

DOI: 10.11779/CJGE20221115

# 裂隙对土体水分蒸发过程的影响

牟文<sup>1</sup>, 唐朝生<sup>1,2</sup>, 程青<sup>1</sup>, 田本刚<sup>1</sup>, 刘伟杰<sup>1</sup>, 胡慧聪<sup>1</sup>, 施斌<sup>1</sup>

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023; 2. 自然资源部地裂缝地质灾害重点实验室, 江苏南京 210049)

**摘要:** 工程中的土体在干旱气候作用下易发育干缩裂隙, 裂隙的存在对土体的工程性质有重要的影响。为了研究裂隙对土中水分蒸发过程的影响, 在模拟干旱条件下对含裂隙土体开展了一系列室内蒸发试验。采用预制裂隙的方法, 制备了一系列包含不同裂隙条数(0~3)和裂隙宽度(5, 10, 15 mm)的试样, 基于获得的含水率、蒸发速率随干燥时间变化结果, 重点分析了裂隙条数、宽度和分布特征对蒸发过程的影响机制。结果表明: ①裂隙对土体水分蒸发过程有重要影响; ②试样的蒸发速率和减速率阶段对应的临界含水率随裂隙条数的增加呈增加趋势, 在5 mm裂隙宽度条件下, 每增加一条裂隙, 试样的蒸发速率增加约14%, 对应裂隙面的蒸发通量约为试样表面的15%~18%; ③试样的蒸发速率和裂隙面的蒸发贡献随裂隙宽度的增加亦呈增加趋势, 裂隙宽度每增加1 mm, 试样的蒸发速率增加约2%, 当裂隙宽度从5 mm增加到15 mm时, 对应裂隙面的蒸发通量从试样表面的18%增加到51%, 但裂隙宽度对试样进入减速率阶段时的对应的临界含水率无影响; ④裂隙分布对蒸发速率的影响主要由裂隙蒸发面和裂隙腔体内的相对湿度梯度和热量传输控制, 并可能存在裂隙宽度阈值效应。

**关键词:** 土体蒸发; 裂隙影响; 裂隙条数; 裂隙宽度; 土体龟裂; 蒸发速率

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)12-2641-08

作者简介: 牟文(1997—), 甘肃定西人, 博士研究生, 主要从事环境岩土和工程地质方面的研究。E-mail: MG21290065@sina.cn.edu.cn。

## Effects of cracks on evaporation process of water in soils

MU Wen<sup>1</sup>, TANG Chaosheng<sup>1,2</sup>, CHENG Qing<sup>1</sup>, TIAN Bengang<sup>1</sup>, LIU Weijie<sup>1</sup>, HU Huicong<sup>1</sup>, SHI Bin<sup>1</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Key Laboratory of Earth Fissures Geological Disaster, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210049, China)

**Abstract:** Under the action of arid climate, the soils in the engineering are prone to develop shrinkage cracks, and the existence of cracks has an important influence on the engineering properties of the soils. In order to study the effects of cracks on the evaporation process of water in the soils, a series of laboratory evaporation experiments are carried out on the soils with cracks under simulated drought conditions. A series of samples with different crack numbers (0~3) and crack widths (5, 10 and 15 mm) are prepared by using the method of prefabricated cracks. Based on the results of water content and evaporation rate with drying time, the influence mechanism of crack numbers, widths and distribution characteristics on the evaporation process is analyzed. The results show that: (1) The cracks have a significant effect on the evaporation process of water in the soils; (2) The evaporation rate and the critical water content corresponding to the falling rate stage of the samples increase with the increase of the number of cracks. Under the crack width of 5 mm, the evaporation rate of the sample increases by about 14% for each additional crack, and the evaporation flux of the corresponding crack surface is about 15%~18% of the sample surface. (3) The evaporation rate of the samples and the evaporation contribution of the crack surface also increase with the increase of the crack width. The evaporation rate of the sample increases by about 2% for every increase of the crack width of 1 mm. When the crack width increases from 5 to 15 mm, the evaporation flux of the corresponding crack surface increases from 18% to 51% of the sample surface. However, the crack width has no effects on the critical water content when the samples enter the falling rate stage. (4) The effects of crack distribution on evaporation rate are mainly controlled by the relative humidity gradient and heat transfer in crack evaporation surface and crack cavity, and there may be a threshold effect of crack width.

**Key words:** soil evaporation; crack effect; crack number; crack width; soil cracking; evaporation rate

## 0 引言

联合国政府间气候变化专门委员会最新发布的报

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(42230710, 41902271, 42172290); 江苏省自然科学基金项目(BK2021087)

收稿日期: 2022-09-08

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

告指出<sup>[1]</sup>，受全球气候变化影响，各种极端气候事件发生的频率、强度、持续时间及影响范围都呈加剧趋势。极端气候会对岩土体施加一系列作用，显著改变岩土体的温度场、水分场、应力场及工程性质，并导致灾变，给当前岩土/地质工程带来许多新的挑战<sup>[2-3]</sup>。揭示极端气候-岩土体相互作用过程及物质能量交换规律，阐明极端气候作用下岩土体工程性质响应特征及灾变机制，对提升岩土/地质工程界应对全球气候变化能力和提高中国综合防灾减灾能力具有重要理论和现实意义。

在以往的与气候有关的岩土工程研究中，大部分都集中在强降雨导致土体工程性质劣化及相关灾害问题，而有关干旱气候的研究极为少见。事实上干旱作用会显著改变土体水分场的时空分布特征，从而改变土体的工程性质<sup>[4-7]</sup>。尤其对于黏性土而言，干旱作用会导致显著的收缩变形并发育龟裂，这是种常见的自然现象<sup>[8-9]</sup>。在地质工程领域中，裂隙破坏了土体的完整性，雨水能通过裂隙快速渗入土体内部，导致力学性质劣化，从而诱发滑坡泥石流等工程地质灾害<sup>[10-11]</sup>。在环境岩土工程领域，裂隙的存在会增加屏障层的渗透性，导致对环境有害的物质发生泄漏<sup>[12-14]</sup>。例如，垃圾填埋场中黏土垫层/覆盖层常常因为土体裂隙造成垃圾渗滤液或有害气体的逸出，造成环境污染。在地下核废料地质处置库中，膨润土缓冲回填材料中的裂隙为地下水入渗和放射性核废物的运移提供了快捷通道，极大增加了处置库的失效风险<sup>[15]</sup>。在水利工程领域，干缩裂隙会改变土体的渗流路径，提供优势通道，进而诱发管涌、岸坡坍塌甚至溃坝灾害<sup>[16-17]</sup>。尽管土体龟裂带来的问题较多，但学界和工程界对土体裂隙问题的关注主要局限于渗透方面。事实上裂隙的发育不仅会改变土体的渗透特性，裂隙面作为新的蒸发面也会显著改变干旱气候-土体间的物质能量交换规律，从而影响土体的蒸发速率和水分场的分布规律，见图 1。然而目前学界有关这方面的研究几乎处于空白状态，严重制约了裂隙性土体工程性质研究的发展。

为了探究裂隙对土中水分蒸发过程的影响，在室内模拟干旱环境对预制裂隙土体开展了一系列蒸发试验，实时监测了干燥过程中土体含水率的变化，并计算了土体的蒸发速率，基于获得的土体蒸发特征曲线，重点分析了裂隙条数、裂隙宽度和裂隙分布特征对土体水分蒸发过程的影响及机理，并量化了裂隙对蒸发速率的贡献，相关研究结果对进一步了解干旱气候作用下裂隙性土体工程性质的响应特征有一定指导意义，尤其对该课题数值模拟研究的蒸发参数选取有重要参考价值。

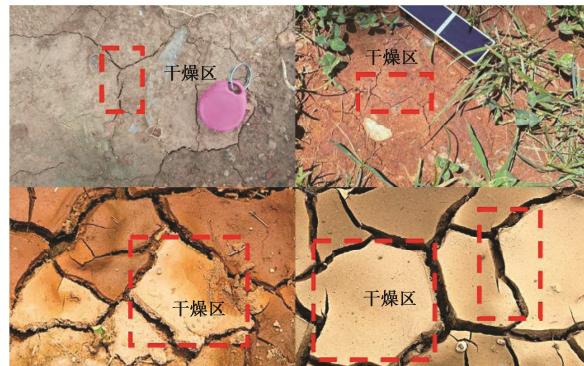


图 1 裂隙对土体水分分布的影响

Fig. 1 Influences of cracks on water distribution in soils

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试验材料

本次试验采用的研究对象是南京地区的下蜀土，颜色为褐黄色，取土位置距离地表约 0.5~1.5 m。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-蒙脱石混层矿物组成。下蜀土的基本物理力学性质：相对质量密度  $G_s=2.73$ ，液限  $w_L=36.5\%$ ，塑限  $w_p=19.5\%$ ，塑性指数  $I_p=17$ ，黏粒含量 ( $d<0.005$  mm) =22%。标准击实试验结果表明下蜀土的最大干密度为  $1.70\text{ g/cm}^3$ ，最优含水率为 16.5%。

### 1.2 试样制备

将取回的土样风干粉碎，过 2 mm 筛，以去除土中大颗粒杂质提高土体的均匀性。过筛后的土样加水配置成初始含水率为 80%的泥浆样并搅拌均匀，密封于容器中静置 48 h，使土颗粒完全分散。待泥浆沉淀稳定后抽掉表面的浮水，得到含水率约为 60%的泥浆样。将泥浆样注入一系列尺寸为长 200 mm×宽 25 mm×高 50 mm 的长方体有机玻璃容器中，并置于振动台上振动 10 min 以去除泥浆样中的气泡，直到泥浆表面平整光滑，控制试样的初始厚度为 30 mm。将容器放置在温度为 25°C、相对湿度为 55%±2% 的控温室内干燥。待试样的含水率降至约 35% 时，此时试样厚约为 25 mm、宽为 23 mm，试样的侧壁刚刚开始与有机玻璃容器脱离。然后将试样密封保存 7 d，使试样中的水分分布均匀，密封结束后拆卸掉有机玻璃容器四周的侧壁，将试样切割成长度分别为 60, 30, 20, 15 mm 的若干土块体备用。

本次试验重在研究裂隙对蒸发的影响，因此试验过程中确保试样的蒸发表面积一致，即每组试样土块的初始总长度一致，均为 60 mm。通过布设不同的土块数量和设计不同的间距，来达到模拟裂隙条数和裂隙间距的目的。采用该方法预制裂隙，具有试验操作简单，便于控制研究变量的优势，也可提高试验的可

重复性和结果的可靠性。具体的试验设计参数见表 1。

为了研究裂隙条数对蒸发的影响, 分别设计了 0, 1, 2, 3 条裂隙情形, 分别对应图 2 中试样 S1, S2, S3, S4。除试样 S1 没有裂隙, 其他试样中每条裂隙宽度均为 5 mm、长度均为 23 mm, 其对应的每个试样中的土块体长度分别为 60, 30, 20, 15 mm。

表 1 试样参数

Table 1 Parameters of samples

试样编号	S1	S2	S3	S4	S5	S6
裂隙条数	0	1	2	3	1	1
裂隙宽度/mm	0	5	5	5	10	15

为了研究裂隙宽度的影响, 分别设计了 5, 10, 15 mm 裂隙宽度情形, 如图 2 中试样 S2, S5, S6 所示。每组试样只含有 1 条裂隙, 裂隙长度均为 23 mm, 试样土块体长度均为 30 mm。为了研究裂隙分布的影响, 设计了裂隙的总宽度一致, 裂隙条数不同的情形。如图 2 中两组试样 S3, S5 和 S4, S6, 每组试样有相同的裂隙总宽度, 分别为 10, 15 mm。但具有不同的裂隙条数, S3, S4 分别有 2 条和 3 条裂隙, S5, S6 均有 1 条裂隙。试验过程中只允许土块表面和土块之间的裂隙面蒸发, 为了防止土块侧面蒸发, 在侧面涂抹薄薄一层凡士林, 然后再覆盖一层塑料薄膜(图 2)。

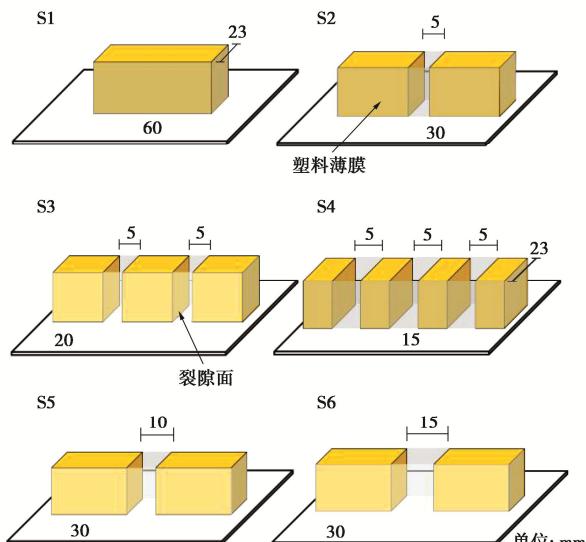


图 2 试样示意图

Fig. 2 Schematic diagram of samples

### 1.3 试验方法

将制备好的上述试样放置在电子天平上(精度  $\pm 0.01$  g), 并置于温度为 25°C, 相对湿度为 11.3% 恒温恒湿环境箱中干燥, 试验装置如图 3 所示。其中环境箱中的相对湿度主要通过饱和氯化锂盐溶液来控制。通过电子天平获得的蒸发过程中试样质量的变化, 可计算各个时刻试样对应的含水率和蒸发速率, 得到蒸发特征曲线(蒸发速率随含水率的变化)。

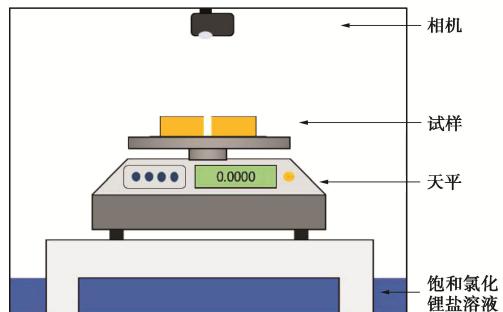


图 3 试验装置示意图

Fig. 3 Sketch of installation

## 2 结果与讨论

通常来说, 土中水分的蒸发需要满足<sup>[18-20]</sup>: ①在蒸发面上有持续的能量供给; ②在大气和蒸发面之间存在一定的蒸汽压梯度; ③土体内部有持续的水分供应到蒸发面。很多学者研究了土体蒸发的影响因素, 主要分为外部因素和内部因素<sup>[21]</sup>。外部因素是指大气环境, 主要包括太阳辐射、风速、蒸汽压梯度、空气相对湿度和温度等<sup>[22-25]</sup>; 内部因素是指土体的物理和化学参数, 主要有土体吸力、渗透系数、粒径、矿物成分、含盐量和土体厚度等<sup>[26-31]</sup>。然而, 关于土体中裂隙对蒸发的影响, 还少见报道, 这是本文的研究重点。

### 2.1 裂隙条数对蒸发的影响

图 4(a), (b) 分别给出了不同裂隙条数试样 S1~S4(表 1)在干燥过程中的平均含水率和蒸发速率变化曲线。从图 4(a) 中可以看出, 不同的试样具有相似的变化趋势。在干燥初期, 含水率随时间线性减小。随着干燥的进行, 含水率的变化逐渐减小, 变化趋势由直线型过渡为曲线型, 并最终趋于稳定。同时可以观察到, 初始直线段的斜率随裂隙条数增加有增加趋势, 说明单位时间内失去水的量与裂隙条数呈正相关。

从各组试样的蒸发速率变化曲线来看(图 4(b)), 在试验开始后, 试样的蒸发速率变化很小, 几乎处于常速率阶段, 这与前人的研究成果基本一致<sup>[20, 32-34]</sup>。主要是因为试样此时处于饱和阶段, 孔隙中有足够的自由水补给蒸发。随着蒸发的持续, 试样孔隙中的自由水减少, 并由饱和变为非饱和, 气体的进入使试样的渗透系数变小, 且土颗粒间的连接逐渐变成弱结合水连接, 水分迁移的阻力变大, 蒸发速率快速减小, 试样进入减速率阶段。随着含水率的进一步降低, 水以强结合水的形式赋存在黏土矿物表面, 土体吸力非常大, 水分子难以克服黏土颗粒的束缚逃逸到大气中<sup>[35-36]</sup>, 试样的蒸发进入残余阶段, 蒸发速率逐渐减小到 0。尽管各组试样总体的变化趋势基本一致, 但受裂隙条数的影响蒸发速率的大小和常速率阶段的持续时间有所不同。随着裂隙条数的增加, 试样在常速率阶段的蒸发速率也随之增大, 持续的时间变短, 如 S1, S2,

S3, S4 在常速率阶段持续的时间为 41 h ( $t_{S1}$ ), 38 h ( $t_{S2}$ ), 32 h ( $t_{S3}$ ), 25 h ( $t_{S4}$ )。该现象也解释了图 4 (a) 中线性段的直线斜率随裂隙条数增加而增加。

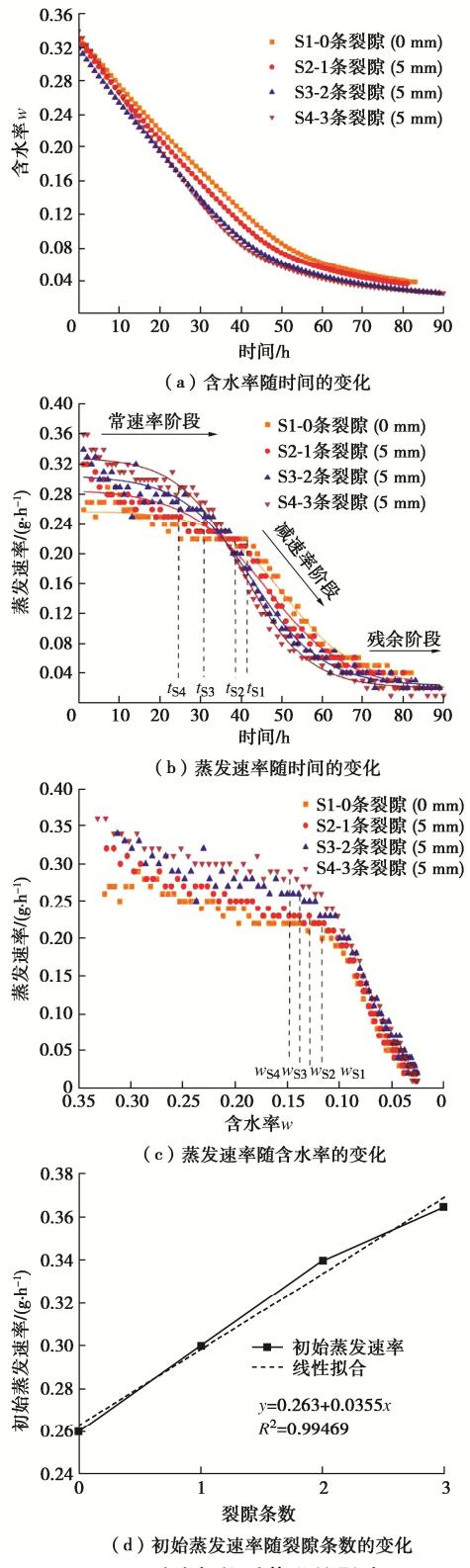


图 4 裂隙条数对蒸发的影响

Fig. 4 Variation of (a) water content versus time; (b) evaporation rate versus time; (c) evaporation rate versus water content with different crack numbers; (d) initial evaporation rate versus crack number

图 4 (c) 给出了各组试样的蒸发特征曲线。图中可以明显观察到各组试样的常速阶段和减速率阶段。由于残余阶段蒸发速率接近于 0, 在该图中难以表征。受裂隙条数的影响, 在相同的平均含水率下, 裂隙条数越多常速率阶段的蒸发速率越大。对于试样 S1 而言, 只存在顶部一个蒸发面, 水分的迁移路径只有一种, 即水分从土体内部向土表面的垂向迁移。当试样中出现裂隙时, 如试样 S2, 裂隙腔体与大气相通, 裂隙面会形成新的蒸发面, 增加了水分的迁移路径。即土中水分的迁移路径由土体内部向土体表面的垂向迁移和由土体内部向裂隙面的水平迁移两种方式组成, 加快了试样的蒸发速率。随着裂隙条数的增加, 形成了更多的蒸发面, 试样被切割成更小的土块, 水分的水平向迁移路径变短, 更有利于水分迁移到裂隙面, 进一步促进了水分的蒸发。

为了量化裂隙条数对蒸发速率的影响, 取每组试样的初始蒸发速率来分析, 此时试样的体积变化较小, 可以认为试样表面积和裂隙面的面积没有发生变化, 方便裂隙面蒸发通量的计算, 也更符合实际情况。试样 S1, S2, S3, S4 开始试验时的蒸发速率分别为 0.26, 0.30, 0.34, 0.36 g/h, 呈现出明显的线性关系 (图 4 (d))。换言之, 每增加一条裂隙, 土样的蒸发速率增加约 14%。为了明确试样表面蒸发和裂隙面蒸发的定量关系, 计算了试样表面的蒸发通量, 和试样 S2, S3, S4 裂隙面的蒸发通量为

$$E_{Sf} = E_{S1} / \rho A_s \quad , \quad (1)$$

$$E_{Cf} = (E_{Si} - E_{S1}) / 2n \rho A_c \quad . \quad (2)$$

式中:  $E_{Sf}$ ,  $E_{Cf}$  分别为试样表面和裂隙面的蒸发通量, (mm/h);  $E_{S1}$ ,  $E_{Si}$  分别为试样 S1 和试样  $Si$  的蒸发速率 (g/h),  $i=2, 3, 4, 5, 6$ ;  $\rho$  为水的密度;  $A_s$ ,  $A_c$  分别为试样表面积和裂隙面面积, 取试样初始时的表面积和裂隙面面积;  $n$  为试样  $Si$  对应的裂隙条数。

通过式(1), (2)得到试样表面的蒸发通量为 0.188 mm/h, 试样 S2, S3, S4 裂隙面的蒸发通量分别为 0.035, 0.034, 0.029 mm/h。由此可得出, 在本文的试验条件下, 裂隙宽度为 5 mm 时, 裂隙面的蒸发通量约为试样表面的 15%~18%。此外, 从图 4 (c) 中可看出随着裂隙条数的增加, 试样进入减速率阶段时的含水率也随之增加, 如 S1, S2, S3, S4 进入减速率阶段时的含水率分别为 11.4% ( $w_{S1}$ ), 12.8% ( $w_{S2}$ ), 13.9% ( $w_{S3}$ ), 14.7% ( $w_{S4}$ )。产生该现象的原因可能是随着裂隙条数的增多, 土样内部土块的蒸发面多, 水分水平向迁移路径短, 导致在土样内部的土块周围快速形成非饱和区域。尽管土样的平均含水率相对较

高, 但是蒸发面附近的渗透系数降低, 阻碍了水分的向外迁移, 试样开始进入减速率阶段。

## 2.2 裂隙宽度对蒸发的影响

图 5 (a) 给出了不同裂隙宽度试样的含水率随时间的变化。可以看出试样 S2, S5, S6 的变化趋势与图 4 (a) 中相似, 呈现先线性减小, 再呈曲线缓慢减小, 最后趋于稳定。同时也看到, 试样 S6 在线性阶段的斜率最大, 其次是试样 S5, 试样 S2 在线性阶段的斜率最小, 说明各试样在单位时间内的失水量随着裂隙宽度的增加呈增加的趋势。

从不同裂隙宽度试样的蒸发速率曲线 (图 5 (b)) 可以看出, 各组试样蒸发速率随时间的变化与图 4 (b) 相似, 均呈现出常速率阶段、减速率阶段和残余阶段。受裂隙宽度的影响, 各组试样在常速率阶段的蒸发速率和持续的时间有所差异。即随着裂隙宽度的增加, 各组试样的蒸发速率也随之增加, 然而各组试样在常速率阶段持续的时间随裂隙宽度的增加而减小, 试样 S2, S5, S6 持续的时间分别为 38 h ( $t_{S2}$ ), 35 h ( $t_{S5}$ ), 31 h ( $t_{S6}$ )。该现象也印证了图 5 (a) 中线性段的斜率与裂隙宽度呈正相关。

图 5 (c) 给出了具有不同裂隙宽度试样的蒸发速率随含水率的变化, 其总体的变化趋势与图 4 (c) 相似。类似的, 在相同的平均含水率下, 裂隙宽度越宽, 常速率阶段的蒸发速率越大。主要是因为裂隙的宽度会影响裂隙腔体内的相对湿度和热量传输。一方面, 对于不同宽度的裂隙, 试样的裂隙面与裂隙腔体之间的蒸汽压梯度有所不同。通常情况下, 裂隙越宽, 空气流通越好, 裂隙腔体内的相对湿度与外部环境相对湿度易容易达到平衡, 使裂隙面与裂隙腔体之间的蒸汽压梯度越接近土体表面与环境大气之间的蒸汽压梯度, 有利于水分的蒸发。另一方面, 裂隙的宽度影响大气中的热量进入裂隙腔体的多少。裂隙越宽, 环境中更多的热量进入裂隙腔体, 加速水分子的热运动, 进而加快土中水分的蒸发。

为了量化裂隙宽度对蒸发速率的影响, 取试样的初始蒸发速率进行分析, 如图 5 (d) 所示。试样裂隙宽度为 5, 10, 15 mm 时的初始蒸发速率分别为 0.30, 0.32, 0.37 g/h。对于试样 S2 而言, 试样 S5 的蒸发速率提升了 6%, 试样 S6 的蒸发速率提升了 23%。对试样 S2, S5, S6 的初始蒸发速率随裂隙宽度线性拟合后, 可以看出裂隙宽度每增加 1 mm, 试样的蒸发速率增加约 2%。采用式 (2) 计算得到 S2, S5, S6 裂隙面的蒸发通量分别为 0.035, 0.052, 0.096 mm/h。由此可以得出, 在本文的试验条件下, 试样裂隙面的蒸发通量从试样表面的 18% 分别增加到 27% 和 51%。

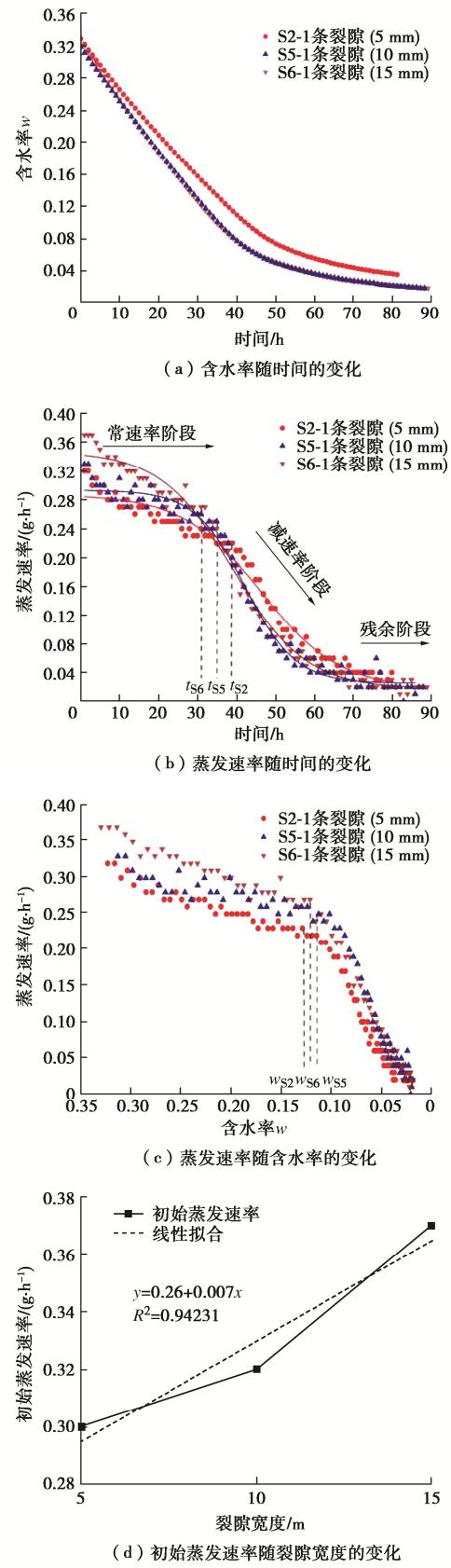


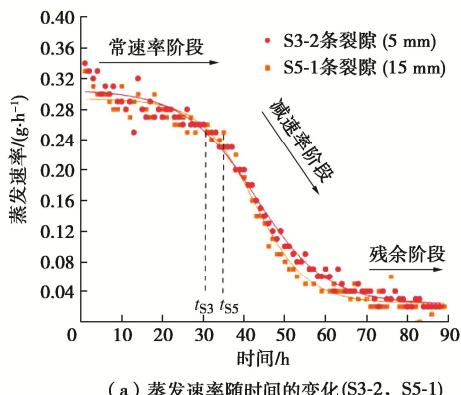
图 5 裂隙宽度对蒸发影响

Fig. 5 Variation of (a) water content versus time; (b) evaporation rate versus time; (c) evaporation rate versus water content with different crack widths; (d) initial evaporation rate versus crack width

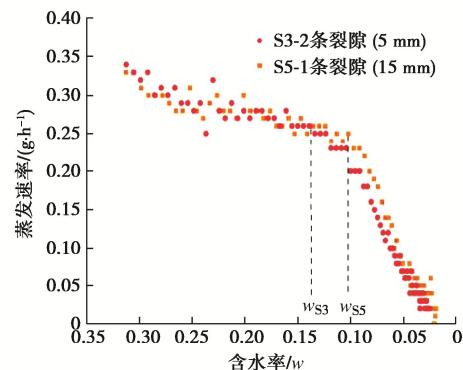
同时,可以看到不同试样进入减速率阶段时的含水率差异不明显,如土样 S2, S5, S6 进入减速阶段的含水率分别为 12.8% ( $w_{S2}$ ), 11.5% ( $w_{S5}$ ), 12.1% ( $w_{S6}$ )。由下蜀土的土水特征曲线 (SWCC) 可知<sup>[37]</sup>, 土样的含水率在 12% 时, 土体吸力约 3 MPa, 这与 Wilson 等<sup>[26]</sup>的研究结果一致, 当土体进入非饱和阶段且总吸力超过约 3 MPa 时, 土体表面的实际蒸发量低于潜在蒸发量。

### 2.3 裂隙分布对蒸发的影响

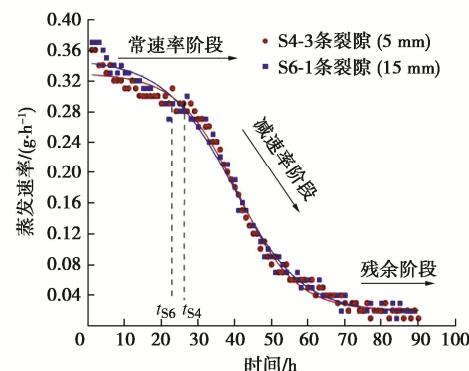
裂隙分布是不同试样的土块和裂隙在水平面上投影形成的面积相同,但是试样的裂隙条数不相同且具有不同的裂隙面。在该试验中,裂隙分布可以等效为裂隙的总宽度相同,裂隙条数不同,如图 2 中试样 S3, S5 和试样 S4, S6 所示,在试样 S3, S5 中裂隙的总宽度为 10 mm,但试样 S3 有 2 条裂隙,每条裂隙宽度为 5 mm,试样 S5 有 1 条裂隙,宽度为 15 mm,类似的,在试样 S4, S6 中裂隙总宽度为 15 mm,但试样 S4 有 3 条宽度为 5 mm 的裂隙,试样 S6 有 1 条裂隙宽度为 15 mm 的裂隙。图 6 (a), (c) 给出了不同裂隙分布试样蒸发速率随时间的变化,总体的变化趋势与图 4 (b), 5 (b) 相似。在常速率阶段 S3 的蒸发速率略大于 S5 的蒸发速率,相应的常速率阶段持续的时间相对较短。然而对于试样 S4, S6 而言, S4 在常速率阶段的蒸发速率小于 S6 的蒸发速率,同样 S4 在常速率阶段持续的时间相对较长。该现象可能是当裂隙总宽度较小时,常速率阶段蒸发速率主要受裂隙条数的控制,换言之,此时裂隙面的数量决定试样蒸发速率的大小;当裂隙总宽度超过一定的值时,蒸发速率主要受裂隙腔体中的相对湿度和热量传输控制;但当裂隙宽度足够大时,裂隙腔体内的蒸发环境可能与试样表面相似,此时裂隙分布对蒸发速率的影响将不再明显,单位时间内的水分蒸发量直接取决于实际蒸发面积的大小。需要指出的是,裂隙的分布特征对蒸发影响非常复杂,本文只是初步研究,今后有必要围绕该课题开展更细致更系统的研究工作。



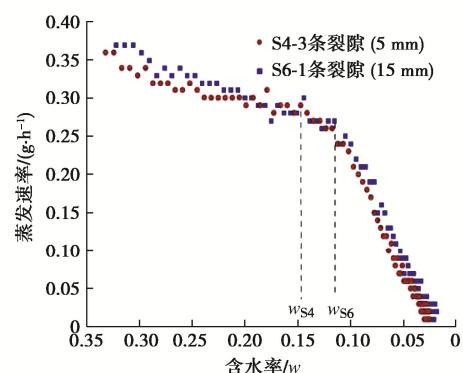
(a) 蒸发速率随时间的变化 (S3-2, S5-1)



(b) 蒸发速率随含水率的变化 (S3-2, S5-1)



(c) 蒸发速率随时间的变化 (S4-3, S6-1)



(d) 蒸发速率随含水率的变化 (S4-3, S6-1)

图 6 裂隙分布对蒸发影响

Fig. 6 Evaporation rate versus time and water content with different crack distributions

图 6 (b), (d) 给出了不同裂隙分布试样蒸发速率随含水率的变化。可看出 S3, S4 均在含水率高于 S5, S6 时, 试样进入减速率阶段。如前所述, 裂隙条数的增多, 土样内部土块的蒸发面多, 水分水平向迁移路径短, 导致在试样内部的土块周围快速形成非饱和区域, 阻碍了水分的向外迁移, 试样在含水率较高时进入减速率阶段。因此相同的裂隙总宽度, 裂隙条数越多试样进入减速率阶段时对应的含水率较高。

## 3 结 论

- (1) 裂隙对土体水分的蒸发过程有重要的影响。
- (2) 裂隙条数的增加会显著提升试样的蒸发速率, 蒸发速率与裂隙条数呈线性正相关关系。在该试

验中, 裂隙宽度为 5 mm 时, 每增加一条裂隙, 土样的蒸发速率增加约 14%。每个裂隙面的蒸发通量约为土样表面的 15%~18%。试样进入减速率阶段对应的含水率随裂隙条数增加而升高。

(3) 裂隙宽度越宽, 试样的蒸发速率越大。在该试验中, 裂隙宽度每增加 1 mm, 试样的蒸发速率增加约 2%, 当裂隙宽度从 5 mm 增加到 15 mm 时, 对应裂隙面的蒸发通量从试样表面的 18% 增加到 51%。裂隙宽度对试样进入减速率阶段时对应的含水率与裂隙宽度无关。

(4) 裂隙分布对蒸发速率的影响主要由裂隙蒸发面和裂隙腔体内的相对湿度和热量传输控制。本次试验发现, 当裂隙总宽度小于某阈值时, 蒸发速率主要受裂隙条数的影响; 当裂隙总宽度超过该阈值时, 蒸发速率主要受裂隙腔体中的相对湿度和热量传输影响。

本文探究了裂隙对土体蒸发过程的影响机制, 提出了裂隙面蒸发与土样表面蒸发的定量表征方法, 并明确了特定条件下裂隙对蒸发的贡献大小, 相关研究结果对进一步了解干旱气候作用下裂隙性土体工程性质的响应特征有一定意义, 尤其可为大气-裂隙性土体相互作用数值模拟研究的参数选取提供重要依据。然而, 需要指出的是, 考虑到研究对象因素, 本文的研究结果适用于低塑性黏土。事实上, 裂隙对土体水分蒸发过程的影响非常复杂, 受许多因素的影响, 本文只是该课题的前期探索性工作, 今后会继续围绕该课题开展系统而深入的研究。

## 参考文献:

- [1] MASSON-DELMOTTE V, ZHAI P, PIRANI A, et al. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[J]. *Clim Change*, 2021, **3**: 31.
- [2] 中国气象局. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告发布[J]. 中国应急管理, 2015(3): 63. (China Meteorological Administration. China national assessment report on risk management and adaptation of climate extremes and disasters[J]. *China Emergency Management News*, 2015(3): 63. (in Chinese))
- [3] 唐朝生. 极端气候工程地质: 干旱灾害及对策研究进展[J]. 科学通报, 2020, **65**(27): 3009-3027, 3008. (TANG Shengtang. Extrem climate engineering geology: soil engineering properties response to drought climate and measures for disaster mitigation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, **65**(27): 3009-3027, 3008. (in Chinese))
- [4] CUI Y J, TANG C S, TANG A M, et al. Investigation of soil desiccation cracking using an environmental chamber[J]. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 2014, **24**(1): 9-20.
- [5] 曾浩, 唐朝生, 刘昌黎, 等. 控制厚度条件下土体干缩开裂的界面摩擦效应[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(3): 544-553. (ZENG Hao, TANG Chaosheng, LIU Changli, et al. Effects of boundary friction and layer thickness on desiccation cracking behaviors of soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(3): 544-553. (in Chinese))
- [6] 林朱元, 唐朝生, 曾浩, 等. 土体干缩开裂过程的边界效应试验与离散元模拟[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(2): 372-380. (LIN Zhuyuan, TANG Chaosheng, ZENG Hao, et al. Laboratory characterization and discrete element modeling of desiccation cracking behavior of soils under different boundary conditions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, **42**(2): 372-380. (in Chinese))
- [7] 徐其良, 唐朝生, 刘昌黎, 等. 土体干缩裂隙发育过程及断裂力学机制研究进展[J]. 地球科学与环境学报, 2018, **40**(2): 223-236. (XU Qiliang, TANG Chaosheng, LIU Changli, et al. Review on soil desiccation cracking behavior and the mechanism related to fracture mechanics[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2018, **40**(2): 223-236. (in Chinese))
- [8] 李生林, 施斌, 杜延军. 中国膨胀土工程地质研究[J]. 自然杂志, 1997, **19**(2): 82-86. (LI Shenglin, SHI Bin, DU Yanjun. Study on the engineering geology of expansive soil in China[J]. *Nature Magazine*, 1997, **19**(2): 82-86. (in Chinese))
- [9] 冷挺, 唐朝生, 徐丹, 等. 膨胀土工程地质特性研究进展[J]. 工程地质学报, 2018, **26**(1): 112-128. (LENG Ting, TANG Chaosheng, XU Dan, et al. Advance on the engineering geological characteristics of expansive soil[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, **26**(1): 112-128. (in Chinese))
- [10] WANG L L, TANG C S, SHI B, et al. Nucleation and propagation mechanisms of soil desiccation cracks[J]. *Engineering Geology*, 2018, **238**: 27-35.
- [11] MORRIS P H, GRAHAM J, WILLIAMS D J. Cracking in drying soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1992, **29**(2): 263-277.
- [12] VAN BAARS S. The horizontal failure mechanism of the Wilnis peat dyke[J]. *Géotechnique*, 2005, **55**(4): 319-323.
- [13] EL MAARRY M R, KODIKARA J, WIJESSORIYA S, et al. Desiccation mechanism for formation of giant polygons on Earth and intermediate-sized polygons on Mars: results from a pre-fracture model[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, **323/324**: 19-26.
- [14] AGHAKOUCHAK A, FELDMAN D, HOERLING M, et al.

- Water and climate: recognize anthropogenic drought[J]. *Nature*, 2015, **524**(7566): 409-411.
- [15] EL-MAARRY M R, WATTERS W, MCKEOWN N K, et al. Potential desiccation cracks on Mars: a synthesis from modeling, analogue-field studies, and global observations[J]. *Icarus*, 2014, **241**: 248-268.
- [16] 袁俊平, 殷宗泽. 膨胀土裂隙的量化指标与强度性质研究[J]. *水利学报*, 2004, **35**(6): 108-113. (YUAN Junping, YIN Zongze. Quantitative index of fissure and strength characteristics of fissured expansive soils[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, **35**(6): 108-113. (in Chinese))
- [17] 孔令伟, 陈建斌, 郭爱国, 等. 大气作用下膨胀土边坡的现场响应试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(7): 1065-1073. (KONG Lingwei, CHEN Jianbin, GUO Aiguo, et al. Field response tests on expansive soil slopes under atmosphere[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(7): 1065-1073. (in Chinese))
- [18] 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.
- [19] QIU G Y, BEN-ASHER J. Experimental determination of soil evaporation stages with soil surface temperature[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, **74**(1): 13-22.
- [20] 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 Chaosheng, 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))
- [21] TANG C S, CUI Y J, SHI B, et al. Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting-drying cycles[J]. *Geoderma*, 2011, **166**(1): 111-118.
- [22] ZENG H, TANG C S, ZHU C, et al. Desiccation cracking of soil subjected to different environmental relative humidity conditions[J]. *Engineering Geology*, 2022, **297**: 106536.
- [23] YAMANAKA T, TAKEDA A, SUGITA F. A modified surface-resistance approach for representing bare-soil evaporation: wind tunnel experiments under various atmospheric conditions[J]. *Water Resources Research*, 1997, **33**(9): 2117-2128.
- [24] KAYYAL M. Effect of the moisture evaporative stages on the development of shrinkage cracks in soils[C]// *Proceedings of the Unsaturated Soils F*, Paris, 1996.
- [25] GILLILAND E R. Fundamentals of drying and air conditioning[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1938, **30**(5): 506-514.
- [26] WILSON G W, FREDLUND D G, BARBOUR S L. The effect of soil suction on evaporative fluxes from soil surfaces[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1997, **34**(1): 145-155.
- [27] WILSON G, BARBOUR S, FREDLUND D. The prediction of evaporative fluxes from unsaturated soil surfaces[C]// *First International Conference on Unsaturated*. Paris, 1995.
- [28] TENG J D, YASUFUKU N, ZHANG S, et al. Modelling water content redistribution during evaporation from sandy soil in the presence of water table[J]. *Computers and Geotechnics*, 2016, **75**: 210-224.
- [29] SONG R, CHU G, YE J, et al. Effects of surface soil mixed with sand on water infiltration and evaporation in laboratory[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, **26**(1): 109-14.
- [30] SHIMOJIMAA E, YOSHIOKA R, TAMAGAWA I. Salinization owing to evaporation from bare-soil surfaces and its influences on the evaporation[J]. *Journal of Hydrology*, 1996, **178**(1/2/3/4): 109-136.
- [31] AN N, TANG C S, XU S K, et al. Effects of soil characteristics on moisture evaporation[J]. *Engineering Geology*, 2018, **239**: 126-135.
- [32] 徐士康, 唐朝生, 李昊达, 等. 土体水分蒸发模型研究进展[J]. *高校地质学报*, 2017, **23**(4): 640-649. (XU Shikang, TANG Chaosheng, LI Haoda, et al. Review on soil moisture evaporation model[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2017, **23**(4): 640-649. (in Chinese))
- [33] 宋卫康, 王会杰, 朱翔, 等. 土体水分蒸发速率计算模型研究进展[J]. *路基工程*, 2017(6): 20-25. (SONG Weikang, WANG Huijie, ZHU Xiang, et al. Research advance on the models for calculating soil moisture evaporation rate[J]. *Subgrade Engineering*, 2017(6): 20-25. (in Chinese))
- [34] 林宗泽, 唐朝生, 曾浩, 等. 基于红外热成像技术的土体水分蒸发过程研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, **43**(4): 743-750. (LIN Zongze, TANG Chaosheng, ZENG Hao, et al. Soil evaporation based on infrared thermal imaging technology[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, **43**(4): 743-750. (in Chinese))
- [35] FREDLUND D G, RAHARDJO H. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*[M]. New York: Wiley, 1993.
- [36] SCHERER G W. Theory of drying[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1990, **73**(1): 3-14.
- [37] ZHANG Y P, GU K, LI J W, et al. Effect of biochar on desiccation cracking characteristics of clayey soils[J]. *Geoderma*, 2020, **364**: 114182.