

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201804087



# 土壤-空气换热器地埋管周围 土壤动态的热湿迁移规律

杨茂林, 杜震宇

(太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 以调节日光温室室内环境的土壤-空气换热系统为背景,开展白天降温、夜晚升温两种不同工况下的试验,从而探究地埋管周围轴向和径向上的温度、湿度迁移规律.研究表明:昼夜温差大的情况下,土壤的热饱和程度会随之产生周期性变化,土壤中蓄放热状态的差异性也会引起温度、湿度分布的动态变化;土壤-空气换热器作用下的土壤热湿耦合的作用明显,温度梯度对湿分迁移有一定的推动作用,产生的湿度梯度同时也会影响温度分布;土壤-空气换热器对土壤的影响主要表现为径向上的变化,即在竖直方向上产生明显的湿度分层及温度变化,且距离换热管越近,变化幅度越大,变化趋势也越显著.

**关键词:** 土壤-空气换热器; 热湿迁移; 耦合作用; 湿度分层

**中图分类号:** TK 124      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2019)01-0079-06

## Experimental Study on Dynamic Heat and Moisture Migration Law Around Earth-to-Air Heat Exchanger Ground Tubes

YANG Maolin, DU Zhenyu

(College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** With the background of adjusting the earth-to-air heat exchange system in the environment of the solar greenhouse, experiments were conducted during daytime cooling and nighttime heating under two different conditions to investigate the axial and radial migration patterns around the ground tube. The experimental results show that: when the temperature difference between day and night is large, the degree of thermal saturation of the soil will change periodically, and the difference in the state of heat release between the soil and the heat will also cause a dynamic change in the temperature and humidity distribution. The soil temperature and humidity distribution under earth-to-air heat exchanger changes significantly, and the coupling between heat and moisture is significant. The temperature gradient has a certain role in promoting the migration of moisture, and the generated moisture gradient will also affect the temperature distribution. The effect of earth-to-air heat exchangers on the soil is mainly radial, that is, there is obvious humidity stratification and temperature change in the vertical direction, and the closer the distance to the heat source is, the greater the span of change will be, as well as the change tendency more obvious.

**Keywords:** earth-to-air heat exchanger; heat and moisture migration; coupling effect; moisture stratification

随着我国社会经济和生产水平快速发展,能源在利用过程中的损耗与环境污染治理之间的矛盾日渐突出,优化能源结构,实现清洁低碳能源,开发和利用可再生能源已经逐步成为能源应用领域的

热点话题<sup>[1-2]</sup>. 其中,土壤-空气换热器作为充分利用浅层地热能的设备,在农业和生活方面已经有了一定的推广和使用<sup>[3-6]</sup>. 关于土壤-空气换热器系统的优化与探索,国内外专家从实验和模拟两个方向进行了深入的研究. 模拟研究方面,研究者主要关注埋管内空气与土壤间的换热过程,通过将空气假定为干空气,土壤视为大容积上的虚拟连续介质,并采用局部热平衡模型进行理论研究和分析. 吴会军等<sup>[7-8]</sup>把受太阳辐射影响的土壤自然温度场与受埋地换热管内空气影响的土壤温度场叠加,以土壤导热方程和  $K-\epsilon$  湍流方程为基础,对土壤-空气换热器系统进行三维动态数值模拟. 崔良卫<sup>[9]</sup>对土壤-空气换热器夜间降湿的可行性和温室热湿环境进行分析计算,认为在冬季夜间除湿需要的条件非常苛刻,局限性非常高. Kumar 等<sup>[10]</sup>运用 MATLAB 和有限差分法,提出一个瞬态模型去估计土壤-空气换热器系统的动态热性能,并计算了土壤-空气换热器系统的节能潜力. Niu 等<sup>[11]</sup>研究土壤-空气换热器系统的热性能,并推导出回归模型. 实验研究方面,刘宏等<sup>[12-13]</sup>针对土壤-空气换热器在夏季运行时的换热机理进行了详细的试验研究,测试了 3 种不同空气流速( $0.5, 1.5, 4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )情况下,换热管内距入口处,不同位置的空气温度、湿度及埋管周围的土壤温度,并对整理的实验数据用数据整理分析软件 SPSS 进行拟合,建立出口空气温度与管内空气平均流速、埋管管长、入口空气温度、湿度的关系式. 目前的研究均以土壤-空气换热系统及埋管为研究核心,探索埋管的换热机理和特性,并针对水平埋管管内空气与周围非饱和土壤热交换的过程,建立完整的土壤-空气换热器瞬态模型. Philip 等<sup>[14]</sup>提出换热过程中非饱和土壤热湿耦合的基本模型,研究温度、湿度分布和耦合传递规律,为实验方案和换热器构造提供理论依据. 本文基于以上理论研究,以调节日光温室内环境的土壤-空气换热系统为背景,对在其运行下的埋管周围土壤热湿耦合迁移规律进行相应的实验探究和分析.

1 试验概况

1.1 试件平台介绍

试验选取地点为太原市小店区孙家寨村益丰农业种植科技园区内的一栋日光温室大棚,该温室为节能型塑料薄膜日光温室,如图 1 所示. 温室坐北朝南,跨度为 9.7 m,长度为 56 m,东、西山墙分别厚 1.0, 0.65 m,后墙高度为 3.1 m、厚 1.04 m. 后墙和山墙均采用实心黏土红砖砌成,且中间加有聚苯板保温层和以炉渣、土填充的空心层. 前屋采光面使用聚乙烯流滴性 PVC 塑料膜,并通过钢架结构支撑,塑料膜有上风口和下风口,可自动启闭,必要时,可以对温室大棚进行换气<sup>[15]</sup>.

土壤-空气换热系统采用的埋管为塑料给水管<sup>[12]</sup>. 埋管沿东西向水平铺设,分别在地下 1.0 m 埋深处和地下 2.0 m 埋深处. 设计埋管间距为 1.0 m,管长为 18 m,每层总共 8 根. 水平埋管的位置图、断面图及对应编号,如图 2 所示. 图 2 中:靠近南侧 8 根埋管(A1~A4, B1~B4)的管径均为  $\Phi 90$  mm,靠近日光温室北侧 8 根埋管(A5~A8, B5~B8)管径均为  $\Phi 110$  mm. 选取 A4, A5 作为实验研究的土壤-空气换热器埋地换热管,并在其周围土壤埋设土壤温湿度一体化传感器.

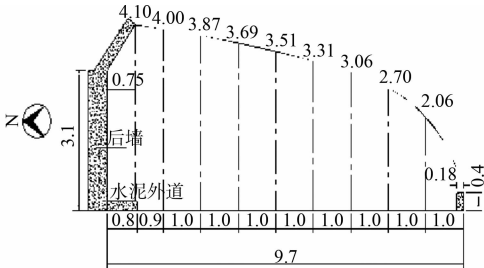
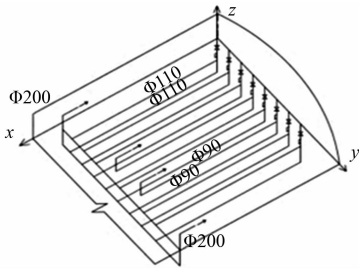
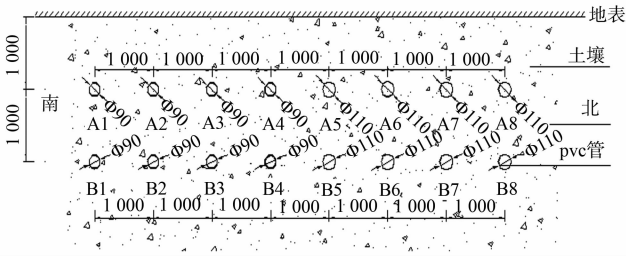


图 1 温室大棚结构剖面图(单位:m)  
Fig. 1 Greenhouse structure section (unit: m)



(a) 位置图



(b) 断面图和对对应编号

图 2 土壤-空气换热系统的埋管(单位:mm)

Fig. 2 Buried pipe of earth-to-air heat exchanger (unit: mm)

1.2 测点布置与实验器材

为了研究在土壤-空气换热器作用下, 换热管在轴向和径向上的土壤温度、湿度变化规律, 选取一些具有代表性的测点. 在空气入口段, 管内空气与土壤的温差大, 传热效果显著. 随着空气沿换热管流动, 空气与土壤的换热温差逐渐减小; 同理, 径向上越靠近换热管入口的点, 传热传湿效果越显著. 因此, 为了更好地研究土壤的传热传湿特性, 采用疏密相间的原则布置温湿度传感器.

径向位置到管中心的距离依次为 0.07, 0.15, 0.25, 0.50, 0.70, 0.85, 0.93, 0.99 m; 轴向位置到埋管入口的距离依次为 0.15, 0.65, 1.50, 2.50, 4.50, 7.00, 10.00, 13.50, 17.50 m, 共计 72 个测点. 采用 SWR-100W 型土壤温湿度一体化传感器测试土壤的温度和湿度. 该传感器的性能参数, 如表 1 所示. 表 1 中:  $d$  为土壤湿度;  $t$  为土壤温度.

表 1 土壤温湿度一体化传感器的性能参数

Tab. 1 Technical parameter of soil temperature and moisture sensor		
测量参数	精度	量程
$d/\%$	$\pm 3$	0~100
$t/^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.2$	-30~70

2 数据采集与分析

2.1 实验方法

分析选取的数据时间段为 2018 年 3 月 20 日至 2018 年 4 月 20 日, 主要进行了土壤-空气换热器换热管周围土壤温度、湿度的连续性测试. 数据采集的时间间隔设为 5 min, 使用 Enview 监测软件按实验设置的测试间隔导入 Excel 中; 然后, 将数据汇总、处理分析并绘制相关曲线图. 由于在采集过程中, 存在人工读数误差及量具存在磨损、天气条件、环境影响等因素, 容易造成数据失真、损坏、异常等. 因此, 通过 Excel 丰富的内置运算函数和 VBA 脚本处理功能对采集数据进行一系列必要的处理, 并且修正失真数据, 删除不符合规律的坏值等.

试验主要研究土壤-空气换热器水平埋管的换热情况, 其在土壤中的换热作用主要表现为竖直方向上的传热. 然而, 由于沿管长方向上的换热量不同, 同一平面上也会产生相应的温度差异, 正是这两个方向上的温差驱动力, 造成了土壤中动态的温度、湿度分布. 因此, 主要通过径向和轴向来讨论土壤中的热湿迁移规律.

2.2 径向热湿迁移规律

2.2.1 径向随时间的热迁移规律 土壤-空气换热器运行下, 径向土壤温度实时监测的日变化情况, 如图 3 所示. 图 3 中:  $t$  为温度;  $r$  为测点位置.

由图 3 可知: 在  $r=0$  m 处, 测试季节的昼夜温差变化较大, 温度分布呈现出明显的周期性变化. 管道内的空气温度在 0:00~10:00 左右低于土壤温度, 此时, 土壤处于放热状态, 换热管起到了升温空气的作用; 而其他时间段内, 由于受太阳辐射、温室内作物及维护结构的影响, 温室和管道中的空气温度大幅度上升, 逐渐大于土壤空气温度, 此时, 土壤处于明显的吸热状态, 换热系统起到了降温空气的作用; 一天时间内的降温和升温过程使温室内环境的气温趋于稳定值. 同时, 距离埋管越近, 换热效果越明显, 温度变化越剧烈, 变化跨度也越高, 不同位置测点的温度变化在时间上出现一定的滞后效应.

由图 3 还可知: 在  $r$  为 0.07, 0.15 m 处的测点经过一定的换热后, 温度变化呈现小幅度的升高, 分别由 15.9  $^{\circ}\text{C}$  上升到 16.32  $^{\circ}\text{C}$ , 16.3  $^{\circ}\text{C}$  上升到 16.7  $^{\circ}\text{C}$ . 这是由于测试时间处于春季的过渡季节, 白天时长大于夜晚, 温室内受太阳辐射的影响更大, 空气温度更高, 土壤吸收的热量大于土壤释放的热量, 使土壤温度随着换热系统的运行产生了微升.

2.2.2 径向的热湿迁移规律 由于过渡季节白天和夜晚土壤的蓄放热情况不同, 会造成径向土壤不同的温度分布规律. 比较分析白天和晚上两种情况下, 径向的热湿迁移规律, 如图 4 所示. 图 4 中:  $X$  为管径方向上的距离;  $d$  为土壤湿度.

由图 4(a)可知: 在白天, 土壤中的温度低于管中空气的温度, 在近管壁处的土壤快速吸收热量, 温度升高; 距离管壁越远, 换热量减小, 温度升幅越小, 从而形成由近管壁处到距管壁远端温度逐渐降低的

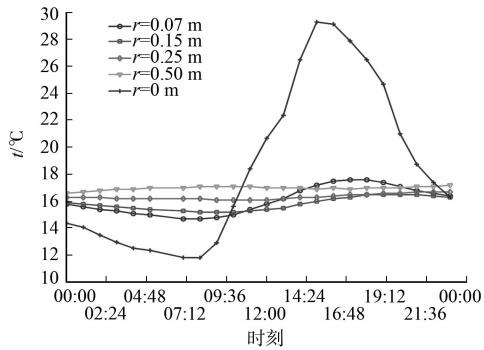


图 3 径向随时间的热迁移规律  
Fig. 3 Heat transfer with time along pipe diameter

趋势,直到 0.50 m 处,温度达到了稳定值,此处为换热器的热作用半径位置;随后的土壤温度分布则主要受地表和太阳辐射的影响,有大幅度的上升。

由图 4(b)可知:在夜晚,土壤处于放热状态,由于距管壁远近的不同,造成放热量的差异,形成相应的温度分布,即呈现由近到远温度升高的趋势,到 0.50 m 也达到稳定值。湿度值分布及变化趋势和温度有着很明显的对应关系。在靠近管壁处,土壤温度梯度最大,Soret 效应<sup>[16]</sup>较明显,土壤中的水分由高温向低温的方向扩散。此处含湿量下降,逐渐远离管壁,温度梯度逐渐减小,推动水分向远端迁移的推动力减弱,最终造成水分的局部聚集,产生了局部增湿<sup>[17]</sup>现象。同时,聚集的水分所产生的湿度梯度又会推动水分向湿度较低的土壤孔隙处移动,并带走热量,产生新的温度梯度。最终,动态的温度、湿度耦合作用构成动态的温度、湿度场。因此,含湿量的变化速率小于温度的变化速率,湿迁移滞后于热迁移。

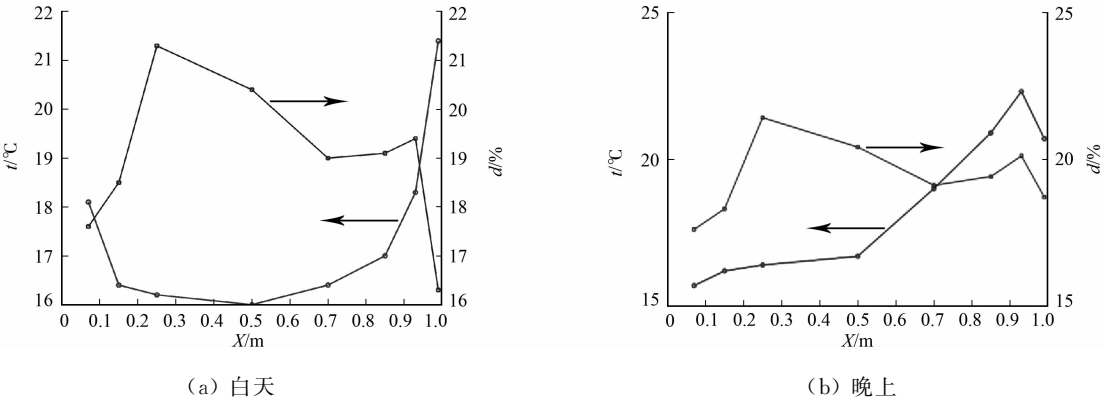


图 4 管径方向土壤温度、湿度分布

Fig. 4 Soil temperature and humidity distribution in vertical direction

2.3 轴向热湿迁移规律

轴向温度、湿度分布的变化,主要取决于管道内空气与土壤换热量的差异所产生的轴向温度梯度的推动力。

2.3.1 轴向热迁移规律 当半径  $r$  为 0.07, 0.15 m 时,在不同管长( $L$ )和不同系统运行时刻,土壤温度的分布规律,如图 5 所示。分别选取 10:00, 12:00, 14:00, 18:00 的轴向温度数据进行分析。因为这些时间段土壤处于吸热状态,土壤温度沿管长方向逐渐降低。

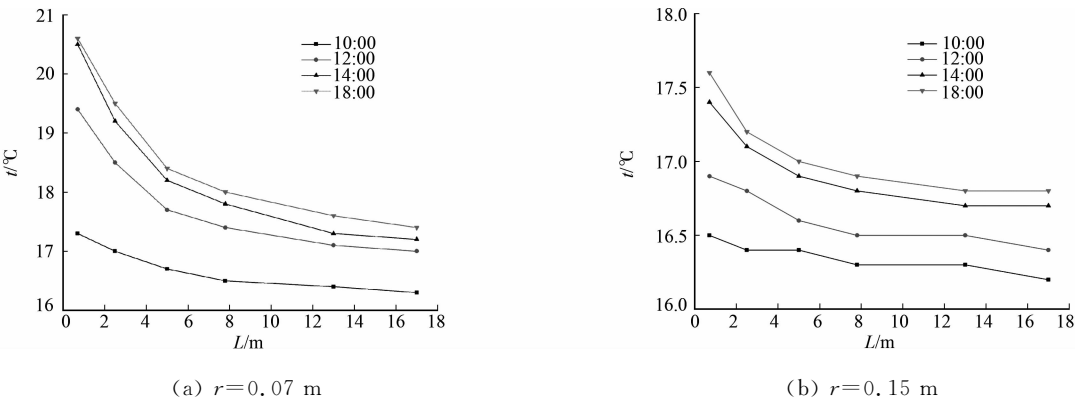


图 5 沿管长方向上土壤温度的变化

Fig. 5 Variation in soil temperature along pipe length

以 14:00 为例,在埋管入口段,管内空气与土壤的温差大,换热效果明显,土壤温度梯度最大;随着入口段距离的增加,空气温度逐渐升高,与土壤的换热温差逐渐减小,换热变缓,土壤温度梯度也逐渐减小。过渡季节由于昼夜温差较大,土壤的温度会经历一个先升温再降温的循环过程,其间会有一个温度峰值和谷值,这种变化状态可以用土壤的热饱和程度来衡量。

由图 5 可知:在 10:00—12:00 期间,轴向上同一测点的土壤温度上升最大;在 14:00—18:00 期间,升温很小,几乎不变。由此可知,在 10:00 左右,土壤的温度最低,热饱和程度最小,吸热潜力巨大;而在 14:00—18:00 期间,土壤温度逐渐升高,热饱和程度逐渐增高至最大值,土壤吸热升温的趋势逐渐放

缓,此时,系统的换热性能也不断降低.对比图 5(a),(b)可知:在径向上,越靠近换热管,换热效果越显著,温度变化越明显.

2.3.2 轴向湿迁移规律 当土壤-空气换热器运行一段时间后,在  $r$  为 0.07,0.15,0.25,0.50 m 处,埋管附近土壤含湿量沿轴向的变化情况,如图 6 所示.

由图 6 可知:当  $r=0.50$  m 时,土壤的含湿量沿轴向基本不变,此时的湿度值等于土壤的初始含湿量,说明土壤-空气换热器运行过程中,土壤的湿度未受到换热的扰动;在  $r=0.07$  m 处,土壤含湿量沿轴向逐渐增加.这是因为在白天处于蓄热状态时,越靠近管道入口和管壁处,土壤温度值和温度梯度越高,在竖直和水平方向温度梯度的驱动下,换热管和管道入口附近土壤的含湿量向轴向和径向迁移,并在远端不断积聚.因此,在  $r$  为 0.15,0.25 m 处,轴向上同一测点的含湿量超过了土壤初始含湿量.随着空气在管内流动,空气和土壤的温差也逐渐减小,湿度驱动力也不断减小.所以,在  $r$  为 0.15,0.25 m 处,土壤含湿量沿管长方向逐渐减小.

2.4 轴向和径向的湿度分布对比

由于土壤的各向异性,且内热源的传热方式不均匀,土壤中的温度、湿度在竖直和水平方向上表现出明显的差异,因此,需要对轴向和径向的温度和湿度分布进行对比.由于温度波动较大,不同方向难以对比,这里主要选取湿度分布情况进行分析比较.

管径方向和管轴方向上的湿度分布变化情况,如图 7 所示.图 7 中: $X$  为管径方向上的距离; $Y$  为管轴方向上的距离.由图 7 可知:随着时间的变化,两个方向上各个测点的湿度始终趋于一个稳定的值,这是温度梯度和湿度梯度共同作用的结果;不同的是,管径方向上湿度跨度比水平方向上大的多,出现了明显的湿度分层.这是由于换热管为水平方向,热量主要向竖直方向上扩散,使管径方向上的温度梯度较大,从而使湿分主要沿竖直方向上迁移,同时产生了竖直方向上的湿分聚集和湿度梯度;此时,管轴方向上的温度、湿度梯度所产生的推动力相比管径方向上的较微弱,所产生的湿度分层并不明显,湿度分布的范围也比较集中.

3 结论

- 1) 昼夜温差大的情况下,土壤的热饱和程度会产生周期性变化,土壤中蓄放热状态的差异性会产生温度、湿度分布的动态变化.
- 2) 土壤的各向异性及土壤空气换热器的换热效应的不均匀性会产生土壤温度、湿度分布的各向异性,主要表现为轴向和径向上的变化.土壤-空气换热器对土壤的影响主要表现为径向上的变化,即在竖直方向上产生了明显的湿度分层及温度变化,且距离换热管越近,变化幅度越大,变化趋势也越明显.
- 3) 土壤的热湿迁移呈现明显的耦合作用,在轴向和径向温度梯度综合作用下,对湿度梯度会产生一定的推动力,从而产生局部增湿现象,同时,产生的湿度梯度也会影响温度分布.

参考文献:

[1] 黎珍,田琦,董旭. 太原地区太阳能耦合空气源热泵一体化热水系统性能分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2017,38(5):670-675. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201612014.

[2] 闻豪,周文成. 公共建筑太阳能热水系统运行效益考察及分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015,36(5):593-

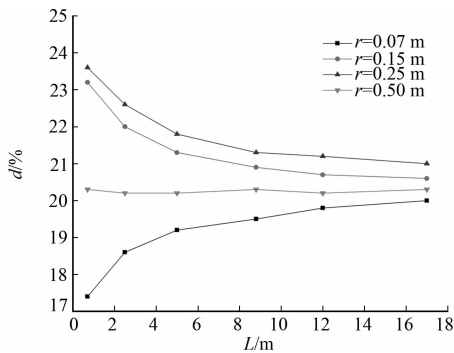


图 6 沿管长方向上土壤含湿量的变化  
Fig. 6 Variation in soil moisture concentration along pipe length

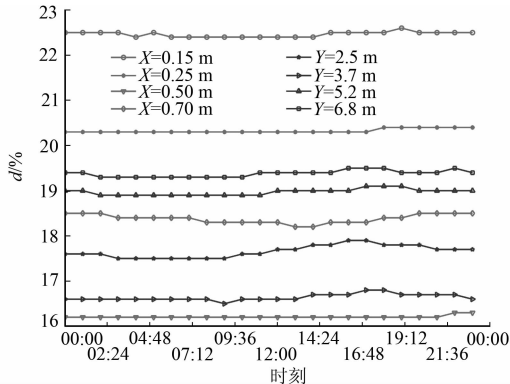


图 7 管径方向和管轴方向上的湿度分布  
Fig. 7 Humidity in direction of pipe diameter and pipe axis

597. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.05.0593.
- [3] 郭源浩. 热压与空气土壤换热器(EAHE)耦合通风换热理论模型研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.
- [4] BADESCU V, ISVORANU D. Pneumatic and thermal design procedure and analysis of earth-to-air heat exchangers of registry type[J]. Applied Energy, 2011, 88(4): 1266-1280. DOI:10.1016/j.apenergy.2010.10.019.
- [5] YASSINE B, GHALI K, GHADDAR N, *et al.* Effectiveness of the earth tube heat exchanger system coupled to a space model in achieving thermal comfort in rural areas[J]. International Journal of Solar Energy, 2014, 33(3): 567-586. DOI:10.1080/14786451.2012.762776.
- [6] VIDHI R, GOSWAMI D Y, STEFANAKOS E. Supercritical rankine cycle coupled with ground cooling for low temperature power generation[J]. Energy Procedia, 2014, 57: 524-532. DOI:10.1016/j.egypro.2014.10.206.
- [7] 吴会军, 朱冬生, 孙加龙. 土壤空气换热系统传热的数值模拟[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2004, 32(11): 24-27. DOI:10.3321/j.issn:1000-565X.2004.11.006.
- [8] 吴会军, 朱冬生, 张立志, 等. 土壤空气换热系统流动与供冷性能的计算模拟[J]. 太阳能学报, 2006, 27(1): 78-82. DOI:10.3321/j.issn:0254-0096.2006.01.015.
- [9] 崔良卫. 冬季自然通风与全热回收日光温室环境因子的试验研究及夜间降湿初探[D]. 太原:太原理工大学, 2010. DOI:10.3969/j.issn.2095-0802.2010.03.017.
- [10] KUMAR R, RAMESH S, KAUSHIK S C. Performance evaluation and energy conservation potential of earth-air-tunnel system coupled with non-air-conditioned building[J]. Building and Environment, 2003, 38(6): 807-813. DOI:10.1016/S0360-1323(03)00024-6.
- [11] NIU Fuxin, YU Yuebin, YU Daihong, *et al.* Heat and mass transfer performance analysis and cooling capacity prediction of earth to air heat exchanger[J]. Applied Energy, 2015, 137: 211-221. DOI:10.1016/j.apenergy.2014.10.008.
- [12] 刘宏. 日光温室热湿环境作用下土壤-空气换热器换热特性的试验研究[D]. 太原:太原理工大学, 2015.
- [13] 刘宏, 杜震宇, 程远达. 日光温室热湿环境作用下土壤空气换热器动态换热特性的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(18): 97-103. DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2015.18.017.
- [14] PHILIP J R, VRIES D A D. Moisture movement in porous materials under temperature gradients[J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 1957, 38(2): 222-232. DOI:10.1029/TR038i002p00222.
- [15] 范毅. 日光温室热环境作用下不同蓄热材料的空气换热器蓄放热特性研究[D]. 太原:太原理工大学, 2016.
- [16] NAWAZ M, HAYAT T, ALSAEDI A. Dufour and Soret effects on MHD flow of viscous fluid between radially stretching sheets in porous medium[J]. Applied Mathematics and Mechanics (English Edition), 2012, 33(11): 1403-1418. DOI:10.1007/s10483-012-1632-6.
- [17] 王馨, 施明恒, 虞维平. 对流边界条件高强度快速传热传质研究[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(2): 212-214. DOI:10.3321/j.issn:0253-231X.2002.02.023.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 刘源岗)