

DOI: 10.11766/trxb201901300514

冯舒悦, 王军光, 文慧, 倪世民, 华丽, 蔡崇法. 赣南崩岗侵蚀区不同部位土壤抗剪强度及其影响因素研究[J]. 土壤学报, 2020, 57(1): 71–83.  
FENG Shuyue, WANG Junguang, WEN Hui, NI Shimin, HUA Li, CAI Chongfa. 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.

## 赣南崩岗侵蚀区不同部位土壤抗剪强度及影响因素研究\*

冯舒悦, 王军光, 文 慧, 倪世民, 华 丽<sup>†</sup>, 蔡崇法

(华中农业大学水土保持研究中心, 农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

**摘 要:** 为明确南方崩岗侵蚀区不同部位土壤抗剪强度的分布规律, 探索在崩岗发育过程中土壤基本性质对抗剪强度指标的影响, 以不同发育阶段崩岗各部位表层土(0~20 cm)为研究对象, 对土壤基本性质和抗剪强度的差异进行对比研究。结果表明:(1)随着崩岗的发育, 表层土壤基本性质逐渐恶化, 容重逐渐减小, 颗粒组成粗骨质化现象明显, 土壤有机质的含量与根系密度的变化, 均随崩岗的发育呈现出典型的退化特征;(2)崩岗各部位黏聚力和内摩擦角的变化规律相似, 集水区部位达到峰值, 沟道部位达到最小值, 随崩岗的发育呈明显下降趋势;(3)根系密度与黏聚力有良好的线性相关关系, 砾石含量、粉粒含量和黏粒含量对崩岗土体内摩擦角有显著影响, 可以用幂函数表示它们之间的关系;(4)试验以根系密度、砾石含量、粉粒含量和黏粒含量来表征土壤饱和状态下的抗剪强度, 建立了在崩岗发育过程中饱和抗剪强度的预测方程( $R^2=0.891$ ,  $P<0.01$ ), 结果显示方程可信程度较高, 预测效果较好。研究结果揭示了南方花岗岩崩岗区不同发育阶段抗剪强度的控制因素, 为进一步防治水土流失提供理论依据。

**关键词:** 崩岗; 发育阶段; 不同部位; 土壤基本性质; 内摩擦角; 黏聚力

**中图分类号:** S157.1      **文献标志码:** A

## Soil Shear Strength of Collapsing Erosion Area in South Jiangxi of China Relative to Position of the Soil and Its Influencing Factors

FENG Shuyue, WANG Junguang, WEN Hui, NI Shimin, HUA Li<sup>†</sup>, CAI Chongfa

(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)

**Abstract:** [Objective] Soil shear strength is an apparent indicator of how easily shear deformation occurs under the action of external force, and a major index to characterize soil mechanical properties, as well as an important parameter of the process-based soil erosion model for prediction of hydraulic erosion. So far, little has been reported on soil shear strength at each collapse developing stage. The purpose of this study is to (1) investigate variation of soil shear strength with the process of soil erosion on typical collapsing mounds; (2) determine influences of basic physical and chemical properties on soil shear strength;

\* 国家重点研发计划项目(2017YFC0505404)和国家自然科学基金项目(41771304, 41630858)资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China( No. 2017YFC0505404 )and the National Natural Science Foundation of China( Nos. 41771304, 41630858 )

<sup>†</sup> 通讯作者 Corresponding author, E-mail: huali@hzau.edu.com

作者简介: 冯舒悦(1998—), 女, 甘肃庆阳人, 硕士研究生, 主要研究方向: 水土保持与生态退化。E-mail: 18727622007@163.com

收稿日期: 2019-01-30; 收到修改稿日期: 2019-04-15; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2019-05-15

and(3)establish an equation for prediction of variation of soil shear strength with development of collapsing. 【 Method 】 The experiment lot was set up in the Jingouxing watershed in Tiencun Town of Gan County, where there are quite a number of collapsing mounds. Three adjacent collapsing mounds of granite different in collapse developing stage(initial stage, active stage and stable stage)were selected for the experiment and a total of 15 sampling sites were set on each mound. Topsoil samples from the 0 ~ 20 cm soil layer of each mound and relevant environmental variables, were gathered, separately, for analysis of basic soil properties and soil shear strength. The data were processed with the classical statistic method for spatial variation of soil shear strength and variation of saturated shear strength with developing of collapse was predicted with the stepwise regression equation. 【 Result 】 (1) The physical properties of the soil in the collapse system are relatively poor with bulk density of the top soil layer varying in the range of 1.02 ~ 1.40 kg·m<sup>-3</sup> and declining with the position lowering along the slope, particle size composition coarsening, soil organic matter content lowering and root density ranging from 0.27 to 3.57 kg·m<sup>-3</sup>, all of which demonstrate typical features of soil degradation with developing collapse; (2) Soil cohesion and internal friction angle, varies quite similarly, that is, both in a declining trend with development of the collapse, peaks at collecting areas, and bottoms in ditches. When collapse develops into a stable stage, restoration of vegetation promotes formation of root-soil complexes, which in turn increases soil cohesion and hence soil shear strength by a certain degree; (3) Statistical analysis shows that the contents of gravels, silt and clay are the optimal parameters to characterize soil internal friction angle of a collapsing mound and their relationships can be well-described with a power function. Besides, a good linear correlation between root density and soil cohesive was observed; and (4) The experiment used root density and particle size composition to characterize shear strength of the soil under saturation, and established the equation ( $R^2=0.891$ ,  $P<0.01$ ) for predicting soil shear strength of a developing mound. 【 Conclusion 】 With developing collapse, soil properties degrade obviously. Soil saturated shear strength varies significantly with soil particle-size distribution and root density across the collapsing erosion area, and is affected jointly by soil texture, topography, moisture and land use at the regional scale. It is recommended to use the functional equation based on parameters like particle-size and root density to predict soil shear strength, particularly for soil layers below 20 cm in the collapsed erosion areas in South Jiangxi.

**Key words:** Collapse; Development stage; Different positions; Soil basic properties; Internal frictional angle; Cohesion

崩岗是山坡土体在水力作用和重力作用共同影响下发生崩塌侵蚀,经过不断地崩塌和陷落作用形成的一种围椅状地貌,是我国南方花岗岩地区侵蚀强度最大、危害最为严重的一种侵蚀类型,被誉为“生态溃疡”<sup>[1-2]</sup>。我国南方崩岗分布范围涉及湖北、湖南、江西、安徽、福建、广东、广西等7省,崩塌面积在60 m<sup>2</sup>以上的崩岗,总共有23.91×10<sup>4</sup>个,总面积为1 220 km<sup>2</sup><sup>[3-4]</sup>。花岗岩崩岗区因节理构造发达,在湿热条件下易形成完整的厚层风化壳,当崩岗内松散的土体遭遇连续降雨时,集水坡面的水势增大,促进了水流对土体的剪切作用,加速了崩塌的发生。崩岗的成因可分为花岗岩的岩土特性、松散易腐蚀的土壤结构和降雨带来的水力侵蚀三个方面,其形成主要由于岩土稳定性降低。土壤抗剪强度的大小直接反映了土体在外力作用下,发生剪切形变破坏的难易程度,是表征土体力

学性质的一个主要指标,也是水力侵蚀中基于过程的土壤侵蚀模型的重要参数<sup>[3, 5]</sup>,与土壤侵蚀关系非常密切,广泛应用于建筑地基工程、农业水土工程、土壤水力与风力侵蚀等。因此,加强对各发育阶段崩岗土体抗剪强度的研究对提高岩土稳定性、改善土壤质量和防治水土流失具有非常重要的理论价值与现实意义。

目前关于崩岗岩土体抗剪强度的研究主要集中在剪切方式、含水量、含石量以及其他条件影响下的抗剪强度特性<sup>[6-16]</sup>,陈晓安<sup>[17]</sup>对崩岗侵蚀区花岗岩和红砂岩的土壤物理特性进行了分层研究,其结果表明:花岗岩与红砂岩地区的母质层抗剪强度明显小于红土层,其液塑性指标也明显低于红土层,说明花岗岩和红砂岩崩岗地区红土层的破坏容易诱发崩岗。张爱国等<sup>[18]</sup>以中国水蚀区范围内水土流失过程中的岩土体为研究对象,发现水土流失过

程中影响抗剪强度的主导因素是容重、粉/黏粒、土壤含水量及土壤有机质质量分数。夏振刚等<sup>[19]</sup>通过研究崩岗不同层次岩土抗剪强度与含水量的关系,发现含水量的变化对崩岗岩土抗剪强度影响极大,除淋溶层随含水量增加呈先增大后下降趋势外,各层次含水量大幅度增加,均导致抗剪强度急剧衰减。此外,张晓明等<sup>[20]</sup>对不同干湿效应下,崩岗侵蚀区岩土抗剪强度的衰减情况进行研究,发现土壤黏聚力、内摩擦角随干湿变化呈非线性衰减趋势,运用灰色关联法探究风干阶段影响抗剪强度的三个主要因素依次塑性指数>游离氧化铁>黏粒含量,在增湿阶段的主要影响因素依次为干密度>水溶性盐>黏粒含量。Bischetti 等<sup>[21]</sup>通过对比植物不同土层深度根系的抗剪强度,得出抗剪强度增量与根系生物量之间呈线性正比关系。杨继红等<sup>[22]</sup>以土石混合的堆积体为研究对象,探索了不同含石量对堆积体剪应力-位移曲线和抗剪强度的影响规律,研究发现:随着含石量的增加,堆积体抗剪强度逐渐增大,黏聚力呈先增大后减小的趋势,临界含石量约为 60%。

由于崩岗在发育过程中,其土壤结构、水分、生物量及颗粒组成等差异较大,目前对于崩岗各发育阶段的抗剪强度研究还比较薄弱。因此,本文以江西赣县金钩形小流域各个发育阶段崩岗为研究对象,拟通过室内模拟剪切实验和野外实地调查,分析南方丘陵区典型崩岗随侵蚀程度的加剧其抗剪强度的差异,探讨土壤基本理化性质对抗剪强度的影响,以期为典型崩岗区土壤抗侵蚀能力研究和水土保持措施布置提供技术依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

赣县位于江西省南部,赣江上游,介于 25°26′~26°17′N, 114°42′~115°22′E,属中亚热带丘陵山区季风湿润气候区,总面积为 2 993 km<sup>2</sup>,年均气温 19.3℃,年均降雨量 1 076 mm。赣县区境内属中低山丘陵地形,不同岩性的抗风化及抗侵蚀能力的差异形成不同地形、地貌,其中,花岗岩区

易风化,风化层厚,多为山顶浑圆的低山丘陵,植被条件差,水土流失严重,崩岗发育集中,是遭受崩岗侵蚀较严重的一个典型县区<sup>[2]</sup>,全县水土流失面积 9.8 万 hm<sup>2</sup>,占全县土地面积的 33%,其中轻度流失面积为 3.3 万 hm<sup>2</sup>,中度流失面积为 3.6 万 hm<sup>2</sup>,强度流失面积为 2.9 万 hm<sup>2</sup><sup>[14]</sup>,给人民的生产生活带来巨大影响。研究区域及采样点如图 1 所示。

试验样地布设于赣县田村镇金钩形小流域,流域内崩岗数量较多,侵蚀类型丰富,植被物种以马尾松和铁芒萁为主,辅以杉木、芒草和马唐等多类杂草。在前期大量调查的基础上,根据崩岗的侵蚀特征(表 1),将崩岗不同发育阶段划分为发育初期、发育活跃期和发育稳定期,从中挑选出各个阶段的典型崩岗。其中,发育初期崩岗侵蚀沟长为 29.1 m,沟道最大宽度为 4 m,崩壁高为 16.3 m,植被郁闭度为 31%,草本覆盖度为 76%,水热变化明显;活跃期崩岗侵蚀沟长为 80.1 m,沟道最大宽度为 11.2 m,崩壁高为 30.4 m,植被郁闭度为 43%,草本覆盖度为 62%,水热变化剧烈;稳定期崩岗侵蚀沟长为 51 m,沟道最大宽度为 7.3 m,崩壁高为 22.1 m,植被郁闭度为 59%,草本覆盖度为 40%,水热变化趋于缓和。

### 1.2 试验材料

试验依据母岩和成土条件相同,海拔和植被等地表生境相似的原则,选取由花岗岩发育的三处不同发育阶段(初期、活跃期和稳定期)的毗邻崩岗为研究对象,于 2017 年 11 月采集崩岗的集水区、边坡(上坡、中坡和下坡)和沟道部位的表层(0~20 cm)土壤样品。采样点的布设主要考虑 3 个方面:一是采样点尽可能多的覆盖整个崩岗流域,能代表样地的基本信息特征;二是土体样品尽可能代表崩岗的不同地貌部位;三是便于取样,具有可通达性。每个部位选择 3~4 个样点,一共 45 个样点,每个样点取 1~2 kg 左右散土样、3 个 100 cm<sup>3</sup>普通环刀样和 12 个直剪环刀样,散土样装入自封袋密封后带回实验室,放入木盘摊平成薄薄的一层,室内通风阴干,剔出土壤中作物根系、杂草等侵入体,粉碎过筛。环刀样加盖,密封后带回实验室测定土壤容重和抗剪强度。土壤基本理化性质采用常规方法测定<sup>[23]</sup>。

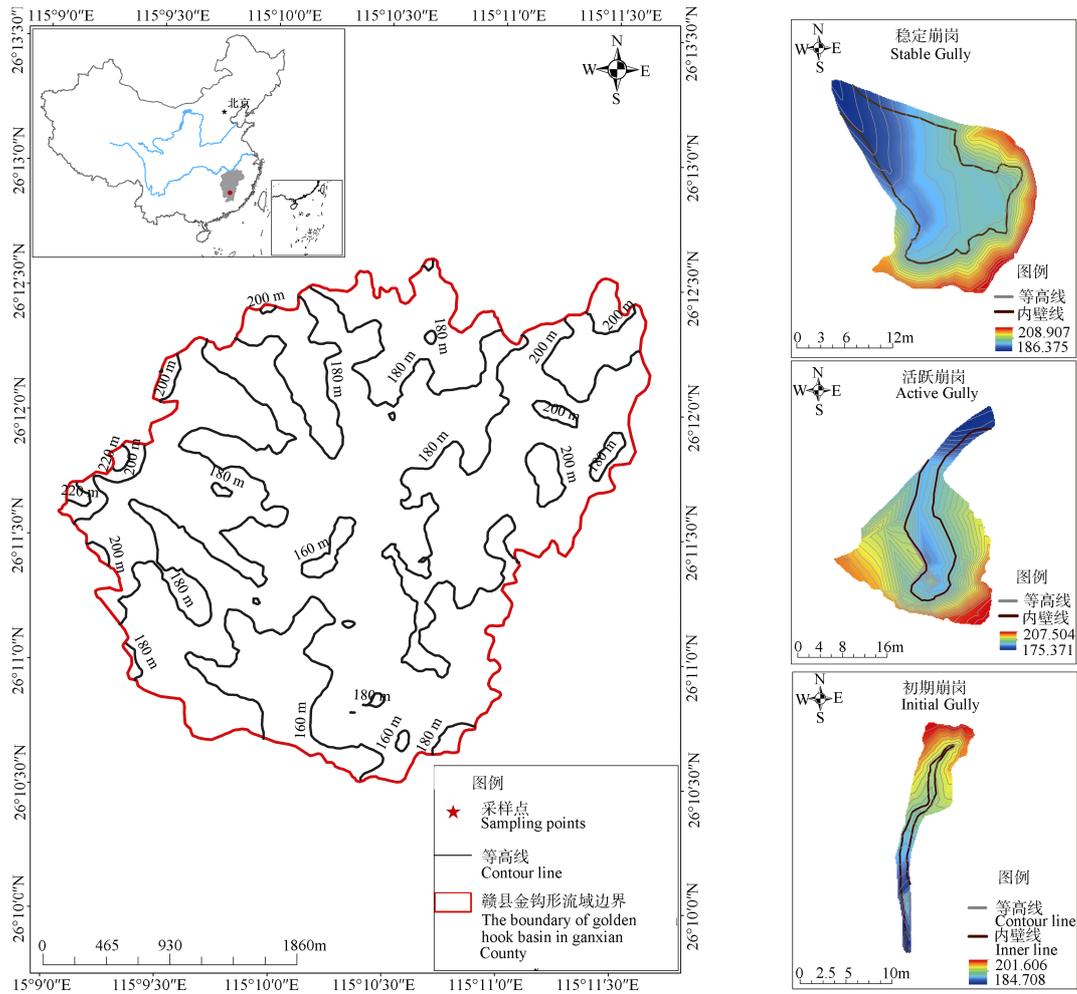


图1 研究区域及采样点位置

Fig. 1 Location of the study area and sampling sites

### 1.3 试验设计与分析

本研究采用 ZJ 型应变控制式四联直剪仪对土壤的抗剪强度进行测定, 试验装置如图 2 所示。将采集的直剪环刀 ( $\Phi 61.8 \text{ mm} \times 20.0 \text{ mm}$ ) 在不同的垂直压力  $\sigma$  (50、100、150、200 kPa) 下进行剪切, 剪切速率为  $0.8 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , 量力环系数  $C$  为  $154.1 \text{ kPa} \cdot \text{mm}^{-1}$ , 剪切前在环刀底部放一吸水石 ( $79.8 \times 10 \text{ mm}$ ), 加水至离环刀上部 2 mm 的位置, 泡 24 h 至完全饱和, 每组设 3 次重复, 施加剪切力  $\tau$  进行不固结不排水快剪试验测定土壤抗剪强度, 剪切完的环刀样品, 将土样过 0.2 mm 的筛子冲洗出根系, 测定根系密度。饱和和原状土的抗剪强度采用 Mohr-Coulomb 强度理论准确测定, Mohr-

Coulomb 公式为<sup>[20]</sup>:

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

式中,  $S$  为土壤抗剪强度 (kPa);  $C$  为黏聚力 (kPa);  $P$  为垂直压力 (kPa);  $\varphi$  为内摩擦角 ( $^{\circ}$ )

本研究采用决定系数 ( $R^2$ )、均方根误差 (RMSE) 来衡量拟合函数或模型的有效性, 筛选适用于试验条件的结果。

### 1.4 数据处理与分析

试验数据采用 Excel 2016、Origin 2018 与 SPSS 21.0 进行数理统计分析, ArcGIS10.0 和 Origin2018 进行制图。

表 1 各发育阶段崩岗的基本特征

Table 1 Basic characteristics of collapsing at each development stage							
崩岗类型	位置	海拔	坡度	郁闭度	草本覆盖度	植物	侵蚀特征
Type of collapsing	Location	Elevation /m	Gradient /%	Canopy density/%	Grass coverage/%	Plants	Erosion characteristics
初期崩岗 Initial gully	26°11'2.08"N; 115°10'34.15"E	185.3~201.6	8.7~40.1	59	76	<i>Pinus massoniana</i> Lamb+ <i>Dicranopteris linearis</i> + <i>Buxus sinica</i> + <i>Miscanthus sinensis</i> + <i>Schima superba</i> + <i>Broussonetia papyifera</i> + <i>Cinnamomum</i> + <i>Raphiolepis indica</i> <i>var.indica</i> + <i>Syzygium jambos</i> (L.) Alston	崩口规模较小, 集水区面积较大, 降雨和暴雨形成的径流易产生下切侵蚀加速崩塌。以径流下切为主, 重力侵蚀较少。
活跃崩岗 Active gully	26°11'19.53"N; 115°10'32.56"E	177.0~207.3	5.2~31.4	43	62	<i>Pinus massoniana</i> Lamb+ <i>Dicranopteris linearis</i> + <i>Miscanthus sinensis</i> + <i>Agropyron cristatum</i> + <i>Dicranopteris linearis</i> + <i>Stipa bungeana</i>	侵蚀区域植被稀少, 物种变化大, 崩岗发育活跃, 沟头溯源侵蚀和径流下切的速度快。以径流下切和重力侵蚀相互促进。
稳定崩岗 Stable gully	26°11'42.63"N; 115°10'47.34"E	186.6~208.6	12.2~29.7	31	40	<i>Pinus massoniana</i> Lamb+ <i>Dicranopteris linearis</i> + <i>Eremochloa ciliaris</i> + <i>Koilodepas</i> + <i>Broussonetia papyifera</i> + <i>Ilex pubescens</i> + <i>Cucurbita pepo</i> + <i>Miscanthus floridulus</i> + <i>Opilia amentacea</i> + <i>Anneslea fragrans</i> + <i>Koilodepas Broussonetia papyifera</i> + <i>Ilex pubescens</i>	沟头的发育接近分水岭, 上方来水减少, 径流下切基本停止, 崩岗发育逐渐稳定, 生态系统逐步恢复, 无溯源侵蚀现象, 主要以径流侵蚀为主。



图 2 ZJ 型应变控制式直剪仪

Fig. 2 ZJ-model strain controlled direct shear apparatus

## 2 结果

### 2.1 不同发育阶段崩岗各部位土壤性质的变化规律

各采样点土壤的基本性质见表 2。各发育阶段崩岗的土壤物理孔隙大, 结构较差, 表层土壤容重范围为  $1.02 \sim 1.40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 随崩岗部位的下移逐渐降低, 并随崩岗的发育呈先降低后上升的趋势, 其中下坡和沟道与其他部位存在显著差异; 各发育阶段崩岗土壤颗粒组成以粉粒居多, 黏粒含量较低,

土壤质地属于粉质壤土, 呈明显粗骨质化现象, 其中, 以沟道部位的土壤砂粒含量明显高于其他部位; pH 的变化范围为 3.95~4.98, 呈中-强酸性; 土壤有机质的含量普遍处于较低水平, 土壤养分贫瘠, 致使植被自然恢复速度缓慢, 呈现出典型的退化特征; 根系密度的范围在  $0.27\sim 3.57\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 对土壤的固

结作用较弱, 抗蚀性差, 随崩岗的发育呈现先降低后上升的趋势。在崩岗发育过程中, 以活跃期崩岗土壤性质恶化最为严重, 大量细粒组分及养分被搬运至洪积扇, 掩埋下游农田, 而粗粒组分在崩积体及沟道发生沉积, 导致崩岗系统土壤瘠薄, 植被生长困难<sup>[24-25]</sup>。

表 2 各发育阶段崩岗采样点的土壤理化性质

Table 2 Basic soil properties of the sampling sites different in collapse development stage

样点 Site code	pH (H <sub>2</sub> O)	粒级配 Particle-size distribution/%			
		砾石 Gravel	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay
		IC	4.35±0.36	38.73±0.92	22.20±0.65
IU	4.41±0.12	28.35±0.63	20.04±1.11	54.41±1.23	25.55±0.98
IM	4.10±0.03	24.20±1.08	21.20±1.77	55.10±2.64	23.70±1.01
IL	4.22±0.04	20.87±1.77	19.59±0.43	51.12±3.00	29.29±1.97
IS	4.10±0.17	3.78±1.21	24.64±1.71	56.30±2.49	19.06±0.21
AC	4.16±0.47	37.99±0.77	21.37±0.98	56.62±2.48	22.01±1.83
AU	4.00±0.15	36.20±0.55	22.49±0.79	56.31±2.15	21.20±0.55
AM	3.95±0.07	31.82±0.45	23.84±1.09	51.31±1.59	24.85±1.11
AL	4.73±0.08	29.23±0.54	16.68±1.16	60.73±2.46	22.59±1.74
AS	4.27±0.25	3.64±0.66	26.42±1.42	55.34±2.71	18.24±0.34
SC	4.37±0.09	28.81±0.30	27.73±1.07	54.10±2.47	19.61±1.01
SU	4.22±0.11	23.00±0.29	29.26±1.84	49.92±2.19	20.82±0.77
SM	4.55±0.07	19.73±0.94	27.56±0.61	52.86±1.30	19.58±1.85
SL	4.41±0.16	19.87±0.95	24.88±0.53	53.57±2.02	21.55±1.61
SS	4.98±0.09	11.70±0.45	28.44±1.40	55.19±2.49	16.37±0.92

样点 Site code	有机质 Organic matter/ (g·kg <sup>-1</sup> )	根系密度 Root density/ (kg·m <sup>-3</sup> )	容重 Bulk density/ (kg·m <sup>-3</sup> )	毛管孔隙 Capillary porosity/ %	总孔隙 Total porosity/ %
IC	8.09±1.42	2.75±0.27	1.42±0.06	42.79±0.09	44.43±0.54
IU	9.34±0.59	3.05±0.03	1.40±0.03	41.25±0.03	47.22±0.27
IM	11.04±0.97	2.33±0.12	1.40±0.05	48.82±0.17	58.84±0.13
IL	16.92±0.76	3.57±0.46	1.29±0.21	39.88±0.11	51.74±0.23
IS	5.66±1.18	0.96±0.18	1.10±0.20	50.13±0.13	66.05±0.11
AC	8.60±0.36	2.19±0.16	1.40±0.07	40.15±0.15	52.80±0.41
AU	9.69±0.50	2.12±0.22	1.38±0.06	41.26±0.11	47.21±0.14

续表

样点 Site code	有机质 Organic matter/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	根系密度 Root density/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	容重 Bulk density/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	毛管孔隙 Capillary porosity/ %	总孔隙 Total porosity/ %
AM	10.10±0.15	2.81±0.17	1.27±0.19	42.77±0.21	56.51±0.39
AL	4.73±0.48	0.77±0.12	1.06±0.14	45.34±0.21	59.47±0.15
AS	3.87±0.31	0.27±0.10	1.02±0.03	45.28±0.35	64.29±0.55
SC	7.27±0.44	1.81±0.29	1.34±0.12	43.41±0.30	59.24±0.36
SU	8.59±0.32	1.83±0.31	1.39±0.17	44.62±0.24	58.35±0.42
SM	9.18±0.73	2.10±0.14	1.37±0.01	41.44±0.14	58.73±0.27
SL	11.49±0.50	1.87±0.11	1.19±0.05	42.76±0.19	57.51±0.19
SS	10.97±0.35	2.35±0.25	1.28±0.11	42.22±0.19	51.81±0.21

注：样点第一个字母 I-初期；A-活跃期；S-稳定期。第二个字母 C-集水区；U-上坡；M-中坡；L-下坡；S-沟道。下同 Note: The first letter of a sampling site: I stands for -Initial stage; A for-Active stage; and S for-Stable stage; The second letter: C stands for -Collecting area; U for- Upper slope, M for- Middle slope; L for- Lower slope; and S for- Scour channel. The same below

## 2.2 不同发育阶段崩岗各部位抗剪强度分布特征

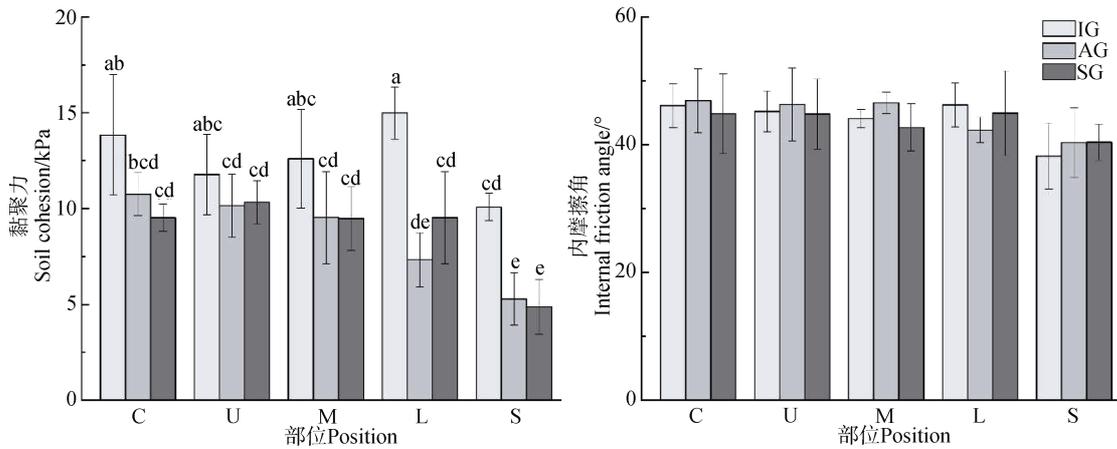
土壤抗剪强度是由垂直荷载的法向应力、土壤内摩擦角和黏聚力共同确定。黏聚力是表征土壤凝聚强度的重要因子，主要来源于胶结物质的胶结作用和颗粒间的静电力、范德华力，例如土壤中有有机质、游离氧化铁等<sup>[26-27]</sup>。内摩擦角是土壤摩擦强度的表征参数，主要取决于咬合摩擦，即剪切面颗粒间的交错排列使颗粒间发生提升错动、转动、拔出，重新定向排列及颗粒本身的破坏断裂<sup>[28]</sup>，与土壤颗粒大小分配，颗粒形状及孔隙度密切相关。

如图 3 实验结果表明：随着发育程度的加深，崩岗各阶段的抗剪强度参数均表现为递减趋势。张爱国等<sup>[18]</sup>通过在国内大范围尺度上建立土壤抗剪强度回归模型，分析了抗剪强度在水平空间和垂直空间上的变化规律。发育初期崩岗各部位的黏聚力均显著大于发育活跃期和发育稳定期，可能原因是发育初期崩岗土体在与根系的缠绕和固结过程中，因形成一定的土壤结构形式、根系分泌产生的有机胶结剂等因素，增加了土壤颗粒间的结合强度，在发育初期崩岗的下坡部位土壤黏聚力达到峰值，即 14.98 kPa，随着发育的进行，物种变化明显，植被稀少，各部位黏聚力具明显下降趋势，以发育稳定期崩岗的沟道部位最低，即 4.87 kPa。处于稳定期的崩岗，因生态平衡逐渐恢复，土壤有机质等含量逐渐上升，胶结物质增多，因此发育稳定期崩岗各部位间黏聚力下降缓慢，为发育活跃期的 88.59%~

99.40%，并在下坡部位有一定的回升趋势。

此外，内摩擦角的变化趋势同黏聚力相似，但其下降的趋势较为缓慢，由各发育阶段不同部位间的对比可知，以集水区部位的内摩擦角最高，沟道部位最低。对应土壤本身的容重及孔隙度可知，当容重减小或孔隙比增大时，土体的密实度降低，土壤颗粒间摩擦力随之减小，内摩擦角也变小，这与陈晓安<sup>[17]</sup>研究结果相似。而同一发育阶段不同部位间，内摩擦角顺地势高低呈现不规则的减小趋势。这是由于饱和原状土中的水分含量充足，被软化的胶结物质可作为润滑剂，在土壤颗粒间起到润滑作用，当坡面受到水流的剪切和冲刷作用时，粗颗粒滞留在集水区和上坡区域，细颗粒被夹杂着带至坡下和沟道，使得沟道部位土壤颗粒间的粗糙度降低，减小了摩擦力，进而降低了土壤内摩擦角。

表 3 显示了五个空间部位抗剪强度参数的显著变化（即，黏聚力从 4.87 kPa 到 14.99 kPa，内摩擦角从 38.22°到 46.89°）。其中，以沟道部位的抗剪强度最小，相对于其他空间部位差异较大，造成这种差异的原因可能是由不同坡地位置的土壤性质和根系的生长状况造成的。土壤性质以土体密度、总孔隙度、颗粒组成、有机质含量以及根系密度为代表，在不同空间部位的各个发育阶段崩岗上存在很大差异（表 2）。特别是沟道的黏粒含量和根系密度与其他部位相比明显减少，在各个发育阶段，根系密度



注：部位：C-集水区；U-上坡；M-中坡；L-下坡；S-沟道。图例：IG-初期崩岗；AG-活跃崩岗；SG-稳定崩岗。Note: The position: C stands for Collecting area; U for Upper slope, M for Middle slope; L for Lower slope; and S for Scour channel. Legend: IG stands for Initial gully; AG for Active gully; and SG for Stable gully.

图3 各发育阶段崩岗黏聚力和内摩擦角分布

Fig. 3 Distribution of soil cohesion and internal friction angle relative to development stage

表3 不同部位抗剪强度的统计参数

Table 3 Statistics of soil shear strength relative to position of the sampling site

	部位 Position	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准误 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation	样本数 <i>n</i>
黏聚力 Soil cohesion /kPa	集水区	9.52	13.84	11.37	2.22	0.20	15
	上坡	10.14	11.78	10.75	0.89	0.08	15
	中坡	9.48	12.60	10.54	1.79	0.17	15
	下坡	7.34	14.99	10.61	3.94	0.37	15
	沟道	4.87	10.07	6.74	2.89	0.43	15
内摩擦角 Internal friction angle/°	集水区	44.82	46.89	45.94	1.05	0.02	15
	上坡	44.78	46.31	45.43	0.79	0.02	15
	中坡	42.70	46.54	44.43	1.95	0.04	15
	下坡	42.28	46.21	44.48	2.00	0.05	15
	沟道	38.22	40.38	39.63	1.23	0.03	15

较其他四个空间部位减少 27.0%~41.0%，黏粒含量较其他四个空间部位减少 24.0%~53.7%。

### 2.3 崩岗区抗剪强度在发育过程中的影响因素

崩岗侵蚀区因生态系统严重退化，土壤基本性质恶劣，降雨时土壤快速达到饱和，保水及供水能力差，容易被水流剪切，从而发生侵蚀<sup>[29-30]</sup>。反之，土壤干旱时的贮水保水能力低，无法满足植被正常生长所需的水分，使得植被难以生长，土壤退化更加严重，其抵抗水流剪切能力更弱<sup>[31]</sup>。因此，研究崩岗区土壤各

性质参数与抗剪强度指标的关系，对于指导崩岗侵蚀治理和加快侵蚀区的生态恢复建设具有重要意义。

表4所示为土壤各性质参数间的相关关系，可知：土壤的容重、根系和粒径级配等与抗剪强度之间存在高度相关关系。其中，根系密度、砾石含量、容重、孔隙度与内摩擦角之间的关系密切，呈极显著相关 ( $R^2 > 0.60$ ,  $P < 0.01$ )，相关性大小为  $Gr > RD > BD > TP > CP$ ；毛管孔隙、总孔隙与内摩擦角呈负显著相关；黏粒含量、根系密度与黏聚力也呈极

表 4 土壤基本性质参数的相关关系矩阵

Table 4 The correlation matrix of soil basic properties

	C	$\varphi$	BD	CP	TP	Gr	Sa	Si	Cl	pH	OM
BD	0.57*	0.67**									
CP	-0.17	-0.63*	-0.40								
TP	-0.42	-0.65**	-0.65**	0.75**							
Gr	0.48	0.86**	0.57*	-0.49	-0.73**						
Sa	-0.44	-0.32	0.09	0.07	0.30	-0.44					
Si	-0.25	-0.29	-0.40	0.25	-0.04	0.14	-0.50				
Cl	0.65**	0.57*	0.16	-0.27	-0.25	0.33	-0.68**	-0.28			
pH	-0.50	-0.40	-0.17	-0.16	-0.05	-0.22	0.13	0.29	-0.41		
OM	0.54*	0.50	0.52*	-0.49	-0.45	0.17	-0.13	-0.56*	0.54*	-0.09	
RD	0.67**	0.68**	0.75**	-0.59*	-0.72**	0.49	-0.21	-0.46	0.55*	-0.13	0.83**

注：\* $P < 0.05$ （双侧），\*\* $P < 0.01$ （双侧），C-黏聚力； $\varphi$ -内摩擦角；BD-容重；CP-毛管孔隙度；TP-总孔隙度；Gr-砾石；Sa-砂粒；Si-粉粒；Cl-黏粒；pH-酸碱度；OM-有机质；RD-根系密度。Note：\* $P < 0.05$ （two-sided），\*\* $P < 0.01$ （two-sided），C stands for Cohesion； $\varphi$  for internal friction angle；BD for Bulk density；CP for Capillary porosity；TP for Total porosity；Gr for Gravel；Sa for Sand；Si for Silt；Cl for Clay；pH for soil pH；OM for Organic matter；and RD for Root density.

显著相关（ $R^2 > 0.60$ ， $P < 0.01$ ），将各个参数分别与黏聚力和内摩擦角进行逐步回归分析后，结果显示：砾石含量、粉粒含量、黏粒含量和根系密度为描述土壤抗剪强度最适合的参数指标。

将上述选取的参数分别与内摩擦角和黏聚力进行拟合，发现砾石含量、黏粒含量与内摩擦角呈现出良好的幂函数关系，根系密度与黏聚力呈现出良好的线性相关关系，这一结果与李慧等<sup>[32]</sup>和李建兴等<sup>[33]</sup>关于植物根系对抗剪强度的影响研究中得出的结论相似。虽然粉粒含量与内摩擦角的相关关系较低，但相较其他参数，粉粒含量在回归分析时对内摩擦角的贡献度较高，因此，选用砾石含量、粉粒含量、黏粒含量和根系密度四个参数来描述土壤抗剪强度的变化特征，对它们之间的关系进行拟合，发现呈现良好的幂函数关系（图 4），此结论与 Chen 等<sup>[12]</sup>和 Elham 等<sup>[34]</sup>得到的土壤性质参数拟合抗剪强度的关系较类似，表 5 所示为土壤基本性质与抗剪强度指标的函数关系。

#### 2.4 土壤基本性质与抗剪强度的拟合模型

土壤基本性质与抗剪强度存在十分密切的关系。综合其他研究者的结论，土壤颗粒与微结构间的胶结力能够抵抗外营力作用带来的土壤离散，植物根系能网络固持土壤<sup>[35-37]</sup>，增强土壤稳

定性。从土壤基本性质定量分析抗剪强度，以内摩擦角  $\varphi$  为目标函数，选取上述拟合结果较好的砾石含量、粉粒含量和黏粒含量作为自变量建立多元回归模型：

$$\varphi = 48.65Gr^{0.07}Si^{-0.26}Cl^{0.10} R^2=0.87, P<0.01 \quad (2)$$

以决定系数（ $R^2$ ）、均方根误差（RMSE）来衡量拟合函数的有效性，其中  $R^2$  值为 0.87，RMSE 值为 0.92，拟合结果达到预测精度要求。从试验的综合结果看，砾石含量是影响崩岗土体内摩擦角的主导因子，其次为黏粒含量和粉粒含量，土壤中粗颗粒物增多，保水保肥能力随之下降，而适量的水分对土壤有一定的黏结力，黏结力减小，土壤颗粒间的移动较为容易，摩擦力降低。由上式拟合结果结合根系密度与黏聚力的拟合结果，对土壤基本性质参数与饱和抗剪强度的关系进行拟合分析，建立基于土壤基本性质预测饱和抗剪强度的模型，结果如下：

$$S = 1.93RD + P \tan \left( 49.12Gr^{0.06}Si^{-0.26}Cl^{0.08} \right) + 7.14$$

$$R^2=0.89, P<0.01 \quad (3)$$

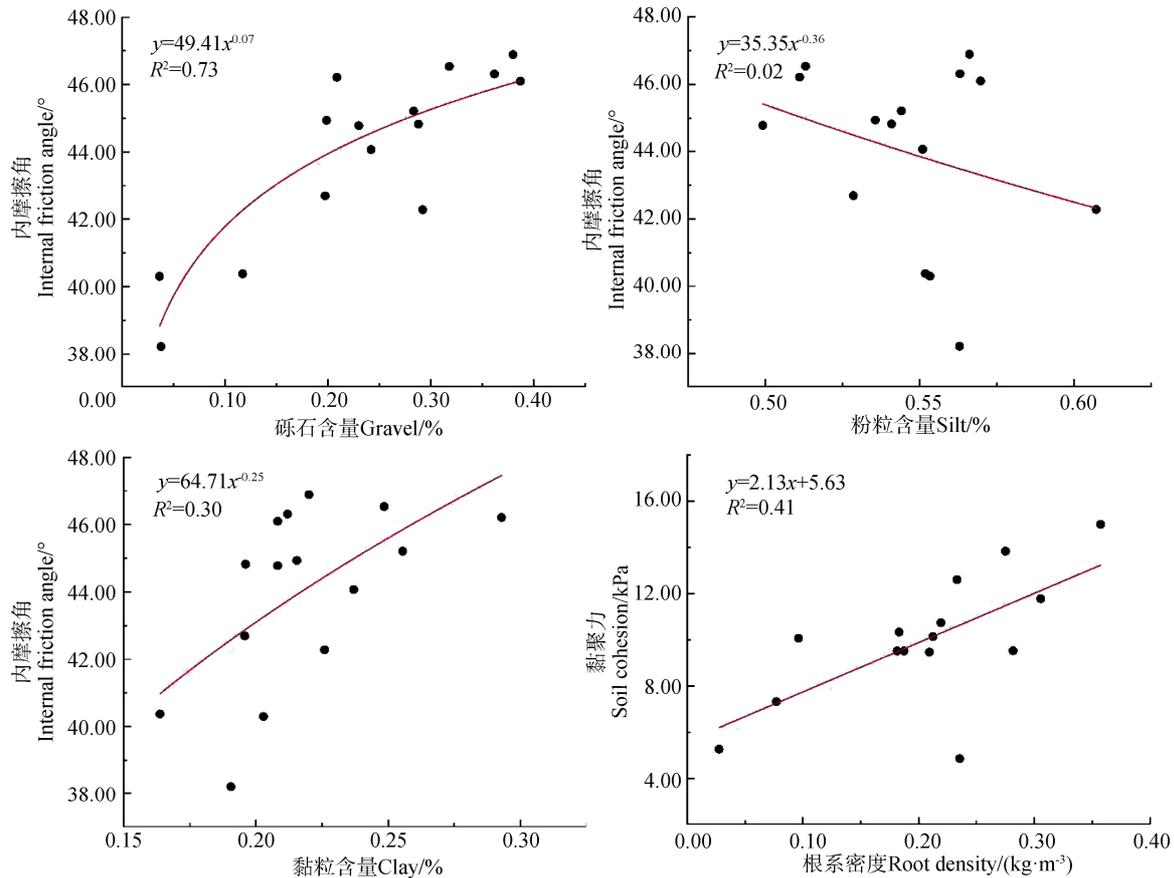


图4 土壤基本性质与抗剪强度指标的关系

Fig. 4 Relationship between soil properties and shear strength index

表5 土壤基本性质与抗剪强度指标的关系

Table 5 Relationships between soil properties and shear strength index

参数 Parameter	函数 Function	$R^2$	$P$
Gr, $\varphi$	$\varphi = 49.41 \text{ Gr}^{0.07}$	0.73	<0.01
Si, $\varphi$	$\varphi = 35.35 \text{ Si}^{-0.36}$	0.02	=0.29
Cl, $\varphi$	$\varphi = 64.71 \text{ Cl}^{-0.25}$	0.30	<0.05
RD, $C$	$C = 2.13 \text{ RD} + 5.63$	0.41	<0.01

注: 样本数  $n=15$  Note: Sample size  $n=15$ .

式中,  $P$  表示垂直压力, 即土壤滑动面积与垂直荷载的比值。拟合结果显示, 土壤基本性质参数对于饱和抗剪强度有较好的预测效果 ( $R^2 > 0.75$ ,  $P < 0.01$ ), 在提高土壤抗剪切能力, 增强土壤稳定性中, 根系密度、砾石含量、粉粒含量和黏粒含量起着至关重要的作用, 其主要由于根系与土壤颗粒间

的接触面积越大, 结合越紧密, 且根系的分泌物对土壤颗粒也起到一定的黏结作用, 从而提高了土体的黏聚力, 而土壤粗颗粒物质增多, 使得土体密度降低, 间接降低土壤内摩擦角, 故根系密度、砾石含量、粉粒含量和黏粒含量是影响土壤抗剪强度的重要参数。

在此试验中, 以各个发育阶段崩岗为研究对象, 针对崩岗各部位土壤基本性质的差异性, 通过测量其饱和状态下土壤的抗剪强度, 建立基于崩岗土壤基本性质与饱和抗剪强度的土壤侵蚀预报模型, 拟合得到最优的抗剪强度预报方程, 将预测模型的模拟值与实测值进行对比 (如图 5), 结果发现密切程度较高 ( $R^2 > 0.88$ ,  $P < 0.01$ ), 预测值与实测值具有良好的重叠度, 方程的可信程度较好 ( $\text{RMSE} = 8.79$ ), 说明本试验通过土壤的粒径级配与根系密度参数所构建的饱和抗剪强度预测方程精度较高, 预测效果较理想。

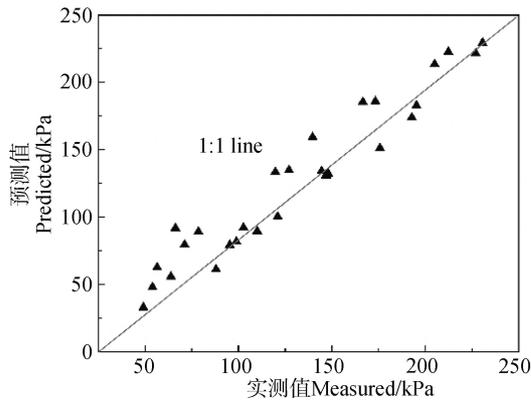


图 5 拟合方程实测值与预测值对比

Fig. 5 Comparison between measured values and the ones predicted with fitting equation

### 3 结 论

本试验以崩岗随发育的进行,各部位的土壤基本性质对饱和和抗剪强度的影响结果进行研究。综合分析土壤基本性质和饱和抗剪强度随崩岗发育过程的变化特征,其中,崩岗系统内土壤颗粒粗化,持水性能较弱,有机质含量偏低,相关土壤物理性质呈明显退化特征。此外,崩岗各部位黏聚力和内摩擦角均随崩岗的发育呈明显下降趋势,其中以集水区部位达到峰值,沟道部位达到最小值。当崩岗发育到稳定期时,因植被恢复使得根-土复合体提高土壤黏聚力,从而使抗剪强度有一定的回升趋势。以土壤各性质参数与抗剪强度指标进行逐步回归分析,得出根系密度和粒径级配预测崩岗表层土壤随发育过程的饱和抗剪强度变化,预报模型可信程度较好,预测精度较高,对崩岗土壤基本性质与抗剪强度的响应机制研究提供了一定的理论依据,但试验以空间换时间,对于不同发育阶段崩岗的土壤性质差异分析存在着一定的不确定性,因此,试验预计划对同一崩岗进行长期动态监测和试验采样与分析,以期对崩岗区水土保持措施研究和生态恢复重建技术提供更可靠地参考价值与现实意义。

#### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Zeng Z X. Topographic principle. Guangzhou: South China Normal University Press, 1960: 64—67. [曾昭璇. 地形学原理 (第一册). 广州: 华南师范大学出版社, 1960: 64—67.]
- [ 2 ] Liao Y S, Tang C Y, Yuan Z J, et al. Research progress on collapsing erosion and its prevention measure in red soil region of southern China. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 ( 6 ): 1298—1306. [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. *土壤学报*, 2018, 55 ( 6 ): 1298—1306.]
- [ 3 ] Li S X, Gui H Z, Ding S W. Features of spatial layout of hill collapse in South China. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2013, 1 ( 32 ): 83—86. [李双喜, 桂惠中, 丁树文. 中国南方崩岗空间分布特征. *华中农业大学学报*, 2013, 32 ( 1 ): 83—86.]
- [ 4 ] Xu J. Benggang erosion: The influencing factors. *Catena*, 1996, 27 ( s3/s4 ): 249—263.
- [ 5 ] Zeng Z X. Observation collapse erosion development and its control in Baoliu landscape. *Soil and Water Conservation in Fujian*, 1992 ( 2 ): 18—23. [曾昭璇. 从瀑流地貌看崩岗侵蚀发育及其整治. *福建水土保持*, 1992 ( 2 ): 18—23.]
- [ 6 ] Wang J G, Li Z X, Cai C F, et al. Quantitative relationships of detachment rate of red soil in concentrated flow with soil aggregate characteristics and soil shear strength. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 ( 6 ): 1133—1140. [王军光, 李朝霞, 蔡崇法, 等. 集中水流内红壤分离速率与团聚体特征及剪强度定量. *土壤学报*, 2011, 48 ( 6 ): 1133—1140.]
- [ 7 ] Léonard J, Richard G. Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength. *Catena*, 2004, 57 ( 3 ): 233—249.
- [ 8 ] Zhang S W, Wang S T, Liu N, et al. Comparison of spatial prediction method for soil texture. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27 ( 1 ): 332—339. [张世文, 王胜涛, 刘娜, 等. 土壤质地空间预测方法比较. *农业工程学报*, 2011, 27 ( 1 ): 332—339.]
- [ 9 ] Sun S L, Wang L F. Comparison of shear strength between saturated and unsaturated sandy silt. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28 ( 11 ): 1932—1935. [孙树林, 王利丰. 饱和、非饱和有机质粉土抗剪强度的对比. *岩土工程学报*, 2006, 28 ( 11 ): 1932—1935.]
- [ 10 ] Wei Y J, Wu X L, Cai C F. Spatial variability of soil shrinkage characteristics in profile of slope disintegration body. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46 ( 6 ): 153—159. [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. *农业机械学报*, 2015, 46 ( 6 ): 153—159.]
- [ 11 ] Zhang C, Wang X, Zou X, et al. Estimation of surface shear strength of undisturbed soils in the eastern part of northern China's wind erosion area. *Soil & Tillage Research*, 2018, 178: 1—10.
- [ 12 ] Chen X A, Yang J, Xiong Y, et al. Research on the soil characteristics and factors of collapsing erosion in the red soil zone. *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. 水利学报, 2013, 44 (10): 1175—1181.]
- [ 13 ] Lee I M, Sung S G, Cho G C. Effect of stress state on the unsaturated shear strength of a weather. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42 (2): 624—631.
- [ 14 ] Wang S L. Study on soil water characteristics and fertility based on the terracing of collapsing hill in Jingouxing small watershed of Gan county in Jiangxi Province. 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. 武汉: 华中农业大学, 2016.]
- [ 15 ] Chen H X, Li F H, Hao S L, et al. Effects of soil water content and soil basicity on soil shearing strength. 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. 农业工程学报, 2007, 23 (2): 21—25.]
- [ 16 ] Martei S J. Mechanics of landslide initiation as a shear fracture phenomenon. Marine Geology, 2004, 203(3/4): 319—339.
- [ 17 ] Chen X A. Stratified difference of soil physical properties of collapse mound erosion areas and its influence to the development of collapse mound. Soil and Water Conservation in China, 2015(12): 71—72. [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. 中国水土保持, 2015 (12): 71—72.]
- [ 18 ] Zhang A G, Li R, Yang Q K. Study on soil anti-shearing intensity of water erosion in China. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21 (3): 5—9. [张爱国, 李锐, 杨勤科. 中国水蚀土壤抗剪强度研究. 水土保持通报, 2001, 21 (3): 5—9.]
- [ 19 ] Xia Z G, Deng Y S, Zhao Y, et al. Relationship between soil shear strength and soil moisture of granite collapsing hill in southeast of Hubei Province. Science of Soil and Water Conservation, 2016, 14 (6): 26—34. [夏振刚, 邓羽松, 赵媛, 等. 鄂东南花岗岩崩岗岩土抗剪强度与含水量的关系. 中国水土保持科学, 2016, 14 (6): 26—34.]
- [ 20 ] 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. 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. 农业工程学报, 2012, 28 (5): 241—245.]
- [ 21 ] Bischetti G B, Chiaradia E A, Simonato T, et al. Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy). Plant & Soil, 2005, 278(1/2): 11—22.
- [ 22 ] Yang J H, Dong J Y, Huang Z Q, et al. Large-scale direct shear tests on accumulation body with different stone contents. 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. 岩土工程学报, 2016, 38(S2): 161—166.]
- [ 23 ] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil physicochemical analyses. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1978. [中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.]
- [ 24 ] Deng Y S, Ding S W, Cai C F, et al. Spatial distribution of the collapsing alluvial soil physical properties in Southeastern Hubei. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47 (24): 4850—4857. [邓羽松, 丁树文, 蔡崇法, 等. 鄂东南崩岗洪积扇土壤物理性质空间分异特征. 中国农业科学, 2014, 47 (24): 4850—4857.]
- [ 25 ] Chen X M, Huang D A, Wu H S. Characteristics of macropore and their affecting factors of major paddy soils in Taihu lake region. 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. 土壤学报, 2006, 43 (3): 509—512.]
- [ 26 ] Coulomb C A. Essai sur une application des regles de maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs a l'architecture (essay on maximums and minimums of rules to some static problems relating to architecture). Columns 1973.
- [ 27 ] Chen L H, Chen Z Y, Liu J M. Probability distribution of soil strength. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26 (1): 37—40. [陈立宏, 陈祖煜, 刘金梅. 土体抗剪强度指标的概率分布类型研究. 岩土力学, 2005, 26(1): 37—40.]
- [ 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. 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. 土壤学报, 2013, 50 (6): 1090—1101.]
- [ 29 ] Knapen A, Poesen J, Govers G, et al. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. Earth Science Reviews, 2007, 80 (1): 75—109.
- [ 30 ] Weiler M. Macropores and preferential flow—A love-hate relationship. Hydrological Processes, 2017, 31 (1): 15—19.
- [ 31 ] Liu Y J, Wang T W, Cai C F, et al. Effect of vegetation restoration on soil shear strength of roadside slopes of unpaved roads in the Three-Gorges Reservoir area. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50 (2): 396—404. [刘窑军, 王天巍, 蔡崇法, 等. 植被恢复对三峡库区土质道路边坡抗剪强度的影响. 土壤学报, 2013, 50(2): 396—404.]
- [ 32 ] Li H, Huang Y H, Jiang F S, et al. Effects of two herbal plants' roots on soil shear strength in a collapsing gully alluvial fan. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31 (3): 98—101. [李慧, 黄炎和, 蒋芳市, 等. 2 种草本植物根系对崩岗洪积扇土壤抗剪强度的影响. 水土保持学报, 2017, 31 (3): 98—101.]

- [ 33 ] 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. *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. *农业工程学报*, 2013, 29 ( 10 ): 144—152.]
- [ 34 ] Elham A K, Hojat E, Mohammad R M, et al. Estimation of unsaturated shear strength parameters using easily-available soil properties. *Soil&Tillage Research*, 2018, 184: 118—127.
- [ 35 ] Ge R L, Zhang C F, Meng Z J, et al. The shear property comparison of three roots-soil composite. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28 ( 2 ): 85—90. [格日乐, 张成福, 蒙仲举, 等. 3 种植物根-土复合体抗剪特性对比分析. *水土保持学报*, 2014, 28 ( 2 ): 85—90.]
- [ 36 ] Wang Y Q, Wang Y J, Zhang H J, et al. Impacts of soil structure on shear-resistance of soil under different land uses in Jinyun Mountain of Chongqing City. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22 ( 3 ): 40—45. [王云琦, 王玉杰, 张洪江, 等. 重庆缙云山不同土地利用类型土壤结构对土壤抗剪性能的影响. *农业工程学报*, 2006, 22 ( 3 ): 40—45.]
- [ 37 ] Osman N, Barakbah S S. Parameters to predict slope stability-soil water and root profiles. *Ecological Engineering*, 2006, 28 ( 1 ): 90—95.

( 责任编辑：檀满枝 )