

控制厚度条件下崩岗土体的裂隙演化特征

王娜, 王佳妮, 张晓明, 段晓阳

(华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要: 裂隙发育降低土体承载力、抗剪强度、凝聚力等力学特性, 促使崩壁崩塌。在控制土体厚度(0.8, 1.6, 2.2 cm)条件下, 对崩岗 4 层土体进行室内脱湿试验, 通过相机定时定点拍照, 并结合数字图像处理技术分析崩岗土体的裂隙演化特征。结果表明: (1) 脱湿过程中土体变形均先产生核心收缩, 后产生裂隙, 且 4 层土中过渡层最早产生核心收缩与裂隙发育现象; (2) 4 层土之间, 裂隙发育程度呈现为过渡层 > 红土层 > 表土层 > 砂土层, 过渡层与砂土层的较大差异会破坏土体的稳定性, 加速崩壁崩塌; (3) 随着土体厚度的增加, 裂隙发育现象减弱, 核心收缩现象逐渐增强。对于直径为 12 cm 的崩岗土体, 当厚度为 2.2 cm 时, 无裂隙发育, 仅产生核心收缩现象。研究结果可为研究崩壁崩塌机理、提高崩岗稳定性提供科学依据。

关键词: 崩岗; 厚度; 裂隙; 核心收缩

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)06-0175-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.06.024

Evolution Characteristics of Cracks in Benggang Soil Under Controlled Thickness

WANG Na, WANG Jiani, ZHANG Xiaoming, DUAN Xiaoyang

(School of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070)

Abstract: The development of crack reduces soil bearing capacity, shear strength, cohesion and other mechanical properties, promotes wall collapse. Under the condition of controlling soil thickness (0.8 cm, 1.6 cm and 2.2 cm), the indoor dehumidification test was carried out on the four layers of Benggang soil. The crack evolution characteristics of Benggang soil were analyzed by taking photos at fixed time and fixed points with a camera sand combined with digital image processing technology. The results showed that: (1) During the dehumidification process, the soil deformation first produced radial shrinkage and then the cracks developed, and the transition layer of four layers soil first produced radial shrinkage and cracks. (2) Among the four layers of soil, the degree of crack development followed the order of transition layer > laterite layer > topsoil layer > sandy layer. The large difference between transition layer and sandy layer would destroy the stability of Benggang soil and accelerate wall collapse. (3) With the increasing of soil thickness, crack development gradually weakened, and the core shrinkage phenomenon increased gradually. For the Benggang soil with a diameter of 12 cm, when the thickness was 2.2 cm, there was no crack development and only core shrinkage. The research results could provide scientific bases for studying the collapse mechanism and improving the stability of Benggang soil.

Keywords: Benggang; thickness; crack; radial shrinkage

崩岗作为中国南方地区一种比较严重的地质灾害类型, 对国土安全、粮食安全、生态安全和公共安全都产生了巨大威胁。其中, 裂隙是崩壁崩塌的主要原因, 降雨过程中裂隙成为水分优先选择的入渗通道, 降低土体的凝聚力、承载力、抗剪强度等力学特性, 导致土体稳定性降低^[1-3], 进一步促进崩塌的发生。因此, 崩岗土体的裂隙演化特征也成为科研工作者的主要研究方向。

国内外学者对于裂隙的研究主要从裂隙形态、影响因素、发育机理等方面进行研究。在裂隙形态方

面, Dasog 等^[4]使用薄金属片测量裂隙深度, 结果显示, 不同作物对裂隙形态(长度、宽度、深度)具有显著的影响; 易顺民等^[5]研究表明, 即使野外观察到的裂隙分布杂乱、毫无规律, 但经过统计发现其具有很好的分形特性; 卢再华等^[6-7]对土体内部结构进行观察测量发现, 土体内部结构破碎、不完整, 存在大量裂隙及软弱面结构面, 并随着干湿循环的进行, 裂隙逐渐延伸、加长并相互连通形成网状裂隙。在影响因素方面, 对土体结构^[8-11](矿物含量、压实度、含水率、黏粒

收稿日期: 2021-06-24

资助项目: 国家自然科学基金项目(41771307, 41201271); 长江科学院开放研究基金项目(CKWV2017522/KY); 2020 年湖北省大学生创新创业训练项目(S202010504045)

第一作者: 王娜(1997—), 女, 云南大理人, 本科生, 主要从事崩岗土体稳定性研究。E-mail: 1944842800@qq.com

通信作者: 张晓明(1980—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 副教授, 主要从事崩岗及土壤侵蚀研究。E-mail: zxm_huanong@mail.hzau.edu.cn

含量、塑性指数)、外界环境^[12-16](温度、湿度、干湿循环次数、边界约束、界面粗糙度)、土体尺寸^[17-20](表面积、厚度)等进行试验研究,获得大量的研究成果。在发育机理方面,唐朝生等^[21]认为,控制裂隙产生的 2 个关键力学因素是基质吸力与抗拉强度。在以上的研究中,研究对象多集中于膨胀土,但由于崩岗土的主要黏土矿物为高岭石,具备亲水性,造成崩岗土同样具备显著的裂隙发育现象。同时由于崩岗土体的特殊分层性,各层次的裂隙演化规律存在差异性,因此对崩岗土体各层次的裂隙发育规律进行研究具有重要意义。

含水率梯度是裂隙发育的关键因素^[2],土体在蒸发失水过程中,垂直剖面上的含水率梯度受到厚度的影响,因此有必要研究厚度对土体裂隙发育的影响。本文以湖北省通城县的典型崩岗为研究对象,将表土层、红土层、过渡层和砂土层 4 个土层^[22-23]设定 3 种厚度,共设置 12 组试验,将饱和的土样在恒定室温低速风扇脱湿

的条件下进行室内干燥试验,运用数字图像处理技术,对土体裂隙发育过程中的各种形态的参数进行定量分析,研究不同厚度条件下土体的裂隙演化特征。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本次试验材料取自湖北省通城县的典型崩岗,崩岗崩壁高约为 3.4 m,崩岗发育完整。该采样点位于东经 113°46′26″,北纬 29°12′39″,海拔 142 m,植被覆盖度约为 35%,主要植被有铁芒萁、马尾松等。分别在崩壁的表土层、红土层、过渡层和砂土层用环刀进行取样,然后迅速放入铝盒中做好标记,并在外面包裹保鲜膜防止水分蒸发散失,同时挖取不同土层具有代表性的土样 1 kg 左右放入密封袋中带回实验室供试验使用。用环刀取回的土样分别用来测定不同土层的干密度、毛管孔隙度、有机质含量等基本性质,测量结果见表 1。

表 1 4 个土层的基本性质

土层	干密度/ (g·cm ⁻³)	毛管 孔隙度/%	有机质/ (g·kg ⁻¹)	pH	液限/%	塑限/%	塑性 指数	颗粒含量/%		
								黏粒含量 (<0.002 mm)	粉粒含量 (0.05~0.002 mm)	砂粒含量 (2~0.05 mm)
表土层	1.37	36.96	21.05	4.66	45.89	29.28	16.61	36.64	26.14	36.98
红土层	1.35	36.14	12.56	4.77	47.72	29.60	18.12	39.40	27.76	32.99
过渡层	1.40	39.80	10.55	5.39	50.13	31.46	18.67	42.98	26.10	30.20
砂土层	1.41	42.30	8.86	5.77	39.99	34.40	5.59	16.12	30.39	53.61

1.2 试样制备

将取回的表土层、红土层、过渡层和砂土层的土样分开平铺在报纸上,先把可见的枯枝、石头等杂质挑拣出来,放在通风处进行自然阴干、碾碎后过 2 mm 的细筛,将过完筛的细土均匀加水搅拌形成过饱和的泥浆状态倒入密封容器中,静置 24 h。考虑到界面粗糙度对裂隙发育有影响,提前在培养皿内壁涂抹了一层凡士林以减小土体与培养皿之间的摩擦力^[24],然后把各土层的泥浆按 0.8,1.6,2.2 cm 的初始厚度分别填入内直径为 12 cm 的培养皿中,在填充后进行轻轻晃动以排除土体内的气泡,使土样尽量形成一个相对均质的状态,从而减少试验过程带来的误差。共配置 12 个试样(4 个土层×3 个厚度)。在密封容器的剩余泥浆中随机取得 3 个泥浆试样,采用烘干法测量含水率,取其平均值为脱湿泥浆试样的初始含水率,测得 4 个土层的初始含水率分别为 63.45%,66.74%,77.12%,47.70%。

1.3 试验方法

采用定时定点拍照与图像处理相结合的方法来完成试验^[25]。在温度和湿度都相对恒定的室内(温度(24±0.5)℃,相对湿度(65±2)%),用风力大小相同的电风扇对试样进行吹干(模拟自然条件下的风干过程),期间定时对试样进行称重,同时用事先固定好的工业相机装置对土体表面裂隙发育情况定点拍照

记录。直至土样重量变化不超过每小时 1 g 且裂隙形态基本稳定不变时,认为脱湿过程结束。

拍照时为避免正常情况下的光线形成阴影,对拍摄的裂隙图像造成干扰,本试验用纸盒遮挡周围光线并在纸盒内侧正上方安装 2 个 LED 灯,让试样在拍照时处于一个光线较为均匀的环境中,再把工业相机固定在正上方,确保拍摄到准确清晰的裂隙图像。

1.4 数据处理

裂隙形态特征参数包括:(1)表面裂隙率,裂隙总面积包括开裂面积与核心收缩面积^[26];(2)裂隙总长度;(3)裂隙平均宽度;(4)裂隙条数,试样表面上临近的 2 个端点、端点与节点又或者是节点与节点之间的骨架线为 1 条裂隙;(5)土块个数,被裂隙分割后的土块总数量。相关参数计算公式为:

$$\text{表面裂隙率}(\%) = \frac{\text{裂隙总面积}}{\text{试样表面积}} = \frac{\text{开裂面积} + \text{核心收缩面积}}{\text{试样表面积}} \quad (1)$$

$$\text{裂隙平均宽度}(\text{cm}) = \frac{\text{裂隙总面积}}{\text{裂隙总长度}} \quad (2)$$

具体操作内容为:(1)使用 Photoshop 裁剪培养皿外的区域(包含培养皿),得到像素为 452×452 的图像;(2)用 ImageJ 对裁剪后的图像进行灰度化、二值化、去噪、骨架化等处理,提取裂隙表面裂隙率、

裂隙条数、土块个数;(3)使用 ImageJ 中的比例尺设置功能将图像默认的长度:452×452 像素转化为 12 cm×12 cm,提取裂隙总长度、裂隙宽度。使用 Origin 将数据绘制出 4 个土层的在不同厚度条件下的表面裂隙率、裂隙总长度、裂隙平均宽度、裂隙条数、土块个数随含水率变化的曲线图,将一系列裂隙参数指标进行对比分析从中发现规律,并推断脱湿过程中崩岗土体的裂隙演化特征。

2 结果与分析

2.1 水分蒸发过程

随着脱湿的进行,土体含水率和水分蒸发速率不断

变化。脱湿过程中对试样进行定时称重,分析不同时刻的含水率与水分蒸发速率变化规律(图 1)。随着水分蒸发,含水率不断下降并逐渐趋于平稳。其中,以厚度为 0.8 cm 的试样为例,4 个土层趋于稳定的时间分别为 30, 40, 52, 46 h,过渡层达到稳定阶段所需时间最长,这是因为过渡层黏粒含量最大,土壤颗粒之间的间隙较小,水分蒸发速率较小。对于不同厚度的试样,以表土层为例,0.8,1.6,2.2 cm 的试样趋于稳定的时间分别为 30,44, 52 h,含水率下降至稳定状态所需时间随厚度的增加而增加,这是因为随着厚度的增加,垂直剖面上下部土体水分蒸发的路径延长致使脱湿结束所需时间增加。

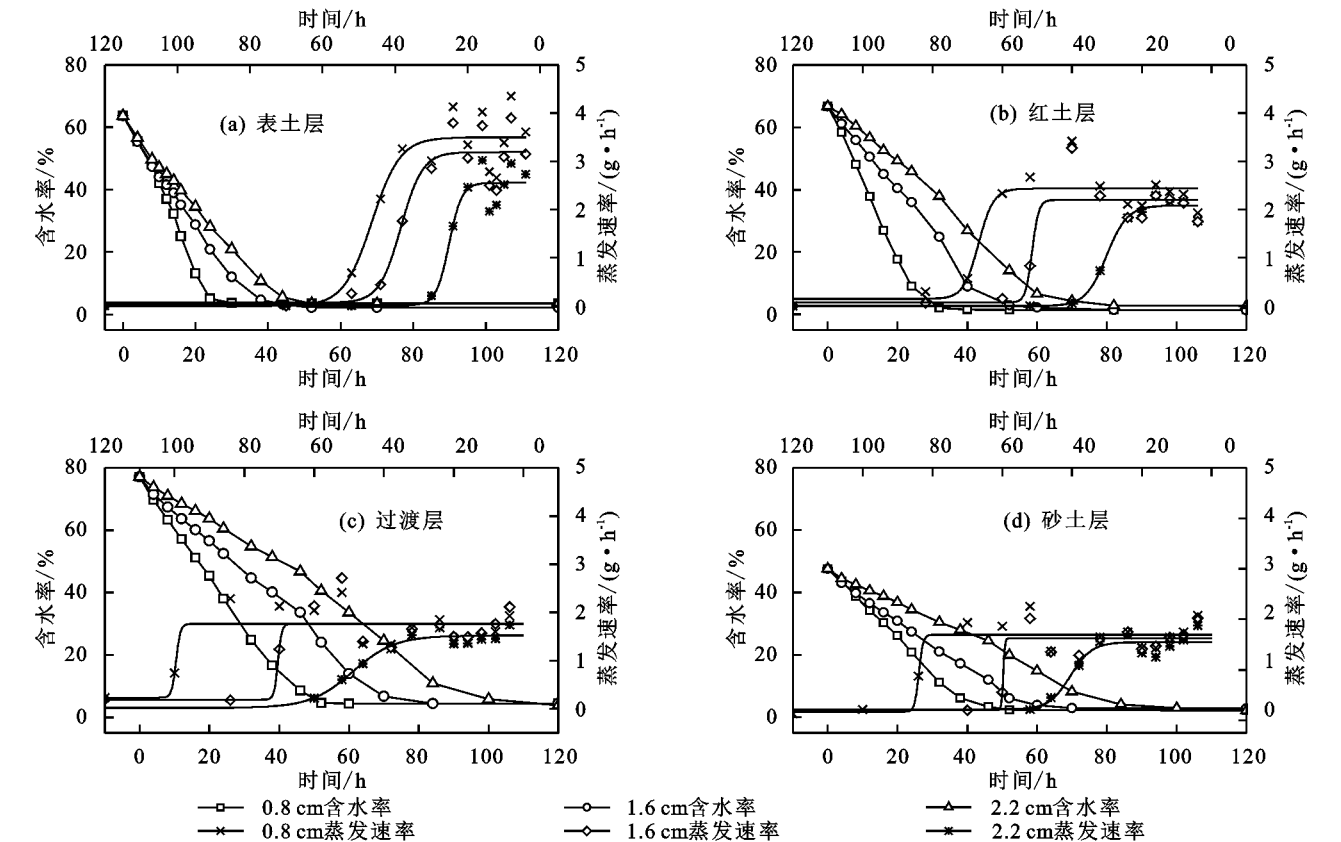


图 1 4 个土层不同厚度土体试样蒸发速率曲线

通过对水分蒸发速率散点图进行拟合可以将水分蒸发过程分为 3 个阶段:常速率蒸发、减速率蒸发和残余蒸发,此规律与唐朝生等^[13]的研究结果一致。试验前期,试样处于过饱和状态,水分蒸发以自由水的蒸发为主,4 个土层蒸发速率呈现为表土层>红土层>过渡层>砂土层,上两层土蒸发速率较大是因为土体干密度较小,土壤颗粒排列较为稀疏,水分蒸发更容易。对于不同厚度的试样,常速率阶段蒸发速率差异不明显,这是因为土体厚度的增加并没有改变土体与空气之间的气压梯度。随着水分的蒸发,自由水含量逐渐减小,孔隙水开始蒸发,土壤颗粒之间开始产生弯液面,产生吸力,吸力作用约束了水分子的蒸发,使水分蒸发进入减速率阶段。从曲线斜率可以看

出,随着厚度的增加,减速率阶段曲线斜率逐渐增大,减速率阶段持续时间逐渐减小,因为厚度越大,蒸发过程中土体上下含水率梯度越大,吸力越大,约束作用越强。当水分蒸发进入残余阶段,蒸发速率维持在 0 附近,脱湿过程结束。

2.2 崩岗土裂隙演化特征

以土体厚度为 1.6 cm 的土层试样为例(图 2),脱湿过程中各土层均先产生核心收缩,后产生裂隙。裂隙发育顺序为:(1)在土体某一部位产生一级裂隙;(2)在一级裂隙某一点产生二级裂隙,同时伴随着一级裂隙的延伸,可以发现二级裂隙大多与一级裂隙发育方向垂直;(3)裂隙延伸完全,形成稳定的裂隙骨架;(4)裂隙的拓宽、加深;(5)脱湿结束,裂隙发育稳

定。4 层土中,过渡层首先在较高含水率 44.07% 产生核心收缩现象,在含水率 40.19% 左右产生裂隙。砂土层最晚于含水率 30.90% 产生核心收缩,于含水率 27.47% 左右产生裂隙;且过渡层与红土层裂隙发育现象明显强于表土层与砂土层。土体中黏粒之间的间隙较小以及黏粒之间的黏结作用较强,阻碍水分

蒸发,促使含水率梯度增大,含水率梯度是拉张应力产生的关键因素^[2]。含水率梯度越大,张拉应力越大,当拉张应力未超过土体的抗拉强度时,土体产生核心收缩现象,当拉张应力超过土体的抗拉强度时,裂隙产生。由于过渡层黏粒含量最大,因此其最早产生核心收缩与裂隙发育现象,且裂隙发育程度严重。

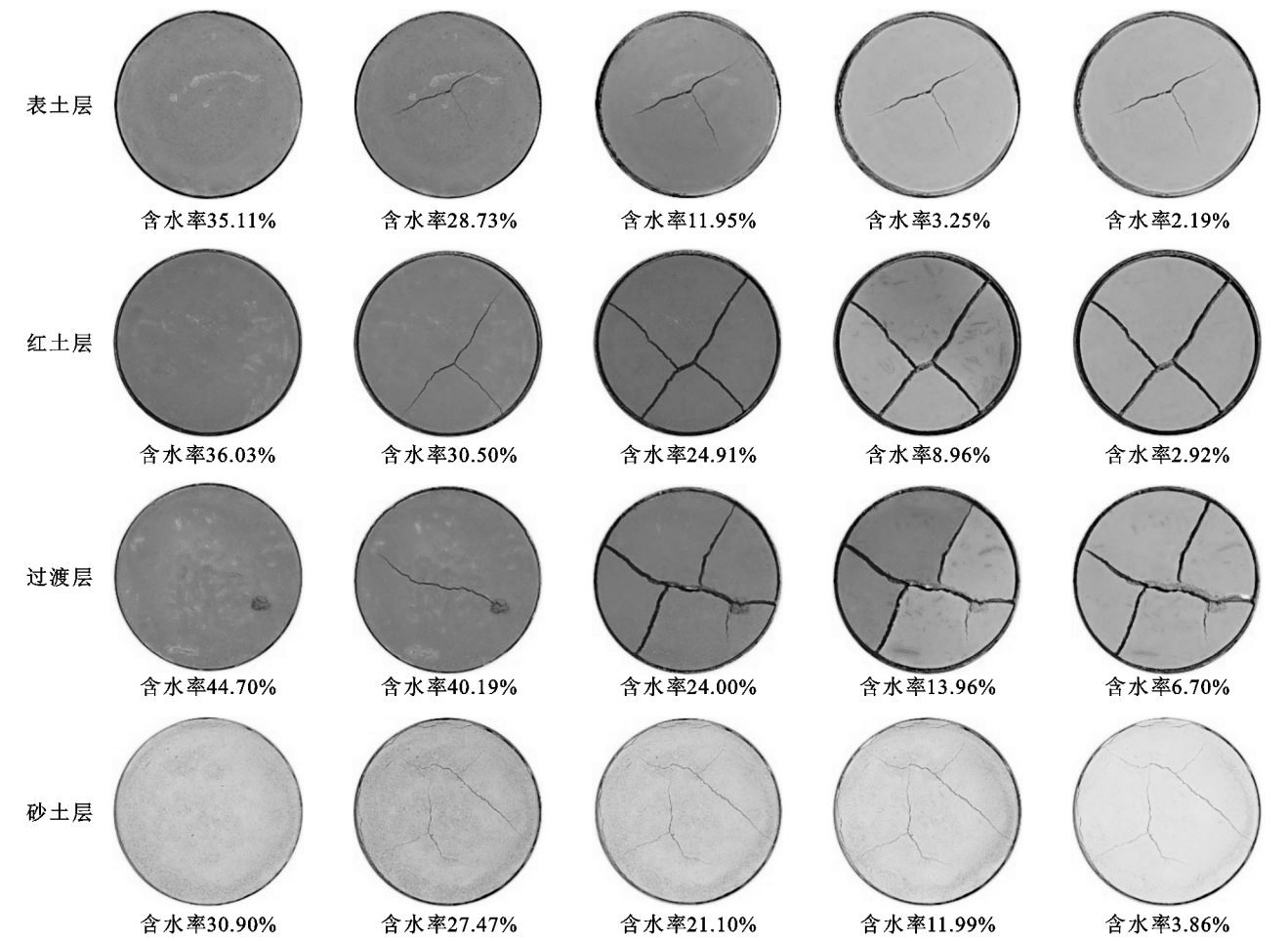


图 2 厚度为 1.6 cm 的 4 个土层土体试样裂隙图像

2.3 控制厚度条件下的裂隙演化特征

图 3 为控制厚度条件下 4 个土层脱湿结束时的干缩开裂图像。厚度为 0.8 cm,裂隙形态较复杂,核心收缩现象不显著,土体破碎程度也较大;厚度为 1.6 cm,裂隙条数明显减少,裂隙宽度增加,核心收缩现象增强,土体破碎程度减小;厚度为 2.2 cm,无裂隙发育,仅产生核心收缩现象。因此,随着厚度的增加,裂隙发育现象逐渐减弱,核心收缩现象逐渐加强。原因在于厚度的增加,不仅增大土体上下含水率梯度,增大拉张应力,同时也增加土体的抗拉强度^[27],由于对抗拉强度的增大效果大于拉张应力,致使脱湿过程中土体产生的拉张应力小于抗拉强度,产生不了裂隙;而拉张应力产生的势能只能通过核心收缩进行释放,致使核心收缩现象越来越明显。

2.4 裂隙参数定量分析

对裂隙参数进行定量分析。图 4 为 4 层土的表

面裂隙率随含水率的变化曲线,可知表面裂隙率随含水率的降低成“S”型增长。以 0.8 cm 的土样为例,脱湿结束时 4 层土的表面裂隙率分别为 12.20%,14.07%,14.36%,5.27%,4 层土的裂隙发育程度呈现过渡层>红土层>表土层>砂土层,与黏粒含量呈现相同的关系,黏粒含量越大,含水率梯度越大,产生的拉张应力越大,所需释放的势能越大,表面裂隙率越大。其中,过渡层与砂土层在崩岗土体中属于相邻土层,两者裂隙发育的较大差异会破坏土体的稳定性,加速崩壁崩塌。随着土体厚度的增加,土体表面裂隙率随之增加,以表土层为例,脱湿结束时 0.8,1.6,2.2 cm 的表面裂隙率分别为 12.20%,14.20%,20.77%,原因在于厚度增大,土体上下含水率梯度增大,表面裂隙率越大。

图 5 为 4 层土的裂隙总长度随含水率的变化曲线。以 0.8 cm 厚度试样为例,脱湿结束时 4 层土的裂隙总长度分别为 82.33,84.38,116.78,68.66 cm,呈

现过渡层>红土层>表土层>砂土层。随土体厚度增加,4 个土层的裂隙总长度大幅度减小,当厚度为 2.2 cm 时,土样为核心收缩,其裂隙总长度趋近于培养皿周长。

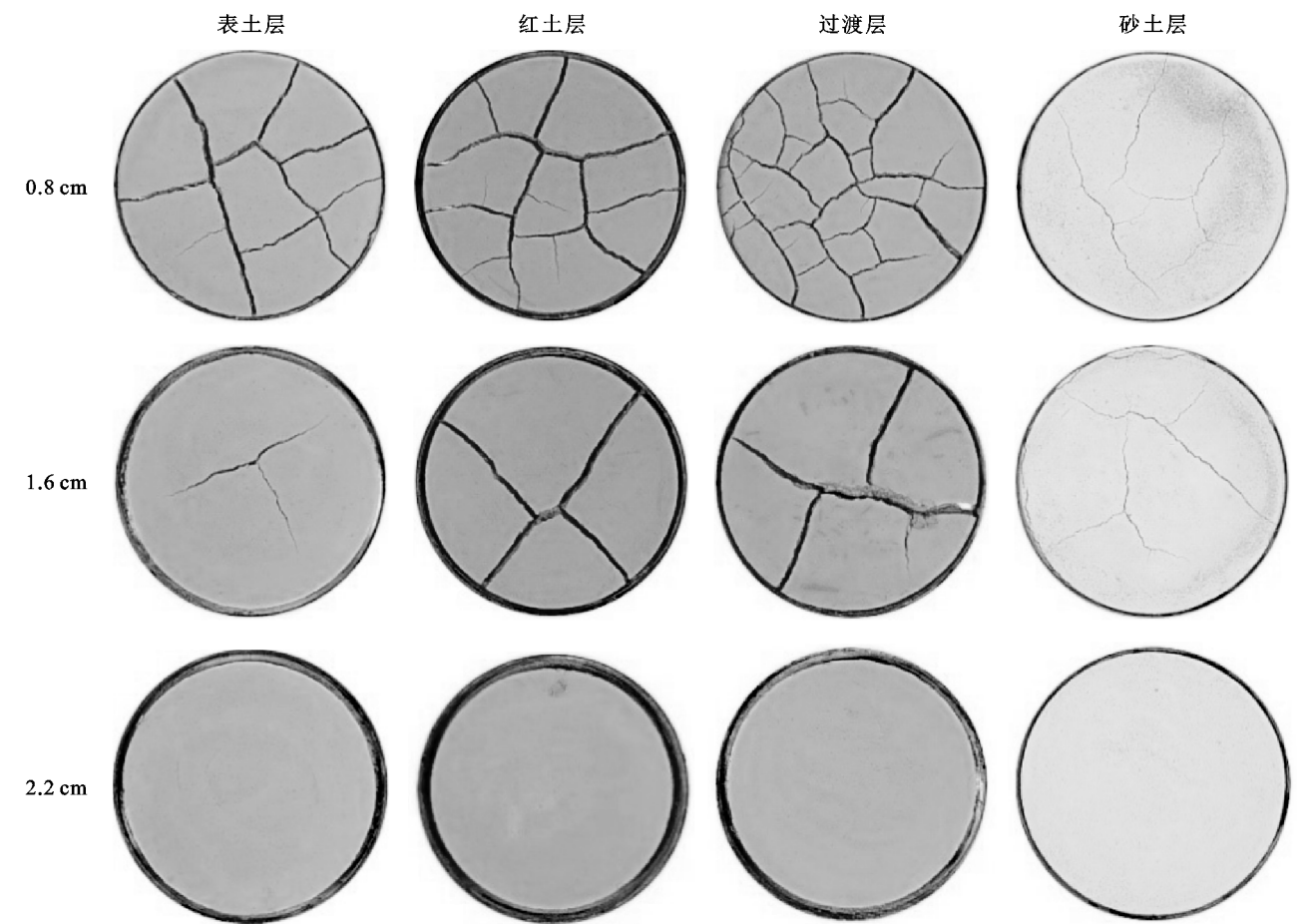


图 3 控制厚度条件下 4 个土层脱湿结束时的干缩开裂图像

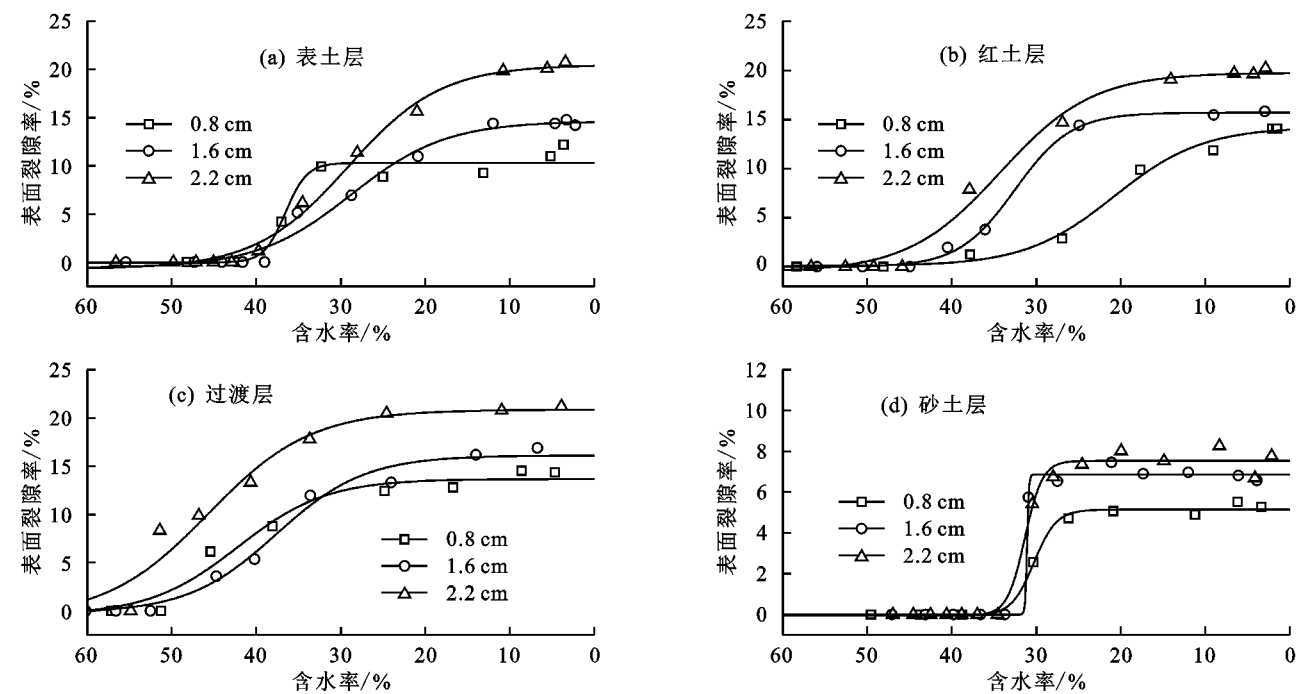


图 4 4 个土层的表面裂隙率变化曲线

图 6 为 4 层土的裂隙平均宽度随含水率的变化曲线。以 1.6 cm 厚度试样为例,脱湿结束时 4 层土的裂隙平均宽度分别为 0.29,0.31,0.32,0.11 cm,呈

现过渡层>红土层>表土层>砂土层。随着厚度的增加,裂隙平均宽度逐渐增大,以表土层为例,脱湿结束时厚度为 0.8,1.6,2.2 cm 的土样裂隙平均宽度分

别为 0.17,0.29,0.66 cm,其中 2.2 cm 厚度的土体试样裂隙平均宽度最大,主要原因是该试样在脱湿过程

中仅产生核心收缩,表面裂隙率不断增大,其裂隙总长度逐渐减小,所以裂隙平均宽度最大。

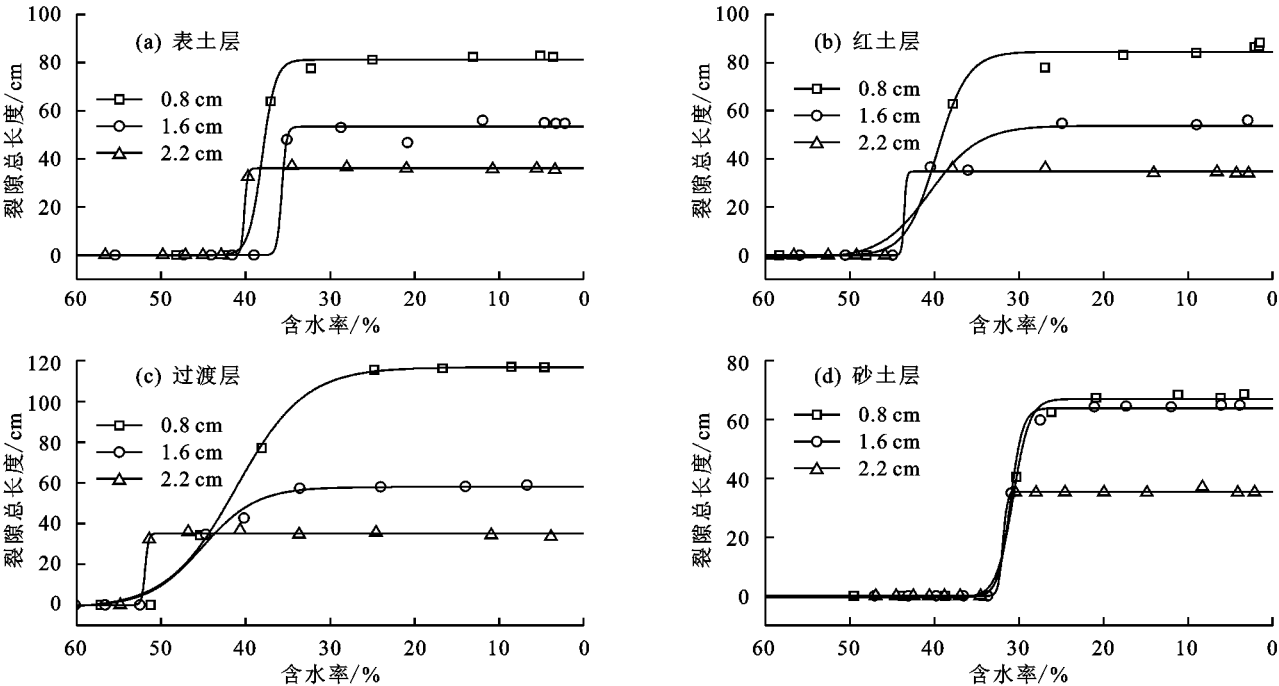


图 5 4 个土层的裂隙总长度变化曲线

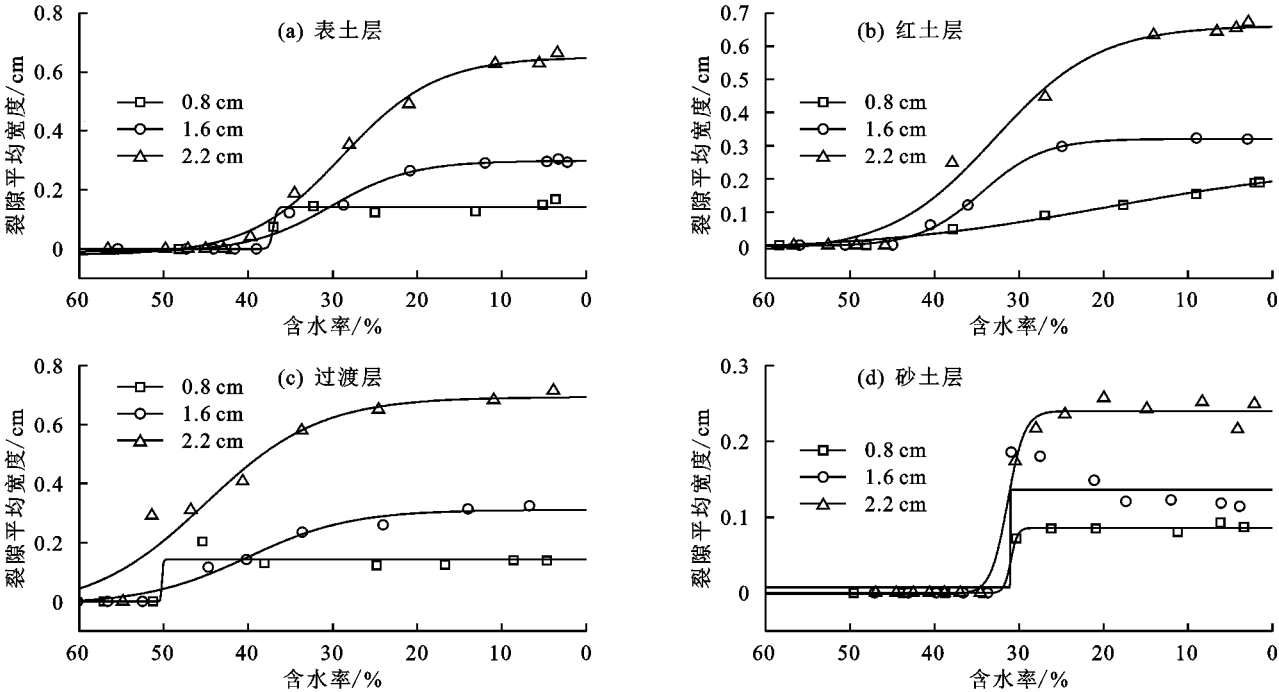


图 6 4 个土层的裂隙平均宽度变化曲线

图 7、图 8 分别为 4 层土的裂隙条数、被分割的土块个数随含水率的变化曲线图。随着含水率的降低,裂隙条数逐渐增加,被分割的土块个数逐渐增大。以 0.8 cm 厚度试样为例,脱湿结束时 4 层土的裂隙条数分别为 16,33,72,12,土块个数分别为 8,10,23,1。随着厚度的增加,土样逐渐趋近核心收缩,裂隙条数、土块个数逐渐减少,至土样厚度为 2.2 cm 时,裂隙条数为 1,被分割的土块个数为 1。

综上分析,在崩岗土体的裂隙演化过程中,4 层土之间,表面裂隙率、裂隙总长度、裂隙平均宽度、裂隙条数、土块个数均呈现为过渡层>红土层>表土层>砂土层。土体厚度对 4 个土层的裂隙演化的影响也比较大,土体厚度越大,表面裂隙率、裂隙平均宽度越大,裂隙总长度、裂隙条数、被分割的土块个数越小。这是因为土体越厚,抗拉强度越大,越不易产生裂隙,核心收缩越明显。

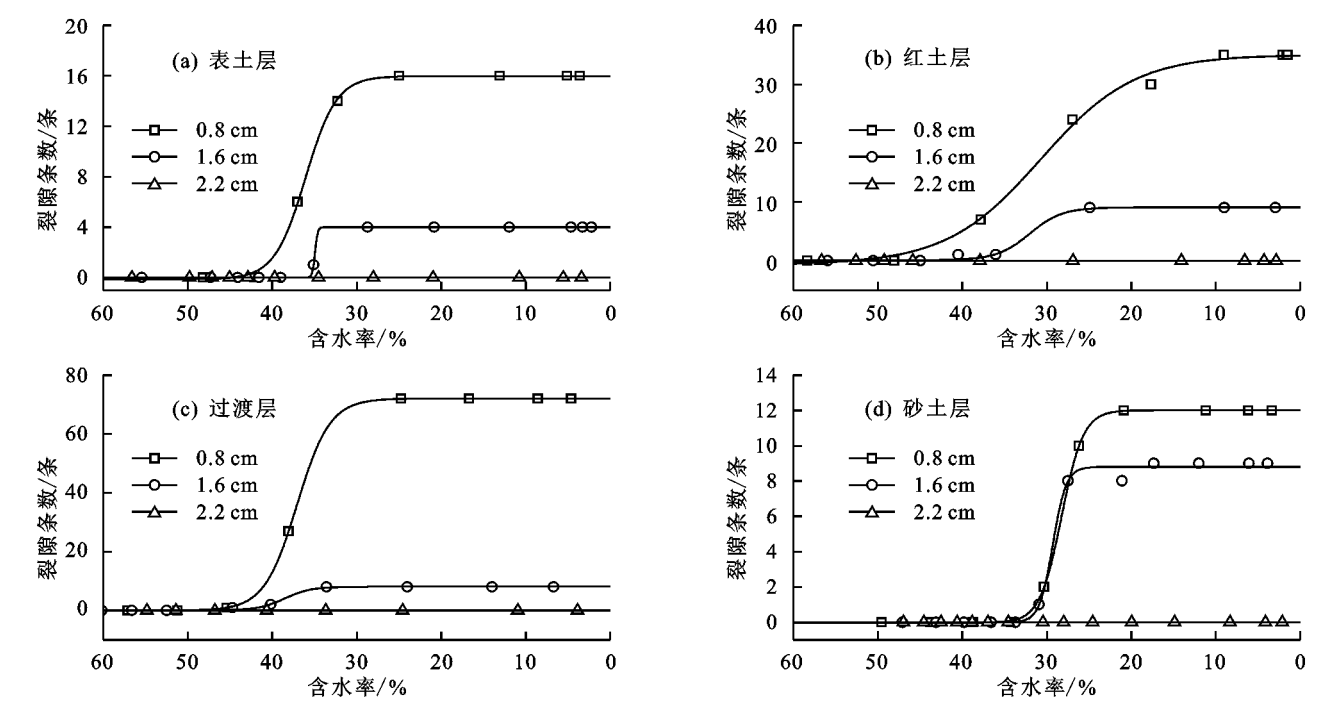


图 7 4 个土层的裂隙条数变化曲线

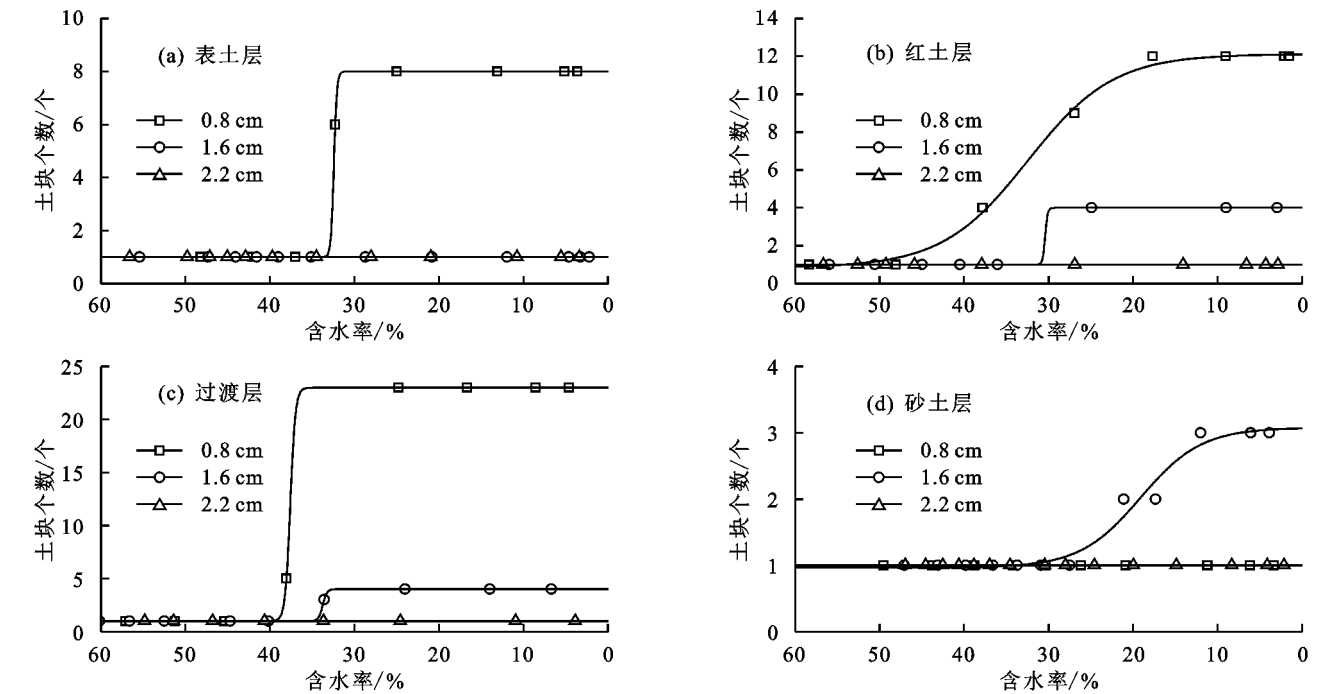


图 8 4 个土层的被分割土块个数变化曲线

3 结论

(1)4 层土中,过渡层脱湿所需时间最长。随着土层厚度的增加,脱湿所需时间逐渐增大。

(2)随着水分地蒸发,土体形变先产生核心收缩,后产生裂隙发育。崩岗 4 个土层的裂隙发育程度呈现过渡层>红土层>表土层>砂土层,与黏粒含量呈现正相关关系。

(3)随着厚度的增加,裂隙发育程度减弱,核心收缩增强,表面裂隙率、裂隙平均宽度逐渐增加,裂隙总长度、裂隙条数、被分割的土块个数大幅度减少。

参考文献:

[1] 包承刚.非饱和土的性状及膨胀土边坡失稳问题[J].岩土工程学报,2004,26(1):1-5.

[2] 张家俊,龚壁卫,胡波,等.干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律试验研究[J].岩土力学,2011,32(9):2729-2734.

[3] 王佳妮,马戎,张晓明.干湿循环下崩岗土体裂隙发育对其渗透性能的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):90-95.

[4] Dasog G S, Shashidara G B. Dimension and volume of cracks in a vertisol under different crop covers[J].Soil Science,1993,156(6):424-428.

[5] 易顺民,黎志恒,张延中.膨胀土裂隙结构的分形特征及其意义[J].岩土工程学报,1999,21(3):294-298.

[6] 卢再华,陈正汉,孙树国.南阳膨胀土变形与强度特性的三轴试验研究[J].岩土力学与工程学报,2002,21(5):717-723.

[7] 卢再华,陈正汉,蒲毅彬.原状膨胀土剪切损伤演化的定量分析[J].岩土力学与工程学报,2004,23(9):1428-1432.

[8] Omid G H, Thomas J C, Brown K M. Effect of desiccation cracking on the hydraulic conductivity of a compacted clay liner[J]. Water, Soil and Soil Pollution, 1996,89:91-103.

[9] Daniel D E, Wu Y K. Compacted clay liners and covers for arid sites[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993,119(2):223-237.

[10] Albrecht B A, Benson C H. Effect of desiccation on compacted natural clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001,127(1):67-75.

[11] 唐朝生,施斌,高玮.聚丙烯纤维和水泥对粘性土强度的影响及机理研究[J].工程地质学报,2007,15(1):108-113.

[12] Rodriguez R, Sanchez M, Ledesma A, et al. Experimental and numerical analysis of desiccation of a mining waste[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007,44:644-658.

[13] 唐朝生,崔玉军,施斌,等.膨胀土收缩开裂过程及其温度效应[J].岩土工程学报,2012,34(12):2181-2187.

[14] 冷挺,唐朝生,施斌.干湿循环条件下重塑膨胀土的裂隙发育特征及量化研究[J].工程地质学报,2016,24(5):856-862.

[15] 袁权,谢锦宇,任柯.边界约束对膨胀土干缩开裂的影响[J].工程地质学报,2016,24(4):604-609.

[16] 刘昌黎,唐朝生,李昊达,等.界面粗糙度对土体龟裂影响的试验研究[J].工程地质学报,2017,25(5):1314-1321.

[17] Nahlawi H, Kodikara J K. Laboratory experiments on desiccation cracking of thin soil layer[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2006,24:1641-1664.

[18] 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.

[19] 骆赵刚,汪时机,杨振北.膨胀土湿干胀缩裂隙演化及其定量分析[J].岩土力学,2020,41(7):1-11.

[20] Lakshmikantham M R, Pratpere C, Ledesma A. Experimental evidence of size effect in soil cracking[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008,49(21):264-284.

[21] 唐朝生,施斌,崔玉军.土体干缩裂隙的形成发育过程及机理[J].岩土工程学报,2018,40(8):1415-1423.

[22] 吴志峰,王继增.华南花岗岩风化壳岩土特性与崩岗侵蚀关系[J].水土保持学报,2000,14(2):31-35.

[23] 夏栋.南方花岗岩区崩岗崩壁稳定性研究[D].武汉:华中农业大学,2015.

[24] 林鑫,唐朝生,程青,等.基于数字图像相关技术的土体干缩开裂过程研究[J].岩土工程学报,2019,41(7):1311-1318.

[25] 毕利东,张斌,潘继花.运用 ImageJ 软件分析土壤结构特征[J].土壤,2009,41(4):654-658.

[26] 叶万军,万强,申艳军,等.干湿循环作用下膨胀土开裂和收缩特性试验研究[J].西安科技大学学报,2016,36(4):541-547.

[27] 冯延云.崩岗土体抗拉力学特性及对崩岗稳定性影响研究[D].武汉:华中农业大学,2020.

(上接第 174 页)

[23] 付优,马英杰.不同土壤水分对枣树幼果期光合特性的影响研究[J].节水灌溉,2019(8):54-58,63.

[24] 马军勇,郑国玉,周建伟,等.不同灌水下限对枣树光合特性、产量及品质的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(1):31-36.

[25] 侯裕生,王振华,李文昊,等.水肥耦合对南疆沙区滴灌红枣光合特性及叶绿素相对含量的影响[J].排灌机械工程学报,2018,36(9):914-919,924.

[26] 徐安阳,张育丽,段维,等.保护性耕作措施对红枣树光合特性及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(4):64-68,81.

[27] 付倩雯,吴正保,史彦江,等.不同施肥方式对枣树生长及光合特性的影响[J].新疆农业科学,2014,51(12):2189-2195.

[28] 付彦博,王成福,黄建,等.水肥交互对红枣产量及生理状况的影响[J].新疆农业科学,2017,54(1):66-75.

[29] 李长城,李宏,张志刚,等.滴灌条件下砂壤土枣林的水分入渗及再分布过程[J].西南农业学报,2016,29(9):2155-2161.

[30] 胡家帅,王振华,郑旭荣,等.滴灌方式对南疆沙区成龄红枣土壤水分的影响[J].灌溉排水学报,2019,38(4):43-47.

[31] 王文娟.河西内陆区特色红枣节水型灌溉制度研究[J].节水灌溉,2020(2):41-45.