

DOI: 10.11779/CJGE202104017

基于红外热成像技术的土体水分蒸发过程研究

林宗泽, 唐朝生*, 曾 浩, 程 青, 田本刚, 施 炳

(南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 蒸发是大气-土体相互作用的主要方式之一, 也是改变土体水分场及影响土体工程性质的重要因素。提出采用红外热成像技术对土体水分的蒸发过程进行试验研究, 共配置了3组不同厚度和初始含水率的土样, 将其置于恒定温湿度条件下干燥, 定时称取试样质量变化获得土样的水分蒸发过程, 并利用红外热成像仪实时记录土样表面的温度场变化。结果表明: 土样的蒸发速率随干燥时间可分为3个典型阶段, 即常速率阶段、减速率阶段和残余阶段。作为响应, 土表温度变化也呈现3个典型阶段, 即恒定低温阶段、升温阶段和稳定阶段, 且与蒸发阶段一一对应。基于蒸发过程中大气-土体之间的物质能量交换特征, 通过理论推导, 建立了土体蒸发速率与大气-土表温度差之间的线性理论关系, 并进行了试验验证, 发现该理论关系不受土样初始厚度和含水率的影响。研究成果表明, 利用红外热成像技术开展土体蒸发特性研究是可行的, 为快速掌握气候作用下土体水分蒸发过程及表面水分场的时空演化特征提供了新的技术思路。

关键词: 红外热成像技术; 土体蒸发; 温度; 能量平衡模型; 厚度; 含水率

中图分类号: TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2021)04-0743-08

作者简介: 林宗泽(1997—), 男, 江苏江阴人, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程和工程地质方面的研究工作。E-mail: MG1929070@smail.nju.edu.cn。

Soil evaporation based on infrared thermal imaging technology

LIN Zong-ze, TANG Chao-sheng, ZENG Hao, CHENG Qing, TIAN Ben-gang, SHI Bin

(School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Evaporation is one of the major approaches of interaction between soil and atmosphere. Additionally, it is also an important factor which significantly controls the moisture field of soil and successively affects its engineering characteristics. In this investigation, the infrared thermal imaging technology is used to conduct experimental researches on the soil evaporation process. Three sets of soil samples with different layer thicknesses and initial moisture contents are configured. The samples are dried under the constant temperature and relative humidity conditions while their mass changes are regularly recorded to obtain the evaporation process. The temperature field of the soil surface is simultaneously monitored in real time with an infrared thermal imager. The experimental results show that the evaporation process of soil samples can be divided into three typical stages: the constant rate stage, the falling rate stage and the residual stage. In response, the soil surface temperature also undergoes three typical stages: the constant low temperature stage, the rising temperature stage and the stable stage, which correspond to the three evaporation stages. Based on the law of conservation of energy, a linear relationship between the soil evaporation rate and the temperature difference between the soil surface and the atmosphere is established through theoretical deduction and verified through experimental inspection. This relationship is found to be not affected by the initial layer thickness or moisture content of the soil samples. The research results show that it is feasible to utilize the infrared thermal imaging technology in soil evaporation studies, which provides an original approach for grasping the temporal and spatial evolution characteristics of the surface moisture field under climatic impact in a more rapid way.

Key words: infrared thermal imaging technology; soil evaporation; temperature; energy balance model; soil thickness; moisture content

0 引言

蒸发作为大气-土体相互作用的主要方式之一, 在干旱、半干旱地区的水循环与能量平衡中扮演着至关重要的角色^[1]。干旱环境中大气-土体界面上的蒸汽压

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(41925012); 国家自然科学基金项目(41572246, 41772280, 41902271); 江苏省自然科学基金项目(BK20171228, BK20170394); 中央高校基本科研业务费专项资金项目

收稿日期: 2020-08-05

*通信作者(E-mail: tangchaosheng@nju.edu.cn)

表 1 下蜀土基本物理性质

Table 1 Physical properties of Xiashu soil

相对质量密度 G_s	液限 w_L /%	塑限 w_p /%	塑性指数 I_p	最优含水率 w_{opt} /%	最大干密度 ρ_d /(g·cm ⁻³)	黏粒含量 ($d < 0.005$ mm) /%
2.73	36.5	19.5	17	16.5	1.70	22

梯度较高, 导致土体水分的蒸发强度较大, 水分的蒸发会直接改变土体的含水率及水分场的空间分布状态, 而土体的工程性质对含水率变化非常敏感, 从而诱发龟裂、盐碱化、土质退化、地面沉降等岩土工程和环境工程地质问题^[2]。近年来, 受全球气候变化影响, 大范围的水文变化加剧了世界上许多地区的旱情。极端干旱气候的频发使得蒸发诱因的区域性岩土/地质工程问题或灾害更加显著, 如地基土收缩变形引起的差异沉降导致地面基础设施大面积受损, 土体开裂引起力学性质弱化及渗透性增加导致工程结构稳定性降低等, 从而造成国民经济损失。因此, 土体水分的蒸发过程及机理近年引起了学界的极大关注。

与纯水不同, 水分在土体内的存在形式十分复杂, 其蒸发和运移过程受土体结构及外部环境等诸多因素的制约。目前对土体水分蒸发的研究主要集中在各种影响因素方面, 如环境温湿度、风速、土体成分、土体结构和含水率等^[3-12]。然而, 传统的土体蒸发量化研究手段如蒸渗仪、土柱、土盒试验等的数据采集大多为点线式^[13-17], 获取的数据也较为离散, 且在经济成本和时间成本上耗费较大。同时, 水分测量设备的埋设会破坏局部土体结构, 扰动水分迁移路径, 在一定程度上会影响研究结果的准确性, 进而限制理论研究的进展。因此, 目前学界对于土体蒸发模型的理论推导, 尤其是黏性土方面, 还鲜有报道。

土体水分蒸发的本质是其孔隙中的液态水通过吸收外部环境提供的能量, 汽化为水蒸气后外逸的物理过程。水分子在离开土体表面的同时, 会以潜热的形式带走土中的热量, 导致土体温度产生相应的变化。蒸发的水分越多, 消耗的潜热越多, 土体降温也越大。因此, 理论上可以通过监测土体的温度变化来评价土体水分的蒸发速率或者蒸发量。然而, 目前学界关于土体蒸发过程中的温度变化以及温度与蒸发之间理论关系的研究还较为鲜见, 这其中的关键问题是如何准确获得土体表面的温度场。红外热成像技术作为一种无接触、可视化、数据采集便捷的测温手段^[18-19], 能够精确地获取物体表面的温度分布。近年来, 该技术已经被广泛的运用到了环境、地质、岩土等领域的研究中, 例如岩石在受荷载条件下的破坏及变形监测、红外探水、地热场监测等^[20-22]。但目前还尚未见基于红外热成像技术的土体水分蒸发研究。

为此, 本文采用红外热成像技术对不同初始条件

的土体蒸发特性开展了一系列室内试验研究, 旨在提出一种无损、便捷、精确的土体蒸发研究新方法。试验中, 为了计算蒸发速率, 监测了蒸发失水导致的试样质量变化, 并采用红外热成像仪实时记录了试样蒸发过程中的表面温度场演化。根据相关理论, 分析了土体表面温度的变化过程以及对蒸发的响应机制。基于土-气交互的能量守恒模型推导了土体蒸发速率与土表界面温差之间的理论关系, 并对其合理性和准确性进行了讨论和验证。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

(1) 试验土

本次试验采用南京地区的下蜀土作为研究对象, 取土深度约 0.5~1.5 m, 其颜色为褐黄色。下蜀土广泛分布于长江中下游地区, 其黏土矿物主要由伊利石和伊利-蒙脱石层间矿物组成^[23]。表 1 给出了试验土的基本物理性质。图 1, 2 给出了该土的颗粒级配累计曲线及击实曲线。由图 2 可知, 下蜀土的最优含水率为 16.5%, 对应最大干密度为 1.70 g/cm³。根据美国 ASTM 协会的土体分类标准 (ASTM, 2011), 下蜀土可被划分为低液限黏土 (CL)。

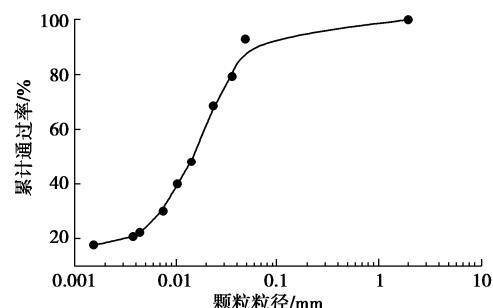


图 1 下蜀土颗粒级配累计曲线

Fig. 1 Cumulative grain-size distribution curve of Xiashu soil

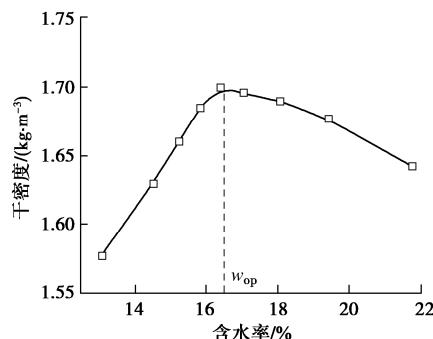


图 2 下蜀土击实曲线

Fig. 2 Compaction curve of Xiashu soil

(2) 红外热成像仪

本研究使用的红外热成像仪型号为 FLIR-T620, 该仪器工作波段为 $7.8\sim14 \mu\text{m}$, 相机分辨率 $640 \text{ pix} \times 480 \text{ pix}$, 温度测量灵敏度可达 $\pm 0.04^\circ\text{C}$, 精度可达 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。红外热成像技术的基本原理是物质温度在绝对零度 (-273.15°C) 以上时, 物质不断地向外辐射电磁波^[24]。当物质温度发生变化, 电磁波的辐射强度与波长分布特性也会随之改变。波长介于 $2.0\sim1000.0 \mu\text{m}$ 的电磁波被称为热红外线。在辐射过程中由于大气的阻隔, 仅在 $3\sim5 \mu\text{m}$ 和 $8\sim12 \mu\text{m}$ 两个波段的热红外线具有较好的穿透能力^[25]。通过捕获这两个波段的热红外线, 并标定其辐射强度与物质温度之间的量化关系, 即可实现对目标物体温度的反演。

1.2 试样制备

将取回的土样风干粉碎, 过 2 mm 筛, 以去除原状土体内的大颗粒杂质。过筛后的土样通过与蒸馏水混合并充分搅拌配制成含水率为 55% 和 65% 的两组泥浆样。随后, 在振动台上振动泥浆 5 min , 排除搅拌过程中其内部产生的气泡。利用薄膜将泥浆密封在容器中, 静置 48 h 。待泥浆沉积稳定后, 抽去表面清液。将配制好的泥浆样缓慢地倒入圆形铝盒后, 采用保鲜膜密封整个试样, 静置于试验环境内 72 h , 以保证试样初始温度与环境温度一致。考虑到试样尺度过大可能更容易受到外界环境及土结构非均质性的影响, 从而造成的土表局部蒸发不均匀, 因此本次试验使用的铝盒内径为 4 cm 。此外, 由于土体水分蒸发速率受到初始含水率和初始厚度等因素的影响^[26], 本次试验中共设计了 2 种不同初始含水率 (55%, 65%) 和 2 种不同初始厚度 (1 cm , 2 cm) 的试样进行对比试验, 以研究不同土体性质条件下的蒸发特性。具体的试样参数如表 2 所示。

表 2 土样参数

Table 2 Parameters of samples

试样编号	初始含水率/%	直径/cm	厚度/cm
S1	65	4	1
S2	55	4	1
S3	55	4	2

1.3 试验方法

将试样表面密封材料揭去, 在铝盒侧壁及底部包裹隔热保鲜膜后, 置于温度 $31\pm1^\circ\text{C}$, 湿度 $75\%\pm2\%$ 的恒温室内干燥。通过试样正上方的红外热成像仪来记录土体蒸发过程中的表面温度变化, 试验装置示意图如图 3 所示。与此同时, 通过高精度电子天平 (精度 $\pm 0.005 \text{ g}$) 实时获取土体在蒸发过程中的质量变化, 从而计算各时刻土体对应的蒸发速率和含水率。为了排除自然光周期性变化造成的外辐射干扰, 本次试验在恒定光源下进行。

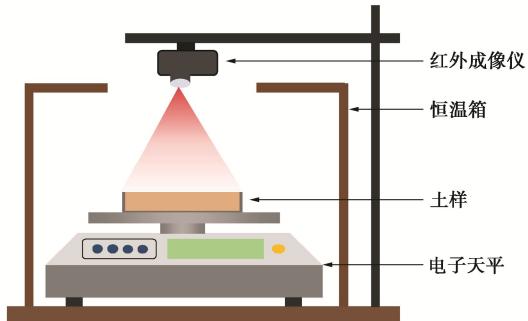


图 3 红外热成像综合试验装置

Fig. 3 Schematic drawing of experimental setup

2 结果与讨论

2.1 水分蒸发过程

在干燥环境下, 由于大气-土界面存在蒸汽压梯度, 当大气相对湿度低于土体的相对湿度时, 土体内的液态孔隙水不断汽化向外逸出, 即土体水分蒸发。土体的质量也随之逐渐减小。图 4 给出了不同初始含水率和不同初始厚度试样的蒸发速率随干燥时间的变化。可以发现, 试样在不同的初始含水率和厚度条件下, 蒸发速率变化的总体趋势一致, 主要由 3 个阶段组成^[27-29]:

(1) 常速率阶段: 该阶段试样水分蒸发速率较为稳定, 数值上趋于某一常数。例如试样 S1 (含水率 65%, 厚度 1 cm) 在该阶段的蒸发速率大约为 0.14 mm/h 。这一现象的原因在于, 该阶段土体处于饱和或接近饱和状态, 土体内部有充足的水分供给蒸发的需要, 大气-土界面的蒸汽压差基本保持恒定。此时的土体蒸发主要受环境因素主导 (如风速、温湿度、能量供给等)^[30]。

(2) 减速率阶段: 该阶段试样的蒸发速率随着干燥时间而逐渐减小。这是因为随着干燥的持续进行, 土颗粒间的孔隙水不断减少产生毛细作用, 诱导粒间吸力的形成。已有学者发现在土体由常速率蒸发阶段过渡到减速率阶段的过程中, 土体状态从饱和转化为非饱和状态^[31]。在非饱和状态下, 土体内部吸力随着含水率的减小而显著上升^[32-34]。吸力能抑制孔隙水的迁移, 是土体持水能力的体现。吸力越大, 土体持水能力越强^[35]。并且, 土体内部吸力的增加, 孔隙中的相对湿度降低, 会导致大气-土界面上的蒸汽压梯度减小, 从而减弱了土体水分蒸发的驱动力^[30]。因此, 在土体蒸发经过常速率阶段以后, 由于吸力的形成与发展, 蒸发速率逐渐降低。此外, 随着土体含水率或饱和度的下降, 土体发生收缩变形, 孔径及渗透系数减小, 孔隙水由连续向非连续过渡, 水分迁移由液相传输逐渐向气相扩散转变, 这些也是导致蒸发速率减小

的重要原因。

(3) 残余阶段: 该阶段试样的蒸发速率逐渐趋近为零。主要原因在于该阶段土体孔隙水含量很低, 孔隙水的赋存状态以结合水为主, 高吸力使得土体具备较高的持水能力^[36-37]。并且, 大气-土界面之间的蒸汽压接近相等, 导致缺少足够的驱动力或能量使土体孔隙水汽化^[30]。因此, 该阶段土体内水分变化较小^[38]。

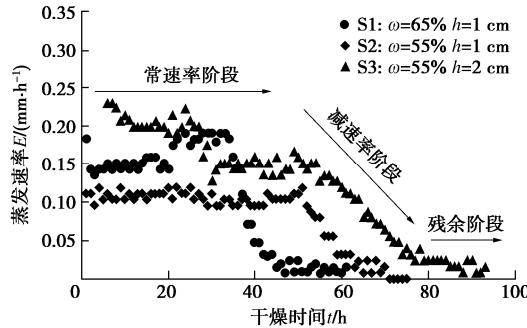


图 4 试样在干燥过程中蒸发速率随时间的变化

Fig. 4 Changes in evaporation rate of soil samples during desiccation

此外, 通过对不同初始条件下的试样蒸发速率曲线进行对比, 可发现在相同初始厚度, 不同初始含水率条件下 (S1 和 S2), 初始含水率越高, 试样在常速率阶段的蒸发速率越大。这是因为初始含水率较高的土样可供蒸发的水量多, 孔径相对较大, 对应的持水能力较弱。此外, 相同初始含水率条件下, 试样厚度越厚, 常速率阶段蒸发速率越高。部分学者针对土体厚度对其蒸发的影响也开展了一系列试验, 发现厚度对常速率阶段蒸发速率大小的影响不是很明显^[27]。这与本文所得现象有所不同, 其原因可能在于本次试验

中 S1 和 S2 的初始厚度 (1 cm) 略低于容器壁高度, 容器壁阻碍了由试样蒸发产生的蒸汽在其表面的流动。因此, 土体表面的相对湿度较高, 导致大气-土界面之间的蒸汽压梯度相比于 S3 偏小, 水分蒸发受到一定抑制。

2.2 温度变化过程

图 5 给出了土样表面温度场随时间的变化过程。可以看出, 在蒸发初期 (对应常速率阶段) (图 5 (a), (b), (e), (f), (i) ~ (j)), 土表温度随时间的变化幅度不大。随着蒸发的持续进行, 土表温度逐渐升高。蒸发结束后, 试样的表面温度与环境温度趋于一致。由于试验土样表面积较小, 不同时刻下土表温度场分布均匀 (图 5)。因此, 取土表温度的平均值与环境温度之间的差值与蒸发时间建立关系, 可以得到大气与土界面上的温度差随干燥时间的变化曲线, 如图 6 所示。从图 6 可发现, 界面温差与蒸发速率随时间的变化趋势具有很好的一致性, 各阶段转折点所对应的时间点基本相同, 这说明土表温度的变化能同步响应其蒸发过程。出现这种现象的原因在于, 土体水分蒸发是一个吸热过程, 蒸发强度越大, 土表的释热作用越剧烈, 相应的表面温度也越低。对于蒸发速率演化的三阶段, 在干燥过程中土体表面温度的变化也可大致分为 3 个阶段:

(1) 恒定低温阶段: 对应于蒸发的常速率阶段。该阶段土体内部的液相自由水含量较高, 外界辐射和热传递提供的能量几乎全部传递给土体内的液相, 引起液相的熵增。当熵增至某一阈值以后, 液相自由水发生相变转化为气相水蒸气, 即土体水分蒸发。由于

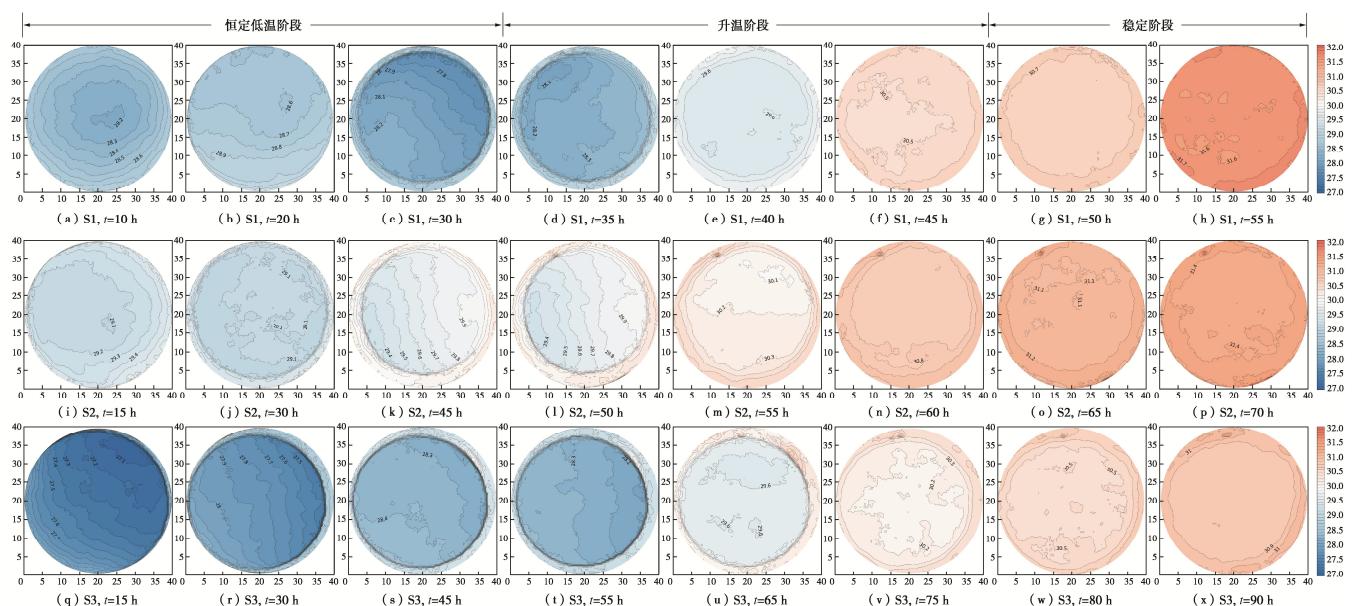


图 5 不同土性试样在干燥过程中的表面温度场随时间的变化

Fig. 5 Changes in surface temperature field of soil samples during desiccation

液相水在相变过程中引起了其内部热能的损耗, 导致土体内液相与固相之间的热力学平衡被打破, 两者之间形成热力梯度, 固相不断向液相提供能量。这使得土体固相的热量减少, 土体温度下降, 土/气界面温差较大。并且, 伴随着恒定的蒸发速率, 上述环境以及土体液相和固相之间的热传递较为稳定。作为结果, 土体在该阶段保持着恒定低温。

(2) 升温阶段: 对应于蒸发的减速率阶段。由于前期蒸发导致土体内的自由水逐渐减少, 结合水的占比逐渐上升。结合水在分子间范德华力, 偶极力等引力的作用下, 与土颗粒之间紧密贴合, 并具有一定的固相性质。相比较与自由水, 结合水的物质混乱度和熵值较低, 因此激发结合水发生相变, 即转化为气相所需的能量越高。这解释了随着结合水在土体内的占比逐渐升高, 在外界环境热辐射一定的条件下, 土体蒸发速率逐渐降低的原因。蒸发速率降低意味着单位时间内蒸发的水量及消耗的热量降低。此外, 随着自由水的减小, 结合水以及固相土颗粒与外界环境的接触面积增大。土/气间环境-液相(自由水)的热交换逐渐转化为环境-固相(结合水与土颗粒)的热交换。因此, 该阶段土表温度的逐步上升。

(3) 稳定阶段: 对应于蒸发的残余阶段。该阶段蒸发速率趋近于0, 环境与土体的热交换趋于稳定, 达到热力学平衡, 因此土体温度与环境温度趋于一致, 不再发生变化。

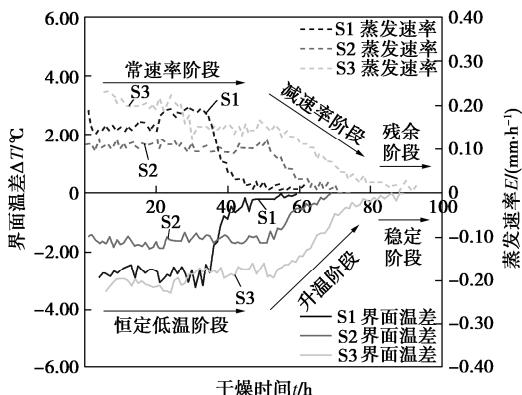


图6 试样在干燥过程中的界面温差随时间的变化

Fig. 6 Changes in temperature difference between soil surface and atmosphere during desiccation

2.3 蒸发速率与温度的理论关系

土体蒸发过程中, 土/气间能量交互服从能量守恒定理。如果假定大气横向对流的影响可忽略不计, 可采用能量平衡模型估算土体水分的蒸发量^[39-40]:

$$L_e E = R_n - G - H \quad (1)$$

式中 L_e 为土水蒸发潜热(水由液相转化为气相吸收的热量) (J/kg); E 为蒸发速率 (mm/d); R_n 为地表

净辐射通量(环境提供的热量) ($\text{J}/\text{m}^2\text{s}$); G 为土体热通量(土体吸收的热量) ($\text{J}/\text{m}^2\text{s}$); H 为感热通量(传导及散射到大气中的热量) ($\text{J}/\text{m}^2\text{s}$)。对于蒸发速率而言, 水分蒸发为正, 水汽凝结为负; 对地表净辐射而言, 入射为正, 散射为负; 对土体热通量而言, 能量引起土体温度上升为正, 下降为负; 对感热通量而言, 能量用于加热空气为正, 空气冷却失去能量为负。地表净辐射量 R_n 由入射的太阳短波辐射、大气散射和出射的地面反射、地面长波辐射共同组成, 如图7所示。

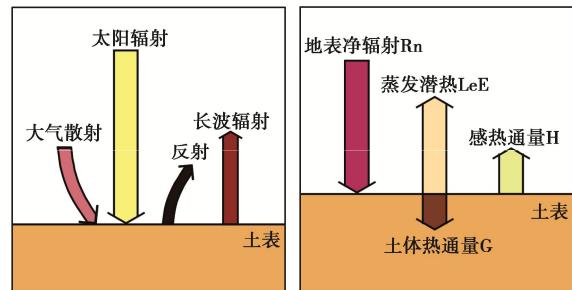


图7 水分蒸发过程中土体表面辐射平衡示意图^[42]

Fig. 7 Diagram of radiation balance on soil surface during Evaporation^[42]

当忽略大气散射的影响, R_n 可表示为^[41-42]

$$R_n = (1 - \alpha)R_s - \Delta R_l \quad (2)$$

式中, R_s 为太阳短波辐射量, α 为土体反照率, ΔR_l 为地表长波辐射量。感热通量 H 可表示为^[39, 43]

$$H = \rho C_p h (T_s - T_a) = \rho C_p \frac{T_s - T_a}{r_a} \quad (3)$$

式中, ρ 为空气密度, C_p 为空气的定压比热容, h 为空气的乱流导温率, r_a 为空气的单位热阻, 其值与 h 互为倒数, T_s 为土体表面温度, T_a 为参考高度处的空气温度。

Tanner 等^[44]对式(1)~(3)进行了整理, 提出了用于估算蒸发速率的温差模型:

$$L_e E = (R_n - G) - \frac{\rho C_p}{r_a} (T_s - T_a) \quad (4)$$

Qiu 等在砂性土的水分蒸发试验中发现, 粗砂在干燥过程中的土体热通量 G 可近似为地表净辐射 R_n 的 $1/5$, 即 $G = 0.2R_n$ ^[45]。鉴于黏性土在失水过程中的物理性质变化与砂性土具有一定差别, 对本次试验中下蜀土的热通量值, 可假设为: $G = \gamma R_n$ 。式中的参数 γ 是一个与土性相关的常量。通过此假设, 式(4)可表示为

$$E = \frac{(1 - \gamma)R_n}{L_e} - \frac{\rho C_p}{r_a L_e} (T_s - T_a) \quad (5)$$

若蒸发过程中的环境温湿度和辐射强度(恒定光照)条件均保持恒定, 即 $\frac{\rho C_p}{L_e}$ 的值为常量, 则式(5)可

进一步简化为

$$E = \alpha - \beta(T_s - T_a) = \alpha - \beta\Delta T \quad \text{。} \quad (6)$$

即在恒定光照或温湿度的环境中, 土体水分蒸发时大气与土表的蒸发速率 E 和界面温差 ΔT 的变化将近似呈线性关系。式(6)中 α 为与辐射强度和土性有关的常数, β 为与空气单位热阻有关的常数。

为了证明上述理论关系式的准确性, 在图8中给出了本次试验中各组试样蒸发过程蒸发速率与土表温度的关系散点图。由图8可知, 试样的蒸发速率与界面温差间存在良好的对应关系, 且初始含水率与厚度的区别对其关系影响较小。对3组数据进行线性拟合, 得到本文研究的下蜀土的蒸发速率与界面温差之间的定量关系如下:

$$E = 0.0086 - 0.0578\Delta T \quad (R^2 = 0.94) \quad (7)$$

式(7)的确定系数 R^2 值为 0.94, 可见该拟合优度较高, 蒸发速率与界面温差之间存在较好的线性关系, 这与理论公式得出的结论相吻合, 即在恒定的环境温度条件下, 土表界面温差与蒸发速率的变化线性相关。

上述试验现象和理论关系表明, 土表温度的变化可以很好地响应土体水分蒸发过程, 可以利用土表温度数据直接反演量化土体水分蒸发速率。因此, 土表温度可以作为一种量化参数指示土体的蒸发特性。本文提出的基于红外热成像技术研究土体蒸发特性是可行的, 后期需要围绕该技术及土体蒸发问题开展更系统和细致的研究。

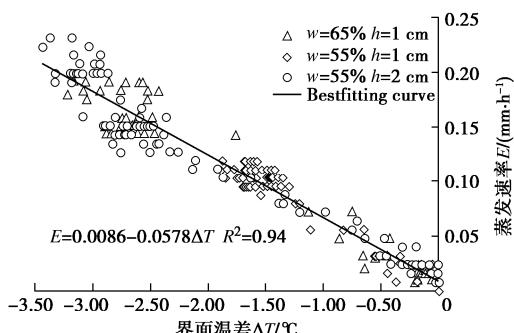


图 8 土/气界面温差 - 速率关系拟合图线

Fig. 8 Fitting curves of temperature difference and evaporation rate

3 结 论

通过开展一系列室内干燥试验, 基于红外热成像技术研究了土体在蒸发过程中的蒸发速率和表面温度的演化规律, 并探讨了两者之间的内在联系, 得到以下主要结论:

(1) 对于初始饱和的土体, 水分蒸发速率随干燥时间呈现 3 个典型阶段, 即常速率阶段、减速率阶段和残余阶段。其阶段性变化主要与干燥过程中土的持

水能力、孔隙水的赋存状态及传输特征有关。

(2) 土体蒸发过程中, 土体表面的温度变化也呈现 3 个典型阶段, 即恒定低温阶段、升温阶段和稳定阶段, 且与蒸发阶段一一对应。这主要与水分蒸发过程中的热能消耗及热能在不同介质中的传递效应有关。

(3) 在恒定的环境温湿度或辐射强度(光照)条件下, 蒸发速率 E 和土体表面与大气的温差 ΔT 之间具有线性关系: $E = \alpha - \beta\Delta T$, 式中的常参数 α 与的外界辐射强度和土体自身性质有关, β 与空气单位热阻有关。对于同一种土, 土层厚度和初始含水率对参数 α 和 β 取值没有明显影响。

本文研究成果表明, 利用红外热成像技术开展土体蒸发特性研究是可行的。该技术具有便捷和无损的优点, 能够快速、精确且实时地获取土体干燥条件下表面温度场的变化特征, 进而可以反演量化土体的蒸发过程, 评价土体的干湿状态。此外, 本次试验成果也为未来开展原位土体在气候作用下蒸发/水分场的时空演化特征研究提供了新的技术思路。

参 考 文 献:

- [1] SAITO H, SIMUNEK J, MOHANTY B P. Numerical analysis of coupled water, vapor, and heat transport in the vadose zone[J]. Vadose Zone Journal, 2006, 5(2): 784 – 800.
- [2] XUE Z, AKAE T. Maximum surface temperature model to evaluate evaporation from a saline soil in arid area[J]. Paddy and Water Environment, 2012, 10(2): 153 – 159.
- [3] WILSON G W, FREDLUND D G, BARBOUR S L. Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(2): 151 – 161.
- [4] WILSON G W, FREDLUND D G, BARBOUR S L. The prediction of evaporative fluxes from unsaturated soil surfaces[J]. Unsaturated Soils, 1995: 423 – 429.
- [5] YANG M D, YANFUL E K. Water balance during evaporation and drainage in cover soils under different water table conditions[J]. Advances in Environmental Research, 2002, 6(4): 505 – 521.
- [6] YANFUL E K, MOUSAVI S M, YANG M. Modeling and measurement of evaporation in moisture-retaining soil covers[J]. Advances in Environmental Research, 2003, 7(4): 783 – 801.
- [7] CUI Y J, LU Y F, DELAGE P, et al. Field simulation of in situ water content and temperature changes due to ground-atmospheric interactions[J]. Géotechnique, 2005, 55(7): 557 – 567.

- [8] CUI Y J, GAO Y B, FERBER V. Simulating the water content and temperature changes in an experimental embankment using meteorological data[J]. *Engineering Geology*, 2010, **114**(3/4): 456 – 471.
- [9] TANG C S, WANG D Y, SHI B, et al. Effect of wetting-drying cycles on profile mechanical behavior of soils with different initial conditions[J]. *Catena*, 2016, **139**: 105 – 116.
- [10] 腾继东, 单 锋, 张 升, 等. 考虑风速影响的土表蒸发计算方法[J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(1): 100 – 107. (TENG Ji-dong, SHAN Feng, ZHANG Sheng, et al. New method for calculating soil surface evaporation considering effect of wind speed[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(1): 100 – 107. (in Chinese))
- [11] 陈建斌, 孔令伟, 赵艳林, 等. 非饱和土的蒸发效应与影响因素分析[J]. *岩土力学*, 2007, **28**(1): 36 – 40. (CHEN Jian-bin, KONG Ling-wei, ZHAO Yan-lin, et al. Evaporation effect in unsaturated soil and its influential factors[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, **28**(1): 36 – 40. (in Chinese))
- [12] 陈建斌, 孔令伟, 赵艳林, 等. 蒸发蒸腾作用下非饱和土的吸力和变形影响因素分析[J]. *岩土力学*, 2007, **28**(9): 1767 – 1772. (CHEN Jian-bin, KONG Ling-wei, ZHAO Yan-lin, et al. On influence factors of suction and deformation of unsaturated soil under evaporation and transpiration effect[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, **28**(9): 1767 – 1772. (in Chinese))
- [13] SINGH V P, XU C Y. Evaluation and generalization of 13 mass-transfer equations for determining free water evaporation[J]. *Hydrological Processes*, 1997, **11**(3): 311 – 323.
- [14] KONDO J, SAIGUSA N, SATO T. A parameterization of evaporation from bare soil surfaces[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1990, **29**(5): 385 – 389.
- [15] KONDO J, SAIGUSA N, SATO T. A model and experimental study of evaporation from bare-soil surfaces[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1992, **31**(3): 304 – 312.
- [16] BENSON C, ABICHOU T, ALBRIGHT W, et al. Field evaluation of alternative earthen final covers[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2001, **3**(1): 105 – 127.
- [17] 宋卫康, 丁文其, 崔玉军. 恒定大气条件下砂土蒸发机制的模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, **33**(2): 405 – 412. (SONG Wei-kang, DING Wen-qi, CUI Yu-jun. Model test study of evaporation mechanism of sand under constant atmospheric condition[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, **33**(2): 405 – 412. (in Chinese))
- [18] TAROZZI L, MUSCIO A, TARTARINI P. Experimental tests of dropwise cooling in infrared-transparent media[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2007, **31**(8): 57 – 865.
- [19] WULSTEN E, LEE G. Surface temperature of acoustically levitated water microdroplets measured using infrared thermography[J]. *Chemical Engineering Science*, 2008, **63**(22): 5420 – 5424.
- [20] 吴 贤, 高 祥, 赵 奎, 等. 岩石破裂过程中红外温度场瞬时变化异常探究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, **35**(8): 1578 – 1594. (WU Xian, GAO Xiang, ZHAO Kui, et al. Abnormality of transient infrared temperature field(ITF) in the process of rock failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, **35**(8): 1578 – 1594. (in Chinese))
- [21] 袁宗征, 刘 苗, 王双超, 等. 红外探测技术在大坪山隧道岩溶预报中的应用[J]. *公路*, 2015, **5**(5): 242 – 245. (YUAN Zong-zheng, LIU Miao, WANG Shuang-chao, et al. Application of infrared detection technology in Karst prediction of Dapingshan tunnel[J]. *Highway*, 2015, **5**(5): 242 – 245. (in Chinese))
- [22] 李 明. 热红外遥感在福建滨海地热调查中的应用研究[J]. *福建地质*, 2015, **4**: 312 – 318. (LI Ming. Application of thermal infrared remote sensing in coastal geothermal survey of Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, 2015, **4**: 312 – 318. (in Chinese))
- [23] LIU J G, LV M K. The engineering geological properties of Xiashu loess in Nanjing. *Investigation*[J]. *Science Technology*, 1996, **6**: 36 – 38.
- [24] FABIEN G, MICKAEL A, KHELLIL S. Infrared thermography investigation of an evaporating sessile water droplet on heated substrates[J]. *Langmuir*, 2010, **26**(7): 4576 – 4580.
- [25] TUCKERMANN R, BAUERECKER S, CAMMENGA H K, IR-thermography of evaporating acoustically levitated drops[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2005, **26**(2): 1583 – 1594.
- [26] WANG W Z. Wind Tunnel Experiments on Bare Soil Evaporation[D]. Taiwan: National Central University, 2006.
- [27] MONTEITH J L, UNSWORTH M H. Principles of Environmental Physics[M]. 2nd ed. London: Edward Arnold, 1990.

- [28] AMANO E, SALVUCCI G D. Detection and use of three signatures of soil-limited evaporation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, **67**(1): 108 - 122.
- [29] QIU G Y, BEN-ASHER J. Experimental determination of soil evaporation stages with soil surface temperature[J]. *Soil Physics*, 2010, **74**(1): 13 - 22.
- [30] 唐朝生, 施斌, 顾凯. 土中水分的蒸发过程试验研究[J]. *工程地质学报*, 2011, **19**(6): 875 - 881. (TANG Chao-sheng, SHI Bin, GU Kai. Experimental investigation on evaporation process of water in soil during drying[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, **19**(6): 875 - 881. (in Chinese))
- [31] 唐朝生, 施斌. 干湿循环过程中膨胀土的胀缩变形特征[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(9): 1376 - 1384. (TANG Chao-sheng, SHI Bin. Swelling and shrinkage behaviour of expansive soil during wetting-drying cycles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(9): 1376 - 1384. (in Chinese))
- [32] BRONSWIJK J J B. Modeling of water balance, cracking and subsidence of clay soils[J]. *Journal of Hydrology*, 1988, **97**(3/4): 199 - 212.
- [33] PERON H, HUECKEL T, LALOUI L, et al. Fundamentals of desiccation cracking of fine-grained soils: experimental characterization and mechanisms identification[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, **46**(10): 1177 - 1201.
- [34] FREDLUND D G, RAHARDJO H. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*[M]. New York: Wiley, 1993.
- [35] LU N, DONG Y. Correlation between soil-shrinkage curve and water-retention characteristics[J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2017, **143**(9): 0001741.
- [36] LU N, LIKOS W J. *Unsaturated Soil Mechanics*[M]. New York: J Wiley, 2004.
- [37] SCHERER G W. Theory of drying[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2010, **73**(1): 3 - 14.
- [38] WILSON G W. *Soil Evaporative Fluxes for Geotechnical Engineering Problems*[D]. Saskatoon: University of Saskatchewan, 1990.
- [39] BLIGHT D E. Interactions between the atmosphere and the Earth[J]. *Géotechnique*, 1997, **47**(4): 715 - 767.
- [40] BRUTSAERT W. *Evaporation into the Atmosphere: Theory, History, and Applications*[M]. Dordrecht: D Reidel Publishing Company, 1988.
- [41] JENSEN M E, BURMAN R D, ALLEN, R G. *Evapotranspiration and irrigation water requirements*[C]// American Society of Civil Engineers. *Manuals and Reports on Engineering Practice*, 1990, New York: 25 - 41.
- [42] HILLEL D. *Introduction to Environmental Soil Physics*[M]. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2004.
- [43] QIU G Y, BEN-ASHER J, YANO T, et al. Estimation of soil evaporation using the differential temperature method[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, **63**(6): 1608 - 1614.
- [44] TANNER C B, FUCHS M. Evaporation from unsaturated surface: a generalize combination method[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1968, **73**(4): 1299 - 1304.
- [45] QIU G Y, YANO T, MOMII K. An improved methodology to measure evaporation from bare soil based on comparison of surface temperature with a dry soil[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, **210**(1/2/3/4): 93 - 105.