

南京地区地源热泵系统优化及时间效应研究

范琦, 袁林山, 赵存法, 田蓉

Study on optimization and time effect of ground-source heat pump system in Nanjing

FAN Qi, YUAN Linshan, ZHAO Cunfa, and TIAN Rong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311052>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

热屏障井对地下水源热泵换热影响模拟

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

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

安阳市地下水源热泵系统建设水资源管理区划研究

A study of the water resources management and division of the groundwater heat pump system construction in Anyang

朱文举, 平建华, 侯俊山, 宁艺武, 耿文斌 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 200–208

某氨氮污染地下水抽提-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

基于LoRa的地质灾害分布式实时监测系统设计

Design of the distributed real-time monitoring system for geological hazards based on LoRa

郭伟, 王晨辉, 李鹏, 孟庆佳 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 107–113

系统维度对变密度溶质运移的影响研究

Effect of the system dimensionality on variable-density solute transport

叶逾, 蔡芳敏, 谢一凡, 井森, 鲁春辉 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 146–153

基于颗粒识别分析系统的碎屑流堆积物颗粒识别和统计方法研究

Particle identification and statistical methods of a rock avalanche accumulation body based on the particle analysis system

陈达, 许强, 郑光, 彭双麒, 王卓, 何攀 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 60–69



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311052

范琦, 袁林山, 赵存法, 等. 南京地区地源热泵系统优化及时间效应研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(4): 233-242.

FAN Qi, YUAN Linshan, ZHAO Cunfa, et al. Study on optimization and time effect of ground-source heat pump system in Nanjing[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(4): 233-242.

南京地区地源热泵系统优化及时间效应研究

范琦, 袁林山, 赵存法, 田蓉
(江苏省地质局, 江苏南京 210018)

摘要: 地埋管换热器孔间距的合理设计是开发侵蚀堆积平原地区浅层地热能时需首先解决的问题。为了获得能供设计参考的地埋管换热器孔间距, 确保地源热泵系统长期稳定运行, 依托南京市秦淮区石门坎 102 号地源热泵试验工程, 通过温度监测和数值模拟方法, 研究了地埋管换热器孔间距和地源热泵系统 10 a 运行的时间效应, 获得了南京侵蚀堆积平原地区地埋管换热器孔合理间距和运行方式。结果显示: (1) 夏季工况、夏季后恢复工况、冬季工况、冬季后恢复工况的完整运行周期内, 地层温度经历升温、降温、缓慢降温、基本恢复的周期性变化; (2) 南京侵蚀堆积平原地区经济合理的地埋管换热器孔间距为 4.0 m; (3) 采取夏季制冷时间和冬季制热时间相等的运行方式, 延长夏季后恢复工况, 可确保地源热泵系统长期稳定运行。结果能为南京地区地埋管的设计和浅层地热能工程研究提供科学依据。

关键词: 时间效应; 侵蚀堆积平原; 地源热泵系统; 数值模拟

中图分类号: P314; TK523

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)04-0233-10

Study on optimization and time effect of ground-source heat pump system in Nanjing

FAN Qi, YUAN Linshan, ZHAO Cunfa, TIAN Rong
(Jiangsu Bureau of Geology, Nanjing, Jiangsu 210018, China)

Abstract: The reasonable design of hole spacing for buried heat exchangers is the first issue to be solved when developing shallow geothermal energy in the Nanjing erosion and accumulation plain area. In order to obtain the hole spacing for design reference and ensure ground-source heat pump system to operate long and stably, based on the ground-source heat pump test project at No. 102 Shimenkan, Qinhua District of Nanjing, the hole spacing of ground heat exchanger and time effect of 10-year operation with ground-source heat pump system have been studied with the temperature monitoring system and numerical simulation method, and the hole spacing of ground heat exchanger and the operation mode have been obtained. The results show that : (1) during the complete operation cycle of summer, post summer recovery, winter and post winter recovery working conditions of ground-source heat pump system, formation temperature undergoes periodic change of heating, cooling, slow cooling and basic recovery. (2) The economical and reasonable hole spacing of ground heat exchanger is 4.0 meters suitable for the erosion accumulation plain of Nanjing. (3) In order to eliminate the heat accumulation during the summer working condition and promote the service life of ground-source heat pump system, the operation mode of equal cooling time in the summer and heating time in the winter is suggested, and the post summer recovery working

收稿日期: 2023-11-15; 修订日期: 2024-02-05

投稿网址: www.swd zgcdz.com

基金项目: 江苏省科技项目基础研究计划项目(自然科学基金 BK20161056)

第一作者: 范琦(1981—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为水文地质、环境地质。E-mail: fq515@163.com

condition is extended as much as possible. This study can provide scientific basis for the design of buried pipes and shallow geothermal energy engineering research in the Nanjing area.

Keywords: time effect; erosion accumulation plain; ground-source heat pump system; numerical simulation

与深层地热能资源相比,浅层地热能资源是一种开发成本较低、可再生的新型能源,利用地源热泵技术开发浅层地热能很多地区得到了应用^[1-5]。地源热泵系统一般由地埋管换热器和热泵系统组成。地埋管换热器孔间距的合理性和热泵系统长期运行的稳定性关系到地源热泵系统的经济性和有效性^[6-8]。

关于上述问题,许多学者在不同地区从不同角度开展了相关研究。宋小庆等^[9]、鄂建等^[10]、张杰等^[11]分别探讨了适合河北、江苏、贵州等地区的地源热泵系统地埋管换热器孔间距与不同工况下冷热失衡的关系以及地温场综合利用效率的优化等;杨露梅等^[12]在南京某地埋管热泵工程布设监测孔拟合了地温场的变化,指出在埋管设计中选择埋管间距大于3 m产生的热影响较小;刘爱华等^[13]研究了地埋管换热区地温垂向深度的影响,得出监测区温度多数无法恢复至初始地温的结论,建议适当调整运行时间才有利于热泵系统长期运行;李新国等^[14]利用天津的地源热泵试验工程,研究了不同回填物对换热器的传热性能及土壤环境温度场的影响;李嘉舒等^[15]提出了一种在地埋管实际热冷负荷动态变化条件下,计算地埋管换热器影响半径的简单数学方法。这些研究为南京地区地源热泵系统的优化提供了有益的参考。

南京地处长江中下游平原地区,地貌类型主要为侵蚀堆积平原,气候属于典型的夏热冬冷地区,夏季制冷和冬季取暖的需求都很大,目前南京浅层地热能资源的应用面积以每年约 $40 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的速度增长^[16],匹配南京侵蚀堆积平原地区经济合理的地埋管换热器孔间距,确保地源热泵系统达到设计运行年限显得非常重要。鉴于此,本文依托江苏省南京市秦淮区石门坎102号地源热泵试验工程,布设温度监测系统,分析了一个完整地源热泵系统运行周期的地层温度变化特征,并用数值模拟软件进行了10 a的时间效应研究,以期获得南京侵蚀堆积平原地区经济合理的地埋管换热器孔间距,同时为工程地质条件类似地区的浅层地热能开发设计提供技术参考。

1 研究区工程地质条件及综合物性特征

为了给南京市秦淮区石门坎102号周围建筑物应用地源热泵系统时提供设计参数,选择102号周围一

个场地作为研究区(图1),进行地源热泵试验工程。



图1 研究区监测孔位置示意图

Fig. 1 Landform map and work area map of the research area

研究区是南京地区典型的松散层厚度较小、基岩埋藏浅和地下水极不丰富的侵蚀堆积平原地貌^[17-18],地层从上至下分别为杂填土①-1、素填土①-2、杂填土①-3(局部分布)、粉质黏土②-1、粉质黏土②-2、粉质黏土③、全风化泥质粉砂岩④、强风化泥质粉砂岩⑤-1、中风化泥质粉砂岩⑤-2A和 中风化粉砂岩⑤-2B。研究区稳定地下水位埋深为2.89~3.55 m,地下水类型为潜水和裂隙水;潜水赋存于①-1杂填土、①-2素填土和①-3杂填土中,赋水量小,大气降水及侧向渗流补给,自然蒸发和侧向渗流排泄;裂隙水赋存于全风化、强风化和中风化泥质粉砂岩、中风化粉砂岩中,赋水量小。

岩土综合热物性主要参数^[18]及测试结果见表1。

2 工作方法

通过地温监测数据,分析土壤中温度分布及随时间的变化特征,在此基础上建立地埋管换热器孔周围地层温度场的物理模型和数学模型^[19-21],根据地源热泵系统10 a运行的时间效应的数值模拟,预测地埋管换热器孔热作用半径随机组运行时间的发展趋势,判断地埋管换热器孔间距设计能否满足地源热泵系统长期运行的要求。

2.1 温度场监测系统

在研究区布置了呈三角形的3个钻孔B、C和D孔。B孔为地埋管换热器孔,C、D孔为温度测试孔,B、C孔间距为2 m,B、D孔间距为4 m。在3个孔中

表 1 岩土综合热物性参数测试结果

Table 1 Parameters of the rock-soil thermal properties

编号	深度/m	名称	含水率/%	密度/(g·cm ⁻³)	孔隙率/%	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	比热/ (J·g ⁻¹ ·K ⁻¹)	热扩散率/ (10 ⁻⁵ m ² ·s ⁻¹)
1	1.1~1.3	杂填土	27.6	1.850	0.465	0.53	1.59	2.30
3	3.1~3.3	素填土	25.8	1.977	0.420	1.12	1.53	4.79
4	4.1~4.3	粉质黏土	25.9	1.957	0.426	1.39	1.56	5.94
8	8.1~8.3	粉质黏土	25.8	1.978	0.420	1.00	1.47	4.46
11	12.3~12.5	粉质黏土	22.3	1.995	0.398	1.10	1.47	4.86
14	17.1~17.3	粉质黏土	22.3	2.001	0.396	1.52	1.57	6.30
Y13	23.1~23.3	强风化泥 质粉砂岩	24.2	2.044	0.393	1.15	1.56	4.64
岩1	30.1~30.2	中风化泥 质粉砂岩	3.6	2.433	0.133	1.77	1.01	9.36
岩2	40.3~40.5	中风化泥 质粉砂岩	2.9	2.488	0.108	1.64	1.04	8.21
岩3	50.3~50.5	中风化 粉砂岩	4.0	2.435	0.136	1.87	1.02	9.79
岩4	60.3~60.5	中风化 粉砂岩	6.3	2.538	0.119	1.56	1.07	7.45
岩5	70.3~70.5	中风化 粉砂岩	4.2	2.549	0.097	1.71	0.99	8.78
岩6	80.3~80.5	中风化 粉砂岩	5.6	2.578	0.099	1.93	0.92	10.51

沿孔壁方向布置了经济实用的 PT100 铂电阻温度传感器, 深度分别为 11.5、20.5、80.0 m, 对应于粉质黏土、强风化泥质粉砂岩和 中风化粉砂岩(图 2)。

钻孔用 1 : 4 的膨润土、细砂回填 2 d 后, 在 B 孔进行了模拟夏季、冬季工况的散热试验和岩土初始平

均温度测试(表 2)。由表 2 可知: 夏季工况测试孔的总换热量为 6.2 kW, 单位管长换热量 62 W/m; 冬季工况测试孔的单位管长换热量为 38 W/m; 深度 18.0 m 以下, 地温稳定在 18℃。

表 2 模拟工况测试结果

Table 2 Results of the rock-soil thermal response test

参数类型	参数值
埋管内流体流量/(m ³ ·h ⁻¹)	1.2
埋管内流体流速/(m·s ⁻¹)	0.628
钻孔岩土初始平均温度/℃	18.0
埋管进水温度/℃	37.0
埋管出水温度/℃	32.4
进出水温差/℃	4.6
进出口平均水温/℃	34.7
总散热量/kW	6.2
单位管长散热量/(W·m ⁻¹)	62.0
地层平均换热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	3.76
冬季进出水平均温度/℃	7.5
冬季平均取热量/(W·m ⁻¹)	38.0

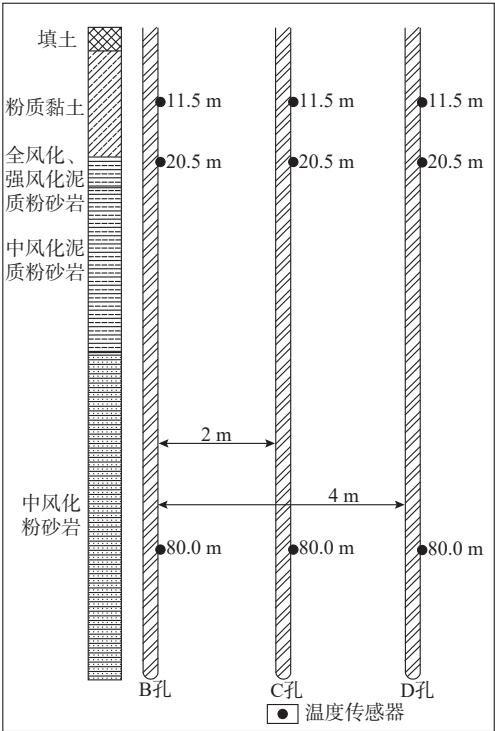


图 2 温度监测系统布设图

Fig. 2 Layout diagram of temperature sensors

2.2 时间效应数值模拟

在地源热泵系统运行过程中, 存在地源热泵系统运行冷热失衡的可能性, 导致地源热泵系统的运行时间达不到设计要求, 因此, 有必要进行地源热泵系统的时间效应分析。浅层地热能 在岩土层中的传热是一个非常复杂的过程[22-28]。根据研究区的实际情况, 采用纯导热模式进行时间效应的数值模拟。

为了建立地源热泵系统的换热模型, 参考已有研

究^[29-33]进行以下假设: (1)岩土层的初始温度均匀,且被近似为无限大的传热介质; (2)岩土体具有稳定的热物理性质,忽略埋管换热器孔内热容的影响,直接将岩土体温度响应反映在钻孔壁上; (3)考虑岩土层、所含水和空气的导热系数随温度的变化进行分析; (4)不考虑埋管换热器与岩土体间的接触热阻。采用 Flow-3D 数值模拟软件对试验工程的地源热泵系统进行了三维建模(图 3),岩土层从上至下分为 5 层:填土、粉质黏土、全风化和强风化泥质粉砂岩(全风化泥质粉砂岩、强风化泥质粉砂岩单层厚度不超过 2 m,两套地层合二为一)、中风化泥质粉砂岩和中风化粉砂岩。按照式(1)分别计算各岩土层的导热系数:

$$\lambda_i = \lambda_{si} \cdot (1 - \varepsilon) + \varepsilon[\lambda_w \cdot \phi + \lambda_g \cdot (1 - \phi)] \quad (1)$$

式中: λ_i ——第 i 岩土层的导热系数/(W·m⁻¹·K⁻¹);

λ_{si} ——第 i 岩土层中固体颗粒的导热系数/(W·m⁻¹·K⁻¹);

λ_w ——岩土层中所含水的导热系数/(W·m⁻¹·K⁻¹),取 0.59;

λ_g ——岩土层所含空气的导热系数/(W·m⁻¹·K⁻¹),取 0.027;

ε ——孔隙率/%;

ϕ ——饱和度/%。

初始条件: $\tau=0$ 时, $t(x, y, z)=t(0)$ 。

边界条件: (1)埋管换热器孔壁施加恒定热流; (2)模型的外边界都是绝热、绝湿的,壁面速度为零,无滑移; (3)换热管壁为耦合壁面; (4)换热管流体入口为速度入口,出口为压力出口且埋管换热器孔远端边界采用恒温边界,远端边界外不受温度影响,远端边界根据相邻埋管换热器孔间距进行调整,但不

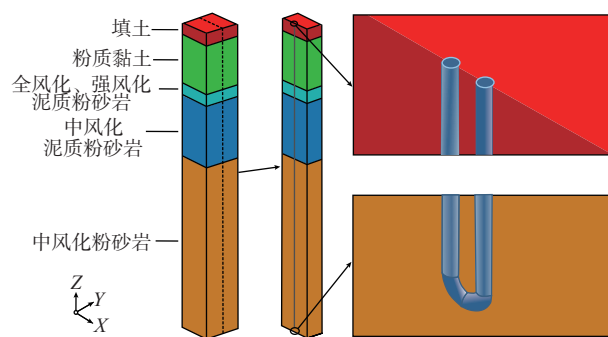


图 3 地源热泵系统 Flow-3D 热交换模型图

Fig. 3 Heat change model of ground-source heat pump system with Flow-3D

小于 1 倍相邻埋管换热器孔间距; (5)土体深度方向超过管道 1 m。利用 Flow-3D 软件,对模型以 0.5 m×0.5 m 的单元网格进行网格剖分。

控制方程使用隐式进行非稳态计算,计算过程中根据换热进行的剧烈程度改变计算步长。初始传热较剧烈,时间步长设为 10 s,在系统运行 100 h 和 10 000 h 后,步长分别设为 600 s 和 6 000 s,以提高计算速度。

为了得到埋管换热器孔的最小影响距离且考虑地源热泵系统的使用寿命,对深度 11.5、20.5、80.0 m 处,埋管换热器孔间距为 2、4、6 m,运行时长为 3、5、10 a,进行了完整运行周期计算,共进行 27 次模拟。

3 结果

3.1 夏季工况及夏季恢复工况温度场特征

地源热泵系统于 2017 年 7 月 6 日上午 9 点开始运行,9 月 10 日夏季工况结束;9 月 11 日进入夏季后恢复工况,11 月 5 日结束。夏季工况运行时间为星期一至星期五的 8:30—17:30,记录 B、C 和 D 孔深度 11.5、20.5、80.0 m 的地层中每天 18 时的温度数据(图 4)。

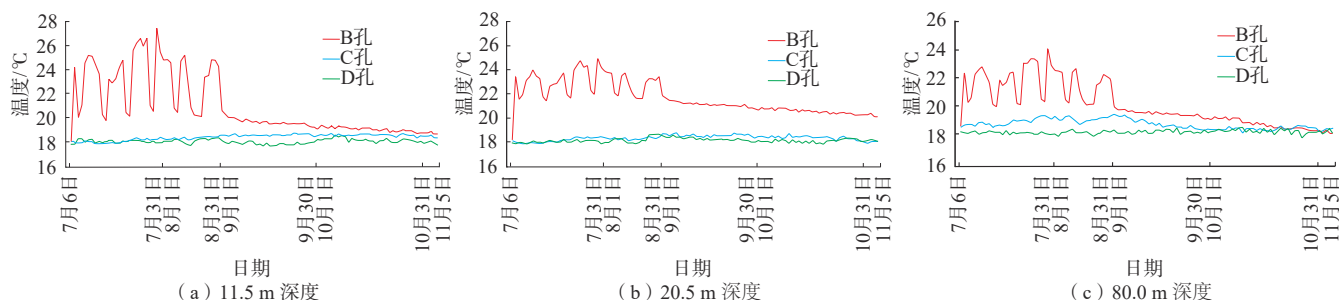


图 4 夏季工况、夏季后恢复工况 B、C、D 孔不同深度温度曲线图

Fig. 4 Temperature of different depth for B, C and D hole during the summer and the post summer recovery working conditions

从图 4(a)可以看出:夏季工况时,B 孔温度起伏大,表现为工作日升温快,休息日降温也快,至 7 月 27

日,温度达到了最大值 27.5 °C; C、D 孔温度一直缓慢上升,但 C 孔温度一直大于 D 孔温度,至 9 月 5 日温

度上升至最大值;C孔在7月23日,温度有小幅上升,而D孔在8月14日才有微弱上升;进入夏季后恢复工况,B孔温度一直处于恢复中,至11月5日,与岩土初始平均温度相比升高了0.5℃,达到了18.5℃,C、D孔温度缓慢恢复,至11月5日已基本恢复至岩土初始平均温度。

从图4(b)可以看出:夏季工况时,B孔温度起伏平稳,工作日温度升高,休息日温度降低,至7月27日,温度达到了最大值25℃;C、D孔温度一直缓慢上升,但C孔温度一直大于D孔温度,至9月5日温度上升至最大值;C孔在7月23日,温度有小幅上升,而D孔在8月4日才有微弱上升;进入夏季后恢复工况,B孔温度一直处于恢复之中,至11月5日,与岩土初始平均温度相比升高了2℃,达到了20℃,C、D孔

缓慢恢复,至11月5日已恢复至岩土初始平均温度。

从图4(c)可以看出:夏季工况时,B孔温度起伏较大,至7月27日,温度达到了最大值24℃;C、D孔温度一直缓慢上升,但C孔温度一直大于D孔温度,至9月5日温度上升至最大值;C孔在7月11日,温度有小幅上升,D孔在8月6日才有微弱上升;进入夏季后恢复工况,B、C、D孔温度一直处于恢复中,至11月5日已基本恢复至岩土初始平均温度。

3.2 冬季工况温度场特征

冬季工况始于2017年11月27日,结束于2018年的3月1日,然后进入2个月的冬季后恢复工况。因为监测仪器故障原因,只有11月29日至12月31日连续的B、C和D孔18时的温度监测数据(图5)。

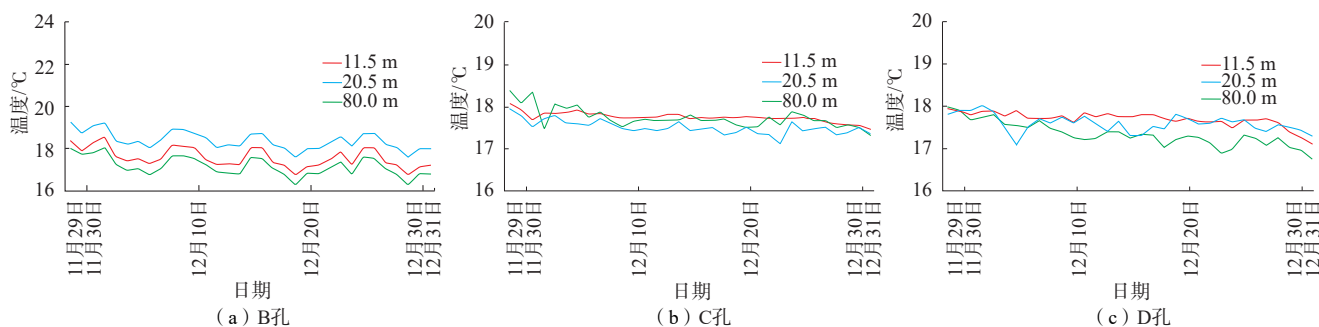


图5 冬季工况B、C、D孔11.5, 20.5, 80.0 m深度温度曲线图

Fig. 5 Temperature curve at depths of 11.5, 20.5 and 80.0 meters for B, C, D hole during the winter working condition

从图5可以看出:冬季工况时,B孔各深度温度一直处于明显变化中,工作日温度降低,休息日温度迅速上升,但各深度温度上升及降低的幅度都较小,且幅度相近,地埋管换热器孔壁周围各深度岩土层温度降低了约2℃,说明冬季工况1个月的运行,对地埋管换热器孔壁及周围岩土层温度影响较大。

C孔各深度温度上升及降低的幅度都较小,且幅度相近,总体上,温度一直处于缓慢下降中,在12月31日,各深度岩土层温度下降达到了最大值,下降幅度约1℃。

D孔各深度岩土层温度逐渐降低,但降低幅度较小,约0.5℃,只有深度11.5 m处温度降低幅度稍大,为1℃左右,这是由于此深度受地表大气温度影响所致。

4 分析与讨论

4.1 完整运行周期温度场特征

为了反映地源热泵系统完整运行周期岩土层温

度的横向变化与时间之间的关系,选择B、C、D孔深度20.5 m处强风化泥质粉砂岩在2017年7月6日、9月6日、11月5日、12月30日、2018年5月21日的温度数据,绘成B孔20.5 m深度处各时间点的温度水平等值线图(图6)。

从图6可以看出:夏季工况后期,地埋管换热器孔附近地层温度升至22℃,温度的影响范围扩大至4 m;至夏季后恢复工况11月5日,地埋管换热器孔附近地层温度降至20℃左右,温度影响范围缩小至1.5 m以内;冬季工况运行1个月至12月30日,地埋管换热器孔附近地层温度降至18.5℃左右,温度影响范围扩大至4 m;至冬季后恢复工况5月21日,地层温度基本恢复至岩土初始平均温度。

夏季工况时,对距B孔2 m范围内的各深度岩土层温度造成了一定的影响,但对距B孔4 m处的各深度岩土层温度造成的影响很微弱。

物体导热系数、热扩散率越大,比热越小,热量越

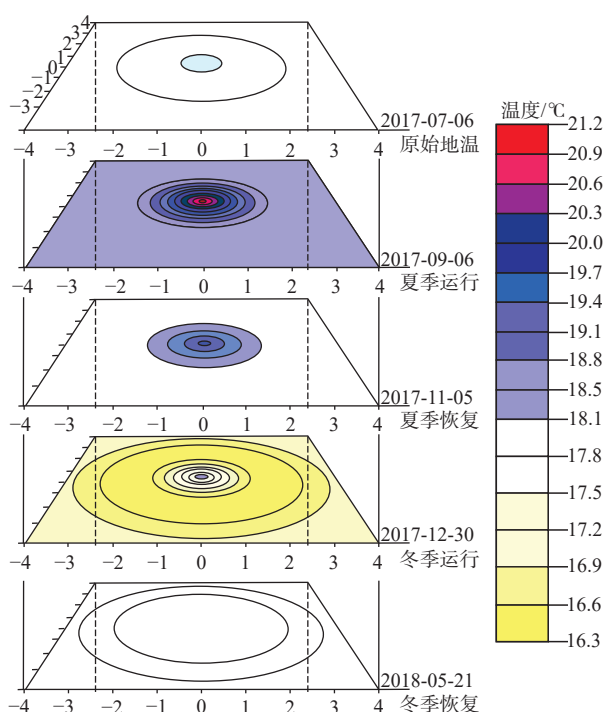


图 6 完整运行周期 B 孔 20.5 m 深度各时间点温度平面等值线图

Fig. 6 B hole temperature contour of time nodes at the depth of 20.5 meters during the complete period

易向外传递,从表 1 可以推出中风化粉砂岩温度最高,而粉质黏土、强风化泥质粉砂岩温度相差不多,但 2017 年 7 月 27 日的实测温度为:深度 11.5 m 的粉质黏土温度最高,达到了 27.5 °C;深度 20.5 m 的强风化泥质粉砂岩温度次之,为 25 °C;深度 80.0 m 的中风化粉砂岩温度最低,仅为 24 °C。产生上述现象的原因是粉质黏土埋深小于 18.0 m,受天气影响大,所以深度 11.5 m 的粉质黏土的实测温度最高。

夏季后恢复工况,岩土体导热系数、热扩散率越小,比热越大,则热量越不易向外传递,导致中风化粉

砂岩已恢复至岩土初始平均温度,而粉质黏土、强风化泥质粉砂岩分别比岩土初始平均温度升高了 0.5 °C、2 °C(图 4)。

而冬季工况 1 个月的运行,对距 B 孔 2 m 处的岩土层温度造成了一定的影响,而对距 B 孔 4 m 处的岩土层温度影响微弱(图 5)。

4.2 不同换热器孔间距时间效应数值模拟与分析

粉质黏土层、强风化泥质粉砂岩层和中风化粉砂岩层深度 11.5、20.5、80.0 m 的温度场模拟结果见图 7—9。

深度 11.5 m 的时间效应数值模拟结果显示(图 7): (1)地埋管换热器孔间距 4 m 以内时,温度互相影响,且随着运行时间的增加,温度互相影响的程度增加,至 10 a 时影响范围趋于稳定; (2)双季工况下,与岩土初始平均温度 18 °C 对比,地源热泵系统运行 3、5、10 a 后,不同间距下,孔中心位置温度升高不到 0.6 °C,说明每年在岩土层的储热量和取热量基本达到平衡,可保证地源热泵系统长期稳定运行。

从图 8、图 9 中可看出:地埋管换热器孔相互影响程度与深度 11.5 m 类似,但与 11.5 m 相比,20.5 m 深度处的影响范围略大,80.0 m 深度处的影响范围较小,且孔中心位置温度分别升高不到 0.8 °C 和 0.2 °C,说明岩土层参数对温度场有一定影响但影响幅度不大,可以满足地源热泵系统长期稳定运行。

用 Flow-3D 数值模拟软件研究了夏季制冷时不同深度处温度影响范围。模拟结果表明(图 10),深度 11.5、20.5、80.0 m 处的影响范围上限分别为 4.4、4.5、4.3 m,模拟结果和监测结果较为接近,选择地埋管换热器孔间距 4.0 m,地埋管换热器孔之间、热干扰相互影响很小,不仅钻孔经济,而且可以满足地源热泵系统长期稳定运行的要求。

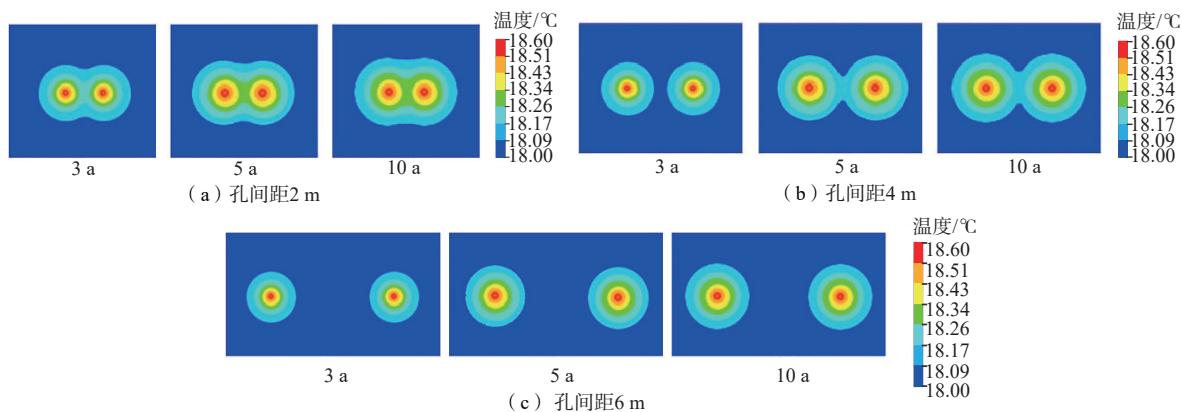


图 7 深度 11.5 m 处 3、5、10 a 运行后不同孔间距温度场

Fig. 7 Temperature field of different spacing holes after 3, 5 and 10 years of operation in 11.5 meters

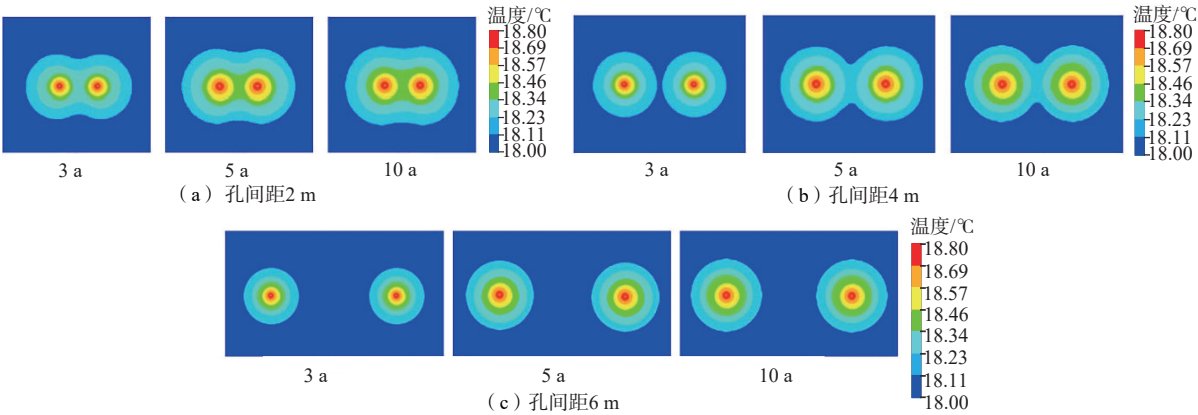


图 8 深度 20.5 m 处 3, 5, 10 a 运行后不同孔间距温度场

Fig. 8 Temperature field of different spacing holes after 3, 5 and 10 years of operation in 20.5 meters

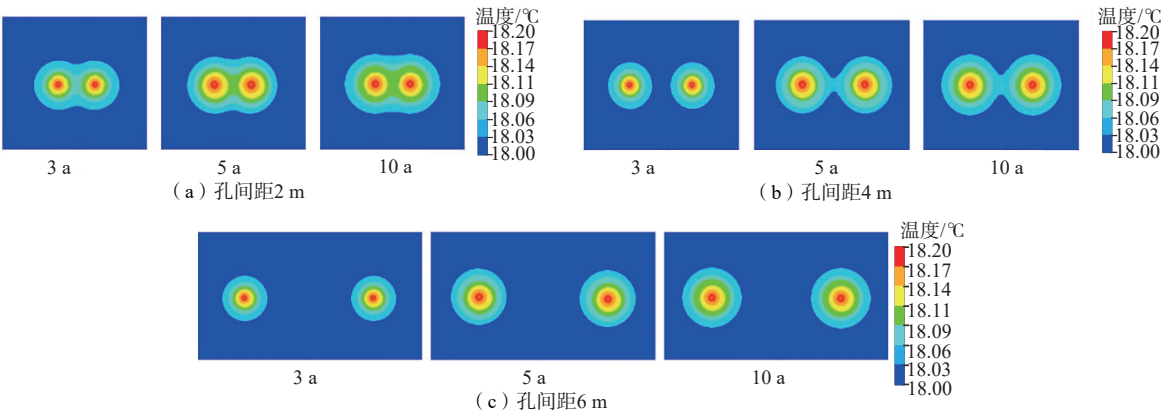


图 9 深度 80.0 m 处 3, 5, 10 a 运行后不同孔间距温度场

Fig. 9 Temperature field of different spacing holes after 3, 5 and 10 years of operation in 80.0 meters

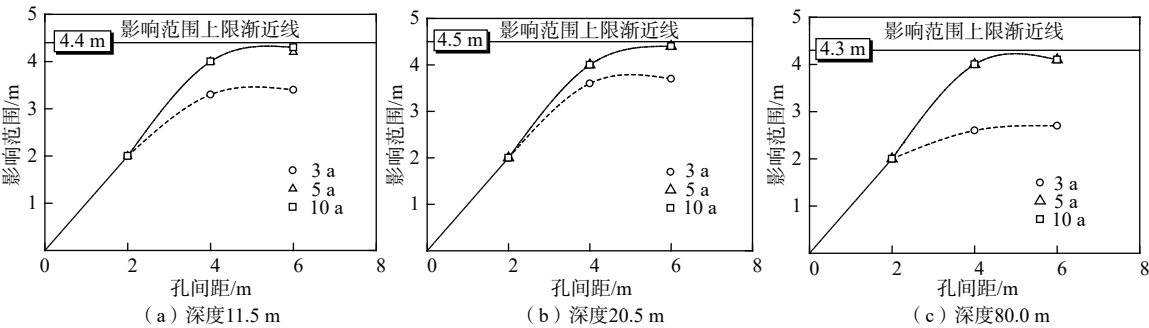


图 10 夏季工况时不同深度处温度影响范围

Fig. 10 Influence range of temperature at different depths during the summer condition

5 结论

(1)通过温度监测系统得到,在侵蚀堆积平原地区,单 U 型竖直埋管明显的热响应距离为 2 m,推断出经济合理的埋管换热器孔间距为 4.0 m。在 4.0 m 的间距下,可避免相邻埋管换热器孔热响应距离的重叠而可能产生的热堆积。

(2)纯导热模式下时间效应数值模拟显示,运行 10 a 后,岩土体中温度升高不超过 1 °C,说明采用单 U 型竖直埋管换热器间距 4.0 m,不会发生地源热泵系统运行冷热失衡的问题,可确保地源热泵系统达到设计使用寿命。

(3)为了消除夏季工况时可能发生的热堆积,建议采用夏季制冷和冬季制热运行时间尽量相等、延长

夏季恢复期的运行方式,消除岩土体中可能产生的热量失衡而影响地源热泵系统长期稳定运行的问题。

参考文献 (References) :

- [1] 韩再生,冉伟彦,佟红兵,等.浅层地热能勘查评价[J].中国地质,2007,34(6):1115-1121. [HAN Zaisheng, RAN Weiyan, TONG Hongbing, et al. Exploration and evaluation of shallow geothermal energy[J]. Geology in China, 2007, 34(6): 1115-1121. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 卫万顺,李翔.未来10~15年中国浅层地热能发展方向战略分析[J].城市地质,2021,16(1):1-8. [WEI Wanshun, LI Xiang. Analysis on the development strategy of shallow geothermal energy in China in the next 10~15 years[J]. Urban Geology, 2021, 16(1): 1-8. (in Chinese with English abstract)]
- [3] YU Yiqiang. Study on ground source heat pump system zoning and methods in the Northwest of Shandong Province[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2018, 6(3): 171-177.
- [4] ZHAO Fanghua. Research on single hole heat transfer power of ground source heat pump system[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2018, 6(1): 65-70.
- [5] 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.
- [6] 朱巍,张静,唐雯,等.城市浅层地热能开发地质环境问题研究[J].地质与勘探,2024,60(1):113-120. [ZHU Wei, ZHANG Jing, TANG Wen, et al. Geological environment problems of urban shallow geothermal energy development[J]. Geology and Exploration, 2024, 60(1): 113-120. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 蔺文静,吴庆华,王贵玲.我国浅层地热能潜力评价及其环境效应分析[J].干旱区资源与环境,2012,26(3):57-61. [LIN Wenjing, WU Qinghua, WANG Guiling. Shallow geothermal energy resource potential evaluation and environmental effect in China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(3): 57-61. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 王婉丽,王贵玲,朱喜,等.中国省会城市浅层地热能开发利用条件及潜力评价[J].中国地质,2017,44(6):1062-1073. [WANG Wanli, WANG Guiling, ZHU Xi, et al. Characteristics and potential of shallow geothermal resources in provincial capital cities of China[J]. Geology in China, 2017, 44(6): 1062-1073. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 宋小庆,段启杉.贵阳市土壤源浅层地热能适宜性分区及资源量评价[J].长江科学院院报,2015,32(12):14-17. [SONG Xiaoqing, DUAN Qishan. Suitability classification and resource evaluation of shallow geothermal energy from soils in Guiyang[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(12): 14-17. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 鄂建,陈明珠,杨露梅,等.南京浅层地热能开发利用现状研究[J].地质学刊,2015,39(2):339-342. [E Jian, CHEN Mingzhu, YANG Lumei, et al. Exploitation and utilization of shallow geothermal energy in Nanjing[J]. Journal of Geology, 2015, 39(2): 339-342. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 张杰,王兴春,赵敬洗,等.河北沽源、饶阳地区浅层地温场特征[J].物探与化探,2013,37(2):237-241. [ZHANG Jie, WANG Xingchun, ZHAO Jingxi, et al. An analysis of the characteristics of shallow geothermal fields in Guyuan and Raoyang, Hebei Province[J]. Geophysical & Geochemical exploration, 2013, 37(2): 237-241. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 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)]
- [13] 刘爱华,佟红兵,冉伟彦.北京某垂直埋管区地温场变化规律研究[J].水文地质工程地质,2016,43(4):165-170. [LIU Aihua, TONG Hongbing, RAN Weiyan. A study of ground temperature changes in a vertical heat exchanger area of Beijing[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(4): 165-170. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 李新国,陈志豪,赵军,等.桩埋管与井埋管实验与数值模拟[J].天津大学学报,2005,38(8):679-683. [LI Xinguo, CHEN Zhihao, ZHAO Jun, et al. Experiment and numerical simulation on U-vertical ground coupled heat exchanger with sandstone and cement backfills[J]. Journal of Tianjin University, 2005, 38(8): 679-683. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 李嘉舒,戴传山,雷海燕,等.埋管换热器动态热负荷下地层温度场的解析解[J].水文地质工程地质,

- 2023, 50(2): 198 – 206. [LI Jiashu, DAI Chuanshan, LEI Haiyan, et al. Analytical solution of formation temperature distribution under dynamic heat load of borehole heat exchangers[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 198 – 206. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 李济琛,陈明珠,汤强,等.南京市浅层地温场研究——基于分布式光纤测温技术[J].中国地质,2021,48(3): 939 – 947. [LI Jichen, CHEN Mingzhu, TANG Qiang, et al. Study on shallow geothermal field in Nanjing: Based on distributed optical fiber temperature measurement system[J]. Geology in China, 2021, 48(3): 939 – 947. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 张庆,李云峰,龚绪龙,等.基于浅层地温及原位热物性参数地温场预测[J].地质通报,2021,40(10): 1713 – 1719. [ZHANG Qing, LI Yunfeng, GONG Xulong, et al. Ground temperature prediction based on shallow-surface ground temperature and in-situ thermophysical parameters[J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(10): 1713 – 1719. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 李继涛.华东地质局机械修造中心办公综合楼项目岩土工程勘察报告[R].南京:南京勘察工程有限公司,2004: 3 – 9. [LI Jitao. Geotechnical investigation report on the office complex building project of the machinery repair center of east China geological bureau[R]. Nanjing: Nanjing Survey Engineering Co. Ltd., 2004: 3 – 9. (in Chinese)]
- [19] 朱娜.地源热泵埋管换热系统热堆积分析[D].武汉:华中科技大学,2007. [ZHU Na. Analysing heat accumulate in the groud heat exchanger system of ground source heat pump[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 曾宪斌.地源热泵垂直U型埋管换热器周围土壤温度场的数值模型[D].重庆:重庆大学,2007. [ZENG Xianbin. Numerical simulation on soil temperature field around vertical U-tube heat exchange used in ground source heat pump[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 纪世昌.土壤源热泵U型垂直埋管温度场数值模拟研究[D].武汉:华中科技大学,2006. [JI Shichang. The study of numeric simulation of temperature field of U-vertical buried pipe of GSHP[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 郎林智,段新胜,陈鹏宇,等.U型管传热数值模拟及恒热流模型分析[J].山东建筑大学学报,2010,25(5): 539 – 542. [LANG Linzhi, DUAN Xinsheng, CHEN Pengyu, et al. Numerical simulation of U-tube and analysis of constant flux models[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2010, 25(5): 539 – 542. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 张鑫.垂直式埋管换热理论及岩土热物性参数试验方法[D].西安:长安大学,2012. [ZHANG Xin. The theory on heat transfer of vertical ground heat exchanger and the test method for parameter of the rock-soil thermal properties[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 马子涵,邢会林,靳国栋,等.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[J].水文地质工程地质,2022,49(6): 190 – 199. [MA Zihan, XING Huilin, JIN Guodong, et al. A study of numerical simulations for enhanced geothermal reservoir parameters and thermal extraction based on microseismic data[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 190 – 199. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 王华军,赵军,沈亮.地源热泵系统长期运行特性的实验研究[J].华北电力大学学报,2007,34(2): 52 – 54. [WANG Huajun, ZHAO Jun, SHEN Liang. Experimental investigation on long term performance of ground source heat pump system[J]. Journal of North China Electric Power University, 2007, 34(2): 52 – 54. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 郭炳跃,金鹏,祁超,等.江苏高邮埋管热响应试验及浅层地热能资源评价[J].地质学刊,2022,46(1): 96 – 102. [GUO Bingyue, JIN Peng, QI Chao, et al. Thermal response test of buried tubes and evaluation of shallow geothermal energy resources in Gaoyou, Jiangsu Province[J]. Journal of Geology, 2022, 46(1): 96 – 102. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 张春雷.U型管地源热泵系统性能及地下温度场的研究[D].天津:天津大学,2005. [ZHANG Chunlei. Study on the system performance of U-type ground source heat pump and ground temperature field[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 刘红卫,徐贵来,张晴,等.回归分析在地源热泵系统地温场研究中的应用[J].工程地球物理学报,2009,6(4): 512 – 515. [LIU Hongwei, XU Guilai, ZHANG Qing, et al. The application of multiple regression analysis in the geothermal field[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2009, 6(4): 512 – 515. (in Chinese with English abstract)]

- English abstract)]
- [29] 赵海丰, 唐荣彬, 桂树强, 等. 双U型埋管能源桩桩周岩土体温度场分布特征试验研究 [J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(5): 157 – 163. [ZHAO Haifeng, TANG Rongbin, GUI Shuqiang, et al. Experiment analysis of ground temperature distribution of double-U type energy piles[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2016, 38(5): 157 – 163. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 刘春雷, 王贵玲, 王婉丽, 等. 基于现场热响应测试方法的地下岩土热物性分析 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(5): 1602 – 1608. [LIU Chunlei, WANG Guiling, WANG Wanli, et al. Analysis of soil thermal properties with In-Situ Thermal Response test method[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2014, 44(5): 1602 – 1608. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 赵军, 陈雁, 李新国. 基于跨季节地下蓄热系统的模拟对热储利用模式的优化 [J]. 华北电力大学学报, 2007, 34(2): 74 – 77. [ZHAO Jun, CHEN Yan, LI Xinguo. Optimization for heat storage operating modes based on simulation of seasonal underground storage of solar-GSHP system[J]. Journal of North China Electric Power University, 2007, 34(2): 74 – 77. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 刘炳成, 刘伟, 李庆领. 温度效应对非饱和土壤中水分迁移影响的实验 [J]. 华中理工大学学报, 2006, 34(4): 106 – 108. [LIU Bingcheng, LIU Wei, LI Qingling. Experimental Studies on the influences of temperature on moisture transport in unsaturated porous soil[J]. Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2006, 34(4): 106 – 108. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 陈宝义, 岳韬, 曹品鲁, 等. 挤密条件下U型埋管换热器换热效率的理论分析及数值模拟 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(6): 1808 – 1814. [CHEN Baoyi, YUE Tao, CAO Pinlu, et al. Theoretical analysis and numerical simulation of heat exchange efficiency of U-tube ground heat exchanger under the condition of soil compaction[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(6): 1808 – 1814. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华