

花岗岩崩岗红土层土体胀缩特性研究

林敬兰

(福建省水土保持试验站,福州 350003)

摘要: 为研究崩岗土体因水分变化而发生干湿胀缩的特性,采集福建省安溪县典型崩岗区的红土层土样,通过室内无荷膨胀试验和收缩试验,分析不同初始干密度(1.3,1.4,1.5 g/cm³)、不同初始含水量(15%,20%,25%和30%)下土体的无荷膨胀率和线缩率。结果表明:当含水量较低时,初始干密度越大土体膨胀率也越大;当初始干密度相同时,土壤膨胀率随其初始含水率的增大而减小。当初始含水率相同时,土样膨胀率随其初始干密度的增大而增大。不同处理的土样收缩过程有一定差异,初始含水率高的土样线缩率大,土壤膨胀和收缩过程不一致,且均为不可逆过程。该研究结果在一定程度上揭示了土壤含水率和干密度与崩岗侵蚀之间的关系。

关键词: 崩岗;红土层;胀缩特性;初始含水率;初始干密度

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0087-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.02.014

Study on the Expansion and Contraction Characteristics of Red Soil Layer in Benggang of Granite Area

LIN Jinglan

(Fujian Soil and Water Conservation Experimental Station, Fuzhou 350003)

Abstract: To study the characteristics of Benggang soil expanding and contracting with the moisture changes, soil samples of the red soil layer in the typical Benggang area of Anxi County, Fujian Province were collected. Through the experiment of non-charge expansion and shrinkage, non-charge expansion rates and the linear shrinkage rates of the soil samples under different initial dry densities (1.3, 1.4 and 1.5 g/cm³) and different initial soil water contents (15%, 20%, 25% and 30%) were analyzed. The results showed that the soil expansion rate was larger when the initial dry density increased in the low soil moisture. When the initial dry density was the same, the soil expansion rates decreased with the increases of initial water contents. When the initial soil moisture content was the same, the soil sample expansion rates increased as its initial dry density increased. There was a difference in the shrinkage process of soil samples with different treatments. The soil shrinkage rate with high initial water content was large, and the soil expansion and contraction processes were inconsistent and both processes were irreversible. The result revealed the relationships between soil water contents and dry densities and Benggang erosion.

Keywords: Benggang; red soil layer; expansion and contraction characteristics; initial soil water contents; initial dry densities

崩岗是我国南方红壤区分布最普遍、发育最旺盛,同时也是危害最严重的一种特有侵蚀现象^[1-3]。目前关于崩岗侵蚀机理及其防治措施的研究受到众多学者的关注^[4]。崩岗主要集中在华南风化壳深厚的花岗岩丘陵区,是一种侵蚀强烈的地貌类型,崩岗土体因水分频繁进出而发生强烈的干湿胀缩现象^[5]。因此,研究崩岗土体的胀缩特征有利于探究崩岗侵蚀

发生的过程。

土壤的干湿胀缩变形主要由黏土矿物成分、结构类型和理化特性等决定,同时又受控于土壤干密度、土壤含水率和气候等外部条件的影响。张佩佩等^[6]对不同亚纲变性土的线性膨胀系数、黏粒含量和黏土矿物成分进行研究,结果表明 2:1 型黏粒矿物组成是新疆北部地区土壤变性的内在影响因素,变性土中

的蒙皂石和黏粒含量呈线性相关,黏土矿物组成对表层土壤胀缩具有决定性作用;张同娟等^[7]对黄土地区土壤膨胀性的影响因素进行研究,表明,颗粒组成、碳酸钙含量和有机质不同,土壤的膨胀率也不同,其中土壤有机质和土壤颗粒组成对其影响显著;范本贤等^[8]通过膨胀、收缩试验与图像处理相结合的方法,对云南红土胀缩特性的不同影响因素的研究表明,红土的胀缩特性与其干湿循环时间、次数和初始含水率均有明显的相关性;章李坚等^[9]对成都龙潭寺膨胀土干缩湿胀特性的研究表明,土壤膨胀率随初始含水率的增大而减小,土壤线缩率随初始含水率的增大而增大,膨胀率和收缩率均随着初始含水率到达某一界限后趋向稳定;杨和平等^[10]对荷载条件下膨胀土的干湿循环胀缩情况进行研究,表明,随着干湿循环过程的进行,土壤的变形量逐渐变小,说明胀缩过程并非是互为可逆的过程;李志清等^[11]对膨胀土的胀缩性能规律进行研究,结果表明土壤产生强烈胀缩变形的内在原因是土壤中的黏粒含量、蒙脱石晶体矿物和土壤中显著的微结构特征,而其发生的外在因素是土壤中的微孔隙—裂隙结构以及其本身的初始状态。

国内外关于土壤胀缩性能的研究较多集中在膨胀土和变性土,包括胀缩特征描述、胀缩土体特征、胀

缩机理研究方法等^[12-15],而有关南方花岗岩崩岗区土壤干湿胀缩状况的研究鲜有报道。因此,本文拟通过采集南方花岗岩典型崩岗区的崩岗红土层土样,利用室内无荷膨胀率试验及收缩试验方法,分析红土层的胀缩特性随初始干密度和初始含水率的变化特征,对阐述土壤含水率和干密度与崩岗侵蚀之间的关系具有重要意义,为深入研究崩岗发生机理及其预防治理工作奠定基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省安溪县龙门镇洋坑村(24°57'N, 118°03'E),该地区属于亚热带气候区,年平均气温 18℃,年平均降水量 1 800 mm。研究区内崩岗土体发育于晚侏罗世、早白垩世燕山晚期的酸性侵入体之上,属于花岗岩类,岩石结构为中—粗粒,似斑状结构,矿物成分以长石为主,其次为石英和白云母^[16-18]。

1.2 土壤样品采集

在研究区内选择 3 个具有典型性的崩岗红土层,分别为崩岗 A、崩岗 B 和崩岗 C。在每个典型崩岗红土层采集 3 个土壤样品,每个土样 3 kg。并测定土壤的基本理化性质(表 1)。在采集土样的同时用环刀采集收缩试验所需原装土样。

表 1 3 个典型崩岗红土层土壤理化性质

崩岗	容重/ (g·cm ⁻³)	有机质/ %	土壤机械组成/%			
			砾石 (>2 mm)	砂粒 (0.05~2 mm)	粉粒 (0.002~0.05 mm)	黏粒 (<0.002 mm)
A	1.46	0.43	7.61	58.18	28.50	5.70
B	1.41	0.31	0.26	61.16	34.29	4.30
C	1.36	0.45	2.10	50.94	39.32	7.64

1.3 土壤胀缩性试验

1.3.1 土壤膨胀试验 称取过 5 mm 筛以下的风干土壤每份约 2 kg,将计算好的水量均匀加入每份风干土中,使得所需的土样含水率分别在(15±0.5)%,(20±0.5)%,(25±0.5)%和(30±0.5)%,并放置过夜。根据控制土样干密度为 1.30,1.40,1.50 g/cm³,计算每个土样所需的湿土重,用击实法打入环刀中,得到所需的试验土样。而后根据无荷膨胀率试验要求,将制备得到的土样放置于膨胀仪中,装好百分表,在膨胀仪中加满纯水并开始计时,前 10 min 内每隔 0.5 min 记录 1 次百分表中的数值,此后每隔 1 min 记录 1 次,直至百分表中的读数不变为止,此时的土壤达到最大膨胀量^[19]。每组试验设置 3 次平行试验,结果取其平均值。

1.3.2 土壤收缩试验 取崩岗红土层土壤的原状环刀土样,将其从环刀中推出,并放置于多孔板上,并将土样和多孔板一起放置于天平上称重。之后将土样

和多孔板放置于收缩仪上,并将百分表安装好,试验开始初期每隔 1~4 h 测记 1 次百分表读数,测记读数的同时将土壤和装置一起称重并记下。2 天后每隔 6~12 h 测记 1 次,至 2 次百分表读数不变为止。每组试验均设置 3 次平行试验。试验结束之后取下试样,在 105℃条件下烘干,称重^[19]。

1.4 数据计算与分析

根据试验得到的位移数据,利用相关公式分别计算其膨胀率和线缩率等相关指标^[19-20]:

膨胀率:

$$\delta_e = \frac{Z_t - Z_0}{h_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: δ_e 为时间为 t 时的膨胀率(%); Z_t 为 t 时的位移计读数(mm); Z_0 为时间初始的位移计读数(mm); h_0 为试样的初始高度。

线缩率:

$$\delta_d = \frac{Z_t - Z_0}{h_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: δ_d 为试样在某时刻的线缩率(%); Z_t 为某时刻的百分表读数(mm); Z_0 为试样的初始百分表读数(mm); h_0 为试样的初始高度。

统计分析采用 SPSS 18.0 软件,制图采用 Origin 7.5 软件。

2 结果与分析

2.1 初始含水率和初始干密度对土壤膨胀性的影响

无荷载膨胀率是指试样在无荷载有侧限条件下浸水后的膨胀量与初始高度之比,用百分比表示^[21],是衡量土壤膨胀潜势较理想的判定指标之一^[22]。试验结果表明,3个典型崩岗的土壤膨胀性与初始含水率和初始干密度关系均一致,以崩岗A不同初始含水率条件下土壤膨胀曲线为例说明。由图1可知,初始干密度相同,初始含水率不同,土壤膨胀率也不同。在3个不同初始干密度条件下,不同初始含水率的膨胀趋势均一致,具体表现为 $15\% > 20\% > 25\% > 30\%$,25%和30%含水率条件下相比,土壤膨胀变化不明显。由此可见初始含水率越小,土壤无荷膨胀率越大;当土壤含水率高于25%时,土壤状态已接近土壤塑限水平,此时土壤颗粒间的水分接近于饱和,土壤膨胀潜势小,即表现为土壤无荷膨胀率小,因此土壤初始含水率为25%和30%条件下的土壤膨胀性变化不明显。土壤在较低初始含水率水平时,土体为集粒结构,土壤孔隙状况较好,水分较易进入土体,土壤膨胀潜势较大,并且能够产生较大的膨胀力对其所受到的外部压力进行抵制,以此来削弱外部压力对土壤的一致作用,从而使土壤发生膨胀。因此,在其他条件都相当的情况下,初始含水率较低的土壤,其膨胀性较大;当含水率持续增加后,土体有了较充足的水源供给,产生较大的膨胀力,开始抵抗外部压力,从而削弱了外部压力对水分继续进入土体的抑制作用。由图1还可知,土壤膨胀过程一般可分为3个阶段,分别为:第Ⅰ阶段为直线剧烈膨胀阶段,此阶段持续时间一般较短,土样吸水膨胀明显,这一过程是由于土-水体系产生一系列理化作用而形成,随着结合水的楔入,土壤颗粒间距变大,从而使土体产生膨胀;第Ⅱ阶段为外凸弧线减速膨胀阶段,这一阶段较上一阶段土壤膨胀变形量小,但持续时间较长,抑制了土壤表面颗粒结合水膜的进一步增厚,使得土壤膨胀速率减慢;第Ⅲ阶段为直线缓慢膨胀阶段,这个阶段虽然土壤膨胀变形量极小,但其持续时间最长,在这一过程中,随着土壤水分的增加,土体内部的吸力逐渐减小,吸水速度变缓,土壤膨胀变形量也随之变小,直至土体达到完全饱和,水分已无法继续进入土体,土壤最终膨胀量已基本达到稳定状态。对于崩岗这种边坡土体而言,在南方夏季高温高湿条件下,表层土壤

水分蒸发较大,土壤含水率较低,水分一旦进入土体将会迅速膨胀,从而造成边坡失稳,这与野外实际观察到的崩岗在降雨后易发生崩塌的现象相吻合。

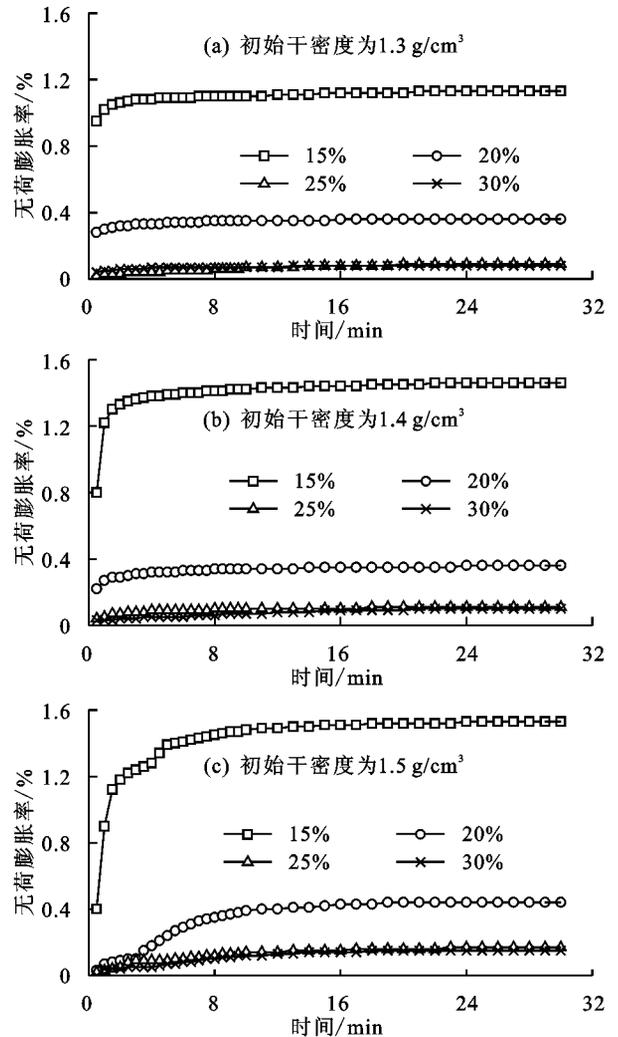


图1 不同初始含水率条件下典型崩岗红土层土壤膨胀曲线
土壤干密度指土壤的孔隙中完全没有水时的密度,即固体颗粒的质量与土的总体积之比,在工程上常把干密度作为评定土体紧密程度的标准,在一定程度上反映了土壤中黏土矿物颗粒含量,特别是具有明显吸水特性的黏粒含量。由图2可知,当初始含水率一定时,崩岗土的无荷膨胀率随着干密度的增加呈上升趋势。这是由于当初始干密度增大时,反而会增大无荷膨胀量或积蓄更多的膨胀潜势能,土壤中相应的可吸水颗粒或聚集体越多,所能吸收的水分增加,从而使得土壤中结合水的水膜总厚度增大,土壤相应的膨胀率也就增大。此外,干密度较大的土壤,其膨胀力也较大,使得外部压力对水分进入土体的抵制作用被削弱,从而使土壤发生膨胀变形。

从图2还可看出,图2a中初始干密度为1.4,1.5 g/cm³ 2个土壤无荷膨胀率差异不大,以干密度为1.5 g/cm³的膨胀率略高,均比干密度为1.3 g/cm³的土壤膨胀率要高;图2b中初始干密度为1.5 g/cm³的土壤膨

胀率最大,干密度为 $1.3, 1.4 \text{ g/cm}^3$ 的膨胀率基本一致;图 2c 和图 2d 中不同初始干密度条件下的土壤无荷膨胀率明显的表现为 $1.5 \text{ g/cm}^3 > 1.4 \text{ g/cm}^3 > 1.3 \text{ g/cm}^3$ 。这可能是由于土壤在较低初始含水率条件下,相较于初始干密度,初始含水率对土壤膨胀率的影响更

大,造成在 $1.4, 1.5 \text{ g/cm}^3$ 初始干密度条件下的土壤膨胀性差异不明显;而随着初始含水率的增加,初始干密度对土壤膨胀性的影响高于初始含水率的影响,因此不同初始干密度条件下的土壤膨胀性表现为 $1.5 \text{ g/cm}^3 > 1.4 \text{ g/cm}^3 > 1.3 \text{ g/cm}^3$ 。

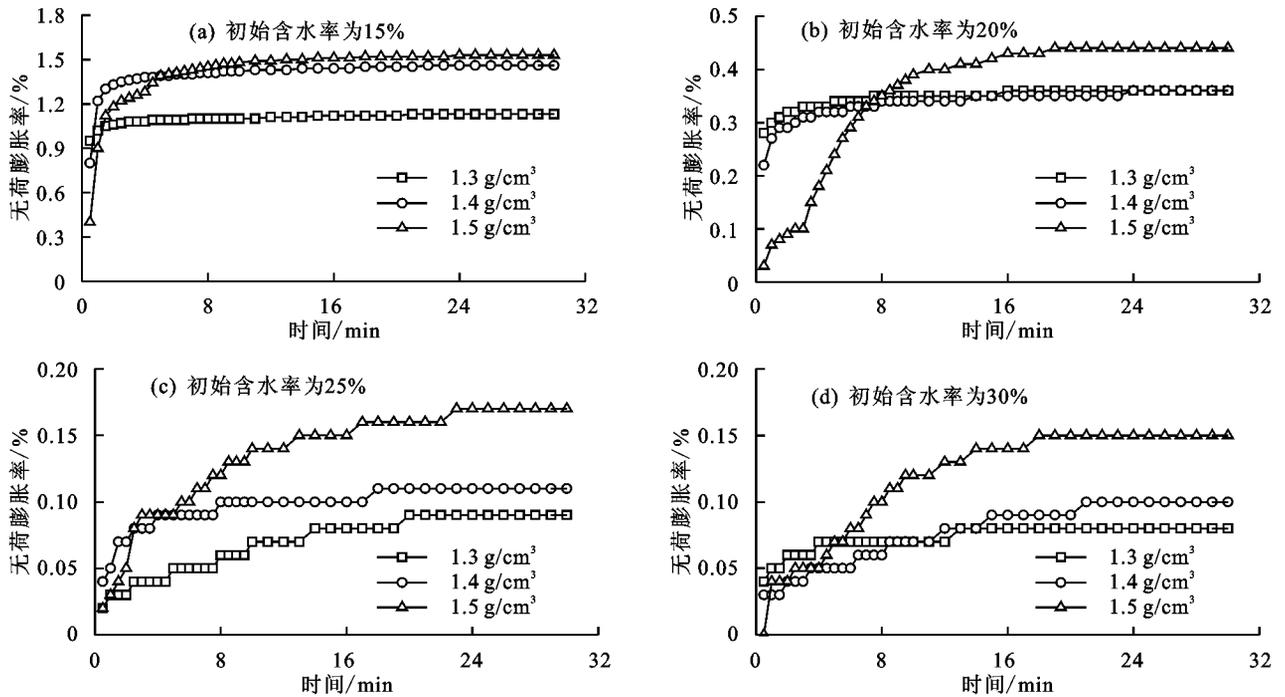


图 2 不同初始干密度条件下土壤膨胀曲线

2.2 时程特征和土壤含水率与土壤收缩性的关系

土壤的收缩性是指土壤在失水过程中体积缩小的性能,可用线缩率、体缩率和缩限等来表征。本研究主要采用线缩率这一指标来表征 3 个典型崩岗红土层的土壤收缩性。线缩率是指土体在垂直方向上收缩变形量与原始高度之比,用百分比表示。由图 3 (图 3a、图 3c、图 3e)可知,与重塑土膨胀试验相同,原状土收缩试验过程也分为 3 个阶段,分别是:第 I 阶段为直线等速收缩阶段,在这一阶段内,土壤线缩率与含水率的减少成正比,主要是因为土壤中的自由水开始蒸发,土壤颗粒间距变小,土体开始收缩变形,体积变小;第 II 阶段为外凸弧线减速收缩阶段,这一阶段土壤随着含水率的减少,收缩速度变慢,线缩率也越来越小,这是由于自由水基本上已被蒸发完,此时土样中剩余的结合水已较难在常温中损失减少,从而使得土体收缩速度变缓;第 III 阶段为直线缓慢收缩阶段,此时虽然土体含水率持续减少,但土体已不再收缩或收缩程度较小,主要是由于随着收缩时间的增加,土壤中水分虽然在持续减少,但其含水率已处于较低水平,土壤颗粒间距较近,颗粒间黏结力也较强,从而使减少的水分已不足以促使土壤体积发生收缩。因此,对崩岗红土层而言,在一场降雨刚停止时,此时的土体含水率较高,随着降雨结束后时间的推移,土

体中的水分慢慢散失减少,土体体积快速收缩;由于土壤出现干湿交替,造成土体出现膨胀收缩交替,使得崩岗崩壁产生裂隙、出现剥落现象,最终导致崩岗发生崩塌。

土壤的收缩是由于土样中的水分减少而导致的,是水分蒸发的结果。结合双电层理论,一般认为土的失水收缩主要是由于其水化特性使得双电层变薄,结合水减少所引起的^[23-25]。从土力学成因上来分析,则是在土壤收缩过程中,土样中的水分不断散失,其中的孔隙内部产生负孔隙压力,迫使土粒不断向孔隙内收缩,当颗粒间距逐渐减小,颗粒间的排斥力逐渐变大以至于大于负孔隙压力时,这时土体将不再收缩,趋向于稳定状态。3 个典型崩岗红土层不同层次土壤线缩率与含水率的关系见图 3。由图 3 可知,3 个典型崩岗红土层土壤在收缩试验过程中,线缩率均随着含水率的减小逐渐增大并最终趋于稳定。由图 3 还可得知,当含水率较高时,线缩率随含水率的减小呈线性增加;随着含水率进一步降低,线缩率增加速率减慢;当含水率低于某一临界值时线缩率基本不变,达到稳定。因此,崩岗红土层土体降雨后土壤含水率较高,在经过自然蒸发或高温暴晒之后,土壤收缩量比无降雨条件下的收缩量大,使得红土层容易产生裂隙,从而加速崩岗侵蚀的发生。

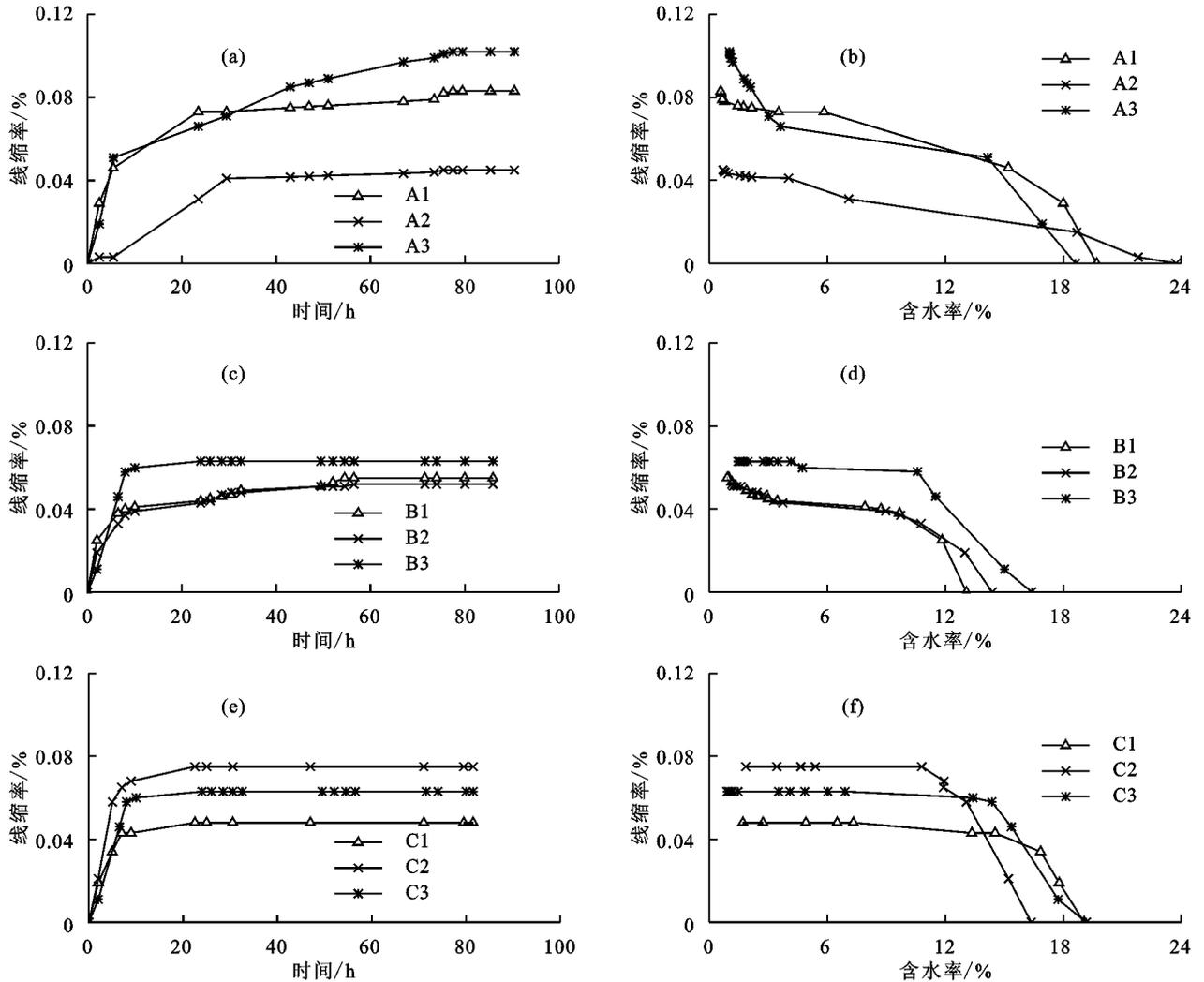


图3 典型崩岗土壤线缩率与时间变化和含水率的关系

2.3 土壤膨胀曲线和收缩曲线的比较

在崩岗土壤膨胀性和收缩性的试验研究中,土壤的膨胀特征曲线以无荷线性膨胀率和膨胀时间之间的关系来表征;收缩特征曲线则以土壤的线性收缩率与收缩时间的关系来体现。根据前文的分析结果可知,土壤膨胀曲线和收缩曲线与膨胀收缩时间的关系在整体上具有一定的相似性,但是两者都是不可逆的过程。典型崩岗红土层土壤膨胀率基本上都在30 min内达到稳定状态,相比较而言,土壤收缩速率则需12~36 h后才能趋于稳定。虽然两者试验时间不同,但仍可说明土壤膨胀过程和收缩过程不一致,两者为不可逆过程。正是由于土壤膨胀和收缩过程的不一致,使得崩岗红土层在夏季湿热条件下经过若干次的强烈干湿循环后,土体发生强烈的膨胀收缩,破坏其原本的结构,造成崩壁裂隙出现,这促使崩岗红土层崩壁发生崩塌^[4,17]。

3 结论

土样的含水率、干密度等初始状态对土壤胀缩性有较大影响,当干密度相同时,土样膨胀率随着其初始含水率的增大而减小;当初始含水率相同时,土样

膨胀率随其初始干密度的增大而增大;在土壤收缩试验中,初始含水率高的土样线缩率大。崩岗土体膨胀和收缩试验过程均为3个阶段,每个阶段的胀缩特征有较大差异;土壤膨胀率和线缩率与时间的关系总体具有一定的相似性,但土壤的剧烈膨胀过程都在较短的时间内完成,而收缩过程所需的时间较长,且两者属于不可逆过程,这是导致崩岗土体因水分变化而产生裂隙的主要原因。因此,今后应该进一步加强对崩岗各土层土壤胀缩特征影响因素的研究,为定量预测崩岗发展过程提供可能。

致谢:本文得到了国家科技支撑计划项目(福建红壤区生态修复和持续经营关键技术集成与示范,2014BAD15B00)的支助,采样和数据分析过程得到庄雅婷、张燕等同志的帮助,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 水利部,中国科学院,中国工程院. 中国水土流失防治与生态安全[M]. 总卷. 北京:科学出版社,2011:924-925.
- [2] 王礼先,孙保平,余新晓,等. 中国水利百科全书:水土保持分册[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004:48-49.
- [3] 梁音,宁堆虎,潘贤章,等. 南方红壤区崩岗侵蚀的特点

- 与治理[J]. 中国水土保持, 2009(1):31-34.
- [4] 张信宝. 崩岗边坡失稳的岩石风化膨胀机理探讨[J]. 中国水土保持, 2005(7):10-11.
- [5] 魏玉杰, 吴新亮, 蔡崇法. 崩岗体剖面土壤收缩特性的空间变异性[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6):153-159.
- [6] 张佩佩, 张文太, 贾宏涛, 等. 新疆北部地区与其他地区变性土壤线性膨胀系数的差异及矿物学机制[J]. 南京农业大学学报, 2017, 40(6):1074-1080.
- [7] 张同娟, 王益权, 刘军, 等. 黄土地区影响土壤膨胀性的因子分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(6):185-189.
- [8] 范本贤, 黄英, 孙书君, 等. 云南红土的循环胀缩特性研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2):120-127.
- [9] 章李坚, 郭永春, 代聪, 等. 含水率对膨胀土胀缩性能影响的试验研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(增刊1):108-112.
- [10] 杨和平, 张锐, 郑健龙. 有荷条件下膨胀土的干湿循环胀缩变形及强度变化规律[J]. 岩土工程学报, 2006, (11):1936-1941.
- [11] 李志清, 余文龙, 付乐, 等. 膨胀土胀缩变形规律与灾害机制研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊2):270-275.
- [12] 吕殿青, 邵明安. 土壤收缩特征曲线的实验研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(3):471-474.
- [13] 吴珺华, 袁俊平, 杨松, 等. 干湿循环下膨胀土胀缩性能试验[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(1):62-65.
- [14] Hillel. Effect of plate impedance, wetting method, and aging on soil moisture retention[J]. Soil Science, 1966, 102(2):135-139.
- [15] 武科, 赵闯, 张文, 等. 干湿循环作用下膨胀土表观胀缩变形特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(12):121-127.
- [16] Lin J S, Huang Y H, Wang M K, et al. Assessing the sources of sediment transported in gully systems using a fingerprinting approach: An example from South-east China[J]. Catena, 2015, 129:9-17.
- [17] 阮伏水. 福建崩岗沟侵蚀机理探讨[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 1996(增刊1):24-31.
- [18] 牛德奎, 郭晓敏, 左长清, 等. 我国南方红壤丘陵区崩岗侵蚀的分布及其环境背景分析[J]. 江西农业大学学报, 2000, 6(2):204-208.
- [19] 国家规范标准. 土工试验方法标准(GB/T 20123—1999)[S]. 北京:中国计划出版社, 1999.
- [20] 东南大学. 土力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2005.
- [21] 李献民, 王永和, 肖宏彬, 等. 击实膨胀土胀缩速度特性的对比研究[J]. 铁道学报, 2003, 25(2):115-120.
- [22] 侯龙清, 黎剑华. 土力学试验[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2012.
- [23] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2010.
- [24] 曾召田. 膨胀土干湿循环效应与微观机制研究[D]. 南宁:广西大学, 2007.
- [25] 唐大雄. 工程岩土学[M]. 北京:地质出版社, 1999.
- (上接第 86 页)
- [14] 侯慧芝, 高世铭, 张绪成, 等. 旱地全膜覆土穴播春小麦的耗水特征及其对产量的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1):202-210.
- [15] 李世清, 李东方, 李凤民, 等. 半干旱农田生态系统地膜覆盖的土壤生态效应[J]. 西北农林科技大学学报, 2003, 31(5):21-29.
- [16] 莫非, 周宏, 王建永, 等. 田间微集雨技术研究及应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8):1-17.
- [17] 樊廷录, 李永平, 李尚中, 等. 旱作地膜玉米密植增产用水效应及土壤水分时空变化[J]. 中国农业科学, 2016, 49(19):3721-3732.
- [18] 孟猛, 倪健, 张治国. 地理生态学的干燥度指数及其应用评述[J]. 植物生态学报, 2004, 28(6):853-861.
- [19] 张海萍, 陈利顶, 王晓燕, 等. 海伦地区水热耦合特征及其对大豆产量的影响[J]. 自然资源学报, 2010, 25(1):131-138.
- [20] 汪勇, 付俊, 徐海军. 浙江省桐庐县将水特征及变化趋势分析[J]. 黑龙江水专学报, 2005, 32(1):26-29.
- [21] 王磊, 李雅文, 樊廷录, 等. 适宜机械收获株行距对黄土旱塬春玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 水土保持研究, 2017, 24(5):363-370.
- [22] 谢军红, 李玲玲, 张仁陟, 等. 覆膜、沟垄作对旱作农田玉米产量和水分利用的叠加效应[J]. 作物学报, 2018, 44(2):268-277.
- [23] 李军, 蒋斌, 胡伟, 等. 黄土高原不同类型旱区旱作粮田深层土壤干燥化特征[J]. 自然资源学报, 2009, 24(12):2124-2134.
- [24] 白翔斌, 岳善超, 李世清, 等. 不同栽培模式旱作春玉米农田土壤水分时空动态和产量效应[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3):164-170.
- [25] 董翠云, 黄明斌, 李玉山. 黄土塬区旱作农田高生产力的水分环境效应与产量波动性[J]. 土壤与环境, 2000, 9(3):204-206.
- [26] 齐华, 梁熠, 赵明, 等. 栽培方式对玉米群体结构的调控效应[J]. 华北农学报, 2010, 25(3):134-139.