

doi:10.11988/ckyyb.20240942

2025, 42(11): 118-125

# 高温作用下封闭土柱水汽迁移规律试验研究

胡梦玲<sup>1,2</sup>, 陈豪<sup>1,2</sup>, 王治文<sup>1,2</sup>, 郜可欣<sup>1</sup>, 宫建华<sup>1,2</sup>, 匡智彬<sup>1,2</sup>

(1.西安科技大学 建筑与土木工程学院, 西安 710054;

2.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程安全全国重点实验室, 武汉 430071)

**摘要:**近年来,极端气候事件频发,西北地区夏季昼夜温差加剧,白天高温持续时间延长,导致水汽迁移对路基湿度的影响愈加显著。采用自制的一维土柱模型试验装置,开展了边界加热条件下黄土土柱的水汽迁移试验,分析了昼夜温差循环与持续加热2种高温作用方式下一维封闭土柱的水汽迁移规律,并探讨了不同加热作用对土柱温湿度分布特性的影响。结果表明:在升温阶段,土柱温度沿高度呈线性分布,升温速度先快后慢,且2种加热方式下土柱温度分布最终均趋于稳定。土柱湿度受水分迁移、液态水汽化、气态水迁移及蒸汽压超饱和时的凝结作用等共同影响。2种加热方式下土柱含水率分布呈现反“S”型曲线,昼夜温差循环加热时土柱上部22.5 cm含水率高于持续高温加热。2种加热方式下土柱湿度均能达到平衡状态。

**关键词:**非饱和土;温湿度分布;夏季高温;土柱模型试验;水汽迁移

中图分类号:TU444 文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2025)11-0118-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Experimental Study on Water Vapor Migration Patterns of Sealed Soil Columns under High-Temperature Conditions

HU Meng-ling<sup>1,2</sup>, CHEN Hao<sup>1,2</sup>, WANG Zhi-wen<sup>1,2</sup>, GAO Ke-xin<sup>1</sup>, GONG Jian-hua<sup>1,2</sup>, KUANG Zhi-bin<sup>1,2</sup>

(1.School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054,

China; 2.Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics and Engineering Safety, Institute of Rock and Soil

Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** [Objective] In recent years, with frequent extreme climate events, the northwestern region of China has experienced large diurnal temperature difference in summer, with daytime high temperatures continuously rising and persisting for extended periods. The resulting water vapor migration significantly affects the subgrade moisture content, thereby influencing the engineering performance of the subgrade. Investigating the water vapor migration patterns in loess subgrades under sealed pavement structures subjected to high temperatures holds substantial practical significance and application value for scientifically predicting the engineering performance of loess subgrades and ensuring their long-term stability. [Methods] A self-developed one-dimensional soil column test apparatus was employed, with compacted loess columns from the suburbs of Xi'an as the study subjects. The MTD15 temperature and moisture sensors were utilized to monitor the temperature and moisture variations within the loess columns under a boundary heating condition of 55 °C. The water vapor migration patterns in one-dimensional sealed soil columns were analyzed under two heating modes: diurnal temperature cycling and continuous heating. Furthermore, the effects of different heating modes on the temperature and moisture distribution characteristics of the soil columns were explored. [Results] Boundary heating caused the temperature of the soil columns to rise, with a faster increase in the upper part and a slower increase at the bottom. During the heating phase, the temperature distribution

收稿日期:2024-09-04;修回日期:2024-11-28

基金项目:国家自然科学基金项目(41702346);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2022JM-287);岩土力学与工程安全全国重点实验室开放基金课题(SKLCME023021)

作者简介:胡梦玲(1985-),女,湖北黄冈人,副教授,博士,主要从事非饱和土力学和路基长期稳定性方面的研究工作。E-mail:mlhu5566@163.com

通信作者:陈豪(1999-),男,重庆开州人,硕士研究生,从事岩土工程灾害及防治研究。E-mail:chenhao6940@163.com

along the height exhibited an approximately linear pattern. Under the cyclic heating of diurnal temperature difference, the internal temperature of the soil columns dropped rapidly after the heating was stopped. The cooling rate in the upper part was significantly higher than that in the middle and lower parts. By 08:00 the next day, the soil column temperature ranged between 22–25 °C, with the middle part slightly warmer than the two ends. At 20:00 each day and 8:00 the following day, the temperature distribution along the depth of the soil columns remained basically the same. Under continuous heating, the soil column temperature reached dynamic equilibrium after 10 days of heating, exhibiting a two-segment, piecewise linear distribution. The variation trends in the moisture content distribution curves of the soil columns under the two heating methods were basically the same—namely, a decrease in moisture content in the upper part, an increase in the middle, and a decrease in the lower part, with these trends becoming more pronounced as the experiment progressed. However, within the upper 22.5 cm of the soil columns, the moisture content under the cyclic heating of diurnal temperature difference was higher than that under continuous high-temperature heating. [ **Conclusion** ] Under boundary heating conditions, the moisture of sealed soil columns is primarily governed by the combined effects of liquid water vaporization and moisture migration within the pores, water vapor migration driven by vapor concentration gradients, and condensation of vapor in the pores when the vapor pressure exceeds the saturated vapor pressure. These mechanisms collectively result in an inverse “S”-shaped moisture distribution. For subgrades with cover layers, 30 days of cyclic heating of diurnal temperature difference during summer induces moisture at 5 cm depth to fluctuate between -2% and +2% of the initial moisture content. This cyclic fluctuation of the upper subgrade moisture induced by diurnal temperature difference will significantly affect the mechanical properties of the subgrade. Under extreme climate conditions characterized by continuously rising heating temperatures and prolonged duration, the moisture content variations in the subgrade become more pronounced. These significant variations in moisture will lead to dehydration, shrinkage, and cracking in the upper subgrade layers, thereby compromising the service performance and lifespan of the subgrade and pavement structures.

**Key words:** unsaturated soil; temperature and moisture distribution; high temperatures in summer; soil column model tests; water vapor migration

## 0 引言

随着我国“一带一路”倡议和西部大开发战略的实施,在西北地区黄土高原修建的公路规模越来越大,日益成为推动西部城乡融合和促进区域经济协调发展的重要纽带。暴露于气候环境中的黄土路基在运营过程中受大气降雨入渗<sup>[1]</sup>、高温蒸发<sup>[2]</sup>、地下水位波动<sup>[3]</sup>等因素的共同作用,引起路基湿度往复变化,进而影响路基的工程性能。由于黄土是一种具有水敏性的特殊土<sup>[4]</sup>,湿度变化对其物理力学性能的影响较一般土体更为显著。处于干旱半干旱气候区的黄土路基,受全球极端气候的影响,季节温差不断增大,夏季极端热浪愈加频繁,这使得夏季高温加热作用对路基湿度的影响更为突出<sup>[5]</sup>。因此,研究夏季高温作用下非饱和黄土水汽迁移规律对于科学预测黄土路基工程性能和保障路基长期稳定性具有重要的现实意义和应用价值。

湿度变化是影响岩土体工程性能的重要因素。处于自然环境中的岩土体的湿度变化主要受赋存环境中水分迁移和水汽迁移的影响。在水分迁移方面,Wang等<sup>[6]</sup>深入探究了降雨模式对土壤含水量分层变化的影响,发现不同的降雨模式会引发土壤含水量在层次上的差异化响应。Zhang等<sup>[7]</sup>借助数值模型,预测了含膨胀土路面因雨水渗透可能引发的垂直运动,并深入分析了蒸发速率、初始湿度和水力导度对水分运动和吸力分布的影响。Liu等<sup>[8]</sup>试验研究了降雨强度、模式、坡度和土壤类型对滑坡易感性的影响,并测量了土壤体积含水量、基质吸力、孔隙水压力和总应力等关键变量。陈佩佩等<sup>[9]</sup>通过COMSOL数值分析平台,分析了砂土、粉土和黏土在水分入渗时的有效饱和度、基质吸力变化规律。荆鹏等<sup>[10]</sup>探究了风积沙路基入渗量与降雨总量和降雨强度之间的关系,并通过数值模拟对其入渗机理进行了详细分析。在水汽迁移方面,Gao等<sup>[11]</sup>通过室内模型试验,研究了多种恒温条件下土壤含水率的变化,并建立了描述土壤热湿传递过程的数学

模型。李颖颖<sup>[12]</sup>深入研究了在恒定 45 °C 温度条件下,黄土与沙土中水汽的迁移特性。林芸<sup>[13]</sup>、赵再昆等<sup>[14]</sup>通过自制的高温作用下非饱和土体水热迁移试验装置,探究了在热端温度范围为 50 °C ~ 150 °C 时,非饱和黄土的水分迁移规律,同时考虑了温度梯度、土体密度和初始含水率等因素的影响。张睿霞等<sup>[15]</sup>采用电阻率法,对土柱进行水汽迁移试验研究,发现压实度对水汽迁移的影响相对较小,含水率对水汽迁移的影响更大。Zhu 等<sup>[16-17]</sup>探讨了土壤中的传热机制、热传导系数以及土壤温度分布等内容,深入研究了非饱和土和饱和土的蓄热和放热、湿度变化及调节过程,并对这些现象的规律进行了总结。崔宏志等<sup>[18]</sup>研究了非饱和黏土在升温降温过程中的含水率变化情况,并发现含水率变化峰值与温度梯度之间存在明显的正相关关系。

目前,对非饱和土水分迁移的相关研究较多,对水汽迁移的研究较少,且关于夏季高温持续作用对黄土路基水汽迁移规律的研究鲜有报道。由于近年来极端气候频发,西北地区夏季昼夜温差大,白天高温不断攀升且持续作用时间长,由此引起的水汽迁移对路基湿度的影响更为显著。因此,通过自制水汽迁移一维土柱模型试验装置,开展边界加热条件下黄土的水汽迁移试验研究,分析昼夜温差循环与持续 2 种加热方式下一维封闭土柱的水汽迁移规律,探讨夏季高温作用下非饱和黄土的温湿度分布特性。研究成果可为预测黄土路基病害提供理论依据。

## 1 模型试验介绍

### 1.1 试验黄土基本物性

选取西安市郊外某公路黄土路基路段填筑的黄土作为试验用土,取土深度为 2 ~ 4 m。按照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)<sup>[19]</sup>,通过室内试验,获得了试验黄土的基本物理性质指标,如表 1 所示。从工程观点看,试验用土为级配良好的土。

表 1 试验黄土的基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of test loess

天然湿密度 $\rho$ / ( $g \cdot cm^{-3}$ )	天然含水率 $w$ (%)	孔隙比 $e$	相对密度 $G_s$
1.62	13.21	0.996	2.70
最大干密度 $\rho_{dmax}$ / ( $g \cdot cm^{-3}$ )	最优含水率 $w_{opt}$ /%	曲率系数 $C_c$	不均匀系数 $C_u$
1.74	15.8	1.508	>5

### 1.2 水汽迁移土柱模型试验装置

为模拟夏季高温作用下非饱和黄土水汽迁移规

律,自制了一维土柱模型水汽迁移试验装置,如图 1 所示。该装置由多节有机玻璃桶组成的土柱模型桶、温湿度传感器、数据采集仪和控制边界温度的红外灯等组成。土柱模型桶由 5 节高 15 cm、内径 15 cm 的有机玻璃桶组合而成,总高度为 75 cm;每两节之间通过橡胶圈和螺丝固定,以确保不漏气;在桶身一侧的不同高度预留有传感器插入孔,预留孔的位置分别距离顶部 5、10、22.5、37.5、52.5、67.5 cm。

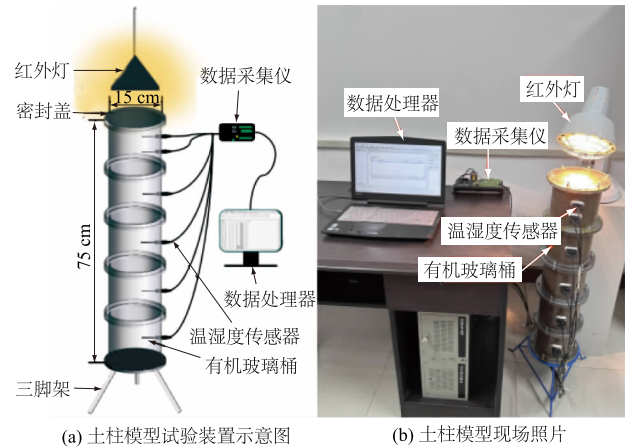


图 1 土柱模型试验装置及现场照片

Fig.1 Soil column model test setup and on-site photo

本试验采用的 MTD15 型温湿度传感器,基于频域反射(FDR)原理,该原理表明介电常数与土壤的体积含水量密切相关。此外,介电常数几乎不受土壤密度、质地和盐含量的影响,也没有明显的温度依赖性<sup>[20]</sup>。传感器标定试验也显示,其性能基本不受温度影响。传感器温度测量范围覆盖 -40 ~ 80 °C,精度达到 0.1 °C;含水率的测量范围在 0 ~ 100% 之间,精度达到 0.1%,能够实时监测土壤水分含量和温度。采用的 CR1000 型数据采集仪能够精准地记录各测点的温度和体积含水率,为便于后续数据分析,本试验的数据采集频率设定为每 60 s 一次。

### 1.3 试验方案

为模拟非饱和黄土路基的水汽迁移规律,试验设计的一维土柱初始填筑体积含水率为 26%,干密度为 1.56 g/cm<sup>3</sup>(对应压实度为 90%,质量含水率为 16.6%),填筑高度为 75 cm。在填筑过程中,采用分层填筑,每分层 15 cm;当填筑到传感器预留孔位置时,插入传感器并继续填筑土体。土柱填筑完成后在土柱模型桶外围加装保温隔热层以减小环向边界温度的影响。

为分析高温加热方式对路基水分迁移的影响,分别设置了 2 种不同的加热方式:①昼夜温差循环(每天 8:00—20:00 加热 12 h,夜间 20:00—次日 8:00 停止加热 12 h);②持续高温(每天 24 h 连续加热)。为

了模拟覆盖层的密封效果,采用透明的亚克力板作为密封盖,厚度为0.5 cm。试验过程中,室内温度始终保持 20 ℃ 恒定,2 种工况加热温度设置为 55 ℃,试验持续时间为 30 d。

## 2 温度场变化规律

一维土柱顶部高温加热引起土柱内部温度变化,高温持续作用导致土柱水汽迁移,引起土柱湿度变化。因此,了解边界高温作用下土柱的温度场变化规律是分析水汽迁移的基础。

### 2.1 昼夜温差循环加热

图 2 为昼夜温差循环加热作用下首个 24 h 土柱温度随深度的分布曲线。图 2 中实线为前 12 h 加热时土柱温度的分布曲线,虚线为夜间停止加热 12 h 的分布曲线。由图 2 可知,边界加热导致土柱温度升高,上部温度增长较快,底部温度增长较慢;升温阶段,温度沿高度基本呈线性分布。在 14 h,土柱顶部温度已接近加热温度 55 ℃。继续加热,土柱上部 5 cm 处温度达到 55 ℃,下部温度基本无变化。至 20 h 停止加热后,在边界温差的驱动下,土柱内部温度迅速降低,土柱上部的温度下降速率显著高于其中下部,且停止加热前期温度下降较快,随后逐渐减缓。到次日 4 时,土柱温度的分布趋于平缓,温度的分布范围在 23~26 ℃ 之间;到次日 8:00,土柱温度的分布范围处于 22~25 ℃ 之间。

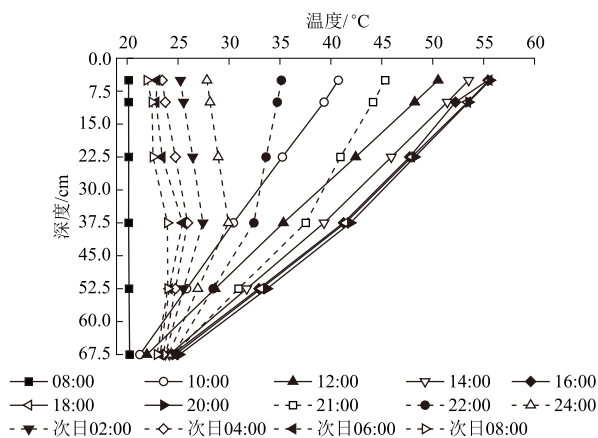


图 2 首个昼夜土柱温度随深度的分布曲线  
Fig.2 Distribution curves of soil column temperature with depth during first diurnal cycle

图 3 为在昼夜温差循环加热作用下不同试验天数在 20:00 和次日 8:00 土柱温度随深度的分布曲线。由图 3 可知,在每日 20:00,土柱距顶部 5 cm 处温度达到 55 ℃,下部土壤温度不断降低,距底部 7.5 cm 处温度达到 25 ℃,土柱温度沿深度基本呈线

性分布,且每日 20:00 温度分布几乎相同。在次日 8:00,不同试验天数土柱温度沿深度的分布也基本相同,整个土柱的温度处于 22~25 ℃ 之间:顶部温度降至接近室温 20 ℃,土柱的上半部分,温度随着深度的增加而升高;而下半部分,温度则随着深度的增加而降低,中间部位温度最高,达到 25 ℃。这是因为关闭热源后,土柱内部温度较外边界室温 20 ℃ 高,土柱在上下边界温度梯度的作用下,内部热量向外传输,导致内部温度不断降低;且由于上半部分温度梯度较大,热量交换更为频繁,因此温度下降得较快,导致次日 8:00 上半部分温度略小于下半部分。

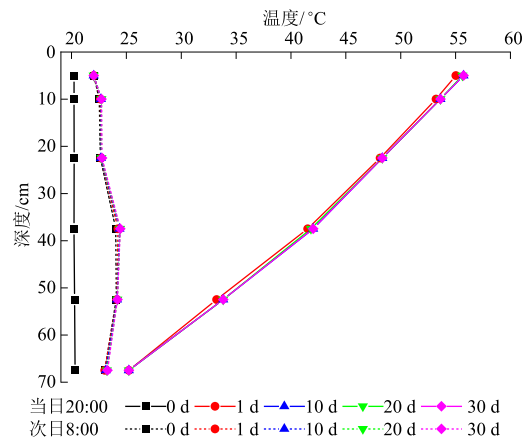


图 3 不同天数中 20:00 及次日 8:00 时刻的土柱温度随深度分布曲线

Fig.3 Distribution curves of soil column temperature with depth at 20:00 and at 08:00 on next day over different days

### 2.2 持续高温加热

图 4 为持续高温作用下土柱温度随深度的分布曲线。其中,实线代表首日分布曲线,虚线代表 5—30 日的分布曲线。由图 4 可知,在首日 20:00 之前,土柱温度变化与昼夜温差循环加热时完全相同。随着热源的持续作用,土柱不同深度的温度持续增长。在首日 24:00,土柱距顶部 5、10、37.5、67.5 cm 处温度分别达到 55、53、42、25.2 ℃,温度分布曲线呈两段式的折线分布。继续加热,加热 5 d 后,土体的热传导作用仍会到引起土柱内部温度的缓慢增长,此时土柱距顶部 10、37.5、67.5 cm 处温度分别为 54.3、45.2、27.5 ℃;加热 10 d 后,土柱距顶部 10、37.5、67.5 cm 处温度分别为 54.5、45.7、28.3 ℃,且加热 20 d 和 30 d 后的温度分布曲线与加热 10 d 的曲线分布完全相同,这表明土柱温度沿深度的分布曲线趋于稳定。试验结果表明,此时在上边界 55 ℃ 热源和下边界 20 ℃ 恒温的作用下,10 d 后土柱的温度达到了动态平衡。

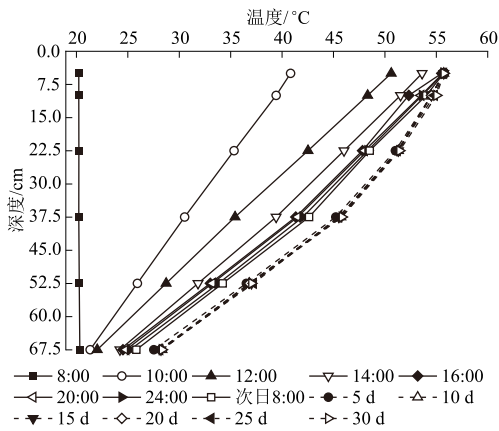


图4 持续高温加热作用下土柱温度随深度的分布曲线  
Fig.4 Distribution curves of soil column temperature with depth under continuous high-temperature heating

### 3 湿度场变化规律

#### 3.1 昼夜温差循环加热

图5为首个昼夜不同时刻土柱含水率随深度的分布曲线,实线代表日间加热时土柱含水率的分布曲线,虚线则代表夜间停止加热时土柱含水率的分布曲线。根据图5中曲线的变化趋势,将曲线划分成3个区段:5~7.5 cm范围以内为I区段、7.5~45 cm为II区段和45 cm以下为III区段。由图可知:在加热过程中,I区段土柱的含水率先增大后减小,加热结束时刻5 cm处的含水率减小到25.86%;II区段土柱的含水率不断增大,III区段不断减小。加热过程中,土柱含水率最大增长量为0.82%,最大减小量为0.68%。停止加热后,上部22.5 cm范围内各测点含水率不断减小,中部37.5 cm处含水率有少量增长,III区段含水率基本无变化;在这个过程中,土柱含水率最大增长量为0.12%,最大减小量为0.54%。

分析原因为:受边界加热作用的土柱,一方面,边界加热引起土柱温度升高,温度增大引起土柱孔隙中液态水汽化,导致含水率减小;另一方面,土柱中液态水受重力势和基质势的作用,引起水分整体呈现向下迁移,导致上部含水率减小,下部含水率增大;此外,液态水汽化形成的气态水在土柱的连通孔隙中迁移,密封盖的作用阻止了气态水的外逸,当蒸汽压超过饱和蒸汽压时,气态水凝结成液态水,引起含水率增大;在以上3种作用的共同影响下,土柱的含水率分布呈现出复杂的态势。试验结果表明,施加热源后,I区段内土柱的温度迅速上升,引发大量水分蒸发,从而在局部区域内形成蒸汽压梯度,即温度越高,蒸汽压越大。部分水汽会向蒸汽压较低的

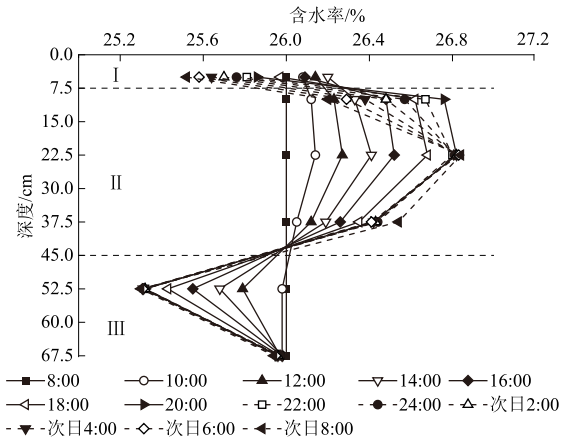


图5 首个昼夜土柱含水率随深度的分布曲线  
Fig.5 Distribution curves of soil column moisture content with depth during first diurnal cycle

II区段迁移,导致I区段含水率先增大后减小。随着水气的持续迁移和积聚,II区段的蒸汽压迅速升高,当其超过饱和蒸汽压,气态水在该区段内凝结,导致该区段的含水率增大。在III区段,水分持续受热汽化向上运移,导致该低温区域的含水率不断降低。在停止加热初期,土柱5~22.5 cm区间仍处于高温状态,高温引起的汽化使水分散失,引起该区段含水率减小。

图6为在昼夜温差循环加热作用下土柱在不同试验天数20:00和次日8:00含水率随深度的分布曲线。曲线划分的3个区段与图5的划分相一致。图6(a)显示,不同试验天数20时,I区段和II区段含水率大于初始含水率,沿深度呈现为先增大后减小的规律;III区段含水率小于初始含水率,沿深度呈现为先减小后增大的规律,曲线总体呈反“S”型。随着循环加热的进行,I区段和II区段含水率持续增长,中部增长最为显著,达到3.7%;而III区段持续下降,中部下降最显著,达到1.97%。在图6(b)中,停止供热12 h后,I区段含水率大幅下降,部分区域降至初始含水率以下,而II区段和III区段的变化趋势与图6(a)基本相同。比较图6(a)和图6(b)可知,20:00与次日8:00之间的含水率差异主要集中在I区段范围内,其余部分的含水率变化较小。

分析如图7所示土柱顶部的凝结与挥发原因:在I区段,施加热源后,土柱温度升高,液态水汽化导致上部含水率减小;同时整个土柱的液态水汽化生成的水蒸气均向上移动,使得大量水蒸气在土柱中上部聚集,当蒸汽压超过饱和蒸汽压,水蒸气凝结为液态水,导致I区段的含水率上升。晚上关闭热源后,密封盖顶部温度迅速下降至室温,这种温差导致大量土柱顶部的蒸汽水冷凝成

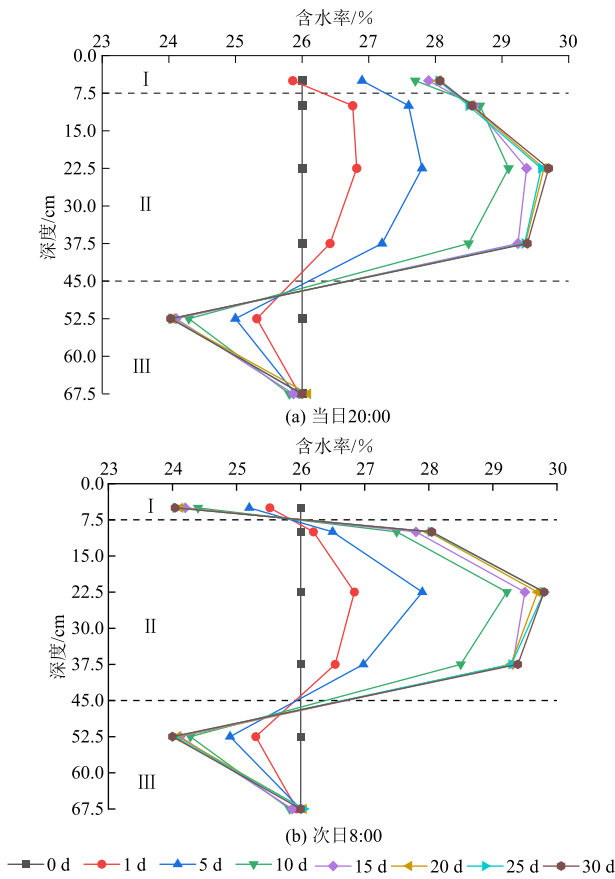


图 6 昼夜温差循环加热作用下不同试验天数时土柱含水率随深度的分布曲线

Fig.6 Distribution curves of soil column moisture content with depth over different test days under diurnal temperature difference

液态水并附着在密封盖上,引起土柱顶部含水率在夜间有所回升。在 II 区段,施加热源时,下部蒸汽向中部运移,上部产生的大量蒸汽经密封盖阻滞也向中部运移,大量蒸汽在该区段聚集,超饱和蒸汽凝结成液态水,导致该区段含水率不断增大;关闭热源后,土柱中下部温度变化范围小,因此引起的湿度变化较小。试验进行到 20 d 后,除了土柱顶部 10 cm 范围外,其余部位土柱的温湿度分布在每个循环加热作用的 20:00 和次日 8:00 基本相同,这说明已逐步趋于稳定。

### 3.2 持续高温

图 8 为持续高温作用下不同试验天数时土柱的含水率随深度的分布曲线。根据图 8 中含水率分布曲线的变化趋势,将曲线划分成 3 个区段:5 ~ 13.5 cm 范围以内为 I 区段、13.5 ~ 48 cm 为 II 区段、48 cm 以下为 III 区段。由图 8 可知:在持续高温作用下, I 区段土柱的含水率基本呈现减小趋势,最大减小量为 3.4%; II 区段土柱的含水率则不断增大,最大增长量达到 3.82%;而 III 区段土柱的含水率则

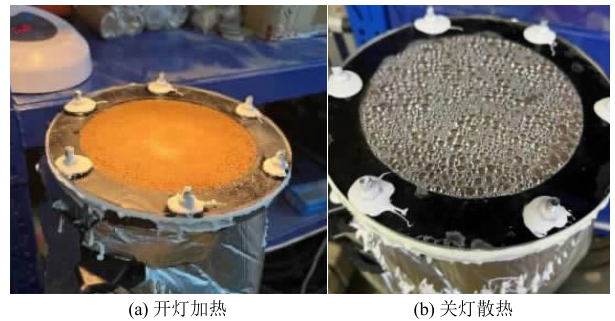


图 7 夜间停止加热时土柱密封盖底部的水汽凝结作用  
Fig.7 Condensation of water vapor at bottom of soil column sealed cover after heating was stopped at night

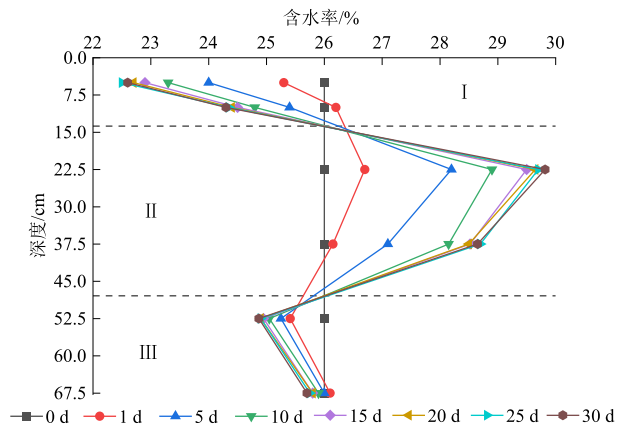


图 8 持续高温作用下不同试验天数时土柱含水率随深度的分布曲线

Fig.8 Distribution curves of soil column moisture content with depth over different test days under persistent high temperature

缓慢减小,其最大减小量为 0.68%。含水率分布曲线总体呈现反“S”型分布,且这一趋势随试验进程愈趋显著。分析原因:边界加热作用下,土柱的湿度主要受到孔隙中液态水的汽化和水分迁移、气态水受浓度梯度引起的迁移以及孔隙中的气态水在蒸汽压超过饱和蒸汽压时的凝结作用等共同影响。另外,随着持续高温作用,温度变化引起的湿度变化不断减小,且在加热 20 d 后,湿度分布曲线基本趋于稳定。

## 4 对比分析与讨论

### 4.1 对比分析

图 9(a) 和图 9(b) 分别为 2 种加热方式下不同试验天数时当日 20:00 和次日 8:00 土柱含水率的分布曲线对比。由图可知,昼夜温差循环加热和持续加热两种不同加热方式下的土柱含水率分布曲线变化趋势基本相同,均呈现反“S”型曲线,趋势随试验进程愈趋显著,其主要区别在上部 22.5 cm 范围内,且在中上部,昼夜温差循环加热时的含水率大于持续高温加热时的含水率;在下部,持续高温加热时

的含水率略大于昼夜温差循环加热情况。这是因为,当土柱持续受到高温加热时,土柱的湿度主要受到孔隙中液态水的汽化和水分迁移、气态水受浓度梯度引起的迁移以及孔隙中的气态水在蒸汽压超过饱和蒸汽压时的凝结作用等共同影响,湿度沿深度呈现反“S”型分布;随着加热时间的延长,反“S”型分布日益加剧。而昼夜温差循环加热相对于持续加热,夜间土柱温度降低引起的水汽迁移量减少,再加上密封盖两侧的温差引起超饱和气态水在密封盖底部凝结,从而使中上部含水量比持续加热作用时大。不同的加热方式会影响土柱中的温度分布,进而影响土柱的水汽迁移,使土柱的湿度呈现不同的分布状态。由此可见,加热方式是影响土柱含水率分布的重要因素之一。

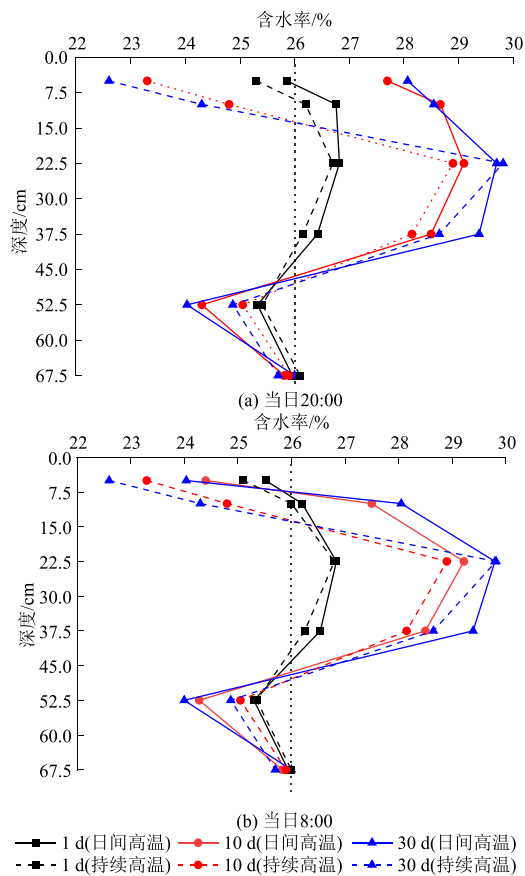


图9 2种加热方式下土柱不同天数含水率分布曲线对比  
Fig.9 Comparison of moisture content distribution curves of soil column over different days under two heating methods

#### 4.2 讨论

(1) 图9表明,在封闭体系中,试验得到的湿度分布曲线与预期的恒定总水量存在偏差。分析原因如下:①实验操作误差。分层铺设和夯实过程中的不均匀性可能导致初始体积含水率和密度的实际配置偏高。②数据采集限制。试验仅在5、10、22.5、

37.5、52.5、67.5 cm深度获取数据,缺失顶部5 cm及底部7.5 cm数据,可能影响湿度分布的全面评估。特别是,顶部5 cm区域受高温影响,其含水率可能低于初始值。因此排除初始操作误差,湿度分布曲线两侧含水率理论上一致。

(2) 对于设有覆盖层的路基,夏季白天气候高温作用引起路基温度升高,这种加热作用使路床中上部含水率增加,下路床减小;夜间低温时,覆盖层内外温差使得路床顶部气态水凝结,附着于覆盖层下。30 d昼夜温差循环作用导致路基5 cm深度处的湿度在初始含水率-2%~+2%之间波动,这种气候昼夜温差引起的上路床湿度的不断波动将对路基的力学性能产生显著影响。

(3) 在极端气候引起的加热温度不断攀升和时间持续延长的情况下,路基的含水率变化更为显著,这种显著的湿度变化将导致路基上部的失水收缩和开裂,进而影响路基路面结构的使用性能和寿命。

## 5 结论

本文通过自制水汽迁移一维土柱模型试验装置,开展边界加热条件下黄土的水汽迁移试验研究,分析了昼夜温差循环与持续温度2种加热方式下一维封闭土柱的水汽迁移规律,探讨了夏季高温作用下非饱和黄土的温湿度分布特性。研究结论主要有以下几点:

(1) 边界加热导致土柱温度升高,上部温度增长较快,底部温度增长较慢;升温阶段,温度沿高度基本呈线性分布,升温速度先快后慢。当顶部温度达到边界加热温度后,继续加热,上部达到边界温度的深度不断增大。边界恒定温度下,在加热阶段和停止加热阶段,土柱温度分布将趋于稳定。

(2) 边界加热作用下,封闭土柱的湿度主要受到孔隙中液态水的汽化和水分迁移、气态水受蒸汽浓度梯度引起的迁移以及孔隙中的气态水在蒸汽压超过饱和蒸汽压时的凝结作用等共同影响。

(3) 昼夜温差循环和持续高温2种不同加热方式下的土柱含水率分布曲线变化趋势基本相同,均呈现反“S”型曲线,即上部含水率减小,中部含水率增大,下部减小;但在土柱上部22.5 cm范围内,昼夜温差循环加热时的含水率大于持续高温加热时的含水率。

(4) 试验表明,当昼夜温差循环或持续高温作用时,土柱在2种加热方式下的湿度分布均会达到平衡状态。平衡状态下的湿度分布规律尚需进一步深入研究。

## 参考文献(References):

- [1] 于昕冉,王乃昂.近 60 a 甘肃省旅游气候舒适度变化分析[J].兰州大学学报(自然科学版),2021,57(2):143-150.(YU Xin-ran,WANG Nai-ang.Analysis of the Changes in Tourism Climate Comfort in Gansu Province from 1955 to 2015[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences),2021,57(2):143-150.(in Chinese))
- [2] 杨维涛,孙建国,康永泰,等.黄土高原地区极端气候指数时空变化[J].干旱区地理,2020,43(6):1456-1466.(YANG Wei-tao,SUN Jian-guo,KANG Yong-tai, et al. Temporal and Spatial Changes of Extreme Weather Indices in the Loess Plateau[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6): 1456-1466.(in Chinese))
- [3] 徐丽君,卫琦,徐俊增,等.中国北方干旱区降雨与相对湿度变化趋势的非一致性研究[J].水资源与水工程学报,2021,32(2):38-44.(XU Li-jun,WEI Qi,XU Jun-zeng, et al. Inconsistent Change Trends between Precipitation and Relative Humidity in Arid Areas of North China[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(2): 38-44.(in Chinese))
- [4] 李建东,王旭,张延杰,等.球形蒸汽源增湿非饱和黄土水热运移规律试验研究[J].岩土工程学报,2022,44(4):687-695.(LI Jian-dong,WANG Xu,ZHANG Yan-jie, et al. Experimental Study on Thermal Moisture Migration of Unsaturated Loess Humidified by Spherical Steam Source[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2022,44(4):687-695.(in Chinese))
- [5] 张升,贺佐跃,滕继东,等.非饱和土水汽迁移与相变:两类“锅盖效应”的试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(5):961-968.(ZHANG Sheng,HE Zuoyue,TENG Ji-dong, et al. Water Vapor Transfer and Phase Change in Unsaturated Soils: Experimental Study on Two Types of Canopy Effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 961-968.(in Chinese))
- [6] A Y, WANG G, SUN W, et al. Stratification Response of Soil Water Content during Rainfall Events under Different Rainfall Patterns [J]. Hydrological Processes, 2018, 32(20): 3128-3139.
- [7] ZHANG J, LITTLE D N, HARIHARAN N, et al. Prediction of Climate Specific Vertical Movement of Pavements with Expansive Soils Based on Long-term 2D Numerical Simulation of Rainwater Infiltration [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 115: 103172-103185.
- [8] LIU Y, DENG Z, WANG X. The Effects of Rainfall, Soil Type and Slope on the Processes and Mechanisms of Rainfall-induced Shallow Landslides [J]. Applied Sciences, 2021, 11(24): 11652-11665..
- [9] 陈佩佩,乔栋,吴楠.非饱和成层土稳态渗流问题的解析计算[J].水文地质工程地质,2024,51(5):68-78.(CHEN Pei-pei,QIAO Dong,WU Nan.Analytical Calculation of Steady Seepage in Unsaturated Layered Soils[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2024,51(5):68-78.(in Chinese))
- [10] 荆鹏,张雅琪,宋心彤,等.强降雨及高温天气对风积沙路基水力特性的影响研究[J].铁道科学与工程学报,2024,21(2):5018-5029.(JING Peng,ZHANG Ya-qi,SONG Xin-tong et al. Analysis of the Effects of Heavy Rainfall and High Temperature on Hydraulic Behavior of Aeolian Sand Subgrade[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024,21(2):5018-5029.(in Chinese))
- [11] GAO Y, DONG S, WANG C, et al. Effect of Thermal Intensity and Initial Moisture Content on Heat and Moisture Transfer in Unsaturated Soil [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 55: 102069.
- [12] 李颖颖.非饱和土水汽迁移特性试验研究[D].西安:长安大学,2019.(LI Ying-ying.Experimental Study on the Water-vapor Transfer Characteristics of Unsaturated Soil[D]. Xi'an:Chang'an University,2019.(in Chinese))
- [13] 林芸.高温作用下非饱和黄土水分迁移研究[D].西安:西安建筑科技大学,2020.(LIN Yun. Study on Water Transfer of Unsaturated Loess under High Temperature[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.(in Chinese))
- [14] 赵再昆,王铁行,金鑫,等.高温作用下非饱和黄土热迁移试验研究[J].岩土工程学报,2024,46(1):151-161.(ZHAO Zai-kun,WANG Tie-hang,JIN Xin, et al. Experimental Study on Water and Heat Migration of Unsaturated Loess under High Temperatures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(1): 151-161.(in Chinese))
- [15] 张睿霞,唐红,姚海林,等.基于电阻率法的非饱和路基水汽迁移试验研究[J].长江科学院院报,2023,40(12):140-146.(ZHANG Rui-xia,TANG Hong,YAO Hai-lin, et al. Experimental Study of Water Vapor Migration in Unsaturated Roadbed Based on Resistivity Method [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(12): 140-146.(in Chinese))
- [16] ZHU F, ZHOU Y, ZHU S. Experimental Study on Moisture Migration in Soil during Coupled Heat Storage and Release Processes [J]. Energy and Buildings, 2021, 242: 110986.
- [17] ZHU F, ZHOU Y, ZHU S. Experimental Study on Heat Transfer in Soil during Heat Storage and Release Processes [J]. Heat and Mass Transfer, 2021, 57(9): 1485-1497.
- [18] 崔宏志,李建英,刘宇飞,等.非饱和黏土中热湿耦合迁移规律研究[J/OL].工程力学,doi:10.6052/j.issn.1000-4750.2023.11.0864.(CUI Hong-zhi,LI Jian-ying,LIU Yu-fei, et al. Study on Thermo-Hydraulic Coupled Migration in Unsaturated Clay [J/OL]. Engineering Mechanics, doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2023.11.0864.(in Chinese))
- [19] JTG 3430—2020,公路土工试验规程[S].北京:人民交通出版社,2020.(JTG 3430—2020, Test Methods of Soils for Highway Engineering [S]. Beijing: China Communications Press, 2020.(in Chinese))
- [20] TOPP G C, DAVIS J L, ANNAN A P. Electromagnetic-Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines [J]. Water Resources Research, 1980, 16(3): 574-582.