

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.04.008



制冷工况下水平埋管换热器运行试验研究

曾召田^{1,2}, 唐双慧¹, 赵艳林^{1,2}, 徐云山¹, 吕海波^{1,2}

(1. 桂林理工大学 广西建筑新能源与节能重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 广西大学 土木建筑工程学院防灾减灾研究所, 南宁 530004)

摘要:通过夏季工况的地源热泵运行试验,对运行过程中水平埋管的换热性能参数、试验场地周围气象因素和换热过程中土体的温湿度变化等因素进行实时监测,探讨了地源热泵运行过程中水平埋管换热器热交换性能及其周围土壤的温、湿度场变化规律。研究表明,地源热泵间隙运行有利于土壤温度场的恢复,随着停机时间的增加,水平埋管与周围土壤的热交换能力明显提高;气候变化对水平埋管周围土壤的温度场分布具有显著影响,随着埋深的递减,土壤温度受气候变化的影响越明显;水平埋管周围土壤温度的变化幅度随着与埋管距离的增加呈递减趋势,其影响半径为1.0m左右;热交换对水平埋管周围土壤湿度场的影响不明显,但大气降雨引起的地表水入渗对土壤湿度场的分布具有显著影响。

关键词:地源热泵;水平埋管换热器;热交换性能;土壤温湿度场;水分迁移

中图分类号:TU413 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)04-0046-07

Experimental analysis on operation process of horizontal ground heat exchanger under cooling provision

Zeng Zhaotian^{1,2}, Tang Shuanghui¹, Zhao Yanlin^{1,2}, Xu Yunshan¹, Lu Haibo^{1,2}

(1. Guangxi Key Laboratory of New Energy and Building Energy Saving, Guilin University of Technology,

Guilin 541004, Guangxi, P. R. China; 2. Research Institute of Preventing and Mitigating Disasters, College of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, P. R. China)

Abstract: Experiment on ground source heat pump (GSHP) was conducted in summer to monitor the factors such as the heat exchange performance parameters of horizontal ground heat exchangers (GHEs), the climatic conditions around the testing site and variations of soil temperatures and moistures during the

收稿日期:2016-03-02

基金项目:国家自然科学基金(41502284,51568014,41272358);广西自然科学基金(2013GXNSFBA019233);广西建筑新能源与节能重点实验室项目(桂科能 15-J-21-1)

作者简介:曾召田(1981-),副教授,博士,主要从事浅层地热能应用技术、环境岩土工程研究,(E-mail)zengzhaotian@163.com。

吕海波(通信作者),教授,博士,(E-mail)lhb@glut.edu.cn。

Received:2016-03-02

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (NO. 41502284, 51568014, 41272358); National Natural Science Foundation of Guangxi (NO. 2013GXNSFBA019233); Project of Guangxi Key Laboratory of New Energy and Building Energy Saving (No. 15-J-21-1)

Author brief: Zeng Zhaotian (1981-), associate professor, PhD, main research interests: application technology of shallow geothermal energy and environmental geotechnical engineering, (E-mail) zengzhaotian@163.com.

Lu Haibo (corresponding author), professor, PhD, (E-mail) lhb@glut.edu.cn.

operation process. The heat exchange performance of horizontal GHEs as well as the variation laws of temperature and moisture fields around their surrounding soils was explored. The results showed that the intermittent operation model of GSHP was beneficial to the recovery of soil temperature field. The heat exchange capacity of horizontal GHEs from their surrounding soils improved significantly with the increase of downtimes. The climatic conditions had an obvious influence on the distributions of soil temperature field around the horizontal GHE. The influence of climatic conditions on soil temperature was becoming obvious with the decrease in burial depth. The changing amplitude of soil temperature field decreased with the increase in distance from the horizontal GHE was found, resulting in a heat influence range of the GHE with a radius of about 1.0 m. Finally, the impact of heat exchange of horizontal GHE to soil moisture field was in-apparent. However, the surface water infiltrating caused by rainfall was an obvious influence factor on the variation of soil moisture field.

Keywords: ground-source heat pump (GSHP); horizontal ground heat exchanger; heat exchange performance; soil temperature and moisture fields; moisture migration

近年来,地源热泵(Ground Source Heat Pump, 简称 GSHP)因其使用可再生的浅层地热能,具有高效、节能、环保等优点,在工程建设中得到了广泛的应用和发展。随着地源热泵技术的推广,其设计、运行过程中突现出了一系列问题,如土壤热特性参数的不确定性^[1-2]、土壤的“冷热堆积”^[3-4]、地下水渗流对埋管换热效果的影响^[5-6]等,这些问题都与埋管周围土壤的温、湿度场有密切联系。曾和义等^[7]对竖直埋管在半无限大介质中的稳态传热模型进行了分析讨论,并给出了其解析解;那威等^[8]通过建立地下水平埋管换热器模型分析了土壤导热系数对埋管及其周围土壤温度场分布和埋管换热量的影响;胡志高等^[9]利用 ANSYS 有限元软件模拟了冬季竖直埋管周围土壤的温度场分布;刘业凤等^[10]通过实验研究了土壤源热泵周围土壤的温度场变化;李晓燕等^[11]建立严寒地区水平埋管换热器周围土壤不稳定温度场的物理和数学模型,并进行了模拟计算及实验验证。上述研究结果表明,尽管针对埋管周围土壤的温度场已取得了一定成果,但是由于土壤中热湿迁移^[12-14]的复杂性,关于埋管周围土壤湿度场的研究却鲜见报道。实际上,地源热泵运行中埋管换热器与岩土层的热交换是一个复杂的热湿耦合传热传质过程^[15];周围土壤温度场变化促使土壤水分发生迁移,使土壤湿度场发生改变;反之,土壤湿度场变化促使土壤的热导率等参数发生变化,影响了土壤中热量传递,最终影响到土壤温度的改变。因此,有必要对埋管周围土壤的温、湿度场开展系统的试验研究。

在以往的研究中,人们仅仅关注埋管与周围土壤的热交换对土壤温、湿度场的影响^[8-11,16-17],然

而,在工程实践中,水平埋管由于埋深浅(地表以下 1~3 m),仍然处在大气影响层范围之内,地表水入渗和大气温度、太阳辐射、蒸发等气象条件变化都会对水平埋管周围土壤的温、湿度场产生不可忽略的影响。广西属于亚热带季风气候,炎热多雨,且雨热同季,因此,深入研究该地区水平埋管换热器周围土壤温湿度场的变化规律,对广西地区地源热泵的应用和推广具有重要的现实意义和理论价值。

本文借助于桂林理工大学地源热泵实验系统,通过夏季工况试验,对地源热泵系统运行过程中水平埋管的换热性能参数、试验场地周围气象因素和换热过程中土体的温湿度变化等进行实时监测,利用试验结果对地源热泵运行过程中水平埋管换热器热交换性能和周围土壤的温、湿度场变化规律进行深入研究,为广西地区地源热泵技术的应用和推广提供理论依据和技术支持。

1 实验系统

水平埋管地源热泵试验系统如图 1 所示,可实现夏季供冷和冬季供暖等功能^[18];采用 HYSS090RA-JF 型水-水式水源热泵机组;系统末端选用 4 台 SK-14 型风机盘管机组式水温空调,对称布置在实验室的 4 个角落;埋管换热系统采用水平埋管,呈“串”型字布置在主管两侧(见图 1),一共布置 4 组换热器,组间距为 4.0 m,每组为单层水平双管,管间距为 1.0 m,埋深为 2.5 m;组间采用并联同程式,选用高密度聚乙烯(HDPE)管(内径 $\varphi=25$ mm),通过管内水循环与周围土壤进行热交换,每一部分采用单环路。

选择水平埋管 C3 为监测对象,分别沿水平和竖

直 2 个方向在不同距离处土壤内埋设温、湿度传感器,如图 2 所示;土壤温度采用 PT100 型铂电阻温度计和 JMZR-2000T 多点温度自动测试系统,可实现 16 通道多点温度全自动采集;土壤湿度采用 Mini Trase 水分测定系统,通过 TDR 探针快速测量土壤体积含水量,可实现自动采集和存储。同时,采用 PC-4 型便携式阳光气象站对场地周围的大气温湿度、风向、风速、太阳辐射、降雨量、蒸发量等多项气象信息进行自动采集。为了研究水平埋管换热器的热交换性能,笔者在水平埋管换热系统总入、回水口和 C3 管入、回水口分别安装了防水型 DS18B20 温度传感器和 DN250 型智能电磁流量计,对流经管内的循环水温度和流量进行实时监测。

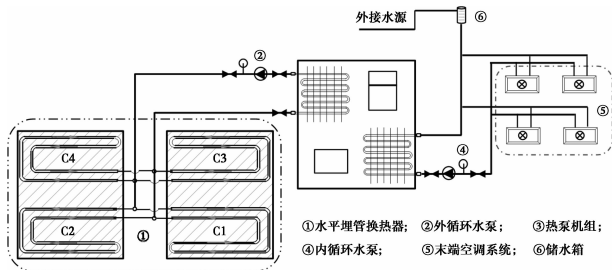


图 1 水平埋管地源热泵系统

Fig. 1 GSHP system with horizontal GHEs

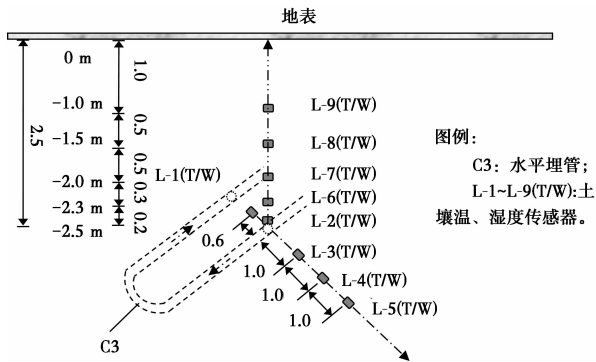


图 2 水平埋管 C3 周围土壤温湿度传感器分布图

Fig. 2 Sensors distributions of soil temperature and moisture around horizontal GHE C3

2 试验过程

一般来说,地源热泵运行分为夏季制冷和冬季供暖 2 种工况;限于篇幅,本文仅选择夏季制冷工况进行试验研究,试验时间为 2013-09-14—10-07。根据现实生活中办公楼、商场和医院住院楼的实际空调运行情况,本文按照 3 种运行模式(I, II 和 III)分别对上述 3 种空调运行情况进行模拟试验,每一种运行模式下连续试验 7 d,间隔 1 d 后进行另一种运

行模式的试验,具体的运行模式如下:

1)运行模式 I(间隙运行模式 A,模拟办公楼运行模式):开机运行 8 h,停机 16 h,运停比为 1:2;即每天 9:00 开机,热泵连续运行 8 h,17:00 关机;

2)运行模式 II(间隙运行模式 B,模拟商场运行模式):开机运行 12 h,停机 12 h,运停比为 1:1;即每天 9:00 开机,热泵连续运行 12 h,21:00 关机;

3)运行模式 III(连续运行模式,模拟医院住院楼运行模式):地源热泵连续运行 7 d(168 h)。

试验过程中,分别对土壤的状态参数(温度、湿度)、周围的气象因素(降雨量、蒸发量、大气温度、相对湿度、太阳净辐射、风速值)等进行实时监测。

3 试验结果与分析

3.1 水平埋管热交换性能分析

图 3 为夏季工况试验 3 种运行模式下换热系统和 C3 管的进出水温度、流量监测结果。由此可知:1)尽管由于热泵机组启停控制而使循环水的进出水温度呈现锯齿状波动,但其温度变化趋势均比较一致,换热系统和 C3 管换热器进出水温度均保持一个恒定差值,其平均值见表 1;2)运行过程中换热系统和 C3 管换热器里的循环水流量基本保持不变,其平均值见表 1。根据文献[18]中的方法,由图 3 中的监测结果计算出换热系统和 C3 管的平均换热量(见表 1)。

由表 1 可知,随着停机时间的减少,水平埋管与周围土壤的热交换能力也逐渐降低,试验中 3 种运行模式的停机时间依次为 16、12 和 0 h,C3 管的换热量相应地依次为 0.98、0.96 和 0.57 kW;同时,运行模式 I 和 II 中的各换热量相差不大,而运行模式 III 种的换热量却急剧降低。笔者分析上述结果产生的主要原因在于:在热泵机组运行过程中,地埋管换热器通过管内水循环不断向土壤中排放热量,同时吸收土壤中的冷量,随着该过程的不断进行,排放到土壤中的热量逐渐增加,致使土壤温度逐渐升高。当系统停机时,换热器附近的土壤中的热量向远端土壤中扩散,从而降低近壁面土壤的温度,使 U 型管附近的土壤温度得到一定程度的恢复。停机时间越长,土壤温度恢复得越充分,土壤与管内循环水的热交换效率越高;反之,由于土壤温度不能有效恢复,土壤温度逐渐升高,土壤与管内循环水的热交换效率降低,致使系统各部分的平均换热量也逐步降低。

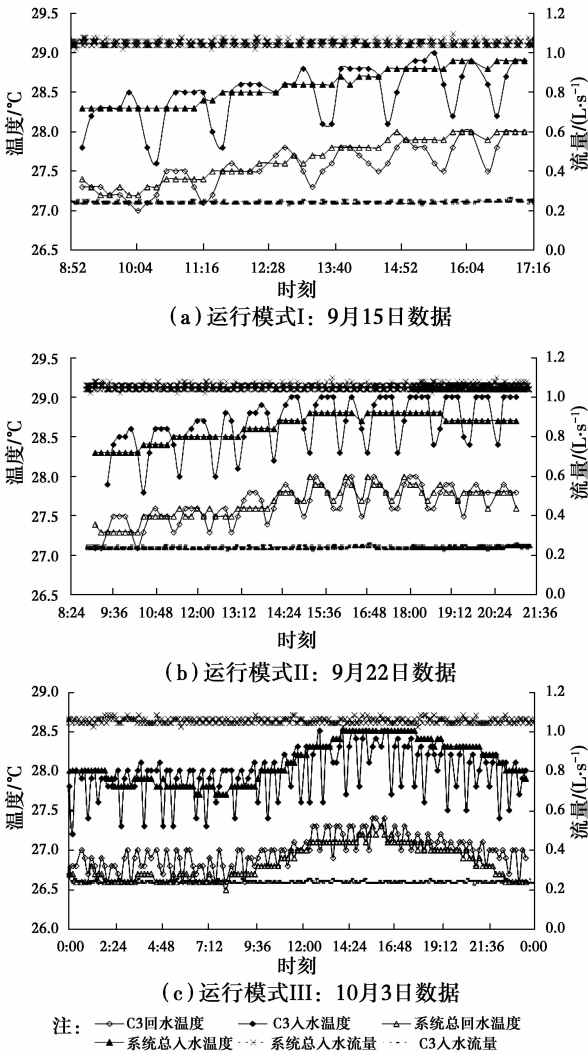


图 3 换热系统和 C3 管的进出水温度、流量

Fig. 3 Temperature and flow rate of circulating water in the inlet and outlet of heat exchange system and C 3

表 1 各运行模式下热交换性能参数的统计结果

Table 1 Statistical results of heat exchange performance parameters with different operation modes

运行模式	进出口循环水		循环水流		换热量/kW	
	温差平均值/°C		量/(L·s ⁻¹)			
	换热系统	C3管	换热系统	C3管	换热系统	C3管
I	0.98	0.97	1.05	0.24	4.32	0.98
II	0.97	0.95	1.05	0.24	4.28	0.96
III	0.60	0.57	1.05	0.24	2.65	0.57

同样地,上述规律可从 C3 管的管壁温度监测结果(如图 4 所示)得到有效反映:热泵运行过程中,C3 管的管壁温度随着运行时间逐渐升高,停机后,管壁温度逐渐下降,有恢复到初始温度的趋势;管壁温度

恢复的程度与停机时间有关,在较长的停机时间模式下运行热泵,管壁温度能得到充分的恢复。图 4 中,运行模式 I 的运停比为 1:2,管壁附近土壤的热量能够有效地与远端土壤进行扩散换热,因此,该模式下管壁温度在停机后的 16 h 内能基本恢复到初始值;运行模式 II 的运停比为 1:1,管壁土壤温度在停机后的 12 h 能得到一定程度的恢复,但与初始值尚有 0.5~0.9 °C 的差值;而运行模式 III 由于连续运行,土壤温度未能得到有效恢复,管壁温度一直处于上升趋势,这极大地影响到水平埋管与周围土壤的热交换效率。

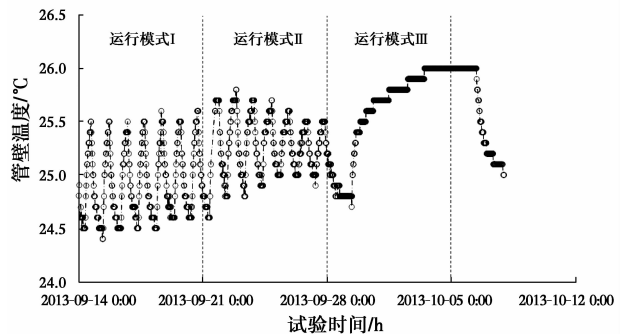


图 4 水平埋管换热器 C3 管的管壁温度变化(L2)

Fig. 4 Wall temperature variations of the horizontal GHE C3 (L2)

3.2 场地周围气象条件分析

浅层土壤的温、湿度场变化受气象条件的影响特别显著,因此,对场地周围的气象数据进行实时监测是一项十分重要的工作,图 5 为试验期间场地周围气象监测数据的统计结果。由此可知,2013-09-01—10-12 期间,试验场地内出现了两次比较明显的降雨过程,分别为 9 月 4 日—6 日(降雨量为 15.4 mm)和 9 月 26 日(降雨量为 9.8 mm),这两个时期内的日蒸发量相应地取值为 0;降雨对大气温度和相对湿度均有显著影响,两次降雨期间大气温度均有一个比较明显的降温过程,降温幅度为 9~12 °C 左右,相反地,相对湿度均是一个较明显的上升过程;同时期的太阳净辐射值和风速分别与大气温度和相对湿度具有类似的变化规律。这说明试验期间场地周围气象因素的测试结果是合理的,且各气象因素之间是相互关联的。以 9 月 14 日至 20 日(运行模式 I)期间的气象数据为例,图 4(b)和 4(c)中同时期的大气温度、太阳净辐射和风速均逐渐增加,而大气相对湿度却逐渐降低,因而,导致图 4(a)中日蒸发量逐渐增加,这符合文献[19]理论公式揭

示的蒸发量变化规律。

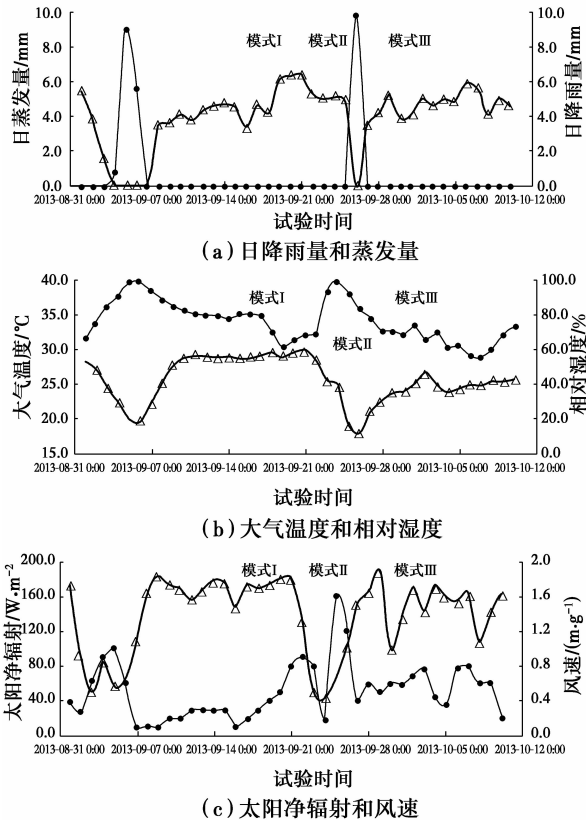


图 5 试验期间场地周围气象数据

Fig. 5 Climatic data on site in testing period

3.3 周围土壤温湿度场变化分析

图 6 给出了夏季试验期间 C3 管周围土壤温度场的分布情况,由此可知:1)夏季试验时,循环水通过埋管与土壤进行热量交换(吸冷放热),管壁附近的土壤吸收热量、温度升高,土壤内部形成温度梯度场,在其影响下埋管附近土壤的热量开始向远端扩散,使远端土壤的温度也不同程度的升高;2)地表以下 2.5 m 仍处在大气影响范围之内,大气变化对其也具有显著影响,因此,该深度范围内的土壤一方面吸收了热泵运行过程中水平埋管排放的热量,另一方面也吸收了地表的太阳辐射热,所以该范围内土壤的温度升高是由上述二者的共同作用完成的,但二者在各点的作用大小变化不同,太阳辐射热是由地表扩散至地下土壤,因此,处于同一深度处的土壤都具有相同的温度增量,而热泵运行排放的热量随着距离的增加,其温度增量逐渐减小;图 6(a)中,L-1 和 L-3 主要受热泵运行过程中水平埋管排放的热量影响,太阳辐射热也有一定的影响,而 L-4 和 L-5 温度升高的主要因素是地表吸收的太阳辐射热(温度变化量 ΔT 均为 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$);3)埋管附近土

壤温度升高的幅度跟距离埋管的远近有关,近壁处的土壤温度升高幅度最大,随着距离的增加,其温度升高的幅度递减;在同一深度处($H=2.5\text{ m}$),监测点 L-1、L-3、L-4、L-5 与 C3 的距离依次为 0.6、1.0、2.0、3.0 m,经过 22 d 试验后,其土壤温度升高幅度分别为 1.0 、 0.5 、 0.4 、 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,由此可推断水平埋管 C3 的热影响半径约为 1.0 m ;4)在竖直方向上,随着埋深的递减,土壤温度受气候变化的影响越显著;例如,图 6(b)中的 L-8 和 L-9,尽管此时热泵运行过程中水平埋管向土壤中排放热量,但由于距离地表分别为 1.5 、 1.0 m ,因此,该两处土壤受外界大气的的影响更显著,表现为温度逐渐降低的趋势。(L:传感器到 C3 的距离;H:传感器到土表面的距离)

图 7 给出了夏季试验期间 C3 管周围土壤湿度场的分布情况,由此可知:1)夏季工况下运行地源热泵,与水平埋管 C3 距离最近的 L-1、L-2 监测点的土壤湿度场未发生明显变化;推断其原因在于,尽管埋管换热器向土壤中排放的热量引起周围土壤温度升高,使土壤温度场产生温度梯度;在此温度梯度的驱动下,土壤中的热量和水分均已发生了迁移;但由于水分迁移的速率很小,同时由前面的热交换量分析可知横埋管 C3 向土壤中排放的热量较小,故热交换对土壤湿度场的影响不显著。2)地表水入渗对土壤湿度场的分布也具有一定的影响,如图所示,L-3~L-9 监测点均因降雨入渗(见图 5(a))的影响而使土壤湿度曲线出现突然增大的现象,随着入渗过程的发展,土壤湿度曲线又恢复到逐渐迁移轨迹,这表明水平埋管由于埋深较浅,其湿度场的变化主要受大气因素的影响。

4 结论

1)地源热泵间歇运行有利于土壤温度场的恢复,从而提高水平埋管换热器与周围土壤的热交换效率;夏季工况试验中 3 种不同模式的运行结果表明,随着地源热泵系统停机时间的增加,水平埋管与周围土壤的热交换能力明显提高。

2)水平埋管由于埋深浅,气候变化对其周围土壤的温度场分布具有显著影响,在竖直方向上,随着埋深的递减,土壤温度受气候变化的影响越明显;水平埋管周围土壤温度的变化幅度跟距离埋管的远近有关,近管壁处的土壤温度变化幅度最大,随着距离的增加,温度变化幅度呈递减趋势,夏季试验结果表

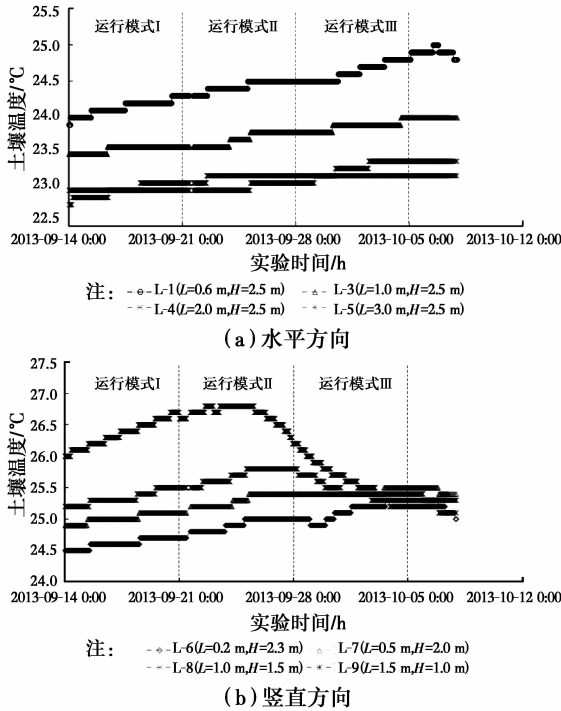


图 6 试验期间水平埋管 C3 周围土壤温度场

Fig. 6 Soil temperatures around horizontal GHE C3 in testing period

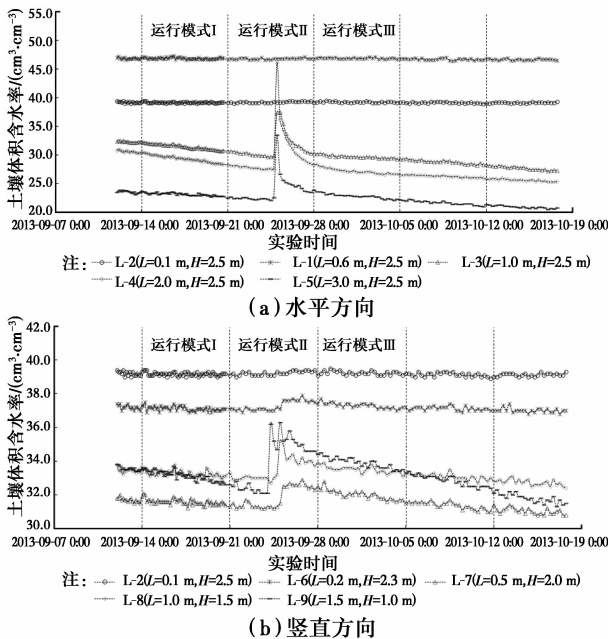


图 7 试验期间水平埋管 C3 周围土壤湿度场

Fig. 7 Soil moistures around horizontal GHE C3 in testing period

明水平埋管热作用的影响半径为 1.0 m 左右。

3)水平埋管与土壤交换的热量较少,同时由于水分迁移的速率缓慢,因此,热交换对土壤湿度场的影响不显著;夏季试验时,大气降雨引起的地表水入

渗对土壤湿度场的分布具有显著影响。

参考文献:

[1] TANG A M, CUI Y J, LE T T. A study on the thermal conductivity of compacted bentonites [J]. Applied Clay Science, 2008,41(3):181-189.

[2] 刘晨晖,周东,吴恒. 土壤热导率的温度效应试验和预测研究[J]. 岩土工程学报, 2011,33(12):1877-1886. LIU C H, ZHOU D, WU H. Measurement and prediction of temperature effects of thermal conductivity of soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12):1877-1886. (in Chinese)

[3] 杨卫波,张苏苏. 冷热负荷非平衡地区土壤源热泵土壤热失衡研究现状及其关键问题[J]. 流体机械,2014,42(1):80-87. YANG W B, ZHANG S S. Research status and key problem of underground thermal unbalance of ground coupled heat pump operated in districts with unbalanced cooling and heating load [J]. Fluid Machinery,2014,42(1):80-87. (in Chinese)

[4] 朱红芬,杜震宇. 土壤源热泵系统热平衡问题对生态环境的影响[J]. 能源与节能,2011,(7):4-6. ZHU H F, DU Z Y. Effects of the ground heat balance of ground coupled heat pump system on ecological environment [J]. Energy and Energy Conservation, 2011,(7):4-6. (in Chinese)

[5] CHIASSON A D, REES S J, SPITLER J D. A preliminary assessment of the effects of groundwater flow on closed-loop ground source heat pump systems [J]. ASHRAE Transactions, 2000, 106(1):380-393.

[6] DIAO N R, LI Q Y, FANG Z H. Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2004, 43(12):1203-1211.

[7] 曾和义,刁乃仁,方肇洪. 竖直埋管地热换热器的稳态温度场分析[J]. 山东建筑工程学院学报, 2002, 17(1):1-6. ZENG H Y, DIAO N R, FANG Z H. Analysis on steady-state temperature field around a vertical borehole in geothermal heat exchangers [J]. Journal of Shandong Institute of Architectural. and Engineering. , 2002,17(1):1-6. (in Chinese)

[8] 那威,宋艳,姚杨. 土壤源热泵地下水水平埋管换热性能及其周围土壤温度场的影响研究[J]. 太阳能学报, 2009,30(4):475-480. NA W, SONG Y, YAO Y. Study on soil temperature field around horizontal buried pipe of heat exchanger for

- ground-source heat pump [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2009, 30(4):475-480. (in Chinese)
- [9] 胡志高, 曹崇民. 冬季地理管周围土壤温度场的模拟与分析[J]. *制冷与空调*, 2008, 8(3):57-59, 35.
HU Z G, CAO C M. Simulation and analysis on ground temperature field of GSHP in winter [J]. *Refrigeration and Air-Condition*, 2008, 8(3):57-59, 35. (in Chinese)
- [10] 刘业凤, 艾永杰, 熊月忠. 地理管地源热泵土壤温度场实验分析[J]. *暖通空调*, 2014, 44(3):119-122, 112.
LIU Y F, AI Y J, XIONG Y Z. Experimental analysis of soil temperature field with ground-source heat pump system [J]. *HV & AC*, 2014, 44(3):119-122, 112. (in Chinese)
- [11] 李晓燕, 于佳文, 杜世强, 等. 严寒地区土壤源热泵地下水水平埋管换热性能影响研究[J]. *太阳能学报*, 2014, 35(3):540-545.
LI X Y, YU J W, DU S Q, et al. Study on the performance impact of horizontal buried pipes heat exchanger in severe cold area[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2014, 35(3):540-545. (in Chinese)
- [12] 陈善雄, 陈守义. 非饱和土热湿耦合传输问题的数值解——理论及一维问题的解[J]. *岩土力学*, 1992, 13(1):39-50.
CHEN S X, CHEN S Y. Numerical analysis of coupled heat and moisture transfer in unsaturated soils: Theory and solution to one dimension problems[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1992, 13(1):39-50. (in Chinese)
- [13] 陈善雄, 陈守义. 非饱和土热湿迁移的数值模拟[J]. *岩土力学*, 1993, 14(2):41-51.
CHEN S X, CHEN S Y. Numerical modeling of coupled heat and moisture transfer in unsaturated soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1993, 14(2):41-51. (in Chinese)
- [14] 杨金国, 赵绪新, 刘伟, 等. 土壤热湿迁移实验与数值模拟的研究[J]. *华中理工大学学报*, 1998, 26(9):39-41.
YANG J G, ZHAO X X, LIU W, et al. An experimental study of moisture and heat transport in soil and its numerical simulation [J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology*, 1998, 26(9):39-41. (in Chinese)
- [15] 赵艳林, 曾召田, 吕海波, 等. 浅层地能开采中土体的热湿迁移机制及力学性状研究综述与展望[J]. *工程地质学报*, 2013, 21(2):222-227.
ZHAO Y L, ZENG Z T, LYU H B, et al. Review and prospect of study on heat and moisture migration mechanism and mechanical behavior of soil in shallow geothermal energy exploitation [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2013, 21(2):222-227. (in Chinese)
- [16] 盛宏. 冬季地下埋管换热器温度场和湿度场的研究[D]. 河北邯郸: 河北工程大学, 2012.
SHENG H. Analysis on temperature field and humidity field of underground heat exchanger in winter [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2012. (in Chinese)
- [17] 王华军, 齐承英, 王恩宇, 等. 土壤高温储热条件下热湿迁移过程的实验研究[J]. *太阳能学报*, 2010, 31(7):824-828.
WANG H J, QI C Y, WANG E Y, et al. Experimental study of heat and moisture transfer process for high-temperature heat storage of soils [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2010, 31(7):824-828. (in Chinese)
- [18] 曾召田. 岩溶地区红粘土热湿迁移及其对地源热泵系统换热性能的影响分析[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
ZENG Z T. Research on heat and moisture migration of red clay and its influence on heat transfer performance of ground source heat pump system in karst region [D]. Nanning: Guangxi University, 2014. (in Chinese)
- [19] PENMAN H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass [C]//*Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. The Royal Society, 1948, 193(1032):120-145.

(编辑 胡玲)