

花岗岩崩岗不同层次土壤抗冲性及其影响因素

徐加盼¹, 邓羽松¹, 陈峰云², 王秋霞¹, 刘丹露¹, 丁树文¹

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 汉口学院管理学院, 武汉 430212)

摘要: 针对湖北通城花岗岩崩岗区发育的淋溶层(A层)、淀积层(B层)、过渡层(BC层)以及母质层(C层), 采用不同坡度(8.8%, 17.6%, 26.8%, 36.4%, 46.6%)和不同流量(0.2, 1.0 L/s)相结合的室内放水冲刷试验, 分析崩岗各层次土壤的抗冲性指数, 初步探讨花岗岩崩岗不同坡度及各层次土壤主要理化性质对抗冲性的影响。结果表明: (1) 湖北通城县崩岗土壤A层、B层、BC层以及C层的理化性质存在较大差异。 (2) 当流量一定时, 随着坡度的增大, 土壤的抗冲性指数均表现为减小的趋势; 当坡度一定时, 大流量条件下土壤的抗冲性指数较小; 在相同坡度和流量条件下, 土壤的抗冲性指数均由A层向C层递减, 说明A层抗冲性能最好, C层最差。 (3) 各层次的土壤抗冲性指数随坡度呈显著的线性递减关系($p < 0.05$), 土壤的抗冲性能随坡度的增加而减小, 其中A层回归方程的系数项绝对值最大, 常数项也最大, 说明A层的抗冲性随坡度的变化最快, 抗流水侵蚀能力最强, 土壤流失量最少。 (4) 土壤抗冲性与粉粒含量、黏粒含量、水稳性指数、渗透系数呈正相关; 与土壤干密度、砂粒含量呈负相关, 其中干密度以及水稳性指数的相关性较高, 表现为极显著相关; 土壤抗冲性与有机质含量、CEC、游离氧化铁呈正相关, 与土壤pH呈负相关, 其中与有机质含量的相关性系数大于0.9, 相关性极显著。

关键词: 崩岗; 抗冲性指数; 放水冲刷; 坡度; 土壤理化性质; 相关性分析

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0009-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.05.002

Anti-scourability on Different Soil Horizons of Granite Collapsing Gully and Its Driving Forces

XU Jiapan¹, DENG Yusong¹, CHEN Fengyun², WANG Qiuxia¹, LIU Danlu¹, DING Shuwen¹

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070;

2. College of Management Hankou University, Wuhan 430212)

Abstract: For developed eluvial horizon (A), illuvial horizon (B), transition horizon (BC) and the parent material horizon (C) of granite collapsing gullies region in Tongcheng, Hubei province, the impact of slope and flow on soil anti-scourability and related soil physical properties were explored. Specifically, the slope were 8.8%, 17.6%, 26.8%, 36.4%, and 46.6%, and the flow were 0.2 L/s, and 1.0 L/s, respectively. The results showed that physical and chemical properties were: (1) significant different among layer A, layer B, layer BC, and layer C of granite collapsing gully soil. (2) When the flow was constant, index of soil anti-scourability showed a decreasing trend, with the increase of the slope; when the slope was constant, the index under high flow conditions was low; at the same slope and flow conditions, the index decreased from layer A to layer C, indicating that layer A has the best anti-scourability, while layer C has the worst. (3) The soil anti-scourability index of all layer decreased linearly with the increase of the slope ($p < 0.05$), and the erosion resistance of soil decreased with the increase of the slope. The absolute values of the coefficients of regression equation in layer A were the largest and the constant was also the largest. This shows that the anti-scourability of layer A changes sharply with the slope, the erosion resistance of layer A is the strongest and the soil loss is the least. (4) There was a positive correlation between soil anti-scourability index and the content of silt, clay content, water stability index and permeability coefficient, and negative correlation with soil dry density and sand content. The correlation between dry density and water stability index was very high, which showed extremely significant correlation. The soil anti-scourability was positively correlated with organic matter content, CEC and free iron Oxide, while negatively correlated with soil pH, specifically, the correlation coefficient with the organic matter content was greater than 0.9, which was extremely significant.

收稿日期: 2016-12-15

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“花岗岩风化岩土体特性的地带性分异及崩岗形成机理研究”(41630858); 华中农业大学国家级大学生创新创业训练计划“花岗岩崩岗不同层次土壤可蚀性与抗冲性对崩岗形成的影响”(201510504021)

第一作者: 徐加盼(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀方面研究。E-mail: jappaxu@163.com

通信作者: 丁树文(1964—), 男, 副教授, 主要从事水土保持、生态环境保护方面的研究。E-mail: dingshuwen@mail.hzau.edu.cn

Keywords: collapsing gullies; index of anti-scourability; water rushing; slope; physical and chemical properties of soil; correlation analysis

崩岗是在水力和重力共同作用下,山坡土体受破坏而崩塌和冲刷的侵蚀现象,主要发育在花岗岩风化壳上,分布面积广,南至广东省,北至鄂东南地区^[1-2]。崩岗侵蚀长期以来是我国南方一种危害严重的水土流失现象,它毁坏农田和基础设施,造成巨大经济损失,是这些地区生态环境恶化的重要原因,被形象地称为生态环境的“溃疡”^[3-5]。区域尺度土壤侵蚀的土壤学因子研究对水土流失的综合治理及预测模型的建立具有重要意义,而土壤抗冲性是最能体现出区域水土流失过程和规律的指示指标之一^[6-7]。土壤抗冲性是指土壤抵抗外力机械破坏作用的能力,是评价土壤抗侵蚀性能的重要方面^[8-9]。土壤抗冲性研究始于 20 世纪 50 年代^[10],主要集中在测试方法、评价指标、以及抗冲性的时空变化规律等方面^[11-13],且研究范围主要在黄土高原区^[14-17]。在影响因素方面,土壤抗冲性主要受土壤物理性质和外在的生物因素影响^[18-19]。已有研究表明^[20-21],紫色土区土壤抗冲性随土壤干密度呈极显著负相关,而与土壤有机质、水稳定性团聚体含量和入渗能力等呈极显著正相关。目前,土壤抗冲性及其影响因素方面的研究主要集中于黄土区和紫色土区,另外高双等^[22]、王恩姮等^[23]对于黑土区也开展了一定研究。南方红壤丘陵区具有特殊地貌特征和水土流失类型,它既是长江中下游的重要生态屏障,又是南方主要的耕作区,目前关于南方红壤丘陵区土壤抗冲性与水土流失之间内在联系的研究却比较少。为此,本研究采用原状土冲刷槽法,开展该区域土壤抗冲性变化特征及影响因素研究,为揭示南方丘陵区水土保持机理及有效防治花岗岩地区崩岗侵蚀提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

通城县位于湖北省东南部,东经 113°36′—114°4′,北纬 29°2′—29°24′,地处北亚热带季风气候区,年平均气温 15.5~16.7℃,年平均降水量 1 450~1 600 mm,光照适中,气候温和,雨量充沛,但受季风和地貌的影响,使得降雨和温度条件时空分布不均,灾害性天气常有发生。该地区土壤为以花岗岩母质发育的红壤为主,结构比较松散,花岗岩经过燕山运动后,经过风化与剥蚀之后形成切割程度较高的低山和丘陵。正是由于这样的气候地形条件,境内水土流失严重,尤其是崩岗侵蚀范围广,土壤侵蚀模数大,严重影响该区域农业用地与经济发展。

1.2 试验材料与设备

试验于 2015 年 7 月选择湖北省通城县五里镇一

处典型的崩岗进行研究,此崩岗仍然处于溯源侵蚀活动期,因此具有较为完整的剖面。采样前将崩岗崩壁剖面土层从上到下划分为 A 层、B 层、BC 层和 C 层,崩岗剖面的发育规律符合我国南方花岗岩地区崩岗的典型特征。采样时,修整崩岗剖面使其各层次充分呈现,采样深度控制及各层次特征详见表 1。用直径 14 cm、高 10 cm 的圆柱形环刀采集崩岗各土层原状土样,由于冲刷试验设计为大、小 2 个流量和 5 个不同坡度,并且设置 2 个平行,故每层采集 20 个土样,4 个层次共 80 个;同时在各层次采集散土混合为 1 个土样,然后采用四分法分取样品 1~2 kg 带回室内,根据样品需要制备不同粒径进行分析。

表 1 采样点崩壁各土层深度及特征

土层 编号	土层 深度/cm	土层特征
A	0—10	土体呈暗红色,土壤有机质含量较高,结构较好,土层中分布有植物根系,土粒细腻
B	10—130	土体呈红色,土层均匀,土粒细腻,紧实
BC	130—210	土体呈浅红色至灰白色,原状土体结构较疏松,粒径增大,用手搓捏有沙质感且易疏松
C	210 以下	土体呈灰白色,原状土体松散,粒径明显增大

1.3 试验方法

土壤抗冲性是指土壤抵抗水流的机械破坏和推移的能力,主要与土壤的理化性质以及外在的因素有关。本试验于 2015 年 8 月在华中农业大学水土保持研究中心进行,在原状土冲刷水槽基础上进行改造(图 1)。试验装置主要由 3 部分组成:水槽装置、土样室、供水装置。其中,水槽装置是长 3.8 m、宽 0.2 m、高 0.2 m 的钢制边坡水槽,水槽顶端设有长 0.4 m、宽 0.2 m、高 0.4 m 的稳水箱,下端距出口 20 cm 处有一土样室,试验水槽整体焊接在可移动的支架上,支架末端有升降装置,可手动调节坡度为 8.8%~46.6%。土样室可以让规格为直径 14 cm、高 10 cm、厚度为 3 mm 的圆柱形环刀刚好嵌入,为减少边际效应带来的误差,用玻璃胶进行密封处理。水池中的水量通过调节阀维持稳定,水泵的功率一定,水流的流量通过阀门组控制,通过压力表和流量计来确定。稳水箱起到储水的作用,当稳水箱中的水储满时,水槽中开始产生稳定、均匀的水流,流速通过高锰酸钾示踪法测定。

为了不破坏原状土结构以及使冲刷效果更显著,制作直径为 14 cm、高为 10 cm 的圆柱形取样器,抗冲水槽的坡度设为 8.8%,17.6%,26.8%,36.4%,46.6%。根据当地雨量情况,出水量设计为大(1 L/s)、小(0.2 L/s) 2 种。冲刷土样历时根据各土样性质而定,即

土样厚度减少 2 cm 为止^[24],历时 10~100 s。用水桶收集冲刷过程中的径流泥沙,静置沉淀一段时间,过滤之后,在 105 ℃条件下进行烘干称重。本文采用在出水流速一定的情况下,冲走 1 g 土壤所需的时间 T 来表示土壤抗冲性指数^[25]:

$$ANS=T/WLDS$$

(1)

式中:ANS 为土壤抗冲指数(s/g); T 为冲刷时间(s);WLDS 为冲走土壤质量(g)。

崩岗剖面土壤理化特性均按常规方法采样和测定,进行 3 次平行测定,取平均值(表 2)。

表 2 各层次土壤主要理化性质

土层编号	干密度/ (g·cm ⁻³)	砂粒 含量/%	粉粒 含量/%	黏粒 含量/%	水稳性 指数/%	渗透系数/ (m·s ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	pH	CEC/ (cmol·kg ⁻¹)	游离氧化铁/ (g·kg ⁻¹)
A	1.18	41.62	27.80	30.58	73.87	5.2×10^{-4}	16.95	4.63	12.79	26.99
B	1.34	47.26	12.02	40.73	60.11	9.4×10^{-5}	11.62	4.91	12.15	35.71
BC	1.34	58.81	21.96	19.23	29.24	1.6×10^{-4}	7.27	5.11	8.61	22.21
C	1.28	82.53	14.34	3.13	10.33	5.2×10^{-4}	5.49	5.75	5.61	15.71

2 结果与分析

2.1 不同层次土壤抗冲指数动态变化

由表 3 可知,不同层次土壤的抗冲性指数存在较大差异。当流量一定时,随着坡度的增大,土壤的抗冲性指数均表现为减小的趋势;当坡度一定时,大流量条件下各层次土壤的抗冲性指数均较小,土壤的抗冲能力较差;当坡度和流量均相同时,土壤的抗冲性指数由 A 层向 C 层递减,说明 A 层抗冲性能最好,C 层最差。当流量为 1.0 L/s 时,以坡度为 8.8% 为例,A 层的抗冲性指数最大,为 59.15 s/g,约是 B 层的 6.5 倍,BC 层的 17.8 倍,C 层的 632.7 倍。可见,A 层的抗冲能力最强,而随着土层深度的增加,由 A 层向 C 层呈现出下降的趋势,且下降的幅度逐渐变小,说明从上层到下层花岗岩崩岗土壤抗冲能力的差异性在减小,其中 C 层的抗冲性指数最小,最易发生侵蚀而造成水土流失。

2.2 土壤抗冲性影响因素分析

2.2.1 不同层次土壤抗冲性随坡度的变化 由图 2

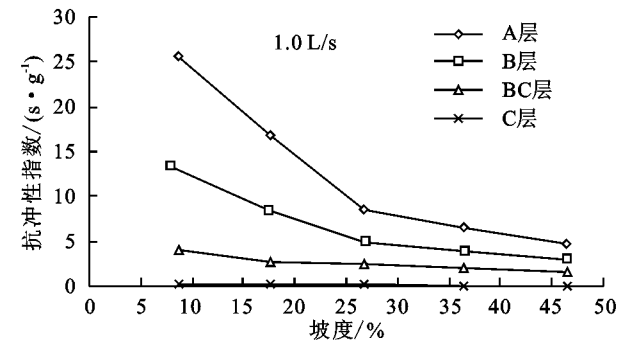


图 2 不同流量条件下各层次土壤抗冲性指数

由表 4 可知,在相同流量条件下,各层土壤回归方程的系数项和常数项差异显著。A 层回归方程的系数项绝对值最大,在 1.0 L/s 时为 0.831 2,是 B 层

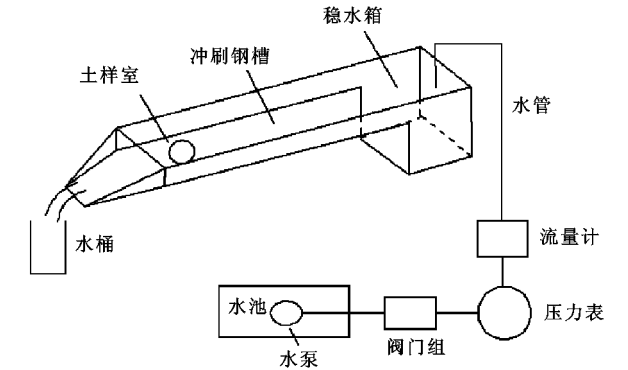
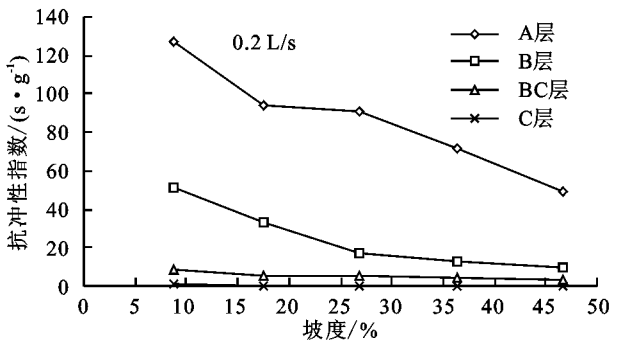


图 1 试验装置示意

可知,各层次的土壤抗冲性指数随坡度呈显著的线性递减关系($p<0.05$),土壤的抗冲性能随坡度的增加而减小。大流量条件下各层次的抗冲性指数均高于小流量条件,说明流量对土壤的抗冲性能有一定的影响。B、BC、C 层较为接近,同时与 A 层的差异较大,说明 A 层抵抗水流的机械破坏和推移的能力明显比下层土壤强,土壤侵蚀过程主要发生在 A 层以下。

表 3 各流量和坡度下不同层次土壤抗冲性指数

流量/ (L·s ⁻¹)	坡度/ %	抗冲性指数/(s·g ⁻¹)			
		A	B	BC	C
1.0	8.8	59.15	9.14	3.32	0.09
	17.6	52.80	7.36	2.67	0.07
	26.8	37.23	3.97	2.54	0.06
	36.4	34.13	3.07	2.05	0.04
	46.6	29.04	2.79	1.25	0.04
0.2	8.8	127.05	50.99	8.23	0.60
	17.6	94.58	33.54	5.46	0.45
	26.8	90.64	16.94	4.85	0.30
	36.4	72.09	13.02	4.25	0.19
	46.6	48.93	9.46	3.31	0.16



的 4.66 倍,BC 层的 16.43 倍,C 层的 554.13 倍,说明 A 层的抗冲性随坡度的变化最快,受坡度条件的影响最大,并且这种影响程度向下层土壤呈现递减趋

势。另外,A 层回归方程的常数项也为最大,说明 A 层的系数项绝对值和常数项均最小,说明其抗冲性随坡度的变化最慢,受影响最小,土壤流失量最大。

表 4 2 种流量下不同层次土壤抗冲性指数随坡度变化经验方程

土层 编号	0.2 L · s ⁻¹			1.0 L · s ⁻¹		
	回归方程	R ²	p	回归方程	R ²	p
A	ANS=−1.8910S+138.10	0.9536	0.004	ANS=−0.8312S+65.115	0.9302	0.014
B	ANS=−1.0868S+54.394	0.8781	0.027	ANS=−0.1784S+10.124	0.8862	0.025
BC	ANS=−0.1166S+8.396	0.8683	0.026	ANS=−0.0506S+3.746	0.9593	0.002
C	ANS=−0.0121S+0.670	0.9387	0.007	ANS=−0.0015S+0.100	0.9212	0.009

注:ANS 为土壤抗冲指数(s/g);S 为水槽的坡度(%)。

2.2.2 土壤主要物理性质对抗冲性的影响 选取大(46.6%)、中(26.8%)、小(8.8%)3 个典型坡度下的土壤抗冲性指数,利用 SPSS 16.0 软件,与土壤干密度、颗粒组成、水稳性团聚体、渗透系数等土壤主要物理性质进行相关性分析。由表 5 可知,土壤抗冲性与粉粒含量、黏粒含量、水稳性指数、渗透系数呈正相关,与土壤干密度、砂粒含量呈负相关,其中和干密度以及水稳性指数的相关性较高,表现为极显著相关。

结合各层次土壤在相同流量下 3 个典型坡度的抗冲性指数,由五里崩岗各层土壤的砂粒(2~0.02 mm)含量来看(表 2),随着风化程度的降低,呈现出 A 层<B 层<BC 层<C 层的趋势,导致 BC 层和 C 层结持松散,透水性较好,抗冲性能差;从黏粒(<0.002 mm)含量来看,A 层含量最高,C 层含量最小,这决定了 A 层的黏结力较好,土壤结持紧密,透水性差,抗冲性能强。由此得出,土壤颗粒中的黏粒能加强土壤的抗冲性能,土壤颗粒中的砂粒会减小土壤的抗冲性能,即小颗粒含量越高,土壤的抗冲性越好。

土壤大团聚体是土壤结构的重要组成部分,其中的水稳性团聚体是维持土壤结构稳定的基础,其含量越高,土壤结构的稳定性越大。由表 3 可知,五里崩岗各层土壤的水稳性指数呈现自 A 层向 C 层递减的变化规律,这表明 A 层的水稳性最大,土壤结构最稳

定,C 层的水稳性最小,土壤的结构稳定性最差。土壤的抗冲性能与水稳性指数呈较好的正相关,这说明土壤中水稳性团聚体含量越高,土壤的抗冲性越好。

2.2.3 土壤主要化学性质对抗冲性的影响 由表 5 可知,土壤抗冲性与有机质含量、CEC、游离氧化铁呈正相关,其中与有机质含量的相关性系数大于 0.9,相关性极显著;与土壤 pH 呈负相关。有机质是土壤的重要组成部分,它影响团聚体的形成和稳定性,是胶结物质的组成之一,与地表径流、土壤渗透性、土壤抗冲性具有密切关系。从五里崩岗土壤剖面来看,上部土层的有机质含量较下部土层高,并具有较大抗冲性能,这表明土壤有机质增强了土壤颗粒间的聚集,起到了抵抗侵蚀营力对土壤的冲刷和搬运、提高土壤结构稳定性的作用,故土壤的抗冲性指数与有机质含量呈较好正相关。同时土壤抗冲性也与阳离子交换量呈正相关,土壤胶体上吸附的各种阳离子代表着土壤保持养分的能力,可以增强土壤的抗冲性能。

五里崩岗土壤的 pH 值很低,呈酸性,这是由于花岗岩在高温湿润地区水解作用和风化淋溶作用增强,钙钠镁钾硫等元素淋失,硅铝铁等氧化物组成的粘土矿物增加,导致土壤的酸性增强。土壤抗冲性与 pH 的相关性指数小于−0.7,呈极显著负相关,这表明酸性土壤 pH 值较低时,土壤的抗冲性能较弱。

表 5 土壤抗冲性与理化性质相关性分析

流量/ 坡度/		指标									
(L · s ⁻¹)	%	干密度	砂粒	粉粒	黏粒	水稳性指数	渗透系数	有机质	pH	CEC	游离氧化铁
1.0	8.8	−0.880**	−0.683*	0.772**	0.442	0.793**	0.473	0.924**	−0.743**	0.701*	0.277
	26.8	−0.891**	−0.658*	0.802**	0.380	0.763**	0.498	0.903**	−0.724**	0.668*	0.230
	46.6	−0.899**	−0.648*	0.793**	0.373	0.759**	0.512	0.901**	−0.713**	0.662*	0.224
0.2	8.8	−0.768**	−0.801**	0.619*	0.623*	0.914**	0.303	0.989**	−0.833**	0.843**	0.507
	26.8	−0.869**	−0.700*	0.753**	0.449	0.812**	0.455	0.936**	−0.757**	0.722**	0.308
	46.6	−0.879**	−0.686*	0.754**	0.433	0.802**	0.471	0.930**	−0.744**	0.709**	0.293

注: * 表示相关性达显著水平(p<0.05); ** 表示相关性达极显著水平(p<0.01)。

2.3 不同层次土壤抗冲性的差异与崩岗发育过程的关系

Deng 等^[26]通过对通城花岗岩风化壳的长期监测,发现崩壁上普遍存在由瀑流冲蚀形成内凹的跌坑,工程地质上称为“瓮”,而瓮的形成与发育是崩岗形成的重要阶段。通过本文研究分析,崩岗不同土层土壤的重要理化性质存在显著差异,使得不同层次土

壤的抗冲性能不一致,为瓮的形成创造了良好的条件。A 层黏粒含量高,渗透性较差,降雨容易导致集水坡面形成径流,径流沿着崩壁形成垂直流,强烈地侵蚀崩壁土体。又由于崩壁不同土层的渗透性和水稳性指数不同,土体剖面尤其是 BC 层和 C 层的土壤渗透性强,水分容易穿透剖面、土壤水稳性差导致土体的内聚力降低,抗冲性能差,从而导致了崩岗剖面

内容易受到侵蚀而凹形成龛。龛不断内蚀与扩大,当凹进深度超过30~60 cm以后,其上含水率较高的土体在重力作用下发生崩塌,崩塌产物大部分随流水带走,使易被冲刷的土层再次暴露出来,在地面径流及瀑流影响下,又形成新的龛,再度发生崩塌,如此反复,伴随溯源侵蚀的发生导致崩壁后退形成崩岗。

3 结论

(1) 湖北通城县花岗岩崩岗土壤A层、B层、BC层以及C层的物化性质存在较大差异。当流量一定时,随着坡度的增大,土壤的抗冲性指数均表现为减小的趋势;当坡度一定时,大流量条件下土壤的抗冲性指数较小;在相同坡度和流量条件下,土壤的抗冲性指数均由A层向C层递减,说明A层抗冲性能最好,C层最差。

(2) 各层次的土壤抗冲性指数随坡度呈显著的线性递减关系($p < 0.05$),土壤的抗冲性能随坡度的增加而减小。其中A层回归方程的系数项绝对值最大,常数项也最大,说明A层的抗冲性随坡度的变化最快,同时抗流水侵蚀能力最强,土壤流失量最少。

(3) 在主要物理因素方面,土壤抗冲性与粉粒含量、黏粒含量、水稳性指数、渗透系数呈正相关;与土壤干密度、砂粒含量呈负相关。其中干密度以及水稳性指数的相关性较高,表现为极显著相关;在主要化学因素方面,土壤抗冲性与有机质含量、CEC、游离氧化铁呈正相关;与土壤pH呈负相关。其中与有机质含量的相关性系数大于0.9,相关性极显著。不同层次土壤抗冲性能的差异与崩岗发育过程有密切关系。

参考文献:

- [1] 邓羽松,丁树文,蔡崇法,等. 鄂东南崩岗剖面土壤水分特征曲线及模拟[J]. 土壤学报,2016,53(2):355-364.
- [2] 段晓倩,倪晨,陈姣,等. 基于含水量高频监测的花岗岩崩岗侵蚀红壤优先流研究[J]. 水土保持学报,2016,30(5):82-88.
- [3] Deng Y S, Cai C F, Xia D, et al. Fractal features of soil particle size distribution under different land-use patterns in alluvial fans of collapsing gullies in the hilly granitic region of southern China[J]. PLoS One, 2017, 12(3):e0173555.
- [4] 邓羽松,丁树文,刘辰明,等. 鄂东南花岗岩崩岗崩壁土壤水分特征研究[J]. 水土保持学报,2015,29(4):132-137.
- [5] Xia D, Deng Y S, Wang S L, et al. Fractal features of soil particle-size distribution of different weathering profiles of the collapsing gullies in the hilly granitic region, south China[J]. Natural Hazards, 2015, 79(1):455-478.
- [6] 周正朝,上官周平. 子午岭次生林植被演替过程的土壤抗冲性[J]. 生态学报,2006,26(10):3270-3275.
- [7] 王丹丹,张建军,丁杨,等. 晋西黄土区退耕林地土壤抗冲性研究[J]. 水土保持学报,2014,28(3):14-18.
- [8] 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.
- [9] De B S, Poesen J, Knapen A, et al. Impact of root architecture on the erosion-reducing potential of roots during concentrated flow[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2007, 32(9):1323-1345.
- [10] 李强,刘国彬,许明祥,等. 黄土丘陵区撂荒地土壤抗冲性及相关理化性质[J]. 农业工程学报,2013,29(10):153-159.
- [11] 王峰,石辉,周立江,等. 土壤抗冲性研究进展[J]. 山地农业生物学报,2010,29(6):528-537.
- [12] Fattet M, Fu Y, Ghestem M, et al. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength[J]. Fuel and Energy Abstracts, 2011, 87(1):60-69.
- [13] 吕春娟,白中科,陈卫国,等. 黄土区大型排土场植被根系的抗蚀抗冲性研究[J]. 水土保持学报,2006,20(2):35-38.
- [14] 郭明明,王文龙,史倩华,等. 黄土高原沟壑区退耕地土壤抗冲性及其与影响因素的关系[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10):129-136.
- [15] 郑江坤,吴黎军,魏天兴,等. 陕北不同地貌部位土壤抗冲性特征研究[J]. 水土保持学报,2009,23(6):14-18.
- [16] Li Q, Liu G, Zhang Z, et al. Effect of root architecture on structural stability and erodibility of topsoils during concentrated flow in hilly Loess Plateau[J]. Chinese Geographical Science, 2015, 25(6):757-764.
- [17] 李聪会,朱首军,陈云明,等. 黄土丘陵区牧草篱对坡耕地土壤抗侵蚀性的影响[J]. 西北林学院学报,2013,28(5):41-46.
- [18] 任改,张洪江,白芝兵. 重庆四面山水源涵养林土壤抗冲性及影响因素[J]. 中国水土保持科学,2013,11(1):1-7.
- [19] Zhang J, Liu G, Shijun N I, et al. Anti-scourability of purple soil on hillslopes with different land uses[J]. Science in China, 2003, 46(S1):133-141.
- [20] 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.
- [21] 邹翔,崔鹏,陈杰,等. 小江流域土壤抗冲性实验研究[J]. 水土保持学报,2004,18(2):71-73.
- [22] 高双,贾燕锋,范昊明,等. 冻融作用下东北黑土区不同土地利用类型土壤抗冲性研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6):69-73.
- [23] 王恩姮,赵雨森,陈祥伟. 典型黑土耕作区土壤结构对季节性冻融的响应[J]. 应用生态学报,2010,21(7):1744-1750.
- [24] Wang J, Li Z, Cai C, et al. Effects of transport distance and flow discharge of overland flow on destruction of Ultisol aggregates[J]. Particucology, 2012, 10(5):607-613.
- [25] 杨玉梅,郑子成,李廷轩. 不同土地利用方式下土壤抗冲性动态变化特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4):64-68.
- [26] Deng Y S, Cai C F, Xia D, et al. Soil atterberg limits of different weathering profiles of the collapsing gullies in the hilly granitic region of southern China[J]. Solid Earth, 2017, 8(2):499-513.