



地埋管地源热泵系统长期运行对换热区域地温场影响分析

张 华¹, 郝术仁², 刘丽虹², 董吴军¹, 程 彤¹, 胡慧娟¹

1. 江西省勘察设计院有限公司, 江西 南昌 330095;

2. 东华理工大学土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330013

摘 要: 为了研究夏热冬冷地区地埋管地源热泵系统长期运行对换热区域地温场的影响, 以南昌市某建筑地埋管地源热泵工程为例, 对该示范工程 4 年间换热区域内外地温场变化特征和冷热堆积进行分析。该工程设置了 7 个温度监测孔, 分别在地埋管孔群中央以及周边由近及远不同距离对该系统运行 4 年间地埋管换热区域地温场进行了全面的监测。分析结果表明: 本地源热泵工程持续运行 4 年间, 地埋管换热区域内外地温均随热泵运行呈现周期性变化; 地温在垂向上随深度增加而增大, 变化幅度逐渐减小; 径向上, 地埋管换热区周围地温波动随着远离地埋管呈现逐渐减小的趋势; 该地源热泵系统持续运行 4 年中, 地埋管孔群换热的热影响半径在 3~6 m 之间; 系统持续运行 4 年后, 孔群边界平均地温仅升高 0.13 °C, 热堆积现象不明显。该分析结果可为地埋管换热孔场地设计提供依据。

关键词: 地埋管地源热泵; 地温场; 换热区域; 热堆积; 地温监测

Influence of long-term operation of ground source heat pump on geothermal field in heat transfer area

ZHANG Hua¹, HAO Shu-ren², LIU Li-hong², DONG Wu-jun¹, CHENG Tong¹, HU Hui-juan¹

1. Jiangxi Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Nanchang 330095, China;

2. School of Civil and Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

Abstract: To study the influence of long-term operation of ground source heat pump (GSHP) on geothermal field in heat transfer area of hot-summer and cold-winter regions, taking a GSHP project in Nanchang City as an example, this paper analyzes the variation characteristics of geothermal field and heat-cold accumulation inside and outside the heat transfer area of the demonstration project over four years of operation. The project arranges seven temperature monitoring holes in the center and surrounding areas of the GSHP group for comprehensive monitoring of geothermal field changes in heat transfer area during the four-year operation. The analysis results show that the geothermal temperature inside and outside the heat transfer area changes periodically with the four-year operation of GSHP; The geothermal temperature

收稿日期: 2022-12-02; 修回日期: 2024-01-17. 编辑: 李兰英.

基金项目: 江西省地质局科研项目“江西省浅层地热能高效开发利用关键技术研究”(2022A01).

作者简介: 张华(1984—), 男, 高级工程师, 主要从事水文地质、浅层地热能、岩土工程研究, 通信地址 江西省南昌市昌东高校园区紫阳大道 169 号, E-mail//99445943@qq.com

通信作者: 郝术仁(1987—), 男, 讲师, 主要从事边坡稳定性及岩土热力学、浅层地热能、固-液-气三相介质热-水-力多场耦合等方面研究, 通信地址 江西省南昌市广兰大道 418 号, E-mail//540668136@qq.com

引用格式: 张华, 郝术仁, 刘丽虹, 董吴军, 程彤, 胡慧娟. 地埋管地源热泵系统长期运行对换热区域地温场影响分析 [J]. 地质与资源, 2025, 34(2): 246-254.

Zhang H, Hao S R, Liu L H, Dong W J, Cheng T, Hu H J. Influence of long-term operation of ground source heat pump on geothermal field in heat transfer area [J]. Geology and Resources, 2025, 34(2): 246-254.

increases with increasing depth vertically, and the variation range decreases gradually; Radially, geothermal temperature variations around the heat transfer area gradually decreases with increasing distance from hole group; The thermal influence radius of the hole group is 3–6 m during the four-year operation; The average temperature at the hole group boundary increases merely by 0.13 °C, indicating insignificant heat accumulation after the four-year operation. These findings provide references for the site design of GSHP heat transfer holes.

Key words: ground source heat pump (GSHP); geothermal field; heat transfer area; heat accumulation; geothermal temperature monitor

0 引言

埋管地源热泵系统是一种利用浅层地热能资源的高效节能空调系统, 同时也是一项利用可再生能源的建筑节能技术^[1]。埋管地源热泵系统运行过程中会一定程度上改变埋管换热区域内外地温场^[2]。地温场的改变对埋管换热器的换热性能会产生影响, 进而影响整个热泵系统的运行^[3-5]。因此, 对埋管地源热泵系统长期运行过程中地温场的变化特征的研究至关重要^[6]。

目前, 对换热区域地下温度场的变化特征研究, 多是通过理论分析和数值模拟开展的^[7-14], 未涉及到对实际地源热泵工程的监测。也有部分学者对地源热泵系统进行了现场监测^[15-21], 但对地温场的监测存在监测点位较少、监测时间较短等问题, 无法更好地了解地源热泵长期运行后对换热区域地温场的影响, 这些情况一定程度上限制了地源热泵系统的推广和应用。

本研究以南昌市某建筑埋管地源热泵工程为例, 对地源热泵系统稳定运行 4 年间, 埋管换热区内外地温场多个地温监测孔进行了实际监测, 并对地温场变化特征进行分析, 以期对南昌地区地源热泵系统的设计、运行管理及地温场研究提供参考。

1 工程概况

1.1 地源热泵工程概述

本工程为一栋集办公和科研一体的建筑, 地上三层, 总高 12 m, 建筑面积和空调面积分别为 1 100 m² 和 759 m², 设计安装二套独立分开的地源热泵中央空调热泵系统(地下水源式、埋管式), 其中建筑物一层设计为地下水源热泵系统, 建筑物二、三层为埋管式系统。一层空调面积为 247.4 m², 建筑冷负荷为 33.2 kW, 热负荷为 22.3 kW, 建筑北侧设置两口抽、回灌井, 两口井可定期互换使用。二、三层空调面积为

511.5 m², 建筑冷负荷为 68.6 kW, 热负荷为 46 kW, 采用垂直埋管方式, 共布置 16 个 100 m 深的换热孔, 呈 4 m × 4 m 方形布置于本建筑东侧 4 m 绿化带处。其中 8 个单 U 换热孔、8 个双 U 换热孔, 两类换热孔交错分布。

1.2 地质概述

据前期埋管钻孔资料显示, 勘探深度内, 场地地层结构由人工填土、第四系上更新统冲积层、古近系新余群(*Exn*)组成。地层具有成层分布特点。按其岩性及工程特性, 自上而下依次可划分为填土、粉质黏土、细砂、中砂、粗砂、砾砂、圆砾、强风化泥质粉砂岩、中风化泥质粉砂岩、微风化泥质粉砂岩。地层结构及特性详见表 1。

表 1 研究区地层特征

Table 1 Stratigraphic characteristics of the study area			
序号	土层名称	层底深度/m	厚度/m
1	填土	0.7	0.7
2	粉质黏土	9.7	9.0
3	细砂	15.9	6.2
4	中砂	17.7	1.8
5	粗砂	23.7	6.0
6	砾砂	29.2	5.5
7	圆砾	36.6	7.4
8	强风化泥质粉砂岩	38.1	1.5
9	中风化泥质粉砂岩	48	9.9
10	微风化泥质粉砂岩	101.3	53.3

1.3 热响应测试

通过埋管水温平衡法测得 13 号双 U 测试孔区域 0~100 m 地层平均初始温度约为 18.52 °C; 2 号单

U 测试孔区域 0~100 m 地层平均初始温度约为 18.86 ℃. 建议拟建场地内岩土体初始温度为 18.69 ℃.

对测试孔进行稳定热流模拟试验, 测试流量为 1.4 m³/h, 测试功率分别为 3 kW 和 6 kW, 岩土体平均单位体积热容为 3.1486 MJ/(m³·K). 根据线热源理论计算, 测试孔的岩土体热物性参数如表 2 所示.

表 2 各测试孔岩土体热物性参数统计结果
Table 2 Statistics of thermophysical parameters of rock-soil body in test holes

测试孔 编号	设定 功率/ kW	单位延米 换热率/ (W/m)	拟合 系数 k	岩土体 导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	单位深度钻孔 总热阻/ (m ² ·K/W)	热扩 散率/ (m ² /d)
13 号	3	32.54	1.0997	2.36	0.209	0.065
	6	63.65	2.0142	2.52	0.196	0.069
2 号	3	28.32	1.1564	1.95	0.234	0.054
	6	58.20	2.1611	2.14	0.215	0.059

1.4 监测系统

工程共设置 7 个地质环境监测孔. 其中, 17 号孔位于换热区中心位置, 对换热区内部地质环境温度变化进行监测; 18~23 号孔位于换热区外围区域西南、东南侧, 对称布设, 距离换热区的距离依次 1、3、6 m, 对地埋管换热器热影响半径地质环境温度变化进行监测. 图 1 中 2#、4#、5#、7#、11#、12#、15#、16# 为单 U 换热孔; 1#、3#、6#、8#、9#、10#、13#、14# 为双 U 换热孔; 4#、7#、11#、16# 为单 U 埋管监测孔; 1#、

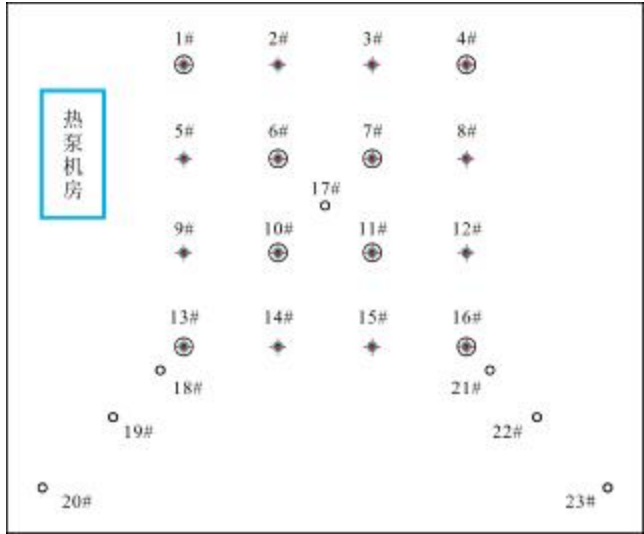


图 1 地埋管及地温监测孔平面布置图

Fig. 1 Plane layout of buried pipe and geothermal temperature monitoring holes

6#、10#、13# 为双 U 埋管监测孔; 17#~23# 为地温监测孔.

17 号监测孔监测点布设深度分别为 5、10、20、30、40、50、60、70、80、90、100 m; 18~23 号孔监测点布设深度分别为 20、40、60、80 m. 具体温度测点布设如图 2. 温度监测采用 pt1000 温度传感器, 精度为 ±0.1 ℃, 监测数据会实时传输到本建筑的地源热泵远程监控系统中, 实现自动化采集、传输和储存.

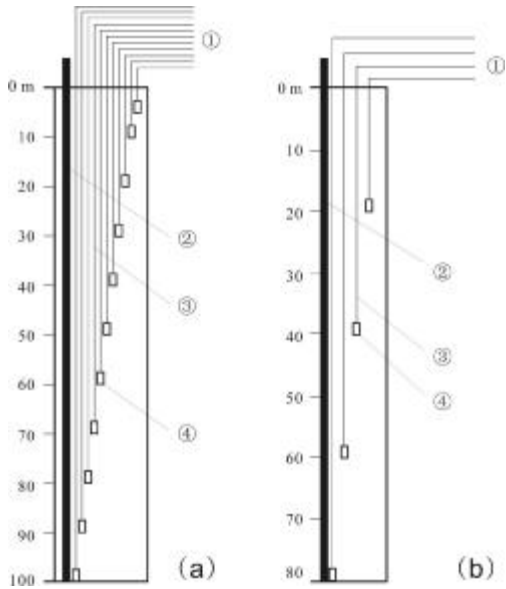


图 2 温度传感器竖向布置图

Fig. 2 Vertical layout of temperature sensors

a—17# 监测孔大样图 (detail drawing of No. 17 monitoring hole); b—18#~23# 监测孔大样图 (detail drawing of Nos. 18~23 monitoring holes); ①监视柜 (monitor rack); ②导管 (conduit); ③屏蔽护套信号线 (shielded sheath signal line); ④ pt1000 温度传感器 (pt1000 temperature sensor)

2 地质环境温度监测结果分析

2.1 地源热泵系统运行情况

2017 年 6 月底, 该建筑的地源热泵系统开始运行. 监测数据的分析范围选取为 2017 年 6 月 6 日—2021 年 6 月 1 日, 累计运行 4 个制冷季、4 个供暖季及过渡季. 每年制冷季 6—10 月, 供暖季 12 月至次年 3 月, 每年制冷供暖情况结合实际使用情况调整. 本文主要选取 17~20 号地质环境温度监测孔监测数据进行分析. 其中, 17 号地温监测孔 50 m 深度处温度探头长期运行过程中损坏, 因此, 舍弃该点处监测数据.

2.2 地温随时间变化特征分析

2017 年 6 月 6 日—2021 年 6 月 1 日各地质环境

温度监测孔不同深度监测点的温度变化如图3所示。由图3可知,在地源热泵系统运行过程中,地温随着“制冷季—过渡季—供暖季—过渡季”的工况转变呈波状变化。具体表现为夏季时,气温较高,空调制冷,地埋管向地下岩土体排放热量,地温随之升高;冬季时,气温较低,空调供暖,地埋管从地下岩土体吸收热量,地温随之降低;过渡季,空调不运行,换热区域地温便逐渐恢复到空调未运行时的初始地温状态。因此,整体上,各测点地温随时间呈现波状变化,并且随着运行周期的增加,其整体的地温呈现出微弱的上升趋势。另外,从图3中可以看出,不同地层深度处的地温变化幅度具有明显的差异。其中,5 m深度处温度波动最大,主要原因在于5 m深度处的地温受环境温度影响很大,随环境温度变化而变化。10 m深度处地温虽然波动较为明显,但相较于5 m深度处地温变化,其受环境温度影响较小,更多受埋管取放热影响。其余

深度地温变化主要受埋管取放热影响,温度波动幅度也相应较小。

17号监测孔:位于埋管中心区域,受埋管与土壤之间的排热/取热热流影响较大,因此温度变化也最为明显。不考虑受环境温度影响较大的5 m和10 m深度处的地温变化,20 m深度处地温在18.0~23.4℃之间波动,波幅为5.4℃;30 m深度处地温在17.2~21.7℃之间波动,波幅为4.5℃;40 m深度处地温在18.1~21.4℃之间波动,波幅为3.3℃;60 m深度处地温在20.7~23.7℃之间波动,波幅为3℃;70 m深度处地温在20.7~23.6℃之间波动,波幅为2.9℃;80 m深度处地温在15.1~17.8℃之间波动,波幅为2.7℃;90 m深度处地温在19.6~22.5℃之间波动,波幅为2.9℃;100 m深度处地温在14.1~17.2℃之间波动,波幅为3.1℃。20~100 m范围内平均波幅为3.48℃,随着深度的增加地温波幅呈现减小的趋势。

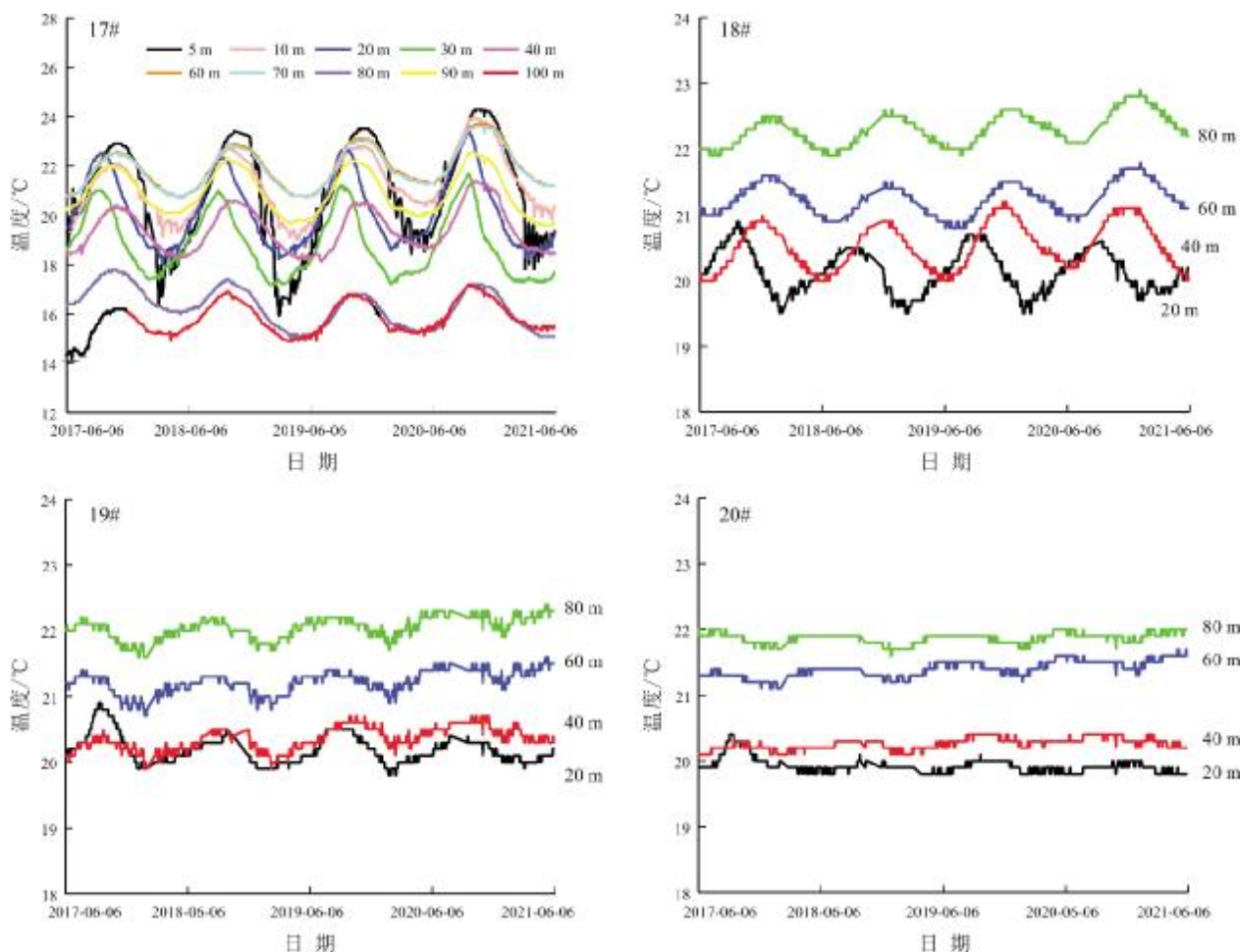


图3 17#~20#地温监测孔不同深度各测点温度随时间变化曲线

Fig. 3 Temperature change curves of measuring points at different depths of Nos.17~20 monitoring holes

18 号监测孔: 位于距离地埋管换热区域 1 m 远处。从温度波动幅度上来看, 20 m 深度处地温在 19.5~20.9 °C 之间波动, 波幅为 1.4 °C; 40 m 深度处地温在 20.0~21.2 °C 之间波动, 波幅为 1.2 °C; 60 m 深度处地温在 20.8~21.8 °C 之间波动, 波幅为 1.0 °C; 80 m 深度处地温在 22.0~23.0 °C 之间波动, 波幅为 1.0 °C。20~100 m 范围内平均波幅为 1.15 °C, 随着深度的增加地温波幅呈现减小的趋势。

19 号监测孔: 位于距离地埋管换热区域 3 m 远处。从温度波动幅度上来看, 20 m 深度处地温在 19.8~20.9 °C 之间波动, 波幅为 1.1 °C; 40 m 深度处地温在 19.9~20.7 °C 之间波动, 波幅为 0.8 °C; 60 m 深度处地温在 20.7~21.5 °C 之间波动, 波幅为 0.8 °C; 80 m 深度处地温在 21.6~22.3 °C 之间波动, 波幅为 0.7 °C。20~100 m 范围内平均波幅为 0.85 °C, 随着深度的增加地温波幅呈现减小的趋势。

20 号监测孔: 位于距离地埋管换热区域 6 m 远处。从温度波动幅度上来看, 20 m 深度处地温在 19.8~20.4 °C 之间波动, 波幅为 0.6 °C; 40 m 深度处地温在 20.1~20.4 °C 之间波动, 波幅为 0.3 °C; 60 m 深度处地温在 21.1~21.6 °C 之间波动, 波幅为 0.5 °C; 80 m 深度处地温在 21.7~22.0 °C 之间波动, 波幅为 0.3 °C。20~100 m 范围内平均波幅为 0.43 °C。实际上, 除前期运行时, 各测点温度稍有变化外, 后期温度变化基本在 0.2 °C 以内, 可以认为 20 号监测孔基本不受地埋管取放热影响, 位于地埋管换热影响范围之外, 可以作为背景地温监测。

18~20 号监测孔位于地埋管换热区外围, 距离地埋管换热区分别为 1 m、3 m、6 m, 平均地温波幅分别为 1.15 °C、0.85 °C、0.43 °C。由此可以说明, 距离地埋管换热区域越远, 地埋管地源热泵运行对地温变化的影响就越小。18~20 号监测孔平均温度分别为 21.0 °C、20.9 °C、20.9 °C, 由此可知, 20 号孔作为背景地温监测, 距离地埋管换热器 3~6 m, 地温受地埋管影响较小。17 号地温监测孔位于换热区中心位置, 其地温受到四周地埋管取放热影响, 因此, 温度波动最大, 平均地温波幅为 3.48 °C。因此, 在做地温场监测时, 地埋管换热区中心位置是必不可少的监测点位。

2.3 地温垂向变化特征分析

选择一个空调运行周期 2019 年 6 月 1 日—2020

年 5 月 31 日, 即地源热泵系统完整运行 1 年, 对 17~20 号地温监测孔地温沿垂向的变化特征进行分析。图 4 是 17~20 号地温监测孔各深度月平均温度随深度变化曲线图。

由 18~20 号地温监测孔的温度随深度变化曲线可知, 整体趋势上, 随深度增加, 地温逐渐增加。但是, 对比 17 号地温监测孔温度随深度变化曲线可知, 虽然整体趋势上, 地温会随深度增加而增加, 但在不同位置的监测孔, 其地温监测越精细, 地温会有不同程度的波动, 并非是完全的递增关系。主要原因在于, 在 80~100 m 深度范围内, 部分地层的地质及水文地质环境比较复杂, 可能存在地下水流以及不同岩性的作用, 使得地温并不是完全按照递增的规律进行分布。通过分析 17 号周围的监测孔温度, 发现在 80~100 m 范围内温度也相对偏低。通过监测井的钻孔资料可知, 在 78~84 m 及 95~100 m 位置钻进过程漏水, 且岩心裂隙发育, 地下水活动迹象明显。因此, 在有条件的情况下, 地温监测应尽可能地详细, 在不同岩性的土层及有地下水流动的方向上尽可能都布置地温监测点。本文着重研究地源热泵系统的运行对地下岩土体温度扰动的问题, 因此对于 17 号孔 80~100 m 范围内的与其他层位的初始温度差异不做深入探讨。

17 号监测孔地温分布较为复杂, 而 20 号孔地温变化较小, 因此, 选择 18 号和 19 号地温监测孔进行地温变化幅度随深度变化规律分析。受地埋管取放热影响, 一个空调运行周期内, 18 号地温监测孔 20 m 深度处地温变化幅度为 1.02 °C; 40 m 深度处地温变化幅度为 1.08 °C; 60 m 深度处地温变化幅度为 0.69 °C; 80 m 深度处地温变化幅度为 0.61 °C。19 号地温监测孔 20 m 深度处地温变化幅度为 0.59 °C; 40 m 深度处地温变化幅度为 0.35 °C; 60 m 深度处地温变化幅度为 0.34 °C; 80 m 深度处地温变化幅度为 0.33 °C。从监测结果可见, 随着深度的增大地温变化幅度有着逐步减小的趋势。主要原因在于, 一般 20 m 深度以下, 基本为地温增温带, 地温随深度增加而增大, 同时, 地埋管中的水会随着向下运行过程中逐渐进行取放热, 在这种共同作用下, 一般管内循环水温 and 周围地温之间的温差会变小, 导致换热效率降低, 故会出现随着深度增加地温变化幅度降低的现象。

因此, 在地源热泵工程设计之前, 对原始地温场的

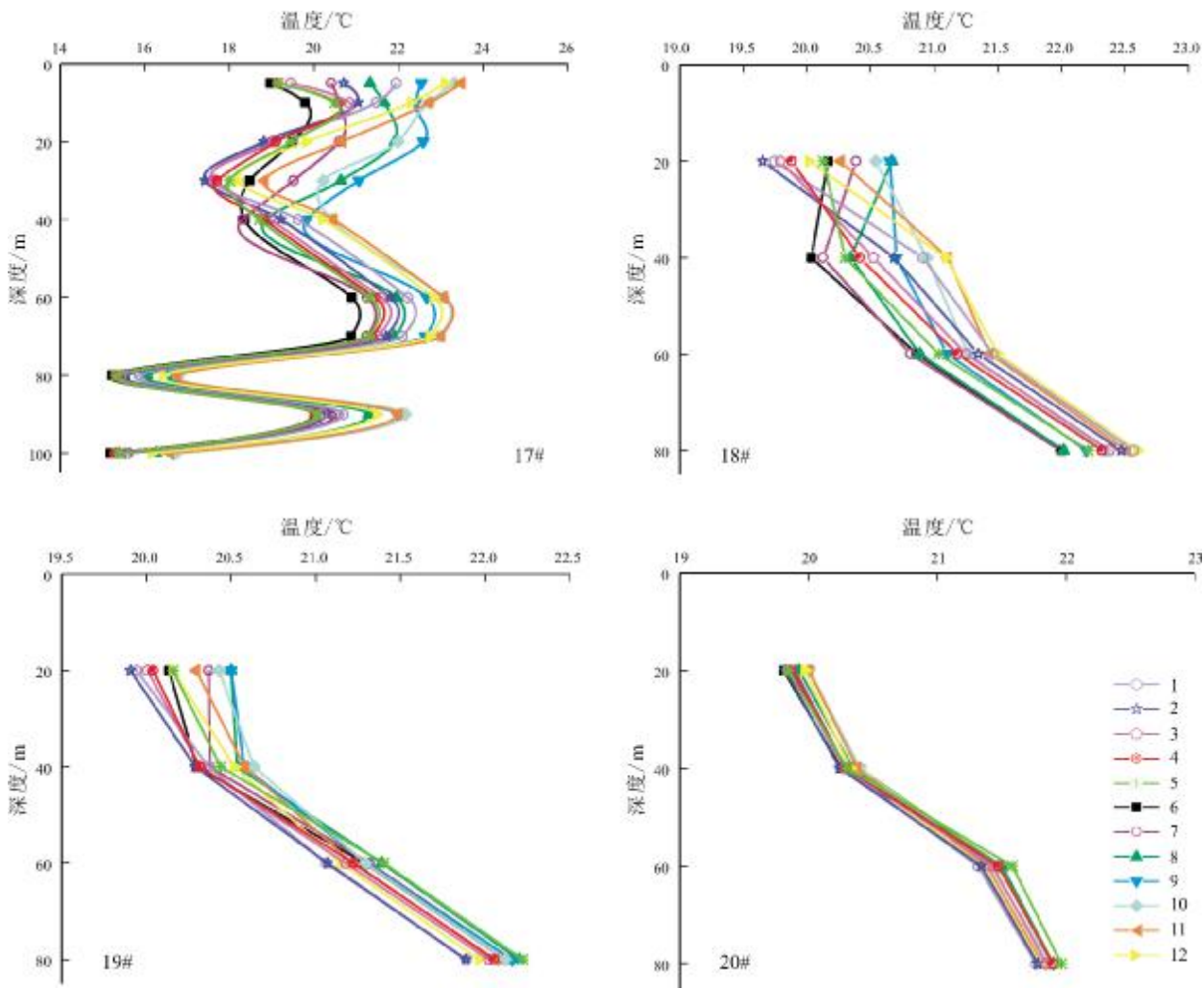


图 4 17#~20# 地温监测孔月平均温度随深度变化曲线

Fig. 4 Mean monthly temperature curves with depth of Nos.17-20 monitoring holes

1~12 代表月份(1-12 referring to month)

测定就变得十分重要。有条件的情况下,不仅要测得原始平均地温,还要测得原始地温的垂向分布。

2.4 地温径向变化特征分析

为了解换热孔换热量向周围扩散情况,选择 2019—2020 年空调运行周期监测数据进行分析,对位于地埋管换热区域外围的 18~20 号地温监测孔地层月平均温度沿钻孔径向变化曲线进行整理分析(如图 5)。

由地温沿钻孔径向变化曲线(图 5)可以看出,地埋管换热区周围地温波动在径向上呈现逐渐减小的变化趋势。距离换热区域越近处,地温波动越大,随着与换热区域距离的增加,温度波动幅度逐步减小。根据监测结果可知,距离换热区域 1 m 处地温波动最大,

距离换热区域 3 m 处地温波动相应减弱,距离换热区域 6 m 处地温基本无波动(小于 0.2 °C)。因此,可以得出该地源热泵系统持续运行 4 年中,地埋管换热的热影响半径为 3~6 m。

对集中制冷、供暖期(7、8 月和 12、1 月)开展研究。由图 5 可知道,在距离换热区域 1~6 m 范围内,供暖期恢复到背景地温的速率大于制冷期的速率,主要原因是:制冷期的时间大于供暖期的时间,使得系统存在少量的热堆积现象,不利于制冷期地温的恢复。由图 6 可知,在制冷季和供暖季时,距离换热区域 1 m 处,地温变化幅度最大;距离换热区域 6 m 处,地温几乎保持不变。

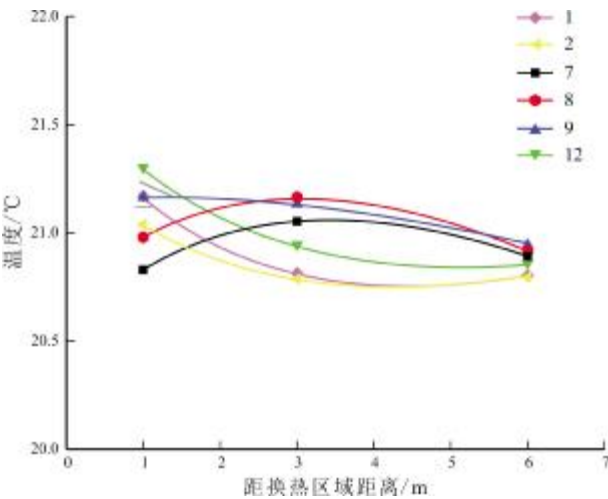


图 5 不同月份地温沿换热区域径向变化曲线

Fig. 5 Radial variation curves of geothermal temperature by months in heat transfer area
1、2、7、8、9、12 代表月份(1, 2, 7, 8, 9, 12 referring to month)

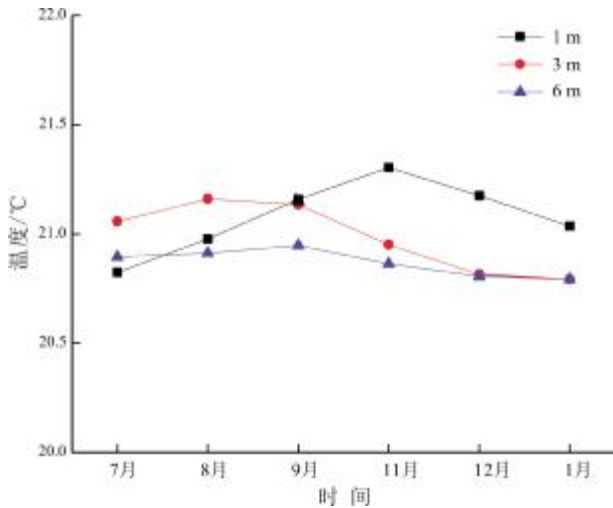


图 6 地温随制冷季和供暖季变化曲线

Fig. 6 Geothermal temperature curves with cooling season and heating season

3 地温场冷热堆积分析

3.1 群孔中心位置冷热堆积分析

对 17 号地温监测孔进行地温监测, 运行一年后, 各深度处地温变化见表 3。

根据线热源理论对地温监测孔地温变化进行分析, 选取 16 个地埋管换热孔中间的 17 号地温监测孔进行地温分析。

单位长度地埋管换热器年平均净释热功率可用下

式计算:

$$q=\frac{Q}{L\tau} \tag{1}$$

式中, q 为单位长度地埋管换热器年平均净释热功率, W/m ; Q 为场地内埋管年总释热量, J ; L 为埋管总长度, m ; τ 为系统运行时间, s 。

将监测数据代入公式可得 $q=1.63 W/m$ 。17 号地温监测孔 1 年后的温度升高值为

$$\Delta\theta=\frac{q}{\pi\lambda}\left[\ln\left(\frac{4\lambda\tau}{r^2S_{vc}}\right)-0.5772\right] \tag{2}$$

式中, $\Delta\theta$ 为岩土体平均温升, $^{\circ}C$; λ 为岩土体的平均导热系数, $W/(m\cdot K)$; r 为地温监测孔距离地埋管换热孔的距离, m ; S_{vc} 为岩土体平均单位体积热容, $J/(m^3\cdot K)$ 。

表 3 17# 监测孔运行一年后各深度处温度变化
Table 3 Temperature changes at different depths after one-year operation of No. 17 monitoring hole

深度/m	20	30	40	60	70	80	90	100
初始温度/ $^{\circ}C$	19.46	18.64	18.4	20.8	20.8	16.38	20.28	14.38
温度/ $^{\circ}C$	19.63	19.05	18.4	20.9	20.9	16.18	20.37	15.48
温差/ $^{\circ}C$	0.17	0.41	0	0.1	0.1	-0.2	0.09	1.1

将已知参数带入公式得到 $\Delta\theta=0.42$, 该值是 100 m 深度处的平均值, 与实际地源热泵系统运行第一年 17 号地温监测孔平均温升 $0.22^{\circ}C$ (地表以下 20~100 m 内的平均温升) 存在较大差异, 主要原因是该系统为地下水和地埋管地源热泵系统, 抽水井和回灌井位于地埋管左侧, 地下水源热泵系统运行时, 形成了人工流场, 有效减缓了地埋管周围的冷热堆积, 提高了地埋管的换热量, 以及在 80 m 和 100 m 处可能存在地下水, 相对于其他深度温度较低, 增大了温度传递速度, 从而加快地温场恢复。

3.2 群孔边界冷热堆积分析

对 18~20 号地温监测孔内各监测点地温取平均值, 最终计算出从 2017—2021 年每年 6 月上旬时的地层平均温度, 即每个供热恢复期末的温度, 详见表 4。

由监测数据可知, 运行 1 年后, 平均地温比初始地温低 $0.01^{\circ}C$; 运行 2 年后, 平均地温比初始地温高 $0.03^{\circ}C$; 运行 3 年后, 平均地温比初始地温高 $0.12^{\circ}C$; 运行 4 年后, 平均地温比初始地温高 $0.13^{\circ}C$ 。由于本系统开始运行的时间为 2017 年 12 月, 为供暖季, 因此

表 4 各监测孔 2017—2021 各年度 6 月上旬
平均温度及温度变化

Table 4 Average temperatures and variation of monitoring
holes in early June during 2017–2021

监测 孔号	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₂ -T ₁	T ₃ -T ₁	T ₄ -T ₁	T ₅ -T ₁
18	20.82	20.77	20.76	20.88	20.88	-0.05	-0.06	0.06	0.07
19	20.85	20.84	20.96	21.08	21.08	-0.01	0.10	0.23	0.23
20	20.81	20.84	20.86	20.88	20.91	0.03	0.05	0.07	0.10
平均值	20.83	20.82	20.86	20.95	20.96	-0.01	0.03	0.12	0.13

注: T₁、T₂、T₃、T₄、T₅ 分别代表 2017、2018、2019、2020、2021 年温度。温度单位:℃。

监测数据显示的第 2 年的温度变化为-0.01℃。而运行至第 3 年开始,恢复期后,地温场的温度变化开始转为正值,并且呈现出逐年增加的趋势,说明本地源热泵工程持续运行后,呈现出轻微热堆积现象。主要原因在于南昌所在区域制冷量较大,一般夏季输送到土壤的热量要比冬季从土壤中的取热量稍多一些。但由于本工程为地下水源热泵系统和地埋管地源热泵系统,当地下水源热泵系统运行时,地下水的渗流有利于地温场恢复,因此土壤基本能够进行自我恢复,热堆积现象比较轻微。但由于运行监测时间较短,对于多年运行后的热堆积程度尚无法判断,对地温场的持续监测是非常必要的。当地温场上升到一定程度时,将会对热泵的能效造成影响,甚至造成机组报警现象。因此,对于大型工程,当地埋管取放热量不平衡时,一般要考虑使用复合地源热泵系统,如“冷却塔+地源热泵系统”或“冷水机组+地源热泵系统”这种形式。要尽量避免地层产生热堆积现象,以保证地源热泵系统的高效运行。

4 结论

1)本地源热泵工程持续运行 4 年间,地埋管换热区域内外地温均随热泵运行呈波状变化。10 m 以内深度地温受环境温度影响较大,其余深度地温则主要受地埋管取放热影响,温度波动相较于 5 m 和 10 m 处地温波动较小,此距离可作为地层岩性相近地区地埋管换热孔间距设计提供参考。

2)除受环境温度影响较大的上部地层外,下部地层温度,基本呈现地温随深度增加而增大的趋势。但

是,由于地层岩性以及水文地质条件的复杂性,针对具体工程,并非是完全的递增关系。因此,地源热泵工程设计之前,除要测得地层初始平均地温外,有条件情况下,还应测得埋管区域地温的垂向分布,如果有含水层分布,有条件情况下要测定地下水的流速流向。

3)从监测结果可知,随着深度的增大,地温变化幅度有着逐步减小的趋势。主要原因在于,在地温随深度增加而增大及地埋管中的水在向下运行过程中逐渐进行取放热,产生热量交换。这两种原因共同作用下,一般管内循环水温和周围地温之间的温差会变小,导致换热效率降低,故会出现随着深度增加地温变化幅度降低的现象。

4)地埋管换热区周围地温波动在径向上呈现随着离地埋管的距离增大而逐渐减小的变化趋势。距离换热区域越近处地温波动越大,随着与钻孔距离的增大,温度波动幅度逐步减小。该地源热泵系统持续运行 4 年中,地埋管换热的热影响半径为 3~6 m,群孔边 6 m 范围内平均温度上升 0.13℃,有轻微的热堆积。应对热泵系统工程地温场进行持续监测,观察长期运行是否会增强热堆积现象。

参考文献(References):

[1] 王小清,王万忠. 地埋管地源热泵系统运行期地温监测与分析[J]. 上海国土资源, 2013, 34(2): 76–79.
Wang X Q, Wang W Z. Soil-temperature monitoring and analysis of a ground source heat pump system during the operating period [J]. Shanghai Land & Resources, 2013, 34(2): 76–79.
[2] 庄宇,潘小平. 地源热泵空调系统的换热工区岩土体温度变化研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(6): 134–138.
Zhuang Y, Pan X P. A study of the soil temperature change caused by GSHP air-conditioning system[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(6): 134–138.
[3] 孙婉,周念清,黄坚,等. 地源热泵系统运行换热区内外地温场变化特征分析[J]. 太阳能学报, 2017, 38(10): 2804–2810.
Sun W, Zhou N Q, Huang J, et al. Analysis of ground temperature field change characteristics for inside and outside heat exchange area of ground source heat pump system operation[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2017, 38(10): 2804–2810.
[4] 姚木申,袁小飞,卢宝. 地源热泵系统地下温度场变化及其对系统 COP 的影响[J]. 制冷与空调, 2016, 16(8): 85–89, 96.
Yao M S, Yuan X F, Lu B. Change of underground temperature field of ground-source heat pump system and its influence on COP of system [J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2016, 16(8): 85–89, 96.

- [5] 高世轩. 上海地源热泵系统对地质环境的热影响分析[J]. 上海国土资源, 2012, 33(1): 67-70.
- Gao S X. Analyzing the influence of heat on the geological environment surrounding ground source heat pump system in Shanghai[J]. Shanghai Land & Resources, 2012, 33(1): 67-70.
- [6] 梁欣阳, 赵雪红, 王青. 地理管地源热泵工程运行换热区温度场变化特征分析[J]. 地下水, 2022, 44(6): 11-16.
- Liang X Y, Zhao X H, Wang Q. Characteristics of temperature field in ground-source heat pump system[J]. Ground Water, 2022, 44(6): 11-16.
- [7] 李新国, 赵军, 周倩. U型垂直埋管换热器管群周围土壤温度数值模拟[J]. 太阳能学报, 2004, 25(5): 703-707.
- Li X G, Zhao J, Zhou Q. Numerical simulation on the ground temperature field around U pipe underground heat exchangers[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2004, 25(5): 703-707.
- [8] 刘俊, 张旭, 高军, 等. 地源热泵土壤温度恢复特性研究[J]. 暖通空调, 2008, 38(11): 147-150.
- Liu J, Zhang X, Gao J, et al. Research of soil temperature restoration characteristics of ground-source heat pump systems [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2008, 38(11): 147-150.
- [9] 张晓明, 吴建坤, 魏凌敏. 垂直U型管换热器周围土壤温度场的数值模拟[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27(1): 111-114, 145.
- Zhang X M, Wu J K, Wei L M. Numerical simulation on soil temperature field around vertical U-tube heat exchangers[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2011, 27(1): 111-114, 145.
- [10] 姜振涛. 单U型垂直埋管换热器放热期土壤温度场的试验研究及数值分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- Jiang Z T. Experimental research and numerical analysis on soil temperature field of single U-tube heat exchanger vertically buried in heat release period[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012.
- [11] 张也, 骆祖江, 杜建国, 等. 基于热平衡原理的地理管地源热泵系统开发利用潜力评价[J]. 太阳能学报, 2022, 43(9): 444-452.
- Zhang Y, Luo Z J, Du J G, et al. Potential evaluation of development and utilization of ground source heat pump system based on heat balance principle[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2022, 43(9): 444-452.
- [12] 管昌生, 万兆, 胡平放. 地源热泵地理管多层岩土温度场的数值分析[J]. 武汉工程大学学报, 2011, 33(4): 42-45.
- Guan C S, Wan Z, Hu P F. Numerical analysis on multilayer geotechnical temperature field of GSHP buried tube[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2011, 33(4): 42-45.
- [13] 王洋, 王小清, 李雷雷, 等. 基于监测数据的地理管地源热泵系统运行策略优化[J]. 暖通空调, 2018, 48(1): 158-163.
- Wang Y, Wang X Q, Li L L, et al. Operation strategy optimization of ground source heat pump system based on monitoring data[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2018, 48(1): 158-163.
- [14] 于慧明, 杨泽, 都基众. 基于层次分析法的沈阳市地理管地源热泵适宜性评价[J]. 地质与资源, 2016, 25(6): 563-566. DOI:10.13686/j.cnki.dzyz.2016.06.009.
- Yu H M, Yang Z, Du J Z. AHP-Based suitability zonation and assessment for the ground-source heat pump system in Shenyang City [J]. Geology and Resources, 2016, 25 (6): 563 -566. DOI: 10.13686/j.cnki.dzyz.2016.06.009.
- [15] Luo J, Rohn J, Bayer M, et al. Heating and cooling performance analysis of a ground source heat pump system in Southern Germany [J]. Geothermics, 2015, 53: 57-66.
- [16] 姚远. 基于实测的地理管地源热泵空调技术的节能与应用分析[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2010: 28-33.
- Yao Y. The energy conservation and technology using analysis of ground source heat pump based on actual survey[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2010: 28-33.
- [17] 张甫仁, 王乐祥, 李雪洋, 等. 重庆市浅层地温能开发利用地温场变化规律研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(2): 76-81.
- Zhang F R, Wang L X, Li X Y, et al. Geo-temperature change law caused by shallow geothermal energy utilization in Chongqing [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2018, 37(2): 76-81.
- [18] 魏静, 高世轩, 孙婉. 上海地区地源热泵工程地温场特征试验研究[J]. 暖通空调, 2015, 45(6): 41-46.
- Wei J, Gao S X, Sun W. Experimental study of ground temperature field characteristics surrounding GSHP system in Shanghai[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2015, 45(6): 41-46.
- [19] 王子珑, 梅新忠, 王楠, 等. 地理管地源热泵长期运行地温变化及系统性能监测与分析[J]. 河北工业大学学报, 2019, 48(6): 82-86, 92.
- Wang Z L, Mei X Z, Wang N, et al. Monitoring and analysis of ground temperature variations and system performance of a buried-pipe ground source heat pump during the long-term operation [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2019, 48(6): 82-86, 92.
- [20] 李少华, 林清龙, 段新胜, 等. 杭州某地理管地源热泵系统地温场监测与分析[J]. 暖通空调, 2020, 50(8): 70-74.
- Li S H, Lin Q L, Duan X S, et al. Monitoring and analysis of ground temperature field of a GSHP in Hangzhou [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2020, 50(8): 70-74.
- [21] 刘杰. 浅层地热能开发利用地质环境影响与监测系统建设研究[J]. 山东国土资源, 2018, 34(1): 49-55.
- Liu J. Study on impact of the development and utilization of shallow geothermal energy to geological environment and monitoring system construction[J]. Shandong Land and Resources, 2018, 34(1): 49-55.