

热储特征对砂岩热储采灌井距的影响

范翼帆, 段忠丰, 杨永红, 尹立坤, 杨立明, 王子威, 尹洪梅

Impact of reservoir characteristics on the well spacing of sandstone geothermal reservoir: A case study of Jiyang Depression

FAN Yifan, DUAN Zhongfeng, YANG Yonghong, YIN Likun, YANG Liming, WANG Ziwei, and YIN Hongmei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202301033>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

胶东典型花岗岩热储地下水水化学特征及热储研究

A study of the hydrochemical characteristics and geothermal water of typical granite geothermal reservoir in the Jiaodong area

王晓翠, 孙海龙, 袁星芳 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 186-194

西宁盆地地热水特征及回灌结垢风险

Characteristics of geothermal water in the Xining Basin and risk of reinjection scaling

赵振, 秦光雄, 罗银飞, 晁嘉豪, 耿松鹤, 张亮 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 193-204

基于微地震数据的增强型地热储层参数及采热的数值模拟研究

A study of numerical simulations for enhanced geothermal reservoir parameters and thermal extraction based on microseismic data

马子涵, 邢会林, 靳国栋, 谭玉阳, 闫伟超, 李四海 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 190-199

四川广安铜锣山背斜热储性质及地热成因模式

A study of the characteristics of geothermal reservoir and genesis of thermal groundwater in the Tongluoshan anticline near Guang'an in east Sichuan

李明辉, 袁建飞, 黄从俊, 刘慧中, 郭镜 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 36-46

热屏障井对地下水热泵换热影响模拟

Simulation study on the effect of thermal barrier well on the heat transfer of groundwater heat pump

肖锐, 黄坚, 王小清 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 190-198

四川巴塘地热田水文地球化学特征及成因

Hydrogeochemical characteristics and genesis of the geothermal fields in Batang of Sichuan

赵佳怡, 张薇, 张汉雄, 屈泽伟, 李曼, 岳高凡 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 81-89



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202301033

范翼帆, 段忠丰, 杨永红, 等. 热储特征对砂岩热储采灌井距的影响——以济阳拗陷为例 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(1): 215-223.

FAN Yifan, DUAN Zhongfeng, YANG Yonghong, et al. Impact of reservoir characteristics on the well spacing of sandstone geothermal reservoir: A case study of Jiyang Depression[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(1): 215-223.

热储特征对砂岩热储采灌井距的影响 ——以济阳拗陷为例

范翼帆¹, 段忠丰², 杨永红³, 尹立坤¹, 杨立明¹, 王子威¹, 尹洪梅¹

(1. 中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院, 北京 100038;

2. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580;

3. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营 257000)

摘要: 水热型地热资源的回灌式开采是公认的地热可持续开采方式, 而采灌井距是地热项目中需要着重关注的问题, 以避免开采井中的热突破现象。回灌水在热储中的运移取决于热储特征, 也就是储层的透水能力, 主要指热储的孔隙度、渗透率及砂泥岩组合关系等参数。基于济阳拗陷典型地热田的储层数据, 采用 Tough2 为核心的 Petrasim 软件建立数值模型, 系统研究了储层孔隙度、渗透率及单砂体厚度对热储中回灌水的运移以及温度场的影响。模拟结果显示: (1) 储层孔隙度对回灌压力与采灌井距几乎没有影响; (2) 储层渗透率对采灌率和采灌压力影响较大, 控制着热储的回灌能力, 但对采灌井距没有影响; (3) 多次叠置的薄砂层热储中的泥岩隔层影响回灌水运移, 在多层薄砂叠置的热储中回灌水水平运移距离远, 温度影响范围更大, 应扩大采灌井距。该研究对地热开发项目的可持续运行具有指导意义。

关键词: 地热回灌; 热储特征; 砂体叠置关系; 采灌井距

中图分类号: P314

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)01-0215-09

Impact of reservoir characteristics on the well spacing of sandstone geothermal reservoir: A case study of Jiyang Depression

FAN Yifan¹, DUAN Zhongfeng², YANG Yonghong³, YIN Likun¹,

YANG Liming¹, WANG Ziwei¹, YIN Hongmei¹

(1. Institute of Science and Technology, China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China;

2. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China;

3. Exploration and Development Research Institute, SINOPEC Shengli Oil Field Company, Dongying, Shandong 257000, China)

Abstract: The reinjection exploitation of hydrothermal resources is a recognized method of sustainable exploitation. The well space between the production and reinjection well is an essential issue because the thermal breakthrough in production well is the main negative impact during reinjection. The migration of reinjection water in the geothermal reservoir depends on the permeability of the reservoir, constrained by the geothermal reservoir characteristics. In this study, A numerical model using the Petrasim software with Tough2, as the core as well as

收稿日期: 2023-01-15; 修订日期: 2023-03-18

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司科研项目(202103329); 中石化科技攻关项目(P22090)

第一作者: 范翼帆(1990—), 女, 博士, 工程师, 主要从事地热地质、水文地球化学等方面的研究。E-mail: fan_yifan@ctg.com.cn

reservoir data of each typical geothermal field in Jiyang depression, was established. The impact of the reservoir porosity and permeability and the thickness of a single sand layer on the migration of reinjection water and temperature field in the geothermal reservoir were analyzed systematically. The simulation results revealed that the reservoir porosity had a minor impact on the reinjection of the geothermal reservoir, including the reinjection pressure and the spacing of production and reinjection wells. The reservoir permeability affected the reinjection pressure, and then controlled the reinjection performance of the geothermal reservoir, while it had no impact on the spacing of production and reinjection wells. The sand layer superposition combination had a minor impact on the reinjection pressure of the geothermal reservoir. The distance of the horizontal migration of reinjection water in the multilayer stacked thin sand layers was longer, and the range of temperature influence was larger. Thus, it is necessary to expand the well space between production and reinjection well. This study is of significance for the stable operation of geothermal development projects.

Keywords: geothermal reinjection; geothermal reservoir characteristics; sand layer superimposition; geothermal well spacing

水热型地热资源的回灌式开发是公认的地热可持续开采方式^[1-3]。《砂岩热储地热尾水回灌技术规范》(DZ/T 0330—2019)^[4]中要求,“必须对地热供暖尾水进行回灌处理,从而避免因地热尾水直接排放引起的热污染和化学污染,并维持热储压力、缓解地热水水位的大幅持续下降,保证地热田的可持续开采”。在回灌式开发过程中,最需要关注的负面问题是开采井中的热突破现象,即开采井中地热水温度出现明显下降^[5-7]。不同地区、不同类型地热田的研究表明,合理的采灌井距可避免热突破,而且能够很好地维持储层压力^[8-9]。

回灌情况下,低温回灌水在热储中运移,这是一个水动力场-温度场的耦合过程,受热储特征、回灌参数(温度、速率)等多个因素的控制^[10-12]。数值模拟方法是分析热储中流体流动和温压场响应的有效手段,已广泛应用于地热田的开发设计、规划管理中^[13-16]。在以往地热系统的分析研究中,由于资料不足以及模型简化的原因,通常将热储层作为整体考虑,设置参数^[17-18]。但在油田的注水开发实践中早已发现储层孔渗性、砂体厚度、砂体连通性等储层内部特征对流体在储层内部的运移有很大影响^[19-24]。因此,需要研究热储特征参数,如储层孔渗性、砂体叠置关系等对采灌井距的影响。

济阳拗陷地热资源潜力大,具有开发利用地热资源的先天优势。前期地热资源勘察结果表明,济阳拗陷古近系、新近系层状砂岩热储中蕴含有丰富的中低温水热型地热资源^[25-26],各区块地热开发过程中取得了详细的热储岩性分布、孔渗性、储水特征等资料。

砂岩热储孔隙度在 23%~32% 之间,渗透率在 409~1 327 mD 之间,沉积环境包括辫状河道、河口坝、三角洲前缘等,单砂体厚度、层数各有不同。不同热储特征条件下如何控制采灌井距,以避免热突破,实现地热项目的安全、稳定运行,是一个需要探讨的问题。本文基于济阳拗陷各典型地热田的储层数据划分了济阳拗陷热储类型,并采用 Tough2 为核心的 Petrasim 软件建立数值模型,系统研究了储层孔隙度、渗透率及砂体叠置关系对热储中流体运移以及温度场的影响,为地热采灌井的合理配置提供依据。

1 济阳拗陷热储特征及采灌能力

济阳拗陷位于渤海湾盆地的西南部,是在华北地台基础上发育而成的中、新生代叠合盆地。济阳拗陷整体热流值较高(70 mW/m²),具有较高的热背景。拗陷中新近系东营组、馆陶组地层广泛分布,砂层厚度大、孔渗性好,温度达到 60~85℃,是地热供暖的良好目的储层。东营凹陷华瑞小区、惠民凹陷临盘宏祥小区、沾化凹陷海洋采油厂是济阳拗陷 3 个典型地热开发区块(图 1)。海洋采油厂“两采三灌”,共 5 口地热井,临盘宏祥小区、华瑞小区采用“一采两灌”的布局,均实现了 100% 回灌,热储压力稳定,总供暖面积达 76×10⁴ m²。以现有地热井的勘探、试井数据为基础,分析研究区热储特征。

1.1 热储特征

济阳拗陷地热开发的主要目的层主要为新近系馆陶组(Ng)和古近系东营组(Ed)砂岩热储。热储岩性主要为含砾砂岩(高渗)、砂岩(中高渗)、粉砂岩

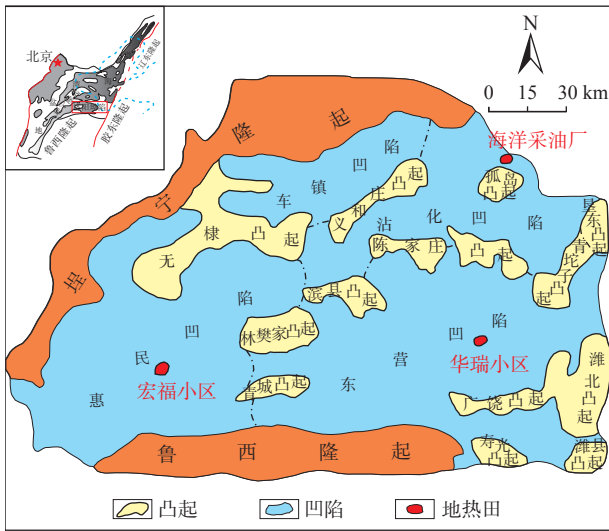


图 1 济阳拗陷构造分区图
Fig. 1 Geological map of Jiyang Depression

(中渗), 中间夹泥质砂岩、泥岩。

新近系馆陶组上段(Ng^2)主要为曲流河沉积, 主要发育中厚层及薄层砂体, 常呈现泥包砂的单层分布, 岩性为灰色、灰白色和杂色的粗碎屑砂岩或砂砾岩^[27], 出水量偏低。馆陶组下段(Ng^1)为三角洲前缘和辫状河道沉积, 为多层砂体叠置分布, 砂体厚, 出水量较大, 回灌性较好。

古近系东营组(Ed)主要为辫状河-三角洲沉积。辫状河沉积主要发育辫状河道厚层-中厚层砂体, 岩性为均匀分布的含砾砂岩、砂岩或为含砾砂岩、细砂岩、粉砂岩交互叠置^[28]。三角洲前缘沉积中河口坝发育厚-中厚层砂体, 多为上粗下细的含砾砂岩-粉砂岩、砂岩-粉砂岩组合; 水下分流河道发育薄层砂体, 岩性主要为含砾砂岩或细砂岩夹粉砂岩。

热储参数见表 1。

表 1 济阳拗陷热储参数

Table 1 Geothermal parameters of Jiyang Deperssion

层位	砂岩厚度/m	地温/ $^{\circ}C$	孔隙度/%	砂层渗透率/mD	开采流量/ $(m^3 \cdot h^{-1})$	回灌流量/ $(m^3 \cdot h^{-1})$
Ng	100	65	30	800	90	35
Ed	100	85	28	600	100	30

下伏古近系沙河街组沙一段(Es_1)地层主要岩性为泥岩夹粉砂岩, 发育有多层低渗透泥岩, 是良好的隔水底板。上覆的新近系明化镇组(Nm)地层发育多套河流相泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩互层; 第四系(Q)地层则以松散的黄色泥、砂为主。这些地层渗透性较差, 热导率较低, 是良好的隔水、隔热顶板。因此, 可

将新近系馆陶组、古近系东营组热储看作垂向上相对独立的热储单元, 地热水以水平方向运移为主。

1.2 热储储水特征

依据 3 个地热田典型地热井的抽水试验数据分析热储储水特征。各地热井数据见表 2。

表 2 地热井参数及抽水试验结果

Table 2 The parameters geothermal well and well test data

地热田	井号	水温/ $^{\circ}C$	地层	顶板埋深/m	底板埋深/m	砂体厚度/m	抽水试验		
							降深/m	出水量/ $(m^3 \cdot h^{-1})$	单位降深出水量/ $(m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-1})$
海洋采油厂	HY1-1	86	Ed	2 155	2 350	101.0	20.4	72.2	3.5
	HY1-2	86	Ed	2 160	2 370	102.5	19.6	85.0	4.3
	HY2-1	85	Ed	2 146	2 320	108.3	13.5	79.0	5.9
	HY2-2	85	Ed	2 150	2 319	109.6	11.3	72.0	6.4
	HY2-3	85	Ed	2 138	2 310	107.1	9.5	63.0	6.6
临盘宏祥小区	LR2-1	60	Ng_2	1 115	1 280	98.2	15.0	98.0	6.5
	LR2-2	60	Ng_2	1 130	1 297	101.3	14.5	99.0	6.8
华瑞小区	HR1	64	$Ng_{1,2}$	1 425	1 816	97.9	49.9	60.2	1.2
	HR2	53	Ng_2, Ed	1 457	2 117	298.2	25.0	105.0	4.2

临盘宏祥小区地热井新近系馆陶组热储厚度为 320 ~ 440 m, 砂层厚度在 100 m 左右, 储厚比 50% ~ 70%。孔隙度为 28% ~ 30%, 渗透系数(K)为 0.59 ~ 2.01 m/d。

根据海洋采油厂测井解释, 古近系东营组热储厚度为 350 ~ 500 m, 储厚比为 40% ~ 50%, 孔隙度为 28% ~ 30%, 平均 29.8%, 砂层渗透率最低 409 mD, 最高 1 327 mD,

平均为 700 mD。

根据各井的抽水试验结果,降深 20 m 时,热储出水量为 75 m³/h($K=0.5$ m/d, 地层渗透率约 200 mD)至 120 m³/h($K=2$ m/d, 地层渗透率约 800 mD)。

2 模型设置

为分析孔隙度、渗透率、砂体叠置关系等热储参数对采灌井距的影响,根据上述地质分析和热储参数建立热储概念模型。

2.1 概念模型

纵向上,模型分储层、盖层、底板 3 层设置,底部埋深 2 500 m。储层厚度 400 m,其中取水段厚 100 m(图 2)。

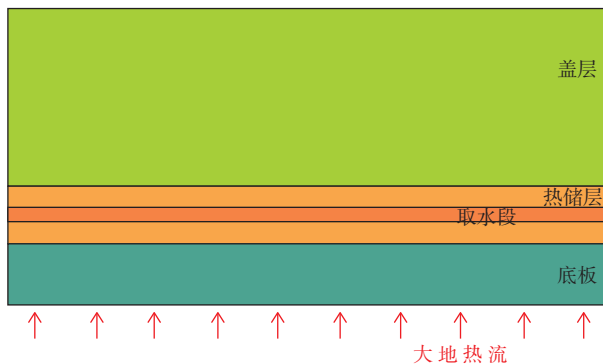


图 2 热储概念模型

Fig. 2 The conceptual model of geothermal reservoir

顶部边界依据区域恒温带条件,设为定温度、定压力边界。华北地区恒温带深度(D_0)为 14 m,温度(T_0)为 14.7 °C^[29]。边界压力设为大气压(1.013×10^5 Pa)。济阳拗陷地温场为传导型,深部热流主要以热传导的形式向上传递。因此,将模型的底部设为定热流边界,热流值设为 70 mW/m²。

地层的热导率是研究地温场的必要参数。研究中采集了新生代地层 40 个砂岩、泥岩样品,采用瑞典 Hot Disk 瞬变平面热源法实测了样品饱水热导率。另外,收集了文献 [30 - 31] 中研究区的 117 个热导率数据,按岩性统计结果见表 3。采用厚度加权平均法计算地层平均热导率,结果见表 4。

模型基本参数参照地热井开采情况设置,见表 5。地热井采灌参数设定为开采流量 80 m³/h,回灌流量 40 m³/h,回灌温度 35 °C。在此基础上修改孔隙度、渗透率等取值可分析不同热储参数对地层温压场的影响。

2.2 模型剖分与时间离散

模型长宽均设置为 20 000 m,深度设置为 2 500 m。为观察地热开发对热储温压场的影响,网格剖分

表 3 岩石热导率数据

Table 3 Thermal conductivity of rocks

岩性	样品块数	热导率/(W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)
泥岩、砂质泥岩	12	1.091 ~ 1.558
砂岩、泥质砂岩、含砾砂岩	74	0.580 ~ 2.282
灰岩	18	2.400 ~ 2.979
花岗岩片麻岩	13	3.089 ~ 3.269

注:热导率值为本次测试数据与文献[30 - 31]数据按岩性综合统计结果。

表 4 济阳拗陷地层平均热导率

Table 4 Mean thermal conductivity of formation in Jiyang Deperssion

地层名称	地层代号	地层岩性	平均热导率/(W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)
新近系明化镇组	Nm	泥岩、砂岩	2.04
新近系馆陶组	Ng	泥岩、砂岩	1.97
古近系东营组	Ed	泥岩、砂岩	2.09
古近系沙河街组	Es	泥岩、砂岩	1.85
古近系孔店组	Ek	泥岩、砂岩	2.23
中生代	Mz	泥岩、砂岩	2.22
古生代	Pz	灰岩、泥岩、砂岩	2.87
元古代	Pre	片麻岩	2.83

表 5 数值模型参数

Table 5 The parameters of numerical model

层位	地层平均密度/(kg·m ⁻³)	孔隙度/%	渗透率/mD	热导率/(W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)
盖层	1 800	25	10	1.34
热储层	2 100	30	50	1.97
取水段	2 200	30	400	1.97
底板	1900	25	10	2.21

时对主要取水段和地热井周边进行加密。

垂向上,热储层是主要模拟层位,分 3 段剖分,其中取水段剖分 10 层,每层厚 10 m;取水段上、下的热储层段各剖分为 3 层,每层厚 50 m。盖层和底板每层厚 120 m,见图 3(a)。

水平方向上,采用多边形剖分法,在地热井周边局部加密。地热井开采时的影响范围一般不超过 1 km²,因此对目前不存在地热井的地区,最大网格面积限制在 1 km²之内。剖分后活动网格共 76 545 个,见图 3(b)。

每年(365 d)划分 2 个时间单元。参照中国北方供暖情况,每年供暖季 4 个月,共 120 d,这期间地热井开发或回灌。非供暖季 245 d,这期间热储压力和温度可以得到一定恢复。地热工程寿命周期一般考虑 30 a,模拟期设为 30 a。

2.3 数学模型

采用 Tough2 核心的 Petrasim 软件求解。Tough2

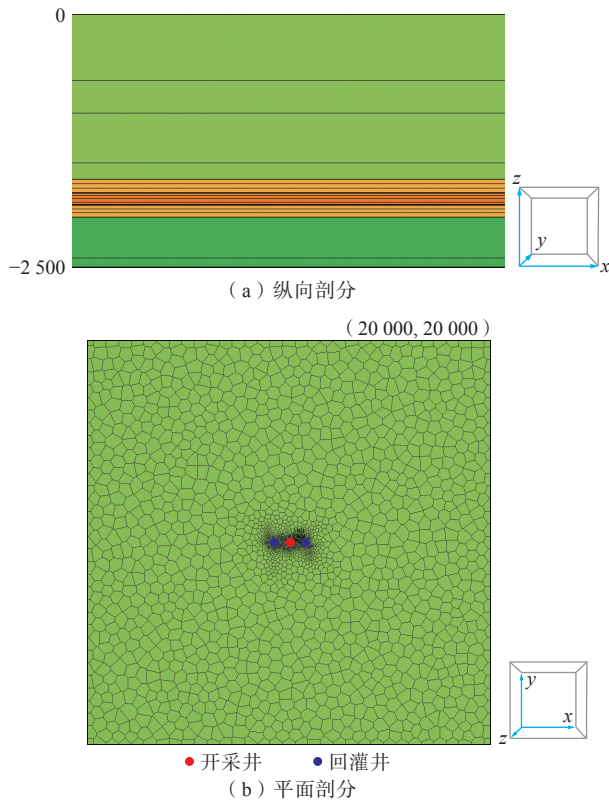


图3 模型网格剖分

Fig. 3 Mesh division in the model

是用来模拟多孔介质和裂隙介质中多相态、多组分流体和热流的多维运移程序,可用于模拟热储中的流体流动和热量迁移。

流体的运移通过达西定律描述,通过设置水平和垂向渗透率,可模拟流体的三维流动。热流通过传导和对流进行迁移,而且在对流中还考虑了热效应^[32-33]。Tough2 求解描述多相和多组分系统中流体和热流转移的质量和能量方程为:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_n} M^k dV_n = \int_{\Gamma_n} F^k \cdot n d\Gamma_n + \int_{V_n} q^k dV_n \quad (1)$$

式中: V_n ——研究区域中某一子单元;

Γ_n —— V_n 的边界;

M ——单位体积所具有的质量或能量;

F ——质量或热流;

q ——源汇项;

k ——某一质量或热量组分(水、空气、 H_2 或是溶质等)($k=1, \dots, n$ 代表质量组分; $k=n+1$ 代表热组分);

n ——表示矢量,指向 V_n 的内部。

质量累积的一般形式为:

$$M^k = \phi \sum_{\beta} S_{\beta} \rho_{\beta} X_{\beta}^k \quad (2)$$

式中: ϕ ——孔隙度;

β ——某个相;

S_{β} —— β 的饱和度(即 β 所占孔隙体积的百分比);

ρ_{β} —— β 的密度;

X_{β}^k ——组分 k 在流体相 β 中的质量分数。

式(2)中所有流体相的质量可以通过将所有的流体相 β (包括液体、气体和非水相液体)求和得到。

热累积的方程为:

$$M^{n+1} = (1 - \phi) \rho_R C_R T + \phi \sum_{\beta} S_{\beta} \rho_{\beta} u_{\beta} \quad (3)$$

式中: ρ_R ——岩石颗粒的密度;

C_R ——岩石的热容;

T ——温度;

u_{β} —— β 的内能。

3 储层特征对热储温压场的影响

3.1 储层孔渗性

孔隙度决定地层的储水能力,渗透率决定地层的透水能力。不同岩性、沉积相的地层孔渗性差异较大。地热井周边开采、回灌的压力影响范围受开采量、热储层渗透率、孔隙度的影响。本次研究在注入温度、注入时间相同的条件下,改变地层孔渗性参数,分析地层孔渗性对地热采灌的影响。

热储层取水段孔隙度分别设为 20%、25%、30%。5 a 后回灌期末地层压力变化见图 4(a)。结果显示热储层孔隙度变化对回灌压力几乎没有影响,回灌井周边的冷晕范围也同样没有差别,见图 4(b)。孔隙度决定热储层的储水能力,但对回灌水的运移影响不大。

虽然孔隙度的大小对回灌水的运移影响不大,但孔隙的连通性和孔喉特征无疑会影响热储回灌过程,这主要反映在热储层的渗透率上。为分析渗透率对地热采灌的影响,设取水段地层渗透率为 200, 400, 600, 800 mD。

单井回灌速率(40 m³/h)不变,不同渗透率情况下回灌井内的压力升高差别很大。地层渗透率 200 mD 时,地层透水能力变差,回灌井压力升高达 0.24 MPa(约 25 m 水柱),明显高于渗透率 800 mD 时的压力(0.08 MPa, 约 8 m 水柱),见图 5(a)。热储渗透率的大小控制着热储的回灌性能。但回灌井周边的冷晕范围相差不大,见图 5(b)。这和直觉认知不同。这是因

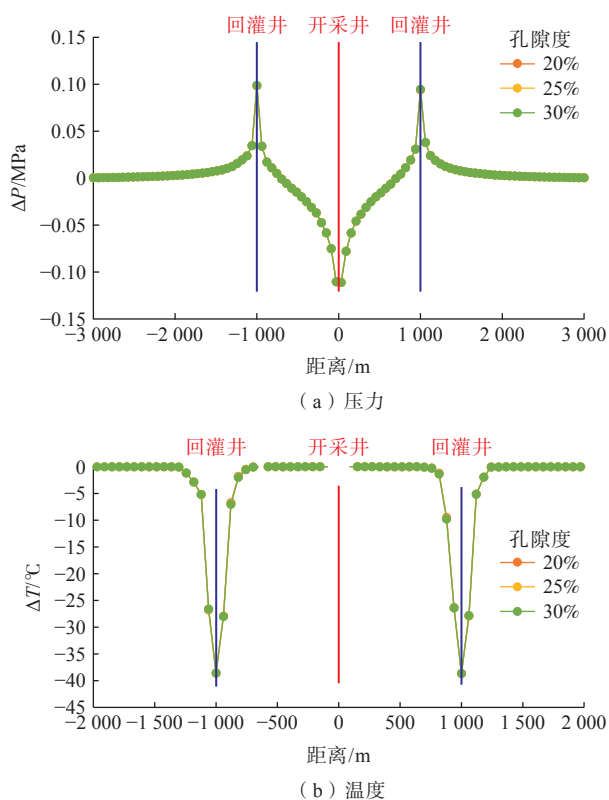


图 4 孔隙度变化对回灌井周边压力和温度的影响 (渗透率 400 mD, 开采量 80 m³/h, 单井回灌量 40 m³/h)

Fig. 4 The influence of porosity change on the formation pressure and temperature around reinjection well (permeability is 400 mD, production rate is 80 m³/h, single well reinjection rate of 40 m³/h)

为按照达西定律,回灌水在地层中的运移速度为渗透系数与回灌压力的乘积,热储渗透率高时,回灌压力也随之降低,回灌水的运移速度并没有太大变化,因此回灌水的运移范围相差不大。

3.2 砂体叠置关系

为探讨砂体叠置关系对热储采灌的影响。本次研究设计了 3 个模型,观察回灌井周边温压场的变化。对取水段平均渗透率按 400 mD 计,储厚比约 60%,按照厚度加权,砂岩渗透率 600 mD,泥岩渗透率 10 mD (表 6,图 6)。

模拟结果显示,在取水段总渗透率相同的条件下,回灌井中的压力抬升几乎相等,储层叠置关系对热储的回灌能力影响不大(图 7a)。但从回灌井周边的温度场看(图 7b),多次叠置的薄砂层中回灌水的运移受上下泥岩限制,阻碍了回灌水在垂向上的扩散,而以水平运移为主,运移距离更远,温度影响范围(354.2 m)大于厚砂层(279.68 m)。采灌井距需加大 75 m 左右,这是在采灌布局中必须要考虑的问题。

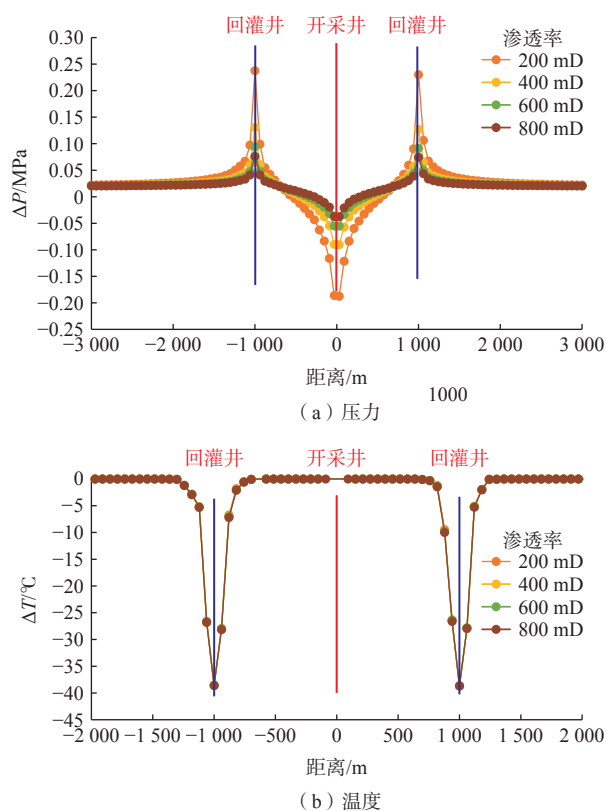


图 5 渗透率变化对回灌井周边压力和温度的影响 (孔隙度 30%, 开采量 80 m³/h, 单井回灌量 40 m³/h)

Fig. 5 The influence of permeability change on the formation pressure and temperature around reinjection well (porosity is 30%, production rate is 80 m³/h, single well reinjection rate of 40 m³/h)

表 6 不同砂体类型的参数概化

Table 6 Parameters conceptualization of different types of sandstone

取水段	单层砂体类型	单层砂体厚度/m	代表性沉积相
厚 100 m, 储厚比 60%	厚层砂岩	30	辫状河道
	中厚层砂岩	15	河口坝
	薄层砂岩	5	三角洲前缘

4 结论

(1)热储孔隙度决定热储的储水能力,但对回灌水的运移影响不大。回灌速率一定的情况下,孔隙度对热储回灌压力与采灌井距均无明显影响。

(2)影响热储回灌能力比较显著的是热储渗透率。渗透率越小,所需回灌压力越大,回灌性越差。有趣的是,渗透率对采灌井距并没有明显影响。当热储渗透率高时,回灌压力也随之降低,按照达西定律,回灌水的运移速度并没有太大变化,因此回灌水的运移范围相差不大。

(3)热储中的泥岩隔层限制了回灌水的流动,在

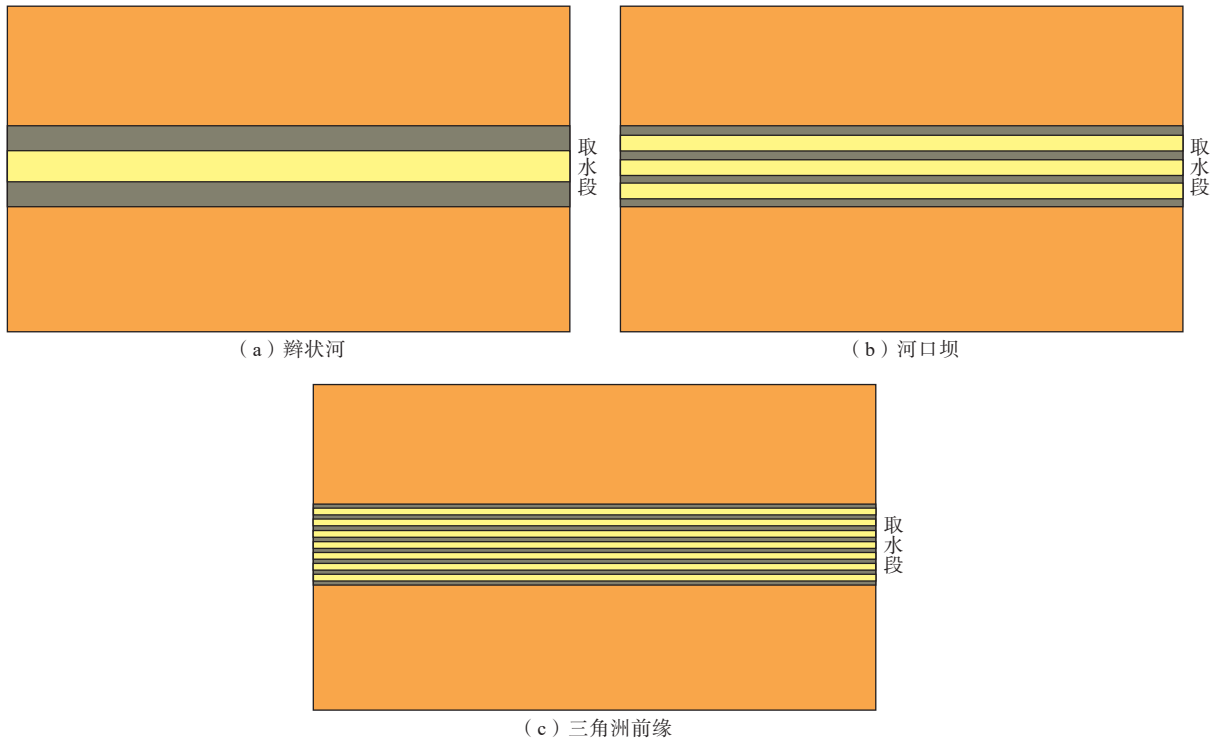


图 6 不同砂体类型的砂体叠置关系概化

Fig. 6 Conceptualization of superposition combination of different types of sandstone

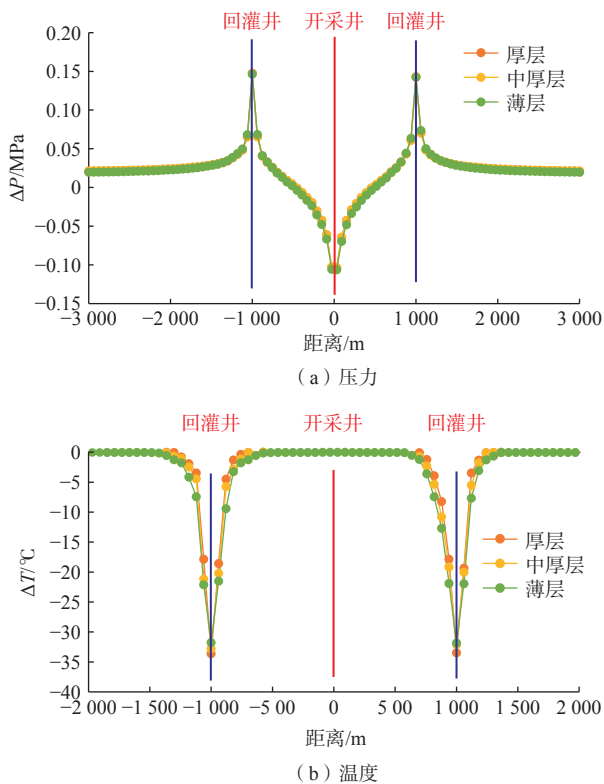


图 7 不同砂体叠置下采灌井周边压力和温度的变化

Fig. 7 The influence of superposition combination on formation pressure and temperature around reinjection well

多层叠置的薄砂层中回灌水运移距离较远, 需要加大采灌井距。模拟中, 代表三角洲前缘相的多次叠置薄砂层中回灌水的运移范围较辫状河道的厚砂层距离更远, 采灌井距需增大 75 m 左右。

参考文献 (References) :

[1] DUAN Zhongfeng, PANG Zhonghe, WANG Xinyi. Sustainability evaluation of limestone geothermal reservoirs with extended production histories in Beijing and Tianjin, China[J]. *Geothermics*, 2011, 40(2): 125 – 135.

[2] SU Yujuan, YANG Fengtian, WANG Bing, et al. Reinjection of cooled water into sandstone geothermal reservoirs in China: A review[J]. *Geosciences Journal*, 2018, 22(1): 199 – 207.

[3] KAMILA Z, KAYA E, ZARROUK S J. Reinjection in geothermal fields: An updated worldwide review 2020[J]. *Geothermics*, 2021, 89: 101970.

[4] 康凤新, 周群道, 赵苏民, 等. 砂岩热储地热水回灌技术规程: DZ/T 0330—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019. [KANG Fengxin, ZHOU Qundao, ZHAO Sumin, et al. Technical regulations of geothermal tail water reinjection in sandstone geothermal reservoir; DZ/T

- 0330—2019[S]. Beijing: China Standards Press, 2019. (in Chinese)]
- [5] SUZUKI A, NIIBORI Y, FOMIN S, et al. Prediction of reinjection effects in fault-related subsidiary structures by using fractional derivative-based mathematical models for sustainable design of geothermal reservoirs[J]. *Geothermics*, 2015, 57: 196 – 204.
- [6] 马峰, 高俊, 王贵玲, 等. 雄安新区容城地热田碳酸盐岩热储采灌数值模拟 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(5): 1 – 18. [MA Feng, GAO Jun, WANG Guiling, et al. Numerical simulation of exploitation and reinjection of carbonate geothermal reservoir in rongcheng geothermal field, Xiongan new area[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(5): 1 – 18. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 李永利, 于长生, 姜智超, 等. 松嫩盆地北部林甸地热田供暖尾水处理试验 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 188 – 194. [LI Yongli, YU Changsheng, JIANG Zhichao, et al. An experimental study of heating tail water treatment of the Lindian geothermal fields in the Northern Songnen Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(1): 188 – 194. (in Chinese with English abstract)]
- [8] WANG Shufang, LIU Jiurong, SUN Ying, et al. Study on the geothermal production and reinjection mode in Xiong County[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2018, 6(3): 178 – 186.
- [9] LEI Haiyan, ZHU Jialing. Numerical modeling of exploitation and reinjection of the Guantao geothermal reservoir in Tanggu District, Tianjin, China[J]. *Geothermics*, 2013, 48: 60 – 68.
- [10] KONG Yanlong, PANG Zhonghe, SHAO Haibing, et al. Recent studies on hydrothermal systems in China: A review[J]. *Geothermal Energy*, 2014, 2(1): 1 – 12.
- [11] 马峰, 王贵玲, 魏帅超, 等. 2018 年地热勘探开发热点回眸 [J]. 科技导报, 2019, 37(1): 134 – 143. [MA Feng, WANG Guiling, WEI Shuaichao, et al. Summary of hot research topics in geothermal exploitation in 2018[J]. *Science & Technology Review*, 2019, 37(1): 134 – 143. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 林黎, 王连成, 赵苏民, 等. 天津地区孔隙型热储层地热流体回灌影响因素探讨 [J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(6): 125 – 128. [LIN Li, WANG Liancheng, ZHAO Sumin, et al. A discussion of the factors affecting geothermal reinjection in the geothermal reservoir of porous type in Tianjin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2008, 35(6): 125 – 128. (in Chinese with English abstract)]
- [13] O’SULLIVAN M J, PRUESS K, LIPPMANN M J. State of the art of geothermal reservoir simulation[J]. *Geothermics*, 2001, 30(4): 395 – 429.
- [14] 周训, 陈明佑, 吴胜军, 等. 天津市深层基岩地下热水系统数值模拟中若干问题的处理 [J]. 地球科学, 2002, 27(2): 163 – 167. [ZHOU Xun, CHEN Mingyou, WU Shengjun, et al. Treatment of some problems in numerical modeling of geothermal water system in deep-seated basement rocks near Tianjin[J]. *Earth Science*, 2002, 27(2): 163 – 167. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 闫佰忠, 徐文杰, 李玉涵, 等. 地下水源热泵抽灌井优化布置及参数灵敏度 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(1): 218 – 229. [YAN Baizhong, XU Wenjie, LI Yuhan, et al. Optimal layout of pumping and recharging wells for groundwater source heat pump and parameter sensitivity[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(1): 218 – 229. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 马峰, 高俊, 王贵玲, 等. 雄安新区容城地热田碳酸盐岩热储采灌数值模拟 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(5): 1534 – 1548. [MA Feng, GAO Jun, WANG Guiling, et al. Numerical simulation of exploitation and reinjection of carbonate geothermal reservoir in Rongcheng geothermal field, Xiongan new area[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2023, 53(5): 1534 – 1548. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 段忠丰, 李福来, 巩亮, 等. 基于水热耦合模拟的油气区地热开发井网布局 [J]. 天然气工业, 2020, 40(10): 156 – 162. [DUAN Zhongfeng, LI Fulai, GONG Liang, et al. Geo-thermal development well spacing patterns based on hydrothermal coupled modeling in oil-gas bearing areas[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(10): 156 – 162. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 阮传侠. 天津地区雾迷山组热储地热回灌研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018. [RUAN Chuanxia. A study of reinjection of geothermal resources in the geothermal reservoir of the wumishan group in Tianjin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 王宽. 基于 TOUGH2 数值模拟软件的延津地区热储采灌研究 [J]. 地下水, 2019, 41(1): 14 – 16. [WANG

- Kuan. Research on thermal storage and irrigation in Yanjin area based on TOUGH2 numerical simulation software[J]. *Ground Water*, 2019, 41(1): 14 – 16. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 胡永乐,王燕灵,杨思玉,等.注水油田高含水后期开发技术方针的调整[J].*石油学报*,2004,25(5):65–69. [HU Yongle, WANG Yanling, YANG Siyu, et al. Adjustment of technical policy for water-flooding oilfield with high water cut in the late stage of development[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(5): 65 – 69. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 冯曦,彭先,李隆新,等.碳酸盐岩气藏储层非均质性对水侵差异化的影响[J].*天然气工业*,2018,38(6):67–75. [FENG Xi, PENG Xian, LI Longxin, et al. Influence of reservoir heterogeneity on water invasion differentiation in carbonate gas reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(6): 67 – 75. (in Chinese with English abstract)]
- [22] BABAEI M, NICK H M. Performance of low-enthalpy geothermal systems: Interplay of spatially correlated heterogeneity and well-doublet spacings[J]. *Applied Energy*, 2019, 253: 113569.
- [23] LIU Xueling, WANG Yuanming, LI Shuai, et al. The influence of reinjection and hydrogeological parameters on thermal energy storage in brine aquifer[J]. *Applied Energy*, 2020, 278: 115685.
- [24] GAO Fei, LIU Feng, WANG Huajun. Numerical modelling of the dynamic process of oil displacement by water in sandstone reservoirs with random pore structures[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2021, 9(3): 233 – 244.
- [25] ZHANG Ying, LUO Jun, FENG Jianyun. Characteristics of geothermal reservoirs and utilization of geothermal resources in the southeastern coastal areas of China[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2020, 8(2): 134 – 142.
- [26] 赵铭海,李晓燕,宋明水,等.济阳坳陷东营组—馆陶组地热资源评价[J].*油气地质与采收率*,2015,22(4):1–5. [ZHAO Minghai, LI Xiaoyan, SONG Mingshui, et al. Research on geothermal resources assessment of the Guantao-Dongying Formation in Jiyang depression[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(4): 1 – 5. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 孟祥玲,王庆兵,杨培杰.山东省地热资源开发利用现状调查与问题分析[J].*山东国土资源*,2021,37(11):36–42. [MENG Xiangling, WANG Qingbing, YANG Peijie. Investigation and problem analysis on development and utilization of geothermal resources in Shandong Province[J]. *Shandong Land and Resources*, 2021, 37(11): 36 – 42. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 国景星,王永诗.济阳坳陷新近系层序地层及沉积体系[J].*油气地质与采收率*,2006,13(6):9–12. [GUO Jingxing, WANG Yongshi. Sequence stratigraphy and sedimentary system of Neogene strata in Jiyang Depression[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2006, 13(6): 9 – 12. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 田美荣.东营凹陷新近系馆陶组层序地层格架[J].*油气地质与采收率*,2010,17(2):1–3. [TIAN Meirong. Stratigraphic sequence framework of Neogene Guantao formation, Dongying Sag[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2010, 17(2): 1 – 3. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 陈墨香.华北地热[M].北京:科学出版社,1988. [CHEN Moxiang. North China geothermal[M]. Beijing: Science Press, 1988. (in Chinese)]
- [31] 龚育龄,王良书,刘绍文,等.济阳坳陷地幔热流和深部温度[J].*地球科学*,2005,30(1):121–128. [GONG Yuling, WANG Liangshu, LIU Shaowen, et al. Mantle heat flow and deep temperature of Jiyang depression, Shandong, North China[J]. *Earth Science*, 2005, 30(1): 121 – 128. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 熊振,王良书,李成,等.东营凹陷现代热流场特征及地热异常成因[J].*石油勘探与开发*,1999,26(4):38–41. [XIONG Zhen, WANG Liangshu, LI Cheng, et al. Determination and interpretation of the terrestrial heat flow in Dongying depression[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1999, 26(4): 38 – 41. (in Chinese with English abstract)]
- [33] PRUESS K, OLDENBURG C M, MORIDIS G J, et al. TOUGH2 User's Guide, Version 2.0. Report LBNL-43134[Z]. Earth Science Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, California, 1999.

编辑:张若琳