

崩岗体剖面土壤收缩特性的空间变异性*

魏玉杰 吴新亮 蔡崇法

(华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要: 采用 SS-1 型土壤收缩仪测定崩岗体不同层次原状土壤的收缩特征曲线, 研究崩岗土壤收缩特性的空间变异性。结果表明: 脱水过程中崩岗土壤的线缩率呈现先增大后稳定的趋势, Logistic 模型可以较好地拟合线缩率与含水率间的关系 ($R^2 > 0.991$), 红土层与斑纹层的土壤收缩曲线分段现象明显, 而砂土层则变化平缓, 土壤质地越黏重线缩率越大; 崩岗不同层次土壤的收缩特性差异显著, 红土层与斑纹层的径向收缩应变大于轴向收缩应变, 在干燥过程中易产生张拉裂隙, 砂土层则相反, 在干燥过程中易发生表面下沉。相关性分析表明, 径向收缩应变与砂粒含量有极显著的负相关关系 ($r = -0.933$), 而轴向收缩应变受土壤质地影响不明显, 体积收缩应变和缩限与黏粒和砂粒分别呈显著正相关 ($r = 0.891$) 和负相关关系 ($r = -0.838$), 说明崩岗土体收缩过程受土壤质地及土壤基质吸力的综合影响。

关键词: 花岗岩土壤 崩岗 收缩特性 空间变异

中图分类号: S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)06-0153-07

Spatial Variability of Soil Shrinkage Characteristics in Profile of Slope Disintegration Body

Wei Yujie Wu Xinliang Cai Chongfa

(College of Resource and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Soil shrinkage curves of different depths in slope disintegration profiles were measured using soil shrinkage tester (SS-1 type) to investigate the spatial variability of soil shrinkage characteristics. Results showed that in the process of dehydration, soil linear shrinkage ratio displayed increase firstly and then attained to steady level. The relationship between linear shrinkage ratio and water content can be fitted well by the Logistic model. Soil shrinkage curves of red soil layer and speckle soil layer could be apparently divided into three stages. The variation rate in soil linear shrinkage ratio showed an unimodal trend with the decreasing of soil water content, which was not suited to that of sandy soil layer. Linear shrinkage ratio increased when soil texture changed to heavy. Significant difference was found in shrinkage characteristic between different layers of slope disintegration body. Radial shrinkage strain was larger than axial shrinkage strain for red soil layer and speckle soil layer but it was opposite for sandy soil layer, which indicated that horizontal cracks mainly occurred in surface layer during the soil dryness dynamic process. Correlation analysis showed that radial shrinkage strain was negatively correlated with sand content ($r = -0.933$); volume shrinkage strain and shrinkage limit were significantly correlated with clay content positively ($r = 0.891$) and sand content negatively ($r = -0.838$), which indicated that soil shrinkage process was influenced by both soil texture and soil water state. Measures could be taken to reduce drastic variation of soil water content to prevent damage from shrinkage behavior in slope stability.

Key words: Granite soil Slope disintegration Shrinkage characteristic Spatial variability

收稿日期: 2014-06-30 修回日期: 2014-08-26

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD31B04)和国家自然科学基金资助项目(41471231)

作者简介: 魏玉杰, 博士生, 主要从事崩岗边坡稳定性研究, E-mail: weiyujay@126.com

通讯作者: 蔡崇法, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀机理研究, E-mail: cfcai@mail.hzau.edu.cn

引言

土的收缩特征是指土体随着自身含水率降低而产生体积减小的现象。土壤在脱水收缩的过程中体积收缩应变超过4%~5%时,开始出现收缩裂隙,且随着含水率的减小,裂隙的长度和宽度逐渐增大,裂隙条数越来越多^[1]。土体收缩直接影响土体的工程性质,如降低土体强度、承载力和稳定性,增加土体的压缩性和渗透性^[2]。农业上,土壤因干旱收缩而产生的裂隙会破坏作物的根系,促进土壤水分的蒸发,改变地表水的径流及土壤水分、养分和微生物的迁移规律,导致水分、养分的损失及地下水污染,影响作物对养分的吸收和产量^[3]。此外,土体收缩产生的裂隙是影响土质边坡稳定性的关键性因素^[4],干缩裂隙破坏土体的完整性,削弱土体结构,同时促进降雨入渗,导致土体抗剪强度、安全系数减小,加重坡面水土流失,诱导滑坡等地质灾害的发生^[5]。因此,土壤的干燥收缩特征引起了国内外众多学者的广泛关注。

土壤的收缩变化受土壤物质组成、结构、容重、含水率、黏土矿物类型、液态孔隙数量、压力、吸附性阳离子种类、时间、温度等因素的影响^[6-9]。Haines^[10]提出了收缩曲线的概念用以描述土体随孔隙水变化的关系。Tariq等^[11]和Braudeau等^[12]将土壤收缩特征曲线划分为4个区域:结构收缩、正常收缩、残余收缩和零收缩。近几十年来,研究者针对不同类型和用途土壤的收缩特性开展了大量研究^[13],并提出了一些定量描述收缩特征曲线的模型,如三直线模型、Logistic模型、KM模型、Peng和Horn模型等^[14-15]。

崩岗是指在水力和重力综合作用下,山坡土体受破坏而崩塌和冲刷的现象,是我国南方花岗岩地区的一种特殊的水土流失现象,不同深度风化层的粒度和结构差异是崩岗形成和发育的基础^[16]。现有的关于崩岗侵蚀的研究多集中于土体的抗剪强度及侵蚀的发生过程。在崩岗区干湿交替频繁的气候环境中产生的土体裂隙是崩岗土体抗剪强度的控制因素^[17],而目前在崩岗侵蚀区土壤的收缩特性方面鲜有研究。研究崩岗区土体收缩特性不仅对花岗岩土体稳定性评价、侵蚀机理的完善具有重要意义,也是科学开展崩岗区综合治理的需要。本文以湖北省咸宁市通城县崩岗体的不同层次花岗岩土壤为研究对象,采用SS-1型土壤收缩仪测定其在干燥脱水过程中的体积变化,结合土壤水分特征曲线,研究土壤水分-基质吸力和线缩率、体缩率、径向收缩应变和轴向收缩应变的关系,了解崩岗体不同层次土壤

收缩特性的空间变异,为深入研究崩岗发生机理及预防治理工作奠定基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与采样

研究区位于湖北省东南部咸宁市通城县,湘、赣、鄂三省交界处,县域内崩岗数量达1100多处,占湖北省崩岗总数的47%,是崩岗集中分布的典型区域。全县平均气温16.7℃,多年平均降水量1512.8mm,多年平均径流深795mm。该地区花岗岩出露面积占地区总面积的70%,水土流失总面积为38410hm²,在通城地区开展崩岗研究工作具有很强的代表性。经过野外调查,在通城县五里镇五里社区(113°46'26"E,29°12'39"N)的典型崩岗发生区进行采样,分别在崩岗发生体不同部位选取红土层、斑纹层和砂土层的土壤(编号为WS₁、WS₂、WS₃和WX₁、WX₂、WX₃;WS表示五里上坡位,WX表示五里下坡位)进行试验。

在采样点,分别用离心机配套环刀(φ5cm×5cm)和收缩仪配套环刀(φ6.18cm×2cm)取原状土,采样后迅速将环刀试件放入塑料袋内密封包装,并采集散状土样放入取样袋内,风干后按物理性质分析方法的要求过筛备用。

1.2 基本性质测定

土壤基本物理性质按常规测定方法测定:土壤比重采用比重瓶法;容重采用环刀法;饱和渗透系数使用TST-55型土壤渗透仪测定;液塑限采用液塑限联合测定仪测定;机械组成采用筛分法结合吸管法测定^[18];土-水特征曲线采用离心法测定,并用Fredlund-Xing模型^[19]拟合(图1);矿物分析采用偏光显微镜和XRD法,结果表明花岗岩土壤原生矿物以石英为主,黏土矿物主要成分为高岭石,同时含少量的水云母。试验所用土壤的物理性质见表1。

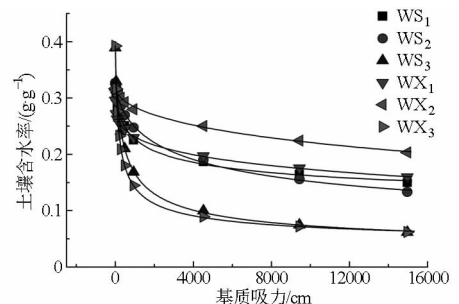


图1 不同层次崩岗体土壤的土-水特征曲线

Fig.1 Soil and water characteristic curves of different layer soils of slope disintegration body

1.3 收缩试验

土壤收缩特性的指标有线缩率、体缩率和缩限

等,可通过收缩试验求得。本试验所用的 SS-1 型土壤收缩仪主要由百分表、测板和多孔板组成。收缩试验在温度为 25℃ 的恒温箱内进行,试验时将试样放在多孔板上,试样表面中心放置测板,试样失水收缩后高度减小引起测板高度随之降低,位移传感器监测土样垂直方向上的收缩量由百分表显示(即

为试样收缩量),初始阶段每隔 1~2 h 测记百分表的读数并称整套试验装置和试样的质量,2 d 后每隔 4 h 记录数据,直到百分表 2 次读数基本不变,取出试样,在 105℃ 条件下干燥并称量,再用游标卡尺测定试样的高度及直径,计算干燥试样的体积,试验设置 3 组重复^[20]。

表 1 供试土壤基本物理性质指标

Tab.1 Physical property of test soil

土壤层次	坡位	编号	比重 G_s	饱和导水率 $K_s/(mm \cdot s^{-1})$	容重 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 $L_p/\%$	砂粒质量 分数/ $\%$	粉粒质量 分数/ $\%$	黏粒质量 分数/ $\%$	质地类型
红土层	上	WS ₁	2.54	1.197×10^{-3}	1.35	48.8	26.1	22.8	25.49	33.93	40.57	黏土
斑纹层	上	WS ₂	2.57	8.350×10^{-4}	1.37	44.9	24.7	20.1	23.51	52.48	24.00	粉壤土
砂土层	上	WS ₃	2.54	1.044×10^{-3}	1.22	27.2	24.1	3.1	59.89	29.19	10.93	砂壤土
红土层	下	WX ₁	2.57	4.886×10^{-3}	1.42	43.8	24.2	19.6	9.43	49.20	41.37	粉质黏壤土
斑纹层	下	WX ₂	2.51	4.280×10^{-4}	1.41	50.4	32.2	18.2	23.02	35.01	41.97	黏土
砂土层	下	WX ₃	2.54	2.180×10^{-3}	1.27	35.2	21.0	14.2	77.56	18.32	4.11	壤砂土

1.4 数据处理

根据收缩试验所得数据,计算土壤收缩特征指标,绘制土壤的收缩特征曲线。其中试样的线缩率 δ_{sl} 、轴向收缩应变 δ_s 、径向收缩应变 δ_r 、体积收缩应变 δ_v 和竖向收缩系数 λ_n 计算式^[20]为

$$\delta_{sl} = \frac{z_t - z_0}{h_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$\delta_s = \frac{h_0 - h_d}{h_0} \times 100\% \quad (2)$$

$$\delta_r = \frac{d_0 - d_d}{d_0} \times 100\% \quad (3)$$

$$\delta_v = \frac{V_0 - V_d}{V_0} \times 100\% \quad (4)$$

$$\lambda_n = \frac{\Delta\delta_{sl}}{\Delta w} \quad (5)$$

式中 z_t ——某时刻的百分表读数,mm
 z_0 ——试样初始百分表读数,mm
 h_0, h_d ——试样的初始、干燥后高度,mm
 d_0, d_d ——试样初始、干燥后直径,mm
 V_0, V_d ——试样初始、干燥后体积,cm³
 Δw ——收缩曲线上第 I 阶段(线缩率基本不变)2 点的含水率之差
 $\Delta\delta_{sl}$ —— Δw 对应的线缩率

为消除初始含水率差异对土壤收缩特性的影响,方便比较崩岗体不同层次土壤收缩特性差异,本文尝试提出以干燥土为对照的线性膨胀率指标 δ_{sw} , 其计算式^[21]为

$$\delta_{sw} = \frac{h_0 - (z_0 - z_t)}{h_d} \times 100\% \quad (6)$$

缩限 w_s 是指土样含水率减小而体积不再变化

的界限含水率,它在土壤收缩特征曲线上可直接求出。土壤干燥过程中,土体形变包括垂直和水平两个方面,即表面的下陷及裂隙的产生,无量纲几何因子 γ 能很好地反映土壤在垂直和水平方向形变的异质性, γ 可表示为^[7]

$$\gamma = \frac{\lg\left(1 - \frac{\Delta V}{V_0}\right)}{\lg\left(1 - \frac{\Delta h}{h_0}\right)} \quad (7)$$

式中 ΔV ——试样体积变化量,cm³

Δh ——试样高度变化量,mm

当只有垂直形变而无水平形变时, $\gamma = 1$;只有水平形变时, $\gamma \rightarrow \infty$;当以垂直变形为主时, $1 < \gamma < 3$;当以水平变形为主时, $\gamma > 3$;形变各向同性时, $\gamma = 3$ 。

数据通过 SPSS 18.0 及 Origin Pro 8.0 软件进行处理和分析。

2 结果与分析

2.1 收缩特征曲线

崩岗体不同层次土壤线缩率与含水率的关系见图 2。由图 2 可知,线缩率均随着含水率的减小逐渐增大并最终趋于稳定;相同含水率条件下,线缩率总体上表现出随黏粒含量增加而增加的趋势;WS₁、WX₁、WX₂、WS₂ 失水收缩过程大致分为 3 个阶段:正常收缩、残余收缩和零收缩。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(如 WS₁ 的含水率达到 0.05 g/g 左右)时线缩率基本不变,达到稳定。砂壤土 WS₃ 与壤砂土 WX₃

的线缩率随含水率减小而平缓增加,3个阶段差异不明显,即整个收缩曲线变化比较平缓。采用 Logistic 模型^[22]拟合土壤收缩特征曲线的拟合参数见表2,决定系数 R^2 均在 0.99 以上,表明此模型能很好地适用于花岗岩土壤收缩特征曲线的拟合。

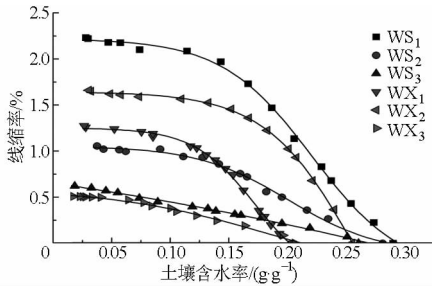


图2 土壤线缩率与含水率的关系曲线

Fig. 2 Relationship between linear shrinkage ratio and soil moisture content

表2 Logistic模型的拟合参数

Tab. 2 Parameters of Logistic model

土壤编号	a	b	c	m	R^2
WS ₁	-0.32	26.00	2.54	0.22	0.998 0
WS ₂	-0.12	25.58	1.17	0.20	0.993 5
WS ₃	-19.67	2.05	21.28	1.49	0.994 1
WX ₁	-0.41	37.98	1.66	0.17	0.997 8
WX ₂	-1.83	25.89	3.48	0.26	0.998 8
WX ₃	-0.40	14.63	0.99	0.19	0.991 1

注: Logistic 模型表达式为 $\delta_{sl} = a + \frac{c}{1 + e^{b(w-m)}}$ 。表中 a 、 b 、 c 、 m 为 Logistic 模型表达式中的参数。下同。

通过 Logistic 模型建立线缩率对含水率一阶导数模型(图3),可以得到崩岗体不同层次土壤线缩率随土壤含水率的变化速率。对于红土层和斑纹层土壤而言,除 WX₂ 外,其他土壤线缩率对含水率一阶导数随着含水率呈现“单峰”变化趋势^[13],土壤 WS₁、WS₂ 和 WX₁ 分别在 0.23、0.20、0.18 g/g 处达到最大值,分别为 0.163、0.075 和 0.157,在这些含水率两侧附近线缩率变化速率变化较快,在与这些值距离较大处,线缩率变化速率较低而且变化较平缓;WX₂ 的线缩率变化速率随含水率减小逐渐降低。砂土层土壤 WS₃ 和 WX₃ 线缩率变化速率为随含水率减小平缓降低,变化范围分别为小于 0.030 和小于 0.035。对于 WS 点来说,红土层 > 斑纹层 > 砂土层;而对于 WX 点,红土层与斑纹层线缩率变化速率因土壤含水率不同而变化,在初始土壤干燥阶段其线缩率变化速率明显高于砂土层。说明不同崩岗层次土壤轴向收缩变化速率差异较大,且受土壤质地及含水率的影响。因此在崩岗治理过程中,可以通过改善土壤质地、控制土壤收缩过程中特殊含水率等措施来减小土体收缩造成的危害。

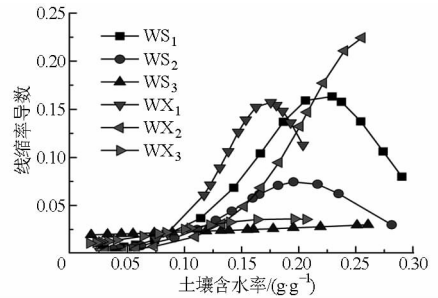


图3 根据 Logistic 模型推导得线缩率对含水率一阶导数
Fig. 3 The first derivative of linear shrinkage ratio vs soil water content derived by Logistic model

为消除初始含水率差异对土壤线缩率的影响,更加直观地比较不同层次崩岗体土壤收缩特性的差异,绘制土壤线性膨胀率与含水率的关系(图4)。相关性分析表明,线性膨胀率与线缩率间呈极显著线性负相关关系($r = -1.000$)。由图4可知,与线缩率变化趋势相反,土壤线性膨胀率随含水率变化同样可以分为3个阶段:土壤含水率低于缩限时,土壤线性膨胀率很小而且变化平缓,不同土层的线性膨胀率差异较小,都低于 0.15%;随着含水率增加,线性膨胀率缓慢增加,各层土壤间差异逐渐增大,而且普遍表现为红土层 > 斑纹层 > 砂土层;随着含水率继续增加,土壤线性膨胀率增长较快,接近线性增加,各土层间差异逐渐增大,总体表现为红土层 > 斑纹层 > 砂土层,这与不同土壤间线缩率的变化稍有不同。

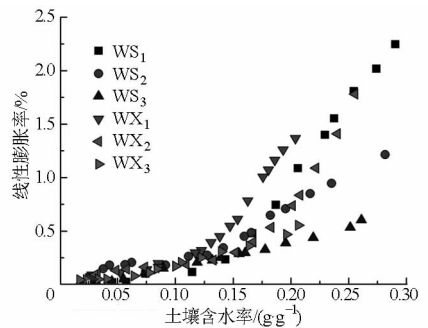


图4 土壤线性膨胀率和含水率的关系

Fig. 4 Relationship between linear expansion ratio and soil moisture content

2.2 收缩特征指标变异

崩岗体不同层次原状土的收缩特性参数如表3所示。不同层次土壤径向收缩应变、体积收缩应变、收缩系数与缩限及其对应线缩率的变化规律相似,总体为红土层 > 斑纹层 > 砂土层;而对于轴向收缩应变而言,斑纹层土壤数值最大。WS₁ 的缩限对应线缩率、径向收缩应变和体积收缩应变最大,分别为 1.871%、3.011% 和 7.425%,而 WX₂ 收缩系数和缩限最大,分别为 0.201 和 0.18 g/g,砂土层 WS₃ 与

WX₃的收缩特征指标明显低于其他 2 个土层。WS₁、WS₂、WX₁与 WX₂均为黏性土,其径向收缩应变均大于轴向收缩应变,砂质土 WS₃与 WX₃则相反。WS₁与 WX₁的几何因子 γ 均大于 3,表明其收缩形变以水平向为主,在收缩过程中会产生裂隙;WX₃的 γ 值为 2.1,表明其收缩形变以垂直向为主,其余各点的 γ 值最终约为 3,表明其在干燥收缩过程中产生了三维体积收缩,但未产生裂隙,这与野外

观测的结果相同。总体而言,砂土层土壤收缩应变较小,以垂直方向上的轴向收缩为主,野外表现为地面前下沉;而表层或亚表层黏质土壤收缩应变较大,且以水平方向上的径向收缩为主,野外表现主要为易产生张拉裂隙,这会降低土体强度,并为雨水下渗提供通道。在今后崩岗土体边坡稳定性评价、土壤侵蚀预测和花岗岩土壤水分管理中应考虑不同层次土壤收缩特性的差异^[4-5,17]。

表 3 供试土壤收缩特征参数

Tab. 3 Shrinkage characteristic parameters of test soils

编号	初始含水率 $w_0/(g \cdot g^{-1})$	缩限 $w_s/(g \cdot g^{-1})$	缩限线缩率 $\delta_{sl-s}/\%$	塑限线缩率 $\delta_{sl-p}/\%$	径向收缩 应变 $\delta_r/\%$	轴向收缩 应变 $\delta_s/\%$	体积收缩 应变 $\delta_v/\%$	收缩系数 λ_n	几何 因子 γ
WS ₁	0.29	0.15	1.871	0.338	3.011	1.874	7.425	0.180	4.1
WS ₂	0.27	0.13	0.897	0.159	2.675	2.377	6.545	0.122	2.8
WS ₃	0.26	0.45	0.565	0.087	0.968	1.175	3.589	0.033	3.1
WX ₁	0.20	0.12	1.085	—	2.588	1.089	6.142	0.163	5.8
WX ₂	0.26	0.18	1.285	—	2.517	2.088	6.953	0.201	3.4
WX ₃	0.21	0.04	0.490	0.003	0.742	1.888	3.901	0.040	2.1

土壤收缩特性参数与土壤物理性质间相关分析(表 4)表明,径向收缩应变 δ_r 与砂粒含量呈极显著负相关关系($r = -0.933, p < 0.01$),与液限 w_L 、塑性指数 L_p 及黏粒含量呈显著正相关关系($r > 0.826, p < 0.05$);体积收缩应变 δ_v 、缩限 w_s 、收缩系数 λ_n 与黏粒和砂粒含量分别呈显著正相关($r > 0.891, p < 0.05$)和负相关关系($r < -0.838, p < 0.05$);线缩率(即缩限和塑限对应线缩率)与黏粒含量呈显著正相关关系($r > 0.848$)。说明土壤中砂粒、黏粒含量是影响土壤收缩特性的关键因素。通过土壤收缩特征参数间相关分析(表 5)发现,除轴向收缩应变外,其他收缩特征参数间存在显著或极显著正相关关系($r > 0.820, p < 0.05$),其

中体积收缩应变与其他指标间相关性最高($r > 0.879, p < 0.05$),表明土壤收缩过程中,径向收缩对土体形变的贡献较大。根据体积收缩应变 δ_v 和黏粒含量的关系(图 5)可知,试验土壤的体积收缩应变 δ_v 随黏粒含量的增加而增加。此外红土层的 WS₁与 WX₁黏粒含量基本接近,但它们的收缩特征曲线差异明显,说明除黏粒含量外,土壤结构的紧实状况也可能影响土壤收缩程度^[23]。在崩岗治理和农业利用过程中可以通过翻耕、黏砂混合、提高地表植被覆盖度等方式来改善土壤质地和结构,增强土壤保水能力并减缓干燥过程中土壤水分的剧烈变化,从而减少土壤裂隙的产生,提高土体稳定性。

表 4 土壤收缩特征参数与土壤物理性质间的相关系数矩阵

Tab. 4 Correlation coefficient between soil shrinkage characteristic parameters and physical properties

参数	初始含水率 w_0	容重 ρ	比重 G_s	饱和导水率 K_s	液限 w_L	塑限 w_p	塑性指数 L_p	砂粒质量分数	粉粒质量分数	黏粒质量分数
缩限 w_s	0.455	-0.640	0.346	-0.426	-0.486	-0.555	-0.319	-0.838 *	0.540	0.901 *
缩限线缩率 δ_{sl-s}	0.542	-0.219	-0.099	0.802	0.560	0.715	0.593	-0.680	0.285	0.848 *
塑限线缩率 δ_{sl-p}	0.886	-0.015	-0.537	0.768	0.908	0.637	0.653	-0.843	0.453	0.991 **
径向收缩应变 δ_r	0.439	0.268	0.181	0.021	0.889 *	0.549	0.826 *	-0.933 **	0.736	0.901 *
轴向收缩应变 δ_s	0.418	-0.293	-0.192	-0.643	0.523	0.301	0.495	-0.059	0.077	0.034
体积收缩应变 δ_v	0.454	-0.806	0.145	-0.490	-0.605	-0.536	-0.477	-0.857 *	0.592	0.891 *
收缩系数 λ_n	0.276	-0.595	0.261	-0.520	-0.375	-0.411	-0.255	-0.875 *	0.523	0.972 **

注:**、* 分别表示在 $p < 0.01$ 和 $p < 0.05$ 水平达到极显著和显著水平。下同。a 表示相关分析中样本数 $n = 4$ 。

表5 土壤收缩特征参数间的相关系数矩阵

Tab.5 Correlation coefficient between soil shrinkage characteristic parameters

参数	缩限 w_s	缩限线缩率 δ_{sl-s}	径向收缩应变 δ_r	轴向收缩应变 δ_s	体积收缩应变 δ_v	收缩系数 λ_n
缩限 w_s	1.000					
缩限线缩率 δ_{sl-s}	0.820*	1.000				
径向收缩应变 δ_r	0.912*	0.842*	1.000			
轴向收缩应变 δ_s	0.443	0.202	0.305	1.000		
体积收缩应变 δ_v	0.961**	0.879*	0.972**	0.444	1.000	
收缩系数 λ_n	0.963**	0.854*	0.911*	0.253	0.947**	1.000

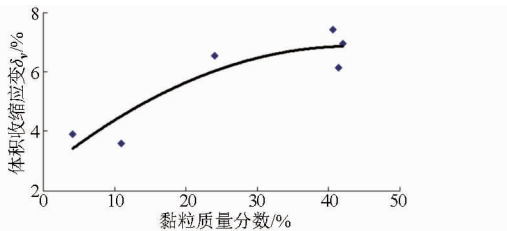


图5 土壤体积收缩应变与黏粒质量分数的关系

Fig.5 Relationship between soil volumetric shrinkage strain and clay content

3 讨论

根据土壤水分特征曲线求得土壤的基质吸力,得到土壤线缩率与基质吸力的关系曲线(图6),这对揭示土体形变的内在机理具有重要意义。

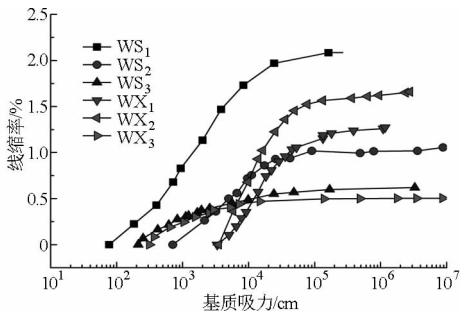


图6 土壤线缩率与基质吸力的关系曲线

Fig.6 Relationship between linear shrinkage ratio and soil matrix suction

对于红土层 WS_1 、 WX_1 和斑纹层 WX_2 、 WS_2 失水过程中线缩率的变化有明显的分段现象,当基质吸力较低时,土颗粒间孔隙水压力大于孔隙气压力,随着土壤颗粒间大孔隙的水分被不断蒸发,土体积收缩量与失水量相当^[24],此时土体的收缩幅度较大;随着基质吸力继续增加,土颗粒表面产生的短程电场促使相邻的孔隙水分子相互吸引和重新排列,土壤的骨架结构逐渐形成,其抵抗变形的能力逐渐增强,孔隙水弯液面逐渐向土内部发展,此时土体减小量小于水分的减小量,土体收缩幅度逐渐减小;随着基质吸力的进一步增大,土中颗粒形成的骨架结构足以抵抗毛细效应产生的孔隙气压力,土体达到最大密度,线缩率达到最大值且保持稳定,基质吸力的继续增大并不引起土体积的减小,此时土体临界

含水率即为缩限,其对应的基质吸力为缩限吸力^[25],此后土体积不再发生变化。此外,黏粒含量越高,土体中微孔隙含量越高,失水过程中土体收缩幅度越大,相应的线缩率越大。

对于砂土层 WS_3 与 WX_3 ,在失水收缩过程中线缩率随基质吸力变化的分段现象不明显,而且线缩率明显低于其他层次,这可能是由于砂粒表面积与表面电荷相对较小,土体中以大孔隙为主,对水分子和水中离子的吸附能力弱,而且土体骨架为砂粒,颗粒间排列稳定,受含水率变化影响较小,使得砂粒对土体积收缩表现为抑制作用^[26-27]。

4 结论

(1) 崩岗体不同层次土壤的线缩率均随着含水率的减小呈现先增大后稳定的变化趋势,红土层与斑纹层土壤的收缩特征曲线可明显的分为正常收缩、残余收缩和零收缩3个阶段,而砂土层的收缩特征曲线则不易划分;在正常收缩阶段,崩岗体各层土壤收缩特性表现为红土层 > 斑纹层 > 砂土层。线缩率与黏粒含量呈显著正相关关系,此外土壤结构的紧实程度以及土壤含水率对土体轴向收缩及线缩率变化速率也有影响,在崩岗区综合治理和花岗岩土壤农业利用过程中,可以通过改善土壤质地、增加地表覆盖度、减缓土壤水分变化等措施来降低土壤收缩造成的危害。

(2) 除轴向收缩应变外,崩岗土壤的收缩特征参数与土壤黏粒或砂粒含量相关性显著 ($|r| > 0.838$, $p < 0.05$),说明花岗岩土壤收缩过程受黏粒和砂粒含量影响明显,干燥过程中土壤自身结构强度和水分能态决定了土体的收缩特性,其中红土层土壤黏粒含量较高,在干燥过程中以径向收缩应变为主,易产生裂隙,砂土层则以轴向收缩应变为主,在表层土壤保持完好的情况下,砂土层结构稳定性较好。对于崩岗表层土壤来说,可以采用种植植物或布设土工布等增加地表覆盖度的方法来抑制表土在脱水过程中的土体收缩、失稳现象,防止因土体收缩产生裂隙造成雨季水分下渗进而导致崩岗侵蚀的加剧。

参 考 文 献

- 1 Kleppe J H, Olson R E. Desiccation cracking of soil barriers [C] // Johnson A I, Frobels N J, Cavalli N J, et al. Hydraulic Barriers in Soil and Rock. ASTM STP 874, 1985: 263 - 275.
- 2 Rayhani M H T, Yanful E K, Fakher A. Desiccation-induced cracking and its effect on the hydraulic conductivity of clayey soils from Iran[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(3): 276 - 283.
- 3 Bronswijk J J B, Hamminga W, Oostindie K. Field-scale solute transport in a heavy clay soil [J]. Water Resources Research, 1995, 31(3): 517 - 526.
- 4 姚海林, 郑少河, 陈守义. 考虑裂隙及雨水入渗影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 606 - 609.
Yao Hailin, Zheng Shaohe, Chen Shouyi. Analysis on the slope stability of expansive soils considering cracks and infiltration of rain[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(5): 606 - 609. (in Chinese)
- 5 Stolte J, Ritsema C J, De Roo A P J. Effects of crust and cracks on simulated catchment discharge and soil loss [J]. Journal of Hydrology, 1997, 195(1): 279 - 290.
- 6 Du Y, Li S, Hayashi S. Swelling-shrinkage properties and soil improvement of compacted expansive soil, Ning-Liang Highway, China [J]. Engineering Geology, 1999, 53(3): 351 - 358.
- 7 Boivin P, Garnier P, Tessier D. Relationship between clay content, clay type, and shrinkage properties of soil samples [J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(7): 1145 - 1153.
- 8 Di Maio C, Santoli L, Schiavone P. Volume change behavior of clays; the influence of mineral composition, pore fluid composition and stress state [J]. Mechanics of Materials, 2004, 36(5): 435 - 451.
- 9 Wilson B, Ghosh S, Barnes P, et al. Drying temperature effects on bulk density and carbon density determination in soils of northern New South Wales [J]. Soil Research, 2010, 47(8): 781 - 787.
- 10 Haines W B. The volume changes associated with variations of water content in soils [J]. Journal of Agricultural Science, 1923, 13(3): 296 - 311.
- 11 Tariq A R, Durnford D S. Analytical volume change model for swelling clay soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(5): 1183 - 1187.
- 12 Braudeau E, Costantini J M, Bellier G, et al. New device and method for soil shrinkage curve measurement and characterization [J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(3): 525 - 535.
- 13 Peng X, Horn R. Identifying six types of soil shrinkage curves from a large set of experimental data [J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(2): 372 - 381.
- 14 吕殿青, 邵明安. 土壤干湿收缩特征研究进展 [J]. 土壤通报, 2003, 34(3): 225 - 228.
Lü Dianqing, Shao Ming'an. A review of soil shrinkage characteristics [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2003, 34(3): 225 - 228. (in Chinese)
- 15 Peng X, Horn R. Modeling soil shrinkage curve across a wide range of soil types [J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(3): 584 - 592.
- 16 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.
Wu Zhifeng, Wang Jizeng. Relationship between slope disintegration and rock-soil characteristics of granite weathering mantle in south China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(2): 31 - 35. (in Chinese)
- 17 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.
Zhang Xiaoming, Ding Shuwen, Cai Chongfa. Effects of drying and wetting on nonlinear decay of soil shear strength in slope disintegration erosion area [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(5): 241 - 245. (in Chinese)
- 18 依艳丽. 土壤物理研究法 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2009.
- 19 Fredlund D G, Xing A. Equations for the soil-water characteristics curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(3): 521 - 532.
- 20 侯龙清, 黎剑华. 土力学试验 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- 21 Grossman R B, Brasher B R, Franzmeier D P, et al. Linear extensibility as calculated from natural clod bulk density measurements [J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1968, 32(4): 570 - 573.
- 22 Nelder J A. An alternative form of a generalized logistic equation [J]. Biometrics, 1962, 18(4): 614 - 616.
- 23 陈祯, 崔远来, 刘方平. 不同灌溉施肥模式下土壤湿胀干缩特征曲线及其滞后效应 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(11): 78 - 84.
Chen Zhen, Cui Yuanlai, Liu Fangping. Soil wet expansion and dry shrinkage characteristic curve and hysteresis effect under different irrigation and fertilization mode [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(11): 78 - 84. (in Chinese)
- 24 Chertkov V Y. Modeling the shrinkage curve of soil clay pastes [J]. Geoderma, 2003, 112(1): 71 - 95.
- 25 汪东林, 栾茂田, 杨庆. 非饱和重塑黏土干湿循环特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1862 - 1867.
Wang Donglin, Luan Maotian, Yang Qing. Experimental study of behavior of unsaturated remolded clay subjected to drying and wetting cyclic paths [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1862 - 1867. (in Chinese)
- 26 Indrawan I G B, Rahardjo H, Leong E C. Effects of coarse-grained materials on properties of residual soil [J]. Engineering Geology, 2006, 82(3): 154 - 164.
- 27 刘平, 张虎元, 严耿升, 等. 土建筑遗址表部土体收缩特征曲线测定 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 842 - 849.
Liu Ping, Zhang Huiyuan, Yan Gengsheng, et al. Determination of soil shrinkage characteristic curve of surface soil on ancient earthen architectures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 842 - 849. (in Chinese)