

华南活动型崩岗崩壁土体的崩解特性及其影响因素

周红艺, 李辉霞

(佛山科学技术学院空间信息与资源环境系, 广东 佛山 528000)

摘要: 崩岗的侵蚀过程主要是通过崩壁的坍塌作用来完成, 崩壁土体的坍塌必然有水的参与, 土体遇水将发生崩解现象, 因此, 研究崩壁土体坍塌需先研究其崩解特性。通过分层采集崩壁土体4个层次的土样, 进行不同层次崩壁土体的理化性质和崩解特性测试分析。结果表明: (1) 崩壁土体的4个层次(红土层、砂土层、碎屑层、碎石角砾残积层)的理化性质与风化壳的风化程度有密切联系, 随风化程度的高低而有规律的变化。(2) 在崩壁土体垂直剖面上, 碎石角砾残积层的崩解速度最快, 红土层最慢, 崩解速度快慢表现为红土层<砂土层<碎屑层<碎石角砾残积层; 初始含水量对红土层、砂土层的崩解速度影响较大, 对碎屑层、碎石角砾残积层的影响较少。(3) 影响崩壁土体崩解特性的理化因子众多。其中对崩解速度有显著正相关影响的理化因子按相关系数大小排序为砂粒含量、MgO、自然含水量、K₂O、CaO、交换性钠、pH、Na₂O、孔隙度、阳离子交换量; 有显著负相关影响的理化因子按相关系数大小排序为粘粒、Fe₂O₃、Al₂O₃、TiO₂、SiO₂、粉粒、有机质、游离氧化铁、游离氧化铝; 只有交换性钙、饱和含水量、土粒比重、土粒干密度这4个因子与崩解速度的相关性不显著。崩壁不同层次土体的理化性质的分异性是崩解产生显著差异的基础, 而崩壁土体崩解速度的层次分异性是崩壁坍塌的重要因素之一。

关键词: 崩岗; 崩壁; 崩解特性; 华南花岗岩红壤区

中图分类号: S157.1; S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)01-0074-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.01.013

The Study on Soil Disintegration Characteristics and Its Influence Factors of Collapsing Wall in the Collapsing Hill Erosion Region of Southern China

ZHOU Hongyi, LI Huixia

(Department of Spatial Information and Resource-environment, Foshan University, Foshan, Guangdong 528000)

Abstract: The collapsing hill was a specific form of soil erosion in the granite red soil region of Southern China. It was one of the most important indications of serious soil erosion. As the material source of collapsing hill, the collapse of collapsing walls was the most active part of collapsing erosion. The soil disintegrating characteristics was an important indicator of the collapsing hill in southern China, and also the critical basis for soil conservation. In this paper, we used a combination of plot-based detailed representation and laboratory experiment based on broad field investigation to study the disintegration characteristics and the influence factors on different layers of collapsing wall. The results showed that: (1) The soil physico-chemical properties of the soil collapsing wall layer were closely related to the weathered degree of weathering mantle, and it showed some regularity. (2) At different levels of the initial soil moisture content, the order of the disintegration speed was as the following: red soil layer<sand soil layer<clastic layer<gravel eluvial breccia layer. The initial soil moisture content had a considerable effect on the speed to complete the disintegration of the red soil layer and sand soil layer, while little impact on the easily-disintegrated soil of the other two layers (clastic layer and gravel eluvial breccia layer). (3) Correlation analysis between the soil physico-chemical properties and disintegration speed of the soil wall showed that the sand content, MgO, nature moisture content, K₂O, CaO, exchangeable sodium, pH, Na₂O, degree of porosity, CEC were positively correlated to disintegration speed, while the clay content, Fe₂O₃, Al₂O₃, TiO₂, SiO₂, silt, soil organic matter, free iron oxide, free aluminum oxide were negatively correlated to disintegration speed. The exchangeable calcium, saturated soil moisture, soil bulk density, specific gravity of soil had no significant correlation with the disintegration speed.

收稿日期: 2016-09-19

资助项目: 国家自然科学基金项目“华南花岗岩红壤区崩壁裂隙发育对崩壁稳定性的影响”(41371041); 国家自然科学基金项目(41401108)

第一作者: 周红艺(1977—), 男, 湖北利川人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: zhouhyfs@163.com

tegration. The correlation coefficient indicated that disintegration speed and soil structure, as well as the chemical content of clay minerals, were closely correlated. Hence, it could be inferred that the soil of clastic layer and gravel eluvial breccia layer disintegrated more easily, which resulted in the head erosion of the collapsing hill. This provided a basis for further research on the collapsing of granite and laid a foundation for the study of the occurrence mechanism of the collapsing hill. This study helped to improve the understanding of physical mechanisms of collapsing hill erosion and policy enlightenments for comprehensive control of collapsing hill erosion.

Keywords: collapsing gully; the collapsed walls; disintegration characteristics; the granite red soil region of southern China

花岗岩风化壳的崩岗侵蚀是华南地区最严重的水土流失类型^[1],虽然崩岗侵蚀在华南土壤侵蚀面积所占比例并不大,但其所造成的危害却远比其他类型的水土流失严重,对自然环境和社会经济发展造成了极大破坏^[1-6]。崩岗的侵蚀过程主要是通过崩壁的坍塌作用来完成,众多学者都已经意识到了崩壁坍塌在崩岗发生过程中起到了至关重要的作用^[1-2,4-7],没有崩壁的坍塌便没有崩岗的演变和崩岗地形的发育,即崩壁的坍塌是整个崩岗演变过程中最活跃的部分,也是崩岗运动的物质来源^[6]。然而关于崩壁坍塌的机制目前还处于探索阶段。崩壁土体的坍塌必然有水的参与,土体遇水必将发生崩解现象。因此,研究崩壁土体坍塌需先研究其崩解特性。由于华南花岗岩风化壳深厚的崩壁土体,其层次性特别明显,其崩解特性理应不同,本研究将研究不同层次的崩壁土体的崩解特性及其影响因素。关于土体崩解特性的研究,国内外学者已经做了富有探索意义的研究工作^[8-14],如对不同土壤类型(如花岗岩残积土)的崩解特性对工程地质和土力学方面的影响研究^[9-11];蒋芳市等^[2-3]研究崩岗崩积体土壤抗蚀性时,采用浸水崩解试验测定土体崩解时间,发现崩积体土壤比其他崩岗部位更易发生崩解;颜波等^[12]、牛德奎等^[13]通过对花岗岩风化土崩解特性的研究,认为花岗岩风化土在雨水作用下能够发生崩解,致使土体结构遭到破坏;刘丹露等^[14]从初始含水率的角度,对花岗岩剖面土壤崩解速度在不同含水量下的差异进行了研究。土体崩解过程虽然引起了学者们的重视,但从已有研究来看,专门针对崩壁土体不同层次的崩解特性及其影响因素的研究还较少,特别是针对深厚的花岗岩风化壳崩壁土体的多层次和不同含水量变化下的比较分析及影响崩解的理化性质等方面缺乏研究。鉴于此,本研究通过采集崩壁土体4个层次(红土层、砂土层、碎屑层、碎石角砾残积层)的土样,进行物理化学性质测定,运用自制崩解仪测定不同层次土体在不同含水量下的崩解量,并通过相关性分析,确定与崩解量密切相关的物理化学因素,探究崩壁土体的崩解特性及其

影响因素,以期为本区域崩岗侵蚀机理提供支撑,对于深入系统了解崩岗发育规律及提出治理途径具有重要的科学意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究点设在广东省德庆县马圩镇深涌水土保持监测站。德庆县地处北回归线南侧,属于亚热带季风气候,年平均降雨1 516.5 mm,年平均气温21.5℃,年平均日照时数1 848 h。岩石为燕山期黑云母花岗岩,风化壳厚30~60 m。在广东省德庆县马圩镇深涌水土保持监测站的39个崩岗中,选定其中1个活动性崩岗进行样品采集。

1.2 分层与采样

在德庆马圩镇深涌水土保持监测站,从岩石矿物的破碎程度和分解淋溶与新生矿物的产生,按物理—化学风化特征,在总结前人工作的基础上进行风化壳综合剖面的划分^[6],将崩壁采样点的花岗岩红土型风化壳分为5个层次:红土层(全风化带)、砂土层(强风化带)、碎屑层(弱风化带)、碎石角砾残积层(弱风化带)、基岩。2016年8月17-18日分别采取前面4个层次的崩壁土体样品,采样内容包括散土和原状土。利用直剪环刀($\Phi 61.8\text{ mm} \times 20\text{ mm}$)取原状土,为了探讨水分含量对崩解特性的影响,试验设计5种水分变化水平,每一层土样采20个环刀试样(重复采样4次,其中一个试样做容重和自然含水量分析,其余3个试样为崩解试验的3次重复),采集4个崩壁土体层次,合计80个原状土样。对每一个样品进行编号,然后用保鲜膜包装好并放入保鲜盒内,同时,采集1 kg左右的散装土进行理化分析。将及时带回室内的直剪环刀土样进行5组土壤水分含量变化的处理,环刀土样进行饱和后脱湿处理,每个土样通过不同的风干时间获得不同的含水量,然后运用自制崩解仪测定不同层次土体在不同含水量下的崩解量,分为3组重复,测定结果取其平均值。

1.3 试验方法

1.3.1 崩壁土体崩解试验 崩解特性的试验方法主

要有以下 3 种:观察法、浮筒法和质量法。观察法主要用于定性分析试样的湿化崩解现象;浮筒法虽运用较广,但是在实际操作过程中存在浮筒晃动、水泡附着浮筒的情况,且当试验土体为黏性土时,湿化崩解过程较为缓慢,不利于长时间的观察。结合前人研究经验^[9-10],本试验选用质量法直接测定崩解质量。其崩解装置示意图见图 1。试验过程基本假定水的密度在土样崩解过程中不发生变化,则天平的读数即为崩解后土样的剩余质量。试验仪器设备主要有:自制铁架,尺寸约为 900 mm×600 mm×600 mm;电子天平,量程 2 000 g,精度 0.01 g;玻璃水缸,尺寸约为 600 mm×300 mm×300 mm;网板尺寸为 100 mm×100 mm,其中网眼尺寸为 10 mm×10 mm;吊架;其它试验仪器有秒表、照相机和摄像机。试验数据通过电子屏显示,测量方便,数据准确。崩解量参考兰泽鑫^[11]推导所得出的计算公式:

$$A_t = \frac{m_0 - m_t}{m_0 - m_e} \times 100 \quad (1)$$

式中: A_t 为试样在时间 t 时的崩解量(%); m_0 为初始放入静水力天平水中的读数(g); m_t 为经时间 t 所对应的天平读数(g); m_e 为铁丝方格网空载时水力天平读数(g)。

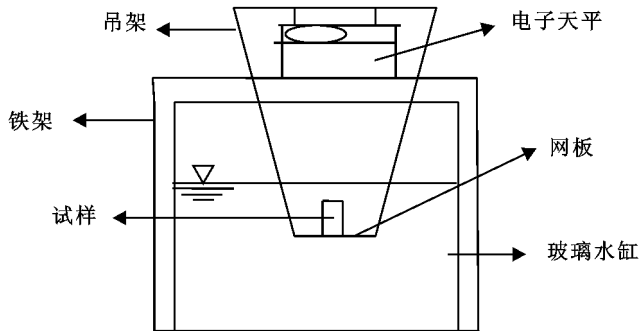


图 1 崩解装置示意

试验于 2016 年 8 月进行,首先将试样放在网板中央并迅速放进水中,打开秒表计时开始,同时测记开始天平的读数;试验开始后每 30 s 记录一次天平读数,即 30,60,90,120,150,180 s 直到 600 s,然后改为每 5 min 记录一次,直到完全崩解的 480 min 测记天平的读数。当试样完全通崩解后,试验即告结束。在崩解试验过程中,电子天平上及时显示的是土样崩解、吸水过程质量的变化,为了便于数据处理,本文采用不同时刻电子天平上的读数作为崩解特性定量指标,通过公式(1)得到不同初始含水率下花岗岩剖面土壤的崩解特性值,并绘制出不同初始含水率下的崩解折线图。

1.3.2 崩壁土体理化性质测定方法 土体颗粒分析中,粒径 >2 mm 的土体颗粒用筛析法测定, ≤ 2 mm 的土体颗粒用美国 Microtrac 公司的 S 3500 系列激光粒度分析仪测定;土壤水分、土粒干密度、孔隙度、

土壤粘粒的大量元素 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 、 CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 和土壤 pH、土壤有机质、阳离子交换量、交换性钙、交换性钠、游离氧化铁、游离氧化铝等分别按照《土壤实验室分析项目及方法规范》(中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组,1991)和《土壤理化分析》(中国科学院南京土壤研究所,1978)方法测试。

1.4 相关性分析

相关性分析是指对 2 个或多个具备相关性的变量元素进行分析,从而衡量两个变量因素的相关密切程度。2 变量间的相关性可以用许多统计值来测量,最常用的是皮尔森相关系数。其计算公式为:

$$R = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \bar{X}}{S_x} \right) \left(\frac{Y_i - \bar{Y}}{S_y} \right) \quad (2)$$

式中: R 为皮尔森相关系数; n 为样本数; X_i 和 Y_i 为第 i 个样本的 X 、 Y 样本值; $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 表示 X 和 Y 的样本平均值; S_x 表示 X 的样本标准差, S_y 表示 Y 的样本标准差。为了探究在自然状态下崩壁土体崩解特性到底有哪些土体理化性质对它产生了影响,研究采用崩壁土体 4 个层次的理化性质(X)和在自然含水量状态下的 1,2,5,10 min 的崩解量(Y)在 Excel 2003 下进行皮尔森相关系数计算。每个理化性质和崩解量都有 3 个重复,在样本数为 $n=12$, $p=0.01$ 和 $R=0.66$ 时进行相关性显著检验,确定对崩解速度有显著相关性的理化因子。

2 结果与分析

2.1 崩壁土体的理化性质

2.1.1 崩壁土体的物理性质 从表 1 可知,崩壁土体的粒度特征表现为:土体颗粒各级粒径的组成在垂直剖面上表现出了较大的差异,粉粒和粘粒等细粒物质的之和在碎屑层(弱风化带)以上的风化壳中占有绝对优势,其比重超过了 50%,粘粒和粉粒从表层红土层(全风化带)到底层碎石角砾残积层(弱风化带)逐层减少,特别是粘粒含量减少更为迅速,位于底部的碎石角砾残积层(弱风化带)的粘粒含量仅有 3.58%,约为红土层含量的 1/5;砂粒含量则逐渐增加,在底部的碎石角砾残积层(弱风化带)中砂粒含量超过了 50%。粒度变化反映了风化程度从上至下及由表层至底层逐渐减弱。

崩壁土体的自然含水量、饱和含水量、总孔隙度和土粒干密度是土体结构和状态的重要指标,由表 1 可知,自然含水量随着深度的增加而增加,而饱和含水量则增加到一定值后在碎石角砾残积层(弱风化带)转为降低;从总孔隙度变化趋势来看,崩壁土体总孔隙度随着深度的增加呈增大的趋势;土粒密度的变化趋势也是随着深度的增加而降低。

表 1 崩壁土体的物理性质

物理性质	红土层	砂土层	碎屑层	碎石角砾 残积层
砂粒(2~0.02 mm)/%	29.39	32.45	45.98	52.36
粉粒(0.02~0.002 mm)/%	53.52	51.74	46.59	44.06
粘粒(<0.002 mm)/%	17.09	15.81	7.43	3.58
自然含水量/%	9.93	12.43	19.72	21.56
饱和含水量/%	33.47	33.11	34.91	27.86
土粒干密度/(g·cm ⁻³)	1.41	1.42	1.39	1.34
孔隙度/%	47.19	47.01	48.52	50.74
土粒比重/(g·cm ⁻³)	2.67	2.68	2.70	2.72

2.1.2 崩壁土体的化学性质 由表 2 可知,风化壳的风化程度从碎石角砾残积层至红土层逐渐加强。表层的氧化铁、氧化铝、氧化钛属积累值,越往地表,含量越高,因此 Fe₂O₃、Al₂O₃ 大量富集,含量比底层高数倍,故形成红土层的铁铝富集带。而氧化硅、氧化钙、氧化镁、氧化钾、氧化钠属淋溶值,越往地表淋溶越强,SiO₂、CaO、MgO、K₂O、Na₂O 大量淋失,底层含量均远高于表层的红土层。

表 2 崩壁土体的化学性质

化学性质	红土层	砂土层	碎屑层	碎石角砾 残积层
SiO ₂ /(g·kg ⁻¹)	512.60	625.70	674.60	711.10
Al ₂ O ₃ /(g·kg ⁻¹)	278.70	227.40	155.10	134.30
Fe ₂ O ₃ /(g·kg ⁻¹)	57.10	44.90	23.40	18.90
TiO ₂ /(g·kg ⁻¹)	8.10	6.60	5.60	4.80
CaO/(g·kg ⁻¹)	1.90	2.20	5.50	5.80
MgO/(g·kg ⁻¹)	0.70	0.30	4.80	6.40
K ₂ O/(g·kg ⁻¹)	2.80	2.50	31.90	37.50
Na ₂ O/(g·kg ⁻¹)	7.60	4.70	9.80	12.80
pH	4.36	4.45	4.91	5.22
有机质/(g·kg ⁻¹)	4.98	3.88	0.65	0.54
阳离子交换量/(mg·kg ⁻¹)	6.86	5.27	7.17	7.65
交换性钙/(mg·kg ⁻¹)	1.11	1.20	1.49	1.32
交换性钠/(mg·kg ⁻¹)	1.20	1.46	1.81	1.95
游离氧化铁/(g·kg ⁻¹)	1.32	1.27	1.18	0.91
游离氧化铝/(g·kg ⁻¹)	0.43	0.41	0.39	0.29

土壤 pH 值表示的是土壤的酸碱性,从崩壁土体剖面的垂直变化来看,其酸性均随深度的增加而减弱。土壤 pH 值的垂直差异与富铝化成土过程是密切相关的,构成土壤酸性的要素除 H⁺ 外,还有 Al³⁺,表层土壤脱硅富铝化的程度较高,故 Al³⁺ 在酸性形成过程中的贡献也较大,因此表层的红土层酸性最高。

有机质和阳离子交换量是土壤化学性质的重要特征要素。阳离子交换量则呈现了先减少后增加的趋势,阳离子交换量与土体的颗粒组成、次生粘土矿

物类型和有机质等要素关系密切,一般来说粘土矿物越丰富,则阳离子交换量越大,崩壁下部阳离子交换量最大可能与下部土体粘土矿物的 SiO₂/R₂O₃ 比率高有关系;有机质随着土壤深度在垂直变化上是从上向下减少,因为越往下动植物残体越少。

在花岗岩风化壳崩壁土体自红土层向母质层过渡时,其交换性钙有先增加又再减少的分布规律。而交换性钠随土层深度增加而明显增加。钠离子是化学活性较强的阳离子。在华南丘陵红壤区,长期的脱硅富铝化成土作用,使 Na、K 等碱金属遭受淋移,这种淋移过程越近地表越旺盛。相反,深层次土体则还存留一定量的 Na⁺,Na⁺ 具有较强的土壤分散能力。游离氧化铁、铝是母岩风化程度的重要指标,越往下部,含量越低。

2.2 崩壁土体的崩解特征

由图 2 可知,崩壁各土体的崩解特性差异显著,碎石角砾残积层完全崩解所需要的时间最短,其次是碎屑层,最慢的是红土层,崩解速度快慢表现为:红土层<砂土层<碎屑层<碎石角砾残积层;土体含水量越高,崩解所需要的时间越长。当土体水分含量较低时,崩解速度最快,这是因为干燥的土体极易吸水而膨胀,而处于较高水分状况时,则这一过程将变得缓慢得多。初始含水量对红土层和砂土层的崩解速度影响较大,对碎屑层、碎石角砾残积层的影响较少。

(1)红土层和砂土层的崩解特性:土体放入水中后,红土层和砂土层的土体出现明显的排气吸水现象,大量气泡不断逸出,土体不断出现裂隙,逐渐崩解。由图 2 可知,各试样随含水量减小崩落的速度加快,自然含水量及其风干后的土壤含水量的崩解量差异不明显,但是比自然含水量多的含水量情况下的崩解量显著增加,说明含水量越高,崩解速度越慢,试样崩解时间随含水量增加而延长。红土层和砂土层的试样随着崩解时间的延长,崩解速度逐渐减慢;红土层崩解到 20 min 后,在水分含量为 9.9%和 3.3%时的试验土体崩解量已经达到了原土体 1/3~1/2,随后崩解便进入相对静止状态,当 5 个处理的试验土体完全崩解则需 4~8 h。砂土层当含水量为 12.43%和 2.97%时,只需要 40 min 就全部崩解完成,其余含水量的试样多在 4 h 后全部崩解完。总体来说红土层的崩解速度小于砂土层,初始含水量对崩解速度影响较大。

(2)碎屑层和碎石角砾残积层的崩解特性:由图 2 可知,碎屑层试样土块不论初始含水量多少,最长不过 20 min 就完全崩解完成,碎石角砾残积层的崩解速度最快,土体完全放入水中后,土体产生强烈的吸水排气过程,不论初始含水量多少,全部在 5 min

之内全部崩解完全,崩解速度随土块含水量增加稍有降低,说明初始含水量对碎屑层和碎石角砾残积层的崩解速度影响较小;碎屑层和碎石角砾残积层比红土层和砂土层土体崩解所需时间短得多,其崩解速度远大于红土层和砂土层,亦即其抗蚀力表现为较红土层和砂土层弱。碎屑层和碎石角砾残积层的试样土体

崩解时和红土层和砂土层有显著不同,红土层和砂土层是先破碎至数个小块,然后维持小土块较长时间,处于相对静止的状态;而碎屑层和碎石角砾残积层则是从外向内逐层直接分散成极细的土粒,然后完全崩解,这充分说明碎屑层和碎石角砾残积层的崩解速度较红土层和砂土层快得多。

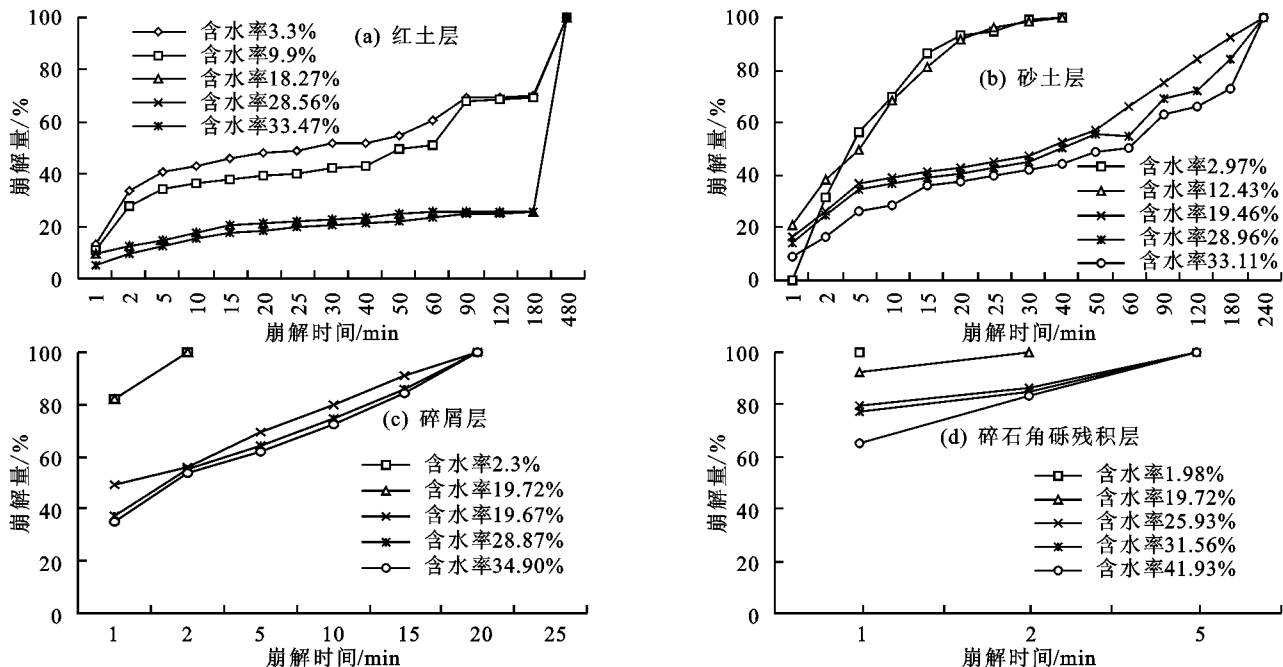


图 2 崩壁土体在不同初始含水率下的崩解量

2.3 崩壁土体崩解特性的影响因子

采用自然含水量状态下土体的 1,2,5,10 min 的崩解量(崩解速度)和理化性质进行相关分析,根据公式(2),在 Excel 2003 下进行皮尔森相关系数计算,在样本数为 $n=12$, $p=0.01$ 和 $R=0.66$ 时进行相关性显著检验。由表 3 可知,崩壁土体的理化性质大部分都与崩解速度有显著的相关性,只有交换性钙、饱和含水量、土粒比重、土粒干密度这 4 个因子与崩解速度的相关性不显著,其余因子均具有显著的相关性,随着崩解时间的进行,各影响因子对崩解速度的影响在下降,甚至有部分因子与 5 min 和 10 min 的崩解量不相关,分别是:阳离子交换量、游离氧化铝、 Na_2O 、游离氧化铁和孔隙度,这可能与试样在 10 min 时碎屑层和碎石角砾残积层均已经完全崩解有一定关系。与崩解速度呈正相关的因子,根据相关系数大小排序为:砂粒含量、 MgO 、自然含水量、 K_2O 、 CaO 、交换性钠、 pH 、 Na_2O 、孔隙度、阳离子交换量;与崩解量呈负相关的因子,根据相关系数大小排序为粘粒、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、 SiO_2 、粉粒、有机质、游离氧化铁、游离氧化铝。从相关系数的大小可以看出,崩解速度与土粒大小的含量、 Fe_2O_3 、自然含水量和粘土矿物的化学组成含量有密切关系。接下来应进一步研究这些因子是如何影响崩解特性的。

表 3 崩解量与崩壁土体的理化性质的相关性分析

理化因子	1 min	2 min	5 min	10 min
	崩解量	崩解量	崩解量	崩解量
$\text{SiO}_2/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	-0.93	-0.92	-0.91	-0.80
$\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	-0.95	-0.96	-0.95	-0.95
$\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	-0.97	-0.98	-0.97	-0.98
$\text{TiO}_2/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	-0.93	-0.94	-0.94	-0.96
$\text{CaO}/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.97	0.96	0.96	0.91
$\text{MgO}/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.99	0.98	0.95	0.85
$\text{K}_2\text{O}/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.98	0.98	0.94	0.89
$\text{Na}_2\text{O}/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.87	0.86	0.80	0.62
pH	0.90	0.89	0.87	0.73
有机质/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	-0.84	-0.84	-0.75	-0.70
阳离子交换量/ $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.69	0.67	0.60	0.39
交换性钙/ $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.54	0.53	0.55	0.65
交换性钠/ $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.92	0.93	0.95	0.93
游离氧化铁/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	-0.81	-0.82	-0.68	-0.68
游离氧化铝/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	-0.66	-0.68	-0.57	-0.53
砂粒(2~0.02 mm)/%	1.00	1.00	0.96	0.91
粉粒(0.02~0.002 mm)/%	-0.90	-0.91	-0.83	-0.86
粘粒(<0.002 mm)/%	-0.99	-0.98	-0.95	-0.90
自然含水量/%	0.98	0.98	0.97	0.94
饱和含水量/%	-0.51	-0.50	-0.35	-0.31
土粒干密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	-0.59	-0.59	-0.55	-0.43
孔隙度/%	0.71	0.70	0.63	0.57
土粒比重/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	0.38	0.37	0.29	0.38

注: $n=12$; $p=0.01$; $R=0.66$ 。

3 讨论

通过崩壁土体理化性质测定和崩解试验可知,崩

壁下部土体(碎屑层和碎石角砾残积层)由于石英、长石等矿物风化破碎不太彻底,颗粒很粗,缺乏有机质,游离氧化铁、铝含量低,土粒之间缺乏胶结物质,因而崩壁下部土体十分松散,遇水极易崩解。结合我们前期研究得知崩壁上部土体(红土层和砂土层)更容易产生裂隙,而且裂隙发育的程度比下部土体(碎屑层和碎石角砾残积层)更为充分^[5,8],那么当降雨的时候,雨水更容易通过裂隙渗透到下部土体,在降雨过程中和降雨停止后,下渗水分和沿侵蚀沟壁运动的水流使暴露在外的各土层吸水膨胀并产生崩解,此时,最底层的碎石角砾残积层最易发生崩解并被水流搬运,继而使上覆红土层、砂土层土体呈悬空状态,从而促成了崩壁的坍塌。这也从一个侧面验证了野外所观察的现象:即一旦厚度不大的红土层被破坏和被径流蚀穿后,崩壁的坍塌将难以控制,并且坍塌速度将成倍增加,因此,在崩岗治理的过程中,应该特别注意保护红土层不受破坏。在崩壁下部土体(碎屑层和碎石角砾残积层)遇水崩解,崩壁上部土体临空面出现悬空现象后,崩壁下部土体按照降雨崩解掏挖→形成悬空土体→崩塌→继续冲深掏挖→…这样一个循环不断进行,崩岗将不断产生,直到各方向沟头接近或到达分水岭,崩岗边缘及塌积堆形成稳定的坡度及沟道底部形成平衡剖面。这也证实了牛德奎^[13]的猜想:由于崩壁上部红土层和砂土层土体又极易产生裂隙或其它软弱面,在渗透水流动压力的触发作用下,悬空土体极易倾覆倒塌,侵蚀沟不断向宽的方向扩展,崩岗边缘也不断向上方延伸,从而导致大规模的崩岗快速发育。因此,接下来应进一步研究对崩壁土体的理化性质是如何影响崩解、渗透和土体强度等方面的特性,为深入阐明崩岗侵蚀的成因机理,进一步丰富崩岗侵蚀理论和采取有效的防治措施提供科学依据。

4 结论

(1)崩壁土体的4个层次(红土层、砂土层、碎屑层、碎石角砾残积层)的理化性质差异显著,理化性质的变化随风化程度的高低而呈现规律性的变化,深厚的花岗岩风化壳是崩解产生的物质基础,崩壁土体4个层次的理化性质层次分异性是其产生不同层次崩解特性差异的重要因素。

(2)在崩壁土体垂直剖面上,碎石角砾残积层的崩解速度最快,红土层最慢,崩解速度快慢表现为:红土层<砂土层<碎屑层<碎石角砾残积层,这说明如果红土层被蚀穿后,崩解速度极快的碎屑层、碎石角砾残积层一旦受到水分的影响,极易发生崩解并被水流搬运,继而使上覆红土层、砂土层土体呈悬空状态,

从而促成了崩壁的坍塌;初始含水量对红土层、砂土层的崩解速度影响较大,对碎屑层、碎石角砾残积层的影响较少。

(3)崩壁土体的大部分理化性质与崩解速度有显著的相关性,呈正相关的理化性质按相关系数大小排序为:砂粒含量、MgO、自然含水量、K₂O、CaO、交换性钠、pH、Na₂O、孔隙度、阳离子交换量;呈负相关的理化性质根据相关系数大小排序为:粘粒、Fe₂O₃、Al₂O₃、TiO₂、SiO₂、粉粒、有机质、游离氧化铁、游离氧化铝。只有交换性钙、饱和含水量、土粒比重、土粒干密度这4个因子与崩解速度的相关性不显著。从相关系数的大小可以看出,崩解速度与土壤结构因子和粘土矿物的化学含量有密切关系。今后应进一步对次生粘土矿物含量和形态作补充测试分析,以分析具分散性的钠和胶结性的钙及粘土矿物对崩解特性是如何影响的。

参考文献:

- [1] 林金石,黄炎和,张旭斌,等.南方花岗岩区典型崩岗侵蚀产沙来源分析[J].水土保持学报,2012,26(3):53-57.
- [2] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等.崩岗崩积体土壤渗透特性分析[J].水土保持学报,2013,27(3):49-54.
- [3] Jiang F S, Huang Y H, Wang M K, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on steep colluvial deposit erosion in Southeast China[J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78(5): 1741-1752.
- [4] 刘希林,唐川,张大林.野外模拟崩岗崩积体坡面产流过程及水分分布[J].农业工程学报,2015,31(11):179-185.
- [5] 周红艺,李辉霞.华南花岗岩风化壳裂隙发育对崩岗侵蚀的影响[J].江苏农业科学,2014,42(10):352-354.
- [6] 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.
- [7] 赵媛鄂.东南花岗岩崩岗岩土抗剪强度及崩解特性研究[D].武汉:华中农业大学,2014.
- [8] 周红艺,李辉霞,叶奇,等.华南活动崩岗崩壁土体裂隙发育规律试验研究[J].水土保持研究,2016,23(1):338-342.
- [9] 曾朋.花岗岩残积土的压实特性及崩解特性研究[D].广州:华南理工大学,2012.
- [10] 张抒,唐辉明.非饱和花岗岩残积土崩解机制试验研究[J].岩土力学,2013,34(6):1668-1674.
- [11] 兰泽鑫.花岗岩残积土的崩解试验研究[D].广州:华南理工大学,2013.
- [12] 颜波,汤连生,胡辉,等.花岗岩风化土崩岗破坏机理分析[J].水文地质工程地质,2009,36(6):68-71.
- [13] 牛德奎.华南红壤丘陵区崩岗发育的环境背景与侵蚀机理研究[D].南京:南京林业大学,2009.
- [14] 刘丹露,赵媛,丁树文,等.花岗岩剖面土壤崩解特性与初始含水率的关系[J].中国水土保持科学,2016,14(2):17-22.