

DOI: 10.11779/CJGE2017S1029

# 制热工况下地埋管周围土壤的热湿迁移试验研究

曾召田<sup>1,2</sup>, 赵艳林<sup>1,2</sup>, 吕海波<sup>\*1,2</sup>, 徐云山<sup>1</sup>, 莫红艳<sup>1</sup>

(1. 广西建筑新能源与节能重点实验室(桂林理工大学), 广西 桂林 541004; 2. 广西大学土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004)

**摘 要:** 基于实际工程建立了地源热泵空调系统运行过程的岩土体原位观测站, 实现系统运行状况和换热过程中岩土体温度变化、水分迁移的实时监测, 通过冬季工况运行试验, 揭示地源热泵运行过程中土体的热湿迁移效应。研究表明: 冬季工况下该地源热泵空调系统的机组性能系数 COP 为 3.58, 具有良好的制热效果; 土壤温度场的变化受地埋管热交换和大气环境变化两个因素的影响, 但二者的影响范围及程度有所区别; 土壤温度场的变化幅度随着与地埋管距离的增加而递减, 竖埋管热作用的影响半径约 2.0 m 左右, 水平埋管热作用的影响半径约 1.0 m 左右; 地埋管热交换对土壤湿度场的影响不显著, 但大气降雨引起的地表水入渗和地下水位的变迁对土壤湿度场变化有明显影响。

**关键词:** 地热能; 地源热泵; 热交换; 热作用半径; 热湿迁移

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)S1-0145-06

**作者简介:** 曾召田(1981-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 高级实验师, 主要从事非饱和土力学、浅层地热能的应用技术及环境岩土工程问题等方面的研究与教学工作。E-mail: zengzhaotian@163.com。

## Heat and moisture migration in soils around ground heat exchangers under heating operation of ground source heat pump

ZENG Zhao-tian<sup>1,2</sup>, ZHAO Yan-lin<sup>1,2</sup>, LU Hai-bo<sup>1,2</sup>, XU Yun-shan<sup>1</sup>, MO Hong-yan<sup>1</sup>

(1. Guangxi Key Laboratory of New Energy and Building Energy Saving (Guilin University of Technology), Guilin 541004, China;

2. College of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** An in-site observation station for soils around the ground heat exchanger (GHE) in the operating process of ground source heat pump (GSHP) is installed to monitor the operation performance of GSHP as well as heat and moisture migration in soils with the heat exchange. Through a heating experiment of GSHP, the effect of heat and moisture migration in soils is revealed. The experimental results show that the GSHP under heating condition has a stable running performance and good heating effect, and its coefficient of performance (COP) is 3.58. The change of temperature fields of soils is affected by the heat exchange of GHE and atmospheric environmental change, but their influence scope and degree are different. Meanwhile, the variation range of temperature field of soils decreases progressively with the increasing distance to the GHE. Therefore, the heat influencing radius of vertical and horizontal GHE is 2.0, 1.0 m, respectively. Finally, the impact of heat exchange of GHE on moisture field of soils is in-apparent. However, there are two obvious impact factors, the surface water infiltrating caused by rainfall and change of the groundwater table on the variation of moisture field of soils.

**Key words:** geothermal energy; ground source heat pump; heat exchange; heat influencing radius; heat and moisture migration

## 0 引 言

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<sup>[1-2]</sup>、土壤的“冷热堆积”<sup>[3-4]</sup>、地下水渗流对地埋管换热效果的影响<sup>[5-6]</sup>等。尽管一些学者对上述问题进行了相关研究并取得了一定的成果, 但目前地源热泵技术在广西岩溶地区的应用尚处于初步阶段, 主要原

因如下: ①广西是典型的碳酸盐岩溶地区<sup>[7]</sup>, 其上覆土层一般广泛分布着碳酸盐岩风化而成的红黏土, 该类土具有独特的矿物组成和特殊的“二级”孔隙结构<sup>[8-9]</sup>, 因此其具有复杂的传热特性, 使发生在其中的热湿迁移效应也具有复杂多变性<sup>[10]</sup>; ②岩溶地区的地下水位

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41502284; 51568014; 41272358); 国土资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室项目 (KDL201603); 桂林理工大学博士科研启动基金项目 (2016254)

收稿日期: 2016-11-28

\*通讯作者 (E-mail: lhb@glut.edu.cn)

表 1 地源热泵系统各部分循环水的监测参数统计值

Table 1 Values of monitoring parameters of circulating water in GSHP system

循环水 监测参数	系统总入、 回水	A区总 入、回水	B区总 入、回水	C区总 入、回水	A1 入、回水	A5 入、回水	B1 入、回水	C3 入、回水
平均温差/℃	0.9	0.9	1.2	0.4	0.3	0.9	0.9	0.3
平均流量/(L·s <sup>-1</sup> )	1.67	0.49	0.59	0.53	0.16	0.17	0.19	0.26
平均压力/MPa	0.08	0.18	0.09	0.11	0.09	0.12	0.09	0.09

一般较高,在岩土层中形成的饱和-非饱和渗流对红黏土的传热过程具有显著影响;同时,岩溶孔隙中的饱和和渗流对地埋管换热系统的换热性能影响显著;③广西炎热多雨的气候环境,特别是降雨形成的地表浅层渗流对于地埋管换热系统的热交换能力也具有一定的影响。因此,深入研究岩溶地区红黏土的热湿迁移效应及其对地埋管换热系统热交换的影响,对广西岩溶地区地源热泵技术的应用和推广具有非常重要的现实意义和理论价值。

地源热泵运行中地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,本文基于实际工程建立了地源热泵运行过程的岩土体原位观测站,实现地源热泵系统运行状况和换热过程中岩土体温度变化、水分迁移的实时监测,通过冬季工况的地源热泵运行试验,对地源热泵运行过程中土体的热湿迁移效应进行深入研究,为广西岩溶地区地源热泵技术应用推广提供理论依据和技术支持。

1 地源热泵试验平台简介

试验场地位于桂林理工大学屏风校区内,现场地质钻探取样和室内试验结果表明:靠近屏风山侧区域属典型的残坡积红黏土,场地内岩土层较均匀,土层厚度约 7.5~9.0 m,以下为碳酸盐基岩;临近小东江区域属漓江 II 级阶地地貌,场地内岩土层较为复杂,主要分布有黏土、粉质黏土、粉土等土层,夹杂有粉砂、卵石层,土层厚度约 8.0~10.0 m,以下为碳酸盐基岩,钻探时初见地下水位埋深为 5.0~6.0 m。试验场地内岩溶均较为发育,岩溶地下水比较丰富。试验场地的土层剖面和基本热物理性质指标详见文献[11, 12]。

地源热泵试验平台于 2013 年 8 月建成,主要分为地源热泵试验系统、运行监控和数据采集系统两个系统。地源热泵试验系统包括 4 个部分,依次为地埋管换热系统、热泵机组、末端空调系统、循环水泵;地埋管换热系统采用横、竖复合方式,分为 A、B、C 三个区域。根据试验需求,笔者自行研制了一套地源热泵运行状况监控和土体数据采集系统,包括地源热泵运行状况监控、土体温度采集、土体湿度采集、气象数据采集、地下水观测 5 个子系统。具体的地源热泵试验平台布置和传感器埋设情况详见文献[11, 12]。

2 试验内容

冬季工况试验时间为 2014 年 1 月 8 日至 14 日,采用间歇运行模式,具体工况为:模拟商场内运行的地源热泵空调系统(工作特性:白天开机,夜晚关机);试验期间,每天 9:00 开机,热泵连续运行 12 h, 21:00 关机,运停比(运行与停机的时间之比)为 1:1。

试验过程中,分别对热泵机组的运行参数(进出口水温、流量、压力)、土壤的状态参数(温度、湿度、地下水位)、周围的气象因素(降雨量、蒸发量、风速值、太阳辐射值)等进行实时监测。

3 试验结果及分析

3.1 地源热泵系统性能分析

表 1 为冬季工况间歇运行模式下热泵系统各部分循环水的监测参数统计值。

由表 1 可知:管内循环水通过地埋管与周围土壤进行热交换,土壤温度降低,循环水吸收土壤热量,温度升高,进出口循环水存在一定的温差;温差大小与地质条件、地埋管类型和长短等因素有关。例如,竖埋管 A5、B1 由于大部分处于温度恒定的地层(6.0 m 以下),与土壤的热交换较充分,其平均温差较大(最小值为 0.8℃),而横埋管 C3 由于埋深浅,热交换效率受气候变化影响较大,其平均温差较小(最大值仅 0.5℃)。同时,分析竖埋管 A1、A5、B1 可知,三者的钻井深度均为 32 m,管内流速大致相同,三者进、出水温差却各有差异,尤其是 A5 和 A1,两者温差相差近两倍,其原因可能是岩溶地下水渗流的影响。

根据文献[11]的计算方法,计算出热泵机组的换热量  $Q_E$ 、地埋管换热器平均换热量  $Q_C$  见表 2。通过分析计算,冬季工况下运行的地源热泵机组性能系数 COP 平均值为 3.58,与普通空调相比具有高效、节能、环保等优点,且完全能够满足实验室供热的使用要求。

表 2 地源热泵系统各部分的平均换热量

Table 2 Average heat exchanged by GSHP system (kW)

系统各部分名称	系 统	A 区	B 区	C 区	A1	A5	B1	C3
平均换 热量	6.3	1.9	3.0	0.9	0.2	0.6	0.7	0.3

### 3.2 地埋管管壁温度变化规律

图 1 为上述运行模式下竖埋管 A5 不同深度处管壁温度的变化规律。由此可知: 热泵运行过程中, 地埋管换热器通过管内水循环不断吸收土壤的热量, 同时向土壤中排放冷量, 随着该过程的不断进行, 排放到土壤中的冷量逐渐增加, 致使管壁温度随运行时间逐渐降低; 当系统停机后, 地埋管附近土壤中的冷量向远端土壤中扩散, 附近土壤温度得到一定程度的恢复; 管壁温度恢复的程度与恢复时间有关, 在较长的恢复时间模式下运行热泵, 土壤温度能得到较充分的恢复。图 1 表明, 该模式的运停比为 1:1, 管壁土壤温度在停机后 12 h 得到一定程度恢复, 与初始地温 (20.68℃, 见文献[11]) 尚有 0.5℃~0.8℃的差值。

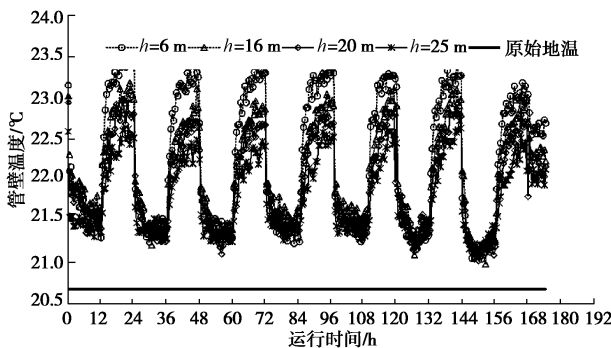


图 1 A5 管不同深度处管壁温度变化曲线

Fig. 1 Wall temperatures of pipe A5 at different depths

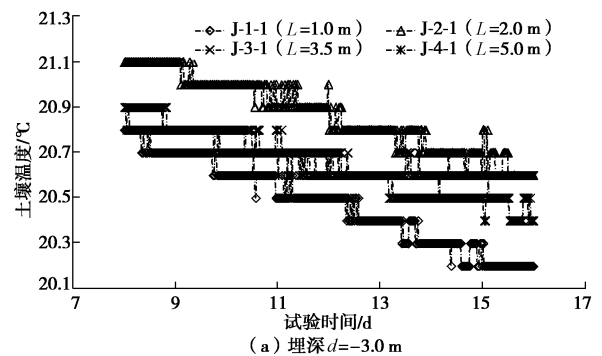
### 3.3 地埋管周围土壤热湿迁移效应

#### (1) 竖埋管周围土壤的热湿迁移

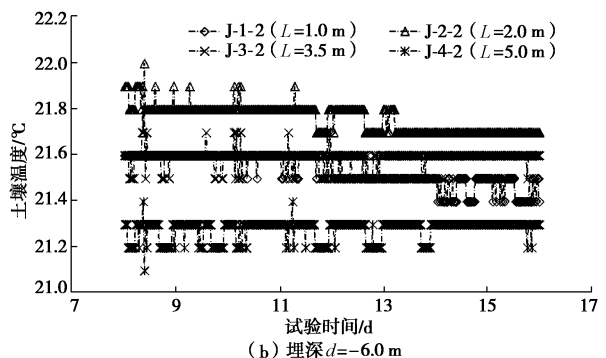
图 2 为竖埋管 A5 周围土壤温度场(J-1~J-4 方向)分布情况。由此可知: 冬季试验时, 循环水通过地埋管与其周围土壤进行了热交换(吸热放冷), 管壁附近土壤释放出热量、温度降低; 在土壤内部形成了温度梯度场, 远端的热量在温度梯度的影响下开始向地埋管附近转移, 使远端土壤的温度也不同程度地降低。

图 2(a) 表明, 地下 3.0 m 深处土壤一方面吸收了热泵运行中地埋管排放的冷量, 另一方面此处土壤在大气影响范围之内, 大气变化有显著影响, 因此, 该深处各测点的土壤温度降低幅度大致相同, 这表明大气变化对土壤温度的影响占据了主导地位。图 2(b) 表明, 地埋管附近土壤温度的降低幅度与距离地埋管的远近有关, 近壁处土壤温度降幅最大, 随着距离增加, 其温度降幅递减; 在同一深度处 ( $d=-6.0$  m), 各监测点与 A5 依次相距 1.0, 2.0, 3.5, 5.0 m, 试验 7 d 后, 各自的土壤温度降幅为 0.3℃, 0.2℃, 0.1℃, 0.1℃, 这表明在距离 A5 的 2 m 范围内, 主要是由地埋管的热交换引起周围土壤的温度降低, 因此 1 m 处的温度降低值大于 2 m 处的温度降低值; 同时, 大气变

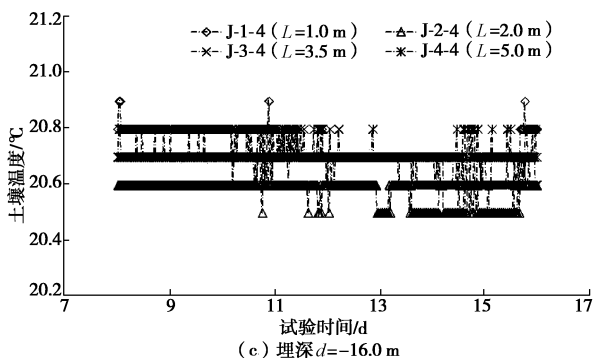
化对土壤温度的降低也有一定的贡献值, 该变化值对于同一深度的土壤是相同的, 因此在距离 A5 的 3.5, 5.0 m 处 (J-3-2、J-4-2) 的降低值均为 0.1℃。由此推定, 试验期间地埋管 A5 热作用的影响半径为 2.0 m 左右, 在此范围内热交换对周围土壤温度的影响占据主导地位。图 2(c) 表明岩溶地下水的渗流对热交换具有显著的影响, 这是因为渗流带走了多余冷量, 减少冷量堆积, 减缓了土壤温度的降低, 可有效提高热泵的运行效率; 图 2(c) 中距离 A5 的 1 m 处 J-1-4 的温度降低值为 0.4℃, 但距离 2 m 处的 J-2-4 的温度降低值仅为 0.2℃, 而在此范围之外的 J-3-4、J-4-4 试验期间均无明显的温度降低, 这是地下水渗流将土壤中热量带走的结果; 因此, 在岩溶地区地埋管设计中, 需考虑地下水渗流对地埋管换热效果的影响。



(a) 埋深  $d=-3.0$  m



(b) 埋深  $d=-6.0$  m



(c) 埋深  $d=-16.0$  m

图 2 竖埋管 A5 周围土壤的温度场

Fig. 2 Temperature fields of soils around vertical U-pipe A5

图 3 给出了试验期间 A5 管周围土壤湿度场(J-1~

J-4) 的分布情况, 由此可知: ①地埋管 A5 周围土壤湿度场在 1.0 m 及其以外区域未发生明显变化; 原因在于: 地埋管换热器与周围土壤的热交换, 使土壤温度场产生温度梯度; 在其驱动下, 土壤中的热量和水分都将发生迁移; 但由于水分迁移的速率很小, 试验期间影响范围尚未达到 1.0 m。②冬季的土壤含水量低, 表层干燥的土壤全部吸收了少量大气降雨 (1 月 7 日至 8 日和 11 日至 13 日均出现明显降雨, 见图 4), 因此 3.0 m 深度处的土壤不受地表水入渗的影响, 土壤含水率处于一个缓慢降低的趋势。③由于地下水位下降 (见图 5), 使土壤水分发生迁移, 图中 4 个监测点的土壤含水量表现出微弱的下降趋势。由此可知: 土壤湿度场的变化不仅跟地源热泵运行过程的热交换有关, 还跟大气降雨形成的地表水下渗、地下水位变化引起的水分迁移等有密切联系, 是一个多因素综合影响的复杂场变量, 在工程实践中需要具体分析。

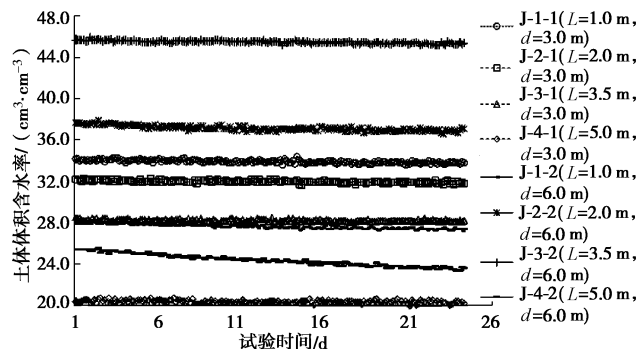


图 3 竖埋管 A5 周围土壤的湿度场

Fig. 3 Moisture fields of soils around vertical U-pipe A5

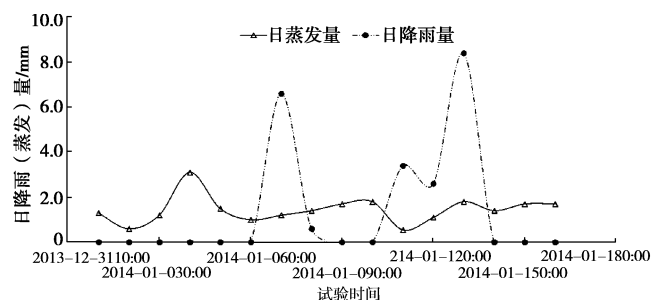


图 4 试验期间日蒸发量和日降雨量

Fig. 4 Daily evaporations and rainfalls during test period

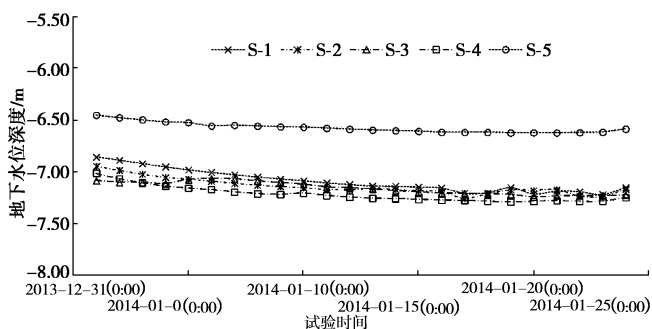
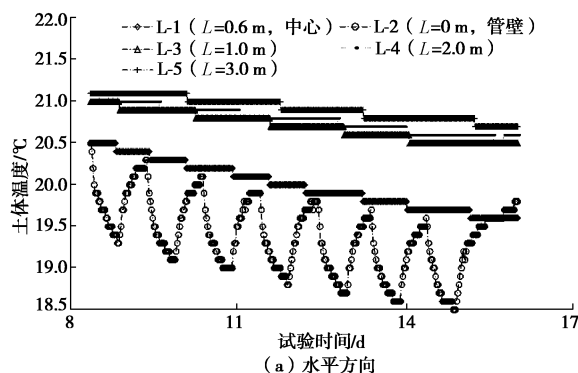


图 5 试验期间地下水位变化

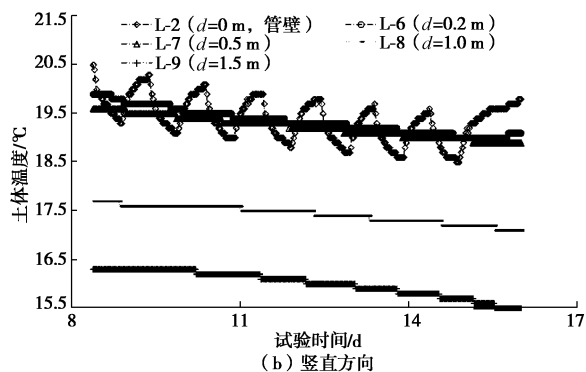
Fig. 5 Variation of groundwater table during test period

## (2) 水平埋管周围土壤的热湿迁移

图 6 为试验期间水平埋管 C3 管壁及周围土壤温度场的分布情况, 由此可知: ①地表以下 2.5 m 处于大气影响范围内, 大气变化有显著影响, 该深度处土壤一方面吸收了热泵运行中地埋管排放的冷量, 另一方面也向地表传递热量, 因此该处土壤温度降低由二者的共同作用完成, 但二者在各点的作用大小不同, 土壤向地表传递热量具有相同的温度梯度, 因此处于同一深度处的土壤具有相同的温度变化量, 而热泵运行排放的热量随着距离增加, 其温度变化量逐渐减小; 图 6 (a) 中, L-1、L-2 和 L-3 主要受热泵运行排放的冷量影响, 同时也向地表传递热量, 而 L-4 和 L-5 温度降低的主要因素是此处土壤要向地表传递热量 (温度变化量  $\Delta T$  分别为  $0.4^\circ\text{C}$ ,  $0.4^\circ\text{C}$ )。②地埋管附近土壤温度降低幅度跟距离地埋管的远近有关, 近壁处土壤温度降幅最大, 随着距离增加, 其温度降幅递减: 水平方向上, 深度相同 ( $d=2.5\text{ m}$ ), 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, 试验 7 d 后, 其土壤温度降幅  $\Delta T$  分别为  $0.9^\circ\text{C}$ ,  $0.5^\circ\text{C}$ ,  $0.4^\circ\text{C}$ ,  $0.4^\circ\text{C}$ , 如图 7 中 A 所示; 竖直方向, L-6、L-7、L-8、L-9 与 C3 的距离依次为 0.2, 0.5, 1.0, 1.5 m, 经过 7 d 试验后, 其土壤温度降低幅度  $\Delta T$  分别为  $0.9^\circ\text{C}$ ,  $0.7^\circ\text{C}$ ,  $0.6^\circ\text{C}$ ,  $0.8^\circ\text{C}$ , 如图 7 中 B 所示; 由此推断 C3 地埋管热作用的影响半径约为 1.0 m。



(a) 水平方向



(b) 竖直方向

图 6 水平埋管 C3 周围土壤的温度场

Fig. 6 Temperature fields of soils around horizontal U-pipe C3

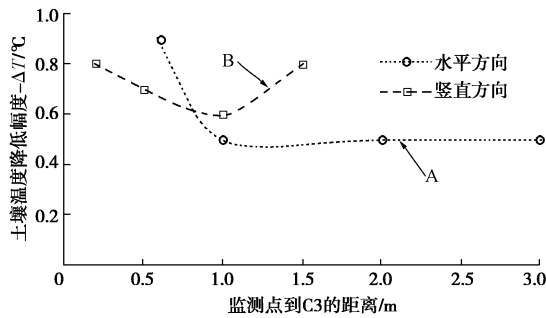


图 7 土壤温度变化量与离管距离的关系曲线

Fig. 7 Relationship between change rate of soil temperature and distance from buried pipe

图 8 为试验期间 C3 管周围土壤湿度场的分布情况, 由此可知: ①冬季工况下运行地源热泵, 与地埋管 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; 其原因在于, 尽管地埋管换热器向土壤中排放的冷量引起周围土壤温度降低, 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都将发生迁移; 但由于水分迁移的速率很小, 同时由上述热交换量分析可知横埋管 C3 向土壤中排放的冷量较小, 故热交换对土壤湿度场的影响不显著。②冬季, 由于土壤含水率低, 上层干燥土壤全部吸收了少量的大气降雨, 因此土壤湿度未发生明显变化, 这与上述竖埋管水分迁移分析的结论一致。

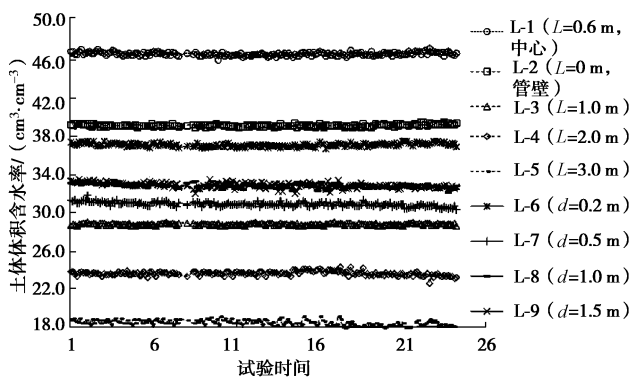


图 8 水平埋管 C3 周围土壤的湿度场

Fig. 8 Moisture fields of soils around horizontal U-pipe C3

## 4 结 论

(1) 该地源热泵空调系统在冬季工况下运行性能稳定, 具有良好的制热效果; 机组性能系数 COP 平均值为 3.58, 具有高效、节能、环保等优点。

(2) 循环水通过地埋管与周围土壤进行热量交换, 引起土壤温、湿度场的变化, 同时周围大气变化也对地表土壤温、湿度场产生显著影响; 二者对土壤温、湿度的影响范围及程度是有所区别的。

(3) 土壤温度场的变化幅度随着与地埋管距离

的增加而递减, 竖埋管热作用的影响半径在 2.0 m 左右, 水平埋管热作用的影响半径在 1.0 m 左右。

(4) 地埋管热交换对土壤湿度场的影响不显著, 但大气降雨引起的地表水入渗和地下水位的变迁对土壤湿度场变化的影响明显。

## 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 Chen-hui, ZHOU Dong, WU Heng. 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 Wei-bo, ZHANG Su-su. 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 Hong-fen, DU Zhen-yu. 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] 刘金荣, 黄国彬, 黄学灵, 等. 广西区域热带岩溶地貌不同类型的演化浅议[J]. 中国岩溶, 2001, 20(4): 247 - 252. (LIU Jin-rong, HUANG Guo-bin, HUANG Xue-ling, et al. Discussion on the evolution of different types of regional tropical karst landform in Guangxi[J]. Carsologica Sinica, 2001, 20(4): 247 - 252. (in Chinese))
- [8] 廖义玲, 余培厚. 红黏土的微结构及其概化模型[J]. 工程地质学报, 1994, 3(1): 27 - 37. (LIAO Yi-ling, YU Pei-hou.

- The microstructure and generalized model of red clay[J]. Journal of Engineering Geology, 1994, **3**(1): 27 - 37. (in Chinese))
- [9] 廖义玲, 朱立军, 周训华. 土体中惰性孔隙及其物理力学属性的研究[J]. 工程勘察, 2001(1): 5 - 8. (LIAO Yi-ling, ZHU Li-jun, ZHOU Xun-hua. Study on inert pore in soil and its physical mechanic property[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2001(1): 5 - 8. (in Chinese))
- [10] 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 Yan-lin, ZENG Zhao-tian, LU Hai-bo, 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))
- [11] 曾召田. 岩溶地区红黏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 Zhao-tian. 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))
- [12] 曾召田, 徐云山, 赵艳林, 等. 岩溶区地源热泵系统土壤热湿迁移试验平台研制[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, **41**(1): 178 - 186. (ZENG Zhao-tian, XU Yun-shan, ZHAO Yan-lin, et al. Development of experimental platform on soil heat and moisture migration of ground source heat pump system in karst region[J]. Journal of Guangxi University (Nat Sci Ed), 2016, **41**(2): 178 - 186. (in Chinese))
- (本文责编 孙振远)