

热屏障井对地下水源热泵换热影响模拟

肖 锐, 黄 坚, 王小清

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

XIAO Rui, HUANG Jian, and WANG Xiaoqing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202003036>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

半干旱地区地表-地下水系统水热运移与裸土蒸发研究

Hydrothermal transfer and bare soil evaporation in surface-groundwater systems in semi-arid areas

马稚桐, 王文科, 赵明, 黄金廷, 卢艳莹, 侯昕悦, 王一 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 7-14

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

基于断裂及高温损伤的岩石蠕变模型研究

A study of the creep model of rock considering fractures and thermal damage

李修磊, 李起伟, 李倩 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 46-56

涡轮取芯钻进工艺在干热岩钻井中的应用

A study of the application of turbine coring drilling technology to hot dry rock drilling

谭现锋, 王景广, 赵长亮, 王稳石, 翁炜, 段隆臣 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 195-202

电化学循环井耦合氧化-还原降解地下水中三氯乙烯

Electrolytic circulation well coupled with oxidation and reduction for trichloroethylene degradation in groundwater

刘洋, 袁松虎, 张耀强, 刘洋, 蔡其正, 郑云松 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 44-51

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



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202003036

热屏障井对地下水源热泵换热影响模拟

肖锐^{1,2}, 黄坚^{1,2}, 王小清^{1,2}

(1. 上海市地矿工程勘察院, 上海 200072; 2. 上海浅层地热能工程技术研究中心, 上海 200072)

摘要: 对于场地受限的地下水源热泵项目, 随着系统运行时间的增加易引发热贯通现象进而降低机组运行效率。地下水源热泵设计中, 在抽灌水井连线间布设热屏障井可改变地下水流动, 降低热量在抽灌井间的运移速度, 有利于延长热贯通发生时间并缓解热贯通程度。通过构建地下水换热模型, 模拟计算夏季制冷工况条件下 36 组热泵运行场景, 分析了热屏障井的位置, 过滤管长度及回灌量对热贯通和含水层温度场的影响规律。结果表明: 热屏障井回灌量的增加有利于提升热屏障效果, 但提升幅度随回灌量的增加逐渐减弱; 最大水位降深值随着热屏障井回灌量的增加呈线性增长; 增加热屏障井过滤管长度可提升热屏障效果, 提升效果随屏障井回灌量的增加逐渐增强。通过模型多周期、长时间模拟计算发现, 热屏障井的运行可促使回灌的冷热量集中在回灌井一侧, 对于采用冬夏季抽灌井交换运行模式的热泵系统, 可充分利用含水层储能, 提升机组运行效率。

关键词: 地下水源热泵; 换热模型; 热屏障井; 热贯通

中图分类号: P641.73

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)02-0190-09

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

XIAO Rui^{1,2}, HUANG Jian^{1,2}, WANG Xiaoqing^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Geological Engineering Exploration, Shanghai 200072, China; 2. Shanghai Engineering Technology Research Center for Shallow Geothermal Energy, Shanghai 200072, China)

Abstract: GWHP system is easy to cause the thermal breakthrough which will reduce the operation efficiency, when the site area is small. In the design of GWHP, by setting up a thermal barrier well between the pumping and recharging well can reduce the heat transfer speed between pumping and recharging well, which is conducive to prolonging the occurrence time of thermal breakthrough. 36 groups of GWHP operation scenarios under the cooling condition are simulated through heat transfer model, and the influence of the location, structure and recharge quantity of the thermal barrier well on the thermal breakthrough and the aquifer's temperature field are analyzed. The results show that the increase of recharge quantity of the thermal barrier well is conducive to improving the thermal barrier effect, but the degree of improvement decreases with the increase of recharge quantity. At the same time, with the increase of recharge quantity, the maximum drawdown will increase linearly. The location of the thermal barrier well has little influence on the aquifer temperature field and the closer the barrier well is to the recharging well, the later the thermal breakthrough time will be. Increasing the length of the filter tube in the heat barrier well can improve the thermal barrier effect, and the effect of the thermal barrier is gradually enhanced with the increase of the recharge quantity. In addition, through the long-time simulation of model, it is found that the operation of the heat barrier well can concentrate the energy near the recharging well.

收稿日期: 2020-03-30; 修订日期: 2020-05-15

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目(13dz1203100)

第一作者: 肖锐(1989-), 男, 博士, 工程师, 主要从事水文地质方面研究。E-mail: zhhxr@live.com

When the GWHP adopts the exchange operation mode of pumping and recharging well, it can make full use of the aquifer energy storage and improve the operation efficiency of heat pump.

Keywords: GWHP; heat transfer model; thermal barrier well; thermal breakthrough

地下水源热泵作为一种高效、节能、环保的空调系统,在国内外得到了快速的发展^[1-3]。虽然目前地下水源热泵技术较为成熟,但在热泵运行过程中仍存在因产生热干扰而导致机组运行效率逐步降低的现象^[4-6]。国内外学者在提高地下水源热泵运行效率方面开展了大量研究。靳孟贵^[7]、周强^[8]等通过构建数值模型,并优化抽灌水井布局,进而降低“热突破”的发生概率。傅志敏等^[9]通过模型计算发现在不发生热干扰前提下对应的最佳井间距以及井群连线与地下水流向的最佳角度。Galgaro 等^[10]以某商业大厦为例,分别针对制冷和制热期定制热泵机组最佳运行时间段,以防止抽灌井群间产生热贯通。Paksoy 等^[11]选取地下水水位变幅作为约束条件,利用数值模拟计算得到在不发生热贯通前提下的最佳抽、灌井间距。为保证机组持久高效运行,吕天奇等^[12]提出在地源热泵空调系统中加入太阳能辅助热源以提升冬季供暖温度,并经过模拟验证了该方案可以满足用户 10 年冷热负荷需求。朱小波等^[13]运用模型得出,系统采用“小流量,大温差”的运行模式可有效降低热贯通发生的概率。Russo 等^[14]研究都灵某地下水源热泵系统,发现通过存储冷却水和均衡分配换热器负荷的方法可以降低机组能耗,提高浅层地热能利用效率。Norio 等^[15]利用 FEHM 代码针对不同热量抽取方案进行数值模拟,根据能耗最小原则确定了最优方案。王洋等^[16]从抽水量和抽灌温差两方面对系统运行策略进行调整,得到最有利系统长期运行的方案。

前人研究主要集中在优化抽灌井布局、改进机组运行策略及引入辅助热源三大方面,但通过控制热量运移方向提高热泵运行效率的研究较少。为此,本文根据 Sheldon 提出的屏障井理念^[17],利用数值模拟方法探究了在地下水源热泵系统运行中热屏障井对热量运移的影响规律,对提升地下水源热泵能效具有一定借鉴意义。

1 热屏障井原理

地埋管地源热泵运行中如地层热导效率较低会造成热量在地埋管附近持续堆积,降低地源热泵系统能效。通过启用埋管换热区域左右两端的抽灌水井

以构建地下水人工流场,促使埋管周围堆积的热量均匀地转移到整个地埋管区域土壤中,增大了换热温差,从而提高了热泵能效^[18-21]。

在地下水源热泵运行中可采取改变地下水流场的方式,即通过布设热屏障井的方式降低回灌井中的冷热量流入抽水井的速度,进而延缓热贯通的产生^[17]。热屏障井工作原理见图 1。在满足冷热负荷的前提下,即保证通过换热机组的回灌量 Q_1 不变,通过加大抽水量 $Q_{总}$,并将未经换热多余的水量 Q_2 通过位于抽水井与回灌井之间的热屏障井重新回灌至含水层,其中 $Q_2=Q_{总}-Q_1$,进而延缓或阻止系统运行期内回灌井中的冷、热水进入抽水井中,在抽灌水井间起到热量屏障作用。

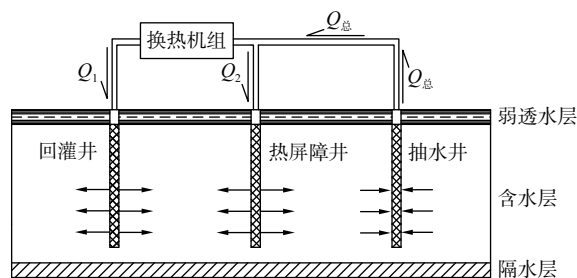


图 1 热屏障井工作原理

Fig. 1 Working principle of thermal barrier well

2 模型建立及情景设置

2.1 概念模型

以某拟建地下水源热泵项目为例^[22],利用 COMSOL Multiphysics 建立含水层水-热运移数值模型。模拟区内潜水含水层厚度为 30 m,且初始水位埋深为 10 m。由于区域内地势平坦且潜水面趋于水平,因此模型中不考虑天然地下水流动。模型四周边界设置为定水头边界;同时考虑到潜水位埋深较大,忽略气温和降水对含水层流场和温度场的影响,模型的顶、底部边界均概化为隔温隔水边界。此外,为有效地研究热屏障井对热泵运行的影响规律,将布设方案中的抽、灌水井群简化为一口抽水井和一口回灌井。回灌井水温设置为 22 ℃,回灌流量设为 2 000 m³/d。模拟工况为夏季制冷工况,模拟期共 120 d。模拟计算中含水层水文地质参数和热物性参数见表 1。

表 1 模型含水层计算参数

Table 1 The paraments of aquifer in model

计算参数	数值
地下水初始温度 $T/^\circ\text{C}$	12
渗透率 k/cm^2	3×10^{-7}
给水度 u	0.2
孔隙度 n	0.3
地下水动力黏度 $\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	1×10^{-3}
地下水比热容 $C_w/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	4.2
含水层固体颗粒比热容 $C_s/(\text{kJ}\cdot(\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}))$	0.7
地下水导热系数 $\lambda_w/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.6
含水层固体颗粒导热系数 $\lambda_s/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	2.2
地下水密度 $\rho_w/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	998.2
含水层固体颗粒密度 $\rho_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 900

为避免边界对模拟结果的影响,通过试算建立长、宽、高分别为 200, 200, 40 m 的三维模拟区。如图 2 所示,模型内抽水井与回灌井之间的距离为 60 m,且抽、灌水井均为完整井,滤管长度为 30 m。由于发生热贯通后抽水水温为一变量,故利用域点探针组件提取抽水井温度,并将其赋值到热屏障井边界上,保证计算过程中抽水温度与热屏障井回灌温度保持一致。此外,将抽水井滤管自上而下均分成 7 层,取各层温度均值作为抽水温度:

$$T_B = T_P = \frac{T_0 + T_5 + T_{10} + T_{15} + T_{20} + T_{25} + T_{30}}{7} \quad (1)$$

式中: T_B ——热屏障井回灌温度/ $^\circ\text{C}$;
 T_P ——抽水井温度/ $^\circ\text{C}$;
 $T_0, T_5, T_{10}, T_{15}, T_{20}, T_{25}, T_{30}$ ——距离滤管顶端 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 m 处水温/ $^\circ\text{C}$ 。

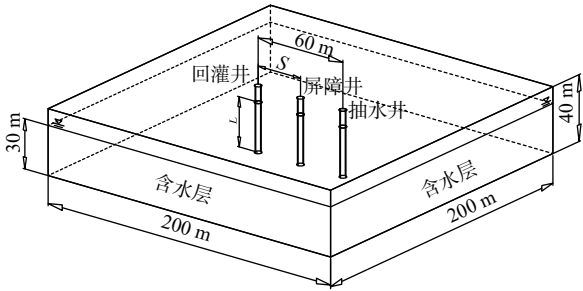


图 2 计算模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the calculation model

2.2 数学模型

根据质量守恒定律和达西定律,得到地下水流动偏微分方程^[23-25]:

$$\frac{\partial(n\rho)}{\partial t} = \nabla \cdot \rho \frac{k}{\mu} (\nabla P + \rho g) + q\rho \quad (2)$$

式中: n ——含水层孔隙度;
 t ——模拟时长/s;
 μ ——地下水动力黏滞系数/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$;
 q ——含水层源汇项/ $(\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1})$;
 ρ ——地下水密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$;
 g ——重力加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$;
 P ——地下水压力/Pa;
 k ——渗透率/ m^2 。

忽略热辐射作用,同时不考虑温度对地下水密度的影响,且多孔介质内固相和液相的热平衡瞬时完成。多孔介质传热偏微分方程为^[26]:

$$\begin{cases} (\rho C_w)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_w \nu \cdot \nabla T + \nabla \cdot E = Q_h \\ E = -\lambda_{\text{eff}} \nabla T \end{cases} \quad (3)$$

式中: $(\rho C_w)_{\text{eff}}$ ——有效容积热容/ $(\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1})$;
 λ_{eff} ——有效导热系数/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$;
 Q_h ——含水层热源汇项/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-3})$;
 ν ——地下水流速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$;
 E ——热通量/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ 。

2.3 情景设置

利用所建模型设置两类情景,探究热屏障井对热泵换热的影响,屏障井各参数变量见表 2。第一类情景主要研究屏障井位置对换热的影响,其中屏障井滤管长度保持 30 m 不变,结合 6 组不同回灌水量,共设置 18 组工况。第二类情景主要研究热泵换热中井结构即屏障井滤管长度的影响,为此设置 6 组不同滤管长度(L)的情景,在保证屏障井水平位置不变的前提下,即 $S=30$ m,结合 3 组不同屏障井回灌量(200, 800, 1 400 m^3/d),共设置 18 组工况。

表 2 热屏障井参数

Table 2 The paraments of thermal barrier well

运行参数	数值
距回灌井长度 S/m	15, 30, 45
滤管长度 L/m	5, 10, 15, 20, 25, 30
回灌水量 $Q/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$	200, 500, 800, 1 100, 1 400, 1 700

3 模拟结果及分析

3.1 屏障井位置对热泵换热影响

图 3 为不同屏障井位置条件下,制冷期末抽水温度与热贯通发生时间变化曲线。本文认定当抽水温度上升幅度大于 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 时即发生热贯通,参照陈响亮^[27]、高青^[28]等提出的热贯通程度划分方法,即为轻度热贯通发生时的阈值温度。对于无屏障井情景,运行期末

抽水温度为 14.6 °C, 相比初始地下水温提高了 2.6 °C, 热贯通发生时间为第 59 天, 运行期内热泵系统发生了重度干扰; 而对于屏障井运行场景, 其制冷期末抽水温度相对较低且热贯通发生时间较晚, 说明设置热屏障井有助于减缓热贯通发生程度。

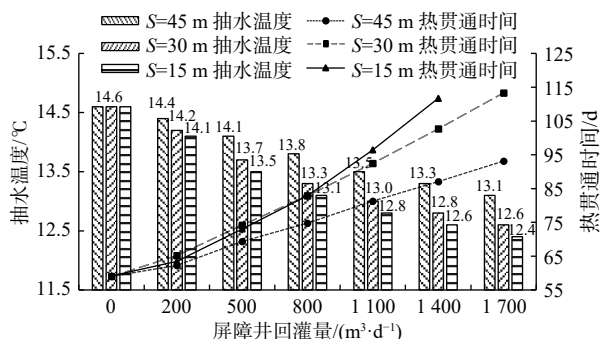


图3 不同屏障井位置条件下抽水温度及热贯通时间变化
Fig. 3 The change of the pumping water temperature and thermal breakthrough time under the different barrier well positions

运行期末抽水温度与热屏障井回灌量之间呈二次函数关系, 抽水温度随着回灌量的增大而降低, 但抽水温度下降幅度逐渐减小。此外, 当屏障井回灌量保持不变时, 屏障井离抽水井越近, 其对应的抽水温度相对越高, 主要考虑当屏障井离抽水井较近时, 屏障井中回灌水被抽水井快速抽出, 降低了热屏障作用。图3中显示不同位置屏障井对应的热贯通发生时间。随着屏障井流量的增加, 热贯通时间大体呈线性增长趋势, 且屏障井距回灌井越近, 其发生热贯通发生时间相对越晚, 当屏障井距离回灌井 15 m 且回灌量增加至 1 700 m³/d 时, 运行期内系统甚至未发生热贯通现象。

图4为制冷期末, 不同屏障井位置及回灌量情景下含水层温度场分布图。不同运行条件下对应的含水层温度变化范围整体差别不大, 主要是因为屏障井位于抽、灌水井间, 且回灌井流量保持不变, 同时, 因抽水量随着屏障井回灌量的改变而变化, 保证了系统总抽水量与总回灌量相同, 进而导致含水层温度受影响范围主要限制在回灌井与抽水井之间。

屏障井运行可在屏障井与抽水井连线间形成椭圆形状的“低温区”, 增加了热量由回灌井进入抽水井的运移距离, 进而延长了热贯通发生时间。同时, 椭圆状“低温区”的长轴距离几乎不随屏障井流量的变化而改变, 其长度为屏障井与抽水井间的直线距离。而短轴长度随着屏障井回灌流量的增加而加长, 说明屏障井回灌量的增加会导致“低温区”范围的扩大, 延

缓热贯通发生时间。值得注意的是, 当屏障井回灌量相同时, 屏障井离回灌井越近, “低温区”范围相对越大, 更有利于缓解热贯通发生程度。

3.2 屏障井位置对最大降深影响

增加屏障井回灌量可以降低热贯通程度, 但增加屏障井回灌量的同时会导致抽水量的增加, 进而加大地下水水位降深。图5为屏障井回灌量与地下水最大水位降深之间的关系。地下水最大水位降深值随着屏障井回灌量的增加呈线性增长, 屏障井回灌量每增加 300 m³/d, 地下水最大水位降深平均增加 0.3 m。此外, 结合拟合曲线斜率可知, 随着屏障井流量的增加, 不同屏障井位置对应的最大降深增长幅度差异较小, 主要因为含水层中水压力传播较快, 加之热泵工程中抽灌水井距离相对较小, 导致屏障井位置变化对最大降深影响较小。

3.3 屏障井滤管长度对热泵换热影响

图6(a)为屏障井滤管长度与运行期末抽水温度之间的关系曲线。抽水温度随着过滤管长度的增加逐渐降低。同时, 当滤管长度由 5 m 增至 30 m 时, 回灌量较小情景对应的抽水温度降幅小于回灌量较大情景。图6(b)显示增加滤管长度可推迟热贯通发生的时间, 且随着屏障井回灌流量的加大, 滤管长度对热贯通时间的影响程度逐渐增强。

图7为制冷期末抽、灌井连线方向的含水层温度场剖面图。对于屏障井回灌量较小情景, 即 Q 为 200 m³/d, 当滤管长度为 5 m 时, 抽水井上部温度较低, 下部温度较高, 以致平均抽水温度整体偏高。当回灌量保持不变且滤管长度增加至 25 m 时, 虽然滤管长度的增加可在抽水井大部分滤管过水断面周边形成“低温区”, 但考虑屏障井回灌量较小且滤管长度较长, 导致屏障井出水流速较小, 热屏障作用相对有限, 因此抽水温度相比含水层初始温度仍偏高, 进一步解释了对于屏障井回灌量较小的情景, 不同屏障井滤管长度对抽水温度影响的差异性较小。

相反, 对比于回灌量较大情景, 即 Q 为 1 400 m³/d, 抽水温度受屏障井滤管长度的影响较大。虽然回灌量的加大可导致“低温区”范围扩大, 且其温度相对较低, 但当滤管长度较小时, 回灌热量仍会从屏障井底部进入抽水井中, 进而导致抽水温度相对较高, 而滤管长度较大时, 即 L 为 25 m, 热量几乎全部被屏障井阻止在回灌井一侧, 抽水温度几乎不受回灌井影响。

为探究热屏障井对热泵系统可持续运行的影响, 结合目前常采用的冬夏季抽灌井交换运行方式, 对模

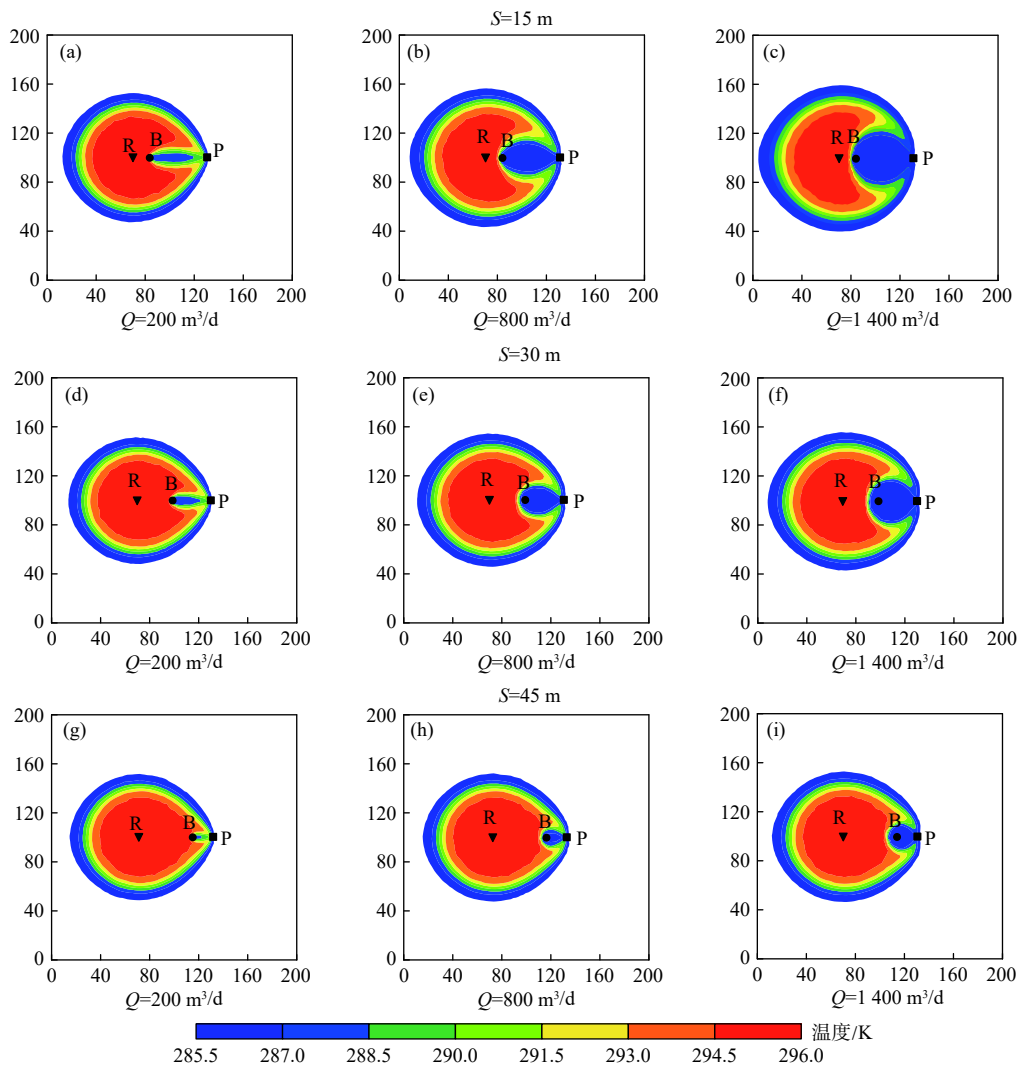


图 4 不同热屏障井位置及回灌量条件下含水层温度场分布

Fig. 4 Distribution of aquifer temperature under different locations and recharge quantity of the thermal barrier well

注: R、B、P 分别代表回灌井、热屏障井和抽水井。

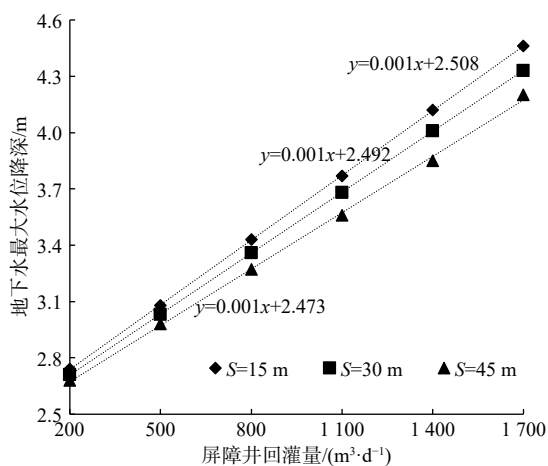


图 5 不同屏障井位置及流量条件下地下水最大水位降深变化

Fig. 5 Variation of maximum drawdown under different locations and recharge quantities of the thermal barrier well

型进行多周期、长时间模拟计算。对于布设有热屏障井的换热系统,通过管道的改装可实现冬夏季抽灌井的互换,见图 8。对于夏季制冷工况,假设图中屏障井左侧为抽水井,右侧为回灌井,此时需打开阀门 1,关闭阀门 2。冬季供暖工况,屏障井右侧为抽水井,左侧为回灌井,此时打开阀门 2,关闭阀门 1。

针对采用抽灌井交换运行方式的“带屏障井”系统和“无屏障井”系统分别进行长时间、多周期模拟。两系统夏季工况运行参数与前文保持一致,冬季工况回灌量与夏季工况一致,回灌温度设为 5℃。此外,对于“带屏障井”换热系统,屏障井设置在抽灌井连线中心位置,滤管长度为 30 m,屏障井回灌量设为 800 m³/d。年内系统运行时间顺序为:制冷(120 d)—停运(60 d)—供暖(120 d)—停运(65 d),模型共运行 3 年。模拟期

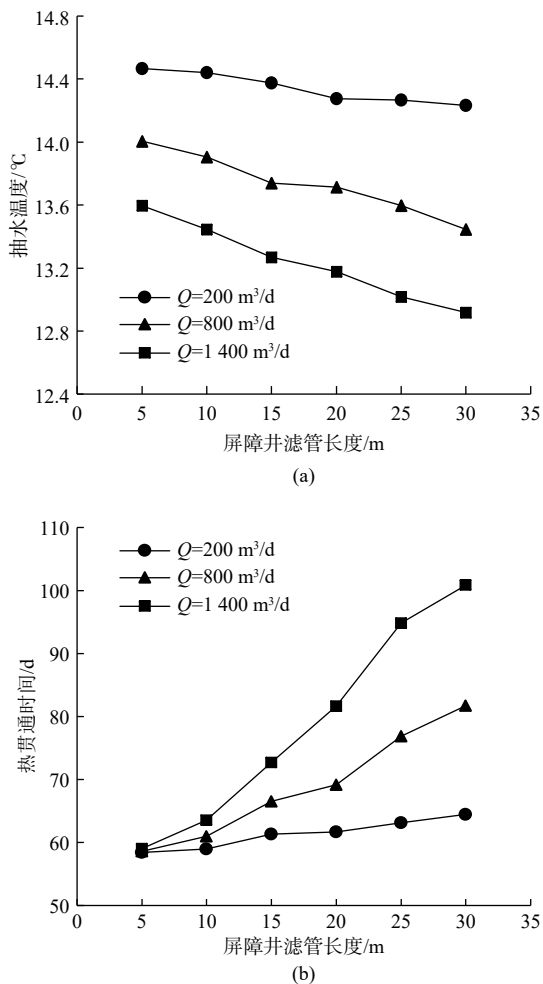


图 6 不同屏障井滤管长度条件下抽水温度和热贯通时间变化
Fig. 6 The change of pumping water temperature and thermal breakthrough time under different lengths of filter tube in thermal barrier well

各系统抽水温度变化曲线见图 9。

由图 9 可知,不同系统对应的抽水温度变幅整体差别不大。为了更好地评价两种模式的运行效果,提取两种系统模式在冬、夏季末期的抽水温度进行分析,见图 10。

图 10 显示,夏季制冷期“带屏障井”模式下的抽水温度低于“无屏障井”模式。冬季供暖期“带屏障井”模式对应的抽水温度高于“无屏障井”模式。因此,热屏障井的运行有利于储能利用率的提升,主要考虑热屏障井的运行可促使冷、热量集中在回灌井一侧,当下个季度系统进行抽灌井交换运行时,可充分利用上季度存储在含水层中的能量,提升机组运行效率。

加大屏障井回灌量,可提升热屏障效果,但增大回灌量会加大水位降深,易引发地质环境问题,因此实际工程中需结合允许水位降深值及回灌效率设置

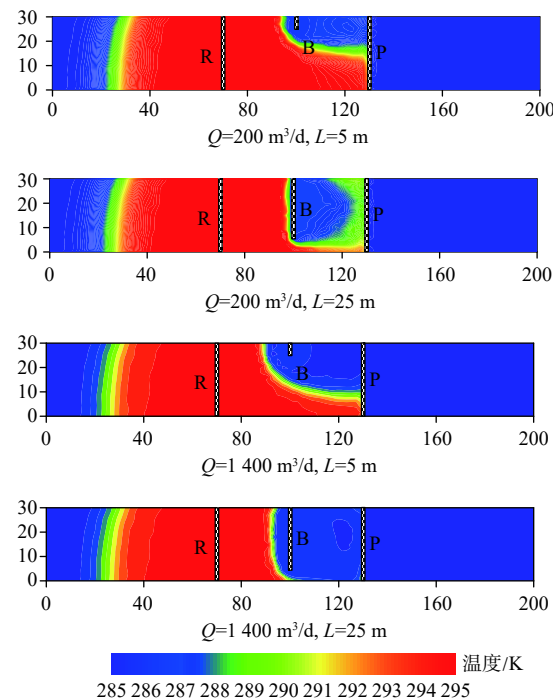


图 7 不同屏障井滤管长度及回灌量条件下含水层温度场剖面
Fig. 7 The profile of aquifer temperature field under different filter tube lengths and recharge quantity of thermal barrier wells
注: R、B、P 分别代表回灌井、热屏障井和抽水井。

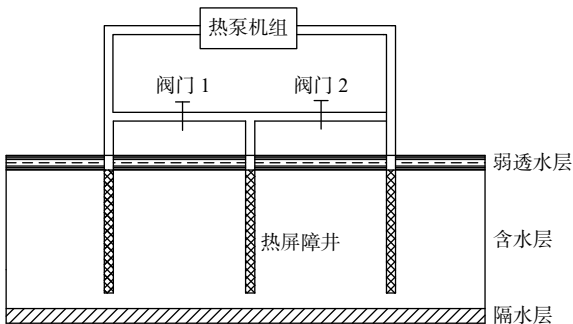


图 8 抽灌井交换运行模式下屏障井运行示意图
Fig. 8 Diagram of thermal barrier well operation under the mode of exchange operation of pumping and recharging wells

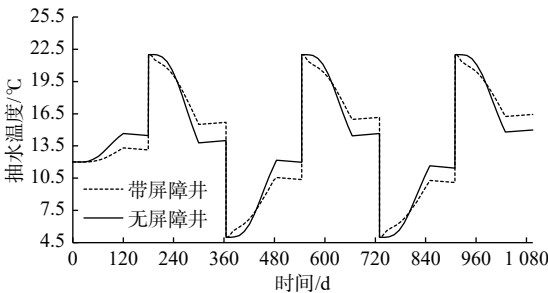


图 9 不同系统情景下抽水温度变化
Fig. 9 Variation of pumping watertemperature under different system scenarios

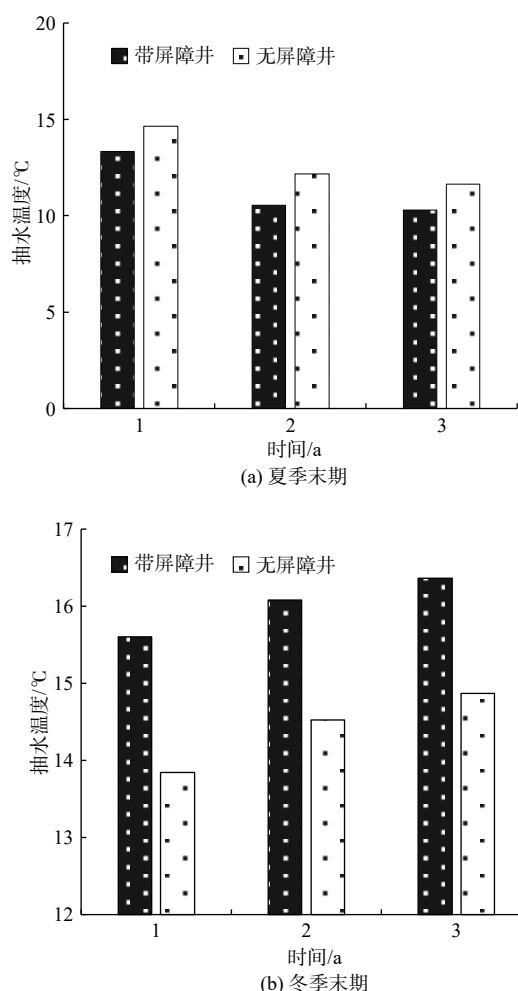


图 10 夏、冬季末期抽水温度对比

Fig. 10 Comparison of pumping water temperature at the end of summer and winter

最佳屏障井回灌量。此外,因布设热屏障井会占用一定的场地空间,前期需对场地平面布局进行优化。同时,为减小系统投资,需对热屏障井埋设深度进行优化。当系统热贯通程度较低,可适当缩短屏障井的埋设深度,而对于热贯通程度较严重的场地,屏障井深度的增加可有效提升热屏障效果,但同时会加大建井成本,此时需根据场地实际情况,综合考虑是否需结合其它控制方式,如引入辅助冷热源,优化机组运行策略等。

4 结论

(1)在抽、灌水井间布设热屏障井可以减缓地下水源热泵热贯通程度,随着屏障井回灌量的增加,抽水温度逐渐下降且下降幅度逐步缩小,同时热贯通发生时间与最大降深值随回灌量的增加呈现线性增长趋势。

(2)屏障井位置及回灌量的变化对整个含水层温

度场变化范围影响不大,但屏障井与抽水井之间的椭圆状“低温区”范围随着回灌量的增加而扩大,且屏障井离回灌井越近,其范围越大,越有利于延缓热贯通发生。

(3)增加屏障井滤管长度可提升热屏障效果,但对于回灌量较小的情景,提升效果较小。随着回灌量的增大,滤管长度对抽水温度的影响程度逐渐增强。

(4)对于采用冬夏季抽灌井交换运行模式的热泵系统,热屏障井的运行可充分利用含水层储能,提升机组运行效率。

参考文献 (References) :

- [1] SANNER B, KARYTSAS C, MENDRINOS D, et al. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe[J]. *Geothermics*, 2003, 32(4): 579 – 588.
- [2] 周彦章,周志芳,吴蓉,等. 地源热泵系统地下水热量运移阶段特性模拟研究[J]. *水文地质工程地质*, 2011, 38(5): 128 – 134. [ZHOU Yanzhang, ZHOU Zhifang, WU Rong, et al. Simulation study of the stage-characteristics of groundwater thermal transport in aquifer medium for GWHP System[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(5): 128 – 134. (in Chinese with English abstract)]
- [3] QI Z S, GAO Q, LIU Y, et al. Status and development of hybrid energy systems from hybrid ground source heat pump in China and other countries[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014, 29(7): 37 – 51.
- [4] 徐生恒,彭涛,王秉忱,等. 地源热泵技术研究新进展[J]. *地下水*, 2016, 38(2): 1 – 8. [XU Shengheng, PENG Tao, WANG Bingchen, et al. The new developments of ground source heat pump research[J]. *Ground Water*, 2016, 38(2): 1 – 8. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 刘洪战,田源,杨坡. 细颗粒沉积物分布区地下水源热泵抽灌井施工工艺探讨[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(1): 36 – 40. [LIU Hongzhan, TIAN Yuan, YANG Po. A discussion of the construction technology of pumping and injection Wells in the fine particle sediment distribution area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(1): 36 – 40. (in Chinese with English abstract)]
- [6] VERDA V, BACCINO G, SCIACOVELLI A, et al. Impact of district heating and groundwater heat pump

- systems on the primary energy needs in urban areas[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 40: 18 – 26.
- [7] 靳孟贵, 汤庆佳, 栗现文. 应用水热运移数值模拟优化地下水源热泵系统抽灌井布局[J]. 地质科技情报, 2012, 31(5): 128 – 135. [JIN Menggui, TANG Qingjia, LI Xianwen. Optimum location of pumping and injection Wells of groundwater heat exchange system using numerical modeling of water and heat transport[J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(5): 128 – 135. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 周强, 王楠. 基于FLOW HEAT的地下水源热泵一抽多灌井群优化布置数值研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(9): 124 – 127. [ZHOU Qiang, WANG Nan. Numerical simulation of ground-water heat pump system of pumping with multi-irrigation based on FLOW HEAT[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(9): 124 – 127. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 傅志敏, 向衍, 高西望. 井点布置对采能区地下水温度场的影响[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2010, 31(6): 34 – 38. [FU Zhimin, XIANG Yan, GAO Xiwang. Influences of well point arrangement on ground water temperature field in energy mining areas[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2010, 31(6): 34 – 38. (in Chinese with English abstract)]
- [10] GALGARO A, CULTRERA M. Thermal short circuit on groundwater heat pump[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 57(1): 107 – 115.
- [11] PAKSOY H, ANDERSSON O, ABACI S, et al. Heating and cooling of a hospital using solar energy coupled with seasonal thermal energy storage in an aquifer[J]. *Renewable Energy*, 2000, 19(1): 117 – 122.
- [12] 吕天奇, 张延军, 于子望, 等. 地下水源热泵系统和太阳能辅助热源系统的地温场数值模拟研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(1): 79 – 83. [LYU Tianqi, ZHANG Yanjun, YU Ziwan, et al. Numerical simulation study on geothermal field of ground water heat pump system and solar assisted heat source system[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(1): 79 – 83. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 朱小波, 李幽铮, 周彦章. 地源热泵系统冷负荷设计方案变化地下水热量运移模拟[J]. 勘察科学技术, 2010(5): 13 – 17. [ZHU Xiaobo, LI Youzheng, ZHOU Yanzhang. Simulation of groundwater thermal migration for GWHP system with different cooling load design[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2010(5): 13 – 17. (in Chinese with English abstract)]
- [14] RUSSO S L, TADDIA G, BACCINO G, et al. Different design scenarios related to an open loop groundwater heat pump in a large building: Impact on subsurface and primary energy consumption[J]. *Energy & Buildings*, 2011, 43(2): 347 – 357.
- [15] NORIO T, KASUMI Y, GEORGE Z. Model study of the thermal storage system by FEHM code[J]. *Geothermics*, 2003, 32(4): 603 – 607.
- [16] 王洋, 王小清, 吕亮. 基于监测数据的地下水源热泵系统运行策略优化[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(5): 153 – 158. [WANG Yang, WANG Xiaoqing, LYU Liang. Operation strategy optimization of groundwater source heat pump based on monitoring data[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2019, 17(5): 153 – 158. (in Chinese with English abstract)]
- [17] SHELDON H A, SCHAUBS P M, RACHAKONDA P K, et al. Groundwater cooling of a supercomputer in Perth, Western Australia: hydrogeological simulations and thermal sustainability[J]. *Hydrogeology Journal*, 2015, 23(8): 1831 – 1849.
- [18] 彭涛, 孙铁, 王秉忱, 等. 地下水人工流场能效增强技术在浅层地热能开发中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(6): 169 – 174. [PENG Tao, SUN Tie, WANG Bingchen, et al. The energy efficiency enhancement technique of soil source heat pump system through groundwater artificial flow field[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(6): 169 – 174. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 赵军, 张志英, 刘九龙, 等. 人工流场影响下埋管管群换热的模拟研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(8): 835 – 840. [ZHAO Jun, ZHANG Zhiying, LIU Jiulong, et al. Simulation study on heat transfer of buried pipe banks under the influence of artificial flow field[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2016, 49(8): 835 – 840. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 杨露梅, 鄂建, 朱明君, 等. 典型埋管系统模拟工况地温场特征研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(2): 178 – 183. [YANG Lumei, E Jian, ZHU

- Mingjun, et al. Characteristics of the ground temperature of the typical Ground-Source Heat Pumps system in Nanjing[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(2): 178 – 183. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 岳丽燕, 孟令军, 赵苏民, 等. 天津市浅层地热能存在的热堆积问题及解决方法探讨[J]. *地质调查与研究*, 2017, 40(1): 76 – 80. [YUE Liyan, MENG Lingjun, ZHAO Sumin, et al. The cold & heat accumulation problem and solution methods of the shallow geothermal resource in Tianjin[J]. *Geological Survey and Research*, 2017, 40(1): 76 – 80. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 朱天奎. 地下含水层蓄能特性模拟实验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013. [ZHU Tiankui. Simulation experiment research on storage characteristic of underground aquifer[D]. Changchun: Jilin University, 2013.(in Chinese with English abstract)]
- [23] 孔祥言, 李道伦, 徐献芝, 等. 热-流-固耦合渗流的数学模型研究[J]. *水动力学研究与进展(A辑)*, 2005, 20(2): 269 – 275. [KONG Xiangyan, LI D Lianlun, XU Xianzhi, et al. Study on the mathematical models of coupled thermal-hydrological-mechanical (THM) processes[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2005, 20(2): 269 – 275. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 张永杰, 束龙仓, 温忠辉, 等. 人工回灌对地下水年龄分布规律的影响[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(1): 8 – 14. [ZHANG Yongjie, SHU Longcang, WEN Zhonghui, et al. Effect of artificial recharge on groundwater age distribution[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(1): 8 – 14. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 曹潇元, 侯德义, 胡立堂. 甘肃北山区域地下水流数值模拟研究[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(2): 9 – 16. [CAO Xiaoyuan, HOU Deyi, HU Litang. Numerical simulation of regional groundwater flow in the Beishan area of Gansu[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(2): 9 – 16. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 李宏卿, 曾昭发, 刘四新, 等. 基于COMSOL Multiphysics的长白山天池多物理场耦合响应研究[J]. *地球物理学进展*, 2017, 32(4): 1779 – 1783. [LI Hongqing, ZENG Zhaofa, LIU Sixin, et al. Study on coupling response of multiphysical field around Tianchi lake of Changbaishan volcano based on COMSOL Multiphysics[J]. *Progress in Geophysics*, 2017, 32(4): 1779 – 1783. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 陈响亮. 抽灌井群热交互性及其布控特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011. [CHEN Xiangliang. Study on thermal interaction and its control in the field of pumping/injecting well groups[D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 高青, 周学志, 江彦, 等. 地能利用过程抽灌井区热贯通及其定量分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2012, 20(3): 447 – 454. [GAO Qing, ZHOU Xuezhi, JIANG Yan, et al. Quantitative analysis of thermal breakthrough in pumping and injecting well group area during earth energy utilization[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2012, 20(3): 447 – 454. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳