偏微分方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda M \frac{\partial t_1}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda M \frac{\partial t_1}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda M \frac{\partial t_1}{\partial z}) + Q_E - (\rho C v_x M \frac{\partial t_1}{\partial x} + \rho C v_y M \frac{\partial t_1}{\partial y} + \rho C v_z M \frac{\partial t_1}{\partial z}) = [\varphi \rho C + (1 - \varphi) \rho_R C_R] \frac{\partial t_1}{\partial t_2} \quad (4)$$

式中: t_1 为温度 ($^{\circ}C$); t_2 为时间 (s); V_x, V_y, V_z 为流体渗流速度向量 (m/s); λ 为热储层热导率 ($J/m \cdot s \cdot ^{\circ}C$); ρ_R 为热储层岩石密度 (kg/m^3); C, C_R 为流体、岩石比热 ($J/kg \cdot ^{\circ}C$); M 为热储层厚度 (m); Q_E 为垂向热通量 ($J/m^2 \cdot s$); φ 为孔隙度.

以上 2 个方程经过离散后, 采用三角形有限元法将这两个方程耦合求解, 研究区经过三角单元的剖分, 共剖出 192 个节点.

2.4 模型校正

此次模型校正选用 1998 年 1 月至 1999 年 1 月作为模型的校正期, 以一个月为一个时段进行参数

校正. 压力数据以 1998 年 1 月的资料作为初始值, 因为温度变化较小, 所以温度数据以各成井报温度资料作为初始值.

2.4.1 初始参数的确定 该地区有丰富的抽水试验资料, 根据以往的抽水试验成果和研究结果^①, 同时考虑地质构造、岩性等因素, 该地区的渗透系数和弹性给水度参数可分为 4 个区, 分区及取值如图 3.

模拟区的第二、三、四热储层段的岩石热物理参数和大地热流值初值见表 5.

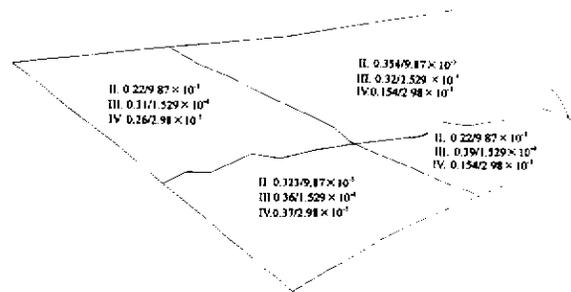


图3 各热储层渗透系数和弹性给水度取值分区图

Fig.3 The coefficient of penetrability and the special yield zoning map of heat reservoirs

II - 热储层号 II, 0.354/9.87 x 10⁻⁵ - 渗透系数/弹性给水度

II - heat reservoirs number II, 0.354/9.87 x 10⁻⁵ - penetrability/special yield

① 陕西省地矿局第一水文队, 1996. 西安地热普查报告.

表 5 热储层岩石热物理参数表

Table 5 Physical parameters of heat reservoirs

| 储层代号 | 岩石热物理参数 | | | | 热流值 |
|------|--------------|---|------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| | $\varphi/\%$ | $\lambda/W \cdot (m \cdot ^\circ C)^{-3}$ | $\rho/g \cdot cm^{-3}$ | $c/cal \cdot (g \cdot ^\circ C)^{-1}$ | $\times 10^{-2} W \cdot m^{-2}$ |
| II | 0.262 | 1.64 | 1.97 | 0.21 | 7.16 |
| III | 0.232 | 1.73 | 2.07 | 0.21 | 7.16 |
| IV | 0.22 | 1.9 | 2.26 | 0.21 | 7.16 |

注:引自陕西地质矿产局第一水文队,1996,西安地热普查报告。

2.4.2 模型校正 通过对 1998 年 1 月至 1999 年 1 月间的十二时段的模型校正,各观测井的压力曲线拟合比较好,最大误差 0.5 MPa,最小误差 0.02 MPa(图 4),温度场基本不变(图 5)。说明模型是反映了实际情况的,证实西安地热田是地压型地热田(王润三等,2000),因此模型所取的参数、边界和源汇项是合理的。

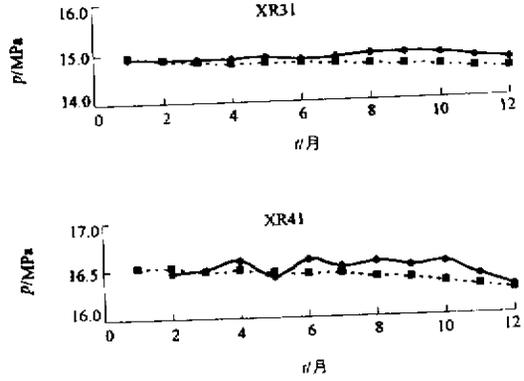
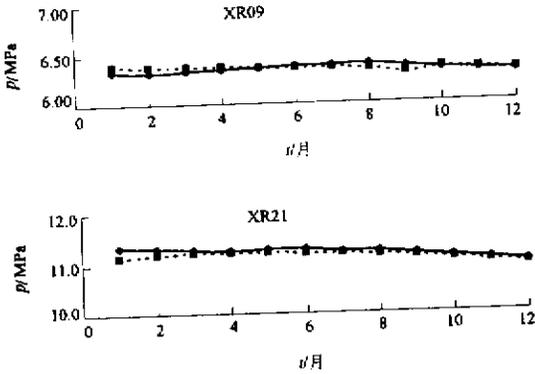


图 4 1998 年 2 月至 1999 年 1 月压力拟合曲线图

Fig.4 The pressure fitting curve map of observation wells(Jan. 1998—Feb. 1999)

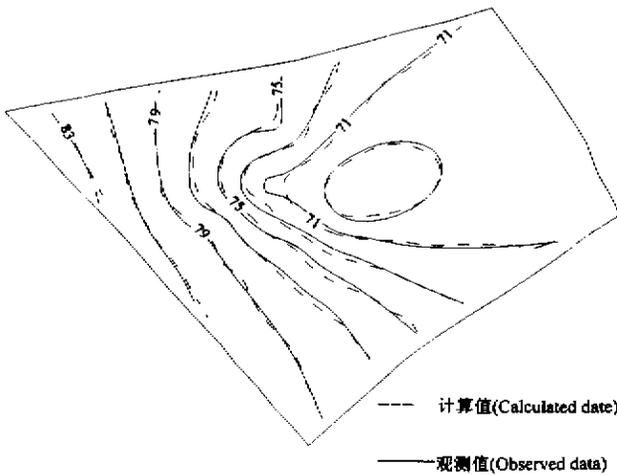


图 5 第 III 热储层温度场拟合图

Fig.5 The temperature fitting map of the III heat reservoir

2.5 回灌模拟计算

在开采条件下进行了回灌模拟,各井的月开采量取各井 1998 年的 12 个月平均开采量,即 $99.3 \times 10^4 m^3$,模拟了回灌水温 $45^\circ C$ 以回灌量 $100 m^3/h$ 进行连续回灌的情况。通过模拟计算,未回灌时模型预测了第 6 年的温度场和压力场,在目前开采强度下,开采 6 年后,第 III 热储层温度基本不变,但压

力平均下降约 1.8 MPa,平均每年下降 0.3 MPa。

回灌时模型预测第 5 年的温度场和压力场如图 6。从第 5 年模拟结果来看,目的层的地热回灌对同一热储层温度的影响局限于 1 km 范围之内。实施回灌 5 a 后,回灌目的层的压力场的变化是显著的,与未实施回灌开采第 6 年预测结果相比较,以水量 $100 m^3/h$ 回灌时,压力约增加了 2.0 MPa。距回灌井最近的同层开采井为 XR41 和 XR27 井,距回灌井 1.5 km,回灌对这两个开采井的温度没有影响。模拟表明,回灌对第 IV 热储层没有影响。

为了更好地指导回灌的实施,在对回灌 5 a 效果评价的基础上,又模拟计算了回灌 20 a 后热储压力的变化情况,结果见图 7。从图中可以看出,以水量 $40 \sim 100 m^3/h$ 回灌时,对 XR41 和 XR27 号井的压力影响是显著的,这两口井的以 $60 m^3/h$ 回灌时的水位比以 $40 m^3/h$ 回灌时的水位平均高出 40 m; $100 m^3/h$ 回灌时的水位比 $60 m^3/h$ 回灌时的水位平均高出 80 m。另外,以 $100 m^3/h$ 回灌时的水位是逐年上升的。

从第 5 年模拟结果来看,目的层的地热回灌对同一热储层温度的影响局限于 1 km 范围之内。实施回灌 5 a 后,回灌目的层的压力场的变化是显著

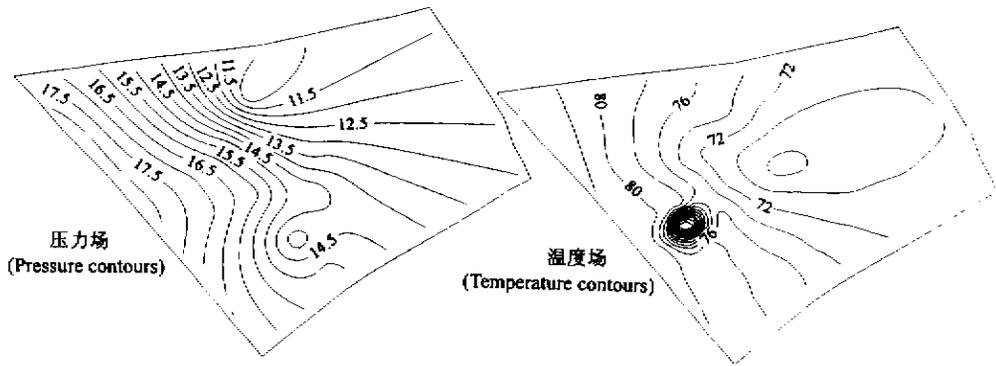


图 6 第 III 热储层以 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 回灌时第 5 年压力场 (MPa) 和温度场图

Fig. 6 The fifth year's pressure (MPa) and temperature map of the III heat reservoir when reinjected at rate $100 \text{ m}^3/\text{h}$

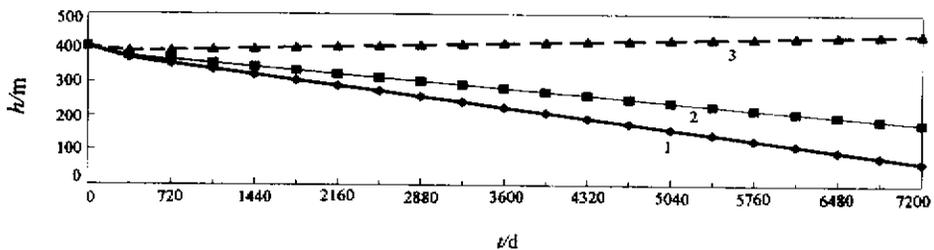


图 7 不同回灌量时 XR41 井预测水位曲线 (45°C)

Fig. 7 The forecast pressure time series at XR41 well under different re-injection rates (45°C)

1-水量 $40 \text{ m}^3/\text{h}$ 2-水量 $60 \text{ m}^3/\text{h}$ 3-水量 $100 \text{ m}^3/\text{h}$

1-Re-injection rate $40 \text{ m}^3/\text{h}$ 2-Re-injection rate $60 \text{ m}^3/\text{h}$ 3-Re-injection rate $100 \text{ m}^3/\text{h}$

的,与未实施回灌开采第 6 年预测结果相比较,以水量 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 回灌时,压力约增加了 2.0 MPa 。距回灌井最近的同层开采井为 XR41 和 XR27 井,距回灌井 1.5 km ,回灌对这两个开采井的温度没有影响。且模拟结果表明,回灌对第 IV 热储层没有影响。

3 结论

(1) 地热弃水回灌适宜层为蓝田灞河组热储层,回灌段深度为 $1450 \sim 2300 \text{ m}$ 。

(2) 回灌 5 a 后,目的层的地热回灌对同一热储层温度的影响局限于 1 km 范围之内。距回灌井最近的同层开采井为 XR41 和 XR27 井,距回灌井 1.5 km ,回灌对这两个开采井的温度没有影响。第 IV 热储层的温度场基本不变。

(3) 实施回灌 5 a 后,回灌目的层的压力场的变化是显著的,与未实施回灌开采第 6 年预测结果相比较,以水量 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 回灌时,压力约增加了 2.0 MPa 。

(4) 回灌 20 a 后,以水量 $40 \sim 100 \text{ m}^3/\text{h}$ 回灌
万方数据

时,回灌目的层的温度影响范围小于 1.1 km ;当以 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 回灌时,在目前开采强度下水位略有上升。因此,实施回灌从而达到维持热储压力是可行的。

参考文献

- 王贵玲,张发旺,刘志明.2000.国内外地热开发利用现状及前景分析.地球学报 21(2):134~139.
王润三,薛华丰峰,王凤林等.2000.西安-咸阳地热田异常地层压力初步研究.地热能(2):1~5.

References

- Wang Guiling, Zhang Fawang, Liu Zhiming. 2000. An analysis of present situation and prospects of geothermal energy development and utilization in the world. Acta Geoscientia Sinica, 21(2):134~139 (in Chinese with English abstract).
Wang Runsan, Xue Huafeng, Wang Fenglin et al. 2000. The primary study of abnormal stratum pressure in Xi'an-Xianyang geothermal field. Geothermal Energy (2):1~5 (in Chinese with English abstract).
Zhang Zhuohua, Wang Guiling et al. 1992. The assessment of geothermal resources in China. Geothermal Workshop Between New Zealand and China.