

文章编号: 1000 - 7598 (2014) 09 - 2473 - 07

降雨蒸发作用下膨胀土湿热和 裂隙特性室内模拟试验

李雄威¹, 王爱军¹, 王 勇²

(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)

摘 要: 以广西白色强膨胀土为研究对象, 对有、无植被覆盖的膨胀土样进行蒸发、降雨再蒸发试验, 研究降雨、蒸发过程对膨胀土湿热和裂隙拓展特性的影响。结果表明, 植被覆盖土样表面的反射量比无植被覆盖土样小 100 W/m^2 左右, 土样表面温差小 $5 \sim 6$ 。无植被覆盖土样经历降雨过程后, 在相同蒸发条件下, 土样表面裂隙率由 1.28% 增加到 3.82% , 表层土体累计脱湿量由 3.42% 增加到 11.17% , 脱湿速率由 $0.59\%/d$ 增加到 $1.44\%/d$, 表层土体温度变化平均值由 13.1 增加到 14.9 。可见, 降雨、蒸发过程使得土体水量变化加大, 水分迁移速率增加, 温度变化加剧, 土体趋于破碎。植被覆盖土样经历降雨过程后, 在相同蒸发条件下, 土样表面并未出现明显裂隙, 表层土体累计脱湿量由 3.16% 变为 2.36% , 脱湿速率由 $0.58\%/d$ 变为 $0.37\%/d$, 表层土体温度变化平均值由 0.58 变为 0.37 。可见, 短期降雨、蒸发过程对植被覆盖下膨胀土的持水能力影响不大。

关 键 词: 膨胀土; 裂隙; 湿热; 大气作用; 植被**中图分类号:** TU 443**文献标识码:** A

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

LI Xiong-wei¹, WANG Ai-jun¹, WANG Yong²

(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)

Abstract: Taking the white strong expansive soil of Guangxi as the research object. Laboratory model test for evaporation-rainfall-evaporation is respectively carried out for expansive soil with vegetation covered or not, to explore the influence of rainfall and evaporation process on moisture-heat behavior and fissures development. The results show that, the values of radiation and surface temperature of soil sample with vegetation covered are smaller than the ones of soil sample without vegetation covered about 100 W/m^2 , $5 \sim 6$ respectively. After rainfall process and under same evaporation conditions, the surface fissure ratio of soil samples without vegetation covered increases from 1.28% to 3.82% . Moisture content changes of surface soil increase from 3.42% to 11.17% . Drying rate of surface soil increases from $0.59\%/d$ to $1.44\%/d$. The average temperature changes of surface soil increase from 13.1 to 14.9 . Thus it can be seen, rainfall and evaporation process makes the changes of moisture content, temperature, and moisture migration rate increased. Soils tended to be broken. After rainfall process and under same evaporation conditions, obvious fissures in soil sample with vegetation covered don't appear. Moisture content of surface soil changes from 3.16% to 2.36% . The drying rate of surface soil changes from $0.58\%/d$ to $0.37\%/d$. The average temperature variation of surface soil changes from 0.58 to 0.37 . Obviously, short-term rainfall and evaporation process has a low influence on the moisture holding capacity of expansive soil with vegetation covered.

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

收稿日期: 2013-06-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41102229); 江苏省自然科学基金项目 (No. BK20131141); 住房和城乡建设部科学技术项目 (No. 2012-k3-10); 江苏省“青蓝工程”; 江苏省地质矿产局科研项目 (No. 2014-ky-4)

第一作者简介: 李雄威, 男, 1976 年生, 博士, 副教授, 主要从事非饱和土力学、特殊土的灾害预测与防治以及桩土共同作用方面的研究工作。

E-mail: lixww@126.com

1 引 言

大气作用是膨胀土工程性质发生改变的重要诱因，膨胀土在降雨、蒸发气象环境下，土体与大气发生水分和热量的传递，使土体温度和含水率产生反复变化^[1-4]。膨胀土边坡现场试验研究表明^[5-7]，降雨过程中植被不但能降低坡面冲刷和径流量，有效抑制坡体变形，而且还可以减缓土体温度梯度，改善土体的渗透性，进而维持边坡稳定。

植被防护是膨胀土边坡防护的重要措施之一，它既能加强边坡稳定又能美化环境^[8-9]。要想最大限度地发挥植被防护功效，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、充分地利用植被功效，改进防护技术^[10-12]。

本文在室内模拟降雨、蒸发环境，制造合适植被生长的室内光照条件，分析有、无植被覆盖膨胀土的湿热和裂隙特性，并对植被的影响作用进行初步的量化。

2 试验方案

试验用土样取自广西南宁市郊外广西农业科学院水牛所草场坡地，原状土样取自地表以下 1.8~2.2 m，土样基本饱和。土样的基本物理性质见表 1，胀缩特性见表 2，土样具有强膨胀性。试验土样尺寸为 40 cm (长)×30 cm (宽)×40 cm (高)，其中 30 cm×40 cm 为试验面。除上表面外，其余各面均用双层 2 cm 厚的保温棉包裹，模型箱的外侧和底面均用 4 cm 厚的保温挤塑板，土样与模型箱的间隙用保温棉塞紧，见图 1。试验开始时，将土样试验面的农膜去掉。

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。

表 1 膨胀土基本物理性质
Table 1 Basic physical properties of expansive soil

土名	密度 /(g/cm ³)	含水率 /%	干密度 /(g/cm ³)	相对密度	液限 /%	塑限 /%	塑性指数	饱和渗透系数 /(10 ⁻⁸ 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	59.0	6.08	76

表 2 膨胀土胀缩特性

Table 2 Swell-shrink characteristics of expansive soil

土名	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

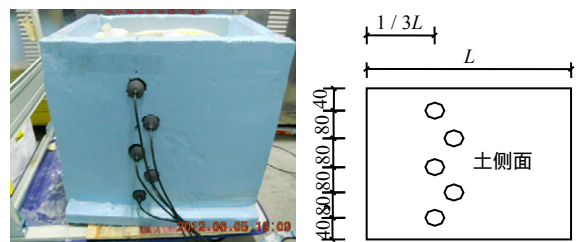


(a) 取样过程 (b) 试验土样

图 1 试样
Fig.1 Testing soil sample

在可控温湿度的恒温、恒湿实验室中，设置室内温度 (24 ± 2) 和湿度 (60% ± 5%) 恒定。利用 1 800 W 长弧氙灯和不锈钢支架制成的人工模拟太阳辐射装置，模拟自然日照条件。设计光照强度为 600 W/m²，通过调节支架高度确定试验辐射强

度。在试验面长度方向的 1/3 处，沿深度方向每隔一定距离布置 TDR-温度一体化探头 (土壤体积含水率时域反射测试和温度测试一体化)，共 5 个 (从上往下依次 1~5)，试样和探头的布置见图 2，5 个探头分别对应不同的深度，距离土表依次是 4、12、20、28、36 cm。通过 TDR-温度一体化探头获取土体体积含水率和温度的变化规律，定义测点 1 测试范围内的土体为表层土体。根据持续蒸发试验的结果发现，从蒸发第 5 d 开始，土体脱湿速率发生变化，第 5 d 是脱湿快慢的转折点，因此，本试验蒸发持续时间设定为 5 d。



(a) 实物照片 (b) 几何尺寸 (单位: mm)

图 2 TDR 测点布置
Fig.2 Distribution of TDR measuring point

试验项目包括无植被覆盖试验和有植被覆盖试验，试验前完成膨胀土蒸发状态下的 TDR 标定试验。

植被选用马尼拉草。它为青绿色，结缕草系列，耐践踏、耐修剪、耐寒、耐旱。马尼拉草坪为节节生根，根系发达，是固土护坡的好材料。在黄河以南地区都有栽培，广泛应用于园林绿化、庭院绿化及道路绿化，是草坪的常见品种之一。常绿周期大约在 280~300 d 左右。马尼拉草已在膨胀土地区大量应用。

2.1 无植被覆盖试验

在恒温、恒湿试验室中，将无植被覆盖的土样放置在太阳辐射模拟装置下。每天 9:00~17:00 连续光照 8 h，持续 5 d 为一个蒸发试验周期。在土样表面对角放置两支温度计，测量每天光照之前和停止光照时土样表面温度，并利用手持太阳功率计测量土样表面的光照总辐射和反射量；通过 TDR-温度一体化探头获取土样每小时温度和体积含水率的分布；在连续光照 8 h 期间，每隔 4 h 用数码拍照、记录土样表面裂隙分布。蒸发试验结束后，采用自制降雨模拟装置，进行 24 h 连续降雨，降雨强度为 50 mm/h（达到暴雨强度等级，使土样充分给水）。经过 24 h 充分给水后，再在相同的日照环境中，重复上述蒸发试验过程。

2.2 有植被覆盖试验

土样充分给水后，铺设 1~2 cm 厚的根植土，将室外生长状态良好的马尼拉草移植到土样表面，见图 3，草高为 12~15 cm，叶长为 3~4 cm，宽为 1.5~2.5 mm，5 cm×5 cm 范围内根系数量超过 38 根。在试验之前对试样充分给水养护，使其始终处于饱和状态，再将试样放置在恒温、恒湿实验室中，按照无植被覆盖试样的试验方法开始相同的试验过程。

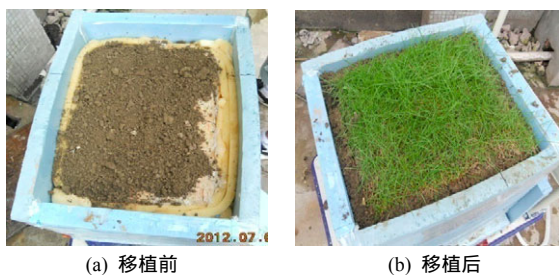


图 3 植被移植

Fig.3 Vegetation transplant

3 试验结果与分析

3.1 辐射和土样表面温度变化特性

对有、无植被覆盖土样进行降雨、蒸发试验，

将土样表面总辐射量、反射量、光照开始前的温度、光照结束时的温度以及光照前后土样表面温差平均值，整理见表 3。有、无植被覆盖土样在经历降雨、蒸发过程后，土样表面的总辐射量均比较相近，在 630 W/m² 左右，符合试验设计要求，但无植被覆盖土样的反射量明显大于有植被覆盖土样。光照开始时土样表面的温度比较接近，但经过 8 h 光照后，无植被覆盖土样表面温度远大于有植被覆盖试样。由此可见，在相同光照强度下，植被蒸腾作用吸收了一部分太阳辐射，减小了反射量，降低了土样表面温度。对比光照前后土样表面温度变化可见，无植被覆盖试样比有植被覆盖试样大 5~6，植被覆盖大大减小了土样表面温度变化的幅度。经历降雨过程后，土样表面温差略大于降雨前，但植被覆盖土样变化量较小。

表 3 模拟阳光辐射量和土样表面温度变化

Table 3 Simulation of sun radiation and temperature changes of surface soil

有无植被	状态	总辐射 / (W/m ²)	反射 / (W/m ²)	9:00 温度 /	17:00 温度 /	平均温度变化 /
无	降雨前	630	213	24.7	37.8	13.1
无	降雨后	632	208	24.3	39.2	14.9
有	降雨前	625	112	24.4	33.0	8.6
有	降雨后	628	133	24.2	33.3	9.1

3.2 土体温度变化特性

在降雨前后蒸发试验中，土体温度沿深度方向的对比见图 4。无植被覆盖试样表层土体温度变化较大，随着深度增加，温度变化量逐渐减小，到 28 cm 深度后温度变化量趋缓，且随着光照天数增加，以及经历降雨过程后，浅层土体温度变化量有所加大。有植被覆盖试样降雨前后以及持续蒸发过程中，土体温度变化幅度都比较接近。有植被覆盖试样，温度变化量趋缓的深度大约在 20 cm 左右，对比可见，植被有效降低了土体温度变化的影响深度和幅度。对于表层土体，无植被覆盖平均温度变化由 5.18 变为降雨后的 6.63，而植被覆盖平均温度变化由 0.81 变为降雨后的 0.86，说明降雨、蒸发过程会加大土体温度变化量，而植被的存在会降低温度变化量，减弱降雨、蒸发过程的影响程度。

以上试验结果说明，光照时植被会吸收部分辐射能量，减小太阳辐射对土体温度的影响，停止光照时，植被的存在会减缓表层土体热量散失的速度，降低温度变化幅度。所以，对新开挖的膨胀土边坡采用植被护坡可以改善土体热量变化过程。

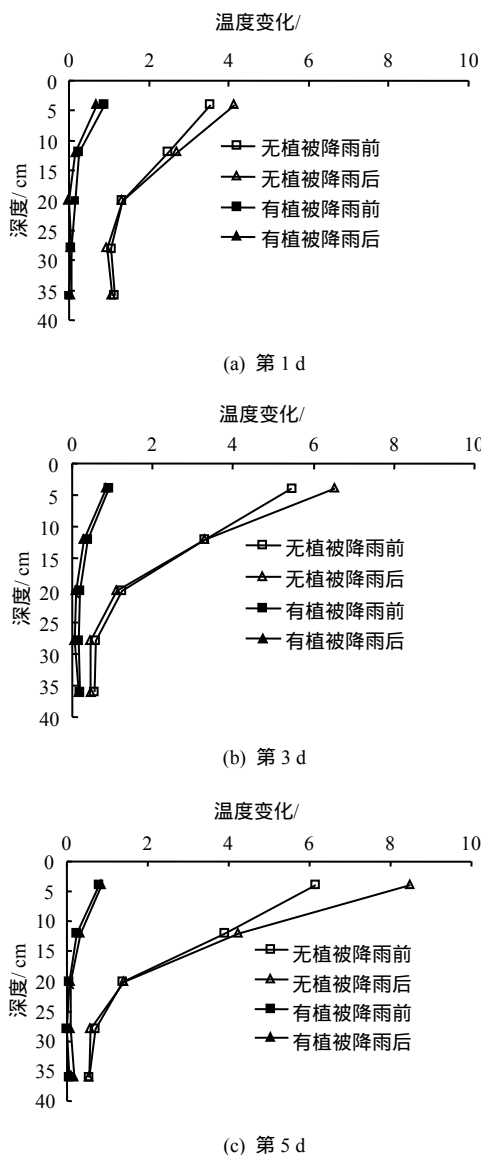


图4 土壤温度-深度变化曲线
Fig.4 Curves of temperature and depth in soil sample

3.3 土壤湿度变化特性

(1) 土壤体积含水率沿深度方向变化特征

降雨前后蒸发试验中，土壤体积含水率总变化量对比（负号表示降低，减小）见图5。有、无植被覆盖试样，表层土体（测点1）的体积含水率变化较大，即蒸发脱湿量较大，沿着深度方向体积含水率变化幅度逐渐减小。无植被覆盖土壤体积含水率变化幅度略大于有植被覆盖土壤，见图5(a)；经过充分降雨后，无植被覆盖土壤测点1的体积含水率变化量为11.17%，明显大于有植被覆盖土壤的体积含水率变化量2.36%，见图5(b)。对于无植被覆盖土壤，降雨对表层土体蒸发脱湿变化影响较大。经降雨、蒸发试验后，表层土体体积含水率变化量远远大于降雨前的土壤；而有植被覆盖土壤在降雨前后蒸发周期内的体积含水率变化量沿深度方向变

化比较接近。植被作用显著降低了降雨过程对土体持水能力的影响，植被覆盖可有效减小表层土体的蒸发量，保持土体湿度。对比降雨蒸发过程中土体水分剧烈变化影响深度，无植被覆盖土样在28 cm左右，有植被覆盖土样在20 cm左右，土体水分与温度剧烈变化影响深度基本接近，可定义为太阳辐射剧烈影响深度。

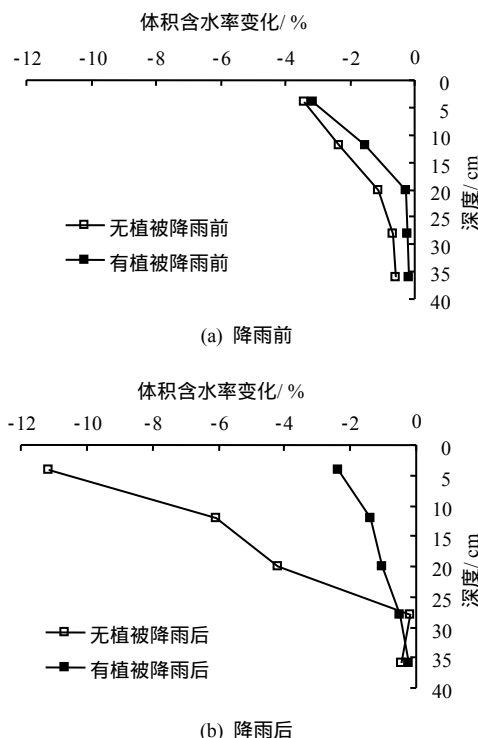


图5 土壤体积含水率-深度变化曲线
Fig.5 Curves of volume moisture content and depth in soil sample

(2) 土壤脱湿过程量化

有、无植被覆盖土壤的降雨蒸发试验中，表层土体（测点1）的体积含水率累计变化量整理对比见图6。可见，无植被覆盖土壤体积含水率累计变化量大于有植被覆盖土壤；降雨前，无植被覆盖土壤的累计脱湿量是3.42%，有植被覆盖土壤的是3.16%；降雨后，无植被覆盖土壤累计脱湿量达到11.17%，有植被覆盖土壤的是2.36%，说明降雨对植被覆盖土壤蒸发过程中的体积含水率变化影响不大，而对无植被覆盖土壤的影响较大，说明植被能有效保持土壤水分。

将表层土体（测点1）的体积含水率变化进行线性拟合，见图7。可见，表层土体体积含水率累计变化量与蒸发天数之间呈现良好的线性关系。直线斜率的绝对值即为体积含水率日变化量，代表了土壤体积含水率变化速率。

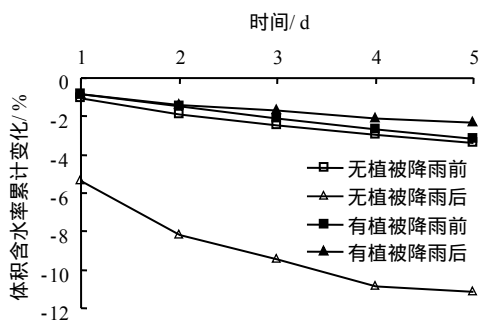


图 6 土样体积含水率累计变化

Fig.6 Cumulated changes of volume moisture content in soil sample

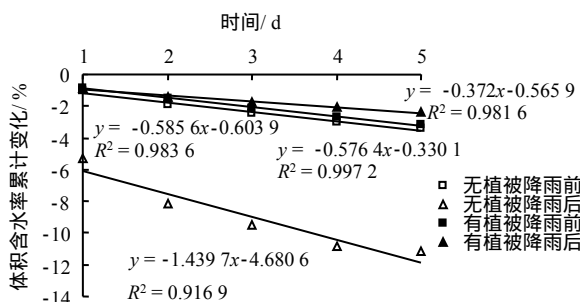


图 7 体积含水率变化线性拟合

Fig.7 Linear fitting of volume moisture content changes

将表层土体体积含水率变化速率整理列入表 4。有、无植被覆盖土样降雨前蒸发脱湿速率分别为 0.58%/d、0.59%/d。降雨后，无植被覆盖土样为 1.44%/d，显著大于植被覆盖土样的 0.37%/d，可见植被作用降低了降雨后膨胀土的脱湿速率。文献[13]研究表明，膨胀土脱湿速率的大小对土体的持水能力影响较大，进而影响到土体的胀缩变形和强度特性，可见植被存在可大大减小土体的脱湿速率，进而改善土体的工程性质。

表 4 体积含水率变化速率对比

Table 4 Comparison of rate of volume moisture content changes

状态	体积含水率累计变化速率/(%/d)
无植被降雨前	0.59
无植被降雨后	1.44
有植被降雨前	0.58
有植被降雨后	0.37

3.4 膨胀土平面裂隙特性

在降雨蒸发过程中无植被覆盖土样表面裂隙以及二值化计算结果对比见图 8、9，处理过程参考文献[7]。无植被覆盖试样在蒸发第 1 d，主要的裂隙基本成型，随着光照天数持续，主裂缝加宽，并向

土体深处发展，而细裂缝拓展缓慢。经历降雨过程后，第 1 d 光照，土样表面裂隙网格变密，细裂缝拓展加速，土体趋于破碎。

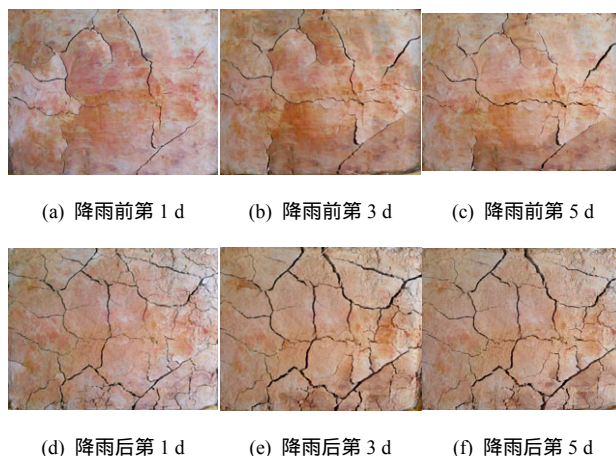


图 8 无植被覆盖土样裂隙分布图

Fig.8 Distribution of soil fissure without vegetation covered

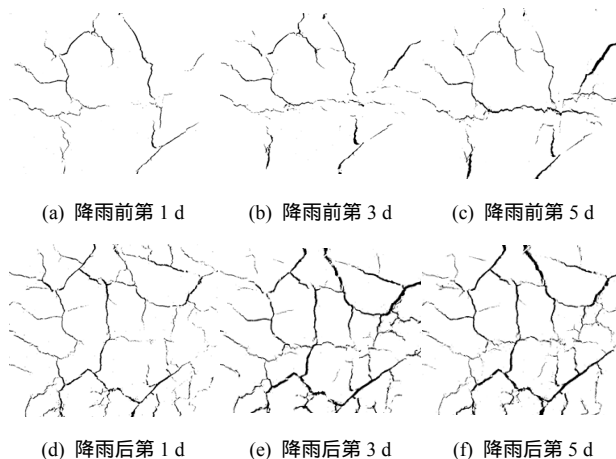


图 9 无植被覆盖土样裂隙二值化结果

Fig.9 Binarization results of soil fissure without vegetation covered

根据土样表面裂隙二值化统计结果计算裂隙率，降雨前后土样表面裂隙率对比见图 10。在光照第 1 d，降雨前为 0.72%，降雨后为 2.98%。降雨前后土样基本在光照第 3 d 左右裂隙率达到峰值，降雨前为 1.28%，降雨后为 3.82%。可见，随着蒸发过程的持续，土样裂隙率逐渐增加，并趋于稳定；经历降雨过程后，土样裂隙率显著增加，降雨蒸发的干湿循环过程加速了土体裂隙的发育。

有植被覆盖土样，在降雨蒸发试验结束后用铲刀除去植被清理土样表面，发现植被根系进入土中 1~2 cm，土样表面没有明显裂隙出现，见图 11。

可见，相同蒸发条件下，经历降雨过程后无植

被覆盖土样的脱湿速率和脱湿量以及裂隙率明显增加；而植被覆盖土样降雨前后，脱湿速率和脱湿量变化不大，土样表面未出现明显裂隙。说明植被可以维持土体的持水能力，进而延缓土样裂隙的拓展。

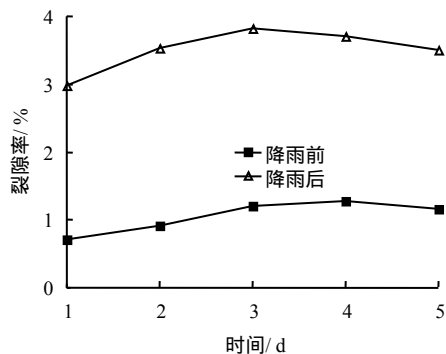


图10 降雨前后土样裂隙率对比

Fig.10 Comparison of soil fissure before and after rainfall



图11 有植被覆盖试样

Fig.11 Soil sample with vegetation covered

4 结论

(1) 630 W/m² 的阳光辐射条件下，植被覆盖土样表面的辐射、反射量比无植被覆盖土样小 100 W/m² 左右，土样表面温差小 5~6 。说明植被蒸腾作用可吸收部分阳光辐射能量，降低表层土体温度变化的幅度。

(2) 无植被覆盖土样经历降雨过程后，在相同蒸发条件下，土样表面裂隙率由 1.28% 增加到 3.82%，说明干湿循环过程可促进土体裂隙的发育。表层土体累计脱湿量由 3.42% 增加到 11.17%，脱湿速率由 0.59%/d 增加到 1.44%/d，表层土体温度变化平均值由 13.1 增加到 14.9 。可见，降雨蒸发过程使得土体水量变化加大，水分迁移速率增加，温度变化加剧，土体趋于破碎。

(3) 植被覆盖土样经历降雨过程后，在相同蒸发条件下，土样表面并未出现明显裂隙，表层土体累计脱湿量由 3.16% 变为 2.36%，脱湿速率由 0.58%/d 变为 0.37%/d，表层土体温度变化平均值由 0.58 变为 0.37 ，土样表面未出现明显裂隙。

可见，短期降雨蒸发过程对植被覆盖下膨胀土的持水能力影响不大，进而延缓土样裂隙的拓展。

本文利用室内模拟试验获得了植被覆盖下土体水分迁移和温度变化的定量数据。下一步将开展室内土工试验，分析水分迁移和温度变化状态对膨胀土工程性质的影响程度，深入分析植被作用机制。

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, 29(6): 795 - 799.
- [2] LUO Z, ATAMTURKTUR S, CAI Y, et al. Simplified approach for reliability-based design against basal-heave failure in braced excavations considering spatial effect[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 2012, 138(4): 441 - 450.
- [3] ORENCIO MONJE VILAR. A simplified procedure to estimate the shear strength envelope of unsaturated soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2006, 43 (10): 1088 - 1095.
- [4] MILLER U M, STANLEY M. Geotechnical and environmental indicators for characterizing expansive soils[J]. *Geotechnical Special Publication*, 2008, 178 (5): 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, 45(5): 141 - 161.
KONG Ling-wei, CHEN Zheng-han. Advancement in the techniques for special soils and slopes[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(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 XIONGWEI, WANG YONG, YU JINWEI. Unsaturated expansive soil fissure characteristics combined with engineering behaviors[J]. *Journal of Central South University*, 2012, 19(12): 3564 - 3571.

- 南大学学报, 1997, 27(3): 127 - 130.
- LIU Song-yu, ZHANG Ji-wen. Fractal approach to measuring soil porosity[J]. **Journal of Southeast University**, 1997, 27(3): 127 - 130.
- [12] 唐益群, 张曦, 赵书凯, 等. 地铁振动荷载作用下隧道周围饱和软黏土分形研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(11): 86 - 91.
- TANG Yi-qun, ZHANG Xi, ZHAO Shu-kai, et al. A study on the fractals of saturated soft clay surrounding subway tunnels under dynamic loads[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2007, 40(11): 86 - 91.
- [13] 姜岩, 雷华阳, 郑刚, 等. 动荷载作用下结构性软土微结构变化的分形研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3075 - 3080.
- JIANG Yan, LEI Hua-yang, ZHENG Gang, et al. Fractal study of microstructure variation of structured clays under dynamic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(10): 3075 - 3080.
- [14] 谢和平. 分形——岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [15] 徐永福, 黄寅春. 分形理论在研究非饱和土力学性质中的应用[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(5): 635 - 638.
- XU Yong-fu, HUANG Yin-chun. Fractal-textured soils and their unsaturated mechanical properties[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(5): 635 - 638.
- [16] 谭罗荣, 孔令伟. 特殊岩土工程土质学[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 293 - 297.
- [17] 廉慧珍, 童良, 陈恩义. 建筑材料物相研究基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996: 118 - 125.
- [18] MUÑOZ CASTELBLANCO J A, PEREIRA J M, DELAGE P, et al. The water retention properties of a natural unsaturated loess from northern France[J]. **Geotechnique**, 2012, 62(2): 95 - 106.
- [19] FRIESEN W I, MIKULA R J. Fractal dimensions of coal particles[J]. **Journal of Colloid and Interface Science**, 1987, 120(1): 263 - 271.
- [20] ZHANG B Q, LI S F. Determination of surface fractal dimension for porous media by mercury porosimetry[J]. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 1995, 34(4): 1383 - 1386.
- [21] 刘永忠, 陈三强, 孙皓. 冻干物料孔隙特性表征的分形模型与分形维数[J]. 农业工程学报, 2004, 20(6): 41 - 45.
- LIU Yong-zhong, CHEN San-qiang, SUN Hao. Characterizing pores in freeze-dried materials by fractal models and fractal dimensions[J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, 2004, 20(6): 41 - 45.
-
- 上接第 2478 页**
- [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护坡防护机制[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] DITI HENGCHAOVANICH. 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: [s.n.], 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.
- [13] 孔令伟, 李雄威, 郭爱国, 等. 脱湿速率影响下的膨胀土工程性状与持水特征初探[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 335 - 340.
- KONG Ling-wei, LI Xiong-wei, GUO Ai-guo, et al. Preliminary study on engineering behaviors and water retention characteristics of expansive soil under influence of drying rate[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(3): 335 - 340.