

初始含水率对崩岗土体抗拉特性的影响

冯延云, 张晓明, 朱丽丽, 王佳妮

(华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要: 针对花岗岩发育的崩岗土体崩壁失稳等问题, 通过单轴抗拉试验, 研究了湖北通城地区不同初始含水率的崩岗土体抗拉强度特性。结果表明: 初始含水率对崩岗土壤抗拉强度影响明显。土壤抗拉强度特征曲线为单峰型, 表土层、红土层和红砂过渡层抗拉特征曲线在含水率 W_c (24.4%) 附近出现抗拉强度峰值, 而砂土层在 W_c (25.8%) 出现抗拉强度峰值。崩岗不同层次土壤轴向拉伸长和径向收缩长随初始含水率呈现正相关关系, 且土壤轴向拉伸率和径向收缩率与初始含水率拟合出相关系数较高的线性函数关系 (除砂土层的径向收缩率与初始含水率呈指数函数关系)。低 (18%~22%)、中 (22%~30%)、高 (30%~饱和) 3 种初始含水率区间下崩岗土壤持水机制分别为土壤毛细管持水机制、团粒水桥联结持水机制与团粒持水机制。研究结果可为崩岗科学防治提供一定的科学依据。

关键词: 崩岗; 抗拉特性; 初始含水率; 持水机制

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)05-0041-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.05.007

Effect of Initial Moisture Content on Tensile Resistance of Collapsed Soil

FENG Yanyun, ZHANG Xiaoming, ZHU Lili, WANG Jiani

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

Abstract: Aiming at the problems instability of collapsed hill soil developed by granite, the tensile strength characteristics of collapsed hill soil with different initial water contents were studied by uniaxial tensile test in Tongcheng area of Hubei Province. The results showed that the initial moisture contents had a significant effect on the tensile strength of the collapsed soil. The characteristic curve of soil tensile strength appeared as a unimodal curve. The peak values were obtained at the water content of W_c (24.4%) for the surface soil, laterite and red sand transition layer, while W_c (25.8%) for the sandy layer. The axial and radial shrinkage lengths of different soil layers were positively correlated with the initial water contents, and the linear relationships between the axial and radial shrinkage of soil and the initial water contents were fitted with a higher correlation coefficient (the radial shrinkage of sand removal layer is exponentially correlated with the initial water contents). The mechanisms of water holding in soils with three initial water contents ranging from low (18% ~ 22%), medium (22% ~ 30%) to high (30% ~ saturation) was analyzed, which were soil capillary water holding mechanism, aggregate water bridge water holding mechanism and aggregate water holding mechanism respectively. These research results could provide a scientific basis for the scientific prevention and control of collapsed hill.

Keywords: collapse; tensile properties; initial water content; water holding mechanism

崩岗是中国南方花岗岩地区的一种特殊的水土流失现象, 指山岗的坡面从山脚到山顶发生严重崩塌的一种土壤侵蚀作用, 侵蚀危害仅次于滑坡和泥石流灾害^[1]。目前, 关于崩岗的研究, 大多数学者主要通过研究崩岗土体的力学性质揭示崩岗侵蚀的发生和

发展。李思平^[2]提出土的崩解特性与节理裂隙的发育有关; 陈晓安等^[3]研究表明, 花岗岩地区, 土壤抗剪强度低和压缩性大的岩土力学质是该地区崩岗大规模发育的主要因素; 林敬兰等^[4]研究表明, 崩岗不同土层抗剪强度总体表现出随着含水量增加而逐渐减

收稿日期: 2019-04-01

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)

第一作者: 冯延云 (1994—), 男, 甘肃白银人, 硕士研究生, 主要从事崩岗土体稳定性研究。E-mail: fengyanyun9965@163.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

小的规律;张晓明等^[5]研究表明,土壤黏聚力和内摩擦角随干湿变化呈非线性衰减趋势;卫杰等^[6]研究表明,崩岗不同层次土体的无侧限抗压强度均随着干湿循环次数的增加而逐渐衰减;汪和青等^[7]研究表明,崩岗土的应力应变曲线符合双曲线模型;魏玉杰等^[8]研究表明,崩岗体剖面土壤收缩过程受土壤质地和土壤基质吸力共同影响。以上研究主要集中在崩岗土体的崩解特性、抗剪强度(直剪、三轴、无侧限)、压缩性质、收缩性质等方面,为了更全面地研究崩岗土体失稳机理,有必要从土体抗拉特性的角度研究崩岗土体稳定性。

裂隙的存在会极大破坏土体结构的完整性,弱化学性质,降低稳定性,增加渗透性,加剧蒸发,加剧坡面水土流失和风化等,给岩土工程和环境岩土工程带来一系列负面影响^[9]。而土体之所以出现张拉裂隙破坏,是因为土体受到的拉应力超过了自身的抗拉强度^[10]。中国南方崩岗地区降雨多,雨水是造成崩岗土体发生张拉破坏的一个重要因素,探究含水量与土体的抗拉特性的关系,对于研究土体的稳定性和防治土体开裂具有重要指导意义。近些年,学者在水分作用下土壤抗拉强度和拉伸裂隙方面也做了很多研究。叶朝良等^[11]对重塑黄土抗拉特性研究中发现,抗拉强度随含水率的变化而变化,且存在峰值,在塑限前主要受弹性变形控制,超过塑限后主要受塑性变形控制;He 等^[12]在对非扰动黄土的拉伸特性研究中指出,含水量与黄土的抗拉强度呈现正相关关系;Tang 等^[13]认为,压实黏性土的抗拉强度显著取决于含水量;胡磊等^[14]在研究重塑黏土抗拉特性试验研究中指出,含水率与抗拉强度呈线性相关关系;Tollenaar 等^[15]在研究高含水量对黏土抗拉强度的联合影响中表明,蒸发速率对土体裂隙的影响与其抗拉强度的显著变化有关。以上研究水分作用下土壤抗拉特性的土体多集中在黄土、压实土、黏性土等,对崩岗土壤涉及不多。因此,需要加强对崩岗土体在水分作用下的抗拉特性,这对今后研究崩岗土体稳定性和崩岗坡面块体运动力学机制有重要指导意义。

本文采用试制的单轴竖向抗拉试验装置,对湖北通城地区崩岗崩壁不同层次土壤进行了抗拉试验,通过设置不同初始含水率梯度,研究水分对不同层次土壤抗拉特性影响(强度、轴向、径向);揭示了拉伸过程中土壤持水机制及破坏断面形式;从抗拉角度探讨了崩岗不同层次土壤的变形和失稳机制。

1 材料与方法

1.1 研究区概况和供试土样

研究区位于湖北省咸宁市通城县,地处湘、鄂、赣

3 省交界处,全县四季分明,属亚热带季风气候,光照适中,降雨充沛,年平均气温为 16.7℃,年平均降水量 1 215.8 mm,多年平均径流深 795 mm,无霜期 260 d。该县崩岗数量高达 1 000 多处,是崩岗典型集中分布区域,该地区崩岗主要由花岗岩节理发育,在气候及其他外界条件影响下,呈现为山顶圆滑、地面破碎、水土流失较严重的地貌景观^[16]。该地区植被覆盖主要为常绿阔叶与落叶阔叶混交林。

试验所用土样于 2018 年 6 月在湖北省咸宁市通城县五里镇进行采集,试验土壤为典型瓢型崩岗土,根据崩岗崩壁土壤剖面颜色特征(从红到浅红)、不同深度(0.17,0.49,2.1,3.1 m)自上而下进行层次划分,分别为:表土层、红土层、红砂过渡层和砂土层。原状土试样采用标准环刀(5 cm×20 cm)取得,将取好的环刀试样迅速用保鲜膜包裹并进行编号,然后放入预备的塑封袋内,再用透明胶带紧密缠绕。同时采集各层典型中部代表性土壤约 2 kg 放入自封袋内,带回实验室放在木盘上均匀摊平,置于室内通风处阴干,拣去较大杂质和动植物残体等。土样风干后根据物理、化学基本性质分析要求研磨过筛,其中过 1 mm 孔径用于化学分析,过 2 mm 孔径用于物理分析。土壤基本性质按照常规方法^[17-18]测定:自然含水率采用烘干法,容重采用环刀法,土壤毛管孔隙度根据土壤容重和比重间接计算获得,土粒相对密度采用比重瓶法,机械组成采用筛分法结合移液管法,有机质采用外加热重铬酸钾容量法,基质吸力通过离心机测得,以上试验均进行 3 次重复。

1.2 试验装置与试样制备

采用单轴拉伸试验装置,由载荷框架和抗拉模具组成。载荷框架是由温州山度仪器有限公司生产的 SJY-500 实验机台和 SH-100 拉力计组成(图 1)。拉力计量程为 2 N—500 N,示值误差±0.5%。将拉力计用 RS232 串口通讯线与电脑连接,利用拉力计配套软件 S-H Test 进行数据接收,得到不同拉伸过程中的荷载变化。抗拉模具分别为 2 个上部带弯钩和螺丝的直径为 50 mm、厚度为 1 mm 硬铁片(不易变形,重量轻、与黏合剂易黏结)。将其用黏合剂牢固地与室内制作的重塑土样黏结(图 1),模具上半部与拉力计的弯钩相连接,下半部通过螺丝与实验机台连接。试验设定实验机台恒定速率(0.5 mm/min)进行垂直缓慢拉伸试验,保证土样拉伸均匀。在试验过程中,用拉力计连续测量轴向载荷和土样峰值应变数据记录直接传送到计算机,土样的拉断面直径在抗拉过程结束后由同一个人用游标卡尺在土柱中间位置

测量 3 次。

将野外风干土样混匀碾碎后过孔径 2 mm 的筛,按照野外调查结果,将过筛的风干土样与需要的蒸馏水混合配制不同初始含水量的土样。根据每层土的野外干密度,设置初始含水率梯度为(18%, 20%, 22%, 24%, 26%, 28%, 30%, 32%),共制备 8 组土样(红土层土壤饱和含水率为 34%,所以红土层为 9 组土样),由于土壤在初始含水率为 18% 的土样达到可塑状态,故设置初始含水率从 18% 开始。将制备的混合土壤在塑料袋中储存和密封 24 h,以便土体中的水分充分均匀。试样制备采用直径 39.1 mm,高度 80 mm 的三瓣筒制作标准圆柱形试样。制样时,在三轴仪饱和器筒壁周围涂抹凡士林薄层,减少土壤颗粒与筒壁的摩擦力,防止试样粘在筒壁造成取样困难。根据预先设置的初始含水率梯度,以及试验方案,均匀质量称重每个试样的土样,分 4 层采用静压力法等高度压实制成试样,每加入每层时将上层表面刨毛,使层与层之间结合更紧密。将成型的试样脱模,与模具进行黏结,待黏合剂强度达到测试要求,放置在拉伸仪器上进行测试,每组重复 3 次。且保证断裂面距离上表面在区间 35~45 mm 为有效,否则视为无效。

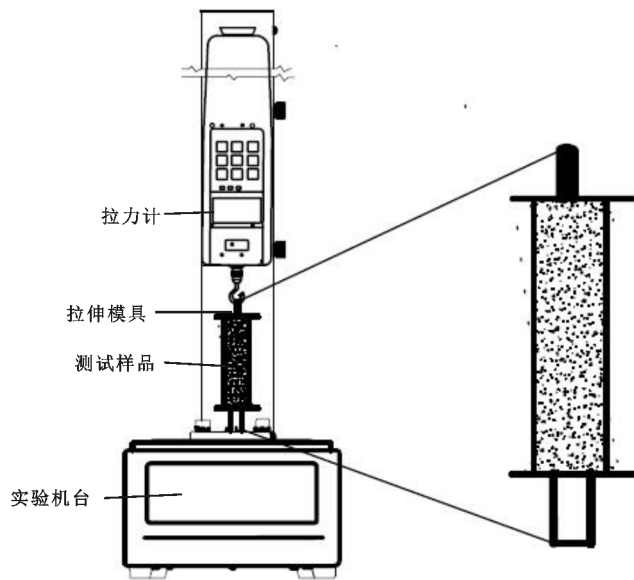


图 1 抗拉强度试验装置

1.3 数据处理

试样拉伸过程中,土体经过拉伸阶段进入强化阶段后,随着横向截面尺寸明显缩小在拉断时所承受的峰值拉伸力 F ,则试样的抗拉强度或者极限强度 σ_t (kPa) 计算公式为:

$$\sigma_t = \frac{F}{S} = \frac{N - W}{S} \quad (1)$$

式中: F 为峰值拉伸力(N); S 为试样断裂面面积(mm^2); N 为轴向载荷(N); W 为抗拉模具上半部的

重量(g)。

轴向拉伸率表示相对于原始试样轴向拉伸长度的变化率,将试验的拉伸率定义为 L_v ,计算公式为:

$$L_v = \frac{L}{H} \times 100\% \quad (2)$$

式中: L 为轴向拉伸长度(mm); H 为试样原始高度(mm)。

径向收缩率表示相对于原始试样径向收缩长度的变化率,将收缩率定义为 ϵ_θ ,计算公式为:

$$\epsilon_\theta = \frac{\epsilon}{d} \times 100\% \quad (3)$$

式中: ϵ 为径向收缩长度(mm); d 为试样原始直径(mm)。

共进行 33 组直接拉伸试验。对于每层土壤和含水量的试样,重复试验 3 次。制作的土样与模具黏贴后对试样表面进行凡士林处理,防止试验过程中水分蒸发。为了检验水分散失影响,在试验过程中测试了土样的含水量,并与初始值进行了比较。观察到非常轻微的变化($<0.05\%$),对试验结果影响较小,可以忽略不计。

采用 Microsoft Excel 2016 软件对试验数据进行处理、作图以及 SPSS 19.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 崩岗不同层次土壤基本性质

崩岗不同层次土壤基本性质具有一定差异性。由表 1 可知,土壤颗粒组成随着采样深度的增加而变化,从表土层到红砂过渡层,砂粒含量不断减小,黏粒含量不断增加。而从红砂过渡层到砂土层,砂粒含量增加了大约 1 倍,黏粒含量减少了大约 3 倍。此外,土壤其他物理性质也具有差异性,由表 2 可知,随着土层深度的增加,崩岗不同层次土壤的毛管空隙度逐渐增加,毛管力逐渐越小,吸水力也逐渐减弱。表土层有机质含量明显高于其他 3 个土壤层次,因为表土层土壤是土壤微生物和土壤动物分泌物以及土体中植物残体和植物分泌物的活动场所,储存着植物生长所需的养分物质,对于其他 3 个土层土壤,由于径流的冲刷作用、红砂过渡层和砂土层长期内部水分运动和剧烈的风化作用,导致了土颗粒逐渐分散,有机质大量流失,土壤颗粒间的胶结作用降低。

2.2 初始含水率对土壤抗拉强度的影响

通过对初始含水率下不同层次崩岗土体进行抗拉强度试验,得到了崩岗不同层次土壤试样的抗拉强度特征曲线 TSCC,且将土壤特征曲线峰值强度对应的含水率定义峰值含水率 W_c ,峰值含水率 W_c 左边

部分为拉伸过程的左侧,右侧定义为拉伸过程的右侧,并用箭头进行分隔(图 2)。

表 1 崩岗不同层次土壤颗粒机械组成

土壤层次	粗砂	砂粒	粉粒	黏粒	土壤分类
	(2~5 mm)/%	(2~0.05 mm)/%	(0.05~0.002 mm)/%	(<0.002 mm)/%	
表土层	5.17±0.19ab	35.30±0.53a	23.91±0.23a	34.42±0.35b	黏壤土
红土层	9.16±0.15b	29.61±0.55a	24.45±0.11a	36.08±0.58b	黏壤土
红砂过渡层	6.73±0.23ab	28.12±0.75a	23.85±0.21a	41.28±0.53b	黏土
砂土层	2.31±0.14a	52.64±0.18b	29.55±0.07b	15.10±0.08a	砂土

注:表中数据为平均值±标准差;数据采用 Duncan 检验,同列相同字母表示不同土壤层次间差异不显著($P<0.01$)。

表 2 崩岗不同层次土壤基本性质

土壤层次	天然	干密度/	土粒相对密度/	毛管	有机质/
	含水量/%	(g·cm ⁻³)	(g·cm ⁻³)	孔隙度/%	(g·kg ⁻¹)
表土层	19.5±0.36	1.38±0.03	2.53±0.04	36.96±0.60	21.05±0.10
红土层	21.0±0.15	1.35±0.01	2.54±0.12	36.12±0.87	12.56±0.06
红砂过渡层	22.7±0.26	1.39±0.02	2.58±0.20	39.84±0.51	10.55±0.24
砂土层	23.3±0.15	1.41±0.02	2.56±0.07	42.26±0.91	8.86±0.08

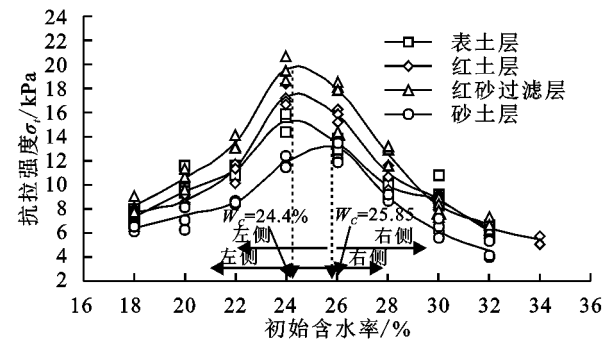


图 2 初始含水率下不同层次土体的抗拉强度特征

由土壤试样的拉伸强度特征曲线看出,初始含水率对崩岗土壤抗拉强度影响明显,且土壤抗拉强度特征曲线为单峰型,在 W_c 左侧,抗拉强度随着初始含水率的增加逐渐增大, W_c 右侧,抗拉强度随着初始含水率的增加逐渐减少。表土层、红土层和红砂过渡层抗拉特征曲线在峰值含水率 W_c (24.4%) 附近出现抗拉强度峰值,由表土层到红砂过渡层分别为 15.28, 17.31, 19.55 kPa。相比于其他 3 个土层,砂土层的抗拉强度特征曲线变化较缓,抗拉强度峰值在含水量 W_c (25.8%) 到达,为 13.06 kPa。同时,随着初始含水率 W 的进一步增加,抗拉强度特征曲线左侧的拉伸强度的增长率高于右侧的减小率。此外,随着初始含水率逐渐到达饱和含水率,初始含水率的变化对抗拉强度影响不再明显,逐渐趋于稳定。

2.3 初始含水率对土壤轴向拉伸长的影响

土壤的轴向拉伸长为试样达到抗拉强度时所对应的试样拉伸长度。由图 3 可知,水分对于轴向拉伸长影响明显,随着初始含水率的增大,不同层次土壤在拉应力作用下轴向拉伸长度呈现递增趋势,且不同层次土壤最大拉伸长对应的初始含水率也不同,红砂过渡层和砂

土层,最大的拉伸变化在初始含水率为 26% 时发生,红土层在初始含水率为 22% 和 30% 出现,表土层土壤是在初始含水率为 26% 时出现。在土壤接近饱和阶段,土壤拉伸进入稳定期,初始含水率的变化对于拉伸长的影响不再明显。

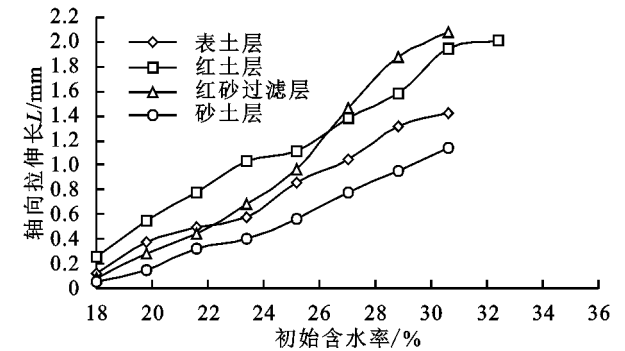


图 3 不同层次土体轴向抗拉长与不同初始含水率的关系

试样的拉伸长随不同初始含水率的变化规律有相同的特点,为了更好地说明初始含水率与不同层次土壤的抗拉长之间的相关关系,利用 4 种不同层次土壤的轴向拉伸率作为参考值,通过曲线拟合的方法来建立不同土壤初始含水量与轴向拉伸率的关系表达式。由图 4 可知,不同层次土壤的轴向拉伸率与初始含水率呈现出较好的线性函数关系,且相关系数较高。

2.4 初始含水率对土壤径向收缩的影响

土壤的径向收缩长为试样达到抗拉强度时所对应的试样径向收缩长度。由图 5 可知,不同层次土壤的径向收缩长随初始含水率的增加逐渐递增。在低初始含水率阶段,由于土壤颗粒之间黏结力低,没有发生径向收缩现象。同时不同层次土壤的径向收缩具有明显差异,红土层和红砂过渡层土壤,初始含水率为 22% 开始发生土壤径向收缩现象,表土层和砂

土层土壤,土壤径向收缩是在初始含水率为 24% 时出现。而土壤在饱和附近时,径向收缩长度继续呈

现增加趋势,这与饱和时抗拉强度和拉伸长度变化规律不同。

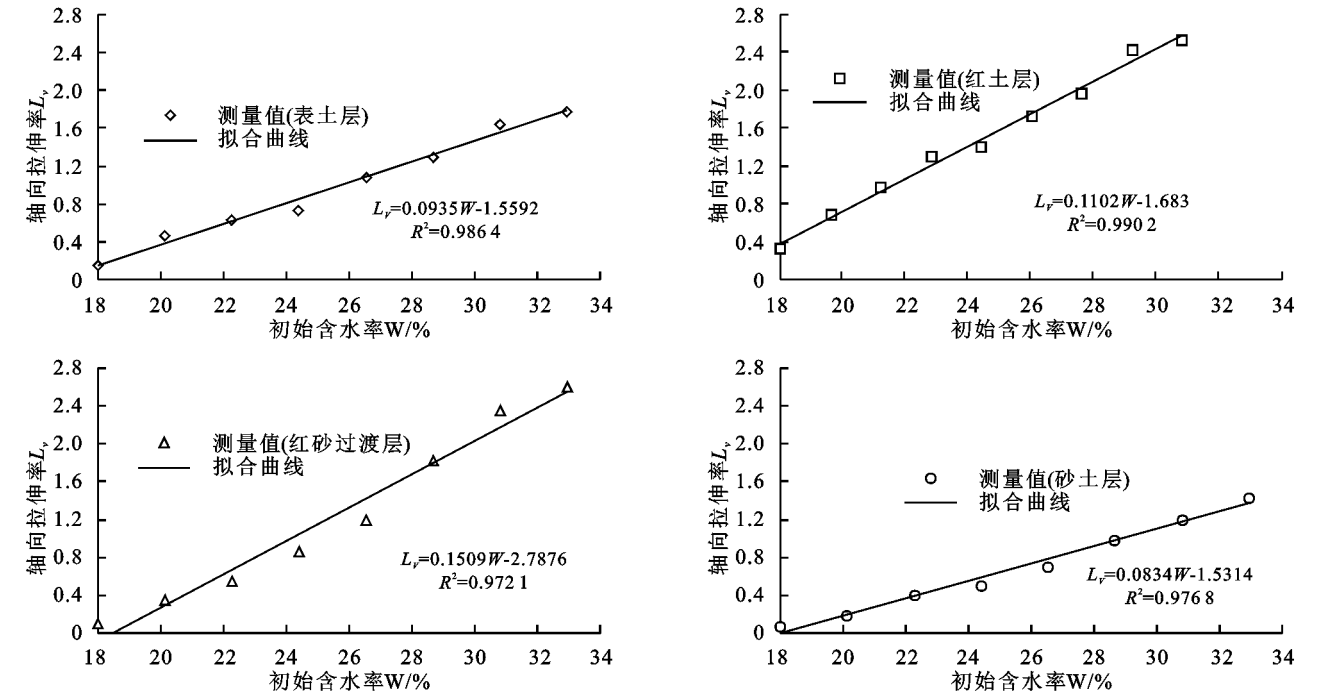


图 4 不同层次土体轴向拉伸率与初始含水率的关系

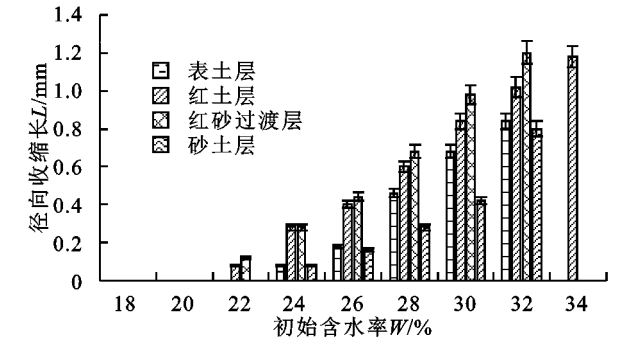


图 5 初始含水率下不同层次土体的径向收缩长分布

为了更好地描述拉伸过程中不同初始含水率与径向收缩长的关系,以径向收缩率为参考值,拟合不同层次土壤的径向收缩率与初始含水率之间的曲线。由图 6 可知,砂土层土壤的径向收缩率与初始含水率呈现指数函数关系,且相关系数较高。而其他层次土壤的径向收缩率与初始含水率却呈现出较好的线性函数关系,且具有较高的相关性。

2.5 拉伸过程中不同持水机制与拉伸断面形式

基质吸力通常是描述非饱和土壤力学性质的重要参数,水土特征曲线即基质吸力与土壤含水率的关系曲线,是描述土壤基质吸力的重要指标,对于部分饱和条件下的土壤,抗拉强度被称为吸力的函数,并且显著地取决于含水率^[19]。颗粒间水的存在形式、土-水之间作用方式以及土壤结构在拉伸过程中随含水率增加而变化,是导致土体抗拉强度变化的主要原因。之前对土壤水分保持机制的研究^[20-21]中,提出

将 SWCC 曲线分为 3 种机制:钟摆型、索状型和毛细管型。Lu 等^[22]在非饱和砂土抗拉强度的研究中,利用非饱和砂土的持水机制和抗拉强度特征的概念图解,说明不同区域之间的边界估计是基于具有简单立方填料的等球体,并且通常取决于颗粒尺寸分布和孔隙率。Tang 等^[13]在研究压实黏土的抗拉强度中,将土壤水分保持机制分为土壤团聚体结构、团聚体分散结构和分散结构 3 种。为了更好地描述拉伸过程中不同初始含水率土壤中结构变化特征,在之前土壤持水机制研究的基础之上,根据土壤团粒持水的特性,结合不同初始含水率的抗拉特征曲线和土水特征曲线,对不同初始含水率区间的土壤持水机制进行了分析,在低初始含水率(18%~22%)下,土壤持水机制主要为团粒持水机制,中初始含水率(22%~30%)下为团粒水桥联结持水机制,高初始含水率(30%~饱和)下为土壤毛细管持水机制。3 种土壤持水机制图解见图 7。土壤的土-水特征曲线 SWCC(以短划线表示)反映了基质吸力或毛细压力和土壤含水率的关系曲线,实线为土壤的抗拉特征曲线 TSCC,长划线表示砂土的抗拉强度与土壤初始含水率的关系。土体受到张拉破坏,主要是土壤颗粒间的联结处发生破坏,而对于不同层次土壤的抗拉断裂面在同一土壤持水机制下具有相似的特征,可以将不同持水机制下拉伸断裂面大致分为 3 种形式:平滑断裂面、粗糙断裂面和起伏断裂面。

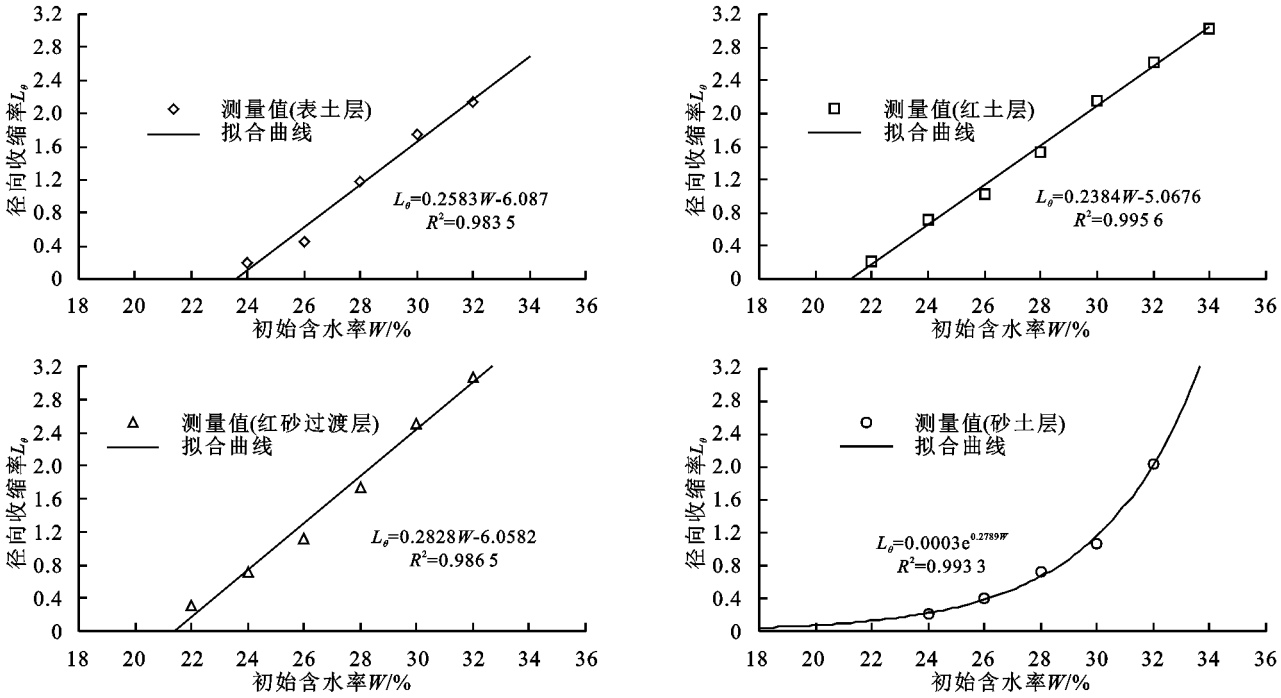
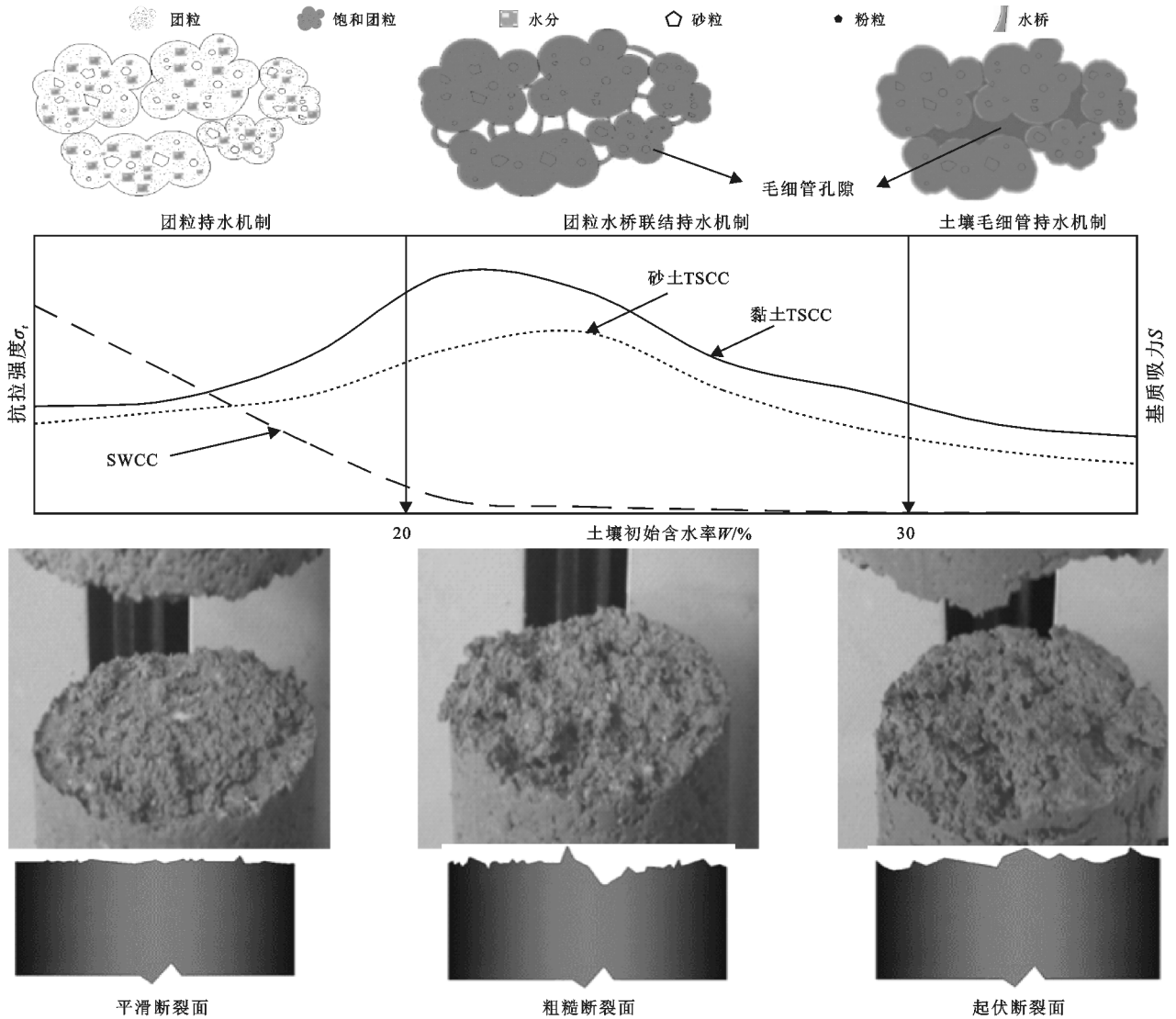


图 6 不同层次土壤径向收缩率与初始含水率的关系曲线



注:土壤起始含水量为 18%。

图 7 黏性土和砂土的持水机制、微观结构特征与抗拉强度特征

在低初始含水率下,土壤的水分多储存在土颗粒中,而少量的水以颗粒之间形成的水桥形式存在,此时土壤的持水机制主要为团粒持水机制。土壤颗粒之间存在着毛细管力和少量由水桥联结的吸附强度,产生了土壤内聚力和抗拉强度,虽然该持水机制段的土壤基质吸力强,但它对土壤颗粒之间的作用力和抗拉强度的影响却很小;同时存在于土壤颗粒之间的水分处于断开的状态,并且颗粒之间零散分布,由于吸力应力随着初始含水率的增加而增加,所以土壤受到的吸应力较小,故该阶段土壤水主要储存在小团粒或者单颗粒中,团粒之间相互隔离,颗粒之间被毛管空隙连接,在抗拉作用力下,土壤从团粒之间或土壤空隙处断裂,土壤的拉伸长也较小,故该阶段土壤的抗拉断裂面为平坦和微粗糙的。土壤抗拉作用力主要由土壤颗粒接触处或附近的黏结力和孔隙中的气传递的孔隙气压力提供。

随着初始含水率的增加,颗粒之间接触点上的水桥逐渐增多,颗粒之间逐渐达到所有可能最大数量的水桥,此时对应吸力应力为最大值,土壤抗拉强度也到达峰值。初始含水率进一步增加,抗拉强度呈现逐渐减少的趋势。土壤持水机制从单颗粒保水机制逐渐向颗粒水桥联结机制过渡,土壤中的颗粒间的空隙土壤颗粒间的水桥数量逐渐增多,水分占据了原来水桥之间的空隙,相互独立的水桥也逐渐从断开状态过渡到连接状态,此时所对应的结构被称为团粒—水桥结构。同时,颗粒—水桥所形成的毛管结合力也开始逐渐减少,颗粒间的基质吸力、由学物质的胶结力和凝聚力也随着水分增加开始降低,原来被水桥所联结的小颗粒也逐渐向较大颗粒聚集。随着团粒和小颗粒的储水逐渐饱和,水分开始进入土壤团粒之间的毛管空隙,团粒间水桥逐渐增多,团粒之间通过水桥联结,土壤受到抗拉作用力时,土体抗拉破坏并没有破坏土颗粒本身,只是沿着土颗粒间的联结作用力最小方向发生,故此阶段观察到粗糙的抗拉断裂面并伴有细小微裂隙分布。土壤抗拉强度主要由土壤团粒间的联结作用力、孔隙水气压力作用的结果。此阶段是土壤侵蚀发生的起点,如果有外营力的作用,土壤会整体或者部分连带滑落。

当样品接近饱和状态时,土壤持水机制过渡为毛细管持水机制,土壤颗粒之间的毛管空隙完全被水分占据,团粒被细分为单独的个体,显示出明显的分散结构,少部分小颗粒出现在毛管空隙中。团粒间的水桥完全消失,抗拉作用力只有小部分为颗粒间黏结力,土中没有孔隙气压力,只有孔隙水压力,孔隙水压力传递附加应力,同时土壤毛管吸力减少到非常低,

此时的抗拉特征曲线 TSCC 趋于平缓,水分对土壤的抗拉强度的影响不再显著,土壤在饱和状态下存在的抗拉强度主要由黏土颗粒之间的内聚力(范德瓦尔斯力、颗粒表面力)提供。故此机制下,抗拉断裂面为分布着数量的较长裂纹的起伏断裂面,土壤的抗拉强度主要是土壤孔隙水压力和大团粒内聚力。

3 崩岗土体拉伸特性垂直层次效应及坍塌破坏形式

3.1 崩岗土体拉伸特性垂直层次效应

对于崩岗不同层次的土壤,提供明显的内聚力或抗拉强度物理过程或机制可能是不同的。崩岗地貌是花岗岩风化的结果,崩岗不同层次体之间表现出不同的物理特征,随着风化程度的下降,有机质含量下降,土壤毛管孔隙度增加,土壤颗粒之间的黏结力逐渐减小,土壤之间的咬合作用也逐渐下降,从而导致相同含水量下抗拉强度的差异性特征。土壤颗粒组成状况也是影响土壤抗拉强度的重要因素。颗粒组成越细的土壤,黏结力越强,在一定程度上使土壤形成团状结构体,其抗抗拉能力也越高。对于黏性土壤,黏粒本身具有巨大的表面能和吸附能,在湿润时起黏结作用,土粒或者凝聚体黏结在一起,并且黏土颗粒半径较小,这样使得单位面积内土壤颗粒间接触数目增多,土颗粒间接触距离短,颗粒间的作用力大,导致抗拉强度也大。对于砂性土壤,土壤颗粒半径大,比表面积小,土颗粒间相互作用力小,土粒之间黏结能力弱,因而,抗拉强度较小。

为了定量描述不同水分条件下崩岗垂直层次土壤的拉拔能力,可对不同初始含水率下垂直层次抗拉强度的递变性进行说明。由图8可知,表土层向红土层与红土层向红砂过渡层递变曲线具有相同特征,抗拉强度增加百分比随着初始含水率的增加逐渐增加,后逐渐趋于稳定,初始含水率进一步增加,曲线逐渐下降,下降速率较快,然后趋于稳定状态。而对于红砂过度层向砂土层变化,在同一初始含水量下,抗拉强度减小百分比明显高于其他2个变化的增加百分比,并且在达到饱和含水率时,变化层又开始增加,并且增加幅度较大。同时,不同过渡土层抗拉强度存在差异性特征,相对于表土层递变红土层、红土层递变红砂过渡层,红砂过渡层到砂土层抗拉强度最大减小百分比(45%)远高于其他过渡土层的最大增加百分比(18%)。红砂过渡层和砂土层之间的抗拉强度差异较大,土层之间联结能力弱,土层接壤处易发生拉拔破坏,从而导致土体在基部产生拉张裂隙,进而在外作用力下发生边坡失稳和变形。

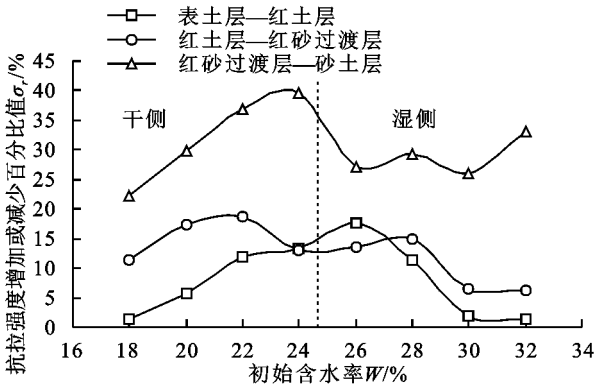


图 8 初始含水率下垂直结构土壤抗拉强度百分变化

3.2 崩岗土体坍塌破坏形式

不同层次土壤的拉伸强度差异性特征导致土层之间易产生张拉裂隙,增加了土体的渗透性,从而在降雨条件下造成土体自身重量增加,造成坡体从基部发生坍塌破坏。崩岗基部砂土层土壤的抗拉能力和抗冲刷能力弱,节理发育的花岗岩在风化过程中,砂土层土壤中产生有大量节理,易发生土壤侵蚀和张拉破坏,土体内部易产生拉张裂隙。降雨过程中,雨水通过裂隙进入土壤内部冲掏,以及受崩岗沟头和部分沟壁坡面迭水影响,导致土体基部被冲刷,进一步加速土体基部发生侵蚀破坏,进而形成长柱状或板状不稳定崩坍体。若侵蚀沟继续下切,裂隙加深,遇暴雨

土体吸水增重,则导致下部土体发生坍塌(图 9)。另外,崩岗沟壁或沟头由原来母岩节理沿袭发育,在重力和外营力作用下,内部土壤发生张合交替变化,导致土壤内部节理面土壤变得松散,在雨水渗入土体内部裂隙过程中,导致静水压力增加,软化土壤节理面,导致土体滑坡崩塌(图 9)。

另一方面,抗拉裂隙破坏了土体的完整性,土壤内部结构发生改变,引起整个土体强度下降。崩岗是由花岗岩岩体风化发育形成的,由垂直分布的特殊非均质土壤构成,不同层次土壤抗拉特性具有明显的差异性,导致发生张拉破坏的程度也存在很大差异,土体发生张拉破坏产生大小不均裂隙,相互切割穿透,极利于雨水或地表径流入渗,同时砂土层中大颗粒含量高,颗粒之间缺乏胶结物质,颗粒之间的黏结能力较低,且砂土层毛管空隙度高于其他土层,水分会继续向下侵蚀扩张,土体两侧的土壤由于抗拉特性差异,下部土壤孔隙多,松散程度高,一旦顶部土壤裂隙扩张到一定值,不再可以维持土体上部的自重,在重力的作用下发生突发性的塌陷(图 9)。原来土体被分割成为 2 个新的独立体,进而土体继续向坡表面集水区发展,继续发生相同的侵蚀破坏,上述过程长期反复进行,山体被逐渐被侵蚀相互分割,崩岗侵蚀逐渐严重并扩展。

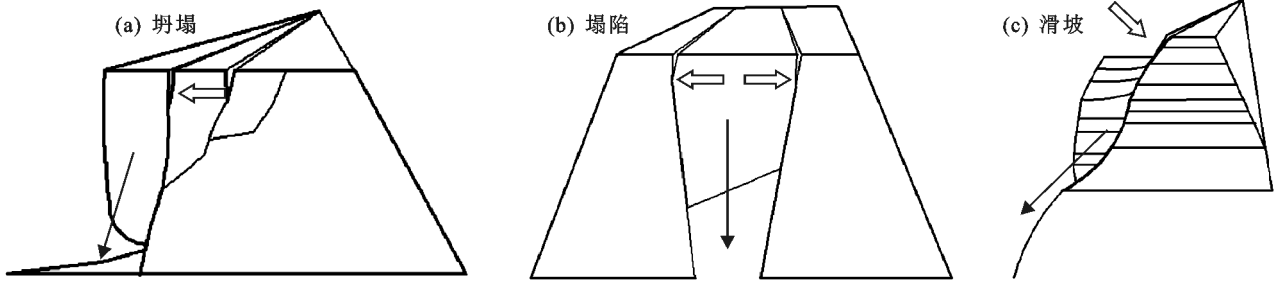


图 9 坡面拉张裂隙引起的侵蚀类型示意

4 结论

- (1)初始含水率对崩岗不同层次土壤的抗拉强度作用明显。土壤抗拉强度特征曲线(TSCC)为单峰型,随着含水量的增加,抗拉强度在曲线左侧递增,右侧递减。
- (2)崩岗不同层次土壤轴向拉伸长和径向收缩长初始含水率呈现正相关关系,并且轴向拉伸率和径向收缩率与初始含水率拟合出相关系数较高的函数关系曲线。
- (3)利用不同含水量的土壤持水机制分析了土壤抗拉强度来源和断裂面特征。团粒持水机制下拉伸断裂面大致是平坦和微粗糙的,团粒水桥联结机制下,拉伸断裂面大致是粗糙的并有细小微裂隙分布。毛细管持水机制下,拉伸断裂面是粗糙的,并且分布着一些较长裂纹。

(4)由于崩岗土壤特殊的非均质特性,不同层次过渡土壤抗拉强度的递变性特征明显。崩岗垂直层次土壤的抗拉特性差异导致拉张裂隙互相切割穿透,造成土体上部发生塌陷,边坡体分离,进一步加速崩岗的发育。

更好地了解崩岗土壤的抗拉强度特性对于改善崩岗土体结构中由张力引起的裂缝的危险性是很必要的;此外,也对崩岗治理有重要指导作用,例如挡土墙、填土坝、谷坊、崩岗防治工程措施等水土保持工程中都有涉及。然而,对于崩岗侵蚀的抗拉特性仍应进行广泛的研究,未来可以考虑崩岗侵蚀耦合的水力学效应和不同土体干湿循环对抗拉特性进行研究。

参考文献:

[1] 张萍,查轩.崩岗侵蚀研究进展[J].水土保持研究,2007,14(1):170-172,176.

- [2] 李思平.崩岗形成的岩土特性及其防治对策的研究[J].水土保持学报,1992,6(3):29-35.
- [3] 陈晓安,杨洁,熊永,等.红壤区崩岗侵蚀的土壤特性与影响因素研究[J].水利学报,2013,44(10):1175-1181.
- [4] 林敬兰,黄炎和,张德斌,等.水分对崩岗土体抗剪切特性的影响[J].水土保持学报,2013,27(3):55-58.
- [5] 张晓明,丁树文,蔡崇法.干湿效应下崩岗区岩土抗剪强度衰减非线性分析[J].农业工程学报,2012,28(5):241-245.
- [6] 卫杰,张晓明,张鹤,等.干湿循环对崩岗不同层次土体无侧限抗压强度的影响[J].水土保持学报,2016,30(5):107-111.
- [7] 汪和青,刘伟平.崩岗区岩土固结特性试验研究[J].南昌大学学报,2016,38(1):28-31.
- [8] 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.
- [9] Venkataramana K, Rao B, Singh D. A critical review of the methodologies employed for determination of tensile strength of fine-grained soils [J]. Journal of Testing & Evaluation, 2009, 37(2): 532-532.
- [10] 李昊达,唐朝生,徐其良,等.土体抗拉强度试验研究方法的进展[J].岩土力学,2016,37(增刊 2):175-186.
- [11] 叶朝良,何世鑫,侯艳乐,宝兰铁路重塑黄土的轴向拉伸试验研究[J].路基工程,2017(1):88-92.
- [12] He S X, Bai H B, Xu Z W. Evaluation on tensile behavior characteristics of undisturbed loess [J]. Energies, 2018, 11(8):1974-1991.
- [13] Tang C S, Pei X J, Wang D Y, et al. Tensile strength of compacted clayey soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 141 (4): e04014122.
- [14] 胡磊,张云,史卜涛,等.重塑黏土抗拉特性试验研究[J].水文地质工程地质,2017,44(4):98-104.
- [15] Tollenaar R N, Paassen L A V, Jommi C. Experimental evaluation of the effects of pull rate on the tensile behavior of a clay [J]. Applied Clay Science, 2017, 144: 131-140.
- [16] 丁树文,蔡崇法,张光远.鄂东南花岗地区重力侵蚀及崩岗形成规律的研究[J].南昌工程学院学报,1995(增刊 1):50-54.
- [17] Hillel D. Fundamentals of soil physics [M]. New York: Academic Press, 1980.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.
- [19] Lu N William J. Likos. Suction stress characteristic curve for unsaturated soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(2): 131-142.
- [20] Schubert H. Tensile strength of agglomerates [J]. Powder Technology, 1975, 11(2): 107-119.
- [21] Orr F M. Pendular rings between solids: Meniscus properties and capillary force [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1975, 67(4): 723-742.
- [22] Lu N, Wu B L, Tan C P. Tensile strength characteristics of unsaturated sands [J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2007, 133(2): 144-154.
- (上接第 40 页)
- [15] 隋鹏祥,张文可,梅楠,等.不同秸秆还田方式对春玉米产量、水分利用和根系生长的影响[J].水土保持学报,2018,32(4):255-261.
- [16] 史东梅,陈晏.紫色丘陵区农林混作模式的土壤抗冲性影响因素[J].中国农业科学,2008,41(5):1400-1409.
- [17] 孙国均,王晓凌,徐进章,等.半干旱黄土丘陵区垄沟集雨对紫花苜蓿人工草地土壤水分和产草量的影响[J].植物生态学报,2007,31(3):470-475.
- [18] 刘红岩,周正朝,刘俊娥,等.黄土区草被生长过程中土壤抗冲性及其与影响因素的关系[J].水土保持学报,2017,31(2):72-78.
- [19] Chen A Q, Zhang D, Xiong D H, et al. Effects of mechanical properties of surface soil on soil anti-scourability in Yuanmou dry-hot valley [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(5):108-113.
- [20] 谢贤健,张继.巨桉人工林下土壤团聚体稳定性及分形特征[J].水土保持学报,2012,26(6):175-179.
- [21] 陈浩,余毅敏,唐旭栋,等.浦阳江下游江岸草本植物根系对土壤抗冲性的影响[J].水土保持研究,2017,24(2):60-63.
- [22] 王宝驹,李隆,李鲁华,等.南疆枣麦复合系统中冬小麦根长密度、根表面积密度分布特征研究[J].广东农业科学,2013,40(17):1-4.
- [23] Vannoppen W, Baets S D, Keeble J, et al. How do root and soil characteristics affect the erosion-reducing potential of plant species? [J]. Ecological Engineering, 2017, 109:186-195.
- [24] 马中浩.南方红壤区玉米生育期坡地土壤抗侵蚀性特征[D].武汉:华中农业大学,2016.