

天津市地热资源开发及可持续利用研究^①

王坤^{1,2}, 李明朗¹, 徐平¹

(1 天津市地热管理处, 天津 300191)

(2 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要 根据天津市地热资源勘探、开发和科研资料, 对天津市地热资源的形成条件、热储类型和资源潜力分析评价。采用压力场和温度场耦合的三维有限元模拟方法, 对热储动态进行预测。以此确定每眼井的年开采量, 并逐步实行对井回灌开采, 实现地热资源的可持续利用。

关键词 热储, 热储模拟, 回灌

中图分类号 TK521

文献标识码 A

天津市地处华北平原东北部, 东临渤海, 北依燕山, 面积 11305 km², 为首都的门户, 是中国地热资源丰富, 开发规模最大的滨海城市。天津位于渤海盆地的中部, 构造特征是中间隆, 两侧凹, 构造展布方向 NNE。市区位于沧县隆起, 西部是武清拗陷, 东部是黄骅拗陷(图 1)。隆起带新生代沉积 800~1600 m, 拗陷带新生代沉积 4000~8000 m。

1 地热资源分布特征

渤海盆地的形成与发展是以太古代—早元古代褶皱变质的结晶基底构造为基础, 以中晚元古代台缘裂陷、古生代稳定的地台盆地, 中生代陆盆(大陆内拱升裂陷)为背景, 于新生代渐新世起逐步发展形成的早第三纪断陷, 晚第三纪至第四纪拗陷的大陆裂谷盆地。该盆地为一大型传导型热储盆地, 由于地幔隆起, 地壳相对减薄, 基底盖层形成“盆—岭”相间的构造样式, 堑、垒组合的断块结构, 盆地大地热流值较高。天津市位于盆地的北部, 蓟运河断裂以南 8700 km² 的平原区均分布有地热资源, 平原区盖层的地温梯度 3~8℃/100 m, 有九个热异常区(图 2)。主要热储层有第三系孔隙型热储和基岩裂隙岩溶型热储。

1.1 第三系孔隙型热储

第三系热储层以砂岩为主, 其孔隙度随深度变化, 在 2700 m 以下出现超压带, 地层压力系数 1.15~1.47, 形成地压型地热田, 主要有三个热储层:

明化镇组常压低温热储层: 上第三系明化镇组, 厚 700~1500 m, 处于正常静水压力带,

① 收稿日期 2002-11-05

第一作者简介 王坤, 北京大学地球与空间科学系博士研究生(在读)。天津市地热管理处高级工程师。主要
万方数据 从事热储工程、地热地球化学和热能工程研究。

主要接受侧向迳流补给、大地热流增温,上段是绿色泥岩和杂色砂岩,下段是棕红色厚层泥岩夹灰白色砂岩,砂岩累计厚 110 ~ 470 m,孔隙度 34 ~ 26%,渗透率 $(965 \sim 5624.5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,底板埋深 600 ~ 1900 m,水温 25 ~ 65℃,水质为 $\text{HCO}_3 - \text{Na}$ 型,矿化度 0.47 ~ 3.2 g/L。按热储法推测的基础储量:热水容积资源 $7526 \times 10^8 \text{ m}^3$,热能资源 $189.7 \times 10^{18} \text{ J}$,1999 年实际开采量 $1300 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

馆陶组常压中低温热储层,上第三系底部馆陶组分布在武清凹陷和黄骅拗陷,上部为厚层砂层,下部是含砾砂岩、中间夹泥岩,总厚 200 ~ 600 m,砂、砾岩累计厚 70 ~ 360 m,孔隙度 15% ~ 32.4%,渗透率 $(773 \sim 2631) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,矿化度 0.9 ~ 5.3 g/L,底板埋深 1300 ~ 2700 m,水温 60 ~ 86℃,按热储法推测的基础资源量为:热水容积资源量 $2800 \times 10^8 \text{ m}^3$,热能资源量 $95.2 \times 10^{18} \text{ J}$ 。以勘探的塘沽和武清地热田,推定的热水资源量为 $12 \times 10^8 \text{ m}^3$,可采热水储量 $5794200 \text{ m}^3/\text{a}$,1999 年实际年开采量 $708 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

沙河街组地压中温热储层,在东部黄骅拗陷中,该组分为三段:分上粗段、上细段,中粗段与中细段和下粗段。局部夹数层玄武岩,总厚 800 ~ 2700 m,砂层累计厚 300 ~ 1500 m,在西部武清凹陷中,改组分为四段夹黑色玄武岩。总厚 200 ~ 3400 m,砂层累计 80 ~ 1300 m。大港地区埋深在 3000 m 以浅的沙河街组,砂岩孔隙度 21% ~ 25.5%,3000 m 以下深埋带砂岩孔隙度 14% ~ 19%,渗透率为 $(1.0 \sim 856) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

根据大港油田的勘探资料,沙河街组为重要的油气储层,油田水中含有大量的水溶天然气,水质为 $\text{HCO}_3 - \text{Na}$ 型和 $\text{CL} - \text{HCO}_3 - \text{Na}$ 型,矿化度 0.5 ~ 2.6 g/L,水温 116 ~ 178℃。

对第三系孔隙型热储层的可采资源量是用压力场方程和温度场方程耦合建立的数学模型,采用三维有限元法进行模拟计算。拟合不同开采方案和回灌方案引起的压力场和温度场变化,以控制地面沉降允许的压力下降值为约束条件确定可采资源,和每眼热水井的年可开采量。以此为依据对各种热水井的开采动态进行核定,实现了科学管理。

1.2 基岩裂隙岩溶热储

天津地区的地质结构如图 3 所示,市区下伏的基岩岩溶热储层主要有奥陶系灰岩岩溶热储层,下寒武系昌平组白云岩岩溶热储层和中上元古界雾迷山组白云裂隙岩溶热储层。

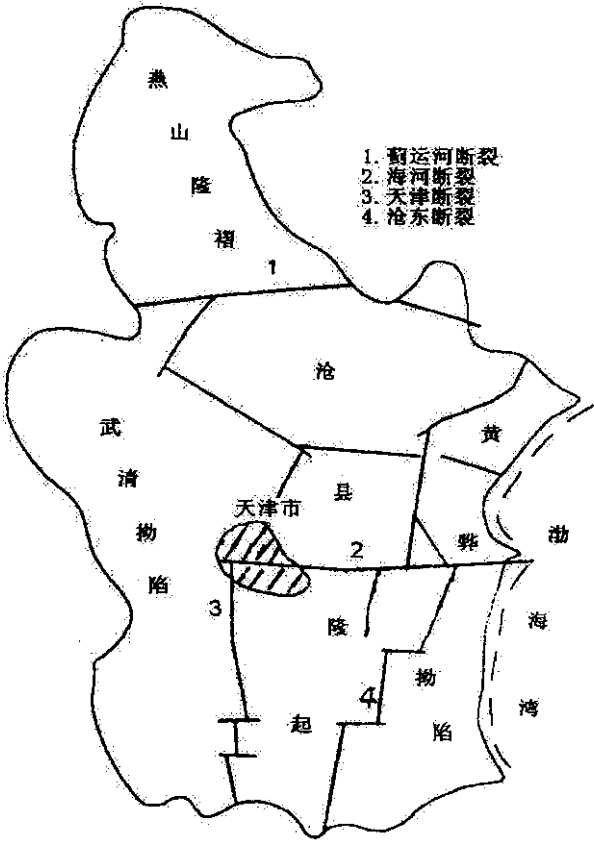


图 1 天津地质构造示意图

Fig.1 The sketch of the geological tectonics in Tianjin

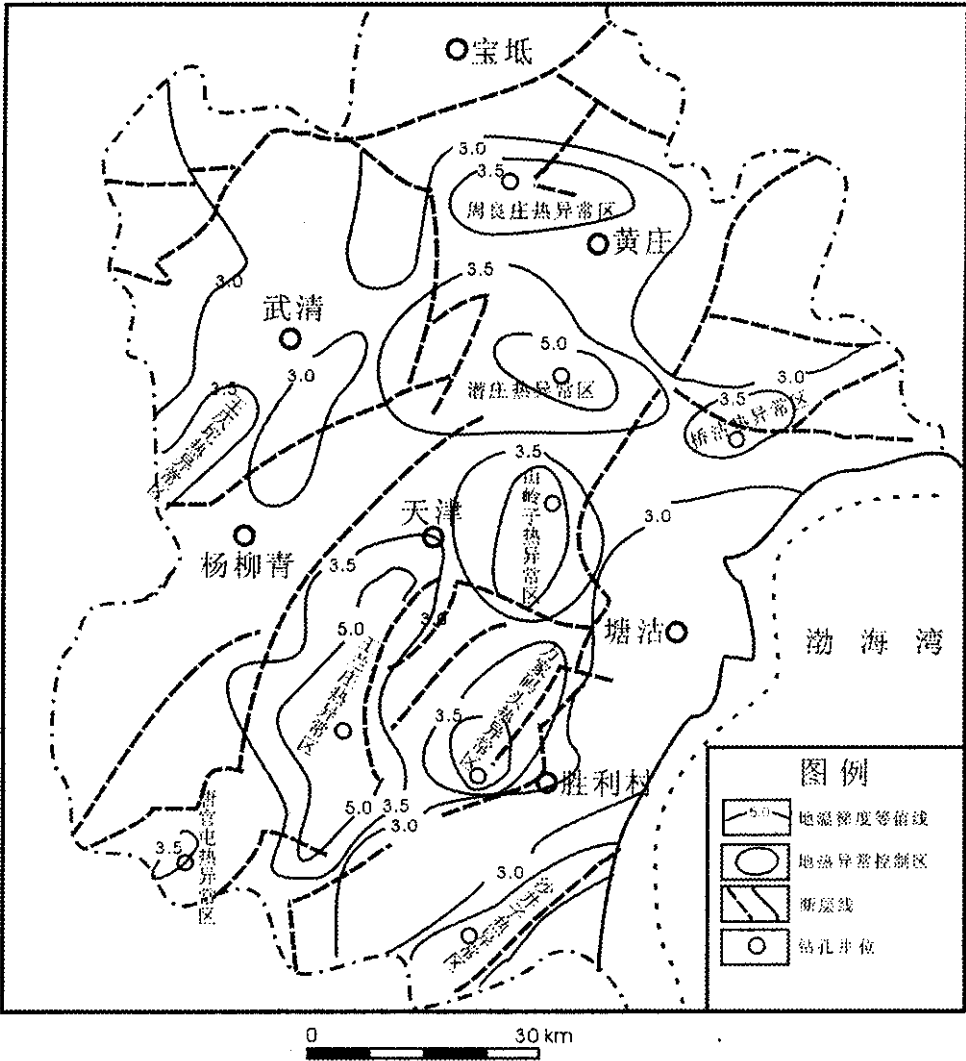


图 2 天津市地热异常区分布图

Fig.2 The Distribution of geothermal anomaly areas in Tianjin

主要分布在仓县隆起带上,根据同位素、地下水化学场和动力场分析,沧县隆起地区的基岩热储为大气降水补给的深逄流型热储,热水的水源来自燕山山区,由蓟运河断裂带汇流后沿沧东断裂和天津断裂向南径流,并沿断裂带向上顶托排泄,形成盖层中的热异常区。

按照热储法推测的九个热异常区 4000 m 以浅的基岩热储热水容积资源为 $125 \times 10^8 \text{ m}^3$, 热资源量 $195 \times 10^{18} \text{ J}$ 。已勘探的王兰庄地热田和山岑子地热田,探明的热水资源量为 $16 \times 10^8 \text{ m}^3$,基岩热水可采资源量 $1200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,1999 年实际开采量为 $988.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。为了限制基岩热水水位过份下降,已建成回灌对井 10 组,回灌工作取得了初步成效。

1.3 热水资源的开发管理

天津市地热开发主要用于供暖,全市地热供暖面积 $810 \times 10^4 \text{ m}^2$,在有地热的生活小区均实现了用供热尾水供应生活热水,同时应用于工业印染、车间空调、旅游娱乐、洗浴、医疗、

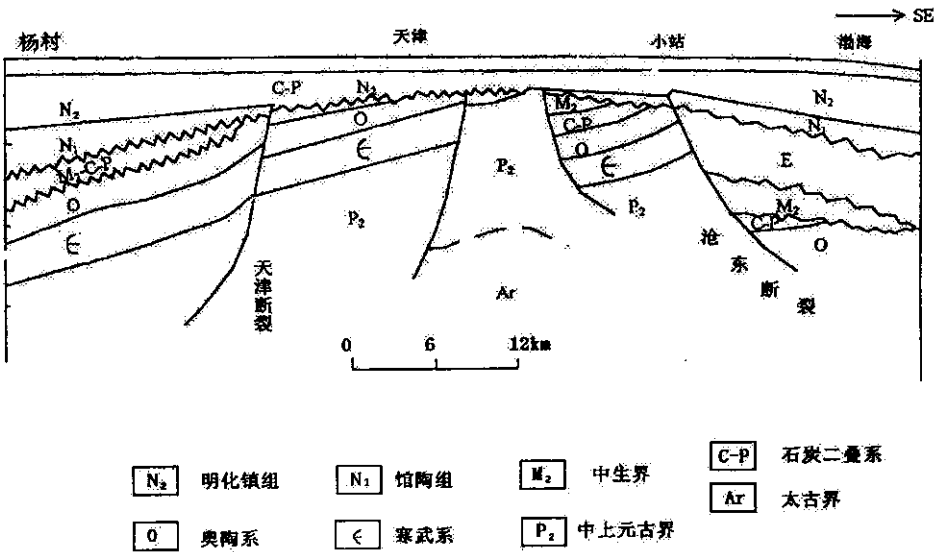


图 3 杨村—天津—渤海剖面示意图

Fig.3 Geological profile along Yangcun - Tianjin - Bohai Sea

农业养殖等行业,取得了良好的经济效益,对改善城市环境质量起到了重要作用,实现了依法管理和科学管理,全市 160 余眼地热井均安装了专用动态观测装置和仪表,按照群专结合的方式进行热水动态观测,建立了热水资源数据库和热水资源预测模型。

2 热水资源预测模型

市区基岩热储的模拟模型:天津市自 1975 年震 4 井(自流量 2000 m³/d)开始了基岩热水的开采,至 1988 年建成基岩热水井 46 眼,一般井深在 2000 ~ 4000 m 之间,水温在 62 ~ 98℃。多年开采形成一个大型的水位下降漏斗,北部的震 1 (奥陶系)震 2 (寒武系)和南部的增 3 (雾迷山组)和大 1 (雾迷山组),东部的津 2 (奥陶系)动态观测孔均已不自流。说明热水开采影响到沈青庄断裂以北的沧县隆起整个基岩断块集合体。模拟计算范围,南北作为定压定温边界,东西作为隔水隔温边界,计算区面积 4152 km²(图 4)。

2.1 热储层的压力场

热储层的压力计算公式为:
万方数据

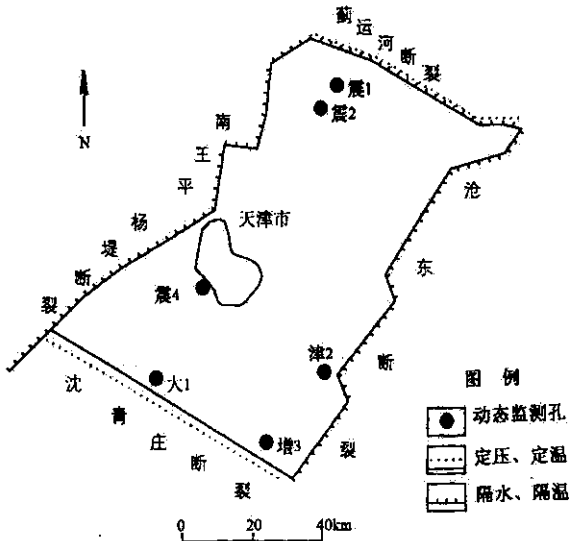


图 4 计算范围示意图

Fig.4 The sketch of the calculation area

$$p = \frac{1}{2}(\rho_k + \rho_b) \cdot g \cdot h$$

- p—井底压力(大气压)
- ρ_k —对应井口温度的水的密度(kg/m^3)
- ρ_b —对应井底温度的水的密度(kg/m^3)
- g—重力加速度 ,其值为 $9.8(\text{m}/\text{s}^2)$
- b—井内液面到井底的距离(m)

模型计算采用各热储层中点的压力值。编制了各热储层的压力等值线图。

压力场数学模型可以表示为：

$$\begin{cases} \frac{S_s}{\rho_o g} \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X_{ij}} \left[K_{ij} \left(\frac{1}{\rho g} \frac{\partial P}{\partial X_{ij}} + \frac{\partial Z}{\partial X_{ij}} \right) \right] + Q \frac{\rho Q}{\rho} - \frac{\varphi}{\rho} \frac{\partial P}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \\ P|_{t=0} = \text{已知} \\ P|_{\text{南北}} = \text{已知} \\ \left. \frac{\partial P}{\partial n} \right|_{\text{其它}} = \text{已知} \end{cases}$$

式中：

- $S_s = \partial \rho \left[\frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial \rho} + \frac{\varphi}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \rho} \right]$ - 比弹性给水度
- K_{ij} 渗透系数张量(LT^{-1})
- Z : 垂向坐标(L)
- φ : 孔隙度
- P : 压力($\text{ML}^{-2} \text{T}^{-2}$)
- Q 抽出或灌入的流量(灌入 + , 抽水 -)
- ρ_Q 源汇 Q 的密度
- ρ : 密度 $\rho = (\rho_0(1 + \alpha_P P + \alpha_T T + \alpha_S S))$
- T : 温度
- S : 矿化度
- ρ_0 : 参考密度
- $\alpha_P, \alpha_T, \alpha_S$: 密度与压力、温度、矿化度相关的系数
- g : 重力加速度(LT^{-2})

2.2 热储层温度场

根据各井孔的测温曲线编制各热储层的地温等值线图 ,反映储层温度场。温度场数学模型为：

$$\begin{cases} \varphi \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \frac{\partial T}{\partial X_i} = \frac{\rho_o}{\rho} \text{div}(\tilde{D} \text{grad} T) + Q(T_Q - T) + \frac{\rho_o}{\rho} \tilde{K}(T_s - T) \\ T|_{t=0} = \text{已知} \\ T|_{\text{南北}} = \text{已知} \\ D \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{东西}} = 0 \\ D \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{顶底}} = 0 \end{cases}$$

式中：

T : 储层的温度

φ : 储层的孔隙度

流速 $\vec{V} = - K_{ij} \left[\frac{1}{\rho g} \frac{\partial P}{\partial X_j} + \frac{\partial P}{\partial X_j} \right]$

i = 1, 2, 3

J = 1, 2, 3

$\tilde{D} = \frac{D}{V_o C}$

D—热扩散系数($JK^{-1}K^{-1}T^{-2}$)

C—水的比热($JM^{-1}K^{-1}$)

Q : 源、汇 , 即抽出或灌入的流量

T_Q 源、汇 Q 的温度(K)

T_s : 储层岩石的温度

K_s 水和岩石的热交换系数($JL^{-1}T^{-1}K^{-1}$)

ρ 和 ρ_0 是水的密度和参考密度

由于热储层是倾斜的断块体 , 其模拟计算采用压力场和温度场耦合的三维有限法求解 , 根据模拟模型的预测确定每个井每年的可开采量 , 为地热可持续开发管理提供了科学手段。

3 地热回灌开采与资源可持续利用

天津市基岩岩溶热水 , 年开采量达 1200 万 m^3 , 热储压力逐年下降 , 年下降 5 ~ 7 m , 水位埋深已达 60 ~ 80 m , 出现个别井掉泵现象 , 分析其原因是热水的补给条件差 , 开采消耗的主要是热储层的弹性储量 , 为了减缓热储层压力下降 , 保证热水井的出水能力 , 实行对井回灌开采 , 取得了成功。

3.1 对井的结构类型：

天津市施工的对井有三种结构类型：

3.1.1 同层对井回灌开采

商业对井为二个同层定向井(图 5) , 地热开采井和回灌井地面相距 21 m , 井底相距 960 m , 成井段为雾迷山组四段白云岩 , 单井出水量 110 ~ 140 m^3/h , 水温 92℃ , 抽水井抽出 80 ~ 100 m^3/h 的热水 , 经换热器换热 , 水温下降至 45℃ , 自流回入灌水井 , 供热面积 15 万 m^2 , 已运行五年 , 基本达到采灌平衡。

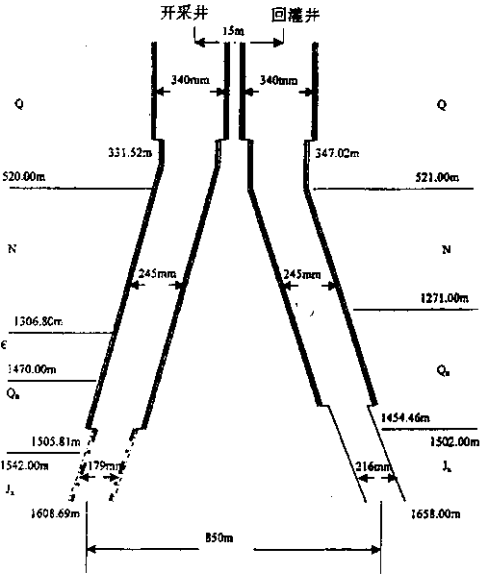


图 5 一商地热开采回灌对井系统结构图

Fig.5 The casing program of WR45 doublet system

到采灌平衡。

3.1.2 异层抽灌开采

天津今晚报社对井系统属于异层抽灌开采 ,开采井钻入下部雾迷山组白云岩 ,回灌井成井段为上部奥陶系灰岩。单井采水 80 m³/h ,水温 86℃ ,经换热器换热 ,水温降至 40℃ ,自流回灌入奥灰热储层 ,供热面积约 10 万 m²。

3.1.3 二抽一灌开采

体院北供热对井系统施工二眼定向斜井 ,开采雾迷山组四段的热水 ,在二斜井中间施工一眼深井 ,成井段为雾迷山三段白云岩 ,二个开采井总抽水量为 180 m³/h ,水温 72 ~ 76℃ ,经换热器降温至 35℃ ,回灌入深井 ,供暖面积约 25 万 m²。

3.2 回灌开采的水质控制

回灌水质按油田注水水质要求控制 ,即悬浮固体含量 < 7.0 mg/L ,硫酸盐还原菌 < 10 个 /ml ,铁细菌 < 10⁴ 个 /ml ,水中溶解氧 < 0.5 mg/L ,采用密封回路 “ 原水 ” 回灌 ,保证了回灌水质要求 ,运行实践证明是有效的。

4 结语

地热水基本属于不可再生资源 ,要充分开采热储层的热资源 ,就必须维持热储层的压力 ,保持水井的出水能力。回灌开采可使储层压力得到恢复 ,是实现地热资源可持续利用的有效方法。

The sustainable development and utilization of
the geothermal resources in Tianjin

WANG Kun ,LI Ming – lang ,XU Ping
(*Tianjin Geothermal Management Division , Tianjin 300191 , China*)

Abstract

According to the information of the geothermal exploration , development and scientific research , the authors analyze the forming condition , reservoir type and developing potential of the geothermal resource in Tianjin. The 3D limited – element method , simulated the reservoir temperature and pressure , is adopted to predict the geothermal reservoir 's changes for measuring the annual flow rate of every single well. The production – reinjection doublet system will be gradually put into action to insure the sustainable development of the geothermal resource in Tianjin.

Key words :reservoir ;simulation ;reinjection