

地热水系统采灌方案模拟优化研究

邹鹏飞, 王彩会, 杜建国, 葛伟亚, 骆祖江, 孔刚, 邱杨, 刘莉

A study of simulation and optimization of the production-reinjection scheme of a geothermal water system: A case study of the geothermal space heating demonstration area in northern Jiangsu countryside

ZOU Pengfei, WANG Caihui, DU Jianguo, GE Weiya, LUO Zujiang, KONG Gang, QIU Yang, and LIU Li

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202302046>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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, 耿鹤鹤, 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

某氨氮污染地下水抽出-处理系统优化模拟研究

Simulation and optimization of a pumping and treating system for the remediation of ammonia polluted groundwater

王平, 韩占涛, 张海领, 孔贝贝, 张鑫馨 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 34-43

中试尺度下可渗透反应墙位置优化模拟——以铬污染地下水场地为例

A numerical simulation study of the position optimization of a pilot-scale permeable reactive barrier: a case study of the hexavalent chromium contaminated site

吕永高, 蔡五田, 杨骊, 边超, 李敬杰 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 189-195

水力屏障和截渗墙在海水入侵防治中的数值模拟研究

A numerical simulation study for controlling seawater intrusion by using hydraulic and physical barriers

吕盼盼, 宋健, 吴剑锋, 吴吉春 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 32-40

典型内陆湖区地下水数值模拟及其主控因子识别

Controlling factors identification of groundwater system evolution based on numerical simulation in the typical arid-inland basin

于晓露, 宋健, 林锦, 吴剑锋, 吴吉春 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 24-33



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202302046

邹鹏飞, 王彩会, 杜建国, 等. 地热水系统采灌方案模拟优化研究——以苏北农村清洁能源供暖示范区为例 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(4): 59-72.

ZOU Pengfei, WANG Caihui, DU Jianguo, *et al.* A study of simulation and optimization of the production-reinjection scheme of a geothermal water system: A case study of the geothermal space heating demonstration area in northern Jiangsu countryside[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(4): 59-72.

地热水系统采灌方案模拟优化研究 ——以苏北农村清洁能源供暖示范区为例

邹鹏飞^{1,2}, 王彩会², 杜建国², 葛伟亚³, 骆祖江³, 孔刚⁴, 邱杨⁵, 刘莉⁴

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023; 2. 江苏省地质调查研究院, 江苏南京 210018; 3. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏南京 211100; 4. 沛县自然资源和规划局, 江苏徐州 221600; 5. 江苏华东基础地质勘查有限公司, 江苏南京 210007)

摘要: 在地热资源开发利用过程中, 热储温度、压力会随开采量和时间的增加而降低, 地热尾水的排放也会对环境造成热污染, 热储回灌可以成为解决这些问题的有效措施。在进行地热开发利用之前, 科学合理地规划采灌井的布局方式, 探索避免采灌井过早发生热突破、实现地热资源高效利用的最优采灌方案, 有利于延长地热井的使用寿命。江苏沛县安国镇所在的丰沛盆地为古近纪以来发育的新生代断陷盆地, 岩溶裂隙型热储分布较为广泛, 以奥陶系灰岩为主。文章在安国镇地热资源勘查成果的基础上, 基于地热井抽水试验、回灌试验获取的采灌井间距、灌采比等重要参数, 利用 Feflow6.2 软件建立了地下热水渗流与热量运移三维耦合数值模型, 模拟预测了奥陶系灰岩热储层中地热水的可开采资源量, 进行了采灌井开发利用方案的模拟优选。研究表明: RPX01 开采井与 RPX02 回灌井合理井底间距为 389 m; 地热井的灌采比为 1.29, 确定了一抽一灌的方式进行可持续开发利用; 水位降深稳定在 50.61 m 时, 开采井可开采资源量为 1 000 m³/d; 开采量为 1 000 m³/d、回灌量 1 000 m³/d, 回灌温度 40 °C 时, 10 个供暖期后开采井水位下降 45.49 m, 温度降低 1.44 °C, 是本次模拟方案中的最佳循环开发利用方案。上述结果为苏北农村清洁能源供暖示范区建设提供了科学决策依据。

关键词: 地热水系统; 回灌; 数值模拟; 灌采比; 优化方案; 可持续开发利用

中图分类号: P314

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)04-0059-14

A study of simulation and optimization of the production-reinjection scheme of a geothermal water system: A case study of the geothermal space heating demonstration area in northern Jiangsu countryside

ZOU Pengfei^{1,2}, WANG Caihui², DU Jianguo², GE Weiya³, LUO Zujiang³, KONG Gang⁴,
QIU Yang⁵, LIU Li⁴

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China;
2. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210018, China; 3. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China; 4. Natural Resources and Planning Bureau of

收稿日期: 2023-02-20; 修订日期: 2023-05-11

投稿网址: www.swdgedz.com

基金项目: 江苏省自然资源科技计划项目(2021033); 江苏省自然资源发展专项资金(地矿类)项目(2020-1-8)

第一作者: 邹鹏飞(1986-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事地热资源勘查评价及可持续开发利用研究。E-mail: 420618238@qq.com

Pei County, Xuzhou, Jiangsu 221600, China; 5. Jiangsu East China Basic Geological Exploration Co. Ltd., Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract: During the process of developing and utilizing geothermal resources, various challenges are encountered. One such challenge is the decrease in temperature and pressure of the geothermal reservoir as a result of the increasing geothermal exploitation and duration. In addition, the discharge of geothermal tail water poses a risk of thermal pollution, leading to environmental concerns. To address these issues effectively, reinjection of geothermal fluids into the reservoir can be implemented as a viable solution. Prior to initiating the geothermal development and utilization, it is crucial to conduct scientific and rational planning of the layout of production and reinjection wells. This involves exploring optimal strategies for the production-reinjection scheme that prevents the premature thermal breakthrough and maximize the efficient utilization of geothermal resources, thereby extending the lifespan of the geothermal reservoir. The Fengpei Basin, a Cenozoic rift basin that developed since the Paleogene period, exhibits a widespread distribution of geothermal reservoirs, primarily composed of the Ordovician limestone with karst and fracture characteristics. Building upon the geothermal resource exploration results in the Anguo Town in Peixian County in Jiangsu Province, this study utilizes key parameters obtained from pumping tests and reinjection experiments, such as well spacing and the reinjection-to-production ratio. This paper establishes a 3D coupled numerical model of geothermal water seepage and heat transfer by using the Feflow6.2 software. The recoverable reserves of geothermal fluid within the geothermal reservoir are simulated and predicted, specifically the Ordovician limestone formation. Furthermore, a simulated optimization of the development and utilization scheme for the production-reinjection wells is conducted. The results reveal that an appropriate well spacing of 389 m between the producing well (RPX01) and the reinjection well (RPX02) is recommended. Moreover, the reinjection-to-production ratio, namely the ratio of average aquifer hydraulic conductivity, is determined to be 1.29, supporting a sustainable approach of one-for-one pumping and reinjection. With a stabilized drawdown of 50.61 m, the production well has a capacity to recover 1 000 m³/d of geothermal resources. Under the conditions of a production rate and a reinjection rate of 1 000 m³/d, as well as a reinjection temperature of 40 °C, the simulation predicts a decrease in groundwater level by 45.49 m and a temperature reduction of 1.44 °C after ten heating seasons. This represents the optimal cyclic development and utilization scheme among the simulated scenarios. The above results provide a scientific basis for decision-making in the construction of the clean energy heating demonstration area in rural northern Jiangsu. They contribute to the establishment of a scientifically sound and sustainable approach for utilizing geothermal resources, while considering the challenges associated with the thermal breakthrough and the environmental impact of geothermal tail water discharge.

Keywords: geothermal water system; reinjection; numerical simulation; ratio of hydraulic conductivity; optimization scheme; sustainable development of geothermal resources

截至 2019 年底,中国直接利用地热的装机容量达 40 610 MWt, 位居世界首位^[1]。我国地热资源潜力巨大, 2015 年, 全国地热资源利用量仅占能源消耗总量的 0.6%^[2]。因此, 加快开发利用地热能, 对优化我国能源结构, 推动实现“双碳目标”具有重要意义。

在地热能开发利用过程中, 常遇到地热储层温度和压力随开采量和时间的增加而降低等问题^[3-4], 且

地热尾水的排放对环境会造成热污染^[5]。采灌结合可以有效地解决地热开发利用所带来的诸多问题^[6-7]。地热回灌开采在意大利 Larderello 地热发电站^[8]、美国 Geysers 地热田^[9]、法国巴黎盆地^[10]及我国的北京^[11]、天津^[12]、陕西^[13]、山东^[14]、内蒙古^[15]等地区推广应用, 成为维持热储压力、减缓水位下降、稳定地热井产能、实现可持续开发利用的地热储层管理工具^[16-18],

全球至少一半地热田采用了完全回灌策略^[19-20]。主要回灌模式为在自然或人工加压的方式下采用对井系统进行同层原水回灌^[17],或对集中开采区采用其他水源进行集中回灌^[21],部分地热水由于富含硫酸根和碳酸根等腐蚀性离子、钙和镁等结垢离子,回灌前还需要进行结垢风险判断,并采取措​​施来预防井筒及地热储层结垢^[22]。利用数值模拟技术能模拟不同采灌情景下地热储层的温度场和压力场响应^[23],世界上许多大型地热田,如新西兰的Wairakei地热田^[24]和意大利的Larderello地热田^[25]都使用数值模型来模拟和预测地热储层的压力、产量和焓变。已有的数值模型通常将采灌井的采灌量、回灌温度等重要参数设置为定量或考虑部分参数作为变量^[21,26],模拟预测不同采灌情景下地热储层的温度场、压力场变化,得出最优生产利用方式和采灌组合模式^[17]。但同时将开采量、回灌量、回灌温度等参数作为变量进行采灌方案数值模拟优化的研究鲜有报道。

沛县安国镇是江苏徐州市首批中心镇,部分乡村已完成农村住房改善任务,对地热清洁能源供暖需求强烈。安国镇地区地热地质条件好,所在的丰沛盆地岩溶裂隙型热储分布较为广泛^[27-28]。碳酸盐岩热储由于岩溶裂隙较为发育,其回灌相对砂岩热储回灌更容易^[29-30]。已有回灌试验结果^[27]表明安国镇地区适宜地热回灌。因此,本文在沛县安国镇地热资源勘查成果的基础上,基于抽水试验、回灌试验获取的采灌井间距、灌采比等重要参数,利用数值模拟手段,探讨了开发利用方案的模拟优选,以期对苏北农村清洁能源供暖示范区(沛县安国镇)的建设提供科学决策依据,为该地区地热资源的合理开发利用提供理论支撑。

1 研究区概况

沛县安国镇位于江苏西北端,地处黄淮平原中部,海拔30~40 m,属淮河流域泗水水系中的南四湖水系,冬季寒冷干燥,年平均气温14.2℃,多年平均(1956—2021年系列)降水量669.3 mm。

安国镇内主要发育近EW向张性正断层,发育于褶皱隆起和拗陷之间,其次为NW向断裂及NE向断裂(图1)。姬蔡断裂、鸳梁断裂是区内主要的近EW向展布断裂。其中,姬蔡断裂倾向南,倾角55°~70°,为张双楼凸起南界断裂,对南侧凹陷的形成起控制作用;鸳梁断裂为张双楼凸起的北侧断裂,向北陡倾,是北侧盆地发育的控制性断裂。庙西断裂呈NW

向展布,是龙固一大屯低凸和欢口拗陷的分界断裂,并控制了欢口拗陷的发育,该断裂SW向陡倾,属于张性正断裂。

本区地下水类型主要有松散岩类孔隙水、碳酸盐岩类岩溶裂隙水和基岩裂隙水,石炭系岩溶裂隙承压含水层在区内大面积分布,下伏地层为奥陶系灰岩;奥陶系灰岩含水层是本区最重要的含水地层,也是矿井地下水的总补给水源,但受邻近矿区矿井排水影响,导致含水层水位下降,下降速度为0.38 m/a^[27],但侧向补给条件较好。区内地下水主要补给来源为大气降水,受南部张双楼煤矿开采影响,区内地下水位呈南低北高趋势。

2 区域地热地质背景

2.1 热源条件

沛县地处华北板块南缘,郯庐断裂带西侧,岩石圈厚度为120 km左右,居里面(560℃)深度大约30 km。已有大地热流值^[31]显示,位于丰县大沙河镇的丰参1井大地热流值为45.5 mW/m²,相对较低;三河尖煤矿13-2孔大地热流值较高,达75.9 mW/m²。地温梯度分布在2.38~2.79℃/100 m之间^[27-28],热源来自深部地球内部,地热资源类型多为传导型地热资源,属地温正常区。

2.2 控热构造

丰沛盆地为古近纪以来发育的新生代断陷盆地,中西部被NW向丰县断裂右行错开,由“一隆两拗”组成,即欢口拗陷、华栖隆起和敬安拗陷^[32](图1)。欢口拗陷中有张双楼低凸和龙固一大屯低凸,具有较高的热流值和地温梯度,凸起和凹陷的边界断阶带、凹陷外斜坡带、凹陷边缘断阶带、隆起区边缘、隆起区隐伏背斜等地段岩性破碎,富水性增强,具有强烈的深部水热循环。区内发育的主要断裂呈NE—NNE向、EW向及NW向展布,经过多次构造运动,互相切割、控制、改造和继承。隆拗相间的格局及区域性断裂的存在有利于地热的富集,是深部热流和地下水循环的良好通道。

2.3 地热储、盖层

根据丰沛地区地热井勘查成果、各煤田矿井水文地质条件,结合区域地层特征,3 000 m以浅地热储层主要有2类。第一类为碳酸盐岩类岩溶裂隙型热储,岩性为奥陶系(O)、寒武系(Є)灰岩、白云质灰岩;第二类为碎屑岩类裂隙型热储,岩性为白垩系(K)、侏罗系(J)砂岩。表1给出了丰沛地区现有地热井的热

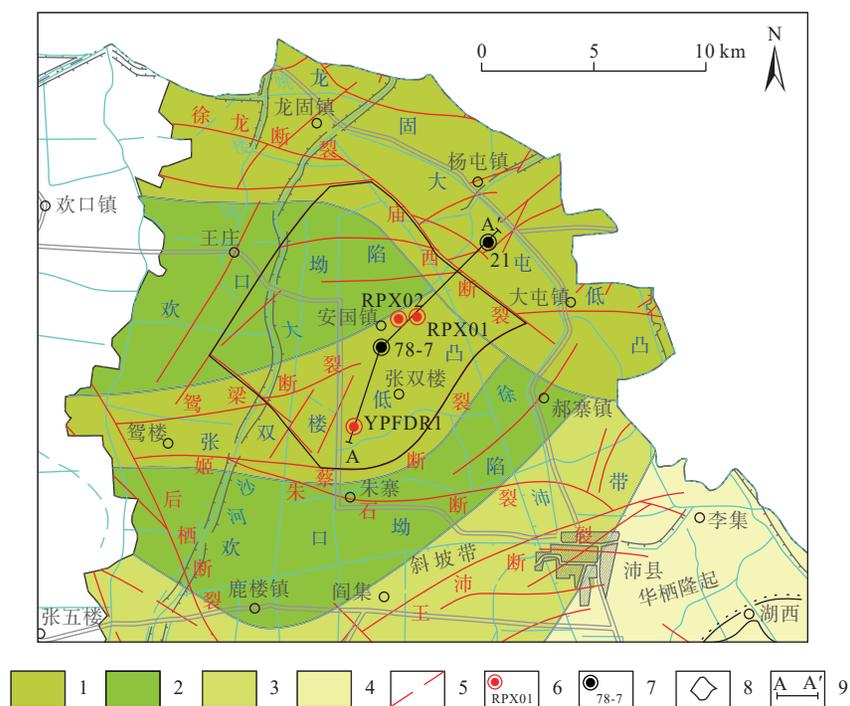


图 1 沛县地质构造分区图

Fig. 1 Geological structure zoning map of Pei County

1—低凸; 2—拗陷; 3—斜坡带; 4—隆起; 5—断裂; 6—地热井及编号; 7—钻孔及编号; 8—研究区范围; 9—剖面线

表 1 丰沛地区地热井热储层类型与出水量统计

Table 1 Statistics of the geothermal well reservoir type and water yield in Feng County and Pei County

井名	成井时间	井深/m	热储层	出水层段/m	水温/°C	大降深水量/(m ³ ·d ⁻¹)
燕牌坊地热井(YPFDR1)	2015年	851	奥陶系灰岩	491 ~ 851	35	800
丰参1井	1987年	3 946	白垩系、侏罗系砂岩	1 680 ~ 2 132	43	463
安国镇地热开采井(RPX01)	2021年	2 200	奥陶系灰岩	1 860 ~ 2 200	65	1 940
安国镇地热回灌井(RPX02)	2021年	2 000	奥陶系灰岩	1 928 ~ 2 000	52	422

注: 丰参1井原为油气井, 1987年完井, 2020年对其进行地热井改造, 成功出水。

储层类型与出水量情况。丰参 1 井热储层为白垩系、侏罗系砂岩, 出水深度 1 680 ~ 2 132 m, 水量 463 m³/d; 燕牌坊地热井与安国镇地热开采井、回灌井均是以奥陶系灰岩作为热储层, 水量 800 ~ 2 000 m³/d 不等, 燕牌坊地热井灰岩埋藏较浅, 小于 500 m, 安国镇 2 口地热井灰岩热储埋藏深度大于 1 800 m。

地热盖层主要为第四 ~ 古近系(Q-E)、中生界(Mz)砂岩、泥岩及石炭 ~ 二叠系(C-P)砂页岩夹煤层, 侏罗 ~ 白垩系(J-K)最厚达 2 000 m 左右, 分布广, 厚度不均, 以紫红色碎屑岩和火山碎屑岩为主。第四 ~ 新近系(Q-N), 分布范围受新生代以前构造及地形控制, 隆起区薄, 厚 120 ~ 188 m, 凹陷区厚, 最大厚度达 2 400 m, 由砂质黏土、粉质黏土、黏土、粉砂、细砂、中-粗砂等组成。上述地层导热率低且不透水、分布广、厚度大, 为地热资源赋存提供了良好的盖层条件。

3 地下热水系统三维耦合模型

3.1 概念模型

3.1.1 热储含水层结构

根据已有煤田钻孔、安国镇地热开采井(RPX01)、回灌井(RPX02)资料, 结合区域地质条件和可控源音频大地电磁测深(CSAMT)、重力测量物探解释成果^[27], 模拟范围平面图如图 1 所示, 地质剖面如图 2 所示。模型在垂向上分为 7 层(图 3), 分别为 Q-N、E、K-J-P、C、O(灰岩、泥质灰岩, 钻探出水段)、O(碳酸盐岩, 物探推测深度)、E(碳酸盐岩, 物探推测深度); 推测了奥陶系碳酸盐岩(主要热储层)的顶底板标高(图 4), 可以看出: 研究区内地层南部由于受张双楼凸起的影响, 碳酸盐岩埋藏浅, 地层整体抬升, 呈现由南向北倾斜, 研究区中、北部靠近欢口拗陷中心, 碳酸盐岩埋藏深度逐渐增大。

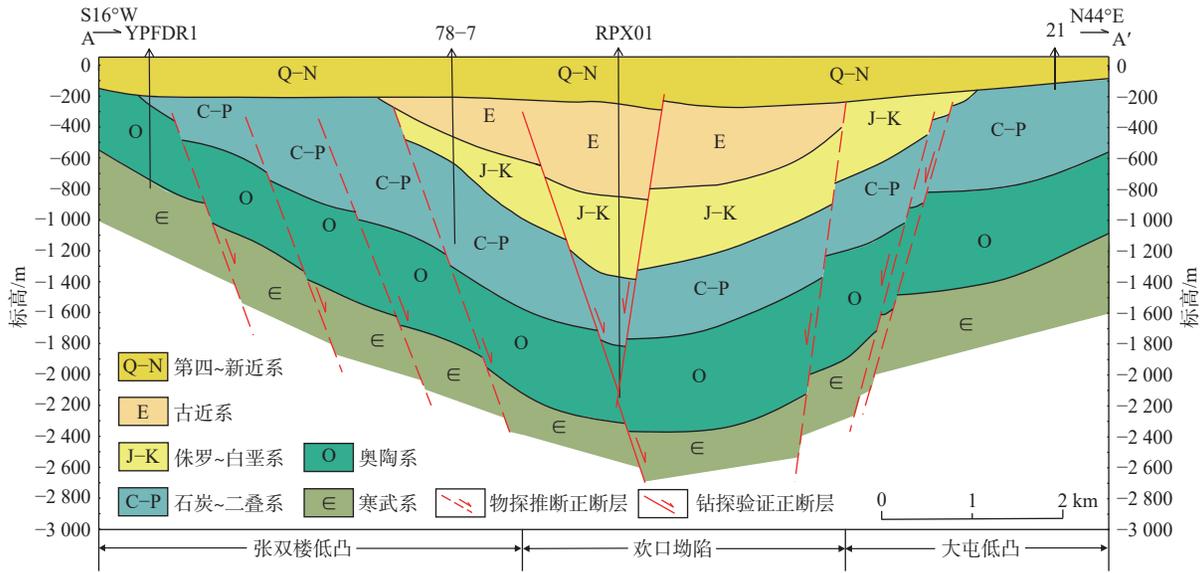


图 2 研究区地热地质剖面

Fig. 2 Geothermal geological profile in the study area

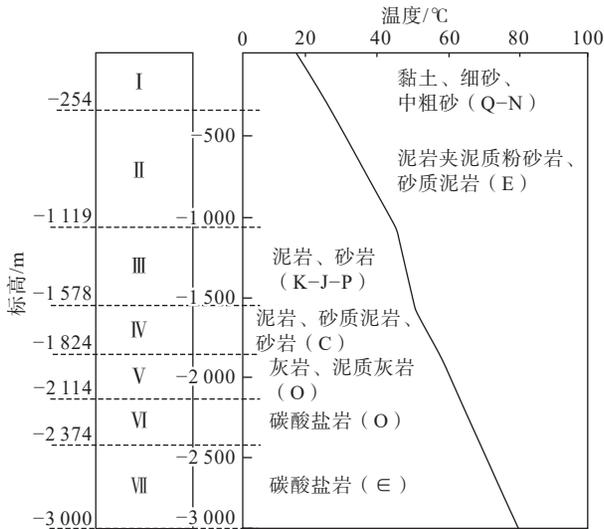
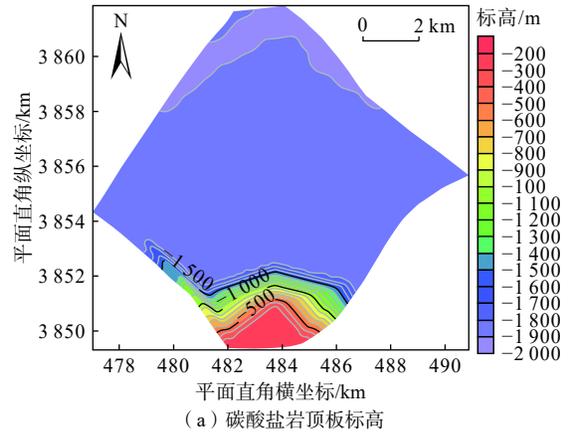


图 3 模型垂向分层示意图

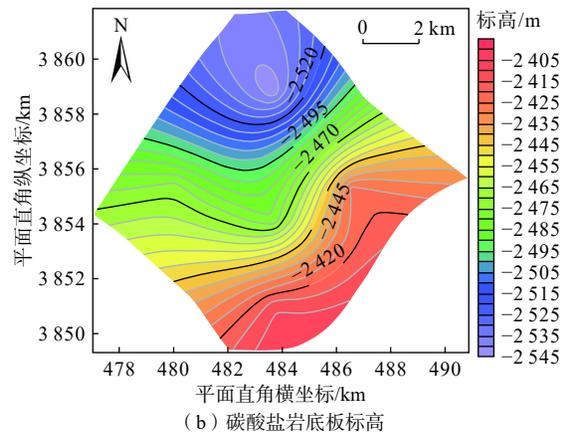
Fig. 3 Vertical stratification diagram of the model

3.1.2 边界条件概化

模型顶板一方面接受大气降雨的补给, 是一补给边界, 另一方面地下水又通过地表进行蒸发, 是一排泄边界。研究区地下热水几乎无开采, 地下热水通过断裂、裂隙的联通进行循环, 水流呈非稳定流状态, 各含水层均为非均质各向异性, 各层之间均发生水力联系。模型的四周概化为第二类边界条件, 底部设置为隔水边界。热量方面, 模型顶部接受大气降雨补给, 混入冷水, 是一热量排泄边界, 具体排热量由大地热流值得出; 目的层通过断裂、裂隙的联通循环, 将深层较高温度带到地表, 底部边界温度根据地温增温梯度



(a) 碳酸盐岩顶板标高



(b) 碳酸盐岩底板标高

图 4 研究区奥陶系碳酸盐岩顶、底板标高平面分布

Fig. 4 Distribution of the elevation plane of the top and bottom of the Ordovician carbonate rock in the study area

计算得到, 设置为恒温边界。设定研究范围内地下水具有相同的温度, 忽略由于温差引起的水的密度差异

而引起的上下自然对流的影响,并将含水层四周概化为第二类通量边界。

研究区概念模型示意图如图 5 所示。

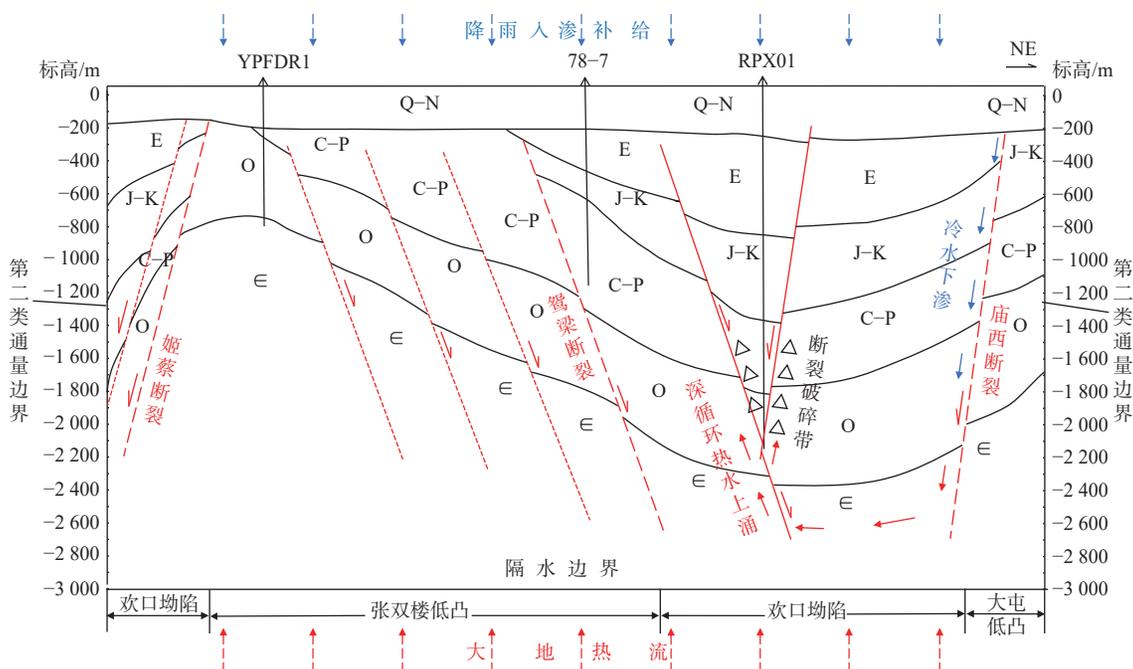


图 5 研究区地热概念模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the geothermal conceptual model in the study area

3.2 数学模型

3.2.1 模型建立

取坐标轴方向与含水层各向异性主渗透方向一

$$\begin{cases}
 \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = \mu_s \frac{\partial h}{\partial t} & (x, y, z) \in \Omega \\
 h(x, y, z, t)|_{t=t_0} = h_0(x, y, z, t_0) & (x, y, z) \in \Omega \\
 h(x, y, z, t) = h_1(x, y, z, t) & (x, y, z) \in \Gamma_1 \\
 K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \cos(n, x) + K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \cos(n, y) + K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \cos(n, z) \Big|_{\Gamma_2} = q(x, y, z, t) & (x, y, z) \in \Gamma_2 \\
 h(x, y, z, t) = z(x, y, t) & (x, y, z) \in \Gamma_3 \\
 K \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{\Gamma_3} = -u \frac{\partial h}{\partial t} \cos \theta & (x, y, z) \in \Gamma_3
 \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} ——各向异性主方向渗透系数/($m \cdot d^{-1}$);

h ——点 (x, y, z) 在 t 时刻的水头值/m;

u_s ——含水层的贮水率/ d^{-1} ;

W ——源汇项/ d^{-1} ;

t ——时间/d;

Ω ——计算域;

$h_0(x, y, z, t_0)$ ——点 (x, y, z) 处初始水头值/m;

$q(x, y, z, t)$ ——第二类边界上单位面积的补给量/($m \cdot d^{-1}$);

$\cos(n, x)$ 、 $\cos(n, y)$ 、 $\cos(n, z)$ ——流量边界外法线

致,即研究区内断裂的发育方向,建立如下数学模型^[33]:

方向与坐标轴方向夹角的余弦;

μ ——饱和差(自由面上升)或给水度(自由面下降);

Γ_1 、 Γ_2 、 Γ_3 ——第一类、第二类和自由面边界。

假设地下水和含水介质骨架的热动平衡是瞬时完成的,即含水介质骨架与周围地下水具有相同的温度,并忽略由于温度差引起水的密度差异而引起的上下自然对流的影响,建立地下水三维热量运移数学模型^[33]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - c_w \left[\frac{\partial(v_x T)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y T)}{\partial y} + \frac{\partial(v_z T)}{\partial z} \right] + Q_c = c \frac{\partial T}{\partial t} & (x, y, z) \in \Omega \\ T(x, y, z, t)|_{t=0} = T_0(x, y, z, t_0) & (x, y, z) \in \Omega \\ T(x, y, z, t)|_{\Gamma_1} = T_1(x, y, z, t) & (x, y, z) \in \Gamma_1 \\ \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \cos(n, x) + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \cos(n, y) + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \cos(n, z)|_{\Gamma_2} = Q(x, y, z, t) & (x, y, z) \in \Gamma_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: λ_x 、 λ_y 、 λ_z ——各方向水的热动力弥散系数/ $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$;

T 、 $T_0(x, y, z)$ 、 $T_1(x, y, z, t)$ ——点 (x, y, z) 处的温度函数/K、初始温度值/K、第一类边界的温度函数/K;

c_w 、 c ——水与含水介质的热容量/ $(J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1})$;

v_x 、 v_y 、 v_z ——地下水渗流速度分量/ $(m \cdot d^{-1})$;

Q_c ——热源汇项, $Q_c = c_w W(T_{Qc} - T)$, 其中 T_{Qc} 为源汇项的温度/K;

$Q(x, y, z, t)$ ——第二类边界上已知的热量或热流函数/ $(J \cdot m^{-1} \cdot d^{-1})$ 。

地下水流运动方程可以表述为:

$$\vec{v} = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (3)$$

将式(1)与式(2)通过式(3)耦合在一起, 构成研究区地下水非稳定渗流与热量运移三维耦合数学模型。

3.2.2 单元剖分

上述数学模型采用伽辽金有限元方法进行求解。借助 Feflow6.2 构建研究区地下水非稳定渗流与热量运移三维有限元可视化计算机模型。

根据研究区几何形状、地下水系统结构特征, 对研究区进行三维剖分。平面上先将计算域剖分成 5 000 个三角形单元, 然后对热水井和该区域主要的控水断裂进行网格加密, 最终形成每层 9 746 个三角形单元, 4 951 个节点。垂向上考虑到开采井、出水层位和层厚的影响, 共剖分为 7 层, 8 个计算层面, 共计 68 222 个单元, 39 608 个节点。模型平面与空间单元剖分见图 6。

3.3 模型的识别、验证

3.3.1 参数分区及赋初值

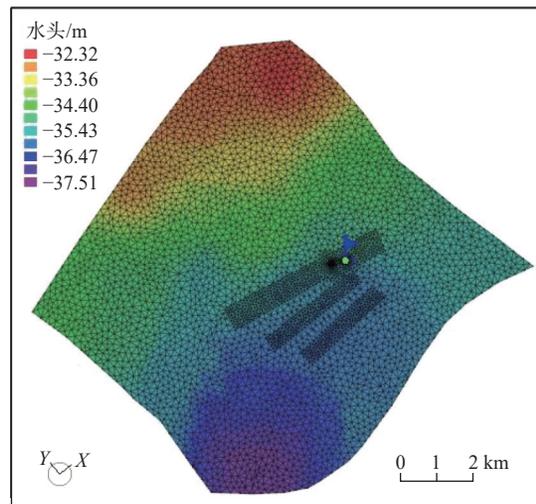
根据研究区断裂构造分布特征, 结合 RPX01 开采井抽水试验资料以及 RPX02 回灌井相关资料, 对研究区进行参数分区, 垂向与平面分区详见图 7 第 I—II 层, 第三—VII 层与第 II 层平面分区一致。

参照研究区 RPX01 开采井的初始水位、40 m 深

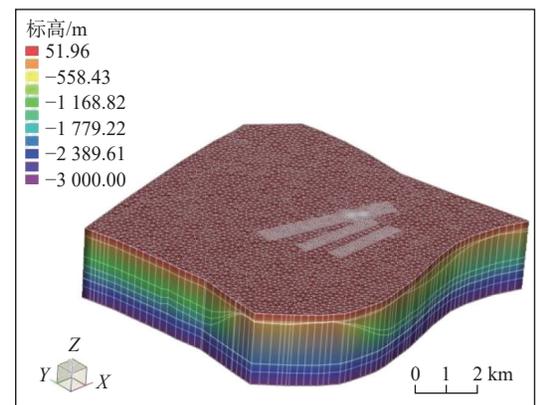
度钻孔测温监测资料及实测地温增温规律, 确定模型热储层初始渗流场和初始温度场(图 8)。研究区内南部分布有张双楼煤矿, 受其长期开采影响, 初始地下水位为区内最低, 已有资料^[27-28]及图 8 显示位于南部的燕牌坊地热井静水位较安国镇地热开采井低 5.27 m, 北部为地下水位相对高值区。研究区北部靠近盆地, 初始温度略高于南部张双楼凸起。

3.3.2 模型识别与验证

研究区内缺乏地热井长期观测资料, 故采用 RPX01 开采井抽水试验数据^[27]进行水位拟合, 并进行反演求参。RPX01 开采井共进行了 4 个落程的稳定流抽水



(a) 模型平面剖分



(b) 模型空间剖分

图 6 研究区三维数值模型图

Fig. 6 Diagram of the 3D numerical model in the study area

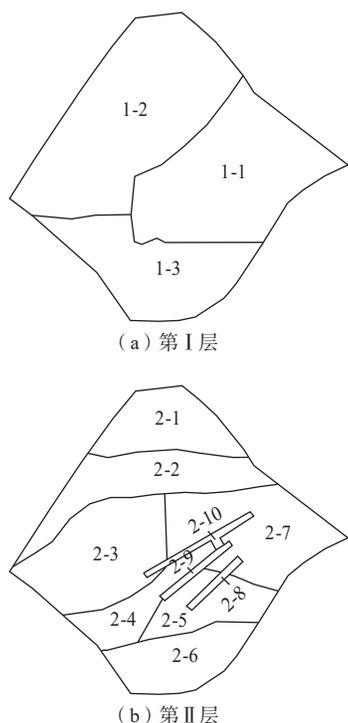


图 7 研究区参数分区图示例

Fig. 7 Parameter partition map for model in the study area

试验, 历时 206 h, 其中最大降深 137.96 m, 水位达到稳定持续时间约 48 h, 出水量为 1 940 m³/d, 出水温度 65 °C; RPX02 回灌井共进行了 3 个落程的稳定流抽水试验, 历时 157 h, 其中最大降深 199.99 m, 水位达到稳定持续时间 52 h, 出水量为 421.92 m³/d, 出水温度 52 °C。2 口地热井在此期间进行了水位恢复试验, 其抽水试验落程次数及稳定时间均达到有关技术要求^[34], 可用于参数的反演及模型的校正。开采井实测数据与计算数据拟合情况见图 9。需要指出的是, 由于深部热储温度场观测较为困难, 难以获取到地热储层的温度场动态变化资料, 本文暂不进行温度场拟合验证, 模拟的温度场为根据地温增温的推测结果。热物性参数依据取芯岩样测试资料^[27]和《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615—2010)^[35]中的经验参数进行赋值。

通过反演求参, 可以确定 I—VII 模型层各分区的水文地质参数。从拟合结果来看(图 9), 计算曲线与实测曲线拟合较好, 总体变化趋势一致, 模型计算误差满足有关文献中^[36]关于数值模拟的精度要求, 可用于研究区地下水渗流场与温度场的模拟预测。

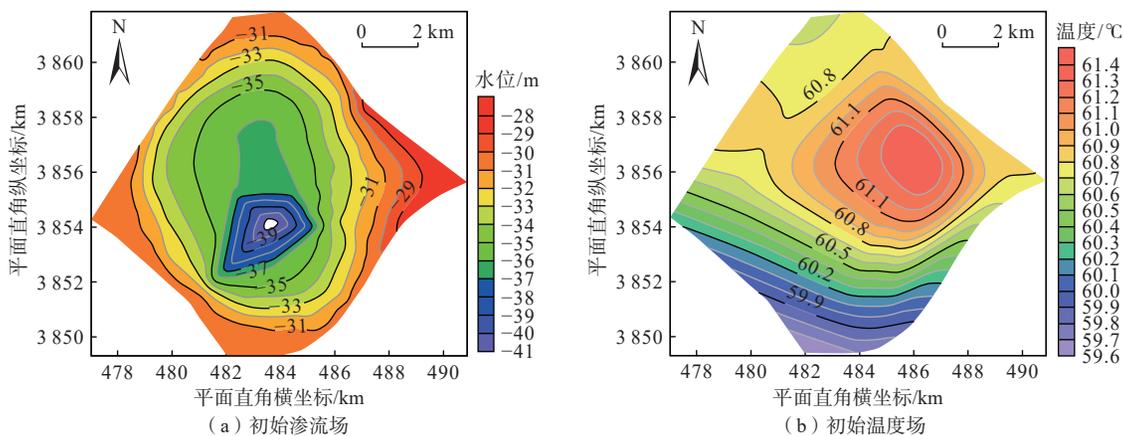


图 8 热储层初始渗流场图及初始温度场图

Fig. 8 Initial flow field diagram and initial temperature field diagram of geothermal reservoir in the study area

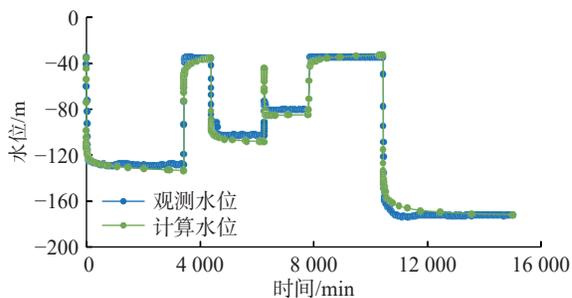


图 9 RPX01 开采井水位拟合图

Fig. 9 Fitting map of water table of well RPX01

4 可持续开发利用方案模拟预测

4.1 地下热水可采资源量评价预测

利用识别、验证过的地下水非稳定渗流与热量运移三维耦合数值模型, 对研究区地热井所在的热储含水层(奥陶系碳酸盐岩)2021—2031 年的地下水流场与温度场变化进行预测。以 2021 年 11 月 15 日作为预测计算的初始时刻, 模拟时间为 2021 年 11 月 15 日—2031 年 11 月 15 日(10 a)。由于研究区地下水开采量少, 水位、温度变化幅度小, 初始流场和初始温度

场均采用模型识别、验证阶段的初始数据,大气降水量数据采用1999—2020年逐月平均值,气温采用当地年平均气温15℃。

在水位降深不超过50m的情况下,预测地下热水渗流与热量运移未来10个供暖周期的变化趋势。计算得出开采井(RPX01)在水位降深稳定在50.61m时,开采量为1000m³/d,即为单井的可采资源量。按该地热井抽水试验资料得到的单井流量方程^[27]计算该水位降深时对应的开采量为1090m³/d,与数值模拟

结果较为吻合,提高了评价结果的可靠性。

研究区内热储在分别模拟1个、5个、10个供暖期地下水渗流场与温度场,等值线图如图10、图11所示。按照50m水位降深确定的开采量进行开采,随着开采的持续,区域上水位逐渐下降后达到平衡,开采量约等于补给量,地下水位处于稳定状态。从RPX01井的水位、温度历时曲线(图12)可以看出:开采井的地下水位从-35.55m下降至-86.73m,温度从65.33℃上升至65.55℃,年内温度增幅0.02℃。

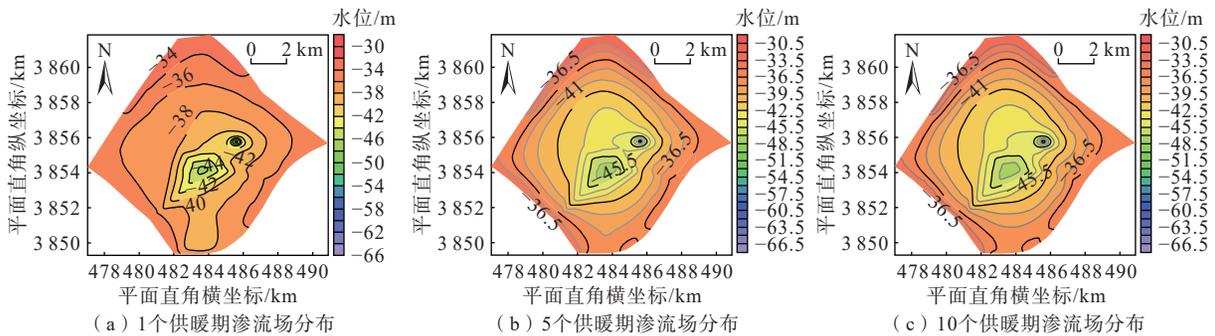


图10 不同供暖期目的层渗流场分布变化趋势模拟图

Fig. 10 Trend chart of the distribution changes of the simulated seepage fields in the target layer for different heating periods

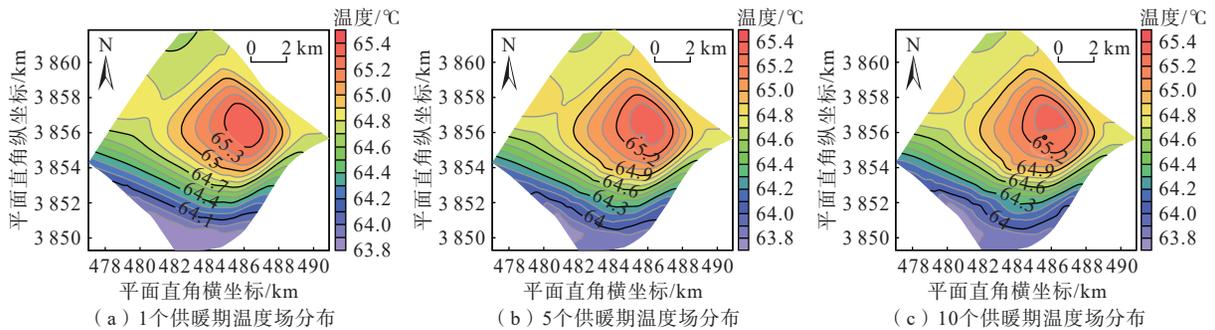


图11 不同供暖期目的层温度场分布变化趋势模拟图

Fig. 11 Trend chart of the distribution changes of the simulated temperature fields in the target layer for different heating periods

4.2 灌采比的确定

通过RPX01开采井、RPX02回灌井各自开展的抽水试验和回灌试验计算得到的渗透系数进行算术平均,抽水试验、回灌试验平均渗透系数分别为0.34 m/d、0.44 m/d^[27],据此计算研究区地热井的灌采比(回灌试验平均渗透系数与抽水试验平均渗透系数之比)为1.29,最终确定一抽一灌的方式对地下热水进行合理持续开发利用。

4.3 回灌方案计算分析

利用前文已识别验证过的模型对研究区地下水抽水回灌的运行效果和热突破现象进行评价。

本文采用1口开采井及1口回灌井进行模拟预测,依据回灌量由小到大的原则,RPX01开采井与RPX02回灌井均采用自然回灌的方式开展了3组不同流量的回灌试验,持续时间分别为110, 85 h,最大可回灌量(即考虑地热井内流体水位上升到允许的最大值时的回灌能力)分别为1858.56, 218.88 m³/d,由于2口地热井热储揭露厚度、裂隙发育程度、增产工艺的不同,回灌效果差异明显^[27]。通过2口地热井回灌试验,获得开采井与回灌井不发生热突破的合理井底间距为389 m,实际间距为407 m,符合距离要求。参照我国北方法定供暖时间,将每年11月15日至次年3

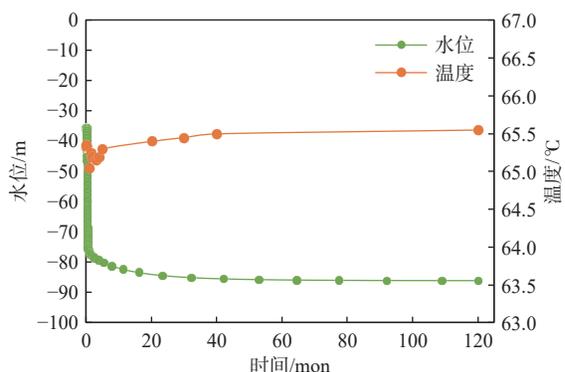


图 12 RPX01 开采井运行 10 a 水位与温度变化历时曲线图
Fig. 12 Duration curve of water level and temperature variations at RPX01 production well over a 10-year operational period

月 15 日作为供暖期,模型设置为仅供暖期抽灌,共 10 个。取每个供暖周期结束时的水位作为该供暖周期的水位,同样取每个供暖周期结束时的温度作为该

供暖周期的温度。经模拟分析,在抽、灌水共同作用下,地下水发生强迫对流作用加强,使天然流场的作用被忽略。将回灌使热储层水温下降 2 °C 视为出现热突破现象^[37],运行 10 a 时,在采、灌井不发生热突破的前提下,尽可能地增加回灌水量和减少回灌温度,实现经济效益的最大化。

根据开采井(RPX01)抽水试验结果^[27],其最大出水量为 1 940 m³/d,实际核定的可开采量(50 m 降深)为 1 080 m³/d,因此,在进行采、灌方案模拟时分别以开采量为 1 000, 1 500, 2 000 m³/d 3 种方案进行设计,针对每个方案,又按回灌量、回灌温度的不同进行细分,回灌量按开采量的 100% 全回灌、2/3 回灌、1/2 回灌、1/3 回灌,回灌水温为 50, 40 °C 进行设计,共细分了 24 种方案(表 2),模拟不同方案下,区域渗流场与温度场的变化。

表 2 不同采、灌方案设计一览表

Table 2 Different geothermal exploitation and reinjection schemes

方案编号	开采量 / (m ³ ·d ⁻¹)	回灌水量 / (m ³ ·d ⁻¹)	回灌温度 / °C	方案编号	开采量 / (m ³ ·d ⁻¹)	回灌水量 / (m ³ ·d ⁻¹)	回灌温度 / °C	方案编号	开采量 / (m ³ ·d ⁻¹)	回灌水量 / (m ³ ·d ⁻¹)	回灌温度 / °C
1	1 000.00	1 000.00	50	9	1 500.00	1 500.00	50	17	2 000.00	2 000.00	50
2	1 000.00	1 000.00	40	10	1 500.00	1 500.00	40	18	2 000.00	2 000.00	40
3	666.67	666.67	50	11	1 000.00	1 000.00	50	19	1 333.33	1 333.33	50
4	666.67	666.67	40	12	1 000.00	1 000.00	40	20	1 333.33	1 333.33	40
5	1 000	500.00	50	13	1 500	750.00	50	21	2000	1 000.00	50
6	500.00	500.00	40	14	750.00	750.00	40	22	1 000.00	1 000.00	40
7	333.33	333.33	50	15	500.00	500.00	50	23	666.67	666.67	50
8	333.33	333.33	40	16	500.00	500.00	40	24	666.67	666.67	40
无回灌开采				无回灌开采				无回灌开采			

以方案 1(开采量 1 000 m³/d、回灌水量 1 000 m³/d、回灌温度 50 °C)、方案 2(开采量 1 000 m³/d、回灌水量 1 000 m³/d、回灌温度 40 °C)为例,对模拟结果进行简要介绍。

分别模拟目的层 1, 5, 10 个供暖期的渗流场与温度场变化,如图 13—15 所示。为更直观地显示渗流场、温度场的变化,图 16 给出了开采井(RPX01)附近地下水水位、温度历时曲线。

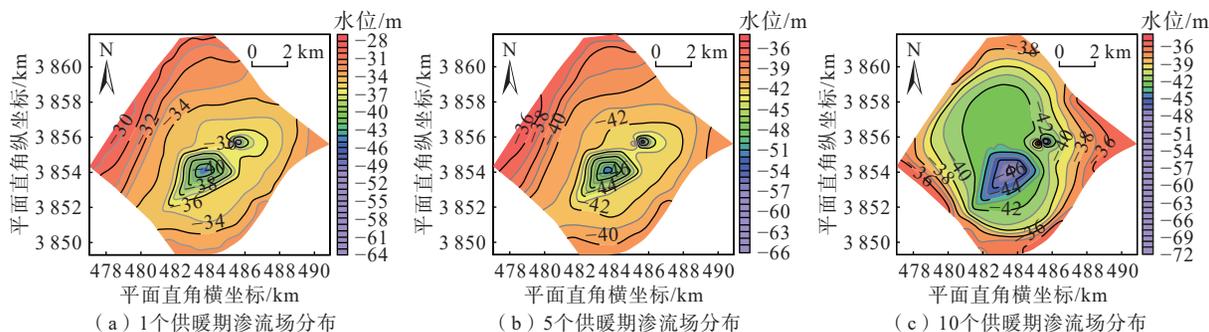


图 13 方案 1 条件下不同供暖期目的层渗流场分布变化趋势模拟图

Fig. 13 Distribution changes of simulated seepage fields in the target layer for different heating periods under the condition of scheme 1

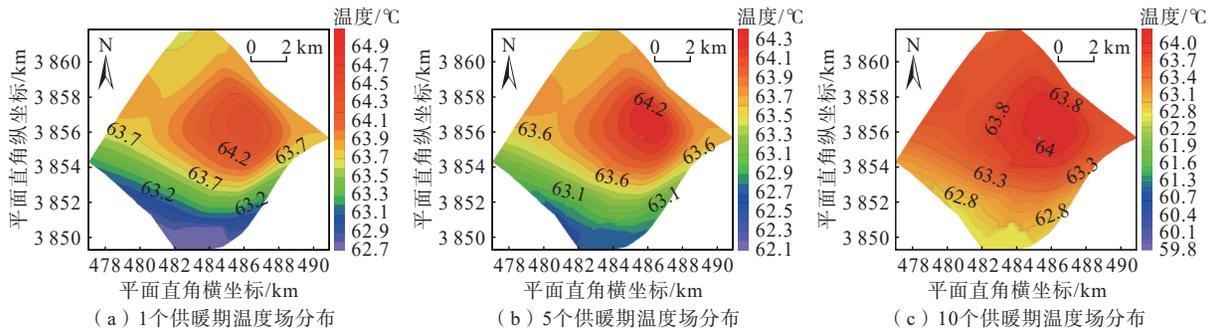


图 14 方案 1 条件下不同供暖期目的层温度场分布变化趋势模拟图

Fig. 14 Distribution changes of the simulated temperature fields in the target layer for different heating periods under the condition of scheme 1

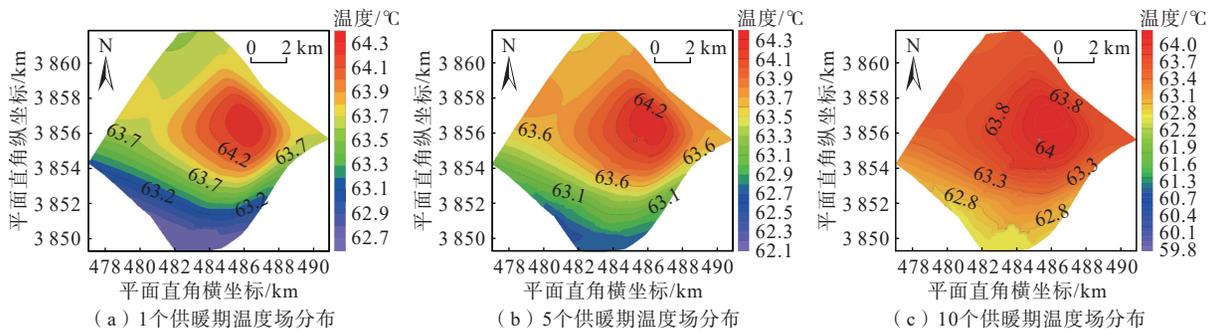


图 15 方案 2 条件下不同供暖期目的层温度场分布变化趋势模拟图

Fig. 15 Distribution changes of the simulated temperature fields in the target layer for different heating periods under the condition of scheme 2

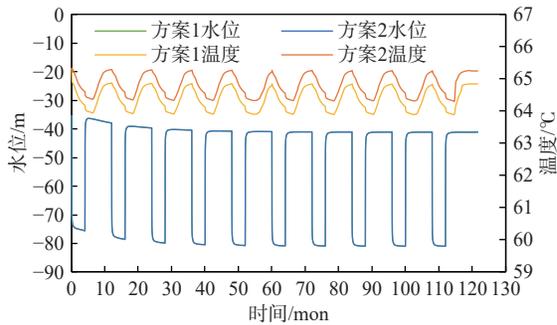


图 16 方案 1、方案 2 条件下 RPX01 开采井运行 10 个供暖期水位与温度变化历时曲线图

Fig. 16 Duration curve of groundwater level and temperature variations at the RPX01 production well over 10 heating periods under the condition of scheme 1 and scheme 2

经模拟计算, 10 个供暖期后开采井水位从-35.55 m 下降至-81.04 m, 水位下降 45.49 m; 无回灌条件下水位从-35.55 m 下降至-86.73 m, 水位下降 51.18 m; 同无回灌条件相比, 在有回灌条件下, 开采井水位少下降 5.69 m。开采井水温在运行 10 个供暖期后温度从 65.33 °C 变化至 64.11 °C, 温度降低了 1.22 °C。

与方案 1 相比, 方案 2 回灌水量相同, 回灌温度不同, 因此, 开采井在 10 个供暖期内水位变化是相同

的, 只会在温度场变化上有所差异(图 16)。方案 2 模拟结果显示, 在运行 10 个供暖期后, 开采井温度从 65.33 °C 变化至 63.89 °C, 降低了 1.44 °C; 同方案 1 相比, 方案 2 开采井温度多降低了 0.22 °C。可以看出, 方案 1、方案 2 下热突破现象均不明显。

5 回灌优化方案选择

5.1 选择依据

(1) 水位降深满足规范要求。RPX01 开采井在成功出水后, 依据抽水试验资料, 水位降深在满足规范要求的情况下, 计算了单井可采资源量, 但未考虑回灌因素, 一般情况下, 回灌水量越大, 地热开采井相同的出水量对应的水位降深就越小, 对周边地质环境影响越小。

(2) 不出现热突破现象。一般情况下, 回灌水温越低, 资源的利用率越高, 但也容易产生热突破现象。在抽、灌水共同作用下, 地下水发生强迫对流作用加强, 使天然流场的作用被忽略, 以回灌使热储层水温下降 2 °C 视为出现热突破现象, 影响地热井的开发利用。

因此, 开采时, 水位降深在满足规范要求的情况

下,且采、灌井不发生热突破现象,尽可能增加回灌水量而降低回灌温度,实现地热资源的高效利用,被认为是回灌的最优方案。

5.2 回灌优化方案分析

对 24 种不同的采灌方案进行 10 个供暖期后模拟的开采井水位、水温统计见表 3,其中,初始水位为 -35.55 m ,初始温度为 $65.33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。具体分析如下。当开采量为 $1\ 000\text{ m}^3/\text{d}$ 时,无回灌开采情况下水位降深为 51.18 m ,其它 8 种方案运行 10 个供暖期后水位降深 $45.49\sim 48.58\text{ m}$,水温降低 $0.95\sim 1.44\text{ }^{\circ}\text{C}$,均未产生热突破现象。

表 3 不同采、灌方案水位、水温模拟结果统计表
Table 3 Simulation results of groundwater level and water temperature in different exploitation and reinjection schemes

方案编号	水位/m		水温/ $^{\circ}\text{C}$	
	10个供暖期后	水位下降	10个供暖期后	水温变化
1/2	-81.04	45.49	64.11/63.89	-1.22/-1.44
3/4	-82.56	47.01	64.18/64.09	-1.15/-1.24
5/6	-83.35	47.8	64.28/64.22	-1.05/-1.11
7/8	-84.13	48.58	64.38/64.33	-0.95/-1.00
无回灌开采	-86.73	51.18	65.55	0.22
9/10	-100.88	65.33	63.27/63.09	-2.06/-2.24
11/12	-103.19	67.64	63.38/63.31	-1.95/-2.02
13/14	-104.36	68.81	63.51/63.50	-1.82/-1.83
15/16	-105.57	70.02	63.77/64.22	-1.56/-1.11
无回灌开采	-109.51	73.96	65.62	0.29
17/18	-120.79	85.24	63.01/62.66	-2.32/-2.67
19/20	-123.88	88.33	63.23/63.14	-2.10/-2.19
21/22	-125.44	89.89	63.66/63.43	-1.67/-1.90
23	-126.98	91.43	64.18/64.10	-1.15/-1.23
无回灌开采	-132.29	96.74	65.65	0.32

当开采量为 $1\ 500\text{ m}^3/\text{d}$ 时,无回灌开采情况下水位降深为 73.96 m ,其它 8 种方案运行 10 个供暖期后水位降深 $65.33\sim 70.02\text{ m}$,水温降低 $1.11\sim 2.24\text{ }^{\circ}\text{C}$,在 100% 回灌和 2/3 回灌、水温 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下产生了明显的热突破现象,剩余方案未产生热突破现象。

当开采量为 $2\ 000\text{ m}^3/\text{d}$ 时,无回灌开采情况下水位降深为 96.74 m ,其它 8 种方案运行 10 个供暖期后水位降深 $85.24\sim 91.43\text{ m}$,水温降低 $1.15\sim 2.67\text{ }^{\circ}\text{C}$,在 100% 回灌和 2/3($1\ 333.33\text{ m}^3/\text{d}$)回灌的情况下出现明显热突破,剩余方案未产生明显热突破。

综合以上分析认为,在开采量为 $1\ 000\text{ m}^3/\text{d}$ 情况下,回灌量 $1\ 000\text{ m}^3/\text{d}$ 、回灌温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时开采井水位降深 45.49 m ,温度降低 $1.44\text{ }^{\circ}\text{C}$,是本次模拟方案中的最优采灌方案。

6 结论及建议

6.1 结论

(1)通过抽水试验与回灌试验,获取了开采井与回灌井不发生热突破的合理井底间距为 389 m ,平均渗透系数分别为 0.34 m/d 、 0.44 m/d ,确定了地热井的灌采比为 1.29,最终选择一抽一灌的对井布局方式对地下热水进行可持续开发利用。

(2)构建了苏北农村清洁能源供暖示范区地下水数值模型,在水位降深不超过 50 m 情况下,预测了地热水渗流与热量运移未来 10 个供暖周期的变化趋势,RPX01 开采井在水位降深稳定为 50.61 m 时,可开采量为 $1\ 000\text{ m}^3/\text{d}$,同单井流量方程计算值较为吻合,提高了评价结果的可靠性。

(3)当开采量为 $1\ 000\text{ m}^3/\text{d}$ 、回灌量 $1\ 000\text{ m}^3/\text{d}$ 、回灌温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时(即方案 2),在 10 个供暖期后 RPX01 开采井水位降深 45.49 m ,温度降低 $1.44\text{ }^{\circ}\text{C}$,该方案是最佳循环开发利用方案。

6.2 建议

(1)根据沛县地热资源特点,结合苏北农村经济社会发展规划和产业布局,研究区中深层地热资源在地热供暖、温泉旅游、康养保健、现代农业等方面具有广阔的开发利用前景,可为苏北乡村振兴提供有力支撑。

(2)沛县地热资源丰富,水量大、温度高,可根据不同温度进行梯级、综合利用,较高温度的地热能首先用于示范区供暖、工业烘干等,之后被用于农业种植、养殖等,最后较低温度的地热流体用来洗浴。

(3)按照本次模拟给出的最优采灌方案进行对井开发利用,加强地热井地下水水位、水质、水温、水量的动态监测,采用综合措施减少结垢,提高回灌能力,实现沛县地热资源的可持续开发利用。

参考文献 (References):

- [1] LUND J W, TOTH A N. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review[J]. Geothermics, 2021, 90: 1-31.
- [2] 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 Guiling, LIU Yanguang, ZHU Xi, et al. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 1-9. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 陈宗宇.天津市塘沽低温热储回灌的水-岩相互作用地球化学模拟[J].地球科学,1998(5):79-84. [CHEN Zongyu. Modeling water-rock interaction of

- geothermal reinjection in the Tanggu low-temperature field, Tianjin[J]. *Earth Earth Science*, 1998(5): 79 – 84. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 何满潮,刘斌,姚磊华,等.地热水对井回灌渗流场理论研究[J].*中国矿业大学学报*,2004(3):11–14. [HE Manchao, LIU Bin, YAO Leihua, et al. Study on theory of seepage field around geothermal production-reinjection doublets wells[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2004(3): 11 – 14. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 申建梅,陈宗宇,张古彬.地热开发利用过程中的环境效应及环境保护[J].*地球学报*,1998(4):67–73. [SHEN Jianmei, CHEN Zongyu, ZHANG Gubin. Environmental protection and environmental impact of geothermal development and utilization[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 1998(4): 67 – 73. (in Chinese with English abstract)]
- [6] BAKKE S, VIK E A, GRÜNER H, et al. Produced water reinjection (PWRI) [M]// REED M, JOHNSEN S. *Produced water 2: Environmental issues and mitigation technologies*. Boston, MA: Springer, 1996 : 447-458.
- [7] AXELSSON G, GUNNLAUGSSON E, JÓNASSON T, et al. Low-temperature geothermal utilization in Iceland – Decades of experience[J]. *Geothermics*, 2010, 39(4): 329 – 338.
- [8] CAPPETTI G, PARISI L, RIDOLFI A, et al. Fifteen years of reinjection in the Larderello-Valle Secolo area: Analysis of the production data[C]// *Proceedings World Geothermal Congress*, 1995 : 18 – 31.
- [9] KENNEDY B M, PRUESS K, LIPPMANN M J, et al. A history of geothermal energy research and development in the United States: Reservoir Engineering 1976—2006[R]. Washington, DC : Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE), 2010.
- [10] UNGEMACH P, ANTICS M, PAPACHRISTOU M. Sustainable geothermal reservoir management[C]// *Proceedings World Geothermal Congress*, 2005 : 24 – 29.
- [11] 刘久荣.地热回灌的发展现状[J].*水文地质工程地质*,2003,30(3):100–104. [LIU Jiurong. The status of geothermal reinjection[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2003, 30(3): 100 – 104. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 曾梅香,田光辉,赵越波,等.采灌条件下中低温热储温度场动态特征初探[J].*中国地质*,2010,37(1):191–197. [ZENG Meixiang, TIAN Guanghui, ZHAO Yuebo, et al. A tentative discussion on dynamic characteristics of the low-medium temperature geothermal reservoir field under the condition of exploitation-reinjection[J]. *Geology in China*, 2010, 37(1): 191 – 197. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 宋先知,李根生,王高升,等.中深层地热能取热技术研究进展[J].*科技导报*,2022,40(20):42–51. [SONG Xianzhi, LI Gensheng, WANG Gaosheng, et al. Research progress on heat extraction technology for developing medium-deep geothermal energy[J]. *Science & Technology Review*, 2022, 40(20): 42 – 51. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 高楠安,汪新伟,梁海军,等.山东临清坳陷大名次凹陷地热系统成因模式[J].*中国地质*,2021:1–19. [GAO Nan'an, WANG Xinwei, LIANG Haijun, et al. Genetic mechanism of geothermal system in Daming sag, Linqing depression, Linqing, Shangdong [J]. *Geology in China*, 2021: 1–19. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 刘润川,任战利,叶汉青,等.地热资源潜力评价——以鄂尔多斯盆地部分地级市和重点层位为例[J].*地质通报*,2021,40(4):565–576. [LIU Runchuan, REN Zhanli, YE Hanqing, et al. Potential evaluation of geothermal resources: Exemplifying some municipalities and key strata in Ordos Basin as a study case[J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(4): 565 – 576. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 刘东林,李义曼,庞忠和,等.碳酸盐岩热储对湖水回灌的响应[J].*工程地质学报*,2019,27(1):178–183. [LIU Donglin, LI Yiman, PANG Zhonghe, et al. Geochemical responses of carbonate reservoir to untreated lake water reinjection.[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(1): 178 – 183. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 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, 5(3): 178 – 186.
- [18] WANG Guiling, ZHANG Wei, MA Feng, et al. Overview on hydrothermal and hot dry rock researches in China[J]. *China Geology*, 2018, 1(2): 273 – 285.
- [19] STEFANSSON V. Geothermal reinjection experience[J]. *Geothermics*, 1997, 26(1): 99 – 139.
- [20] KAMILA Z, KAYA E, ZARROUK S J. Reinjection in geothermal fields: An updated worldwide review 2020[J]. *Geothermics*, 2021, 89: 1 – 88.
- [21] 阮传侠,沈健,李立亮,等.天津市滨海新区东丽湖地区基岩热储回灌研究[J].*地质通报*,2017,36(8):1439–1449. [RUAN Chuanxia, SHEN Jian, LI Liliang, et al. Researches on the reinjection of Dongli Lake bedrock reservoir in Binhai New Area, Tianjin[J]. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(8): 1439 – 1449. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 赵振,秦光雄,罗银飞,等.西宁盆地地热水特征及回

- 灌结垢风险[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(5): 193 – 204. [ZHAO Zhen, QIN Guangxiong, LUO Yinfei, et al. Characteristics of geothermal water in the Xining Basin and risk of reinjection scaling[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(5): 193 – 204. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 马峰, 王贵玲, 刘桂宏, 等. 雄安新区容城地热田碳酸盐岩热储采灌数值模拟[J/OL]. *吉林大学学报(地球科学版)*, (2022-12-27)[2023-01-30]. <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.20220004>. [MA Feng, WANG Guiling, LIU Guihong, et al. Numerical simulation of exploitation and reinjection of carbonate geothermal reservoir in Rongcheng geothermal field, Xiongan New Area[J/OL]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, (2022-12-27)[2023-01-30]. (in Chinese with English abstract)]
- [24] ZARROUK S J, O’SULLIVAN M J, CROUCHER A E, et al. Optimized numerical modeling of production from the pohipi dry steam zone: Wairakei geothermal system[C]// *Proceedings of 31 workshop on geothermal reservoir engineering Stanford University, Stanford, California. 2006.*
- [25] ROMAGNOLI P, ARIAS A, BARELLI A, et al. An updated numerical model of the Larderello –Travale geothermal system, Italy[J]. *Geothermics*, 2010, 39(4): 292 – 313.
- [26] 杨亚军, 丁桂伶, 徐巍, 等. 基于示踪试验及动态数据的北京小汤山地区地热资源量评价[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(5): 196 – 200. [YANG Yajun, DING Guiling, XU Wei, et al. Tracer test and geothermal resource quantity evaluation based on dynamic data in the Xiaotangshan area of Beijing[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(5): 196 – 200. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 杜建国, 王彩会, 孔刚, 等. 苏北农村住房条件改善清洁能源供暖示范区(沛县)地热资源勘查报告[R]. 南京: 江苏省地质调查研究院, 2022. [DU Jianguo, WANG Caihui, KONG Gang, et al. Report of geothermal resources exploration in the clean energy heating demonstration area of rural housing improvement in Northern Jiangsu (Peixian County)[R]. Nanjing: Geological Survey of Jiangsu Province, 2022. (in Chinese)]
- [28] 梅玲, 王健呈, 张华哲. 江苏省沛县朱寨镇燕牌坊地热资源勘查报告[R]. 南京: 江苏长江地质勘察院, 2015. [MEI Ling, WANG Jiancheng, ZHANG Huazhe. Geothermal resources exploration report of Yanpaifang, Zhuzhai Town, Peixian County, Jiangsu Province [R]. Nanjing: Jiangsu Yangtze River Geological Exploration Institute, 2015. (in Chinese)]
- [29] 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.
- [30] WANG Guiling, WANG Wanli, ZHANG Wei, et al. The status quo and prospect of geothermal resources exploration and development in Beijing-Tianjin-Hebei region in China[J]. *China Geology*, 2020, 3(1): 173 – 181.
- [31] 王钧, 黄尚瑶, 黄歌山, 等. 中国地温分布的基本特征[M]. 北京: 地震出版社, 1990. [WANG Jun, HUANG Shangyao, HUANG Geshan, et al. Basic characteristics of geothermal distribution in China [M]. Beijing: Seismological Press, 1990. (in Chinese)]
- [32] 江苏省地质矿产局. 江苏省及上海市区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1984: 612 – 616. [Jiangsu Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration. Monograph on the regional geology of Jiangsu Province and Shanghai City[M]. Beijing: Geology Press, 1984: 612 – 616. (in Chinese)]
- [33] 吕雅馨, 骆祖江, 徐成华. 南京汤山地区地热水资源评价[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(6): 1844 – 1853. [Lǚ Yaxin, LUO Zujiang, XU Chenghua. Evaluation of geothermal water resources in Tangshan area, Nanjing[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2020, 50(6): 1844 – 1853. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 中国地质调查局. 水文地质手册[M]. 2 版. 北京: 地质出版社, 2012: 445 – 461. [China Geological Survey. Handbook of hydrogeology[M]. 2nd ed. Beijing: Geology Press, 2012: 445 – 461. (in Chinese)].
- [35] 宾德智, 刘延忠, 郑克棣, 等. 地热资源地质勘查规范: GB/T 11615—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011. [BIN Dezhi, LIU Yanzhong, ZHENG Keyan, et al. Geologic exploration standard of geothermal resources: GB/T 11615—2010[S]. Beijing: Standard Press of China, 2021. (in Chinese)]
- [36] 曹剑峰, 迟宝明, 王文科, 等. 专门水文地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2006. [CAO Jianfeng, CHI Baoming, Wang Wenke, et al. Applied hydrogeology[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)]
- [37] 王贵玲, 李曼, 张明燕, 等. 地热资源评价方法及估算规程: DZ/T 0331—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020. [WANG Guiling, LI Man, ZHANG Mingyan, et al. Specification for estimation and evaluation of geothermal resources: DZ/T 0331—2020[S]. Beijing: Standard Press of China, 2020. (in Chinese)]

编辑: 汪美华
刘真真