

文章编号: 1004—5589 (2026) 01—0164—11

贺一倮, 王国文, 张延军. 砂岩热储回灌开采参数优化: 以黑龙江通河县为例 [J]. 世界地质, 2026, 45 (1): 164–174.
DOI: 10.3969/j.issn.1004-5589.2026.01.013.

He Y L, Wang G W, Zhang Y J. Optimization of parameters for sandstone thermal storage reinjection mining: a case study of Tonghe County, Heilongjiang [J]. World Geology, 2026, 45 (1): 164–174. DOI: 10.3969/j.issn.1004-5589.2026.01.013.

砂岩热储回灌开采参数优化: 以黑龙江通河县为例

贺一倮¹, 王国文^{2*}, 张延军¹

1. 吉林大学 建设工程学院, 吉林 长春 130026;
2. 黑龙江省地质科学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150000

摘要: 为了实现地热资源的可持续利用, 避免回灌低温尾水导致热突破, 保障地热资源长期稳定地开采, 笔者根据详实的地质勘探和测井资料, 采用热储法系统评估了黑龙江省通河县的地热资源总量和可开采潜力, 在此基础上, 基于 COMSOL Multiphysics 平台构建了考虑地层结构、水热耦合机制和回灌边界条件的三维数值模型, 模型尺寸为 1 600 m × 1 200 m × 500 m, 埋深约 1 400 m, 中部含水热储层厚度为 174 m。通过设置“一注一采”开采模式, 采用周期性采灌运行机制, 设置回灌井与生产井等流量运行, 综合分析不同采灌量及井间距组合方案下的热储层温度场演化规律, 分析了低温扰动锋面的迁移路径及其对生产井温度的影响, 并以生产井温度下降 2 °C 作为热突破判定标准, 进而确定合理的井间距与采灌量。研究结果表明, 黑龙江通河县地区地热资源总储热量约 2.07×10^{18} J, 可开采量折合标准煤 2.17×10^7 t, 地热开发潜力较大; 同时模拟显示, 低温尾水在回灌过程中形成的冷锋随系统运行时间不断向生产井推进, 过小的井间距或过大的采灌量会加剧热干扰并导致热突破, 影响系统运行寿命和换热稳定性, 为确保系统持续稳定运行 100 a 不发生热突破, 不同采灌量对应的最小安全井间距需严格匹配。具体而言, 当采灌量为 30 m³/h 时, 井间距需大于 300 m 才能确保系统在 100 a 运行周期内不发生热突破; 采灌量分别为 40、60、80、100、120 m³/h 时, 所需合理井间距也需相应增大至 350、400、450、500、550 m。

关键词: 地热回灌; 水热耦合; 热突破; 井间距; 数值模拟; 通河县

中图分类号: P314 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1004-5589.2026.01.013

Optimization of parameters for sandstone thermal storage reinjection mining: a case study of Tonghe County, Heilongjiang

He Yiluo¹, Wang Guowen^{2*}, Zhang Yanjun¹

1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China;
2. Geosciences Research Institute of Heilongjiang, Harbin 150000, Heilongjiang, China

Abstract: To achieve the sustainable utilization of geothermal resources, avoid thermal breakthrough caused by low-temperature reinjection water, and ensure its long-term stable exploitation, the authors systematically evaluate the

收稿日期/Received: 2025-06-30; 修订日期/Revised: 2025-08-20; 出版日期/Published: 2026-02-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42172274)

第一作者: 贺一倮 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事能源岩土研究。E-mail: heyl3796@163.com

* 通信作者: 王国文 (1973—), 男, 正高级工程师, 主要从事地热资源勘查研究。E-mail: wangguowen3911@163.com

© Editorial Office of World Geology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

total reserves and exploitable potential of geothermal resources in Tonghe County, Heilongjiang rely on comprehensive geological exploration and well-logging data using the heat storage method. On this basis, a three-dimensional numerical model was constructed on the COMSOL Multiphysics platform, incorporating stratigraphic structure, hydrothermal coupling mechanisms, and reinjection boundary conditions. The model dimensions are $1\ 600\ \text{m} \times 1\ 200\ \text{m} \times 500\ \text{m}$, with a burial depth of approximately $1\ 400\ \text{m}$, and the central aquifer-type reservoir has a thickness of $174\ \text{m}$. An exploitation mode of “one injection-one production” was adopted, combined with a cyclic injection-production operation scheme, in which reinjection and production wells operated at equal flow rates. The evolution regularity of the reservoir temperature field under different combinations of production and reinjection rate and well spacing was comprehensively analyzed. The migration path of the cold-water front and its impact on production well temperature were examined, with a temperature drop of $2\ ^\circ\text{C}$ at the production well defined as the criterion for thermal breakthrough, thereby determining reasonable parameters for well spacing and production and reinjection rate. The results show that the total geothermal heat storage in Tonghe County is approximately $2.07 \times 10^{18}\ \text{J}$, with exploitable resources equivalent to $2.17 \times 10^7\ \text{t}$ of standard coal, indicating significant development potential. The simulations further reveal that the cold front generated by reinjection of low-temperature reinjection water progressively advances toward the production well over operation time. Excessively small well spacing or overly high production and reinjection rate aggravates thermal interference and induces premature thermal breakthrough, thereby reducing system service life and heat exchange stability. To ensure 100 years of continuous operation without thermal break-through, the minimum safe well spacing must be strictly matched with the production and reinjection rate. Specifically, when the rate is $30\ \text{m}^3/\text{h}$, the well spacing must exceed $300\ \text{m}$, and for rates of $40, 60, 80, 100,$ and $120\ \text{m}^3/\text{h}$, the required well spacing should increase correspondingly to $350, 400, 450, 500,$ and $550\ \text{m}$, respectively.

Keywords: geothermal reinjection; hydrothermal coupling; thermal breakthrough; well spacing; numerical simulation; Tonghe County

0 引言

随着经济全球化快速发展, 能源短缺与环境污染问题日益凸显。在全球能源转型的紧迫形势下, 化石燃料主导的不可再生能源体系正引发深重危机。2024 年《世界能源统计年鉴》^[1] 数据显示, 2023 年化石能源占全球一次能源消费比例高达 81.5% , 推动碳排放量升至 $422\ \text{亿 t}$, 达到历史峰值。

地热能作为地球内部蕴藏的丰富热力资源, 是 21 世纪全球能源转型中极具战略价值的可再生能源。数据显示, 全球地热能资源总量约 $1.25 \times 10^{27}\ \text{J}$ (折合 $4.27 \times 10^{16}\ \text{t}$ 标准煤), 其中埋深 $5\ 500\ \text{m}$ 以浅的资源量约为 $3.14 \times 10^{24}\ \text{J}$ (折合 $1.06 \times 10^{14}\ \text{t}$ 标准煤)^[2]。中国水热型地热能资源总量相当于 2015 年全国能源消耗总量的 44% , 开发潜力巨大^[3-4]。根据地热储层特征, 地热能主要分为干热岩型和水热型。干热岩通常埋藏于地下深处, 储层

温度高, 当前热能资源开采仍面临技术挑战和成本压力^[5-6]; 水热型地热资源则利用地下热水进行开发, 虽温度相对较低, 但技术较为成熟, 成本效益更佳^[7-8]。地热回灌对提高地热资源利用率、减少尾水排放、维持地热储层压力和实现地热资源的可持续利用具有重要作用^[9]。然而, 地热回灌的尾水温度远低于储层温度, 不可避免地会导致储层温度降低。随着生产井温度的降低, 地热资源的利用率也迅速下降, 直到失去开采价值^[10-11]。因此, 研究地热尾水回灌引起的储层温度演变具有重要意义。

针对地热回灌问题, 雷海燕等^[12] 采用数学模型与数值模拟相结合的方法, 研究了回灌速率对热储层温度和压力场的影响。李嘉龙等^[13-14] 监测了井段全程的温度、温度梯度及地热升温速率, 通过定性分析与定量计算, 明确了砂岩热储层回灌井温度恢复的主要热源为外围高温地层的热传导及地热水流。Sayantan 等^[15] 提出了描述冷水注入时地热

储层瞬态温度分布的解析解,并探究了不同回灌速率、热导率及孔隙度对瞬态传热的影响,结果表明回灌速率和热导率对瞬态温度分布具有明显影响。Sippel等^[16]利用数值模拟建立了柏林地区热储模型,分析了储层结构、孔隙度和渗透率对生产井热突破的影响。Franco等^[17]定性评估了流速、采灌井间距、回注温度及储层几何形态在地热系统全生命周期中的重要性。

中国最早的地热回灌研究始于北京东南部地热田,自1974年起,当地开展了多次回灌试验。以小汤山项目为例,截至2016年累计回注量达1 322 700 m³,占区域开采量的56.6%,近年地下水位明显回升,回灌效果良好^[18]。2012年,天津地热勘查开发设计院在武清区观陶组应用定向钻井与射孔完井技术,建成一对地热采灌井,最大回灌率达120 m³/h,效果良好^[19]。2016年,在德州市实施地热尾水回灌工程,开展多年连续测温观察,结果表明回灌初期热对流主导温度恢复,随着时间增加,冷水影响范围扩大,热对流作用减弱,地温恢复速率降低^[20]。2021年,山东省地矿局在惠民县开展砂岩热储地热尾水回灌试验,依次进行自然回灌及加压回灌,稳定回灌量最高达73 m³/h,验证了该区地热尾水同层回灌的可行性与良好渗透性^[21]。2025年,兰州市七里河区实施了首次砂岩型热储地热尾水回灌试验,开展了不同流量(15~28 m³/h)和不同压力(0.1~0.6 MPa)的梯级自然与加压回灌实验,建立了适用于该区的尾水回灌技术工艺流程^[22]。

笔者基于哈尔滨市通河县地区勘探资料,开展地热井采灌条件下温度场动态响应研究。分析不同采灌工况下温度场随时间演化规律,评估研究区地热井长期开采及可持续供暖能力,明确水热型地热资源开采潜力,为地热开采长期稳定运行提供理论支撑。

1 研究区地质特征

1.1 区域地质背景

通河县位于黑龙江省中部,小兴安岭南麓,松花江中游北岸。勘查区面积91.71 km²(地理坐标:45°54′00″~46°00′15″N,128°52′00″~129°00′00″E)。

根据区域地质图(图1)及探采井钻孔柱状图

(图2),该探采井揭示的地层自上而下依次为:新生界第四系上更新统顾乡屯组(Q_{3g})、新近系中新统富锦组(N_{1f})、古近系渐新统宝泉岭组二段(E_{3b₂})及一段(E_{3b₁})。

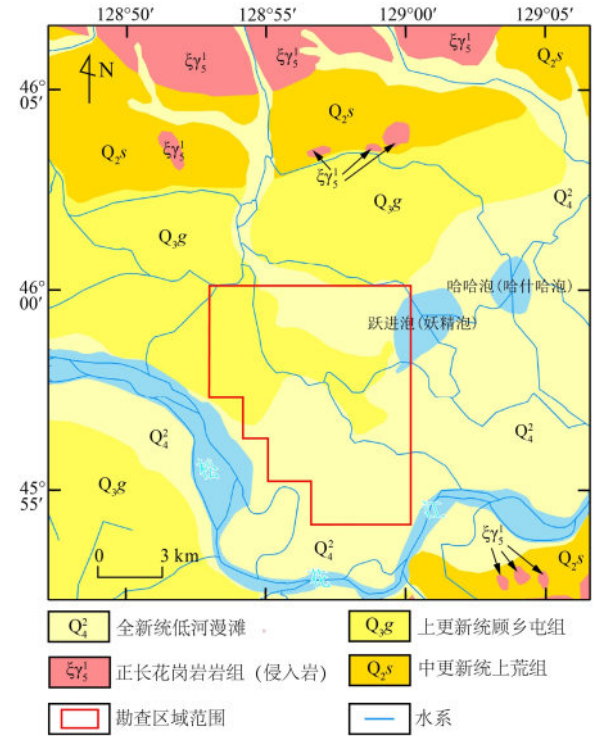


图1 通河县勘查区域地质图

Fig.1 Geological map of Tonghe County exploration area

(1) 第四系上更新统顾乡屯组(Q_{3g})

据完井报告显示该组厚度为16 m。区域资料表明周边第四系埋深约15 m,本井与之相符。岩性上部为黄褐色黄土状粉质黏土,下部为黄褐色、灰色含砾石粗砂;砂粒由长石、石英组成。

(2) 新近系富锦组(N_{1f})

岩性为绿灰色泥岩与灰、杂色砂质砾岩不等厚互层。顶板埋深为46.0~56.0 m,底板埋深为664.5~736.5 m,厚度为618.5~680.5 m。该组为弱氧化-弱还原环境下的冲积扇相沉积,与下伏宝泉岭组呈不整合接触。

(3) 古近系渐新统宝泉岭组(E_{3b})

① 渐新统宝泉岭组二段(E_{3b₂})

上部为绿灰色泥岩、粉砂质泥岩与灰色砂质砾岩不等厚互层;下部为灰色砂质砾岩夹深灰色泥岩。顶板埋深为664.5~736.5 m,底板埋深为1 471.0~1 574.1 m,厚度为785.5~806.5 m。该

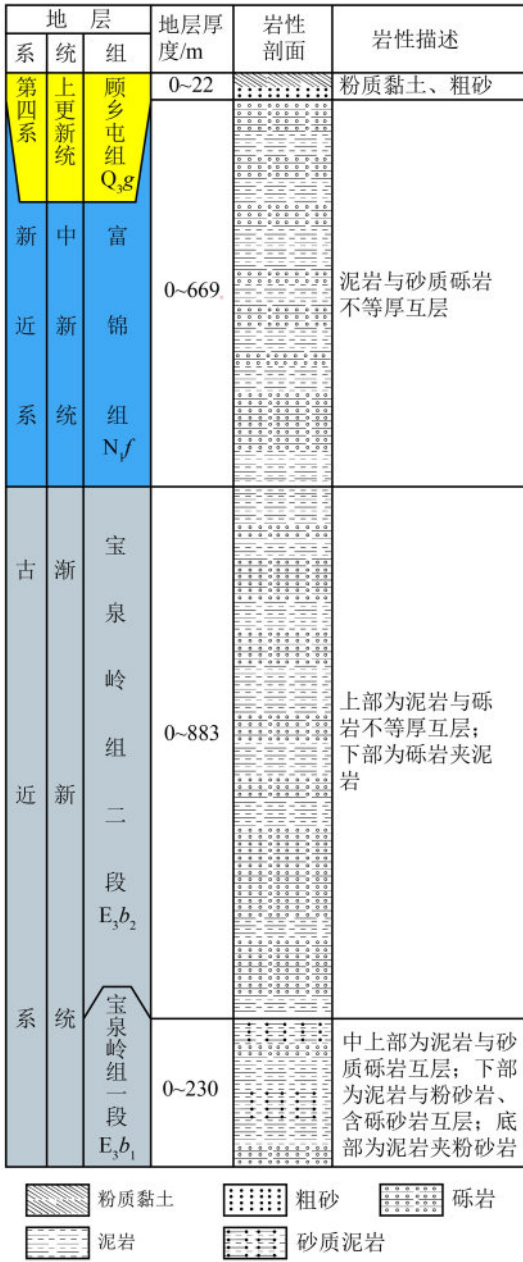


图 2 探采井钻孔柱状图

Fig. 2 Drilling column of exploration and mining wells

段为还原环境下的深水扇相沉积。

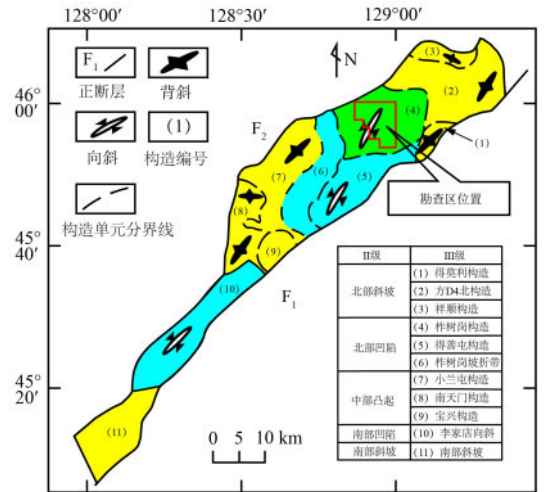
② 渐新统宝泉岭组一段 (E_{3b1})

中上部为深灰色泥岩、粉砂质泥岩与灰色砂质砾岩不等厚互层, 偶见灰色泥质粉砂岩、粉砂岩; 下部为黑灰色泥岩、粉砂质泥岩与灰色泥质粉砂岩、粉砂岩、含砾砂岩不等厚互层; 底部为灰黑色泥岩、粉砂质泥岩夹薄层灰色泥质粉砂岩。顶板埋深为 1 471.0 ~ 1 574.1 m, 底板埋深为 2 757.5 ~

2 846.5 m, 厚度为 1 235.5 ~ 1 375.5 m。该段属还原环境下的深水扇-半深湖相沉积。

1.2 构造特征

勘查区位于方正断陷盆地内 (图 3), 该盆地属依舒地堑的次一级构造单元。依舒地堑地处黑龙江省中部, 是中新生代形成的断陷盆地, 为郯庐大断裂北延部分的分支。该地堑呈北东—南西向展布, 形态狭长, 在黑龙江省境内长约 90 km, 平均宽度 20 ~ 26 km, 总面积约 6 480 km²。依据黑龙江省深部构造分区, 依舒地堑位于嘉荫—舒兰莫霍面深度陡变带上, 莫霍面埋深 33 ~ 34 km。方正断陷作为依舒地堑的次一级构造单元, 位于地堑中北部, 受控于东西两侧的巨大断裂 F1 和 F2, 表现为北东走向的双断式槽状断陷。构成该断陷格架的断裂构造将盆地由南向北划分为 5 个二级构造单元, 并进一步细分为 11 个三级构造。勘查区即位于北部的凹陷单元柞树岗向斜内。



据文献 [23] 修改。

图 3 方正断陷构造单元划分图

Fig. 3 Structural units division of Fangzheng Fault Depression

1.3 热储层特征

研究区位于依舒地堑方正断陷的柞树岗向斜内, 沉积了巨厚的古近系宝泉岭组粉砂岩、砂质砾岩及泥岩, 为地热储层提供了良好的保温条件; 深大断裂构成深部热量的传导通道, 导致地温呈现相对高值。测井资料表明, 井底 1 800 m 处地温为 59.76 °C, 平均地温梯度约为 3.32 °C/100 m, 属

正常增温型。热储层顶板埋深 1 574.1 m，底板埋深 1 792.4 m，总厚度 174.7 m。该热储层主要赋存于古近系渐新统宝泉岭组一段 (E_3b_1)，岩性以灰绿色泥岩、粉砂质泥岩与泥质粗砂岩、粗砂岩、砾岩的不等厚互层为主。热储层顶板地温 54.28 °C，底板地温 59.64 °C，平均地温 56.96 °C。热储层孔隙度最大值为 21.80%，最小值为 20.00%，平均值为 20.96%；渗透率最大值为 $1\ 105.00 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，最小值为 $747.50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均值为 $901.33 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

1.4 水文地球化学特征

采取了地热井地热流体同位素化学分析样品，进行稳定同位素 (^2H 、 ^{18}O) 和放射性同位素 (C_{14}) 分析。结果显示含氡量 < 1 TU，表明其为 1956 年前降水补给的古老地下水， C^{14} 年龄大于 20.62 ka，从当地降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 相关关系图 (图 4) 上可以看出，水样点位于全球降水线附近，说明地下水补给来自大气降水。

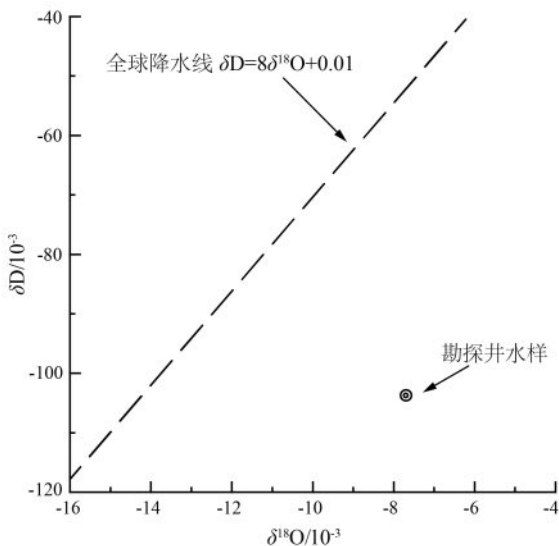


图 4 勘探井地热流体与大气降水 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 关系

Fig. 4 Relationship between $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ of geothermal fluid in exploration wells and atmospheric precipitation

在井降压试验结束后，采取了水质全分析水样，分析结果显示，地热流体 pH 值为 8.5，呈弱碱性；阴离子以 HCO_3^- 为主 (摩尔分数为 188.37 mg/L)，阳离子以 Na^+ 为主 (摩尔分数为 77.25 mg/L)；矿

化度 310.24 mg/L，总硬度 6.93 mg/L，水化学类型为 HCO_3-Na 型。

2 地热资源及潜力评价

采用热储法对研究区进行地热资源及开采量计算，公式如下：

$$Q = Q_r + Q_w \quad (1)$$

$$Q_r = AM\rho_r c_r (1 - \varphi)(t_r - t_0) \quad (2)$$

$$Q_L = Q_1 + Q_2 \quad (3)$$

$$Q_1 = A\varphi M \quad (4)$$

$$Q_2 = ASH \quad (5)$$

$$Q_w = Q_L c_w \rho_w (t_r - t_0) \quad (6)$$

式中： Q 为热储中储存的热量 (J)； Q_r 为岩石中储存的热量 (J)； Q_w 为水中储存的热量 (J)； Q_L 为热储中储存的水量 (m^3)； Q_1 为截至计算时刻，热储孔隙中热水的静储量 (m^3)； Q_2 为水位降低到目前取水能力极限深度时，热储释放的水量 (m^3)； A 为计算区面积 (m^2)； M 为热储层厚度 (m)； ρ_r 、 ρ_w 分别为热储岩石密度和地热水密度 (kg/m^3)； c_r 、 c_w 分别为热储岩石和水的比热容 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$]； φ 为热储岩石的孔隙率 (%)， t_r 、 t_0 分别为热储温度和当地年平均气温 ($^\circ\text{C}$)； S 为弹性释水系数； H 为计算热储起始点以上水头高度 (m)。

根据勘查区范围、地质及物探资料，确定计算区面积 A 、计算热储起始点以上水头高度 H 和当地年平均气温 t_0 ；依据钻探编录及测井资料，确定了热储层厚度 M 和热储温度 t_r ；孔隙度 φ 依据砂岩样品物理力学测试报告取值；结合完井抽水试验资料，利用标准曲线法计算确定弹性释水系数 S ；砂岩的比热容 c_r 、密度 ρ_r 和水的比热容 c_w 、密度 ρ_w 依据《地热资源评价方法及估算规程：DZ/T 0331—2020》^[24] 和研究区热储层实际情况取值 (表 1)。

经过计算，研究区岩石中储存的热量为 1.27×10^{18} J，水中储存的热量为 7.98×10^{17} J，热储中储存

的总热量为 2.07×10^{18} J, 折合标准煤 7.07×10^7 t; 可开采量为 0.91×10^{17} J, 折合标准煤 2.17×10^7 t, 相应可减少 CO_2 排放 5.18×10^7 t。根据地热田规模分级方法, 确定研究区为中型中、低温地热田, 开发潜力较大。

表 1 地热资源量计算参数

Table 1 Calculation parameters for geothermal resource quantity

计算参数	取值
计算区面积/ km^2	74.82
热储层厚度/m	174.70
热储岩石密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 600
热储岩石比热容/ $[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$	878
热储岩石的孔隙度/%	20.96
热储温度/ $^\circ\text{C}$	56.96
当地年平均气温/ $^\circ\text{C}$	3.16
地热水密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 000
弹性释水系数	0.007 2
计算热储起始点以上水头高度/m	150
水的比热容/ $[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$	4 180

3 模型构建与参数化

3.1 地热回灌传热模型

本文采用 COMSOL 有限元软件, 建立了“一注一采”回灌模式在水热耦合条件下的传热数值模型。研究区域尺寸大小选定为 $(1\ 600 \times 1\ 200 \times 500)$ m, 埋深为 1 400 m, 上部弱透水层厚 174 m, 中部含水热储层厚 174 m, 下部弱透水层厚 152 m, 在中部含水热储层中设置一个回灌井筒和一个生产井筒。对模型进行网格划分, 当网格数量超过 60 000 后, 产出水温度趋于稳定, 基本维持在 $35.5\ ^\circ\text{C}$, 考虑到计算效率和精度, 最终将网格数量控制在 65 755, 网格划分模型如图 5 所示。

3.2 数学模型

储层被视为各向同性、均质的饱和多孔介质, 其孔隙中完全被流体填充。传热过程同时考虑了热传导和热对流两种方式, 并通过骨架与流体的热量交换体现固液两相间的热平衡。

在饱和多孔介质中, 地下水流动可由质量守恒方程与达西定律共同控制。

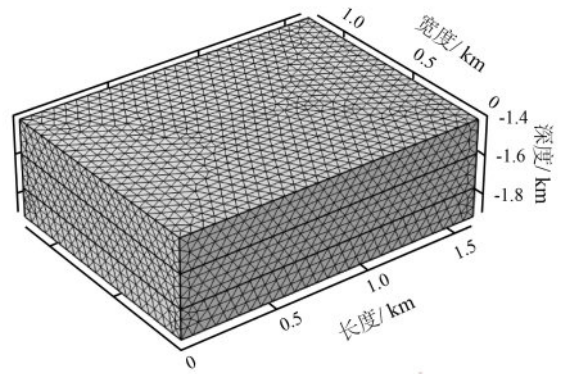


图 5 数值模型网格剖分图

Fig. 5 Mesh subdivision diagram of numerical model

质量守恒方程:

$$\nabla \cdot (\rho u) = Q_m \quad (7)$$

式中: ∇ 为梯度/散度算子; ρ 为流体密度 (kg/m^3); u 为达西速度 (矢量) (m/s); Q_m 为质量源汇项 [$\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$].

达西定律:

$$u = -\frac{\chi}{\mu} \nabla p \quad (8)$$

式中: χ 为介质渗透率 (m^2); μ 为流体动力黏度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$); p 为孔隙流体压力 (Pa)。

由于骨架与流体之间存在热交换, 整体系统的能量守恒表达为:

$$(\rho C_p)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f C_{p,f} u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) \quad (9)$$

式中: $(\rho C_p)_{\text{eff}}$ 为常压有效体积热容 [$\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$]; T 为流体温度 (K); t 为时间 (s); ρ_f 为流体密度 (kg/m^3); $C_{p,f}$ 为流体比热容 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]; u 为达西速度 (矢量) (m/s); k_{eff} 为多孔介质的有效导热系数。

3.3 初始边界条件

研究区供暖周期约为每年 10 月 20 日至次年 4 月 20 日, 模型采用周期性采灌模式: 每年实施 6 个月地热开采, 随后进入 6 个月停采期以实现井底温度恢复。选取定流模式开采, 回灌井与生产井等流量运行, 回灌比为 100%。由于盖层和基岩的低渗特性, 模型上下界面设定为无流动边界, 模型四

周界面为流动边界。

根据《砂岩热储地热尾水回灌技术规程：DZ/T 0330—2019》^[25]，热泵利用后的供暖尾水温度一般为 25 ℃，因此回灌水温度维持 25 ℃ 不变。储层初始温度场沿垂向呈线性分布，以深度 400 m 处 (23.98 ℃) 为起点，按地温梯度 3 ℃/100 m 向下递增，模型上下界面设定为绝热边界，侧向边界采用热稳态边界条件，其温度参数与热储层初始温度场保持一致性。围岩区域不与低温流体直接换热，仅对热储层起到热补偿作用，其外边界设置为绝热边界条件。

3.4 模型验证

通过对比模型模拟的地表出水温度与现场抽水试验结果，验证回灌传热模型的准确性，试验模型参数如表 2 所示。

表 2 模型参数及取值

Table 2 Model parameters and values

参数	取值
岩石密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 600
孔隙度/%	20.96
渗透率/($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	901
导热系数/[$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]	2.596
比热容/[$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$]	878
抽水水量/($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	2.27
时间/h	48
模型尺寸/m	1 600 × 1 200 × 500

首次抽水试验稳定后出水口温度在 35.0 ℃，模拟与抽水试验结果对比如图 6 所示。稳定后抽水试验温度为 35.0 ℃，模型模拟温度为 35.5 ℃，二者出水温度的变化趋势一致，误差为 1.4%，因此认为该回灌传热模型与现场实际情况基本相符，能够用来开展对研究区开采方案的研究。

3.5 开采方案设计

在回灌井和生产井构成的流体循环回路中，低温回灌流体沿储层高渗通道快速迁移至生产井，导致产出流体的温度快速且不可逆转地下降，这种现象称为热突破。热突破会导致生产井产出温度骤降、系统寿命缩短等不利情况。本文将热储层生产井位置温度下降 2 ℃ 视为发生热突破，为了避免在 100 a 的供暖周期中发生热突破，需要制定合适的采灌量以及井间距方案。为了探究采灌量 L 对生产

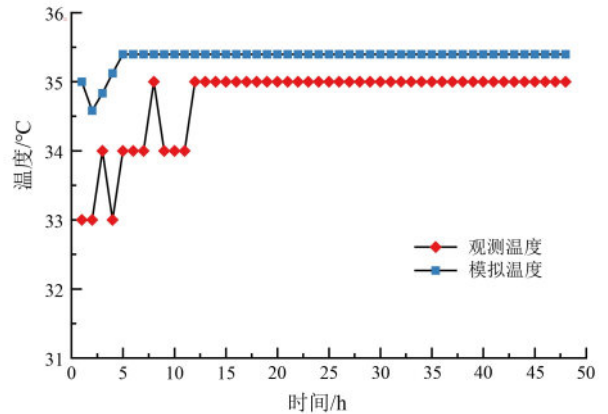


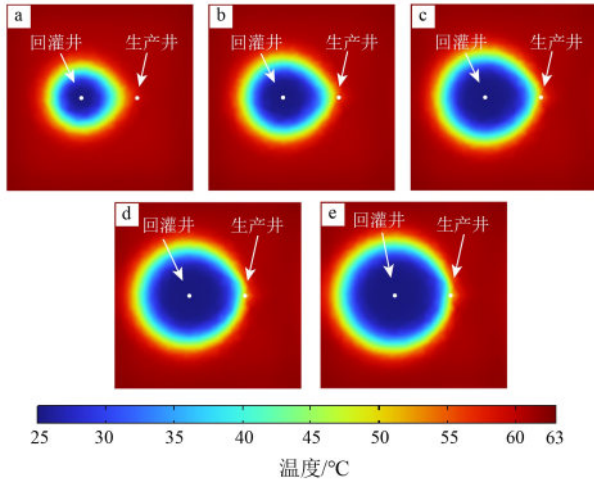
图 6 数值模拟与抽水试验对比

Fig. 6 Comparison between numerical simulation and pumping test

井温度的影响，将井间距设置为 300 m，生产井流量分别设置为 30、50、70、90 和 110 m^3/h ，在 100% 尾水回灌条件下，监测水热运移过程中储层温度演化，绘制 100 年后储层的温度云图，结果如图 7 所示。

回灌尾水形成的低温扰动锋面随运行时间逐渐向生产井扩展。采灌量为 30 m^3/h 时，生产井温度降幅小于 2 ℃（未达热突破阈值），受低温影响轻微；当采灌量由 30 m^3/h 增至 110 m^3/h ，生产井温度降幅持续增大，至 110 m^3/h 时降温超 15 ℃，呈现明显的热干扰特征。热突破发展过程呈现阶段性演化规律：锋面迁移阶段，低温扰动区未抵达生产井时，截面呈不规则椭圆状，采灌井间低温尾水与围岩热交换时间不足，导致储层温度降低；热突破临界阶段，低温锋面抵达生产井后，井周热扩散受阻，局部冷堆积现象严重造成生产井温度下降；系统失效阶段，随采灌量提升，百年运行期生产井降温加剧；当低温扰动区到达生产井位置时，扰动区不再继续扩散，此时采灌系统已经失去开采价值。为避免百年运行期内发生热突破，需实现采灌量与井间距的协同优化。

为了探究井间距 H 对生产井温度的影响，固定采灌流量为 20 m^3/h ，设置井间距梯度为 100、150、200、250 和 300 m，在 100% 回灌供暖尾水的条件下，模拟尾水注入热储层后的水热运移过程及温度场演化，绘制 100 年后储层的温度云图，结果如图 8 所示。



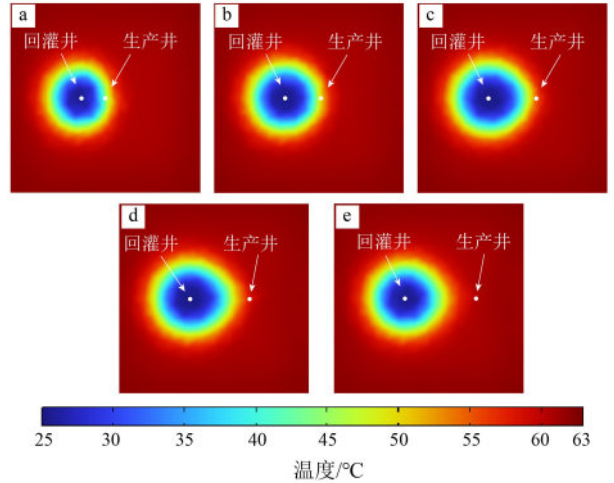
a. $L = 30 \text{ m}^3/\text{h}$; b. $L = 50 \text{ m}^3/\text{h}$; c. $L = 70 \text{ m}^3/\text{h}$; d. $L = 90 \text{ m}^3/\text{h}$;
e. $L = 110 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

图 7 井间距 H 为 300 m 时, 不同采灌量下采灌井温度场变化预测图

Fig. 7 Prediction of temperature field changes in irrigation wells at different production and reinjection rate when well spacing H is 300 m

当井间距为 100 m 时, 生产井降温达 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 呈现严重低温干扰; 当井间距从 100 m 逐渐增加至 300 m 的过程中, 生产井处的温度逐步升高, 当井间距为 300 m 时, 生产井处的温度变化很小, 未发生热突破, 受低温尾水影响很小。随着井间距的增加, 运行周期内生产井受低温尾水回灌的影响逐渐减小, 为保证 100 a 内不发生热突破现象, 需要设置足够的井间距。

根据上述结果分析, 结合现场实测最大抽水流量为 $83 \text{ m}^3/\text{h}$, 设计 30 组采灌量-井间距配比方案 (表 3), 系统研究不同采灌量和井间距条件下的水热运移响应机制, 分析预测温度演化趋势并进行方案优化, 结果如图 9 所示。开采初期不同工况出水温度变化趋势相似, 均表现出一定程度的温降特征, 但随着运行时间的增加, 各工况下的温度响应逐渐出现差异。在相同采灌量下 (以 $L = 30 \text{ m}^3/\text{h}$ 为例), 较小井间距 (如 150 m) 导致热干扰加剧, 开采井温度下降迅速且恢复缓慢, 系统仅运行 17 a 即发生热突破, 随着井间距增大至 250 m, 热突破时间延后至 51 a, 温度降低幅度和速率均减小; 当井间距进一步增至 300 m 时, 系统运行 100 a 后仍



a. $H = 100 \text{ m}$; b. $H = 150 \text{ m}$; c. $H = 200 \text{ m}$; d. $H = 250 \text{ m}$;
e. $H = 300 \text{ m}$ 。

图 8 采灌量 L 为 $20 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 不同井间距下采灌井温度场变化预测图

Fig. 8 Prediction of temperature field changes in irrigation wells with different spacing when production and reinjection rate L is $20 \text{ m}^3/\text{h}$

表 3 采灌模拟方案设计

Table 3 Design of irrigation simulation scheme

方案	开采条件		方案	开采条件	
	采灌量 $L/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	井间距 H/m		采灌量 $L/$ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	井间距 H/m
1	30	150	16	80	300
2	30	200	17	80	350
3	30	250	18	80	400
4	30	300	19	80	450
5	30	350	20	80	500
6	40	200	21	100	350
7	40	250	22	100	400
8	40	300	23	100	450
9	40	350	24	100	500
10	40	400	25	100	550
11	60	250	26	120	400
12	60	300	27	120	450
13	60	350	28	120	500
14	60	400	29	120	550
15	60	450	30	120	600

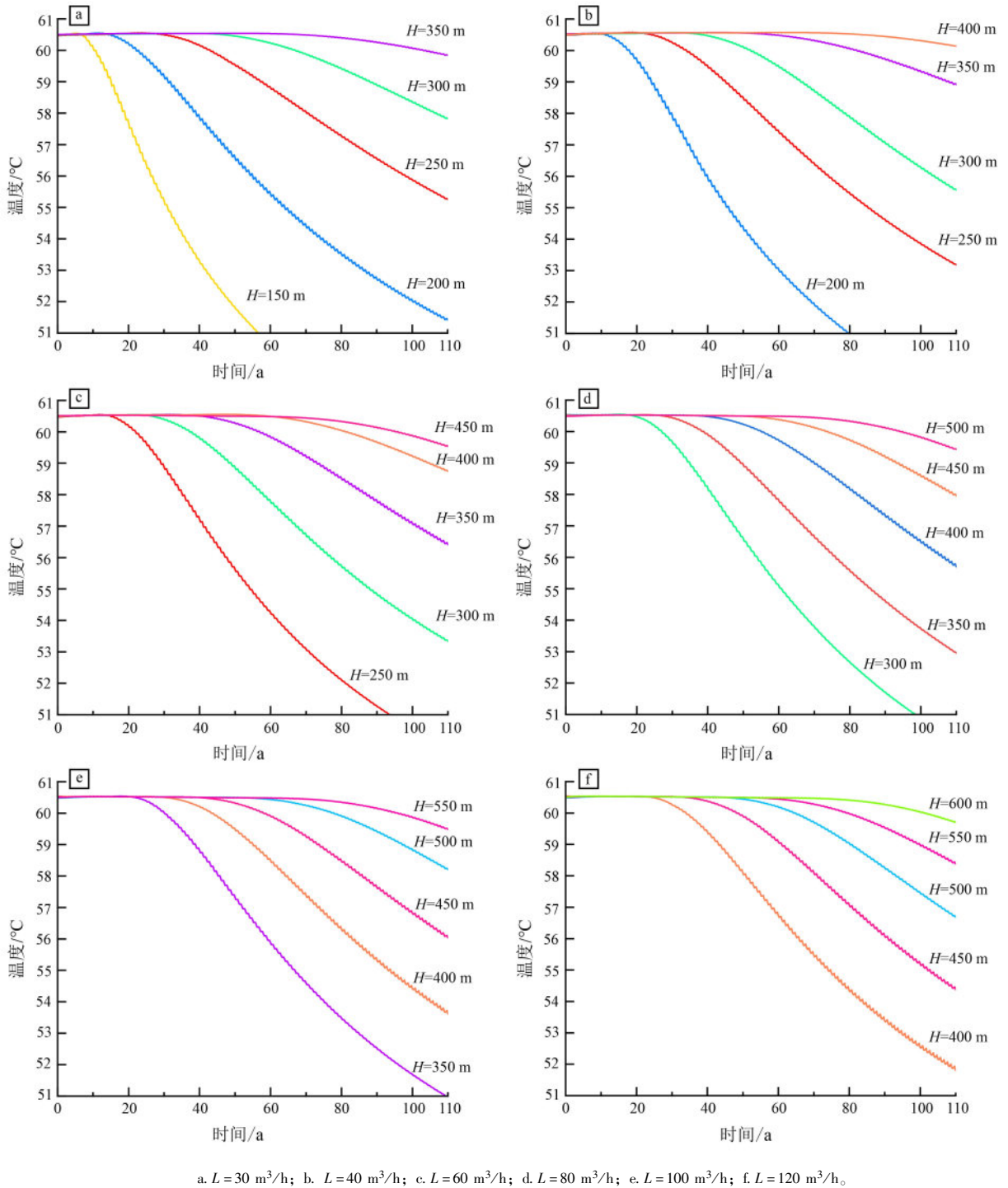


图9 不同开采条件下生产井温度变化预测图

Fig. 9 Prediction of temperature changes in production wells under different mining conditions

未发生热突破,表明增大井间距能有效提升系统整体换热能力并延缓热突破发生。在相同井间距下(以 $H = 350 \text{ m}$ 为例),随着采灌量从 $30 \text{ m}^3/\text{h}$ 增加

至 $100 \text{ m}^3/\text{h}$,温度降低速率加快,高流量条件下热能采出速率增大,但热储层的热恢复能力滞后,导致温度衰减加速,因此,流量调控应在保证热采

效率的基础上兼顾热储可持续性。

4 结论

(1) 研究区岩石储存热量为 1.27×10^{18} J, 地下水储存热量为 7.98×10^{17} J, 热储总储存热量为 2.07×10^{18} J (折合标准煤 7.07×10^7 t); 地热资源可开采量为 0.91×10^{17} J (折合标准煤 2.17×10^7 t), 相应可减少 CO_2 排放 5.18×10^7 t, 表明该区地热资源开发潜力较大。

(2) 回灌低温尾水的冷锋影响范围随系统运行持续扩展, 最终可波及生产井区域。过小的采灌井间距将降低系统整体换热效率, 导致热突破时间明显提前。为维持系统长期稳定运行, 采灌量增大时, 需要相应增加井间距。

(3) 采灌量为 $30 \text{ m}^3/\text{h}$, 井间距大于 300 m 才可保证系统运行 100 a 不发生热突破; 采灌量为 40、60、80、100 和 $120 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 100 a 内不发生热突破的合理井间距为 350、400、450、500 和 550 m。不同条件下的合理井间距为地热资源的可持续开采提供了科学依据。

参考文献:

[1] 英荷壳牌石油公司. 世界能源统计年鉴 [EB/OL]. [2024-08-26]. <https://kpmg.com/cn/zh/home/insights/2024/08/statistical-review-of-world-energy-2024.html>.
Royal Dutch Shell. Statistical review of world energy [EB/OL]. [2024-08-26]. <https://kpmg.com/cn/zh/home/insights/2024/08/statistical-review-of-world-energy-2024.html>.

[2] 自然资源部中国地质调查局. 中国地热能发展报告 (2018) [EB/OL]. [2024-09-11]. <http://www.cgs.gov.cn>.
China Geological Survey, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. China's geothermal energy development report (2018) [EB/OL]. [2024-09-11]. <http://www.cgs.gov.cn>.

[3] 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 等. 中国地热资源现状及发展趋势 [J]. 地学前缘, 2020, 27 (1): 1-9.
Wang G L, Liu Y G, Zhu X, et al. Current status and development trends of geothermal resources in China [J]. *Frontiers in Geosciences*, 2020, 27 (1): 1-9.

[4] 李德, 郭妙连. 中国地热资源现状与未来发展趋势 [J]. 化工设计通讯, 2021, 47 (5): 149-150.

Li D, Guo M L. Current status and future development trends of geothermal resources in China [J]. *Chemical Design Communication*, 2021, 47 (5): 149-150.

[5] 王贵玲, 陆川. 碳中和目标驱动下地热资源开采利用技术进展 [J]. 地质与资源, 2022, 31 (3): 412-425, 341.
Wang G L, Lu C. Progress in geothermal resource utilization technology driven by carbon neutrality target [J]. *Geology and Resources*, 2022, 31 (3): 412-425, 341.

[6] 王文中, 邵东云, 程新科, 等. 中国浅层和中深层地热能的开发和利用 [J]. 水电与新能源, 2022, 36 (3): 21-25.
Wang W Z, Shao D Y, Cheng X K, et al. Development and utilization of shallow and medium deep geothermal energy in China [J]. *Hydroelectric and New Energy*, 2022, 36 (3): 21-25.

[7] 文冬光, 张二勇, 王贵玲, 等. 干热岩勘查开发进展及展望 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50 (4): 1-13.
Wen D G, Zhang E Y, Wang G L, et al. Progress and prospects of exploration and development of dry hot rocks [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2023, 50 (4): 1-13.

[8] Ma J C, Liu Z, Wang Z, et al. The influence of different mining modes on the heat extraction performance of hydrothermal geothermal energy [J]. *Energies*, 2024, 17 (8): 1922.

[9] Gan H N, Liu Z M, Wang G L, et al. Permeability and porosity changes in sandstone reservoir by geothermal fluid reinjection: insights from a laboratory study [J]. *Water*, 2022, 14 (19): 3131-3149.

[10] Zahratul K, Eyleen K, Zarrouk S J. Reinjection in geothermal fields: an updated worldwide review 2020 [J]. *Geothermics*, 2021 (89): 101970.

[11] Wang X, Zhou Q G, Liu G Y, et al. Research progress on temperature field evolution of hot reservoirs under low-temperature tailwater reinjection [J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2024, 12 (2): 205-222.

[12] 雷海燕, 朱家玲. 孔隙型地热采灌开发方案的数值模拟研究 [J]. 太阳能学报, 2010, 31 (12): 1633-1638.
Lei H Y, Zhu J L. Numerical simulation study on the development plan of porous geothermal irrigation [J]. *Journal of Solar Energy*, 2010, 31 (12): 1633-1638.

[13] 李嘉龙. 馆陶组砂岩热储采灌条件下地温场演化机

- 制 [D]. 济南: 济南大学, 2024.
- Li J L. Evolution mechanism of geothermal field under thermal storage, production and irrigation conditions of Guantao Formation sandstone [D]. Jinan: Jinan University, 2024.
- [14] 李嘉龙, 康凤新, 白通, 等. 砂岩热储温度场对回灌参数的响应机理与规律 [J]. 地球科学, 2024, 49 (9): 3318-3333.
- Li J L, Kang F X, Bai T, et al. The response mechanism and law of sandstone thermal storage temperature field to recharge parameters [J]. *Earth Science*, 2024, 49 (9): 3318-3333.
- [15] Sayantan G, Mohan M S K. Analytical solutions for transient temperature distribution in a geothermal reservoir due to cold water injection [J]. *Hydrogeology Journal*, 2014, 22 (2): 351-369.
- [16] Sippel J, Fuch S S, Cacace M, et al. Deep 3D thermal modelling for the city of Berlin (Germany) [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70 (8): 3545-3566.
- [17] Franco A, Vaccaro M. Numerical simulation of geothermal reservoirs for the sustainable design of energy plants: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 30: 987-1002.
- [18] 徐巍. 北京小汤山地区地热回灌关键问题的初步研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- Xu W. Preliminary study on key issues of geothermal recharge in Xiaotangshan area, Beijing [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [19] 殷肖肖, 赵苏民, 蔡芸, 等. 近三十年天津市地热大规模开发热储动态特征研究 [J]. 地质学报, 2024, 98 (1): 297-313.
- Yin X X, Zhao S M, Cai Y, et al. Research on the dynamic characteristics of large-scale geothermal development and thermal storage in Tianjin in the past thirty years [J]. *Geological Journal*, 2024, 98 (1): 297-313.
- [20] 刘帅, 刘志涛, 冯守涛, 等. 采暖尾水回灌对砂岩热储地温场的影响: 以鲁北地区为例 [J]. 地质论评, 2021, 67 (5): 1507-1520.
- Liu S, Liu Z T, Feng S T, et al. The influence of heating tail water recharge on the geothermal field of sandstone thermal storage: a case study of Lubei region [J]. *Geological Review*, 2021, 67 (5): 1507-1520.
- [21] 王兆林, 刘苏哲, 纪洪磊, 等. 山东省惠民县淄角地区砂岩热储地热尾水回灌研究 [J]. 山东国土资源, 2023, 39 (3): 72-78.
- Wang Z L, Liu S Z, Ji H L, et al. Research on geothermal tail water recharge of sandstone thermal storage in Zijiao area, Huimin County, Shandong Province [J]. *Shandong Land and Resources*, 2023, 39 (3): 72-78.
- [22] 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 H D, Zhu J Y, Wang H, et al. Analysis and inspiration of experimental results on geothermal tail water recharge of Pengjiaping sandstone thermal storage in Lanzhou [J]. *Science, Technology and Engineering*, 2025, 25 (11): 4438-4447.
- [23] 何星, 杨建国, 李映雁. 依-舒地堑方正断陷古近系构造演化与沉积相带展布特征 [J]. 中国地质, 2008 (5): 902-910.
- He X, Yang J G, Li Y Y. The structural evolution and distribution characteristics of sedimentary facies zones in the Fangzheng fault depression of Yishu graben [J]. *Geology of China*, 2008 (5): 902-910.
- [24] 全国自然资源与国土空间规划标准化技术委员会 (SAC/TC 93). 地热资源评价方法及估算规程: DZ/T 0331—2020 [S]. 北京: 地质出版社, 2020.
- National Standardization Technical Committee for Natural Resources and Land Spatial Planning (SAC/TC 93). Geothermal resource evaluation method and estimation regulations: DZ/T 0331-2020 [S]. Beijing: Geological Publishing House, 2020.
- [25] 全国国土资源标准化技术委员会 (3AC/TC 93). 砂岩热储地热尾水回灌技术规程: DZ/T 0330—2019 [S]. 北京: 地质出版社, 2019.
- National Technical Committee for Standardization of Land and Resources (3AC/TC 93). Technical regulations for backwater recharge of sandstone thermal storage geothermal tail water: DZ/T 0330-2019 [S]. Beijing: Geological Publishing House, 2019.