

DOI: 10.11766/trxb202012240707

文慧, 倪世民, 王艺彤, 王军光, 蔡崇法. 赣南崩岗区不同植被类型粉砂质土壤抗剪强度及其影响因素[J]. 土壤学报, 2022, 59(6): 1517–1526.

WEN Hui, NI Shimin, WANG Yitong, WANG Junguang, CAI Chongfa. A Study on Silty Soil Shear Strength and Its Influencing Factors in Different Vegetation Types in Benggang Erosion Area of Southern Jiangxi[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(6): 1517–1526.

赣南崩岗区不同植被类型粉砂质土壤抗剪强度及其影响因素*

文 慧^{1, 2}, 倪世民¹, 王艺彤¹, 王军光^{1†}, 蔡崇法¹

(1. 华中农业大学水土保持研究中心, 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070; 2. 江西省水利科学院, 江西省鄱阳湖水资源与环境重点实验室, 南昌 330029)

摘要:为探究南方崩岗侵蚀区不同植被类型下土壤抗剪强度的分布规律,明确崩岗治理后土壤基本性质对抗剪强度的影响。以 3 种不同植被类型下崩岗各部位表层土壤为研究对象,对土壤基本性质的变化规律、抗剪强度参数变化特征及其影响因素,利用路径分析和主成分分析进行研究。结果表明,土壤抗剪强度由大到小依次为林地>柑橘地>灌木地>草地>侵蚀区,且柑橘地较灌木地土壤抗剪强度提高了 29.74%。随地势降低,毛管孔隙度总体呈升高趋势,黏粒、粉粒等细颗粒物占比也不断上升,汇聚于坡下。随着恢复时间增加,土壤养分含量逐渐上升。土壤黏聚力在同种植被类型下,随着恢复年限增加,表现为递增趋势,内摩擦角则表现为缓慢递减趋势,均表现为上坡最大。其中有机质、饱和导水率与黏聚力存在极显著相关关系,含水率、容重与内摩擦角也存在极显著相关关系。试验以总孔隙、毛管孔隙、黏粒含量和土壤饱和导水率来表征土壤饱和状态下的抗剪强度,建立了预测方程($R^2=0.80$, $RMSE=5.95$),结果表明该方程的可信度和预测精度均较高。研究结果揭示了不同植被类型抗剪强度的控制因素,可为南方崩岗侵蚀区恢复过程提供一定的参考。

关键词:崩岗; 植被类型; 土壤基本性质; 土壤抗剪强度

中图分类号: S157.1 文献标志码: A

A Study on Silty Soil Shear Strength and Its Influencing Factors in Different Vegetation Types in Benggang Erosion Area of Southern Jiangxi

WEN Hui^{1, 2}, NI Shimin¹, WANG Yitong¹, WANG Junguang^{1†}, CAI Chongfa¹

(1. *Research Center of Water and Soil Conservation, Huazhong Agricultural University, Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China*; 2. *Jiangxi Province Key Laboratory of Water Resources and Environment of Poyang Lake, Jiangxi Provincial Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, China*)

Abstract: [Objective] This study was designed to explore the distribution of soil shear strength under different vegetation restorations types in the erosion area of Benggang in southern Jiangxi, and to clarify the influence of soil basic properties on shear

* 国家自然科学基金项目(42177317, 41630858)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42177317, 41630858)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: jgwang@mail.hzau.edu.cn

作者简介: 文 慧(1995—),女,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与环境生态研究。E-mail: 734951507@qq.com

收稿日期: 2020-12-24; 收到修改稿日期: 2021-11-03; 网络首发日期(www.cnki.net): 2022-04-01

strength after restoration. 【Method】 The surface soil of various parts of the Benggang under three different vegetation types was used as our research object. We analyzed and studied the changes in soil basic properties and the change characteristics of shear strength parameters and their influencing factors using Path analysis and principal component analysis. 【Result】 The results showed that the shear strength from high to low was forest > arboreal forest > scrubland > grassland > erosion area, and the soil shear strength of arboreal forest was 29.74% higher than that of scrubland. As the terrain decreases, the capillary pores were increasing, and the proportion of fine particles such as clay particles and powder particles was also increased and converged under the lower slope. Moreover, the soil nutrient content was gradually increased as the recovery time increased. The cohesion of Benggang soil showed an increasing trend as the recovery period increased while the internal friction angle showed a slowly decreasing trend, and reached the maximum on the upper slope. Importantly, the cohesive force had a very significant correlation with organic matter and saturated hydraulic conductivity, and the internal friction angle also had a significant correlation with water content and bulk density. The total pores, capillary pores, clay content and soil saturated hydraulic conductivity were selected to characterize the shear strength of the soil undersaturation and a prediction equation ($R^2 = 0.80$, RMSE = 5.95) was established, and it showed high reliability in prediction accuracy. 【Conclusion】 The research results reveal the control factors of shear strength under different vegetation types, which can provide a certain reference for soil restoration processes in the southern Benggang eroded area.

Key words: Benggang; Vegetation types; Soil basic properties; Soil shear strength

崩岗是指山坡土体受水力、重力共同作用出现崩塌侵蚀而导致岩土稳定性下降的现象, 主要发生在我国南方花岗岩地区, 是造成生态环境恶化的重要原因, 常被形象地称为“生态溃疡”^[1-2]。根据 2005 年水利部的崩岗调查结果可知, 我国南方崩岗集中分布在湖北、湖南、江西、安徽、福建、广东、广西等 7 省, 其中崩塌面积在 60 m² 以上的崩岗有 23.91 万个, 崩塌总面积达到 1 220 km², 防治总面积在 2 436 km²^[3-5]。崩岗侵蚀造成表土流失, 导致土壤贫瘠, 严重毁坏土地资源, 危害当地民众生产生活。花岗岩崩岗的原生节理与风化壳中次生裂缝、松散的土壤结构以及降雨造成的水力侵蚀可归为崩岗的三大成因^[6-8]。土壤抗剪强度是指土体抵抗剪切破坏的最大能力, 是表征土体力学的一个重要指标, 也是水力侵蚀中基于过程的土壤侵蚀模型的重要参数, 当土体剪应力大于土体自身抗剪强度时, 土体将被剪切破坏, 土体稳定性也因此降低^[9-12]。

近年来相关研究者在土壤抗剪强度变化规律及其影响因素方面做了大量研究, 主要集中于不同剪切速率、含水量、土壤碱度等条件下的抗剪强度变化^[13-16]。陈红星等^[14]研究了土壤含水率与土壤抗剪强度参数之间的关系, 结果表明, 土壤黏聚力随着土壤含水率增加呈现出先增后减的趋势, 内摩擦角则一直呈现降低趋势, 说明含水率是影响抗剪强度指标的重要参数。但 Singh 和 Thompson^[17]发现, 多草的排水沟壤土和农田壤土的抗剪强度随含水量的增加而增加。陈晓安^[18]和冯舒悦等^[19]对南方红壤区

的崩岗土壤进行研究, 发现相同条件下, 抗剪强度随土壤中细颗粒含量的上升而增大, 其中根系密度、砾石含量、粉粒含量以及黏粒含量是影响抗剪强度的主要因素。Zhang 等^[20]以华北东部风蚀区未饱和、未扰动表土为研究对象, 发现砾石含量、有机物、碳酸钙和土壤容重均与表土抗剪强度密切相关。此外, 陈旭等^[21]和李建兴等^[22]通过分析不同植被类型对土壤抗剪强度的影响, 发现乔灌混栽林的土壤抗剪强度最高, 农田土壤抗剪强度较乔灌混栽林降低了 31.6%, 香根草、百喜草、狗牙根、紫花苜蓿对黏聚力和内摩擦角均有显著增强作用, 且对后者的增强作用大于前者。

崩岗治理后, 植被对土壤理化性质的影响还需进一步研究。因此, 本文以江西赣县金钩形小流域不同植被类型崩岗土壤为研究对象, 通过土壤抗剪强度参数呈现出的规律性变化, 及恢复过程中土壤基本理化性质对抗剪强度的影响, 以期进一步了解崩岗的恢复情况。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江西省赣县北部金钩形小流域, 介于 26°10'—26°13'N, 115°9'—115°12'E, 属亚热带丘陵山区季风湿润气候区, 年均气温 19.3℃, 年平均降雨量 1 076 mm。该地崩岗的成土母质以花岗岩类

风化物为主，花岗岩风化壳厚，含沙量大，土壤颗粒较粗，由此形成的土壤结构松散、透水性强等，极易产生崩岗侵蚀。赣南山地丘陵属强度侵蚀区，主要以崩岗侵蚀为主，而金钩形小流域崩岗侵蚀面积达 95.8 hm²，分布广，侵蚀类型丰富，单个崩岗年土壤流失量可达到 1.2 万吨，是一个崩岗发育明显、侵蚀较大的典型区域^[5]。流域内植被物种以马尾松纯林为主，辅以针阔混交林、针叶林和荒山灌草等其他植被类型。对其进行研究，能够进一步了解崩岗的恢复情况，可为不同地区崩岗侵蚀的生态环境恢复工作提供一定的参考。

1.2 样点布设与样品采集

前期调查研究将金钩形流域内崩岗分为三种不同治理模式（生态防护型、产业经济型、修复完善型）^[8]。本试验在此基础上，选取流域内生态防护型

治理模式的崩岗，该治理模式为发育初期，崩口较小的崩岗，主要通过拦截坡面径流，通过人工种植农作物和结合林草措施，达到生态环境保护和发展经济的目的。选取的 7 个崩岗代表该地区所有种植的植被类型，海拔高度相似，并且均在保持原地貌的基础上，实施相同的治理措施：3 个崩岗治理后柑橘地（RA）；2 个灌木地（RS）；1 个草地（AG2），1 个林地（NF30）和一个崩岗侵蚀区（EA）作为参考（表 1、图 1）。于 2018 年 7 月以坡面为单位，采集每个崩岗（坡上、坡中和坡下）的表层（5~10 cm）土壤样品，按照“S”路线，能够较好地克服耕作、施肥等所造成的误差，每个部位采集 3~4 个样点，3 个 100 cm³ 普通环刀和 12 个直剪环刀样（Φ 61.8 mm×20.0 mm），同时采集 1~2 kg 左右散土样装入自封袋带回实验室，土壤基本性质采用常规方法测定^[23-24]。

表 1 不同植被类型崩岗的基本特征

Table 1 Basic characteristics of Benggang at different vegetation types

	植被类型 Vegetation types	位置 Location	海拔 Elevation/m	恢复时间 Recovery time/a	主要植物 Dominant species
NF30	林地 Forest	115°11'00" E 26°12'01" N	198	30	<i>Pinus elliottii</i> Engelm and <i>Schima superba</i> Gardn. et Champ. 湿地松+木荷
	柑橘地 Arboreal forest	115°11'31" E 26°12'15" N			220
RA10	柑橘地 Arboreal forest	115°10'59" E 26°12'17" N	195	10	<i>Citrus sinensis</i> (Linn.) Osbeck 甜橙
RA8	柑橘地 Arboreal forest	115°11'24" E 26°12'12" N	224	8	<i>Citrus sinensis</i> (Linn.) Osbeck 甜橙
RS9	灌木地 Scrubland	115°11'11" E 26°12'00" N	212	9	<i>Camellia sinensis</i> (L.) O. Ktze 茶树
RS3	灌木地 Scrubland	115°11'04" E 26°12'22" N	200	3	<i>Camellia sinensis</i> (L.) O. Ktze 茶树
AG2	草地 Grassland	115°11'38" E 26°11'59" N	203	2	<i>Paspalum wettsteinii</i> Hack. 宽叶雀稗
EA	/	115°11'35" E 26°12'08" N	210	/	<i>Dicranopteris pedata</i> (Houtt.) Nakaike, <i>Pinus massoniana</i> Lamb 铁芒萁+马尾松

注：NF30：崩岗侵蚀后自然恢复林地；RA13、RA10、RA8：治理后柑橘地；RS9、RS3：治理后灌木地；AG2：崩岗治理后草地；EA：崩岗侵蚀区。

Note: NF30: Natural restoration mixed forest for 30 years; RA13、RA10、RA8: Replanted arboreal forest for 8 to 13 years; RS9、RS3: Replanted scrubland for 3 to 9 years; AG2: Artificial grassland for 2 years; EA: Benggang erosion area.

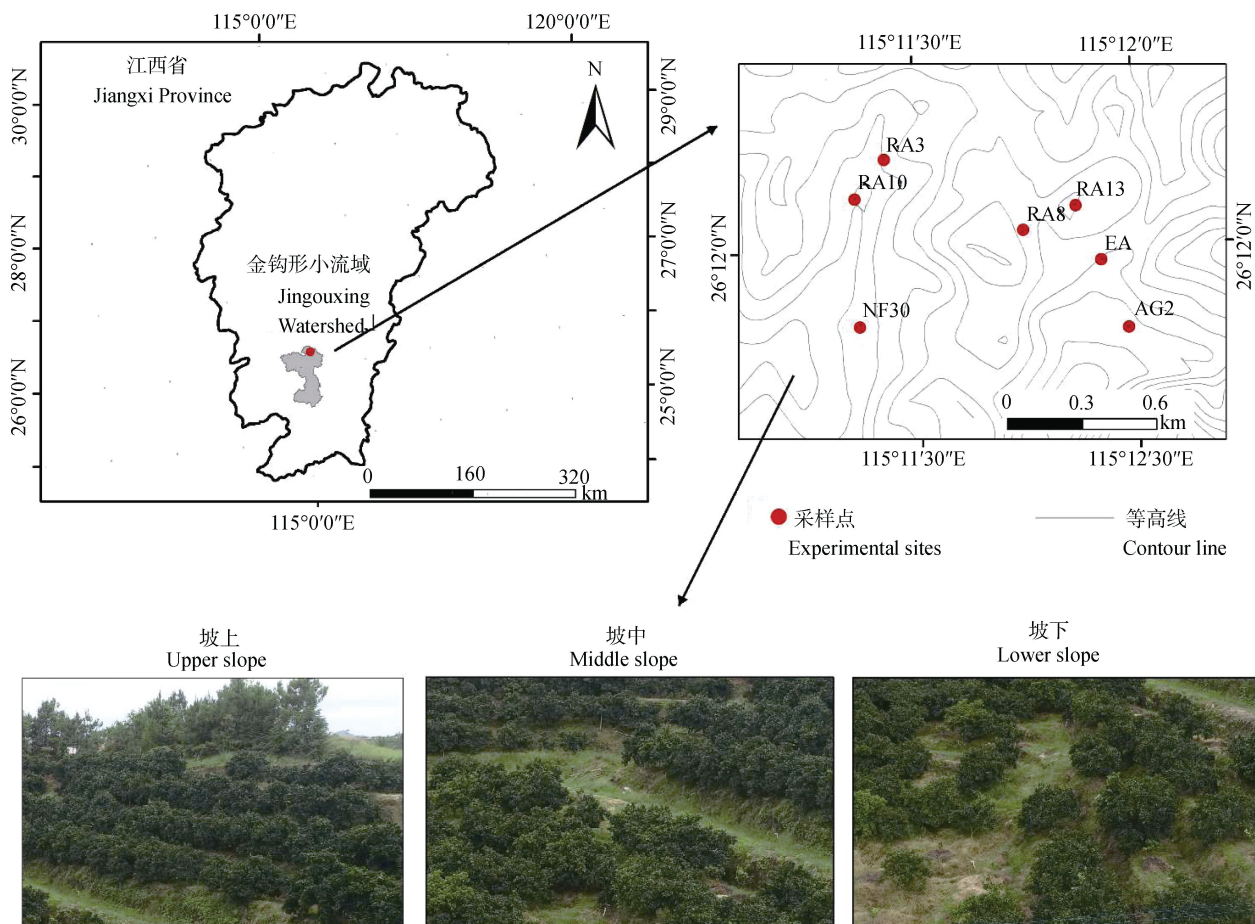


图 1 研究区及采样点位置

Fig. 1 Location of the study area and sampling sites

1.3 试验方法与数据处理

土壤抗剪强度采用 ZJ 型应变控制式四联直剪仪测定, 在不同剪切垂直压力 (50、100、150、200 kPa) 下进行直剪试验, 试验前将环刀放在吸水石 (79.8 × 10 mm) 上, 加水泡 24 h 至完全饱和。剪切速率为 0.8 mm·min⁻¹, 量力环系数 C 为 154.1 kPa·mm⁻¹, 施加剪切力进行不排水快剪, 每组进行 3 次重复实验, 采用 Mohr-Coulomb 强度理论, 准确测定土壤抗剪强度。Mohr-Coulomb 公式如下:

$$S = C + P \tan \varphi \quad (1)$$

式中, S 为土壤抗剪强度 (kPa); C 为黏聚力 (kPa); P 为垂直压力 (kPa); φ 为内摩擦角 (°)。

采用决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE) 来衡量拟合函数的有效性。试验数据采用 Excel 2019、Canoco 5.02、Origin 2021 和 SPSS 21.0 进行数据统计分析和处理。

2 结果

2.1 不同植被类型各部位土壤基本性质的变化特征

崩岗不同植被类型下土壤采样点的基本性质如表 2 所示。土壤机械组成中粉粒含量居多, 范围介于 38.01%~81.69%, 黏粒含量和砂粒含量较低, 土壤质地主要属于粉砂质黏土和粉砂质壤土。其中, 草地 (AG2) 土壤的黏粒含量则显著低于其他植被土壤, 主要是因为该区域崩岗处于初始治理阶段, 人工松动土壤、种植草坪对土体扰动较大, 致使前两年的土壤质量恢复较慢, 土壤黏粒含量也较低。土壤容重变化范围介于 1.19~1.46 g·cm⁻³, 灌木地 (RS3) 土壤容重在坡下部位最大达 1.46 g·cm⁻³。pH 的变化范围为 4.01~5.56, 呈中-强酸性。土壤饱和和导水率的变化范围为 0.014~0.123 cm·min⁻¹, 与侵蚀区相比, 林地、柑橘地和灌木地的土壤饱和和导水率均较高, 其中林地的土壤饱和和导水率值最高为

表 2 不同植被恢复类型崩岗的土壤理化性质

Table 2 Soil basic properties of the sampling sites at different vegetation restoration types

样点 Site code	部位 Parts	粒径分配 Particle-size distribution/%			容重 Bulk density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	总孔隙度 Total porosity/%	毛管孔隙 Capillary porosity/%	田间持水 量 Field water capacity/%	土壤饱和		有机质 Organic matter ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
		黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand					导水率 Saturated hydraulic conductivity ($\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$)	pH	
NF30	US	47.85Aa	37.22Ce	14.93Ac	1.16Bc	56.55Aa	46.61Ba	12.18Bh	7.39Aa	4.44Cb	14.97ABa
	MS	39.92Bab	48.24Bcd	11.84ABbc	1.22Ac	54.47Ba	46.79Bb	10.46Cf	7.15Aa	4.67Abc	14.62Ba
	LS	39.08Bb	51.83Ab	9.12Bc	1.20ABc	49.78Cb	54.20Aa	13.83Aef	7.17Aa	4.61Bb	15.77Aa
RA13	US	38.13Bb	40.01Ae	21.86Ab	1.15Bc	47.99Ab	45.19Bb	20.59Aa	6.52Ab	4.01Ce	10.86Bb
	MS	50.60Aa	33.06Be	16.33Bb	1.25Ad	47.72Ac	42.06Cd	14.86Cc	5.51Bb	4.64Abc	11.97Bb
	LS	49.03Aa	40.97Ac	10.01Cbc	1.28Abc	49.08Abc	51.23Ab	16.29Bc	6.22ABb	4.17Bd	15.07Aa
RA10	US	32.05Ac	39.64Ce	28.31Aa	1.33Aab	46.79Cc	44.95Bb	14.28Cg	4.92Ac	4.90Ab	12.52Ab
	MS	28.04Bb	54.32Bc	17.64Bab	1.22Cd	50.88Bb	47.52Ab	19.06Bb	4.47Bc	4.48Cc	11.07Bbc
	LS	23.17Cd	59.62Ab	17.22Bb	1.27Bbc	52.75Aa	48.73Ac	20.04Ab	5.11Ac	4.56Bbc	11.20Bbc
RA8	US	26.43Bb	58.25Ac	15.32Cc	1.28Ab	45.77Cd	43.83Cbc	16.21Bd	4.43Bcd	4.65Ac	8.50Ac
	MS	35.14Ab	47.54Bcd	17.32BCab	1.22Ad	51.71Bb	50.42Aa	20.27Aa	3.85Cd	4.09Cd	9.76Ac
	LS	37.46Ad	36.3Cc	26.21Aa	1.31Ab	48.59Ac	46.11Bd	13.83Cef	5.17Ac	4.25Bcd	10.58Abc
RS9	US	31.91Ac	55.02Bcd	13.07Bc	1.35Bab	44.52Be	42.20Cc	17.61Ac	4.02Ad	4.56Bcd	11.17Bb
	MS	22.52Bb	65.20Ab	12.28Bbc	1.43Aa	45.00ABd	43.35Bcd	11.52Be	3.98Ad	4.82Ab	11.61Bbc
	LS	29.40Ac	51.93Bb	18.67Aab	1.42Aa	46.29Ad	50.00Abc	10.95Bg	3.15Bd	4.61ABb	14.64Aa
RS3	US	23.68Bd	51.308Ad	25.02Aab	1.35Aab	43.15Bf	43.34Ac	17.99Ab	3.88Ad	5.07Aa	6.82Ccd
	MS	31.68Bb	43.71ABd	24.61Aa	1.39Ab	43.61Bde	43.59Acd	14.32Bc	3.42Bd	5.56Aa	10.60Bc
	LS	48.96Aa	36.05Bc	14.99Bbc	1.46Aa	45.64Ad	44.31Ade	13.62Bf	2.63Ce	5.28Aa	12.23Ab
AG2	US	1.76Bf	77.97Aa	20.27Abc	1.41Aa	40.78Cg	39.39Bd	14.99Bf	2.71Be	4.70Ab	4.59Bd
	MS	4.73Ac	83.00Aa	12.27Bbc	1.45Aa	43.73Be	44.31Acd	13.35Bc	2.19Cf	4.69Ab	4.92Bd
	LS	2.34Be	84.11Aa	13.55Bbc	1.47Bbc	44.54Ae	44.47Ae	14.64Aa	2.32Ad	4.75Ab	4.25Ac
EA	US	13.32Be	63.98Bb	22.70Ab	1.42Aa	40.53Bg	40.20Bd	14.64Ae	2.53Ae	4.88Ac	5.08Ad
	MS	5.40Cc	85.73Aa	8.87Cc	1.43Aa	42.20Ade	43.65Ac	14.67Bd	0.85Be	4.89Abc	4.45Ad
	LS	28.88Ac	58.31Cb	12.80Bbc	1.22Aa	44.01Ae	43.5Ade	21.04Ad	3.53Abe	4.87Ab	9.02Ad

注：US：上坡；MS：中坡；LS：下坡。不同的大写字母表示不同类型植被之间的差异显著。不同小写字母表示相同部位的不同类型植被之间差异显著。Note: US: upper slope; MS: middle slope; LS: lower slope. Different uppercase letters indicate a significant difference under different parts of vegetation types. Different lowercase letters indicate a significant difference among different types of vegetation types at the same parts.

$0.123 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。灌木地 (RS9、RS3) 的有机质含量明显高于柑橘地 (RA10、RA8)，说明在一定时间内灌木地恢复积累有机质的效果优于柑橘地，并且见效更快。除 RS9 和 RS3 之外，土壤饱和导水率随

着部位的降低，呈现出先减少后增加的趋势，且柑橘地的入渗能力优于灌木地^[25-26]。不同植被类型的毛管孔隙度随地势降低而整体呈显著上升趋势，黏粒、粉粒等细颗粒物占比也呈升高趋势，汇聚于

下坡。在崩岗治理恢复过程中,柑橘地(RA13)土壤性质恢复较好,植被覆盖率明显提高,土壤有机质含量也得到逐渐恢复,从而推进土壤质量的提高。

2.2 不同植被类型各部位抗剪强度分布特征

土壤抗剪强度是表征土壤抗侵蚀力的重要指标,被广泛应用于土壤侵蚀研究中,其大小受黏聚力、内摩擦角及法向应力3个因素的影响。如图2所示,林地坡下土壤黏聚力最高,达到14.28 kPa,整体黏聚力大小表现为林地>柑橘地>灌木地>侵蚀区>草地。柑橘地崩岗的土壤各部位黏聚力显著大于灌木地的崩岗土壤黏聚力,可能是因为柑橘地种植时间较长,根系缠绕固结程度较深,随着生态恢复和土壤养分含量逐渐

上升,崩岗土体形成稳定的土壤结构形式,增强了土壤颗粒的聚合能力。其中,柑橘地(RA13)的黏聚力为灌木地(RS9)的1.15倍~1.90倍,并表现为坡下>坡上>坡中,草地(AG2)的土壤黏聚力最低。不同植被类型下崩岗土壤的内摩擦角随恢复时间的增长出现缓慢下降趋势,即随着恢复时间的增长,孔隙度增加、容重减小,土壤紧密程度下降,颗粒间摩擦相对减弱,内摩擦角随之降低。柑橘地较灌木地土壤抗剪强度提高较快,陈旭等^[21]研究表明,灌木林>草地>乔木地,这与本研究结果不一致。可能是因为南北地区土壤性质差异的影响,乔木地的容重大于草地和灌木,辽西沙化地区受风蚀影响,土壤沙化严重。

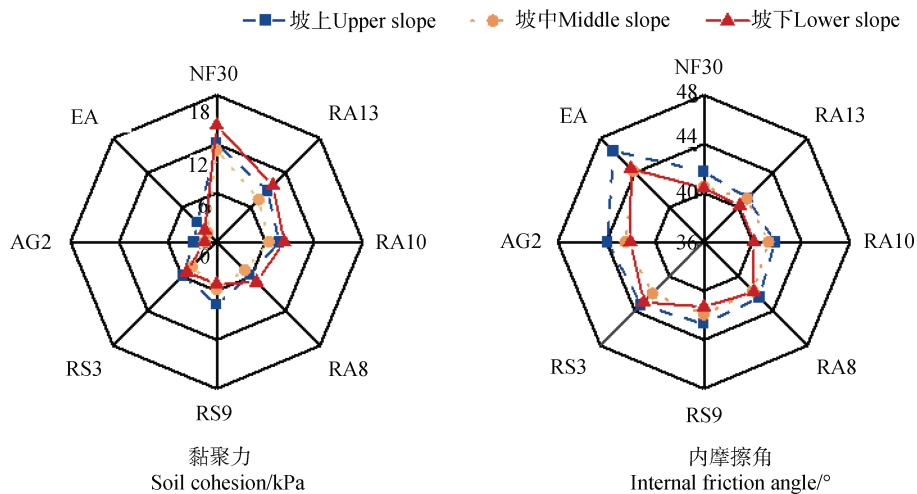


图2 不同植被恢复类型各部位(黏聚力、内摩擦角)雷达图

Fig. 2 The distribution of soil cohesion and internal friction angle at different vegetation restoration types

不同空间部位的抗剪强度参数见表3,土壤黏聚力变化范围介于2.78~14.28 kPa之间,变异系数介于44.59%~62.91%,属于中等变异。内摩擦角的值在34.04°~49.75°之间,变异系数介于4.33%~6.14%,内摩擦角均表现为上坡最大,随地势降低呈缓慢下降的趋势,这是由于土壤的饱和含水量较大,土壤中被水软化的胶结物质在颗粒间发挥了润滑作用,土壤中的细颗粒物随水流冲刷沉降在坡脚,导致坡下土壤的颗粒间摩擦减弱,进而降低了内摩擦角。其中,中坡的抗剪强度最低,与其他空间部位存在显著差异,原因是坡地位置差异导致土壤的基本理化性质产生区别,中坡植被覆盖度较低,农业实施时,受人为扰动较大。

2.3 不同植被类型崩岗抗剪强度的影响因素

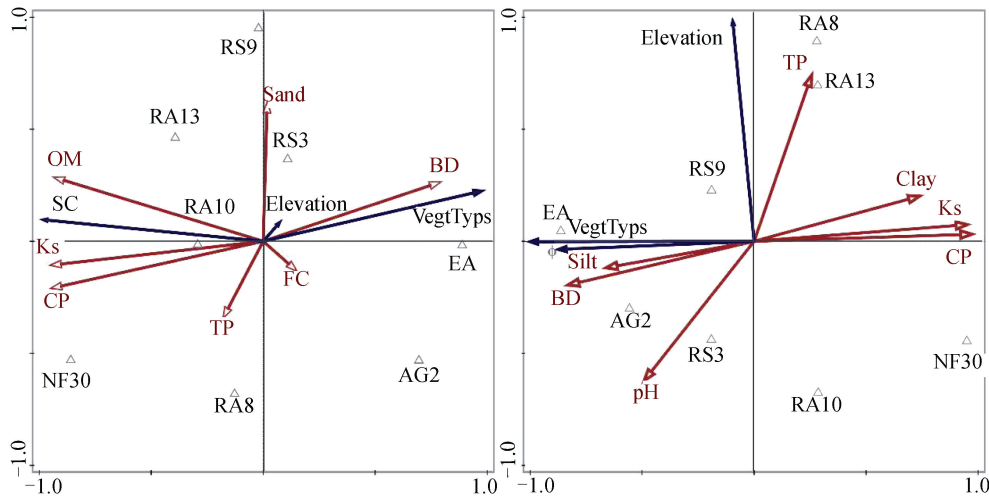
土壤抗剪强度主要受内摩擦角和黏聚力的影

响,而这些因素与土壤的理化性质存在紧密联系。根据崩岗治理后的周围环境条件,本文采用约束性排序方法分析不同植被类型土壤基本性质与黏聚力和内摩擦角之间的关系。RDA排序结果显示了黏聚力与内摩擦角和土壤基本性质之间的相关关系:箭头长短,表示两者之间相关性的大小。由图3可知,土壤黏聚力与有机质、土壤饱和导水率和毛管孔隙度呈显著正相关($P<0.01$),其次是容重和砂粒含量,与持水量相关性最小,土壤黏聚力含量表现为,NF30>RA13>RA10>RS9>RA8>RS3>AG2>EA,土壤有机质通过胶结作用使土壤结构更加稳定;土壤内摩擦角与粉粒含量、土壤容重呈显著正相关($P<0.01$),与土壤黏粒、饱和导水率和毛管孔隙度呈显著负相关,受植被类型变化影响较大。RDA分析表明,第一、第二排序轴特征值之和占全部排序轴特征值总和的99.93%、99.11%,反映了排序的绝大

表 3 不同植被恢复类型各部位抗剪强度统计参数

Table 3 Statistics of soil shear strength relative to position of different vegetation restoration types

	部位	最小值	最大值	平均值	标准误差	变异系数
	Parts	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation	Coefficient of variation/%
黏聚力 Soil cohesion/kPa	坡上 Upper slope	2.78	12.04	6.75	3.01	44.59
	坡中 Middle slope	1.47	11.27	5.38	3.19	59.29
	坡下 Lower slope	1.48	14.28	6.66	4.19	62.91
内摩擦角 Internal friction angle/ $^{\circ}$	坡上 Upper slope	40.45	46.99	42.54	1.99	4.33
	坡中 Middle slope	34.04	49.75	42.04	1.43	6.14
	坡下 Lower slope	37.45	45.49	41.82	1.71	4.09



注：BD，容重；CP，毛管孔隙度；TP，总孔隙度；Ks，土壤饱和导水率；Clay，黏粒含量；Silt，粉粒含量；Sand，砂粒含量；TP，全磷；OM，有机质；FC，田间持水量；SC，土壤黏聚力； Φ ，内摩擦角；Elevation，环境要素；VegtTyps，植被类型。Note: BD, bulk density, CP: capillary porosity, TP: total porosity, Ks: saturated hydraulic conductivity, Clay: clay content, Silt: silt content, Sand: sand content, TP: total nitrogen, OM, organic matter, FC, field capacity, SC: soil cohesion; Φ , internal friction angle; Elevation, environmental factors; VegtTyps, vegetation types.

图 3 基于 RDA 排序的土壤抗剪强度与环境因素排序

Fig. 3 RDA ranking diagram of soil shear strength and environmental factors

部分信息，能够用来反映土壤基本性质之间的关系。张晓明等^[27]研究表明，干密度、团聚体干筛 MWD 值是影响土壤抗剪强度的主要因素，对于灌木林和混交林而言，总孔隙度影响最大，可能是由于植物

的根系作用，通过影响土壤内摩擦角大小来影响土壤抗剪强度。也有研究表明，容重是土壤的物质组成，容重越大土壤结构就越密实，进而影响土壤中孔隙的分布，是影响土壤抗剪强度的主要因素^[28-30]，

而本文是在测定多种基本性质的前提下, 利用数理统计方法选取贡献度最大的因素。其中, 土壤容重与土壤饱和导水率呈显著负相关, 可以通过影响饱和导水率来间接影响土壤抗剪强度。

将上述参数与两个抗剪强度指标分别进行逐步回归分析, 根据结果选定了总孔隙度、毛管孔隙、黏粒含量和饱和导水率作为最适参数指标与土壤抗

剪强度参数进行拟合。用上述四个参数来描述抗剪强度变化特征, 并对它们进行拟合, 分别呈现出如图 4 的幂函数和线性函数关系。发现饱和导水率和黏聚力之间存在较优的幂函数关系 ($R^2=0.88$), 黏粒含量、毛管孔隙和内摩擦角之间也存在较优的幂函数关系 ($R^2>0.51$), 而总孔隙度和黏聚力则存在较优的线性相关关系 ($R^2=0.55$)。

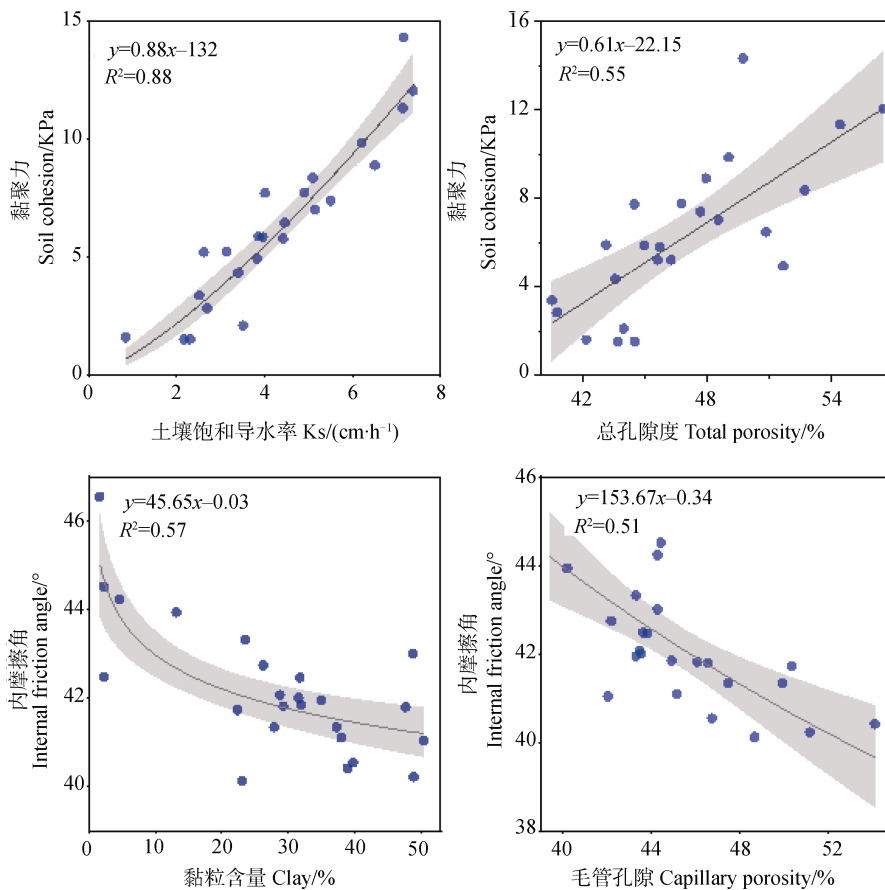


图 4 土壤基本性质与抗剪强度指标的关系

Fig. 4 Relationship between soil basic physicochemical properties and shear strength index

2.4 土壤抗剪强度影响因子的拟合

通过土壤基本理化性质来定量分析抗剪强度指标, 采用拟合结果较优的黏粒含量与毛管孔隙为自变量, 构造以黏聚力和内摩擦角为因变量的多元回归模型: 采用决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE) 对拟合方程的有效性进行评价, 其中 R^2 为 0.74, RMSE 为 0.97, 拟合结果较好。综合试验结果可知, 土壤黏粒是影响土壤内摩擦角的主要因素, 其次为毛管孔隙, 相同条件下土壤细颗粒含量越大, 土壤间黏结性越强, 土壤抗剪强度越大^[31-32]。土壤中孔隙大小分布直接影响土壤中的水分状况以及养分的

转化, 水分影响土壤黏结作用, 进而影响农作物的生长状况^[19]。土壤入渗率越高, 降雨时水分易入渗到深层土壤, 随着土体饱和度的逐渐增大, 表面张力的逐渐消失, 从而减小土粒间摩擦作用, 导致黏聚力也进一步降低^[27]。

$$S=0.06Ks^{1.59}TP^{0.63}+Ptan(-8.54Clay^{-1.08}CP^{-1.06})+44.54$$

式中, P 表示垂直压力, Ks 表示土壤饱和导水率, TP 表示土壤总孔隙度, $Clay$ 表示土壤黏粒含量, CP 表示毛管孔隙。结果表明, 土壤基本性质对于抗剪强度有较好的预测能力 ($R^2=0.89$, $P<0.01$), 黏

粒含量对提高土壤稳定性具有重要作用, 土壤中细颗粒增多, 使得土体密度增加, 整体结构性能提升。其中, 土壤饱和导水率与毛管孔隙、黏粒含量呈负相关关系。崩岗黏粒含量低, 土质松散、水稳性差, 进而影响土壤饱和导水率和孔隙大小, 导致其在降雨作用下极易发生侵蚀。

通过测量饱和状态下不同恢复年限崩岗的土壤抗剪强度, 基于土壤基本性质, 建立崩岗土壤侵蚀预报模型。预测值与实测值具有良好的重叠度 ($R^2=0.80$, $P<0.01$, $RMSE=5.95$), 表明构建的抗剪强度预测方程可信度较高, 预测效果较好。

3 结 论

崩岗系统内土壤粉粒含量高, 持水能力弱, 土壤养分低。从空间角度看, 随地势降低, 毛管孔隙度总体呈升高趋势, 黏粒、粉粒等细颗粒物质占比也不断上升, 汇聚于下坡。土壤养分含量上升, 保水保肥能力提高。此外, 土壤黏聚力随地势降低而升高, 内摩擦角则随恢复时间的增长出现缓慢下降趋势, 并且柑橘地的土壤抗剪能力优于灌木地。总孔隙、毛管孔隙、黏粒含量和饱和导水率构建的多元回归模型, 能够在不通过抗剪切实验基础上, 仅利用土壤基本性质, 有效、方便地预测崩岗的土壤抗剪强度。但缺少对植物根系的研究, 对于土壤性质的差异存在一定的不确定性。因此, 在后期试验中需要对植被根系特征进行更为深入的研究, 以及对 0~20 cm 范围内不同土层的原状土进行样本分析, 以期对南方崩岗侵蚀区治理恢复技术提供更有价值的参考。

参考文献 (References)

- [1] Zeng Z X. Soil erosion on the red soil regions in South China[J]. *Renmin Zhujiang*, 1992, 13 (6): 15—20. [曾昭璇. 华南红土区水土流失问题[J]. 人民珠江, 1992, 13 (6): 15—20.]
- [2] Liang Y, Ning D H, Pan X Z, et al. Characteristic and management of dilapidated granite erosion of red soil region in south [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2009 (1): 31—34. [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.]
- [3] Xiao S S, Yang J, Fang S W, et al. Different control measures for collapsed gully erosion in hilly red soil region of South China[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2014, 31 (1): 18—22. [肖胜生, 杨洁, 方少文, 等. 南方红壤丘陵崩岗不同防治模式探讨[J]. 长江科学院院报, 2014, 31 (1): 18—22.]
- [4] Li S X, Gui H Z, Ding S W. Features of special layout of hill collapse in South China[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2013, 32 (1): 83—86. [李双喜, 桂惠中, 丁树文. 中国南方崩岗空间分布特征[J]. 华中农业大学学报, 2013, 32 (1): 83—86.]
- [5] Feng M H, Liao C Y, Li S X, et al. Investigation on status of hill collapsing and soil erosion in Southern China[J]. *Yangtze River*, 2009, 40 (8): 66—68, 75. [冯明汉, 廖纯艳, 李双喜, 等. 我国南方崩岗侵蚀现状调查[J]. 人民长江, 2009, 40 (8): 66—68, 75.]
- [6] Liao Y S, Tang C Y, Yuan Z J, et al. Research progress on Benggang erosion and its prevention measure in red soil region of Southern China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (6): 1297—1312. [廖义善, 唐常源, 袁再健, 等. 南方红壤区崩岗侵蚀及其防治研究进展[J]. 土壤学报, 2018, 55 (6): 1297—1312.]
- [7] Yang J H, Dong J Y, Huang Z Q, et al. Large-scale direct shear tests on accumulation body with different stone contents[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38 (S2): 161—166. [杨继红, 董金玉, 黄志全, 等. 不同含石量条件下堆积体抗剪强度特性的大型直剪试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38 (S2): 161—166.]
- [8] Feng S Y, Wen H, Ni S M, et al. Study on integrated control measure modes of typical collapsing in the south of China[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2019 (2): 18—22. [冯舒悦, 文慧, 倪世民, 等. 南方典型崩岗综合治理模式研究[J]. 中国水土保持, 2019 (2): 18—22.]
- [9] Lei J, Zhang G M, Liu L Y, et al. Measuring soil shear strength and impact factors[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2016, 52 (4): 486—492. [雷洁, 张国明, 刘连友, 等. 土壤抗剪强度测定与影响因素研究进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52 (4): 486—492.]
- [10] Amiri Khaboushan E, Emami H, Mosaddeghi M R, et al. Estimation of unsaturated shear strength parameters using easily-available soil properties[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 184: 118—127.
- [11] Knapen A, Poesen J, Govers G, et al. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2007, 80 (1/2): 75—109.
- [12] Léonard J, Richard G. Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength[J]. *Catena*, 2004, 57 (3): 233—249.
- [13] Xu X Y, Zhao Z L, Tang L S. Experimental research for shear strength and influencing factors of granite residual soil in Guangzhou area[J]. *Guangdong Architecture Civil Engineering*, 2018, 25 (7): 89—94. [徐晓宇, 赵占仑, 汤连生. 广州地区花岗岩残积土抗剪强度及其影响因素试验研究[J]. 广东土木与建筑, 2018, 25 (7): 89—94.]
- [14] Chen H X, Li F H, Hao S L, et al. Effects of soil water

- content and soil sodicity on soil shearing strength[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23 (2): 21—25. [陈红星, 李法虎, 郝仕玲, 等. 土壤含水率与土壤碱度对土壤抗剪强度的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23 (2): 21—25.]
- [15] Lin J L, Huang Y H, Zhang D B, et al. Influence of soil moisture content on shear characteristics of Benggang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27 (3): 55—58. [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.]
- [16] Zhang B, Zhao Q G, Horn R, et al. Shear strength of surface soil as affected by soil bulk density and soil water content[J]. Soil and Tillage Research, 2001, 59 (3/4): 97—106.
- [17] Singh H V, Thompson A M. Effect of antecedent soil moisture content on soil critical shear stress in agricultural watersheds[J]. Geoderma, 2016, 262: 165—173.
- [18] Chen X A. Stratified difference of soil physical properties of collapse mound erosion areas and its influence to the development of collapse mound[J]. Soil and Water Conservation in China, 2015 (12): 71—72, 86. [陈晓安. 崩岗侵蚀区土壤物理性质分层差异及其对崩岗发育的影响[J]. 中国水土保持, 2015 (12): 71—72, 86.]
- [19] Feng S Y, Wang J G, Wen H, et al. Soil shear strength of collapsing erosion area in south Jiangxi of China relative to position of the soil and its influencing factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (1): 71—83. [冯舒悦, 王军光, 文慧, 等. 赣南崩岗侵蚀区不同部位土壤抗剪强度及影响因素研究[J]. 土壤学报, 2020, 57 (1): 71—83.]
- [20] Zhang C L, Wang X S, Zou X Y, et al. Estimation of surface shear strength of undisturbed soils in the eastern part of Northern China's wind erosion area[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 178: 1—10.
- [21] Chen X, Su F L, Li H F, et al. Study on soil shear strength of main vegetation types in desertification area of western Liaoning Province[J]. Yangtze River, 2020, 51 (5): 84—88. [陈旭, 苏芳莉, 李海福, 等. 辽西沙化地区主要植被类型土壤抗剪强度研究[J]. 人民长江, 2020, 51 (5): 84—88.]
- [22] Li J X, He B H, Chen Y, et al. Root distribution features of typical herb plants for slope protection and their effects on soil shear strength[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (10): 144—152. [李建兴, 何丙辉, 谌芸, 等. 不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29 (10): 144—152.]
- [23] Yi Y L. Soil physics research method [M]. Beijing: Peking University Press, 2009. [依艳丽. 土壤物理研究法[M]. 北京: 北京大学出版社, 2009.]
- [24] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [25] Wang S L. Study on soil water characteristics and fertility based on the terracing of collapsing hill in jingouxing small watershed of Ganxian in Jiangxi Province[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016. [王书玲. 江西赣县金钩形小流域崩岗削坡开梯土壤水分特征及肥力研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.]
- [26] Chen X M, Huang D A, Wu H S. Characteristics of macropores and their affecting factors of major paddy soils in Taihu Lake region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43 (3): 509—512. [陈效民, 黄德安, 吴华山. 太湖地区主要水稻土的大孔隙特征及其影响因素研究[J]. 土壤学报, 2006, 43 (3): 509—512.]
- [27] Zhang X M, Ding S W, Cai C F. Effects of drying and wetting on nonlinear decay of soil shear strength in slope disintegration erosion area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28 (5): 241—245. [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.]
- [28] Ni J P, Gao M, Wei C F, et al. Dynamics of soil shearing strength of three types of soils under wetting-drying alternation in Chongqing area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50 (6): 1090—1101. [倪九派, 高明, 魏朝富, 等. 干湿循环条件下重庆地区三种土壤抗剪强度的动态变化[J]. 土壤学报, 2013, 50 (6): 1090—1101.]
- [29] Huang Y J, Fu M F, Liu W P. Experimental study on shear strength of soil in collapse area[J]. Water Resources and Power, 2017, 35 (12): 127—130. [黄莹晶, 扶名福, 刘伟平. 崩岗区残积土抗剪强度试验研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35 (12): 127—130.]
- [30] Zhang X M, Zhang J C, Wang Y N, et al. Research on soil shear strength of the major forest types in headwaters of Qiantang River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22 (4): 79—84, 90. [张晓明, 张金池, 王云南, 等. 钱塘江源头主要植被类型土壤抗剪强度研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22 (4): 79—84, 90.]
- [31] Chen X A, Yang J, Xiong Y, et al. Research on the soil characteristics and factors of collapsing erosion in the red soil zone[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44 (10): 1175—1181. [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.]
- [32] Xue L, Wang S J, Li X, et al. Impact of soil particle deletion on erosion resistance of purple soil in Chongqing based on strength index[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56 (3): 582—591. [薛乐, 汪时机, 李贤, 等. 重庆紫色土抗侵蚀能力的粒组效应研究[J]. 土壤学报, 2019, 56 (3): 582—591.]

(责任编辑: 檀满枝)