

引用格式:郑永香, 凡杰, 尹超, 等. 含水层互补储热系统的热平衡规律数值模拟分析[J]. 油气藏评价与开发, XXXX, XX(XX):  
ZHENG Yongxiang, FAN Jie, YIN Chao, et al. Numerical simulation analysis of thermal equilibrium law of complementary aquifer thermal storage  
system[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, XXXX, XX(XX):  
DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025397

# 含水层互补储热系统的热平衡规律数值模拟分析

郑永香<sup>1</sup>, 凡杰<sup>1</sup>, 尹超<sup>1</sup>, 韩学良<sup>2</sup>, 黄瑞丰<sup>1</sup>

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 中国石油长庆油田陇东油气开发分公司, 甘肃 庆阳 745000)

**摘要:** 含水层储能技术是一种新兴且可行的多能互补储能方案, 其核心技术是将波动性较强的可再生能源(如太阳能、风能等)以热能形式存储于地下含水层中, 在需要时稳定提取利用, 实现基于地热储层的多能互补储能目标。热平衡距离是该系统注采井间距确定的关键参数, 其定义为特定运行条件下, 注入流体的温度波动幅度在含水层内传播过程中降低至可接受范围所需的最小距离。为揭示热平衡距离的主控影响机制, 构建了考虑热-流耦合的三维含水层数值模型, 重点分析了注采生产参数(注液温度、注液速率)、地层物性参数(渗透率、孔隙度)及岩石热物理参数(岩石体积比热容、岩石导热系数)等因素对热平衡距离的影响规律。采用多元线性回归分析法对各参数进行敏感性排序及主导因素识别。研究表明: 热平衡距离与注液温度、注液速率、渗透率及岩石导热系数呈正相关, 与孔隙度及岩石体积比热容呈负相关; 影响热平衡距离的三大主导因素为渗透率、注液速率与注液温度, 其敏感性排序为渗透率>注液速率>注液温度。值得注意的是, 主导因素中生产参数占比较高, 这表明通过合理调控注采策略及优化井网布局, 可有效提升系统储热效率与储能经济性。研究成果为“地热+”多能互补系统的合理布井及运行策略优化提供了定量化科学依据, 同时为可再生能源的高效利用提供了技术支撑。

**关键词:** 含水层储能; 热平衡距离; 多能互补系统; 热-流耦合; 敏感性分析

中图分类号: TE09

文献标识码: A

## Numerical simulation analysis of thermal equilibrium law of complementary aquifer thermal storage system

ZHENG Yongxiang<sup>1</sup>, FAN Jie<sup>1</sup>, YIN Chao<sup>1</sup>, HAN Xueliang<sup>2</sup>, HUANG Ruifeng<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 2. Longdong Oil and Gas Development Branch, PetroChina Changqing Oilfield Company, Qingyang, Gansu 745000, China)

**Abstract:** Aquifer thermal energy storage technology is an emerging and viable multi-energy complementary solution, with its core principle being the storage of highly variable renewable energy sources (such as solar and wind energy) in underground aquifers in thermal form, enabling stable extraction and utilization when needed to achieve multi-energy complementary storage based on geothermal reservoirs. The thermal equilibrium distance is a key parameter for determining the well spacing in this system, representing the minimum distance required for the temperature fluctuation amplitude of injected fluids to reduce to an acceptable range while flowing through the aquifer under specific operating conditions. To reveal the influencing mechanisms of thermal equilibrium distance, a three-dimensional aquifer model incorporating thermo-hydraulic coupling was constructed. The study focused on analyzing the impact of operational parameters (injection temperature and injection rate), formation properties (permeability and porosity), and rock thermophysical properties (volumetric heat capacity and thermal conductivity) on thermal equilibrium distance. Multivariate linear regression analysis was employed to rank the sensitivity of each parameter and identify the primary influencing factors. The results indicate that thermal equilibrium distance is positively correlated with injection temperature, injection rate, permeability, and rock thermal conductivity, while negatively correlated with porosity and volumetric heat capacity. The three dominant factors influencing thermal equilibrium distance are permeability, injection rate, and injection temperature, with their sensitivity ranking as permeability > injection rate > injection temperature. Notably, operational parameters account for a relatively high proportion among the dominant factors, suggesting that optimizing injection-production strategies and wellfield

收稿日期: 2025-11-04。

第一作者简介: 郑永香(1991—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩石力学、地热开发等研究工作。地址: 河北省石家庄市长安区石家庄铁道大学, 邮政编码: 050043。E-mail: zhengyx@stdu.edu.cn

通信作者简介: 凡杰(2000—), 男, 在读硕士研究生。地址: 河北省石家庄市长安区石家庄铁道大学, 邮政编码: 050043。E-mail: fj13616159755@163.com

基金项目: 河北省自然科学基金创新研究群体项目“可地浸资源储层改造与高效开发”(E2025210180); 河北省教育厅青年拔尖人才项目“低渗砂岩铀矿CO<sub>2</sub>相变爆破增渗关键技术研究”(BJ2025142)。

layouts can effectively enhance the thermal storage efficiency and economic viability of the system. These findings provide quantitative basis for well placement and operational strategies in "geothermal+" multi-energy complementary systems, offering technical support for renewable energy utilization.

**Keywords:** aquifer energy storage; thermal equilibrium distance; multi energy complementary system; Tthermo-hydraulic coupling; sensitivity analysis

近年来,全球清洁能源部署规模再创新高,其中风能和光伏发电量在全球电力供应中的占比逐年提升<sup>[1]</sup>。但由于风能、光伏发电自身具有间歇性和波动性,其大规模稳定并网利用面临严峻挑战<sup>[2-3]</sup>。在此背景下,如何实现波动性能量的稳定输出成为提升风光能源利用率的关键。地下含水层储能(Aquifer Thermal Energy Storage, ATES)凭借超大容量、低成本、可长期储能等优势,已成为可再生能源储能系统的潜力技术方案。

深部含水层储热是一种通过地下深部含水层储存高温热能(通常 $\geq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ )的技术,可将间歇性可再生能源以热能形式注入地下深部含水层储存,并在能源需求高峰时提取利用。与浅部含水层储热相比,深部含水层储热不仅储热效率更高<sup>[4]</sup>,且可避免对地表环境造成不利影响<sup>[5]</sup>。因此,本文提出一种“地热+”多能互补储能系统:将太阳能、风能及工业余热等波动性能量以热能形式注入深部含水层进行平衡与储存,最终实现稳定能量输出。该系统示意图如图1所示。

含水层储能的核心关注重点是地层温度场演化规律,目前国内外关于地层温度场演化的研究主要集中于地热开发应用场景。围绕浅层地热开发,周宇坤等<sup>[6]</sup>基于热平衡理论分析了布置方案对浅层土体温度场的动态影响规律;王婉丽等<sup>[7]</sup>结合地温测量、热物性测试及现场热响应试验研究了城市浅层地热能利用过程中的地温场演化规律。上述研究表明,浅层地层温度场稳定性较低、

抗干扰能力较弱。深部含水层地热埋深大、温度稳定性高。围绕深部含水层地热开发,韩朝旭等<sup>[8]</sup>研究了注入流体与地层的温差及注入流量对温度场的影响。GREEN等<sup>[9]</sup>通过数值模拟分析了储层均质性对地层温度场的影响;BURNS等<sup>[10]</sup>通过数值模拟分析了井间距、注采方案对地层温度场的影响;李皓东等<sup>[11]</sup>通过物理实验分析了考虑地热尾水回灌过程中压力梯度和流量梯度对温度场的影响;饶松等<sup>[12]</sup>研究了储层厚度、渗透率、断裂带宽度及地下水流方向对温度场的影响;杨金鹏等<sup>[13]</sup>探讨了含水层储能互补系统中回灌温度、井底压差及井间距对产水井温度的影响规律。综上,含水层温度场主要受生产参数、地层物性参数及岩石热物理参数等影响。本文提出的含水层互补储热系统本质是在传统地热系统基础上增加储热功能,因此,将生产参数、地层物性参数及岩石热物理参数作为本研究的变量。

含水层储热系统的关键评价指标是储热效率。芮振华等<sup>[14]</sup>通过梳理总结全球地热储能项目,认为储热层的孔隙度、渗透率、厚度、各向异性及非均质性等参数对其储热效率及规模影响较大;WANG等<sup>[15]</sup>通过数值模拟,分析了隔水层地质参数对水平井储热的影响;李嘉龙等<sup>[16]</sup>结合现场数据与数值模拟,研究了冷水回灌引起的热储内温度场演化规律;OHAGEN等<sup>[17]</sup>研究了地下水流速度、井间距和抽水量对三井式含水层储热的影响;黄永辉等<sup>[18]</sup>对比了传统水热型地热系统与深部含水层储热的特

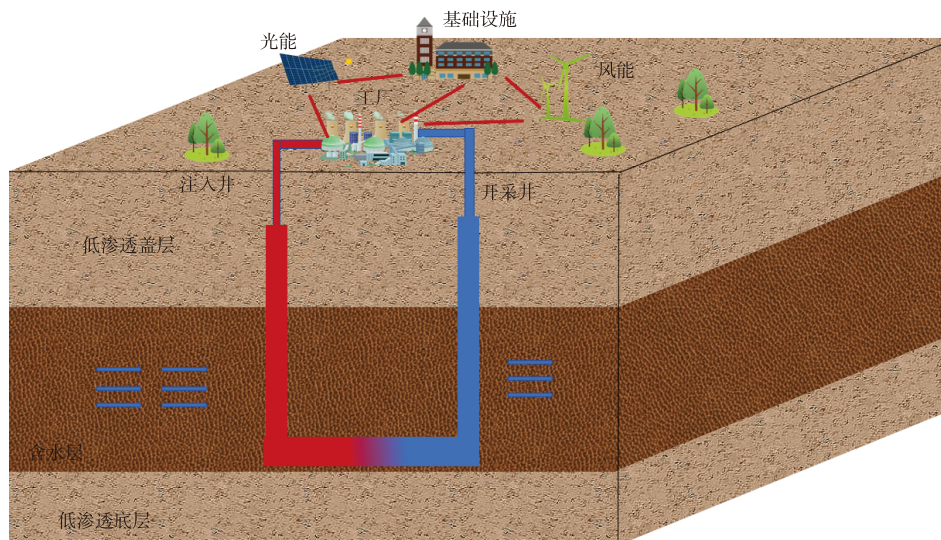


图1 “地热+”多能互补储能系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of "Geothermal +" multi energy complementary system

点,并明确了深部含水层储热性能的影响参数。上述研究表明,含水层具有良好的储热性能,是热能存储的良好载体。当前,含水层储能研究与应用主要集中于季节性储能,ZEGHICI等<sup>[19]</sup>模拟了恒定流速下供暖180 d、制冷185 d的季节性单井HT-ATES系统的温度变化;SHELDON等<sup>[20]</sup>模拟了时长91 d的注入、储存、开采及关井全阶段季节性储能系统的运行过程;COLLIGNON等<sup>[21]</sup>模拟了4个月注入、2个月关井、4个月采热工况下的季节性储能流程及采热效果。综上,通过含水层可实现跨季节储能,进而实现能量的稳定利用。但风光等可再生能源的间歇性比季节性储能场景下的间歇性更复杂,如何实现能量的快速平衡与稳定输出,是提升其利用效率的关键。本文提出的系统是一种借助深部含水层储能开展快速能量平衡、实现短期能量利用的方案。相较于季节性储能,本研究的储能周期短、见效快,因此需解决注入能量的波动性及周期性能量的平衡问题。

热平衡距离是该系统注采井间距确定的关键参数,其定义为特定运行条件下,注入流体的温度波动幅度在含水层内传播过程中降低至可接受范围所需的最小距离。为分析多能互补系统热平衡距离的影响规律,本文基于热-流耦合理论,建立了持续性注入波动性能量的三维数值模型。通过系统分析深部含水层储热体的热力学响应机制,揭示生产参数、地层物性参数及岩石热物理参数对热平衡距离的影响规律。

## 1 方法与模型

### 1.1 控制方程

基于以下关键假设,建立深部含水层热-流耦合数值模型:

- 1)多孔介质各向同性:地层渗透率、孔隙度等物性参数在空间上呈各向同性分布。
- 2)忽略辐射传热:热量传递仅通过热传导与对热流2种方式实现,忽略辐射传热的影响。
- 3)局部热平衡假设:流体与固体骨架之间可瞬时达到热平衡状态。
- 4)稳态渗流条件:流体流动遵循稳态达西流规律,忽略瞬态压力波动的影响。
- 5)恒定的热物性参数:岩石热物性参数(比热容、导热系数)不随温度变化而改变。

#### 1.1.1 能量守恒方程

含水层内的换热过程以热对流为主,含水层与盖层、含水层与底层之间通过岩石骨架进行换热,地下换热过

程可用如下能量守恒控制方程描述<sup>[22]</sup>:

$$\left(\rho_w C_{p,w}\right)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_w C_{p,w} v_w \cdot \nabla T = \lambda_{\text{eff}} \nabla^2 T \quad (1)$$

式中: $(\rho_w C_{p,w})_{\text{eff}}$ 为有效体积比热容,单位 $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\partial T$ 为温度偏微分,单位 $^\circ\text{C}$ ;  $\partial t$ 为时间偏微分,单位 $\text{d}$ ;  $\rho_w$ 为流体的密度,单位 $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $C_{p,w}$ 为流体的定压比热容,单位 $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $v_w$ 为流体的速度,单位 $\text{m}/\text{s}$ ;  $\nabla T$ 为温度梯度,单位 $^\circ\text{C}$ ;  $\lambda_{\text{eff}}$ 为有效导热系数,单位 $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{d} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\nabla^2 T$ 为温度的拉普拉斯算子,表示温度在空间中的二阶导数,单位 $^\circ\text{C}/\text{m}^2$ 。

式(1)中有效体积比热容 $(\rho_w C_{p,w})_{\text{eff}}$ 表示为:

$$(\rho_w C_{p,w})_{\text{eff}} = \varphi \rho_w C_{p,w} + (1 - \varphi) \rho_r C_{p,r} \quad (2)$$

式中: $\varphi$ 为孔隙度;  $\rho_r$ 为岩石的密度,单位 $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $C_{p,r}$ 为岩石的定压比热容,单位 $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

式(1)中有效导热系数 $\lambda_{\text{eff}}$ 表示为:

$$\lambda_{\text{eff}} = \varphi \lambda_w + (1 - \varphi) \lambda_r \quad (3)$$

式中: $\lambda_{\text{eff}}$ 为有效导热系数,单位 $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{d} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\lambda_w$ 为流体的导热系数,单位 $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{d} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\lambda_r$ 为岩石的导热系数,单位 $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{d} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

本文假设含水层中的渗流过程均符合线性层流运动规律,服从达西定律且遵循质量守恒定律,由此得到含水层渗流过程的质量守恒控制方程为<sup>[16]</sup>:

$$\frac{\partial(\rho_w \cdot \varphi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w v_r) = Q_m \quad (4)$$

式中: $t$ 为时间,单位 $\text{d}$ ;  $v_r$ 为基质中渗流速度,单位 $\text{m}/\text{s}$ ;  $\nabla$ 为散度算子,表示质量通量 $\rho_w v_r$ 的净流出率;  $Q_m$ 为质量源项,单位 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

#### 1.1.2 动量守恒方程(达西定律)

盖层、底层及含水层中的流体运移过程用达西定律表示为:

$$v = -\frac{K}{\mu} (\nabla P - \rho_w g \nabla z) \quad (5)$$

式中: $v$ 为流体的达西流速,单位 $\text{m}/\text{s}$ ;  $K$ 为渗透率,单位 $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $\mu$ 为流体的动力黏度,单位 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $\nabla P$ 为压力梯度,单位 $\text{Pa}/\text{m}$ ;  $g$ 为重力加速度,单位 $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $\nabla z$ 为高度梯度。

### 1.2 数值模型

本文建立的“地热+”多能互补系统是将波动性能量转化为热能后,通过流体介质注入地层。为研究波动性高温流体注入深部含水层时的温度场演化规律,结合已有文献中鲁西德城区砂岩热储的地热开发地质条件<sup>[15]</sup>,建立三维含水层热-流耦合数值模型(图2),其几何尺寸

为  $100\text{ m}\times 100\text{ m}\times 35\text{ m}$ 。模型垂向分为3层:盖层(厚度  $10\text{ m}$ ,低渗透岩层)、目标层(厚度  $15\text{ m}$ ,高渗透砂岩含水层)及底层(厚度  $10\text{ m}$ ,低渗透岩层)。盖层与底层将目标含水层夹在中间,形成封闭型储热系统。各层具体参数见表1,其中部分参数取自文献[23]。

模型四周设置为无流动边界。2口井设置压力边界,注水井井底压力设定为  $18\text{ MPa}$ ,采水井井底压力设定为  $11\text{ MPa}$ ,流量上限为  $3\ 000\text{ m}^3/\text{d}$ 。模型中设置注水井与采水井各1口,井间距为  $60\text{ m}$ ,2口井均在目标层(含水层)层位射孔。设置模型初始参数及上、下温度边界,四周设置为绝热边界;工作介质为水,储层初始温度设定为  $70\text{ }^\circ\text{C}$ 。模型网格数量为  $100\times 100\times 7$ ,网格总数  $70\ 000$ 个。单网格水平长度  $1\text{ m}$ 、纵向长度  $1\text{ m}$ 、厚度  $2\text{ m}$ 。

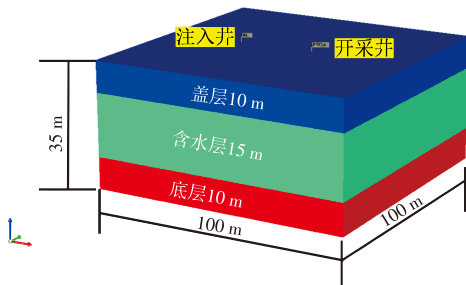


图2 三维储层模型

Fig. 2 Three-dimensional reservoir model

表1 不同层位参数

Table 1 Parameters of different layers

参数	盖层	目标层	底层
渗透率/ $10^{-3}\ \mu\text{m}^2$	1	200	1
孔隙度	0.01	0.2	0.01
岩石体积比热容/ $\text{J}/(\text{m}^3\cdot^\circ\text{C})$	$2.5\times 10^6$	$2.5\times 10^6$	$2.5\times 10^6$
岩石导热系数/ $\text{kJ}/(\text{m}\cdot\text{d}\cdot^\circ\text{C})$	150	150	150
流体导热系数/ $\text{kJ}/(\text{m}\cdot\text{d}\cdot^\circ\text{C})$	56	56	56
初始地层温度/ $^\circ\text{C}$	70	70	70
层厚/ $\text{m}$	10	15	10

常规地热井井身结构主要有两种:二开井身结构和四开井身结构。在实际井身结构设计过程中,无特殊地质及工程要求时,套管尺寸与井眼直径通常采用“13/9/7”配合系列。同时,参考天津地区馆陶组地热井WQ-39B井、雾迷山组地热井DL-93井的井身结构参数,整理得到表2地热井井深结构设计方案<sup>[24-25]</sup>。结合本文研究区地热地质条件、热储层特性及地热开发工程要求,最终选用三开钻井结构。

注水并热源整合利用太阳能、风能及工业余热。其中,工业余热选取了钢铁工业和电力工业中常见的排水余热,温度范围为  $30\sim 70\text{ }^\circ\text{C}$ 。由于太阳能光热仅在白天产生,因此结合该特性,将注液温度简化为随时间变化的

表2 地热井井深结构设计方案

Table 2 Design scheme for geothermal well depth structure

井身结构	开次	钻头尺寸/mm	井深/m	套管尺寸/mm	下入深度/m
二开	一开	444.5	200	339.7	200
	二开	311.0	1 200	244.5	200~1 200
四开	一开	444.5	200	339.7	200
	二开	311.0	1 200	244.5	200~1 200
	三开	215.9	2 850	177.8	1 200~2 850
	四开	152.4	3 000		裸眼成井

阶段性温度,一天内设置  $12\text{ h}$  高温注入阶段和  $12\text{ h}$  低温注入阶段。其中,高温注入阶段的注入流体温度为  $110\text{ }^\circ\text{C}$ ,夜晚低温注入阶段的注入温度为  $80\text{ }^\circ\text{C}$ 。

采用动态监测法(径向每隔  $1\text{ m}$  设置温度监测点)监测含水层温度场的演化规律。通过阈值判定法,将日温度波动差低于  $2\text{ }^\circ\text{C}$  视为地层温度已达到平衡。前人研究表明,埋深  $5\text{ m}$  地层的温度波动幅度仅为  $0.2\sim 0.4\text{ }^\circ\text{C}$ ,且随着地层深度的增加,温度扰动幅度约为  $\pm 0.7\text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ (岩石导热系数为  $1.55\text{ kJ}/(\text{m}\cdot\text{d}\cdot^\circ\text{C})$ )<sup>[26-27]</sup>。因此,温度平衡点的定义具有合理性,并依据该平衡点定义热平衡距离(Thermal Equilibrium Distance, TED)。本研究提出热平衡距离作为系统性能评价指标,其定义为温度波动幅度首次出现且能持续小于  $2\text{ }^\circ\text{C}$  的监测点与注入井的距离。通过TED的变化规律,分析深部含水层储热体的热力学响应机制,并明确关键参数及其对系统整体性能的影响。

### 1.3 模型验证

为验证所建模型的可靠性,以一个HT-ATES工程案例作为对照<sup>[23]</sup>。该HT-ATES系统埋深为  $1\ 250\text{ m}$ ,储层初始温度  $70\text{ }^\circ\text{C}$ 、注液温度  $90\text{ }^\circ\text{C}$ 、注液速率  $40\text{ L/s}$ 。该案例采用双井模型,模型几何尺寸为  $1\ 000\text{ m}\times 1\ 000\text{ m}\times 60\text{ m}$ 。数值模拟结果与文献案例中的温度变化数据见图3。将模拟值与文献案例数据进行对比,结果显示两者误差范围介于  $0.03\%\sim 6.7\%$ ,表明所建模型的模拟结果较为准确。

## 2 地层温度场演化特征

为揭示波动性高温流体注入对地层温度场的影响,基于表1不同层位参数选取注液速率分别为  $1\ 000$ 、 $2\ 000$ 、 $3\ 000\text{ m}^3/\text{d}$  3种工况开展数值模拟。选择距离注入井  $10$ 、 $20$ 、 $30\text{ m}$  处作为温度监测点,分析不同距离处地层温度曲线的演化特征。图4汇总了3个监测点在不同注液速率工况下地层温度随时间的变化规律。

如图4a—图4c所示,近井区( $10\text{ m}$ 处)地层温度波动剧烈,日温度波动幅度达  $15\sim 20\text{ }^\circ\text{C}$ ,且注液速率越快,温

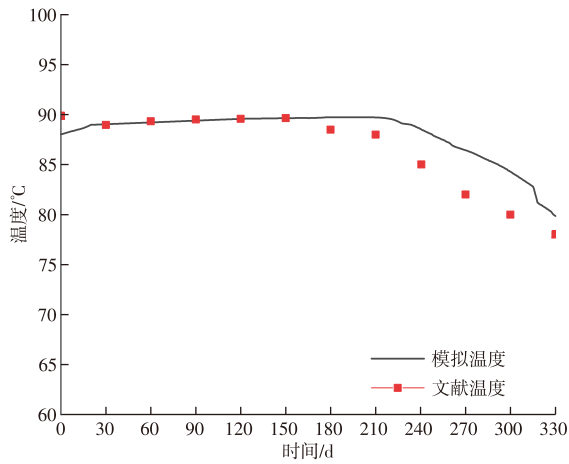


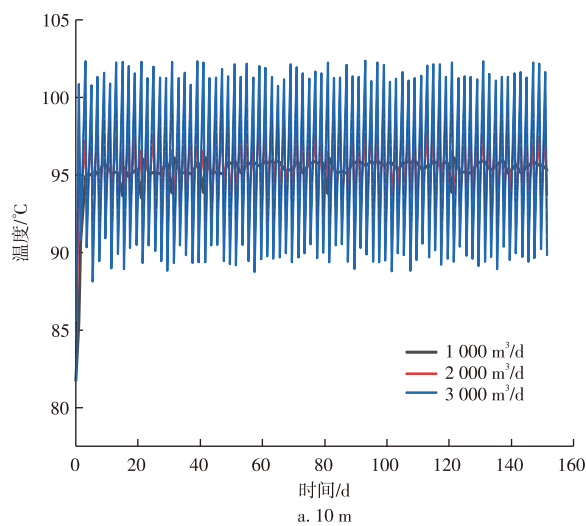
图3 模型验证结果

Fig. 3 Results of Verification Model

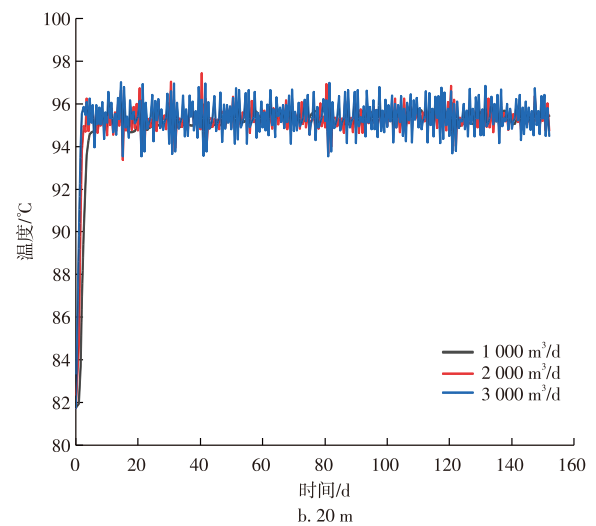
度波动越显著;中程区(20 m处)温度波动幅度降至3~6 °C,不同注液速率工况下的温度波动幅度减小;远井区(30 m处)温度波动幅度逐渐趋于一致,曲线波动幅度不

超过2 °C。综上,波动性高温流体注入地层后,近井区域地层温度波动性较大;随着注入流体在地层中运移距离的增加,借助地层自身的热平衡作用,注入流体的温度差被逐步平衡;当运移距离超过热平衡距离后,地层温度基本趋于稳定。

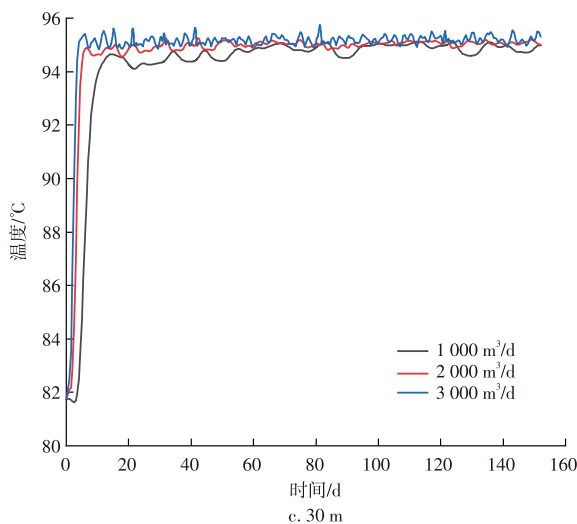
为分析注入流体温度差异对地层温度变化的影响,图4d汇总了不同距离处地层最高温度与最低温度的温度波动幅度。由图4d可知,温差曲线呈现“先快速下降、后维持低值稳定”的变化趋势:近井段地层温差较高,随后随距离增加而逐渐降低;当温度降低至平衡阈值后,地层温度波动差异很小,可视为地层温度达到热平衡状态。因此,本文提出的热平衡距离可作为衡量地层温度场演化特征的关键评价指标。当监测点与注入井的距离小于热平衡距离时,注入的波动性能量在地层中表现为较大的温度差异;当监测点与注入井的距离大于热平衡距离时,地层可实现对注入波动性能量的平衡,进而保证系统能量的稳定输出,最终实现深部含水层对波动性能量的平衡。



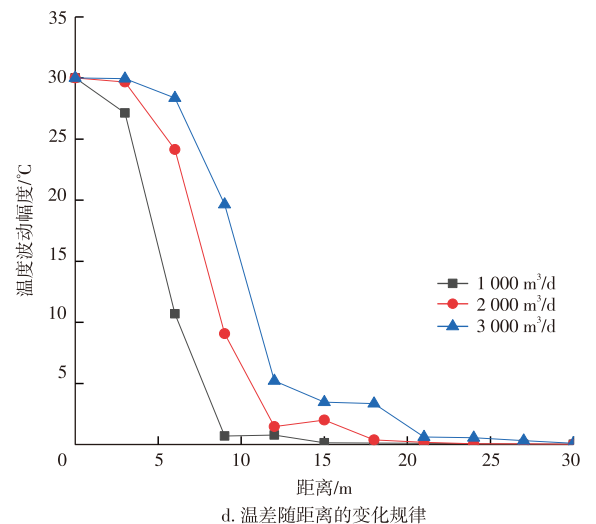
a. 10 m



b. 20 m



c. 30 m



d. 温差随距离的变化规律

图4 不同距离的温度演化特征

Fig. 4 Evolution characteristics of temperature at different distances

### 3 各因素对热平衡距离的影响规律分析

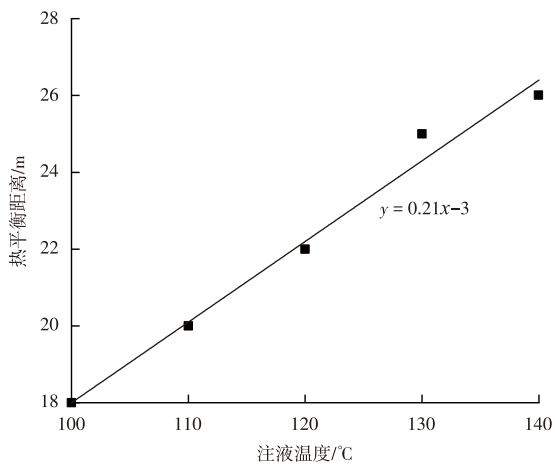
#### 3.1 模拟方案的制定

模型以高温高压水作为介质,结合以往含水层储热数值模拟研究,归纳并制定了生产参数、地层物性参数及岩石热物理参数对热平衡距离影响的研究方案。具体方案如表3所示。

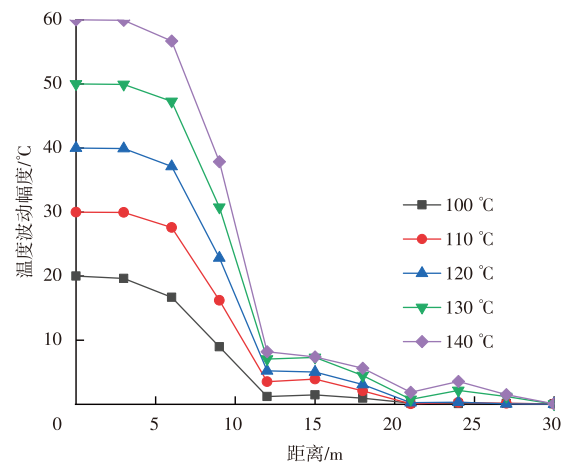
表3 不同因素对热平衡距离影响的研究方案

Table 3 Research plan of the influence of different factors on TED

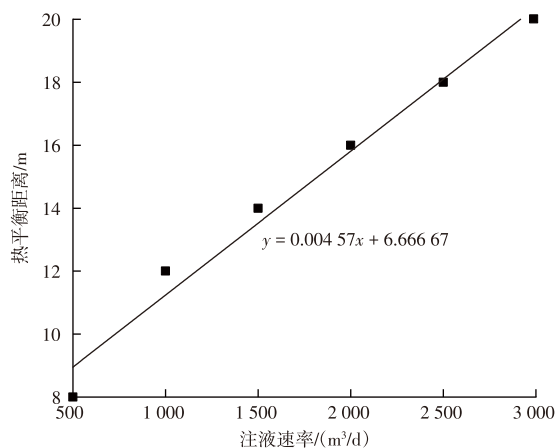
影响因素	工况1	工况2	工况3	工况4	工况5	工况6
注液温度/ $^{\circ}\text{C}$	100~140	110	110	110	110	110
注液速率/ $\text{m}^3/\text{d}$	3 000	1 000~3 000	3 000	3 000	3 000	3 000
渗透率/ $\mu\text{m}^2$	200	200	100~300	200	200	200
孔隙度	0.2	0.2	0.2	0.1~0.3	0.2	0.2
岩石体积比热容/ $\text{J}/(\text{m}^3\cdot^{\circ}\text{C})$	$2.5\times 10^6$	$2.5\times 10^6$	$2.5\times 10^6$	$2.5\times 10^6$	$1.5\times 10^6\sim 3.0\times 10^6$	$2.5\times 10^6$
岩石导热系数/ $\text{kJ}/(\text{m}\cdot\text{d}\cdot^{\circ}\text{C})$	150	150	150	150	150	100~300



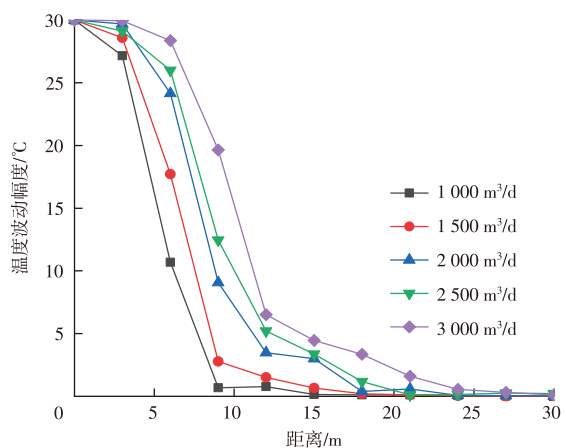
a. 不同注液温度对热平衡距离的影响



b. 不同注液温度的温差随距离的变化规律



c. 不同注液速率对热平衡距离的影响



d. 不同注液速率的温差随距离的变化规律

图5 不同生产参数对热平衡距离的影响规律

Fig. 5 The influence of operational parameters on TED

#### 3.2 生产参数对热平衡距离的影响

为分析生产参数对热平衡距离的影响,基于表3设置高温注入阶段不同注液温度(低温注入阶段温度固定为 $80^{\circ}\text{C}$ )与不同注液速率的研究方案。不同生产参数对热平衡距离的影响如图5所示。

其中,图5a与图5b反映不同注液温度对TED的影响规律。由图5a可知,当注液温度由 $100^{\circ}\text{C}$ 增至 $140^{\circ}\text{C}$ ,TED从18 m扩展至26 m,增幅达44%,且注液温度与TED呈线性正相关,其数量关系为 $A_{\text{TED}}=0.21x-3$ 。由图5b

可知,不同高温时段温差随距离的变化可分为3个阶段:高温差稳定阶段、快速下降阶段及低温差稳定阶段。在高温差稳定阶段,高温与低温时段注入的流体距离注水井较近,缺乏充足的热量交换空间,因此,温度波动幅度较小。随着距离的增加,进入温差快速下降阶段,当注入流体与注水井的距离逐渐增大,高温与低温时段注入流体的热量交换空间随之扩大,热量快速散失,温度波动幅度快速下降,且下降速率随距离增加而加快。进入低温差稳定阶段后,温差随距离缓慢降低,且高温时段注入流体温度越高,温差趋于平稳的距离越远。因此,注液温度越高, TED 越大。

图 5c 与图 5d 反映不同注液速率对 TED 的影响规律。由图可知,当注液速率由 1 000 m<sup>3</sup>/d 增至 3 000 m<sup>3</sup>/d, TED 从 8 m 扩展至 20 m,增幅达 150%,且注液速率与 TED 呈线性正相关,数量关系为  $A_{TED}=0.004\ 57x+6.666\ 67$ 。因此,注液速率越大,热平衡距离越大,且二者呈线性正相关。由图 5d 可知,注液速率越大,温差越晚进入快速下降阶段,且 TED 越大。注液速率增大意味着地层中流体流速增加,流速增加后,流体在相同时间内可运移至更远的地层,且高温流体与地层的热交换时间缩短。因此,注液速率越大, TED 越大。

### 3.3 地层物性参数对热平衡距离的影响

渗透率和孔隙度均为地层的固有属性,渗透率是表征岩石自身传导流体能力的参数,孔隙度是描述岩石中孔隙体积占岩石总体积百分比的参数,也是衡量岩石储存流体能力的重要指标。为分析地层物性参数对 TED 的影响,基于表 3 设置不同渗透率与不同孔隙度的研究方案。不同地层物性参数对热平衡距离的影响如图 6 所示。

其中,图 6a 与图 6b 反映渗透率对 TED 的影响规律。由图 6a 可知,当渗透率从  $100\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$  增至  $300\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$

时, TED 由 12.6 m 显著扩展至 24 m,增幅达 90%。且渗透率与 TED 呈线性正相关,其数量关系为  $A_{TED}=0.054x+7.8$ 。由图 6b 可知,渗透率越大,波动温度的下降起始位置越靠后,且下降速率越慢。渗透率升高时,岩层传导流体能力的增强,导致高温与低温时段注入流体的热交换时间缩短。因此,渗透率越高,流体流速越快,热交换时间越短,波动温度越难被平衡。随着距离的增加,高温与低温时段注入的流体与更多岩石发生热交换,温度波动幅度逐渐下降,最终趋于平衡。综上,渗透率越大, TED 越大。

由图 6c 不同孔隙度对 TED 的影响规律可知,当孔隙度从 0.1 增至 0.3 时, TED 由 19.8 m 缩短至 17.8 m,降幅达 10%,其数量关系为  $A_{TED}=-9.1x+20.6$ ,且孔隙度与 TED 呈线性负相关。孔隙度描述了岩石中孔隙体积占岩石总体积的百分比,孔隙度增大时,岩石容纳流体的能力增强,高温与低温时段注入的流体可在更大空间内发生热交换,波动温度可更快趋于稳定。因此,孔隙度越大, TED 越小。由式(5)达西定律可知,流体流速与孔隙度成反比,孔隙度增大会削弱流体流速,但影响较小。

### 3.4 岩石热物理参数对热平衡距离的影响

岩石体积比热容描述了单位体积岩石在温度升高或降低 1 °C 时所吸收或释放的热量,是衡量岩石热容性的重要指标。岩石导热系数是表征岩石导热能力优劣的参数,二者均是岩石热物理参数的重要组成部分。为分析岩石热物理参数对 TED 的影响,基于表 3 设置不同的岩石体积比热容与不同的岩石导热系数的研究方案。不同岩石热物理参数对 TED 的影响如图 7 所示。

由图 7a 可知,当岩石体积比热容从  $1.5\times 10^6\ \text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{°C})$  增加至  $3.0\times 10^6\ \text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{°C})$ , TED 由 23.0 m 缩短至 17.2 m,降幅达 25%,且岩石体积比热容与 TED 呈线性负相关,数量关系为  $A_{TED}=-4x+29$ 。岩石体积比热容直接影响热传递效率。由于比热容大的岩石具有更大的热容量,在

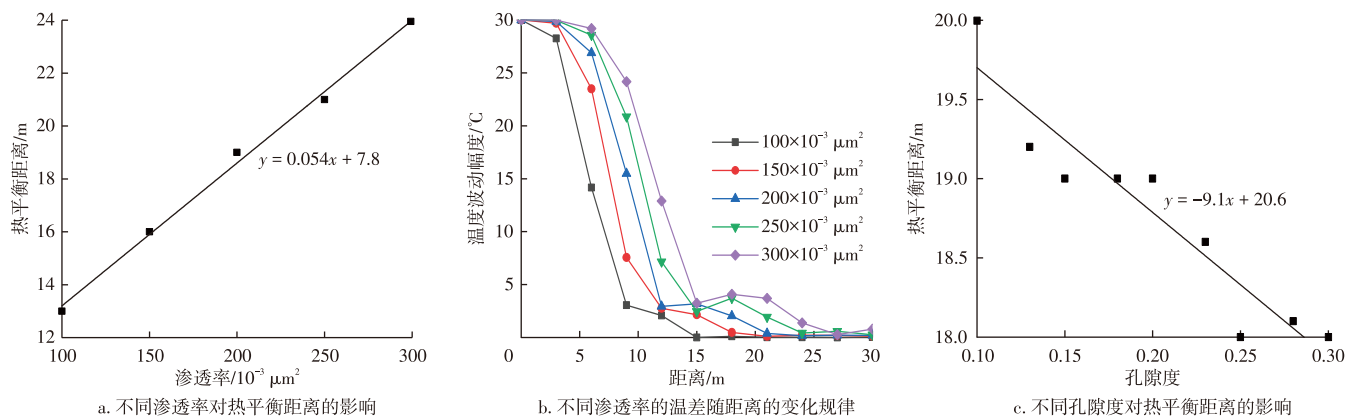


图6 地层物性参数对热平衡距离的影响规律  
Fig. 6 The influence of formation properties on TED

高温注入阶段的热量传递过程中能够吸收更多热量,在低温注入阶段则释放更多热量提升低温流体温度。因此,岩石体积比热容越大,温度趋于稳定的过程越迅速,意味着波动温度可在更短距离内达到稳定状态,因此,岩石体积比热容越大, TED 越小。由图 7b 可知,当岩石导热系数从  $100 \text{ kJ}/(\text{m}\cdot\text{d}\cdot^\circ\text{C})$  增加到  $300 \text{ kJ}/(\text{m}\cdot\text{d}\cdot^\circ\text{C})$ , TED 仅从  $18 \text{ m}$  增长到  $19 \text{ m}$ ,增幅为  $5.6\%$ 。说明岩石导热系数对 TED 影响较小,远低于注液温度、注液速率和渗透率等参数的影响。

### 3.5 不同因素对热平衡距离的影响规律

前述已系统分析了注液温度、注液速率、渗透率、孔隙度、岩石体积比热容及岩石导热系数对 TED 的影响。各因素对热平衡距离的影响不同,表 4 汇总了不同因素对 TED 的影响规律。

由表 4 可知,注液温度、注液速率、渗透率及岩石导热系数对 TED 的影响为随着影响因素的增加呈递增趋势。岩石体积比热容和孔隙度 TED 的影响为随着影响因素的增加呈递减趋势。TED 随孔隙度增大而减小,这主要是由于孔隙度主导了含水层的储热容量,因此,孔隙度增大,高低温混合流体具备更充足的热交换空间,进而促使 TED 减小。岩石体积比热容的增大,使得混合流体

在注采井间运移过程中更多热量被地层吸收,因此,随着比热容的增大, TED 减小。注液温度升高,则向地层内注入的热量增加,在其他条件不变时,高低温混合流体需要更远距离完成热交换,因此, TED 增大。注液速率和渗透率增大,均会提升流体流速,促使高温流体更快运移至更远距离,同时高低温混合流体的热交换时间被压缩,最终导致 TED 增加。在流速较快条件下,岩石导热系数的热交换调控作用较小,对 TED 的影响较小。

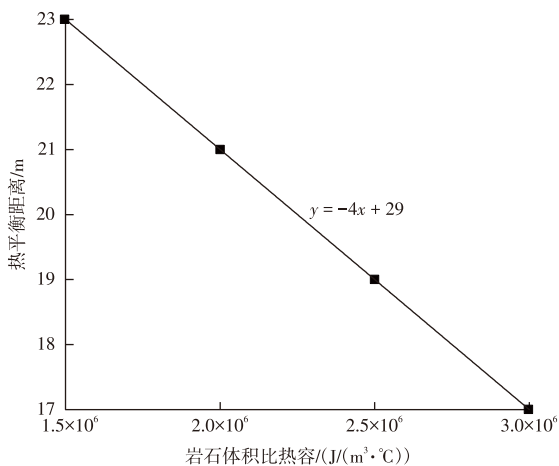
## 4 各因素对热平衡距离的影响评估

### 4.1 热平衡距离影响因素的归一化处理

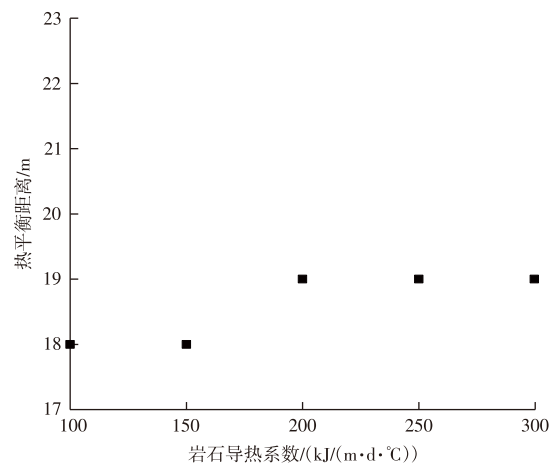
为进一步探究热平衡距离的关键控制因素,从施工参数、地层物性参数及岩石热物理参数 3 方面开展不同因素的影响机制分析。为避免不同因素因单位或数量级差异较大引发的分析误差,本研究采用归一化处理方法。通过归一化公式(式 6),将各变量的数值范围调整为相同的尺度。

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (6)$$

式中:  $x$  为原始数据;  $x_{\max}$  为数据最大值;  $x_{\min}$  为数据最小值;  $x'$  为归一化后的值,范围  $[0, 1]$ 。



a. 不同岩石体积比热容对热平衡距离的影响



b. 不同岩石导热系数对热平衡距离的影响

图 7 岩石热物理参数对热平衡距离的影响规律

Fig. 7 The influence of rock thermophysical parameters on TED

表 4 不同因素对产水井温度与热平衡距离的影响分析

Table 4 Analysis of the influence of different factors on the temperature of production well and TED

影响因素	范围	影响规律
注液温度/ $^\circ\text{C}$	100~140(热平衡距离为 18~26 m)	TED 随着注液温度的增加而增加
注液速率/ $(\text{m}^3/\text{d})$	1 000~3 000(热平衡距离为 8~20 m)	TED 随着注液速率的增加而增加
渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	100~300(热平衡距离为 13~24 m)	TED 随着渗透率的增加而增加
孔隙度	0.1~0.3(热平衡距离为 19.8~17.8 m)	TED 随着孔隙度的增大而减小,但影响较小
岩石体积比热容/ $\text{J}/(\text{m}^3\cdot^\circ\text{C})$	$1.5 \times 10^6 \sim 3 \times 10^6$ (热平衡距离为 21~15 m)	TED 随着岩石体积比热容的增大而减小
岩石导热系数/ $\text{kJ}/(\text{m}\cdot\text{d}\cdot^\circ\text{C})$	100~300(热平衡距离为 18~19 m)	TED 随着岩石导热系数的增加而增加,但影响较小

## 4.2 热平衡距离影响因素的敏感性评估

为量化不同参数对热平衡距离的独立影响并明确其优先级,基于数值模拟结果,结合多元线性回归模型开展敏感性分析。模型以热平衡距离为因变量,选取注液温度、注液速率、渗透率、孔隙度、岩石体积比热容及岩石导热系数作为自变量。结合归一化处理后的数值模拟数据,开展多元线性回归分析。

回归分析采用最小二乘法(OLS),回归方程如下:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad (7)$$

式中: $y$ 为平衡距离; $\beta_0$ 为截距; $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 为回归系数; $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 为不同因素; $\varepsilon$ 为误差项。

由表5可知,决定系数 $R^2$ 为0.966,去除复杂性因素后调整 $R^2$ 为0.957,表明该模型拟合度较高,可准确表征不同因素对TED的影响。

表5 单因素模型回归结果摘要  
Table 5 Summary table of regression results for single-factor model

基本信息	参数	基本信息	参数
因变量	平衡距离	决定系数 $R^2$	0.966
模型	普通最小二乘法	调整决定系数 $R^2$	0.957
方法	最小二乘法	$F$ 检验统计量	108.7
样本数量	30	$P$ 值	$4.2 \times 10^{-18}$
残差的自由度	27	对数似然值	67.552
独立变量	6	赤池信息准则(AIC)	-119.1
协方差	非稳健标准差	贝叶斯信息准则(BIC)	-106.7

单因素回归模型结果回归系数表如表6所示,  $Coef$ 表示回归系数,其数值表征各自变量每单位变化对因变量(热平衡距离)的影响幅度。 $Std\ err$ 表示标准误差,用于衡量各回归系数的不确定性。 $t$ 值为回归系数估计值与标准误差的比值。 $P > |t|$ 值, $P$ 值用于检验自变量是否显著。 $P < 0.05$ ,表明该变量对热平衡距离的影响显著。 $[0.025, 0.975]$ 为置信区间,用于反映回归系数的可能取值范围。置信区间不包含0,则进一步说明该因素对热平衡距离影响的显著性。

表6 单因素模型回归结果回归系数  
Table 6 Regression coefficient table of single-factor model regression results

	$Coef$	$std\ err$	$t$	$P >  t $	置信区间
截距	-0.177 1	0.063	-2.829	0.009	-0.306, -0.049
注液温度	0.502 2	0.043	11.802	0.000	0.415, 0.590
注液速率	0.554 8	0.029	19.175	0.000	0.495, 0.614
渗透率	0.620 8	0.051	12.274	0.000	0.517, 0.725
孔隙度	-0.084 8	0.051	-1.677	0.105	-0.189, 0.019
岩石体积比热容	-0.312 4	0.050	-6.274	0.000	-0.415, -0.210
岩石导热系数	0.062 0	0.043	1.456	0.157	-0.025, 0.149

注: $Coef$ 为回归系数; $std\ err$ 为标准误差; $t$ 值为 $t$ 统计量; $P > |t|$ 为双侧 $t$ 检验 $P$ 值。

注液温度、注液速率、渗透率及岩石导热系数的回归系数均为正值,表明上述参数对TED具有正相关影响。孔隙度与岩石体积比热容的回归系数分别为-0.084 8和-0.312 4,表明二者对TED具有负相关影响,且岩石体积比热容对TED的影响更显著。对比各因素 $P$ 值可知,注

液温度、注液速率、渗透率及岩石体积比热容的 $P < 0.05$ ,对TED的影响显著,其余因素对TED的影响不显著。

若某一因素的置信区间不包含0,则表明该因素对平衡距离的影响显著。由图8中各因素对TED的影响及置信区间结果可知,孔隙度于岩石导热系数的置信区间包含0,因此,二者对TED的影响不显著。注液温度、注液速率及渗透率的置信区间位于0的右侧,对TED具有正相关的显著影响。岩石体积比热容的置信区间位于0的左侧,对TED具有负相关的显著影响。基于第3节各因素对热平衡距离的影响规律分析、回归系数及置信区间的研究,得出不同参数对TED的影响排序如下:渗透率>注液速率>注液温度>岩石体积比热容。

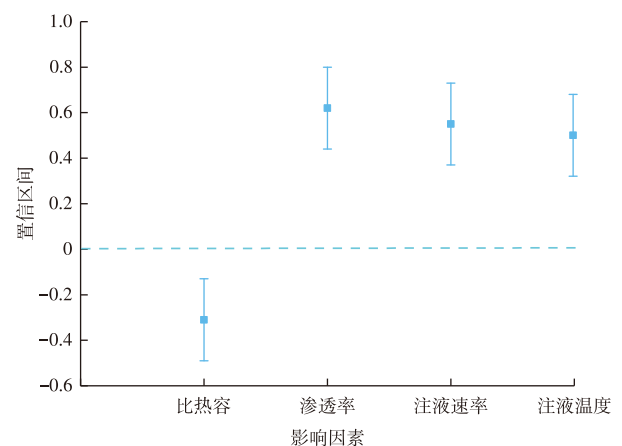


图8 不同因素对平衡距离的影响及置信区间  
Fig. 8 The influence and confidence interval of different factors on the equilibrium distance

## 5 结论

本文基于热-流耦合理论建立数值模型,揭示了波动性高温水周期性持续注入含水层后热平衡距离的演化规律。通过单因素影响分析与多元线性回归分析,量化了不同参数对TED的影响。主要结论如下:

1)验证了砂岩含水层可实现波动性可再生能源的热能存储与稳定输出,注入流体的温度波动在含水层内的传播受多因素影响,提出热平衡距离作为核心评价指标,用于分析其影响规律。

2)通过系统分析不同参数对热平衡距离的影响,明确了各参数的影响规律。注液温度、注液速率、渗透率及岩石导热系数均与热平衡距离呈正相关,孔隙度和岩石体积比热容与热平衡距离呈负相关。

3)基于各参数影响规律分析、回归系数及置信区间的研究,确定各参数对热平衡距离的影响大小为:渗透率>注液速率>注液温度>岩石体积比热容>岩石导热系数>孔隙度。

### 参考文献

- [1] LI Y B, SUN Y T, LIU J C, et al. A data driven robust optimization model for scheduling near-zero carbon emission power plant considering the wind power output uncertainties and electricity-carbon market[J]. *Energy*, 2023, 279: 128053.
- [2] 刘珂,顾雪平,白岩松,等.考虑风电不确定性的电力系统在线动态分区恢复优化方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(19): 60-73.  
LIU Ke, GU Xueping, BAI Yansong, et al. Online dynamic partition restoration optimization method of a power system considering wind power uncertainty[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(19): 60-73.
- [3] 李鹏,李林媛,王加浩,等.考虑风电不确定性和储能灵活性的有源配电网有功无功协同鲁棒优化[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(7): 303-311.  
LI Peng, LI Linyuan, WANG Jiahao, et al. Active power and reactive power cooperative robust optimization of active distribution network considering wind power uncertainty and energy storage flexibility[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2024, 45(7): 303-311.
- [4] 黄永辉,庞忠和,程远志,等.深层含水层地下储热技术的发展现状与展望[J]. *地学前缘*, 2020, 27(1): 17-24.  
HUANG Yonghui, PANG Zhonghe, CHENG Yuanzhi, et al. The development and outlook of the deep aquifer thermal energy storage (deep-ATES)[J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(1): 17-24.
- [5] HARRY M, DOMINIC O, DANIEL F, et al. A review of thermal energy storage technologies for seasonal loops[J]. *Energy*, 2022, 239: 122207.  
MAHON H, O'CONNOR D, FRIEDRICH D, et al. A review of thermal energy storage technologies for seasonal loops[J]. *Energy*, 2022, 239: 122207.
- [6] 周宇坤,骆祖江,郭华.基于热平衡原理的地理管地源热泵系统开发利用规划评价[J]. *中国煤炭地质*, 2024, 36(8): 42-49.  
ZHOU Yukun, LUO Zujiang, GUO Hua. Development and utilization planning evaluation of ground source heat pump system based on heat balance principle[J]. *Coal Geology of China*, 2024, 36(8): 42-49.
- [7] 王婉丽,段雅娟,张薇,等.基于管控单元的城市尺度浅层地热能开发控制因素及指引导则:以雄安新区起步区为例[J]. *地学前缘*, 2024, 31(6): 158-172.  
WANG Wanli, DUAN Yajuan, ZHANG Wei, et al. Control factors and guidelines for urban-scale shallow geothermal energy development based on control units: An example from Xiongan[J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(6): 158-172.
- [8] 韩朝旭,高千,韩元红,等.中深层U型地热井换热特征及影响因素数值模拟研究[J]. *科学技术与工程*, 2025, 25(15): 6332-6343.  
HAN Zhaoxu, GAO Qian, HAN Yuanhong, et al. Numerical simulation of heat transfer characteristics and influencing factors in middle-deep U-shaped geothermal well[J]. *Science Technology and Engineering*, 2025, 25(15): 6332-6343.
- [9] GREEN S, MCLENNAN J, PANJA P, et al. Geothermal battery energy storage[J]. *Renewable Energy*, 2021, 164: 777-790.
- [10] BURNS E R, BERSHAW J, WILLIAMS C F, et al. Using saline or brackish aquifers as reservoirs for thermal energy storage, with example calculations for direct-use heating in the Portland Basin, Oregon, USA[J]. *Geothermics*, 2020, 88: 101877.
- [11] 李皓东,朱俊宇,王辉,等.兰州彭家坪砂岩型热储地热尾水回灌试验结果分析与启示[J]. *科学技术与工程*, 2025, 25(11): 4438-4447.  
LI Haodong, ZHU Junyu, WANG Hui, et al. Analysis and insights of the experiment results of geothermal tail water reinjection in sandstone-type thermal storage at pengjiaping, Lanzhou[J]. *Science Technology and Engineering*, 2025, 25(11): 4438-4447.
- [12] 饶松,罗洋,张英,等.岩溶热储地下水对流活动聚热效应的影响因素研究:以冀中坳陷为例[J]. *地球物理学报*, 2025, 68(6): 2262-2275.  
RAO Song, LUO Yang, ZHANG Ying, et al. Research on the influencing factors of the heat accumulation effect of groundwater convective activities in karst geothermal reservoir: An example from Jizhong Depression[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2025, 68(6): 2262-2275.
- [13] 杨金鹏,郑永香,王伟,等.含水层储层多能互补系统的采热效果数值模拟分析[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2024, 41(5): 85-94.  
YANG Jinpeng, ZHENG Yongxiang, WANG Wei, et al. Numerical simulation analysis of thermal recovery effect of multi energy complementary system in aquifer reservoirs[J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2024, 41(5): 85-94.
- [14] 芮振华,刘月亮,张政,等.地热储能技术研究进展及未来展望[J]. *石油科学通报*, 2024, 9(2): 260-281.  
RUI Zhenhua, LIU Yuefang, ZHANG Zheng, et al. Research progress and prospect of geothermal energy storage technology[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2024, 9(2): 260-281.
- [15] WANG Y N, ZHANG J Y, ZHAN H B. Analysis of the impact of confining layers on aquifer thermal energy storage (ATES) systems with a horizontal well doublet[J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 662:

- 133896.
- [16] 李嘉龙, 康凤新, 杨亚宾, 等. 砂岩热储地热能对井采灌温度场演变规律与响应机制和恢复能力[J]. 地质学报, 2025, 99(2): 568-587.
- LI Jialong, KANG Fengxin, YANG Yabin, et al. Temperature field evolution rule, response mechanism and recovery ability of a production-reinjection doublet system in sandstone geothermal reservoirs[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2025, 99(2): 568-587.
- [17] OHAGEN M, KOCH M, SCHOLLIERS N, et al. Managing high groundwater velocities in aquifer thermal energy storage systems: A three-well conceptual model[J]. *Energies*, 2025, 18(16): 4308.
- [18] 黄永辉, 杨俊生, 朱传庆, 等. 深部含水层储热系统的数值模拟研究[J]. 地球学报, 2023, 44(1): 239-247.
- HUANG Yonghui, YANG Junsheng, ZHU Chuanqing, et al. Numerical modeling of the high-temperature thermal energy storage system in deep aquifers[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2023, 44(1): 239-247.
- [19] ZEGHICI R M, OUDE ESSINK G H P, HARTOG N, et al. Integrated assessment of variable density - viscosity groundwater flow for a high temperature mono-well aquifer thermal energy storage (HT-ATES) system in a geothermal reservoir[J]. *Geothermics*, 2015, 55: 58-68.
- [20] SHELDON H A, WILKINS A, GREEN C P. Recovery efficiency in high-temperature aquifer thermal energy storage systems[J]. *Geothermics*, 2021, 96: 102173.
- [21] COLLIGNON M, KLEMETSDAL Ø S, MØYNER O, et al. Evaluating thermal losses and storage capacity in high-temperature aquifer thermal energy storage (HT-ATES) systems with well operating limits: Insights from a study-case in the Greater Geneva Basin, Switzerland[J]. *Geothermics*, 2020, 85: 101773.
- [22] LI G S, JI J Y, SONG X Z, et al. Research advances in multi-field coupling model for geothermal reservoir heat extraction[J]. *Energy Reviews*, 2022, 1(2): 100009.
- [23] ZHOU D, TATOMIR A, GAO H H, et al. Analysis of high-temperature aquifer thermal energy storage system performances with heterogeneous permeability distribution, insights from a case study in Burgwedel, Germany[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 120: 116467.
- [24] 苏小飞, 杨忠彦, 董路飞, 等. 天津地区地热定向井钻井工艺优化及应用[J]. 钻探工程, 2024, 51(S1): 392-397.
- SU Xiaofei, YANG Zhongyan, DONG Lufei, et al. Drilling technology optimization and application for geothermal directional wells in Tianjin[J]. *Drilling Engineering*, 2024, 51(S1): 392-397.
- [25] 杨忠彦, 任鸿飞, 林圣明, 等. 基于同井双目的层地热勘探井井身结构设计与实践[J]. 钻探工程, 2022, 49(6): 162-168.
- YANG Zhongyan, REN Hongfei, LIN Shengming, et al. Geothermal exploration well structure design and drilling for two geothermal reservoirs[J]. *Drilling Engineering*, 2022, 49(6): 162-168.
- [26] 李延河, 万志军, 于振子, 等. 平顶山矿区地热地质条件及其成因分析[J]. 地球物理学进展, 2023, 38(2): 551-561.
- LI Yanhe, WAN Zhijun, YU Zhenzi, et al. Analysis of geothermal geological conditions and its genesis in Pingdingshan mining area[J]. *Progress in Geophysics*, 2023, 38(2): 551-561.
- [27] 林乃山. 宁波地区地层温度的原位测试分析[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(2): 543-548, 588.
- LIN Naishan. *In-situ* observation of the stratum temperature in Ningbo area[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(2): 543-548, 588.

(编辑 柳超超)