

DOI: 10.11766/trxb202107120359

韦江杏, 邓羽松, 廖达兰, 黄婉霞, 黄娟, 蒋代华. 桂东南花岗岩崩岗土壤界限含水率空间变异及影响因素[J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 749–761.

WEI Jiangxing, DENG Yusong, LIAO Dalan, HUANG Wanxia, HUANG Juan, JIANG Daihua. Spatial Variation and Influencing Factors of Soil Limiting Water Content of Granite Collapsing Gullies in Southeast Guangxi[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(3): 749–761.

桂东南花岗岩崩岗土壤界限含水率空间变异及影响因素*

韦江杏¹, 邓羽松^{1†}, 廖达兰¹, 黄婉霞¹, 黄娟¹, 蒋代华²

(1. 广西大学林学院, 南宁 530004; 2. 广西大学农学院, 南宁 530004)

摘要: 界限含水率是土壤水理性质的一个重要参数, 可表征土体状态随含水量变化而变化的能力, 与崩岗土体稳定性密切相关, 对预测降雨和崩岗侵蚀关系具有重要意义。本研究选取桂东南区活动型、半稳定型和稳定型 3 种花岗岩崩岗为研究对象, 分析各崩岗土壤界限含水率空间变异规律并利用通径分析揭示其影响因素。结果表明: 崩岗各部位土壤界限含水率在空间上存在差异, 活动型和半稳定型崩岗土壤液塑限在崩壁上部有最大值 (液限分别为 54.45% 和 57.08%, 塑限分别为 32.84% 和 34.04%), 洪积锥顶部有最小值 (液限分别为 35.39% 和 30.72%, 塑限分别为 21.92% 和 20.23%); 稳定型崩岗崩壁下部土壤液塑限最小 (液限为 33.78%, 塑限为 22.47%); 随着崩岗发育逐渐稳定, 各部位土壤界限含水率总体呈增加趋势。黏粒、有机质、总孔隙度和毛管孔隙度与土壤液塑限及塑性指数呈极显著正相关关系, 其中, 总孔隙度对土壤液塑限的影响最显著。总孔隙度、黏粒、有机质、毛管孔隙度对界限含水率变化起主导作用, 总孔隙度、黏粒和毛管孔隙度分别是土壤液塑限、塑性指数和液性指数的主要影响因子。此研究结果可进一步明确崩岗侵蚀危害并确定高侵蚀风险部位, 为崩岗危害预防与治理提供相关理论支撑。

关键词: 花岗岩; 崩岗; 界限含水率; 发育阶段; 通径分析; 影响因素

中图分类号: S157.1 文献标志码: A

Spatial Variation and Influencing Factors of Soil Limiting Water Content of Granite Collapsing Gullies in Southeast Guangxi

WEI Jiangxing¹, DENG Yusong^{1†}, LIAO Dalan¹, HUANG Wanxia¹, HUANG Juan¹, JIANG Daihua²

(1. Forestry College of Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Agricultural College of Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: 【Objective】Collapsing gully is an erosion phenomenon of hillside soil under the effect of gravity damage collapse and hydraulic scouring. It is also the most serious and harmful typical soil erosion mode in the granite red soil area in South China. Collapsing gully is mainly distributed in granite hilly areas in seven provinces of Guangdong, Jiangxi, Guangxi, Fujian, Hunan, Hubei and Anhui, and their erosion modulus is large and widely distributed. This causes serious concerns for the local ecological environment and economic development. Limiting water content is an important parameter of soil hydraulic properties, which can

* 广西自然科学基金项目(2021GXNSFBA075017)和国家自然科学基金项目(42007055, 41630858)资助 Supported by the Guangxi Natural Science Foundation Project (No. 2021GXNSFBA075017) and the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42007055, 41630858)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: denny2018@gxu.edu.cn

作者简介: 韦江杏 (2000—), 女, 广西河池人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: WJX001117@163.com

收稿日期: 2021-07-12; 收到修改稿日期: 2022-05-11; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-08-25

characterize the ability of the soil state to change with a change in water content. Given that this is closely related to the stability of collapsing gullies soil, it is of great significance to predict the relationship between rainfall and collapsing gullies erosion. 【Method】 We selected three types of granite collapsing gullies in southeastern Guangxi, active, semi-stable and stable, as the object of study to analyze the spatial variation of soil limiting water content in each collapsing gullies and to reveal the influencing factors by using path analysis. 【Result】 The main results were as follows: (1) Soil limiting water content of each part of collapsing gully varies spatially, the liquid plastic limit of active and semi-stable collapsing gullies soils had maximum value at top of collapsing wall(the liquid limit was 54.45% and 57.08%, the plastic limit was 32.84% and 34.04%, respectively) and minimum value at the top of the pluvial cone(the liquid limit was 35.39% and 30.72%, the plastic limit was 21.92% and 20.23% respectively). Also, the liquid plastic limit of stable collapsing gully had the lowest value at the bottom of the colluvial deposit (the liquid limit was 33.78% and the plastic limit was 22.47%). After gradually stabilizing the development of collapsing gullies, the limiting water content of the soil in each part showed an overall increasing trend. (2) Correlation analysis showed that clay content, organic matter, total porosity and capillary porosity were positively correlated with soil liquid plastic limit and plasticity index, with total porosity having the most significant effect on soil liquid plastic limit. Nevertheless, soil bulk, gravel content and sand content were negatively correlated with soil liquid plastic limit and plasticity index. (3) Path analysis showed that total porosity, clay content, organic matter and capillary porosity played a dominant role in the variation of the limiting water content. Furthermore, total porosity, clay content and capillary porosity were the main factors influencing the liquid plastic limit, plasticity index and liquidity index of soil, respectively. The higher the clay content, total porosity and organic matter, the higher the liquid plastic limit and plasticity index of soil. Also, the stronger the cohesion of the soil, the better the water retention performance of the soil, and the more difficult it is for the soil to crumble and be lost. Capillary porosity negatively affects the liquidity index, that is, the larger the capillary porosity, the lower the liquidity index and the more stable the soil is. 【Conclusion】 The limiting water content is closely related to the start-up and stability of collapsing gullies. When the limiting water content is low and is washed by rain, the soil state is easy to change, and surface runoff is produced, which causes soil collapse and fertility loss. Therefore, the results of this study can help to clarify the soil erosion process, further clarify the erosion hazards of collapsing gullies and identify high erosion risk areas. It can also provide theoretical support for the prevention and management of collapsing gullies hazard and have important significance for the prediction of regional soil and water conservation.

Key words: Granite; Collapsing gully; Limiting water content; Developmental stage; Path analysis; Affect factor

界限含水率是黏性土从一个稠度状态逐渐过渡到另外一个稠度状态时的分界含水率,可分为液限、塑限和缩限^[1],国际上也将液限和塑限称为阿太堡界限(atterberg limit)^[2]。界限含水率是黏性土最基本、最重要的指标之一^[3],也是影响黏性土抗渗透、抗剪切的重要因素^[4-5]。界限含水率相关研究主要集中在建筑、道路桥梁等工程应用以及施工技术上。近几年来,土壤液塑限与土壤侵蚀的关系也逐渐受到关注。Zhou 和 Lu^[6]综合多种土壤,明确了界限含水率与土壤矿质成分、粒径分布及孔隙结构之间的定量关系,且表明界限含水率与毛管持水机制无关;张芹等^[7]从微观角度研究了孔隙溶液对土壤液塑限的作用;Polidori^[8]调查了6种无机土及其与细硅砂的混合物的液塑限,揭示了界限含水率与黏土含量

的关系;Lalitha 等^[9]研究发现,土壤风化剖面的成土作用对界限含水率有显著影响;Sparks^[10]在干旱地区将黏土置于不同环境并对其施加不同建筑荷载,证实了界限含水率可以预测黏土的膨胀,进而可以预防坡面滑坡、溜坍及地裂。以上相关研究从不同角度探讨了土壤理化性质等因素对界限含水率的影响,但仅对其作了简单的相关分析,缺乏对影响因素之间及其相互作用的定量比较。通径分析是利用通径系数分析多个自变量与因变量之间的直接影响,及自变量交互作用下的间接影响,此方法已被广泛运用于农林作物栽培研究中^[11-13]。

崩岗是山坡土体在重力破坏崩塌及水力冲刷作用下的一种侵蚀现象,也是华南花岗岩红壤区侵蚀最严重、危害最大的典型土壤侵蚀方式^[14]。崩岗系

统主要由 5 个部分组成, 分别为集水坡面、崩壁、崩积堆、沟道和洪积锥^[15], 主要分布在粤、赣、桂、闽、湘、鄂、皖 7 省(自治区)的花岗岩丘陵区^[16]。崩岗侵蚀模数大, 分布广泛, 极大危害了当地的生态环境和土地资源。近年来, 崩岗侵蚀研究逐渐受到重视, 并取得了一定研究成果^[17-18]。就崩岗侵蚀机理的探索而言, 相关研究表明, 含水量的变化会导致崩岗边坡土体工程性质发生改变。王彦华等^[19]发现雨水充分与土壤接触时, 土体的力学性质将发生明显的变化。Wen 等^[20]揭示了地表径流可通过优先流通道进入土壤, 增加土体自重, 降低剪切强度, 从而导致土体崩塌。周红艺和李辉霞^[21]发现, 崩壁土体遇水会发生坍塌, 且不同层次土壤在不同含水率情况下崩解程度不同。因而, 花岗岩土壤水分变化会影响崩岗侵蚀强度。界限含水率是土壤水理性质的一个重要参数, 可表征土体状态及随含水量变化而变化的能力, 与崩岗土体稳定性密切相关, 对预测降雨与崩岗侵蚀关系具有重要意义。但是目前对崩岗土壤界限含水率特征及其影响因素的研究较少, 崩岗土壤界限含水率影响因素之间的综合分析及土壤界限含水率与崩岗的侵蚀关系缺乏系统报道。花岗岩是我国长江以南地区主要的岩类母质残积物之一, 因其抗风化程度不同, 导致土体各项指标具有明显差异^[22]。花岗岩风化岩土体结构强度低, 易发生分解、崩塌和堆积, 可为崩岗侵蚀的发生创造条件, 致使土体性质发生改变并对土壤液塑限产生影响。因此, 花岗岩崩岗的发育与土壤界限含水率关系密切, 探讨土壤液塑限性质对崩岗的深入研究具有重要意义。

本研究分析了桂东南花岗岩不同发育阶段(活动型、半稳定型、稳定型)的崩岗土壤界限含水率的空间分布规律, 探讨了界限含水率与崩岗侵蚀的联系, 并结合土壤基本理化性质对界限含水率的影响因素进行途径分析, 以期揭示崩岗侵蚀与水力复合作用的内在联系规律, 为崩岗侵蚀的预防和治理提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区梧州市龙圩区

(22°58'—24°10'N, 110°51'—111°40'E), 属南亚热带季风气候, 易受热带气旋影响, 气候温和, 雨水充足, 太阳辐射光强, 年均气温 21.2℃, 年无霜期 323 d, 年均降雨量 1 507 mm, 降雨年内分布极不均匀, 冬春两季雨量少, 夏秋两季雨量多且集中。该区地形主要为丘陵、低山, 土壤以花岗岩风化壳发育的侵蚀性赤红壤为主, 结构较为松散, 疏松深厚的风化壳可为崩岗的发生提供充足的物质基础。同时, 受海拔地带性和纬度地带性影响, 湿热条件会限制花岗岩的风化, 而梧州市龙圩区海拔约为 50~500 m, 为桂东南低山丘陵地带, 常年高温多雨, 与该区其他地方相比, 水热条件良好, 残积红土发育更旺盛; 地壳抬升幅度较小, 花岗岩风化壳更厚, 崩岗形成速度更快。因此, 龙圩区的土壤和气候条件为桂东南花岗岩区所特有, 同时该区是广西崩岗发育集中区域, 也是南方花岗岩崩岗侵蚀的主要分布区域之一^[15]。植被覆盖类型以马尾松(*Pinus massoniana*)、桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、岗松(*Baeckea frutescens*)、欆木(*Loropetalum chinensis*)、箬竹(*Indocalamus tessellatus*)、铁芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)等为主。2005 年, 全县(龙圩区曾隶属于苍梧县)面积>60 m²的崩岗达 1 592 个, 总面积达 378.13 hm²。龙圩镇是苍梧县崩岗最集中和数量最多的镇, 有崩岗 580 个, 崩岗崩塌流沙量大。由于崩岗泥沙大量下移, 下游河床悬高, 洪水漫田, 沿河两岸农田常受黄泥锈水渗蚀, 沙压瘠化, 旱涝灾害频繁。

1.2 样品采集与分析

桂东南区高温湿润的气候特点有助于促进花岗岩等母质风化为深厚的土层, 进而发育形成崩岗。因此, 该区域崩岗侵蚀类型十分丰富, 数量多且大都集中分布于两广交界的苍梧地区。在前期大量调查的基础上, 分别选择梧州市龙圩区发育年限约 30 年的 3 个花岗岩崩岗, 崩岗呈瓢形, 土壤剖面层次清晰完整。同时, 根据 2005 年水利部南方崩岗外业普查标准和陈志彪等^[23]的研究将 3 个崩岗按发育程度划分为活动型、半稳定型和稳定型。3 个崩岗均位于海拔高度 100 m 以下的低山丘陵地带, 地形较平缓, 便于保留深厚的风化层。由于该地特殊的气候条件和地理特点, 覆盖崩岗的植物种类、植被生

长状况及土壤结构在一定程度上具有相似性和独特性,因而,这3个崩岗发育较为完整且富有特点,在桂东南花岗岩区具有较强的代表性和典型性。活动型崩岗分布在 $23^{\circ}21'45''\text{N}$, $111^{\circ}16'50''\text{E}$,海拔69.67 m,该崩岗植被覆盖度低,均不超过15%,集水坡面、沟道和洪积锥仅存在铁芒萁等部分蕨类植物,崩壁和崩积堆植被稀少,地表裸露,石砾和砂砾等石英颗粒随处可见,且整个崩岗系统土体风化程度低,稳定性差,土壤流失严重;半稳定型崩岗位于 $23^{\circ}21'08''\text{N}$, $111^{\circ}16'42''\text{E}$,海拔58.70 m,崩岗植被覆盖度约30%,植被以马尾松为主,植株矮小,林下植被稀少,集水坡面、沟道和洪积锥处植被覆盖度较低,崩壁和崩积堆处分布着少量铁芒萁和桃金娘,土壤截水能力弱,同时,崩岗土体风化程度较低,土壤抗侵蚀能力差,水土流失灾害频发。稳定型崩岗位于 $23^{\circ}21'19''\text{N}$, $111^{\circ}16'43''\text{E}$,海拔44.13 m,崩岗各部位植被长势较好,五节芒、箬竹等根蘖较发达的禾本科植物生长良好,植被覆盖度较高,各部位植被覆盖度均超过50%,土体风化程度高,稳定性好,土壤侵蚀现象较少。根据崩岗不同部位的划分,夏季单次降雨后的4~6d内分别在集水坡面、崩壁(上部、中部和下部)、崩积堆(上部和下部)、沟道和洪积锥(顶部、中部和底部)处采集各样点原状土和散土。各采样点等高设计3个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 样方,重复采样3次。其中,在集水坡面、崩积堆上部、崩积堆下部、沟道出口、洪积锥顶部、中部和底部采集0~30 cm的表层土壤;崩壁处采样深度为:上部30~100 cm、中部100~400 cm、下部>400 cm。用环刀以垂直土层的角度采集各样点原状土,用“S”型多点混合方法在采样点内的一个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 样方内采集散土,每层重复3次取样混合成一个样品,每个样品取1~2 kg,采样后立即进行密封以防止水分蒸发。

采用常规方法测定其土壤理化性质^[24]。土壤自然风干和过筛后用于土壤理化性质的测定,其中有机质过100目筛(0.147 mm),其他理化性质过2 mm筛规格。采用沉降吸管法测定土壤机械组成,并按照美国农业部制土壤粒径分级标准(黏粒, $<0.002\text{ mm}$;粉粒,0.002~0.05 mm;砂粒,0.05 mm~2 mm;石砾,2 mm~3 mm)对崩岗土壤颗粒的粒级进行划分;采用铝盒烘干法测定土壤天然含水量;采用环刀法测定土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度

和非毛管孔隙度;采用重铬酸钾外加热法进行土壤有机质测定。利用通径分析法研究界限含水率的影响因素。

参考《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019),采用液塑限联合测定法测定土壤塑限和液限。风干土样过0.5 mm筛后,取土样200 g,分成3份,加不同量纯水,调成3种不同稠度的试样(3种不同稠度的试样含水量依次为达到接近液限、中间状态和塑限的含水量),采用电磁落锥法,分别测圆锥自由下落沉入试样5 s时的下沉深度,3点圆锥入土深度分别为3~4、7~9和15~17 mm。该试验方法标准按照沉入深度17 mm所对应的土壤含水量为液限,沉入2 mm所对应的土壤含水量为塑限。塑性指数和液性指数的计算公式如下^[25]:

$$I_p = w_L - w_p$$

$$I_L = (w - w_p) / I_p$$

式中, I_p 为塑性指数; w_L 为液限(%); w_p 为塑限(%); I_L 为液性指数; w 为天然含水率(%)。

1.3 数据处理

采用变异系数(coefficient of variation, CV)分析土壤理化性质和界限含水率的变异程度^[26]。

采用通径分析法对土壤液塑限的多个影响因子的影响程度进行量化分析,通径分析可将各个自变量与因变量的相关系数分解为各自变量对因变量的直接作用和通过其他自变量对该因变量的间接作用,因此,可以直观地表达各个变量之间的相互关系^[27]。

2 结果

2.1 土壤性质及界限含水率描述性统计

本研究所用的花岗岩土壤大多属于砂黏壤,其次为黏壤,少部分为壤土。桂东南花岗岩发育而来的侵蚀性红壤,石砾、砂砾含量较多、黏粒含量较少,土壤颗粒之间的胶结能力较弱,因而所选的崩岗土壤中石砾和砂粒等颗粒占有较大比重,黏粒所占比例小,土壤多为砂性土壤。由表1可以看出,崩岗土壤中石砾含量平均值为23.78%。土壤颗粒组成中砂粒、粉粒和黏粒含量变化范围分别为32.72%~69.20%、22.70%~38.72%和8.10%~36.64%。说明土壤砂粒含量高、黏粒含量低,粗颗粒化严重,渗透性能好,难形成良好的结构,致使

土壤天然含水量较低, 达 19.35%。土壤总孔隙度高, 平均值为 49.88%; 毛管孔隙度平均值为 38.70%, 高于非毛管孔隙度, 这有利于植被吸收水分; 土壤容重、土粒密度、总孔隙度、毛管孔隙度和天然含水量的变异系数分别为 5.95%、1.23%、5.61%、9.84%和 9.56%, 均不超过 10.0%, 属于弱变异, 表明以上土壤理化性质在空间上的变异不大, 对土壤结构影响较低。砂粒含量、非毛管孔隙度、

黏粒含量和有机质的变异系数分别为 18.59%、31.99%、42.66%、75.55%, 前两者为中等变异, 后两者为高等变异, 表明土壤结构性特征存在空间异质性。土壤塑限、液限、塑性指数和液性指数的变化范围分别为 20.23%~35.85%、30.72%~59.68%、10.49~23.71 和-1.00~-0.09, 变异系数分别为 15.51%、16.64%、21.41%和-40.68%, 属于中等变异, 表明崩岗界限含水率在空间上的变异较大。

表 1 土壤理化性质和界限含水率描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of soil physical and chemical properties and limiting water content

指标 Indicator	极小值 Minimum	极大值 Maximum	均值 Mean	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	CV /%
容重 $BD^{①}$ / ($g \cdot cm^{-3}$)	1.16	1.46	1.32	0.02	-0.92	5.95
土粒密度 $\rho^{②}$ / ($g \cdot cm^{-3}$)	2.57	2.69	2.63	0.09	-0.74	1.23
石砾 Gravel/%	13.32	36.68	23.78	0.37	-0.16	24.56
砂粒 Sand/%	32.72	69.20	47.65	0.40	-0.28	18.59
粉粒 Silt/%	22.70	38.72	31.36	-0.31	-0.51	13.52
黏粒 Clay/%	8.10	36.64	20.70	0.55	-1.05	42.66
土壤有机质 $SOM^{③}$ / ($g \cdot kg^{-1}$)	0.45	14.88	5.43	0.51	-0.70	75.55
总孔隙度 $TP^{④}$ / %	45.39	55.05	49.88	0.04	-1.12	5.61
毛管孔隙度 $CP^{⑤}$ / %	29.60	45.64	38.70	-0.81	0.54	9.84
非毛管孔隙度 $NP^{⑥}$ / %	3.37	17.37	11.14	-0.13	-0.61	31.99
天然含水量 $NWC^{⑦}$ / %	15.66	23.70	19.35	0.67	0.21	9.56
塑限 $w_p^{⑧}$ / %	20.23	35.85	28.37	-0.11	-1.05	15.51
液限 $w_L^{⑨}$ / %	30.72	59.68	44.95	0.12	-0.60	16.64
塑性指数 $I_p^{⑩}$	10.49	23.71	16.58	0.64	0.03	21.41
液性指数 $I_L^{⑪}$	-1.00	-0.09	-0.53	0.09	0.57	-40.68

注: ①Bulk density; ②Soil particle density; ③Soil organic matter; ④Total porosity; ⑤Capillary porosity; ⑥Non-capillary porosity; ⑦Natural water content; ⑧Plastic limit; ⑨Liquid limit; ⑩Plasticity index; ⑪Liquidity index.

2.2 崩岗土壤界限含水率特征

由表 2 可知, 活动型、半稳定型和稳定型崩岗塑限变化范围分别为 21.92%~32.84%、20.23%~34.04%和 22.47%~35.85%, 液限变化范围分别为 35.39%~54.45%、30.72%~57.08%和 33.78%~59.68%。活动型和半稳定型崩岗液塑限在崩岗各部位上变化趋势相似, 即集水坡面至崩壁上部液塑限增加, 沿径流方向液塑限在崩壁处逐渐减小、在崩积堆处逐渐增大, 沟道至洪积锥底部液塑限呈先减小后增加的趋势, 其中洪积锥顶部土壤液塑限值最

低(液限分别为 35.39%和 30.72%, 塑限分别为 21.92%和 20.23%), 崩壁上部土壤液塑限值最高(液限分别为 54.45%和 57.08%, 塑限为 32.84%和 34.04%); 稳定型崩岗集水坡面至崩壁下部液塑限逐渐减小, 崩积堆处液塑限变化不大, 崩壁下部土壤液塑限值最低(液限为 33.78%, 塑限为 22.47%), 集水坡面土壤液限最高(59.68%)。3 种不同发育阶段崩岗相同部位液塑限: 随着崩岗发育趋于稳定, 集水坡面土壤液塑限升高且具有显著差异性; 崩壁土壤液塑限较低, 自崩壁上部至下部液塑限逐渐减

表 2 不同发育阶段崩岗不同部位界限含水率

Table 2 Limiting water content of different parts of the crumbling hill at different stages of development

类型	部位	液限	塑限	塑性指数	液性指数
Type	Section	Liquid limit/%	Plastic limit/%	Plasticity index	Liquidity index
AG	UC	50.35±0.69Cb	31.18±0.95Bab	19.17±0.25Bab	-0.81±0.04Ad
	WT	54.45±1.21Aa	32.84±1.15Aa	21.61±0.06Aa	-0.64±0.00Acd
	WM	41.43±0.29Bd	26.03±0.84Acd	15.40±0.55Abc	-0.45±0.07Abc
	WL	35.44±0.92Af	22.29±1.03Ae	13.15±1.94Ac	-0.42±0.05Aabc
	DT	38.58±0.20Be	23.55±0.34Bde	15.03±0.54Abc	-0.39±0.12Aabc
	DL	43.96±0.14Bc	28.82±2.68Abc	15.14±2.54Abc	-0.63±0.22Acd
	SC	48.75±1.62Ab	30.62±1.43Aab	18.13±3.05Aab	-0.39±0.12Aabc
	PT	35.39±0.41Af	21.92±0.44Be	13.47±0.04Ac	-0.14±0.11Aa
	PM	42.26±0.70Bcd	27.18±0.93Bc	15.08±0.23Abc	-0.31±0.04Aab
	PE	50.51±1.18ABb	32.53±2.48Aa	17.98±3.67Aab	-0.58±0.23Abcd
MG	UC	54.99±1.23Ba	33.25±0.38Aa	21.74±0.85ABa	-0.66±0.03Abc
	WT	57.08±0.84Aa	34.04±1.59Aa	23.04±0.74Aa	-0.56±0.07Abc
	WM	43.28±1.19ABcd	27.80±0.34Abc	15.48±1.54Abc	-0.56±0.06Abc
	WL	35.29±0.39Ae	22.26±0.09Ad	13.03±0.29Acd	-0.51±0.17Abc
	DT	43.29±0.37Acd	28.12±1.02Abc	15.17±1.39Abc	-0.56±0.14Abc
	DL	44.97±0.28Ac	29.04±2.23Ab	15.93±2.51Abc	-0.70±0.25Ac
	SC	43.73±1.62Bc	26.68±0.64Bbc	17.05±2.26Ab	-0.37±0.02Aab
	PT	30.72±0.37Bf	20.23±0.21Cd	10.49±0.17Cd	-0.09±0.03Aa
	PM	41.11±0.08Bd	26.43±0.30Bc	14.68±0.22Abc	-0.56±0.05Bbc
	PE	48.77±1.62Bb	33.92±1.19Aa	14.85±0.44Abc	-1.00±0.07Ad
SG	UC	59.68±1.85Aa	34.97±0.38Abc	24.71±2.23Aa	-0.64±0.08Acd
	WT	56.48±2.73Ab	33.20±0.32Ab	23.28±3.05Aa	-0.60±0.08Abcd
	WM	45.39±0.18Ad	26.95±2.63Ad	18.44±2.81Ab	-0.43±0.13Ab
	WL	33.78±0.44Af	22.47±0.21Ae	11.31±0.64Ad	-0.52±0.09Abc
	DT	45.51±1.44Ad	29.27±1.34Acd	16.24±0.10Ab	-0.51±0.02Abc
	DL	45.77±0.45Ad	30.57±0.62Ac	15.20±1.06Abc	-0.62±0.02Abcd
	SC	42.26±2.22Be	24.26±3.44Be	18.00±1.08Ab	-0.18±0.09Aa
	PT	36.05±0.61Af	24.27±0.05Ae	11.78±0.57Bcd	-0.48±0.07Bbc
	PM	45.94±0.45Ad	30.63±1.05Ac	15.31±0.60Abc	-0.76±0.09Cde
	PE	53.36±0.22Ac	35.85±0.51Aa	17.51±0.29Ab	-0.89±0.05Ae

注: AG: 活动型崩岗; MG: 半稳定型崩岗; SG: 稳定型崩岗; UC: 集水坡面; WT: 崩壁上部; WM: 崩壁中部; WL: 崩壁下部; DT: 崩积堆上部; DL: 崩积堆下部; SC: 沟道; PT: 锥顶; PM: 锥中; PE: 锥底。不同大写字母表示不同发育阶段的崩岗同一部位之间差异显著, 不同小写字母表示同一发育阶段的崩岗不同部位之间差异显著 ($P<0.05$)。Note: AG represents active collapse; MG represents semi-stable collapse; SG represents stable collapse; UC represents upper catchment; WT represents the top of collapsing wall; WM represents the middle of collapsing wall; WL represents the bottom of collapsing wall; DT represents the top of colluvial deposit; DL represents the bottom of colluvial deposit; SC represents scour channel; PT represents the top of pluvial cone; PM represents the middle of the pluvial cone; PE represents the bottom of the pluvial cone. Different capital letters meant the significant differences between different development stages of collapsing gullies in the same position, different small letters mean significant differences between different positions of collapsing gullies at the same development stage at 0.05 level.

小；沿径流方向崩积堆土壤液塑限逐渐增大且崩岗越稳定其值越高。在崩岗处于活跃阶段时沟道土壤液塑限值大，随着崩岗发育趋于稳定土壤液塑限值降低；洪积锥处尽管植被逐渐得到恢复，但由于该区域花岗岩土壤为砂性土壤，石英、长石、云母等含量较多，难在短时间内风化，因而土壤的熟化过程相对于其他土壤较速度较慢，故 3 种不同发育阶段崩岗洪积锥土壤液塑限总体上并无明显区别。

塑性指数是土壤质地分类和评价的重要指标^[28]。活动型、半稳定型和稳定型崩岗塑性指数变化范围分别为 13.15~21.61、10.49~23.04 和 11.31~24.71。从总体上看，稳定型崩岗塑性指数最大，活动型崩岗次之，半稳定型崩岗最小。活动型崩岗集水坡面至崩壁上部，塑性指数增加，崩壁上部至洪积锥底部塑性指数呈现“W”型的变化趋势，其中沟道为对称中心，崩壁下部和洪积锥顶部为两侧塑性指数最低点（13.15、13.47）；半稳定型崩岗塑性指数变化与活动型崩岗塑性指数变化趋势一致；稳定型崩岗集水坡面至崩壁下部塑性指数逐渐减小，其余部位塑性指数变化与半稳定型崩岗一致。3 种不同发育阶段崩岗相同部位塑性指数比较：活动型崩岗和半稳定型崩岗崩壁上部塑性指数最大（21.61、23.04），稳定型崩岗集水坡面处塑性指数最大（24.71）。随着崩壁土层深度的增加，塑性指数逐渐减小；崩积堆至沟道塑性指数总体呈增加趋势，洪积锥处从顶部至底部塑性指数逐渐减小。

液性指数是评价土体状态的指数，可表征土体抵抗外力的能力^[29]。活动型、半稳定型和稳定型崩岗液性指数变化范围分别为-0.81~-0.14、-1.00~-0.09 和-0.89~-0.18。3 种不同发育阶段崩岗液性指数均为负数，说明土体处于固态或半固态状态。活动型、半稳定型和稳定型崩岗整体液性指数依次减小，说明活动型崩岗向稳定型崩岗发育过程中土体抵抗外力能力逐渐增强。3 种不同发育阶段崩岗相同部位液性指数比较：沿径流方向液性指数分别在崩积堆和洪积锥处递减，崩壁处液性指数随着土层深度的增加而增加。

2.3 界限含水率的影响因素

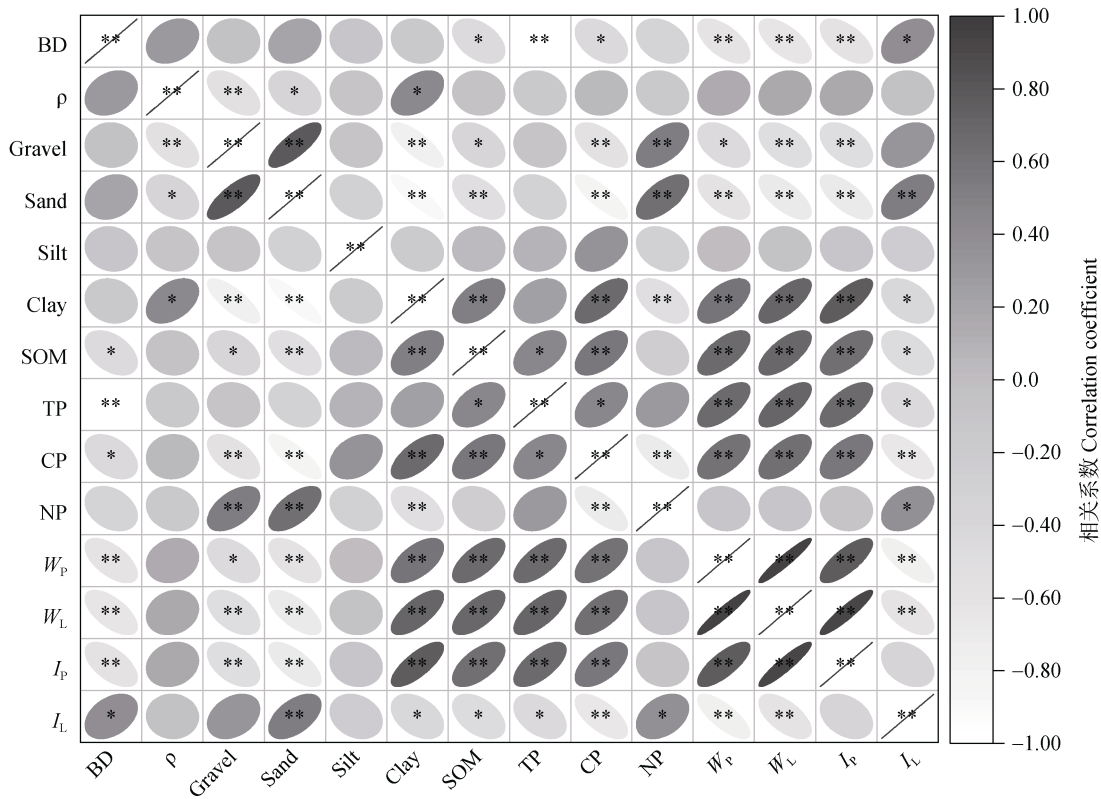
花岗岩崩岗土壤界限含水率变化过程复杂，受各土壤理化性质的综合影响。分析表明，土壤界限含水率受土壤容重、土粒密度、石砾含量、砂粒、

粉粒、黏粒、有机质、总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度的直接影响和间接作用。利用 Origin 2021 软件绘制热图，结果如图 1 所示；使用 SPSS 18.0 软件对数据进行通径分析，得出相关系数和直接通径系数，计算间接通径系数及决定系数，结果如表 3 所示。

由图 1 和表 3 可知，土壤液限与容重、石砾含量、砂粒含量、黏粒含量、有机质、总孔隙度和毛管孔隙度呈极显著相关关系，相关系数分别为 -0.639、-0.496、-0.682、0.709、0.687、0.712、0.629，相关性最大的因子为总孔隙度。其中容重、石砾含量和砂粒含量与土壤液限呈极显著负相关关系，黏粒含量、有机质、总孔隙度和毛管孔隙度与土壤液限呈极显著正相关关系。对各影响因子进行通径分析可知，土壤液限的主要影响因子为总孔隙度、黏粒含量和有机质，其中总孔隙度的决定系数最大，为 0.458，是影响土壤液限的主导因子，对土壤液限起正向决定作用。总孔隙度对土壤液限的直接通径系数大于间接通径系数，同时也大于其他因子的直接通径系数，说明总孔隙度对液限的影响以直接作用为主，间接作用次之。黏粒对液限的直接通径系数大于间接通径系数，产生的影响是以正向直接作用为主。而有机质对液限的直接通径系数小于间接通径系数，说明有机质对液限的影响主要是通过黏粒含量和总孔隙度的间接作用来完成的。

与土壤塑限呈极显著负相关关系的影响因子是土壤容重和砂粒含量，呈极显著正相关的影响因子是黏粒含量、有机质、总孔隙度和毛管孔隙度。由通径分析可知，塑限主要影响因子为总孔隙度、黏粒和有机质。总孔隙度对塑限的影响最大，其影响规律与其对液限的作用相同。黏粒含量对塑限的作用主要以正向直接作用为主。有机质对塑限的直接通径系数小于间接通径系数（0.281<0.380），即有机质主要通过黏粒含量和总孔隙度的正向间接作用影响土壤塑限。从决定系数大小来看，总孔隙度对土壤塑限的影响依然是最大的。

土壤液性指数与砂粒呈极显著正相关关系，相关系数为 0.532；与黏粒含量、有机质和总孔隙度呈显著负相关关系，相关系数依次为-0.403、-0.463、-0.422；与毛管孔隙度呈极显著负相关关系，相关系数为-0.655。由通径分析可知，土壤液性指数主要影响因子为毛管孔隙度，直接通径系数为-0.655，



注：*和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著。黑色表示正相关，灰色表示负相关，颜色越深相关性越强，面积越大相关性越强。Note: * and ** denotes significant correlation at 0.05 and 0.01 levels, respectively. Black indicates a positive correlation, grey indicates a negative correlation, the darker the colour the stronger the correlation and the larger the area the stronger the correlation.

图 1 土壤理化性质与界限含水率的相关系数

Fig. 1 Correlation coefficients between soil physicochemical properties and limiting water content

表 3 土壤理化性质对界限含水率的通径分析

Table 3 Path analysis of soil physicochemical properties on limiting water content

界限含水率	自变量	相关系数	直接通径系数	间接通径系数 Indirect path coefficient				决定系数	
Limiting water content	Independent variable	Correlation coefficient	Direct path coefficient	TP	Clay	SOM	CP	间接通径系数合计	Decision coefficient
								Total indirect path coefficients	
液限 Liquid limit	TP	0.712	0.491	—	0.119	0.102	—	0.221	0.458
	Clay	0.709	0.472	0.124	—	0.113	—	0.237	0.447
	SOM	0.687	0.222	0.224	0.241	—	—	0.465	0.256
塑限 Plastic limit	TP	0.677	0.465	—	0.084	0.128	—	0.212	0.381
	Clay	0.589	0.327	0.118	—	0.144	—	0.262	0.278
	SOM	0.661	0.281	0.213	0.167	—	—	0.380	0.294
塑性指数 Plasticity index	TP	0.660	0.499	—	0.161	—	—	0.161	0.410
	Clay	0.764	0.637	0.127	—	—	—	0.127	0.868
液性指数 Liquidity index	CP	-0.655	-0.655	—	—	—	—	—	—

无间接途径系数,说明毛管孔隙度对液性指数产生的效应为直接负效应,即花岗岩土壤毛管孔隙度越大,液性指数越小。塑性指数与土壤容重、石砾含量、砂粒、黏粒、有机质、总孔隙度和毛管孔隙度呈极显著相关关系,相关性最大的因子为黏粒,相关系数为 0.764。由途径分析可知,黏粒含量和总孔隙度对塑性指数变化起主要作用,且二者对土壤塑性指数变化均起正向直接作用。同时,由决定系数可知,黏粒对塑性指数的影响最大,这也间接验证了塑性指数是土体质地评价的重要指标。

3 讨 论

3.1 土壤理化性质与崩岗界限含水率的空间变异

土壤界限含水率在崩岗不同部位存在着显著差异。崩岗集水坡面由持水性和涨缩性较强的红土层及表土层组成,有机质含量高,土壤容重较小,毛管孔隙度较大,黏粒含量整体也较高,致使水分难以向下渗透^[30]。因此,在降雨后一段时间内土壤仍能保持较高的含水量,故土壤液塑限值高、塑性指数高。

崩壁上部主要由表土层和被破坏后的红土层组成,其有机质和黏粒含量较高,土壤颗粒之间的胶结能力强,团聚状况好,使得该层土壤液限、塑限和塑性指数最大。崩壁中部主要土壤颗粒为砂粒,黏粒含量较低,土体大多呈散状结构,质地疏松多孔,透水性能强,故该部位与其他部位相比土壤液塑限值较低。崩壁下部砂粒含量高,黏粒含量极低,有机质含量达到最低,土壤结构十分松散。因此,崩壁下部土壤液塑限极低。崩积堆是崩岗沟头或沟壁崩塌下来的物质在底部堆积形成的锥形堆积物^[31]。该部位土壤容重、土粒密度和有机质含量偏低,且土壤中砂粒含量高、黏粒含量低,土壤颗粒之间黏结力弱,致使土壤液塑限处于一个较低的值。同时崩塌对原状土破坏强烈,导致崩积堆土体结构更加松散,在降雨过程中更易发生土壤侵蚀,造成水土流失。沟道是崩岗系统内物质输移过程中十分重要的通道,洪积锥是崩岗水流和泥沙堆积而成的部位,是泥沙主要沉积区域^[14]。当携带大量泥沙碎屑的水流由沟道流出崩岗口后,部分大颗粒物质沿径流方向被冲刷至洪积锥外,其他颗粒大多留存在沟道和洪积锥里且细小颗粒多集中于沟道。因此,沟道处

土壤黏度高,质地细,持水性强,土壤液塑限值高。崩岗泥沙输送过程中,粗颗粒由于重力作用会在洪积锥顶部附近堆积,而较细颗粒则在洪积锥底部逐渐沉积。随着与洪积锥顶部距离的增加土壤中砂粒显著减少,粉粒和黏粒显著增加,有机质含量及毛管孔隙度增加,土壤保水性能逐渐变强。因此,沿径流方向该部位土壤液塑限变高。

不同发育阶段的崩岗土壤界限含水率存在差异。由于活动型崩岗处于持续崩塌状态,土壤容重大,有机质含量低,土壤疏松,土体稳定性弱。相对于其他两种崩岗,此类崩岗土壤液塑限值比较低。半稳定型崩岗也处于较为活跃的状态,土体不断崩塌而使土壤得到更新,土壤有机质升高、土壤容重降低、土壤孔隙少,因而土壤液塑值变高。稳定型崩岗处于较为稳定的状态,土壤发育较为成熟,结构稳定,同时植被覆盖度增加,生物活动增强,在一定程度上提高了土壤养分含量,土体更加稳定,进而使土壤的液塑限值变高。因此,随着崩岗发育趋于稳定,崩岗各部位土壤有机质含量升高,土壤容重减小,黏粒含量不断增加,土壤团聚状况变好,土体强度变高,结构更稳定,因而崩岗各部位土壤界限含水率总体呈增加趋势。

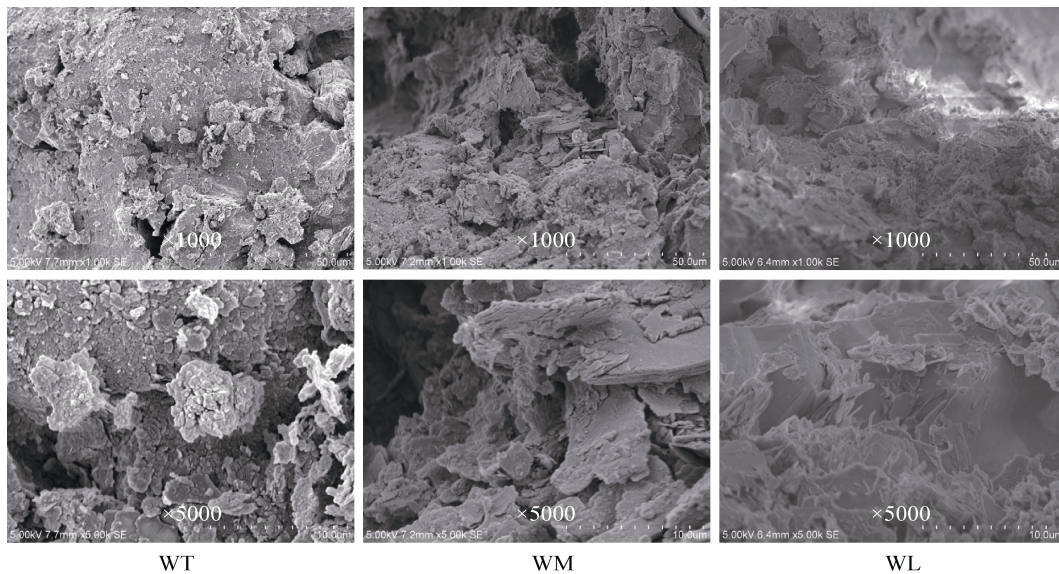
3.2 崩岗土壤界限含水率的影响因素

土壤容重是土壤的基本理化性质之一,对土壤通气性、渗透性和持水性有重要影响^[32]。紧实度高的土壤对降低土壤入渗速率和土壤蓄水量的效果更加明显,即土壤容重增加,土壤入渗率和蓄水量减小。随着土壤容重的增加,土壤团粒结构丧失、土壤孔隙减少、入渗性能降低。土壤入渗能力降低,水分渗入土壤的速度变慢,一段时间内,土壤含水量变化不大,使土壤可以保持较高的液塑限。崩岗五大组成部位中崩积堆土壤容重较大,土壤团粒结构不稳定,渗透性能好,导致其液塑限值较低,说明土壤容重对土壤界限含水率有很大的影响,土壤容重越高,液塑限值越低,越易造成水土流失。

土壤结构影响界限含水率大小。从活动型崩岗崩壁土壤颗粒电镜扫描结果(图 2)来看,崩壁上部、中部和下部土壤结构具有显著的差异,上部风化程度高的土壤颗粒形成致密的团聚体结构,表面较为粗糙且形状不规整,颗粒无明显菱角,不易受到破坏,结构较稳定,界限含水率高;中部土壤颗粒呈层状结构,土体内部颗粒胶结能力弱,土壤颗

粒较分散,质地疏松,结构松散,界限含水率处于一个较低的值;下部土壤颗粒呈片状结构,土壤颗粒边界清晰,表面光滑,形状规整,土壤颗粒几乎不形成团聚体,故相对以上两个部位界限含水率最低。土壤孔隙是土壤水分运动和贮存场所,与土壤结构和团聚体稳定性密切相关^[33]。总孔隙度与土壤容重呈显著负相关关系,且相关系数最大。说明土壤容重降低,总孔隙度将升高,土体结构将更稳定,土壤液塑限将增大。土壤的

颗粒组成决定了土壤对各种物质的吸附能力,直接影响着土壤的渗透、容重、孔隙、团聚状况等特征^[34]。由相关性分析可知,黏粒含量与毛管孔隙度呈极显著正相关关系。因此,随着土壤黏粒含量与毛管孔隙度的增加,土壤比表面积变大,吸附能力变强。黏粒含量的增多使土体黏结力增强,土体内部颗粒排列更紧密,土壤排水性能降低,保水性能增加,土壤液塑限值变高,地表产流量小而使土壤不易受到侵蚀。



注:从左至右依次为同一放大倍数下崩壁上部、中部和下部土壤微结构,从上至下依次为不同放大倍数下崩壁同一部位土壤微结构。Note: From left to right are the soil microstructure of the top, middle and bottom parts of the collapsing wall under the same magnification, and from top to bottom are the soil microstructure of the same part of the collapsing wall under different magnification.

图2 花岗岩风化壳不同土层土壤颗粒微形态特征

Fig. 2 Micromorphological character of soil particles in different soil layers of granite weathering crust

有机质是土壤的重要组成成分,对养分供给、土壤物理性质的改善及土壤侵蚀的防治有重要意义^[35]。相关研究显示,有机质含量过高,会引起土壤的高塑性^[36]。经分析可知,崩岗土壤有机质与土壤液限、塑限和塑性指数呈极显著正相关关系,与液性指数呈显著负相关关系,这与庄雅婷等^[5]和张越等^[37]的结果一致。土壤有机质含量增加,促进了土壤团聚体的形成,改变了土壤的胶结状态,进而改善土壤结构,土壤液塑限值升高,使土壤吸附作用和保水能力增强,土壤便不易崩塌流失^[38]。

3.3 界限含水率与崩岗侵蚀的启动及稳定关系

经通径分析发现,不同因子对界限含水率的影响效果不同,土壤液塑限值的高低对土壤侵蚀也有

一定的影响。崩岗集水坡面土壤液塑限值相对较高,是因为土壤黏粒较多、质地较细、非毛管孔隙度较低、持水性能较好^[39]。集水坡面处抗冲刷和抗侵蚀能力强,但坡面处容易产生裂隙。当水分在坡面上部或中部土层大量沉积时,水分沿着裂隙向下渗透,土体自重增加,土体边坡不稳易形成崩岗。同时,在大面积降雨冲刷作用下,坡面土层含水量到达土壤的液限,产生地表径流会使得崩岗侵蚀灾害进一步加剧。

崩壁上部土壤液塑限相对中部和下部要高。由于崩壁上部土壤液限值较中部大,其抗蚀能力相对较强,土体强度较大。Xia等^[40]发现崩壁处存在一个弱渗透层而使水分难以下渗,当降雨时间较长时,

上部土壤含水量持续增加接近土壤塑限,会使土体的抗剪强度降低,稳定性能变差,易造成崩塌和流失现象。崩壁下部土壤液塑限值极低,说明含水量变化对该部位影响较大。在降雨量较小情况下,崩壁下部土壤含水量很容易达到土壤液塑限,从而产生地表径流造成土体崩塌。且集水坡面与未受侵蚀的土壤接壤,主要以面蚀为主,侵蚀强度较低,当坡面遇强降雨时,其水分分布不均匀会改变崩壁土体的剪切力和抗剪强度,加剧崩壁侵蚀强度^[41-42]。崩壁土体崩塌后形成的崩积堆结构松散、复杂无序。该部位土壤液塑限值低,在大面积降雨时,土粒易与水分产生亲和力,当土壤含水量增加至土壤液塑限时,易发生土壤侵蚀、造成土体的崩解。沟道处黏粒含量相对较高,土壤液塑限值较高,土体较稳定,土壤不易被侵蚀。洪积锥是崩岗上部崩塌后泥沙沉积的主要区域,具有一定的坡度。该处土壤容重大,砂粒含量高,土质疏松,土壤颗粒的变大导致了土地的沙化,致使该处土壤贫瘠,植被根系扎入土层较浅,生长较为困难,难以快速覆盖地表,降低径流的冲刷。加之该处土壤液塑限值最低,当洪积锥遇到具有较大势能的坡面径流冲刷时,土壤水分增大极易达到土壤液塑限,土体抗剪强度便迅速下降,土壤下切侵蚀,导致土体结构失稳,故该处为易发生土壤侵蚀的高风险部位。同时由于部分地区耕作用地紧张,需要在部分崩岗洪积锥处进行农业活动,这不仅不利于作物的生长,而且会进一步破坏土壤结构,增加土壤可蚀性,土壤更易遭受侵蚀,产生更为严重的水土流失灾害。

综合分析土壤基本性质和界限含水率空间变化规律可知,总体上崩岗各部位液塑限值均增大。活动型崩岗处于活跃状态,侵蚀区内植被覆盖率低,表土裸露,土体松散,土壤液塑限值低。因此,在降雨的情况下,坡面水分含量升高,土壤易达到液塑限值,进而产生地表径流,造成崩塌和水土流失。半稳定型崩岗也在不断更新中,但土壤相对紧实,土体强度较高,土壤液塑限值较高,植被逐渐得到恢复,土壤发生侵蚀的概率变小。稳定型崩岗趋于稳定状态,由于植被得到大面积恢复,土壤团聚状况良好,界限含水率高,崩岗不易发生侵蚀。由此可知,植被的恢复对侵蚀区内土壤界限含水率大小及崩岗侵蚀的发生有极其重要的意义。

4 结 论

(1) 花岗岩崩岗土壤界限含水率在崩岗各个部位呈现出明显的空间差异,活动型和半稳定型崩岗土壤液塑限在崩壁上部有最大值,洪积锥顶部有最小值;稳定型崩岗崩壁下部土壤液塑限最小;随着崩岗发育逐渐稳定,各部位土壤界限含水率总体呈增加趋势。(2) 相关性分析表明,黏粒含量、有机质、总孔隙度和毛管孔隙度与土壤液塑限和塑性指数呈极显著正相关关系,其中总孔隙度对土壤液塑限的影响最显著;土壤容重和砂粒含量与土壤液塑限和塑性指数呈极显著负相关关系。(3) 通径分析表明,总孔隙度、黏粒含量、有机质、毛管孔隙度对界限含水率变化起主要作用,其中总孔隙度、黏粒含量和毛管孔隙度分别对土壤液塑限、塑性指数和液性指数的影响效果最为明显。表现为黏粒含量、总孔隙度和有机质越高,土壤液塑限和塑性指数越高,土体的黏结力增强,土壤保水性能好,土壤便难以发生崩塌和流失。毛管孔隙度对液性指数产生负效应,即毛管孔隙度越大,液性指数越低,土壤越稳定。(4) 探讨土壤界限含水率的空间分布特征及理化因子对界限含水率的影响,有助于阐明土壤侵蚀过程,明确其与花岗岩崩岗侵蚀的启动与稳定关系,为崩岗危害防治提供理论支撑,对预防和控制水土流失有重要意义。

参考文献 (References)

- [1] Bobrowsky P T, Marker B, Ostad-Ali-Askari K. Encyclopedia of engineering geology[M]. New York: Springer International Publishing, 2018.
- [2] Arthur E, Rehman H U, Tuller M, et al. Estimating Atterberg limits of soils from hygroscopic water content[J]. Geoderma, 2021, 381: 114698.
- [3] Li S M, Liu Z K, Meng J P. Effect of pH value on boundary water content of red clay in Guilin and its mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39 (10): 1814—1822. [李善梅, 刘之葵, 蒙剑坪. pH 值对桂林红黏土界限含水率的影响及其机理分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39 (10): 1814—1822.]
- [4] Sivakumar V, Glynn D, Cairns P, et al. A new method of measuring plastic limit of fine materials[J]. Géotechnique, 2009, 59 (10): 813—823.
- [5] Zhuang Y T, Huang Y H, Lin J S, et al. Study on liquid limit and plastic limit characteristics and factors of

- Benggang in red soil layer[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21 (3): 208—211, 216. [庄雅婷, 黄炎和, 林金石, 等. 崩岗红土层土壤液塑限特性及影响因素研究[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(3): 208—211, 216.]
- [6] Zhou B C, Lu N. Correlation between atterberg limits and soil adsorptive water[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2021, 147 (2): 04020162.
- [7] Zhang Q, Yan R T, Wei C F, et al. Effects of pore fluids on consistency limits of silty clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36 (S1): 558—562, 608. [张芹, 颜荣涛, 韦昌富, 等. 孔隙溶液对粉质黏土界限含水率的影响[J]. *岩土力学*, 2015, 36(S1): 558—562, 608.]
- [8] Polidori E. Relationship between the atterberg limits and clay content[J]. *Soils and Foundations*, 2007, 47 (5): 887—896.
- [9] Lalitha M, Kumar K S A, Nair K M, et al. Evaluating pedogenesis and soil Atterberg limits for inducing landslides in the Western Ghats, Idukki District of Kerala, South India[J]. *Natural Hazards*, 2021, 106(1): 487—507.
- [10] Sparks D. Using atterberg limits to predict the expansion of clays[J]. *Civil Engineering*, 2010, 18: 12—14.
- [11] Lu S, Xiao H X, Mao C Y, et al. Correlation and path analysis of major agronomic traits of maize types[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35 (19): 11—14. [鲁珊, 肖荷霞, 毛彩云, 等. 不同类型玉米主要农艺性状的相关和通径分析[J]. *中国农学通报*, 2019, 35 (19): 11—14.]
- [12] Hu B, Chen L H. Characteristics of soil moisture and path analysis of influencing factors on different forest lands on the Loess Plateau[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2021, 19 (1): 79—86. [胡波, 陈丽华. 黄土高原不同林地土壤水分特征及影响因子通径分析[J]. *中国水土保持科学*, 2021, 19 (1): 79—86.]
- [13] Song S M, Liu X, Zhang R H, et al. Path analysis of soil wind erosion influence factors to cultivated land in Yellow River flooded wind sand area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37 (3): 249—253. [宋胜明, 刘霞, 张荣华, 等. 黄泛风沙区耕地土壤风蚀影响因子的通径分析[J]. *水土保持通报*, 2017, 37 (3): 249—253.]
- [14] 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.]
- [15] Niu D K, Guo X M, Zuo C Q, et al. Analysis of the distribution and environmental surroundings of collapsed hills land of red soil in south of China[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2000, 22 (2): 204—208. [牛德奎, 郭晓敏, 左长清, 等. 我国南方红壤丘陵区崩岗侵蚀的分布及其环境背景分析[J]. *江西农业大学学报*, 2000, 22 (2): 204—208.]
- [16] 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.]
- [17] Liu X L, Qiu J A, Zhang D L. Analysis of soil wetting mechanism and influencing factors on the headwall of collapsing hill and erosional gully[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30 (4): 80—84. [刘希林, 邱锦安, 张大林. 崩岗侵蚀区崩壁土体湿化机理及影响因素分析[J]. *水土保持学报*, 2016, 30 (4): 80—84.]
- [18] Deng Y S, Ding S W, Cai C F, et al. Characteristic curves and model analysis of soil moisture in collapse mound profiles in southeast Hubei[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (2): 355—364. [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.]
- [19] Wang Y H, Xie X D, Wang C Y. Formation mechanism of calamities due to Benggang processes of weathered granitic rocks[J]. *Journal of Mountain Research*, 2000, 18 (6): 496—501. [王彦华, 谢先德, 王春云. 风化花岗岩崩岗灾害的成因机理[J]. *山地学报*, 2000, 18 (6): 496—501.]
- [20] Wen L L, Zheng F L, Shen H O, et al. Rainfall intensity and inflow rate effects on hillslope soil erosion in the Mollisol region of Northeast China[J]. *Natural Hazards*, 2015, 79 (1): 381—395.
- [21] Zhou H Y, Li H X. The study on soil disintegration characteristics and its influence factors of collapsing wall in the collapsing hill erosion region of Southern China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31 (1): 74—79. [周红艺, 李辉霞. 华南活动型崩岗崩壁土体的崩解特性及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2017, 31 (1): 74—79.]
- [22] Duan X Q, Ni C, Chen J, et al. Study on the preferential flow of red soil erosion in granite slope collapse with high frequency monitoring of water content[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30 (5): 82—88. [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.]
- [23] Chen Z B, Zhu H J, Liu Q, et al. Slump gully characteristic of small watershed of Genxi River and its control measures[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2006, 15 (5): 83—88. [陈志彪, 朱鹤健, 刘强, 等. 根溪河小流域的崩岗特征及其治理措施[J]. *自然灾害学报*, 2006, 15 (5): 83—88.]
- [24] Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis*[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. *土壤农*

- 化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [25] Wu S G. Soil mechanics [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2016. [吴曙光. 土力学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2016.]
- [26] Entin J K, Robock A, Vinnikov K Y, et al. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics[J]. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 2000, 105 (D9): 11865—11877.
- [27] Zhang F Y, Li L H, Ahmad S, et al. Using path analysis to identify the influence of climatic factors on spring peak flow dominated by snowmelt in an alpine watershed[J]. *Journal of Mountain Science*, 2014, 11 (4): 990—1000.
- [28] Ministry of Water Resources. GB/T 50145-2007 Soil engineering classification standard [S]. Beijing: China Planning Press, 2008: 7. [中华人民共和国水利部. GB/T 50145—2007 土的工程分类标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008: 7.]
- [29] Zong Q L, Xia J Q, Zhang Y, et al. Experimental study on scouring characteristics of cohesive bank soil in the Jingjiang reach[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25 (4): 567—574. [宗全利, 夏军强, 张翼, 等. 荆江段河岸粘性土体抗冲特性试验[J]. *水科学进展*, 2014, 25 (4): 567—574.]
- [30] Lin J S, Zhuang Y T, Huang Y H, et al. Shear strengths of collapsing hill in red soil as affected by soil moisture under different experimental methods[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 (24): 106—110. [林金石, 庄雅婷, 黄炎和, 等. 不同剪切方式下崩岗红土层抗剪特征随水分变化规律[J]. *农业工程学报*, 2015, 31 (24): 106—110.]
- [31] Ruan F S. Study on slump gully erosion and its control in Fujian Province[J]. *Journal of Mountain Research*, 2003, 21 (6): 675—680. [阮伏水. 福建省崩岗侵蚀与治理模式探讨[J]. *山地学报*, 2003, 21 (6): 675—680.]
- [32] Zhang C, Chen H S, Zhang W, et al. Spatial variation characteristics of surface soil water content, bulk density and saturated hydraulic conductivity on Karst slopes[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25 (6): 1585—1591. [张川, 陈洪松, 张伟, 等. 喀斯特坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的空间变异特征[J]. *应用生态学报*, 2014, 25 (6): 1585—1591.]
- [33] Wu C F, Yu X L, Lu S G. Synchrotron-based X-ray tomographic microscopy reveals morphology and spatial structure of intra-aggregate pores in red soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (6): 1422—1429. [吴呈锋, 於修龄, 卢升高. 运用同步辐射显微 CT 揭示红壤团聚体内孔隙形态与空间分布[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (6): 1422—1429.]
- [34] Jiang F S, Huang Y H, Lin J S, et al. Soil particle size distribution and fractal dimensions of colluvial deposits in granite Benggang[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21 (6): 175—180. [蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 等. 花岗岩崩岗崩积体颗粒组成及分形特征[J]. *水土保持研究*, 2014, 21 (6): 175—180.]
- [35] Yang W D, Wang Z Q, Sui G P, et al. Impact of soil erosion on soil fertility and land productivity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10 (2): 175—178. [杨武德, 王兆骞, 眭国平, 等. 土壤侵蚀对土壤肥力及土地生物生产力的影响[J]. *应用生态学报*, 1999, 10 (2): 175—178.]
- [36] Liu Y H. Correlation analysis on liquid-plastic limit of regional soil[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2002, 19 (1): 28—30. [刘艳华. 区域土的液限和塑限的相关性分析[J]. *长江科学院院报*, 2002, 19 (1): 28—30.]
- [37] Zhang Y, Zhao D F, Zheng Q M, et al. Effects of temperature on soil atterberg limit in soil of collapsing gully wall in the hilly granitic region of South China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59 (1): 118—128. [张越, 赵冬峰, 郑勤敏, 等. 花岗岩红壤丘陵地区崩岗土体界限含水量的温度效应研究[J]. *土壤学报*, 2022, 59 (1): 118—128.]
- [38] Zhu H X, Deng Y S, Xia Z G, et al. Liquid and plastic limits and influencing factors for the profiles of collapse slope in Southeast of Hubei Province[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, 14 (5): 1—7. [朱慧鑫, 邓羽松, 夏振刚, 等. 鄂东南花岗岩崩岗剖面土壤液塑限特征及影响因素分析[J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14 (5): 1—7.]
- [39] Ni C. Study on soil moisture distribution in a granitic Benggang hillslope[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016. [倪晨. 花岗岩崩岗集水坡面土壤水分状况研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.]
- [40] 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.
- [41] Ou X L, Chen Z B, Chen Z Q, et al. Variation in soil property and its response to vegetation restoration in areas of collapse mounds in mid-subtropical China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39 (6): 2180—2190. [区晓琳, 陈志彪, 陈志强, 等. 中亚热带植被恢复过程中崩岗土壤性质分异特征[J]. *生态学报*, 2019, 39 (6): 2180—2190.]
- [42] Zhang X M, Ding S W, Cai C F, et al. Mechanism of effects of wetting-drying on nonuniform settlement and caved wall collapse in slope disintegration erosion area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34 (S2): 299—305. [张晓明, 丁树文, 蔡崇法, 等. 干湿效应下崩岗岩土不均匀沉降变形规律与崩壁崩塌机制[J]. *岩土力学*, 2013, 34 (S2): 299—305.]

(责任编辑: 檀满枝)