

文章编号: 1000-7598(2014)增1-141-08

# 持续蒸发作用下膨胀土裂隙和湿热特性 室内模型试验

李雄威<sup>1</sup>, 王爱军<sup>1</sup>, 王 勇<sup>2</sup>, 王继果<sup>3</sup>, 李书进<sup>1</sup>

(1. 常州工学院 常州市建设工程结构与材料性能研究重点实验室, 江苏 常州 213002;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 3. 三江学院 土木工程学院, 南京 210012)

**摘 要:** 以广西白色强膨胀土为研究对象, 对有、无植被覆盖和农膜覆盖的膨胀土分别进行 30 d 持续蒸发试验, 研究持续蒸发过程对膨胀土湿热和裂隙拓展特性的影响。结果表明, 无植被覆盖时表层土体脱湿量及脱湿速率分别为 7.38% 和 0.17%/d, 植被覆盖时分别为 5.29% 和 0.07%/d, 显然植被覆盖的脱湿量和脱湿速率均小于无植被覆盖的, 而农膜覆盖土体蒸发受到遏制, 水分无散失; 无植被覆盖和农膜覆盖土体平均温度变化分别是 7.36 °C 和 9.72 °C, 比植被覆盖的 2.03 °C 大 5~8 °C, 可见植被覆盖降低了土体温度变化幅度; 无植被覆盖土体裂隙深度达 32 cm, 与湿热影响深度 28 cm 较接近; 植被覆盖和农膜覆盖土体平面及竖向均无出现明显裂隙, 植被覆盖和蒸发受到遏制的状态可阻止土体裂隙开展。

**关 键 词:** 膨胀土; 裂隙; 湿热; 大气作用; 植被**中图分类号:** TU443**文献标识码:** A

## Laboratory model test on fissure development and moisture-heat behavior of expansive soil under action of continuous evaporation

LI Xiong-wei<sup>1</sup>, WANG Ai-jun<sup>1</sup>, WANG Yong<sup>2</sup>, WANG Ji-guo<sup>3</sup>, LI Shu-jin<sup>1</sup>

(1. Changzhou Key Laboratory of Structure Engineering and Material Properties, Changzhou Institute of Technology, Changzhou, Jiangsu 213002, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. College of Civil Engineering, Sanjiang University, Nanjing 210012, China)

**Abstract:** Talking the strong expansive soil of Guangxi as research object. 30 days evaporation experiment was respectively carried out for expansive soil with on without vegetation cover and under plastic sheeting cover, to explore the influence of continuous evaporation process on moisture-heat behavior and fissures development. The results show that without vegetation cover, the surface soil amount and rate of volumetric water content changes respectively are 7.38% and 0.17%/d; with vegetation cover, which are respectively 5.29% and 0.07%/d; apparently under vegetation cover, whose dehydration content and drying rate were less than that of without vegetation cover. For plastic sheeting cover, expansive soil evaporation is curbed and no water loss. Without no vegetation and plastic sheeting cover, the average temperature changes of expansive soil are 7.36 °C, 9.72 °C respectively, which is 5-8 °C higher than that with vegetation cover 2.03°C; obviously, the vegetation cover reduces expansive soil temperature variation. Without vegetation cover, expansive soil fissure depth is up to 32 cm, which is closer to 28 cm influence depth of moisture-heat. Under vegetation and plastic sheeting cover, no apparent fissure carried out in the plane and vertical; vegetation cover and the state of evaporation curbed can prevent expansive soil fissure developing.

**Key words:** expansive soil; fissure; moisture-heat; atmosphere action; vegetation

## 1 引 言

膨胀土对环境变化非常敏感, 特别是久旱降雨及多雨炎热的气候条件时这种敏感性会对膨胀土壅

坡造成严重的危害, 而且这种破坏随气候变化和季节变迁, 具有潜在性、长期性和反复性。气象条件的急速变动极易导致膨胀土性状劣化, 进而诱发膨胀土边坡的灾变<sup>[1-3]</sup>。在太阳辐射作用下, 膨胀土

收稿日期: 2013-10-30

基金项目: 国家自然科学基金资助 (No.41102229; 江苏省自然科学基金资助(No.BK20131141); 住房和城乡建设部科学技术项目资助(No.2012-k3-10); 江苏省“青蓝工程”资助(2012 年)。

第一作者简介: 李雄威, 男, 1976 年生, 博士, 副教授, 从事非饱和土力学、特殊土灾害预警和防治技术等方面的研究。E-mail: lixww@126.com

会发生水分迁移, 而不均匀的水分迁移过程会引起不均匀收缩, 从而导致土体产生无序的裂隙, 可见要研究膨胀土边坡的灾变机制, 就有必要对膨胀土裂隙的开展规律进行深入研究<sup>[4-6]</sup>。目前对膨胀土裂隙的研究主要集中在土表裂隙特征描述, 对膨胀土竖向裂隙产生、发展、演化过程的研究鲜见报道, 对气候作用下裂隙的产生及演化过程中土体的湿热变化还缺乏了解<sup>[7]</sup>, 因此有必要改进试验方法, 对竖向裂隙的变化过程进行定量分析。

膨胀土人工堑坡的形成是人类改造自然的结果, 常常又以破坏自然界原有平衡为代价, 既破坏自然植被覆盖, 造成水土流失和生态环境恶化, 又为坡体灾变埋下了隐患。植被防护是膨胀土边坡防护的重要措施之一, 能加强边坡稳定和美化环境<sup>[8-9]</sup>。想要最大限度的发挥植被防护功效, 即维持边坡稳定又美化生态环境, 就需要对植被覆盖下膨胀土的裂隙和湿热特性进行深入研究, 合理且充分地利用植被功效, 改进防护技术<sup>[10-12]</sup>。

本次对膨胀土试样进行持续蒸发状态下的室内模拟试验, 研究持续脱湿过程中膨胀土裂隙的产生、拓展规律, 量化土体湿热变化过程, 为新开挖膨胀土堑坡的植被防护措施提供理论依据。

## 2 试验方案

试验用土取自广西南宁市郊外广西农业科学院水牛所草场坡地的原状土块, 基本处于饱和状态。原状土样基本性质见表 1、2。

持续蒸发室内模拟试验分为 3 种不同试验方案: (1) 无植被覆盖试验, 模拟新开挖膨胀土蒸发状态; (2) 植被覆盖试验, 模拟新开挖膨胀土蒸发、蒸腾状态; (3) 农膜覆盖试验, 模拟新开挖膨胀土蒸发作用被遏制时的状态。

不同试验状态下所用原状膨胀土试样尺寸(长×宽×高)均为 400 mm×150 mm×400 mm。为确保表面裂隙能贯通土表, 并在侧面观测竖向裂隙开展, 设计土样长宽比大于 2:1。

表1 膨胀土基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of expansive soil

| 土性描述   | 密度/(g/cm <sup>3</sup> ) | 含水率/% | 干密度/(g/cm <sup>3</sup> ) | 土粒相对密度 | 液限/% | 塑限/% | 塑性指数  | 饱和渗透系数/(m/s)          | <5 μm 黏粒含量/% |
|--------|-------------------------|-------|--------------------------|--------|------|------|-------|-----------------------|--------------|
| 灰白色膨胀土 | 1.78                    | 40.9  | 1.26                     | 2.77   | 94.3 | 35.3 | 58.99 | 6.08×10 <sup>-8</sup> | 76           |

表2 膨胀土胀缩特性

Table 2 Swelling-shrinking characteristics of expansive soil

| 土性描述   | 自由膨胀率/% | 收缩系数 | 缩限/% | 体缩率/% | 50 kPa 膨胀率/% |
|--------|---------|------|------|-------|--------------|
| 灰白色膨胀土 | 98      | 0.44 | 19.5 | 20.4  | -0.008 5     |

试验前, 将从现场取回的原状膨胀土试块(试样用细钢丝切割)除试验面外, 其余各面均用双层 2 cm 厚的保温棉裹紧, 在其外面再利用 4 cm 厚的挤塑板围成模型箱, 用透明胶带将其固定, 并用玻璃胶将箱体缝隙密封, 在土样与模型箱之间的间隙用保温棉塞紧, 保证试样土体温度和水分主要沿竖向变化。利用 TDR 温度一体化传感器测试土体体积含水率和温度变化(型号: TDC220D), 为减小对土体的扰动, 沿着试样深度方向按照一定的距离错位布置传感器, 见图 1(图中 B 为试样宽度)。

植被覆盖试样在蒸发试验前 30 d 左右, 将试样表面的保护膜去掉, 并在土表铺设 1 层 1~2 cm 厚的营养土, 将生长状态良好的马尼拉草皮移植到试样上, 充分给水保持土体饱和状态养护 30 d 左右, 再开始蒸发试验。

长弧氙灯是一种在管状石英泡壳内充有适量高纯度氙气、二端封有极距大于 100 mm 的钨钨、钽

钨或钨钨电极的氙灯。氙在电场的激发下, 能射出类似太阳光的连续光谱。因其发出的光和太阳光光谱接近, 波长主要在 290~800 nm 之间, 色温为 5 500~6 000 K, 是目前较理想的室内模拟太阳光的光源, 被誉为“人造小太阳”。

在恒温恒湿实验室内, 确保温度在(24±2)℃和湿度(60±5)%恒定。利用长弧氙灯加工制作模拟自然日照的试验装置, 通过调节装置获得 600 W/m<sup>2</sup>左右的试验辐射强度。开始试验前, 将试样在恒温恒湿室内静置 1~2 d, 待试样土体温度与环境温度保持平衡后再开始试验。在相同的光照条件下, 每天 9:00 打开氙灯开始光照, 17:00 停止光照, 光照 8 h, 持续 30 d, 模拟持续蒸发的气候条件。利用手持太阳功率计量测不同状态下试样在蒸发试验时土表 4 个角总辐射量和反射量, 在土表对角放置 2 支温度计, 测量光照之前土表温度和光照结束时土表温度。

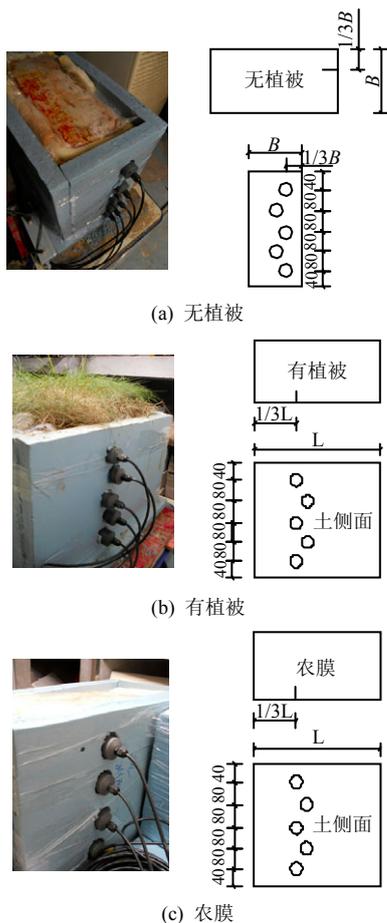


图 1 TDR 传感器布置 (单位: mm)  
Fig.1 The distribution of TDR(unit: mm)

(1) 无植被覆盖试样

每天光照 8 h 结束后,用数码相机记录土表裂隙发育分布状况,同时,用精度为 0.5 mm 的刻度尺在同一位置量测最大裂缝宽度,再打开模型箱侧面的挤塑板保温棉及农膜保鲜膜,从侧面观察竖向裂隙产生及拓展状况,并用 0.5 mm 刻度尺量测裂隙宽度和深度,观察完竖向裂隙后,迅速将试样恢复原来的状态。利用 TDR 温度一体化传感器获取试样在光照、停止光照期间土体温度和水分变化过程。

(2) 植被覆盖试样

每隔若干天,在 8 h 光照结束后打开侧面挤塑板,按观察无植被覆盖试样侧面裂隙发育的方法观察浅根系植被覆盖试样侧面裂隙发育演化特性。同时,利用 TDR 传感器获取试样土体湿热动态变化。

(3) 农膜覆盖的试样

持续 30 d 蒸发试验结束后,打开挤塑板和农膜,观察土表及侧面竖向裂隙发育分布状况,用数码相机记录下。同时,每天利用 TDR 传感器获取试样土体湿热动态变化。

试验前完成膨胀土蒸发状态下 TDR 标定试验。

3 试验结果

3.1 膨胀土平面裂隙拓展特性

(1) 无植被覆盖试样

蒸发试验第 1 天光照 8 h 结束时,土表蒸发失水,收缩开裂形成 3 条主要裂缝,平行于试样宽度方向。随后,光照 30 d 内土表裂隙主要围着 3 条主裂缝宽度和深度不断拓展发育变化。土表裂隙随光照时间的变化,见图 2。

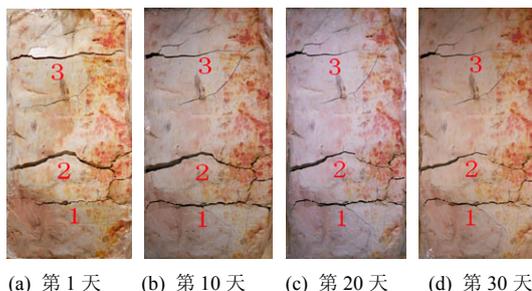


图 2 试样表面裂隙  
Fig.2 Surface fissure of soil sample

每天光照结束时,用数码相机记录土表裂隙发育状态,将拍摄的土表裂隙图片利用 MATLAB 软件自编程序进行二值化处理,计算并整理土表裂隙率随光照天数的变化规律,如图 3 所示。光照一开始,土表的裂隙率随光照天数的持续上升,4~5 d 的时候裂隙率达到峰值,随后土表裂隙率开始缓慢减小,并逐渐趋于稳定。

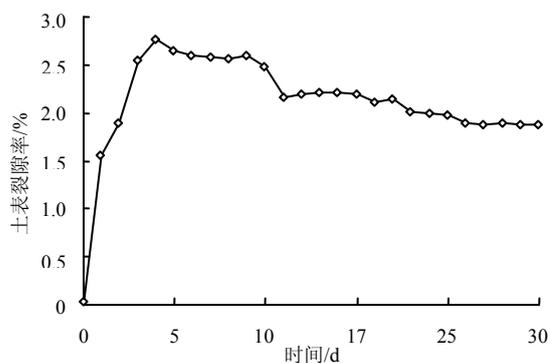


图 3 表面裂隙率变化  
Fig.3 Changes of surface fissure ratio

每天 8 h 光照结束后,用精度为 0.5 mm 的刻度尺量测 3 条主裂缝的最大宽度,并记录下裂缝宽度随光照天数增加的变化情况(附原始记录)。土样表面在第 1 天光照形成的 3 条主裂缝分别标记①、②、③。随着蒸发的持续,3 条主裂缝最大宽度的变化见图 4 所示。光照前 5 d 内,3 条主裂缝宽度急剧增加,尤其是②、③号裂缝,并在第 3 天达到最大,分别为 12 mm 和 8 mm,①号裂缝在第五天达到最大,为 3.5 mm。当每条裂缝宽度达到最大时,随着蒸发

天数持续, 3 条主裂缝宽度开始缩减, 并逐渐趋于稳定, 最终分别维持在 2.5、5.5、6.0 mm, 与室外现场试验裂缝宽度实测平均值 5.0 mm 比较接近<sup>[7]</sup>。这主要是因为微裂隙的出现以及裂隙向土体深部发展的过程, 降低了主裂隙的宽度。

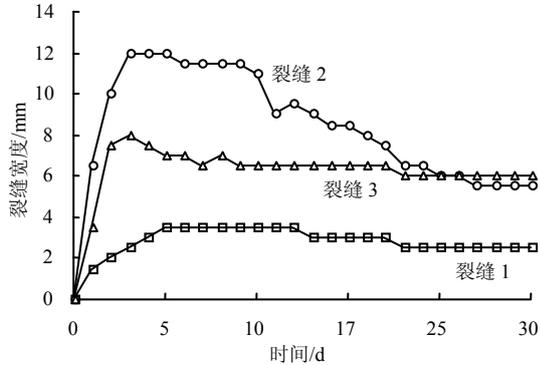


图4 裂缝变化  
Fig.4 Changes of fissure

(2) 植被覆盖试样

对于植被覆盖试样, 由于养护时间较短, 植被根系入土较浅, 浅根系植被覆盖试样在持续蒸发试验结束后, 铲除草皮, 试样表面无明显裂隙, 见图 5(a)。由图可见, 持续蒸发的气候环境下, 植被的存在可抑制裂隙的发展。

(3) 农膜覆盖试样

光照 30 d 结束后, 打开农膜观察土体表面, 发现土体没有出现裂隙, 见图 5(b)。农膜覆盖下膨胀土蒸发作用被遏制, 有效地抑制了裂隙的产生。



(a) 植被覆盖 (b) 农膜覆盖

图5 试样表面  
Fig.5 Sample surface

3.2 膨胀土竖向裂隙拓展特性

(1) 无植被覆盖试样

每天光照 8 h 后, 打开模型箱侧面, 观察土体竖向裂隙拓展状态, 记录竖向裂隙演化过程, 见图 6。由图可见, 蒸发第 1 天在表面形成的裂缝②、③贯通土样, 用精度为 0.5 mm 的刻度尺量测裂缝②、③在土样中形成的裂隙深度分别为 41 mm 和 33mm。裂缝②、③在土体中形成贯通裂缝④, 贯通裂缝④的最底部距离土表 67 mm。表面裂缝①随蒸发持

续, 裂缝贯通土表, 到第 6 天, 在土体侧面与贯通裂缝④连通。贯通裂缝④左侧底部, 在第 2 天试验结束时产生 1 条竖向的微裂缝, 记为裂缝⑤。

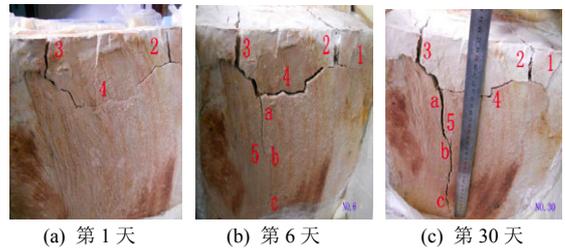


图6 土体竖向裂隙  
Fig.6 Soil vertical fissure

裂缝⑤长度和宽度变化如图 7 所示。裂缝⑤随着光照的持续逐渐向深度方向发展, 前 5 d 变化速度较快, 第 5~9 天变化速度减缓, 第 9 天以后裂隙深度趋于稳定, 裂缝最底部距离土体表面约 32 cm。裂缝宽度从裂缝⑤的顶部向底部不断变大, 顶部裂缝宽度变化速度最快, 越往下裂缝变化的越缓慢。随着光照持续, 裂缝宽度始终不断的缓慢增加, 顶部裂缝宽度在 a 处最大达到 5.5 mm, 中间 b 处达 3.5 mm, 底部 c 处达 2 mm。

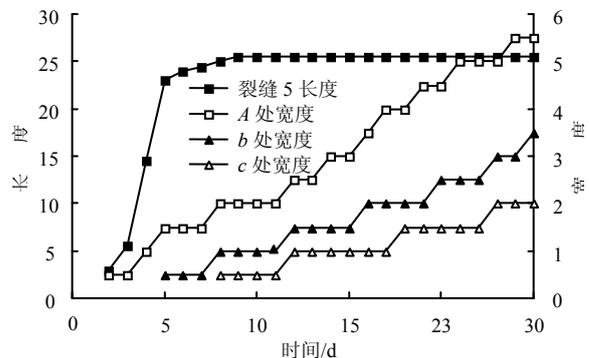


图7 裂缝⑤变化  
Fig.7 Variations of fissure ⑤

(2) 植被覆盖试样

植被覆盖下的试样, 持续蒸发 30 d, 每天试验结束后, 打开模型箱侧面, 观察植被覆盖下的土样, 量测裂隙沿深度方向的开展情况。观察发现, 在持续蒸发、蒸腾作用下土体始终没有出现明显的竖向裂隙。试验结束后, 用铲刀铲除草皮, 观察草皮的根系, 此时的根系已经植入表层土体 1 cm 左右, 见图 8(a)。

(3) 农膜覆盖试样

农膜覆盖下试样在持续蒸发 30 d 后, 打开农膜观察土体侧面裂隙发育分布情况, 见图 8(b)。可见, 农膜覆盖下土体侧面没有明显的裂隙, 说明限制膨胀土的蒸发能有效阻止土体裂隙的开展。

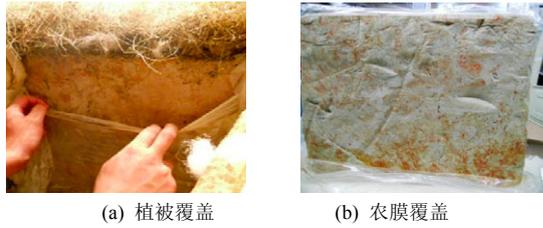


图 8 第 30 天土体侧面  
Fig.8 Profile of soil sample at the 30rd day

### 3.3 膨胀土湿热特性

#### (1) 试样表面辐射及温度变化规律

试样表面的总辐射量、反射量和净辐射量以及光照前后的试样表面温度变化，见表 3。将每天土体表面最高温度与最低温度之差，即温差变化整理对比如图 9 所示。由图可见，植被覆盖下试样表面温差最小，平均为 8.4 °C，无植被覆盖和农膜覆盖时试样表面温度变化较大，且两者接近，在 14 °C 左右。植被覆盖下土表最高温度 33 °C，远小于其他试验状态下的土表温度，植被的存在吸收了部分辐射，降低了土表温度。无光照时，植被覆盖作用减缓了土体温度的散失，每天开始光照之前，植被覆盖下试样土表温度最高 24.6 °C。

表 3 试样表面辐射和温度变化  
Table 3 Changes of radiation and temperature on the surface of soil sample

| 试验分类  | 总辐射<br>( $W/m^2$ ) | 反射<br>( $W/m^2$ ) | 净辐射<br>( $W/m^2$ ) | 不同时刻温度<br>/ $^{\circ}C$ |      |
|-------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------------|------|
| 无植被覆盖 | 629                | 216               | 413                | 24                      | 37.6 |
| 植被覆盖  | 630                | 115               | 515                | 24.6                    | 33   |
| 农膜覆盖  | 633                | 198               | 435                | 23.8                    | 37.9 |

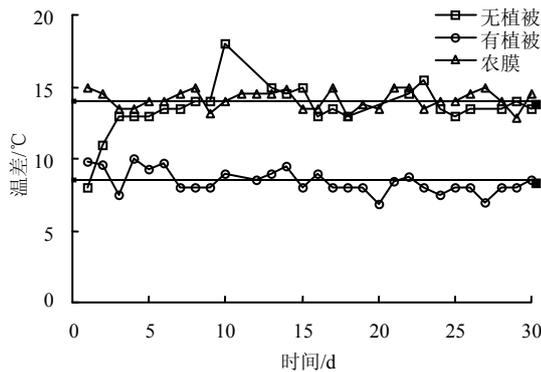


图 9 土样表面温差变化  
Fig.9 Changes in temperature on the surface of soil sample

#### (2) 试样体积含水率变化规律

在持续 30 d 蒸发试验结束后，沿深度方向各测点体积含水率总的变化量对比如图 10 所示。在相同光照条件下，经历相同蒸发时间后，无植被覆盖试样体积含水率变化幅度最大，明显大于植被覆盖下的试样。有无植被覆盖下试样表层土体（测点 1）

体积含水率变化都比较大，而农膜覆盖下试样各测点体积含水率没有明显变化。

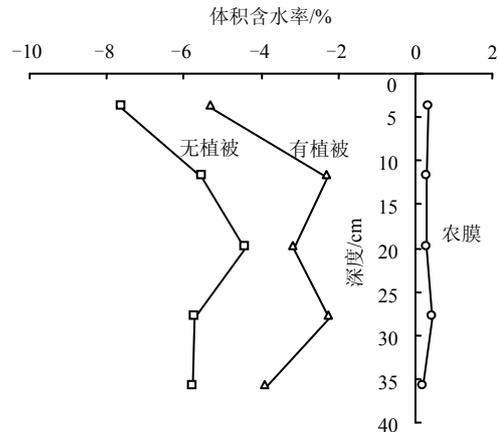


图 10 体积含水率变化  
Fig.10 The changes in volume moisture content

试样表层土体（测点 1）30 d 体积含水率累计变化对比如图 11 所示。由图可见，农膜覆盖下试样表层土体体积含水率变化不大；有无植被覆盖试样表层土体体积含水率随着光照时间的变化规律相似，在光照前 5 d，脱湿较快，从第 5 天开始，两者变化速率开始变缓，无植被覆盖下试样表层土体的脱湿量逐渐大于有植被覆盖下试样。

将有无植被覆盖试样表层土体体积含水率累计变化曲线按照前 5 d 光照和后 25 d 光照分成 2 阶段进行线性分析，获得表层土体脱湿速率，见表 4。在蒸发初期，有、无植被覆盖土样蒸发脱湿速率分别为 0.47 %/d、0.46 %/d，比较接近，但从第 5 天开始，两者的脱湿速率都开始减小，植被覆盖下的脱湿速率减为 0.07 %/d，无植被覆盖的减为 0.17 %/d。对于长期蒸发过程，植被的覆盖可减缓土体脱湿速率，降低土体脱湿量，起到保持土体持水能力的作用。

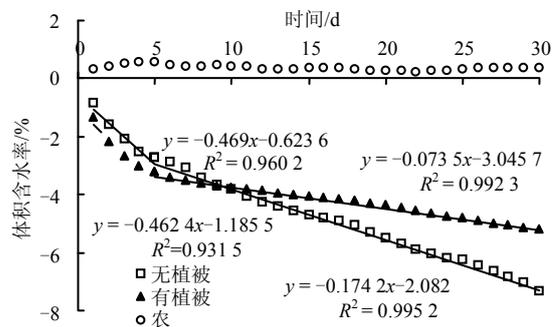


图 11 体积含水率累计变化  
Fig.11 Accumulative changes of volumetric moisture contents

表 4 表层土体脱湿速率  
Table 4 The drying rate of surface soil

| 试验项目  | 脱湿速率/(%/d) |        |
|-------|------------|--------|
|       | 前 5 d      | 后 25 d |
| 无植被覆盖 | 0.469      | 0.174  |
| 植被覆盖  | 0.462      | 0.074  |

(3) 试样温度变化规律

每天光照 8 h, 沿深度方向土体温度变化的对比如图 12 所示。由图可见, 土体温度在 28 cm 范围内变化幅度较大, 植被覆盖膨胀土温度变化幅度最小, 表层土体 (测点 1) 温度平均变化为 2.03 °C, 明显小于无植被覆盖的 7.36 °C 和农膜覆盖的 9.72 °C, 植被覆盖有效地减小土体温度变化达 5 °C 左右。在太阳辐射下, 膨胀土温度变化的影响深度有限, 沿着深度方向土体温度变化幅度逐渐减小。植被覆盖下土体温度变化在 20 cm 处趋于平缓, 无植被覆盖和农膜覆盖的土体温度变化在 28 cm 处趋于平缓, 说明植被覆盖可减小温度变化影响深度, 同时可见无植被覆盖土体温度变化影响深度 28 cm 与其竖向裂隙开展深度 32 cm 比较接近。

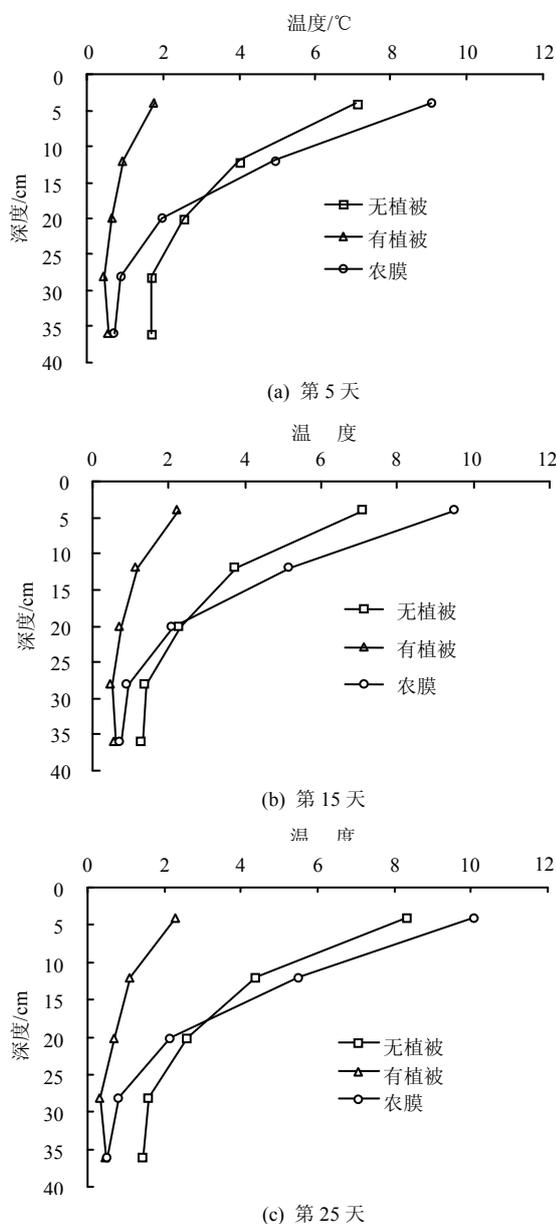


图 12 温度变化对比

Fig.12 Comparison of temperature changes

土体每天温度时程变化的对比如图 13 所示。每天温度变化规律相似, 光照 8 h, 土体温度不断上升, 停止光照后, 土体温度开始逐渐降低, 直至与环境中的温度保持平衡。但是, 不同状态下土体温度变化幅度和剧烈程度不同, 即农膜覆盖土体温度变化幅度最大, 其次是无植被覆盖土体, 有植被覆盖土体温度变化幅度最小, 温度上升和下降都比较平缓; 随着蒸发过程的持续, 无植被覆盖与农膜覆盖土体温度变化越来越接近, 但两者的温度变化幅度都明显大于有植被覆盖下土体; 有植被覆盖土体温度变化曲线随光照时间持续整体有所上升, 这是由于植被覆盖, 对土体温度变化具有“削峰填谷”的作用。所以, 植被覆盖不但能减小土体温度变化的剧烈幅度, 而且还能保温, 降低土体热量的散失速度。

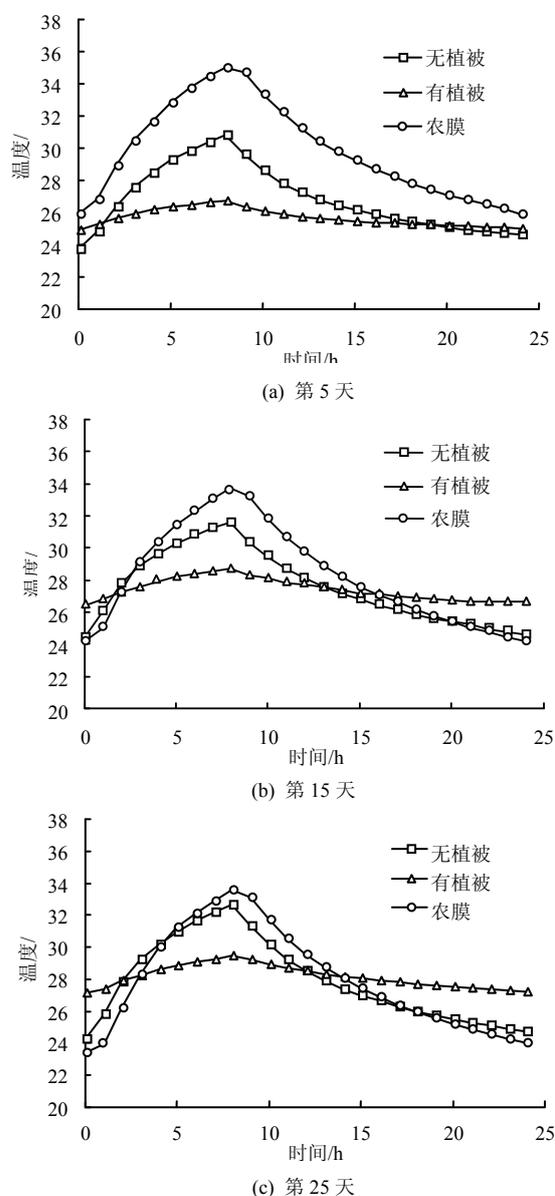


图 13 土体温度变化对比

Fig.13 Comparison of soil temperature changes

## 4 结 论

(1) 持续蒸发状态下, 植被覆盖和农膜覆盖土体表面及竖向均未出现明显裂隙。对无植被覆盖的土体, 将土样尺寸长宽比确定为大于 2:1 的形式, 可观测到土体表面在持续蒸发作用下形成平行于宽度方向的 3 条主要裂隙, 这种处理方式可以保证从侧面观测到土体竖向裂隙拓展过程。

(2) 无植被覆盖膨胀土竖向裂隙拓展特性。在距离土表 6.7 cm 范围内, 共出现 3 条竖向裂隙, 在 6.7 cm 以下只出现 1 条竖向裂隙, 该竖向裂隙随着持续蒸发, 不断往深度方向发展, 第 2~5 天裂隙长度迅速增加, 第 5~9 天裂隙长度开始缓慢增加, 第 9 天后裂隙长度趋于平稳, 不再增加, 此时竖向裂隙深度达 32 cm, 说明大气作用对膨胀土裂隙开展深度影响有限。

(3) 无植被覆盖下土体湿热影响深度为 28 cm, 与竖向裂隙开展深度 32 cm 接近, 而植被覆盖下土体湿热影响深度为 20 cm; 无植被覆盖时, 表层土体蒸发脱湿量为 7.38%, 初始蒸发脱湿速率 0.46%/d, 5 d 后脱湿速率开始减小, 减为 0.17%/d; 植被覆盖时, 表层土体脱湿量为 5.29%, 初始脱湿速率为 0.47%/d, 5 d 后脱湿速率减为 0.07%/d; 农膜覆盖时, 土体蒸发受到遏制; 持续 30 d 蒸发, 平均每天光照 8 h 温度变化, 无植被覆盖的为 7.36℃; 农膜覆盖的为 9.72℃; 植被覆盖的为 2.03℃。说明植被作用可减小土体湿热变化幅度, 降低水分迁移速率, 起到保持土体湿度, 调节土体温度的作用。

本文采用自制的阳光辐射模拟试验装置对持续蒸发状态的膨胀土裂隙和湿热特性展开分析, 试验中考虑植被蒸腾作用对膨胀土的裂隙拓展和湿热变化过程的影响, 试验结果为进一步研究植被对膨胀土工程性质的作用机制奠定了基础, 研究结果可服务于膨胀土边坡的植被防护和植被恢复, 同时也可作为类似研究项目提供借鉴。

## 参 考 文 献

[1] 陈生水, 郑澄锋, 王国利. 膨胀土边坡长期强度变形特性和稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6): 795—799.  
CHEN Sheng-shui, ZHENG Cheng-feng, WANG Guo-li. Researches on long-term strength deformation characteristics and stability of expansive soil slopes[J].

*Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(3): 422—424.

[2] 徐彬, 殷宗泽, 刘述丽. 膨胀土强度影响因素与规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 44—50.  
XU Bin, YIN Zong-ze, LIU Shu-li. Experimental study of factors influencing expansive soil strength[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(1): 44—50.

[3] LUO Z, ATAMTURKTUR S, CAI Y, et al. Reliability analysis of basal-heave in a braced excavation in a 2-D random field[J]. *Computers and Geotechnics*, 2012, 39: 27—37.

[4] MILLER, STANLEY M. Geotechnical and environmental indicators for characterizing expansive soils[J]. *Geotechnical Special Publication*, 2008, 178: 263—270.

[5] 孔令伟, 陈正汉. 特殊土与边坡技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 52(5): 141—161.  
KONG Ling-wei, CHEN Zheng-han. Advancement in the techniques for special soils and slopes[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 52(5): 141—161.

[6] 陈正汉, 孙树国, 方祥位, 等. 非饱和土与特殊土测试技术新进展[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 147—169  
CHEN Zheng-han, SUN Shu-guo, FANG Xiang-wei, et al. Recent advances of the measuring technology for unsaturated soils and special soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(2): 147—169.

[7] LI Xiong-wei, WANG Yong, YU Jin-wei. Unsaturated expansive soil fissure characteristics combined with engineering behaviors[J]. *Journal of Central South University*, 2012, 19(12): 3564—3571.

[8] 李雄威, 孔令伟, 郭爱国. 植被作用下膨胀土渗透和力学特性及边坡防护机制[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 85—91.  
LI Xiong-wei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo. Permeability and mechanical characteristics of expansive soil and cut slope protection mechanism under vegetation action[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(1): 85—91.

[9] 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.
- [10] HENGCHAOVANICH D. 15 years of bioengineering in the wet tropics from A(*Acacia auriculiformis*) to V(*Vetiveria zizanioides*)[C]//Proceedings of the First Asia-Pacific Conference on Ground and Water Bioengineering for Erosion Control and Slope Stabilization. Manila: IECA, 1999: 54—63.
- [11] 程洪, 颜传盛, 李建庆, 等. 草本植物根系网的固土机制模式与力学试验研究[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(1): 62—65.
- CHENG Hong, YAN Chuan-sheng, LI Jian-qing, et al. An experimental study on mechanic performance and mechanism of soil-reinforcement by herb root system[J]. **Research of Soil and Water Conservation**, 2006, 13(1): 62—65.
- [12] 李志清, 胡瑞林, 吴礼舟, 等. 生态防护在高速公路护坡中的应用研究[J]. *工程地质学报*, 2005, 13(2): 280—284.
- LI Zhi-qing, HU Rui-lin, WU Li-zhou, et al. Protection of ecological system in the application of expressway revetment[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2005, 13(2): 280—284.