

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2024.04.034

谢福倩, 韦真茜, 廖达兰, 等. 桂东南花岗岩红壤区典型崩岗剖面风化强度对理化特性的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 122-131, 142.

XIE F Q, WEI Z X, LIAO D L, et al. Effect of weathering intensity on physical and chemical properties of typical Benggang gully profile in granite red soil area of southeast Guangxi[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 122-131, 142.

桂东南花岗岩红壤区典型崩岗剖面风化强度对理化特性的影响

谢福倩^{1,3}, 韦真茜¹, 廖达兰¹, 段晓倩², 邓羽松¹

(1. 广西大学林学院, 南宁 530004; 2. 广西大学农学院, 南宁 530004; 3. 广西壮族自治区水土保持监测站, 南宁 530023)

摘要: [目的] 花岗岩红壤剖面风化强度与崩岗形成密切相关, 促进崩岗侵蚀的发育和扩张, 研究风化强度和理化特性对崩岗的作用机理, 可为花岗岩崩岗科学防治提供理论依据。[方法] 选取花岗岩红壤区典型崩岗剖面为研究对象, 测定不同土层的常量氧化物含量和土壤理化性质, 分析花岗岩红壤风化强度对理化特性的影响。[结果] (1) 土壤剖面常量氧化物组成以 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 为主, 花岗岩风化壳表现出脱硅富铁铝化过程, 风化强度随土壤剖面深度增加而降低, 处于高等风化阶段。(2) 土壤剖面的理化性质具有异质性。表层有机质、阳离子交换量、黏粒含量和饱和导水率高, 黏结性和持水性强; 下层砂粒含量高, 结构松散, 透水性强。(3) 相关性和通径分析结果表明, 风化强度与非毛管孔隙度、有机质、阳离子交换量、黏粒含量、饱和导水率、界限含水率呈正相关, Fe_2O_3 对黏粒含量、砂粒含量和界限含水率的综合决定性能力最强。(4) 表层风化强度高, 黏粒比例高, 对水的吸附能力强, 土壤颗粒间的胶结作用强, 土体稳定性好。下层风化强度低, 胶结物质含量和界限含水率低, 土体抗蚀性差, 当土体暴露或者水蚀的条件下, 容易崩塌形成崩岗。[结论] 土壤剖面风化强度对理化特性产生影响, 是促进崩岗形成的重要影响因素。

关键词: 崩岗; 风化强度; 氧化物; 理化特性; 花岗岩红壤

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0122-10

Effect of Weathering Intensity on Physical and Chemical Properties of Typical Benggang Profile in Granite Red Soil Area of Southeast Guangxi

XIE Fuqian^{1,3}, WEI Zhenxi¹, LIAO Dalan¹, DUAN Xiaolian², DENG Yusong¹

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

2. College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004, China;

3. Soil and Water Conservation Monitoring Station of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530023, China)

Abstract: [Objective] The weathering intensity of granite red soil profile is closely related to the formation of Benggang, which promotes the development and expansion of Benggang. Studying the mechanism of weathering intensity and physicochemical properties on Benggang can provide a theoretical basis for the scientific prevention and control of granite Benggang. [Methods] The typical Benggang profile of granite red soil areas was selected as the research object, the oxide content and physicochemical properties of different soil layers were measured, and the influence of weathering intensity on the physicochemical properties of granite red soil was analyzed. [Results] (1) The major element oxides in the soil profile were mainly composed of SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 . The weathering crust of granite showed the process of desilication and iron-rich aluminization. The weathering intensity decreased with the increase in the depth of the soil profile, which was in the stage of high weathering. (2) The physical and chemical properties of the soil profile exhibited heterogeneous. The surface layer was characterized by high organic matter, cation exchange capacity, clay content and saturated hydraulic conductivity, with strong cohesiveness and water holding

收稿日期: 2024-03-22

修回日期: 2024-04-18

录用日期: 2024-04-22

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-05-08

资助项目: 中央引导地方科技发展资金项目 (桂科 ZY21195022); 国家自然科学基金项目 (42107350)

第一作者: 谢福倩 (1993—), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要从事水土保持监测与土壤侵蚀研究。E-mail: stbcbx@163.com

通信作者: 邓羽松 (1988—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: denny2018@gxu.edu.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

capacity; whereas the lower layer had high sand content, loose structure and strong water permeability. (3) The results of correlation and path analysis indicated that weathering intensity was positively correlated with non-capillary porosity, organic matter, cation exchange capacity, clay content, saturated hydraulic conductivity and boundary water content. Fe_2O_3 had the strongest comprehensive determinative ability for clay content, sand content and boundary water content. (4) The surface weathering intensity was high, with a high proportion of clay, strong water adsorption capacity, strong cementation between soil particles, and good soil stability. The lower layer had a low of weathering intensity, with low content of cementing materials and boundary water content, poor soil corrosion resistance. When the soil was exposed or subjected to water erosion, it easily collapsed, forming Benggang. [Conclusion] The weathering intensity of soil profile has an impact on the physicochemical properties, which is an important factor to promote the formation of Benggang.

Keywords: Benggang; weathering intensity; oxide; physicochemical properties; granite red soil

Received: 2024-03-22

Revised: 2024-04-18

Accepted: 2024-04-22

Online(www.cnki.net): 2024-05-08

崩岗是在水力和重力交互作用下山坡土体或岩石风化壳大面积崩塌、堆积和冲刷形成的一种复合侵蚀地貌类型^[1],具有突发性、长期性和危害性等特点^[2],被称为“生态溃疡”,主要集中分布在广东、江西、广西、福建、湖南、湖北及安徽等省区。受热带和亚热带地区气候及丘陵地形的影响,崩岗侵蚀极易引发水土流失,破坏生态环境^[3],危害人民生命财产安全,是限制地区经济可持续发展的重要因素。作为我国南方低山丘陵地区常见的一种土壤侵蚀现象^[4],崩岗侵蚀发育已引起相关学者的广泛关注^[5]。

风化作用是指在土壤和沉积物形成过程中原生和次生矿物元素重新分配,在近地表环境中进行地球化学循环作用的一种现象^[6]。土壤由岩石风化生成,其风化程度指示土壤发育水平,反映土壤的演化发育状态^[7]。受花岗岩岩脉分布不均匀与抗风能力差异的影响,岩土体理化性质随风化程度呈现明显的剖面异质性^[8],因土体风化结构强度低,自身更是具有易分解、崩塌和堆积的特点,为崩岗侵蚀的发生提供了物质条件,致使土体理化性质改变^[9]。根据风化强度的不同,相关学者在花岗岩崩岗区将土壤剖面自上而下划分为不同土层^[3],并对有关花岗岩分层岩土特性和崩岗侵蚀发育的影响展开了大量工作,主要涉及不同土层间的颗粒组成差异^[10]、发育特性^[11]、土体微结构特征^[12]、土体力学特性^[13-14]等方面。此外,LAN等^[15]研究发现,花岗岩土壤物理性质和力学特性与风化程度密切相关;并且花岗岩土体风化剖面的异质性是土壤侵蚀发生及斜坡破坏的重要影响因素^[16]; LALITHA等^[17]研究发现,土壤风化剖面的成土作

用对土壤界限含水率也产生显著影响。以上研究从不同角度探讨了风化强度对土壤理化性质的影响,也表明花岗岩土壤风化特性与崩岗土体稳定性存在联系。但缺乏对不同风化强度与土壤理化性质间相互作用的定量化分析,不同风化强度下的花岗岩红壤区土壤侵蚀机制仍在探索阶段。采用通径分析法量化分析风化强度指标对土壤理化性质的影响程度,有利于明晰花岗岩岩土特性与崩岗剖面的侵蚀机理。

本研究旨在分析桂东南花岗岩崩岗剖面风化强度的空间特征,结合土壤风化参数对崩岗侵蚀区土壤理化性质的影响因素进行通径分析,探讨风化强度和理化性质与崩岗侵蚀之间的内在联系,以期揭示花岗岩崩岗区土壤侵蚀发生的内在因素,为我国南方花岗岩地区的崩岗侵蚀机理及预防治理措施提供科学依据。

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($22^{\circ}58'—23^{\circ}27'N$, $110^{\circ}06'—111^{\circ}22'E$)。该地区属南亚热带季风气候,盛行东南季风,气候温和,雨量充沛,资源丰富,年平均气温可达 21.12°C ,年无霜期 323 天,年平均降水量 1 520 mm,年平均日照时间 1 815 h。地形属低山丘陵地貌区,以丘陵、低山、中山地形为主,大部分为土山,平原较少,总体地势南高北低。土壤类型以花岗岩风化壳发育形成的侵蚀性红壤为主,主要岩性为黑云母钾长花岗岩。花岗岩风化壳厚度最深可超过 50 m,在暴雨溅击和地表径流的冲刷下,极易造成水土流失。森林覆盖率达 51.8%,乔灌木类主要以马尾松(*Pinus massoniana*)、桃金娘

(*Rhodomyrtus tomentosa*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)为主。龙圩区崩岗侵蚀严重,在当地影响范围较广。据 2005 年崩岗调查数据^[18]显示,苍梧县(龙圩区原属苍梧县)有面积大于 60 m²的崩岗 1 592 个,总面积 378.13 hm²,2003 年有 240 hm²农田因崩岗侵蚀而遭受泥沙掩埋,造成部分水田改旱作甚至弃耕,9 座水利工程受严重淤积影响灌溉。

1.2 土样采集

桂东南具有高温湿润的气候特点,促进花岗岩风化形成疏松深厚的风化壳,为崩岗侵蚀提供充足的物质基础。广西崩岗集中分布在东南,主要发育在以花岗岩母质为主的红壤区,水土流失较为严重。在收集资料和外业踏勘基础上,本研究在龙圩区选取发育年限约 30 年的活动型花岗岩崩岗,崩壁裸露且剖面层次清晰完整,具有典型性和代表性。崩岗剖面不同土层的土壤理化性质差异明显,沿着崩岗剖面采集不同土层的土壤样品,包括表层土样和深层土样,采样深度达 19 m(图 1)。由于风化壳厚度的差异,采样时按照土层厚度间隔采集样品,在土壤剖面顶部 0—1, 1—5, 5 m 以上按照 0.2, 0.5, 1 m 间隔采集土样,共采集 27 个土壤样品。采样时先铲除地表凋落物,再沿着剖面自下而上分层采集原状土和散土,尽量避免对土壤剖面结构的扰动。采集原状土后迅速密封,采取防震措施便于保存和运输。每个采样点以多点混合采样的方法,重复采集散土混合成 1 个样品,装于采样袋后立即密封,防止水分蒸发。

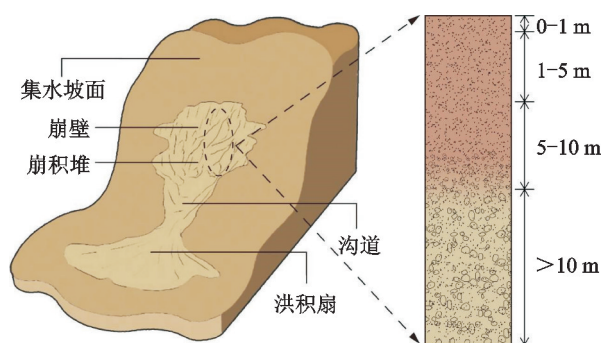


图 1 花岗岩红壤区典型崩岗及土壤剖面示意

Fig. 1 Typical Benggang and soil profile diagram of granite red soil area

1.3 试验方法

1.3.1 土壤风化强度测定 化学风化系数是根据岩石在风化前后,其化学成分与含量发生改变而提出,被广泛用于评价岩石的风化程度,易溶性盐类的淋失与铁铝氧化物的富集是主要的化学风化过程。本研

究采用风化强度来定量评价土壤剖面的风化程度,通过测定不同土层常量氧化物含量来计算硅铁铝比率、风化淋溶系数、化学蚀变指数等风化指标,对花岗岩红壤的风化强度进行描述和量化评价。常量氧化物含量采用碳酸锂—硼酸熔法测定。

通过 X 射线荧光光谱仪对样品进行化学全量分析,X 射线衍射仪(XRD)和偏光显微镜(OLYMPUS)测定样品的黏土矿物和原生矿物^[19]。测定后发现,研究区的黏土矿物均由高岭石、水云母和 1.4 nm 过渡矿物组成,而原生矿物主要由长石、石英、黑云母和白云母组成,其中石英和长石(约占矿物总量 90%左右)、白云母(3%)、黑云母(3%)以及角闪石和辉石(<1%)。

硅铁铝比率可以反映土壤矿物的风化程度,在同一剖面的差异也可以说明剖面中的黏粒及铁铝氧化物等物质的迁移或富集情况。

$$S/F = W_{SiO_2} / W_{Fe_2O_3} \quad (1)$$

$$S/A = W_{SiO_2} / W_{Al_2O_3} \quad (2)$$

$$S/R = W_{SiO_2} / W_{R_2O_3} \quad (3)$$

式中:S/F 为硅铁系数,即 SiO₂ 与 Fe₂O₃ 的质量分数的比值;S/A 为硅铝系数,即 SiO₂ 与 Al₂O₃ 的质量分数的比值;S/R 为硅铁铝系数,即 SiO₂ 与 (Fe₂O₃ + Al₂O₃) 的质量分数的比值。

风化淋溶系数(Ba)、化学蚀变指数(CIA)可以反映盐类的淋失程度及岩石风化、土壤成土过程中 K、Na、Ca 的相对损失量。

$$Ba = (W_{K_2O} + W_{Na_2O} + W_{CaO} + W_{MgO}) / W_{Al_2O_3} * 100\% \quad (4)$$

$$CIA = W_{Al_2O_3} / (W_{K_2O} + W_{Na_2O} + W_{CaO} + W_{MgO}) * 100\% \quad (5)$$

式中:W_{K₂O}、W_{Na₂O}、W_{MgO}、W_{Al₂O₃} 分别为 K₂O、Na₂O、MgO、Al₂O₃ 在土壤和岩石中的质量分数,W_{CaO}表示硅酸盐中的 CaO 含量,且土样中的 CaO/Na₂O<1。

1.3.2 土壤理化性质测定 土壤自然风干和过筛后用于土壤理化性质的测定,其中有机质过筛规格为 100 目,其他理化性质过筛规格均为 10 目。采用重铬酸钾外加热法测定土壤有机质,环刀法测定土壤容重、非毛管孔隙度,乙酸铵萃取法测定阳离子交换量(CEC)。采用吸管法测定土壤机械组成,并根据美国系统分类标准划分为砂粒(0.05~2 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)和黏粒(<0.002 mm)。采用恒定水头法测定土壤饱和导水率(K_s)。土壤饱和导水率(K_s)在不同温度下变化,可通过公式(6)计算:

$$K_s = \frac{V}{TA} \cdot \frac{L}{H} \quad (6)$$

式中: K_s 为温度 t °C 时的饱和导水率 (mm/min); V 为时间 T 内排出渗透率计的水体积 (cm³); T 为水分出流时间 (min); A 为土柱横截面积 (cm²); L 为土柱长度 (cm); H 为土柱顶部和底部之间的水头差 (10 cm)。从公式 (7) 中得出 $t=10$, 便于计算和比较。

$$K_{10} = \frac{K_s}{0.7 + 0.03t} \quad (7)$$

式中: K_{10} 为 10 °C 时的饱和导水率 (mm/min); t 为测试时水的温度 (°C)。

采用液塑限联合测定法测定土壤液塑限。样品土壤过 0.5 mm 筛后, 取约 200 g 代表性土壤加不同数量的纯水, 制备成接近液限、塑限以及介于二者之间不同稠度的均匀试样, 预计圆锥下沉深度分别为 3~4, 7~9, 15~17 mm。将测试土样调拌均匀之后, 测量圆锥仪在自重作用下沉 5 s 时圆锥的下沉速度, 取出试样之后测定土壤含水率。根据计算规定下沉速度 17 mm 所对应的含水量为液限, 沉入 2 mm 所对应的含水量为塑限。塑性指数、液性指数的计算公式为:

$$PI = LL - PL \quad (8)$$

$$LI = (W - PL) / PI \quad (9)$$

式中: PI 为塑性指数; LL 为液限 (%); PL 为塑限 (%); LI 为液性指数; W 为自然含水率 (%)。

1.4 数据处理

采用 Excel 2020 软件进行数据统计, 运用 SPSS 26.0、Origin 2021 软件进行统计分析与绘图。采用逐步回归分析方法建立环境因子的多元回归方程, 根

据回归分析结果对显著性检验的因子进行途径分析, 比较常量氧化物对土壤理化性质的影响程度和相对重要性。

2 结果与分析

2.1 常量氧化物特征和风化强度

2.1.1 常量氧化物含量及特征 土壤剖面常量氧化物组成以 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 为主, 且 3 种氧化物总量均超过 80.00%, 其中 SiO_2 含量最高, 除 K_2O 这类易被黏土矿物吸附的元素含量超过 1.00%, 其余 CaO 、 Na_2O 与 MgO 等易溶组分的含量均低于 1.00%。除 SiO_2 为弱等变异, 其余氧化物均为中等变异, 表明 SiO_2 含量在土壤剖面上差异较小, Fe_2O_3 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 、 Al_2O_3 和 CaO 在土壤剖面中空间异质性大。由图 2 可知, 7 种氧化物含量曲线在土壤剖面垂直方向上均有不同程度的波动。 SiO_2 含量沿土壤剖面自下而上呈递减的趋势, 表层的 SiO_2 含量比下层减少 21.80%; Al_2O_3 和 Fe_2O_3 含量整体上均沿土壤剖面自下而上呈递增的趋势, 表层的 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 含量分别比下层增加 117.13%, 190.31%, 说明 SiO_2 在土壤剖面的淋溶作用强, 而 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 迁移和富集作用明显。 MgO 、 K_2O 含量沿土壤剖面波动变化较大, 表层的 MgO 、 K_2O 含量分别比下层减少 51.43%, 45.93%; CaO 、 Na_2O 含量沿土壤剖面自下而上呈递减的趋势, 表层的 CaO 、 Na_2O 含量分别比下层减少 62.96%, 86.89%。由分析可知, 花岗岩风化壳表现出硅酸盐类矿物不断淋溶以及铁铝氧化物迁移和富集的过程。

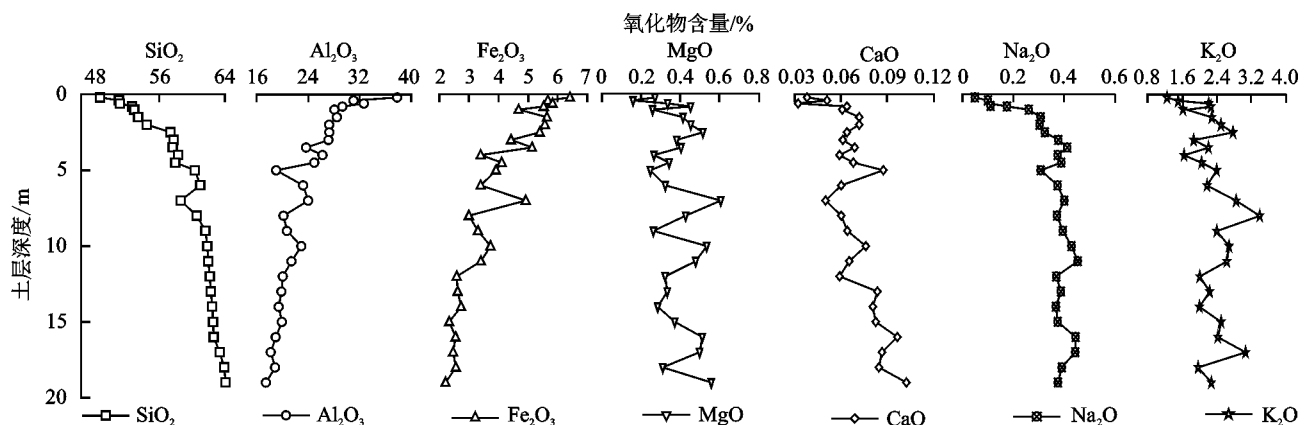


图2 土壤氧化物含量特征

Fig. 2 Characteristics of soil oxide content

2.1.2 风化强度 硅铝系数、硅铁系数、硅铁铝系数反映出土壤剖面中硅的淋失和铁铝的富集状态, 数值越小, 风化强度越高。硅铝系数、硅铁系数、硅铁铝系数的变化范围分别为 1.32~3.68, 7.82~29.02,

1.13~3.26, 变异系数分别为 25.20%, 38.69%, 26.73%, 均属于中等变异, 表明在土壤剖面上的变异较大。由图 3 可知, 硅铝系数、硅铁系数、硅铁铝系数变化趋势一致, 均表现为从土壤剖面自下而上呈逐渐

下降的趋势,最大值均在下层,最小值均在表层,且在 5—10 m 剖面中波动变化较大,说明在土壤剖面中硅逐渐减少,而铁铝相对增加,即脱硅富铁铝化过程明显,风化作用增强。表层的硅铝系数小于 2.0,表现为强富铁铝化过程。风化淋溶系数有明显波动,变化范围为 4.19~22.57,变异系数为 32.79%,属于中等变异,表明在土壤剖面空间上变异较大,最小值位于表层,最

大值位于下层,说明该土壤剖面自下而上碱金属元素不断淋失,发育成熟度不断增加,即风化作用增强。化学蚀变指数变化范围为 83.46~96.64,平均值为 89.53,变异系数为 3.50%,属于弱等变异,沿土壤剖面自下而上呈波动上升的趋势,最小值位于下层,最大值位于表层,土壤剖面的化学蚀变指数平均值在 85 以上,表明土壤剖面在湿热条件下处于高等风化阶段。

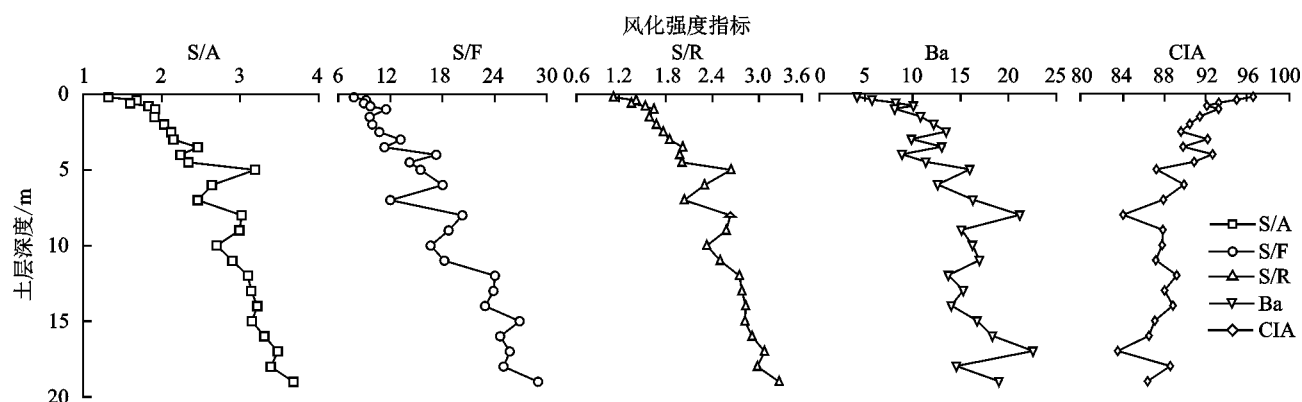


图 3 土壤风化强度特征

Fig. 3 Characteristics of soil weathering intensity

2.2 土壤理化性质特征

土壤饱和导水率、容重、非毛管孔隙度、有机质、阳离子交换量、机械组成和界限含水率,是衡量土壤理化性质的重要指标,最能反映花岗岩土壤状态和力学性质,与崩岗侵蚀相关度较高。土壤剖面的土壤理化性质存在异质性。由表 1 可知,土壤剖面容重无明显变化,土壤密度相对集中,稳定性较好。非毛管孔隙度、有机质、阳离子交换量的变化范围分别为 4.98%~17.25%, 1.35~23.45 g/kg, 1.45~19.58 cmol/kg,非毛管孔隙度的变异系数为 32.75%,属于中等变异,有机质、阳离子交换量的变异系数分别为 85.74%, 80.98%,均属于高强度变异,有机质与阳离子交换量在土壤剖面上呈现出极强的变异性。在土壤机械组成成分中,黏粒、粉粒、砂粒含量范围分别为 9.24%~34.10%, 28.00%~37.19%, 30.75%~61.76%,变异系数分别为 34.87%, 7.46%, 19.49%,黏粒、砂粒含量为中等变异,说明黏粒和砂粒含量对土壤结构影响较大,而粉粒含量对土壤结构影响较小。黏粒含量在土壤剖面中自下而上呈增加的趋势,与阳离子交换量在土壤剖面中的变化趋势一致,阳离子交换量与土体的黏土矿物关系密切,表层的黏粒含量和阳离子交换量最高,说明该层结构紧实、黏结性和持水性强。砂粒含量在土壤剖面中自下而上呈减少的趋势,说明下层结构松散,透水性强。土壤饱和导水率变化范围在 0.12~1.63 mm/min,变

异系数为 67.86%,属于高等变异,表明饱和导水率在空间上存在显著差异,在土壤剖面中自下而上呈先下降后上升的趋势,表层和下层均具有良好的导水性能。

由图 4 可知,塑限和液限的变化范围分别为 18.66%~35.89%, 30.00%~61.12%,变异系数分别为 18.99%, 19.62%,均属于中等变异,在土壤剖面中自下而上呈增加的趋势,表层的液限均大于 50.00%,抗侵蚀能力强,而下层塑限、液限最小,土体稳定性低。塑性指数能综合反映土壤的矿物成分和颗粒大小,变化范围为 11.34~25.81,变异系数为 21.55%,属于中等变异,在土壤剖面中自下而上呈增加的趋势。上层液限大于 50.00%、塑性指数大于 17%,故在这深度之上的土壤均为高液限黏土,其抵抗外力的能力较强。液性指数为天然含水率与塑性指数极限之差与塑性指数之比,范围为 -0.72~-0.12,变异系数为 -60.28%,属于高等变异,说明自然状态下土壤呈固态或半固态不易受到侵蚀。液性指数在土壤剖面中自下而上呈减小的趋势,最大值位于下层,表明下层土壤稳定性低。

2.3 风化强度与土壤理化性质的相关性及通径分析

土壤剖面的理化性质受花岗岩红壤风化强度的影响。由图 5 可知,与非毛管孔隙度、有机质、阳离子交换量、黏粒含量和饱和导水率呈极显著的正相关关系的影响因子是 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、化学蚀变指数,呈极

显著的负相关关系的影响因子是 SiO_2 、 Na_2O , 表明化学蚀变指数对非毛管孔隙度、有机质、阳离子交换量、黏粒含量、饱和导水率均起促进作用。土壤容重和砂粒含量与 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、化学蚀变指数呈极显著负相关关系, 说明风化强度越低, 砂粒含量越高。硅铁铝比率、风化淋溶系数与砂粒含量具有明显的正比关系, 与非毛管孔隙度、有机质、阳离子交换量、黏粒含量具有明显的反比关系, 表明土壤理化性质与盐类矿物淋溶、铁铝氧化物迁移和富集关系密切, 风化

强度越高, 非毛管孔隙度、有机质、阳离子交换量、黏粒含量越大, 饱和导水率越大。塑限、液限和塑性指数与 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、化学蚀变指数呈极显著正相关关系, 与硅铁铝比率、风化淋溶系数呈极显著负相关关系。液性指数与 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、化学蚀变指数呈极显著负相关关系, 表明 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 对塑性指数有促进作用, 对液性指数有抑制作用。土壤塑限、液限、塑性指数随着风化强度的升高而增大, 液性指数随着风化强度的升高而减小。

表1 风化强度和土壤理化性质特征值

Table 1 Weathering intensity and soil physical and chemical properties characteristic value

指标	最小值	最大值	平均值	标准偏差	方差	偏度	峰度	CV/%
$\text{SiO}_2/\%$	50.11	64.07	59.10	4.08	16.63	-0.74	-0.64	6.90
$\text{Fe}_2\text{O}_3/\%$	2.21	6.41	3.98	1.31	1.72	0.27	-1.37	32.97
$\text{MgO}/\%$	0.16	0.61	0.38	0.11	0.01	0.17	-0.71	29.30
$\text{CaO}/\%$	0.03	0.10	0.07	0.02	0.01	-1.52	1.60	24.45
$\text{Na}_2\text{O}/\%$	0.05	0.46	0.34	0.11	0.23	0.13	0.55	32.07
$\text{K}_2\text{O}/\%$	1.23	3.41	2.27	0.48	0	-0.01	0.16	21.14
$\text{Al}_2\text{O}_3/\%$	17.43	37.85	24.02	5.10	26.03	0.87	0.42	21.24
硅铝系数(S/A)	1.32	3.68	2.59	0.65	0.43	-0.19	-1.10	25.20
硅铁系数(S/F)	7.82	29.02	16.86	6.52	42.57	0.31	-1.28	38.69
硅铁铝系数(S/R)	1.13	3.26	2.24	0.60	0.36	-0.10	-1.19	26.73
风化淋溶系数(Ba)	4.19	22.57	13.51	4.43	19.62	-0.09	-0.14	32.79
化学蚀变指数(CIA)	83.46	96.64	89.53	3.14	9.84	0.26	-0.03	3.50
$K_s/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	0.12	1.63	0.56	0.38	0.15	1.42	1.69	67.86
容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.05	1.43	1.32	0.10	0.01	-1.29	1.07	7.58
非毛管孔隙度/%	4.98	17.25	9.04	2.96	8.76	1.17	1.42	32.75
有机质/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1.35	23.45	6.59	5.65	31.96	1.74	2.62	85.74
CEC/($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1.45	19.58	6.15	4.98	24.76	1.53	1.58	80.98
黏粒/%	9.24	34.10	22.40	7.81	61.05	-0.19	-1.17	34.87
粉粒/%	28.00	37.19	32.96	2.46	6.04	-0.18	-0.80	7.46
砂粒/%	30.75	61.76	44.64	8.70	75.73	0.32	-0.75	19.49
塑限(PL)/%	18.66	35.89	27.95	5.31	28.17	-0.18	-1.18	18.99
液限(LL)/%	30.00	61.22	48.82	9.58	91.77	-0.61	-0.88	19.62
塑限指数(PI)	11.34	25.81	20.87	4.50	20.23	-0.99	-0.23	21.55
液限指数(LI)	-0.72	-0.12	-0.34	0.20	0.04	-0.68	-1.00	-60.28

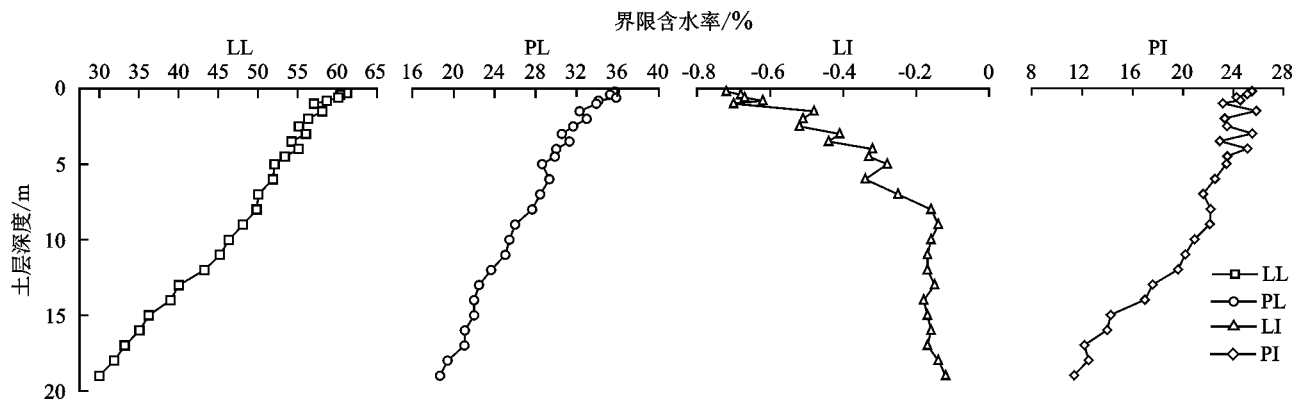


图4 土壤界限含水率特征

Fig. 4 Characteristics of soil boundary moisture content

由表 2 通径分析可知,有机质和阳离子交换量主要影响因子分别为 Al_2O_3 、 Na_2O ,其中 Al_2O_3 直接通径系数分别为 0.457,0.462,表明 Al_2O_3 直接影响有机质和阳离子交换量,可能是由于 Al_2O_3 与有机质形成复合物,从而增强土壤的结构稳定性和养分保留能力。 Fe_2O_3 对黏粒和砂粒含量变化起主要作用,其中 Fe_2O_3 对黏粒含量起正向直接作用,对砂粒含量起负向直接作用。饱和和导水率主要影响因子为 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 Na_2O ,其中 Al_2O_3 对饱和和导水率起正向直接作用, Na_2O 的决策系数最大为 0.782,是影响饱和和导水率的主导因子,对饱和和导水率起正向决定作用。塑限主要影响因子为 Fe_2O_3 、

SiO_2 、 CaO ,直接通径系数分别为 0.417, -0.186 , -0.412 ,决策系数排序为 $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{SiO}_2 > \text{CaO}$ 。液限主要影响因子为 Fe_2O_3 、 MgO ,其直接效应依次为 $\text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{MgO}$,直接通径系数分别为 0.864, -0.231 ,决策系数排序为 $\text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{MgO}$ 。塑性指数主要影响因子为 Fe_2O_3 、 CaO ,其直接效应依次为 $\text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{CaO}$,直接通径系数为 0.556, -0.348 ,决策系数排序为 $\text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{CaO}$ 。液性指数影响因子为 SiO_2 ,直接通径系数为 0.960,决策系数为 0.922。由决策系数可知, Fe_2O_3 对塑限、液限、塑性指数的综合决定性能力最强, SiO_2 对液限指数的促进作用最明显。

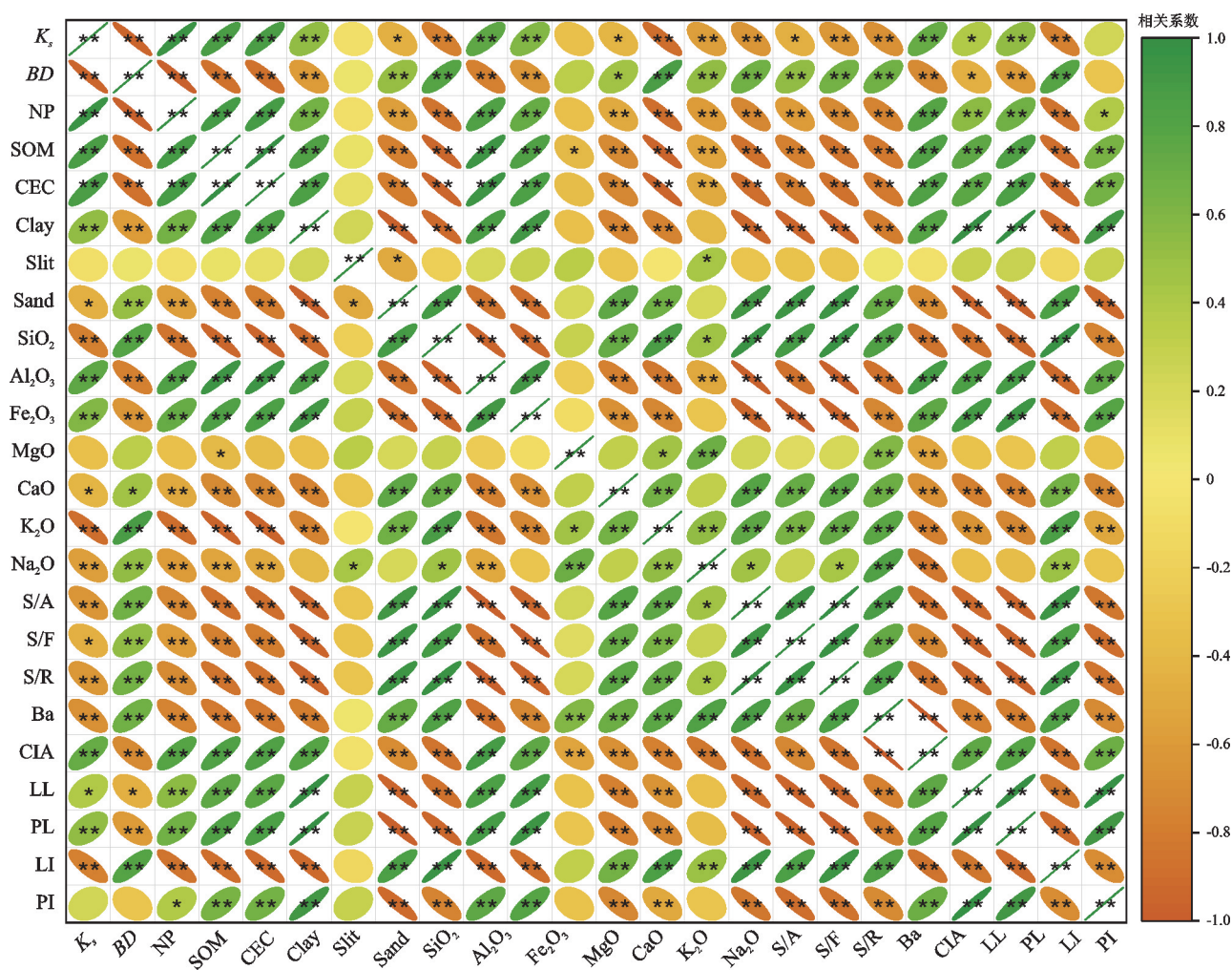


图 5 土壤理化性质与风化强度的相关系数

Fig. 5 The correlation coefficient between soil physical and chemical properties and weathering intensity

3 讨论

3.1 常量氧化物和风化强度的空间变异性

从常量元素含量分布可知,土壤剖面常量氧化物组成主要以 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 为主, SiO_2 含量在土壤剖面从下到上递减, Al_2O_3 、 Fe_2O_3 含量递增与 LIU 等^[20] 研究结果规律一致。碱土金属 CaO 、 MgO 的含量均小于 1% 碱金属 K_2O 、 Na_2O 的含量,在土壤

剖面从下到上逐渐减少,表明淋溶作用比较强。风化过程中的淋溶作用使 SiO_2 大量淋失,脱硅富铝铁化,随着盐基离子的淋溶,风化层上部 pH 逐渐下降^[21],而表层植物残体的矿化所提供的盐基离子较丰富,酸性较弱,含水铁、铝氧化物的活性也较弱,大多数富集下来形成铁铝残余积聚层。在土壤演化过程中,土壤体积可能膨胀或塌陷,因此,降雨的淘洗作用、大气水

的垂向迁移和固体物质的搬运都可能发生在松散多孔土壤介质中,特别是在降水较多的地区,强降雨或短期暴雨可提高土壤元素浸出率。降雨使黏土和有机物沿土壤剖面向下迁移影响 Al、Fe、K、Na、Mg 的含量,即土壤剖面中 CaO、MgO、K₂O、Na₂O 的淋溶作用和 Fe₂O₃、Al₂O₃ 的富集情况。

表 2 风化强度与土壤理化性质的通径分析
Table 2 Path analysis of weathering intensity and soil physical and chemical properties

因变量	自变量	相关系数	直接通径系数	间接通径系数							间接通径系数合计	决策系数
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O		
K _s	Al ₂ O ₃	0.746	0.736	—	—	−0.327	—	−0.346	0.683	—	0.009	0.556
	Fe ₂ O ₃	0.597	−0.363	—	0.664	—	—	−0.302	0.599	—	0.961	−0.565
	CaO	−0.417	0.445	—	−0.573	0.246	—	—	0.646	—	0.319	−0.569
	Na ₂ O	−0.886	−0.829	—	−0.606	0.262	—	0.288	—	—	−0.056	0.782
BD	Na ₂ O	0.876	0.876	—	—	—	—	—	—	—	—	0.767
NP	Na ₂ O	−0.893	−0.893	—	—	—	—	—	—	—	—	0.797
SOM	Al ₂ O ₃	0.927	0.457	—	—	—	—	—	0.470	—	0.470	−1.385
	Na ₂ O	−0.947	−0.571	—	−0.376	—	—	—	—	—	−0.376	0.756
CEC	Al ₂ O ₃	0.930	0.462	—	—	—	—	—	0.468	—	0.468	0.646
	Na ₂ O	−0.949	−0.569	—	−0.380	—	—	—	—	—	−0.380	0.756
Clay	Fe ₂ O ₃	0.910	0.888	—	—	—	0.023	—	—	—	0.023	0.828
	MgO	−0.337	−0.259	—	—	−0.078	—	—	—	—	−0.078	0.107
Slit	Al ₂ O ₃	0.204	0.579	—	—	—	—	—	—	−0.375	−0.375	−0.099
	K ₂ O	0.437	0.733	—	−0.296	—	—	—	—	—	−0.296	0.103
Sand	Fe ₂ O ₃	−0.899	−0.726	—	—	—	—	−0.173	—	—	−0.173	0.778
	CaO	0.748	0.255	—	—	0.493	—	—	—	—	0.493	0.317
LL	Fe ₂ O ₃	0.885	0.864	—	—	—	0.020	—	—	—	0.020	0.783
	MgO	−0.307	−0.231	—	—	−0.076	—	—	—	—	−0.076	0.088
PL	SiO ₂	−0.932	−0.412	—	−0.387	—	—	−0.133	—	—	−0.520	0.598
	Fe ₂ O ₃	0.926	0.417	0.382	—	—	—	0.126	—	—	0.508	0.598
LI	CaO	−0.765	−0.186	−0.296	−0.283	—	—	—	—	—	−0.579	0.250
	SiO ₂	0.960	0.960	—	—	—	—	—	—	—	—	0.922
PI	Fe ₂ O ₃	0.792	0.556	—	—	—	—	0.236	—	—	0.236	0.572
	CaO	−0.725	−0.348	—	—	−0.377	—	—	—	—	−0.377	0.383

硅铝系数、硅铁系数和硅铝铁系数沿土壤剖面自下而上逐渐减小,是因为在风化过程中,Al₂O₃、Fe₂O₃较稳定,遇雨水不易被冲刷,而酸性红壤加剧SiO₂的淋失。风化淋溶系数主要反映盐基的淋溶状况,风化淋溶系数值越小,K、Ca、Na、Mg 岩基淋溶越明显,风化作用越强,风化淋溶系数值越大,风化作用越弱。风化淋溶系数在土壤剖面空间上变异较大,其数值显著高于南方红土,这可能与温度及降雨量有关。化学蚀变指数与风化淋溶系数的变化趋势相反,沿土壤剖面自下向上呈波动上升的趋势,由于 Ca、Na、K 的化学性质活跃,在气候暖湿的条件下容易迁移淋失。化学蚀变指数值较大,表明桂东南气候湿润,温度高热,表层风化强度高,下层风化强度低,均处于高等风化阶段。

3.2 风化强度和理化特性的关系

随着风化作用的增强,花岗岩母岩逐渐被分解,大部分长石和云母风化为黏土矿物,土壤黏粒含量增加。花岗岩风化剖面矿物性质以黏土矿物聚集为显

著特征,母岩分解伴随着黏土的形成。土壤黏粒含量在一定程度上能反映出母岩的风化程度,风化强度越高,母岩分解作用越强。结果表明,风化强度与黏粒含量、阳离子交换量、有机质、非毛管孔隙度、饱和导水率呈正相关,与砂粒含量呈负相关,这与已有研究^[22-23]的结果一致。表层风化强度高,Fe₂O₃、Al₂O₃ 富集,黏粒含量和阳离子交换量高。因表层植被覆盖多、生物活性强,土壤养分、有机质较多,有机质的增加可以提高土壤结构稳定性,表现出很强的胶体特性,非毛管孔隙度大,对水的吸附能力强,使土壤颗粒间的胶结作用加强,故表层具有很高的饱和导水率。下层风化强度低,黏粒含量较少,砂粒含量相对高,结构疏松,渗透性强,抗蚀性差,因此饱和导水率较高^[24]。

风化强度与界限含水率有显著的相关性,随土壤剖面深度的增加而减小。表层主要以高液限黏土为主,下层为粉质黏土。高黏土含量的土壤因黏土矿物的高保水性和较大的比表面积,具有较高的液限和塑性指数。土壤黏粒含量从表层到下层逐渐减少,砂粒

含量增多,土壤孔隙率增加,透水性增强,液塑限也随之减小。土壤剖面的液限指数均小于 0,说明土壤剖面在自然状态下将保持固体状态,具有较高的抗剪强度和较强的抗水蚀能力,使花岗岩风化剖面土壤保持稳定。表层的液限、塑性指数较高,在降雨强度小的情况下,塑性状态不会轻易发生改变,不易发生崩塌^[25],若降雨持续时间较长且降雨量大,土壤含水量达到较高水平,导致土壤自重增加,土体抗剪强度迅速降低而发生土体塌陷^[26]。

3.3 风化强度和理化特性对崩岗侵蚀的影响

崩岗的产生由该地区的地质构造、气候、岩土性质和人类活动等因素共同影响^[27]。风化作用和降雨是崩岗侵蚀的诱导因素,南方地区暖湿多雨的气候促进岩土风化,形成疏松深厚的风化壳,为崩岗的发生提供充足的物质基础,同时降雨增加土壤含水量,降低土体的稳定性,导致面蚀和沟蚀的发生。在干燥的自然环境下,花岗岩土壤表层 Fe_2O_3 在黏土矿物上沉淀增加黏聚力,但土壤在强酸性环境下达到饱和状态,其就易被溶解。当降雨量增加,雨水冲刷将土壤中的胶结物质从土壤基质中去除,随着 Fe_2O_3 溶解度的增加,土壤中 H^+ 浓度增加,黏聚力减小,土体结构不稳定,从而造成土体流失和崩塌^[28]。

花岗岩土壤下层黏粒含量较低,胶结物质含量少,砂粒含量高,颗粒间隙大,土体稳定性差,原生矿物主要为石英和长石,有少量的云母以及黏土矿物等,土壤可蚀性高,当土体暴露或者水蚀的条件下,容易发生崩塌^[29]。下层液塑限较低,在长时间降雨侵蚀时,土壤含水量可能接近塑限甚至液限,土壤孔隙度较高,土体抗剪强度迅速降低,土壤易从固态转变为流动状态,形成土壤软弱面,而土壤剖面上层因底部崩塌缺乏支撑,从而发生土体塌陷,发生崩岗侵蚀^[30]。表层黏粒含量相对于下层含量较高,在含水量较高条件下极易发生收缩,同时形成裂隙导致优先流,土层中的大孔隙以及微裂隙等为水分的侧向流动提供通道,加之长期的干湿交替,裂隙将进一步扩大,促进降雨入渗导致土体抗剪强度降低,加重坡面水土流失,从而导致崩岗等地质灾害发生^[31]。

4 结论

(1)土壤剖面常量氧化物组成以 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 为主, SiO_2 在土壤剖面的淋溶作用强,而 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 迁移和富集作用明显,花岗岩风化壳表现出脱硅富铁铝化过程,风化强度随着土壤剖面深度增加而降低,处于高等风化阶段。

(2)土壤剖面的土壤理化性质具有异质性。表层黏粒含量、阳离子交换量和有机质高,黏结性和持水

性强,饱和导水率高;下层砂粒含量高,结构松散,透水性,饱和导水率较高;界限含水率在土壤剖面中自下而上呈增加的趋势。

(3)相关性和通径分析结果表明, Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、化学蚀变指数与非毛管孔隙度、有机质、阳离子交换量、黏粒含量、饱和导水率、界限含水率呈极显著的正相关关系,与砂粒含量呈极显著的负相关关系, Fe_2O_3 对黏粒含量、砂粒含量和界限含水率的综合决定能力最强。

(4)表层风化强度高,黏粒比例高,对水的吸附能力强,土壤颗粒间的胶结作用强,土体稳定性好。下层风化强度低,胶结物质含量和界限含水率低,土体抗蚀性差,当土体暴露或者水蚀的条件下,容易崩塌形成崩岗。

参考文献:

- [1] 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.
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.
- [2] 熊平生.中国南方红壤丘陵区崩岗侵蚀基本问题研究综述[J].亚热带水土保持,2016,28(4):28-32.
XIONG P S. Review on basic problems of collapse erosion in red soil hilly area of South China[J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2016, 28(4): 28-32.
- [3] 王秋霞,丁树文,夏栋,等.花岗岩崩岗区不同层次土壤分离速率定量研究[J].水土保持学报,2016,30(3):65-70.
WANG Q X, DING S W, XIA D, et al. Quantitative research of different soil layers detachment rate in granite collapse region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(3): 65-70.
- [4] 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.
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.
- [5] 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[J].农业机械学报,2015,46(6):153-159.
WEI Y J, WU X L, CAI C F. Spatial variability of soil shrinkage characteristics in profile of slope disintegration body[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 153-159.
- [6] BANFIELD J F, BARKER W W, WELCH S A, et al. Biological impact on mineral dissolution: Application of the lichen model to understanding mineral weathering in the rhizosphere[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1999, 96(7): 3404-3411.

- [7] 刘成禹,何满潮.对岩石风化程度敏感的化学风化指数研究[J].地球与环境,2011,39(3):349-354.
LIU C Y, HE M C. Research on the sensitive chemical weathering indices to rock weathering[J]. Earth and Environment, 2011, 39(3): 349-354.
- [8] RAHARDJO H, SATYANAGA A, LEONG E C, et al. Variability of residual soil properties[J]. Engineering Geology, 2012, 141/142: 124-140.
- [9] 韦江杏,邓羽松,廖达兰,等.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 J X, DENG Y S, LIAO D L, et al. 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.
- [10] 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.
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.
- [11] 邓龙洲,张丽萍,陈儒章,等.侵蚀性风化花岗岩坡地土壤发育特性[J].水土保持学报,2020,34(1):64-70,77.
DENG L Z, ZHANG L P, CHEN R Z, et al. Characteristics of soil development on the erosive weathered granite slopes[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1): 64-70, 77.
- [12] 高帆,卢玉东,郭雯,等.不同坡位崩积土体的微观空隙结构特征[J].西安科技大学学报,2020,40(6):1039-1046.
GAO F, LU Y D, GUO W, et al. Microvoid structure characteristics of colluvial soil in different slope positions[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2020, 40(6): 1039-1046.
- [13] 张晓明,丁树文,蔡崇法.干湿效应下崩岗区岩土抗剪强度衰减非线性分析[J].农业工程学报,2012,28(5):241-245.
ZHANG 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.
- [14] 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.
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.
- [15] LAN H X, HU R L, YUE Z Q, et al. Engineering and geological characteristics of granite weathering profiles in South China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2003, 21(4): 353-364.
- [16] MARESCHAL L, TURPAULT M P, RANGER J. Effect of granite crystal grain size on soil properties and pedogenic processes along a lithosequence[J]. Geoderma, 2015, 249/250: 12-20.
- [17] LALITHA M, ANIL KUMAR K S, 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.
- [18] 黄艳霞.广西崩岗侵蚀的现状、成因及治理模式[J].中国水土保持,2007(2):3-4.
HUANG Y X. Present situation, causes and treatment mode of collapse erosion in Guangxi[J]. Soil and Water Conservation in China, 2007(2): 3-4.
- [19] MEI H W, JIAN X, ZHANG W, et al. Behavioral differences between weathering and pedogenesis in a subtropical humid granitic terrain: Implications for chemical weathering intensity evaluation [J]. Catena, 2021, 203: e105368.
- [20] LIU W J, LIU C Q, BRANTLEY S L, et al. Deep weathering along a granite ridgeline in a subtropical climate[J]. Chemical Geology, 2016, 427: 17-34.
- [21] 曹允淞,肖波,江子昊,等.生物结皮发育对风沙土盐基离子释放和矿物风化的影响[J].水土保持学报,2022,36(3):77-85.
CAO Y S, XIAO B, JIANG Z H, et al. Effects of biocrusts development on base cations release and mineral weathering in aeolian sandy soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3): 77-85.
- [22] 熊平生,袁航.花岗岩风化壳崩岗侵蚀剖面风化强度和粒度分布特征[J].水土保持研究,2018,25(2):157-161.
XIONG P S, YUAN H. Characteristics of grain size and weathering intensity of collapsing erosion profile in granite weathering crust[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(2): 157-161.
- [23] 郝芮,邓羽松,娜荷芽,等.鄂东南花岗岩崩岗剖面土体风化特征[J].中国水土保持科学,2018,16(4):1-8.
HAO R, DENG Y S, NA H Y, et al. Soil weathering characteristics of granite collapsing gully section in Southeast Hubei province[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(4): 1-8.
- [24] 黄婉霞,邓羽松,谢福倩,等.花岗岩崩岗不同部位土壤饱和导水率特征及其影响因素[J].应用生态学报,2020,31(7):2431-2440.
HUANG W X, DENG Y S, XIE F Q, et al. Characteristics of soil saturated hydraulic conductivity on different positions and their controlling factors of granite collapsing gullies[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(7): 2431-2440.

(下转第142页)

- 分布与变化趋势研究[J].生态与农村环境学报,2023,39(11):1464-1473.
- LU X D, QI S, CHEN J D, et al. Spatiotemporal distribution and variation trend of rainfall erosivity in the nan-driviver basin[J].Journal of Ecology and Rural Environment,2023,39(11):1464-1473.
- [23] 王秀荣,王维国,刘还珠,等.北京降水特征与西太副高关系的若干统计[J].高原气象,2008,27(4):822-829.
- WANG X R, WANG W G, LIU H Z, et al. Beijingregion precipitation feature and some statistics of relationship between it and SHWP[J].Plateau Meteorology, 2008,27(4):822-829.
- [24] 芦鑫,殷淑燕,高涛涛.1960—2017 年秦岭南北地区降雨侵蚀力的时空变化特征研究[J].浙江大学学报(理学版),2019,46(3):380-390.
- LU X, YIN S Y, GAO T T. Temporal and spatial variations of rainfall erosivity in the northern and southern regions of Qinling Mountains from 1960 to 2017 [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2019, 46(3):380-390.
- [25] XU X J, YAN Y J, DAI Q H, et al. Spatial and temporal dynamics of rainfall erosivity in the Karst region of southwest China: Interannual and seasonal changes[J]. Catena,2023,221:e106763.
- [26] 钟科元,郑粉莉.1960—2014 年松花江流域降雨侵蚀力时空变化研究[J].自然资源学报,2017,32(2):278-291.
- ZHONG K Y, ZHENG F L. Spatial and temporal variation characteristics of rainfall erosivity in the Songhua River Basin from 1960 to 2014 [J]. Journal of Natural Resources,2017,32(2):278-291.
- [27] 彭玉芝,范建容,于江,等.金沙江流域降雨侵蚀力时空分布特征[J].水土保持通报,2018,38(2):8-13.
- PENG Y Z, FAN J R, YU J, et al. Spatial and temporal distribution of rainfall erosivity in Jinsha River Basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2018,38(2):8-13.
- [28] 孙从建,王佳瑞,郑振婧,等.黄土高原塬面保护区降雨侵蚀力时空分布特征及其影响因素研究[J].干旱区地理,2020,43(3):568-576.
- SUN C J, WANG J R, ZHENG Z J, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of rainfall erosivity and its influencing factors in the protected area of the Loess Plateau [J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 568-576.
- [29] ZHU D Y, XIONG K N, XIAO H, et al. Variation characteristics of rainfall erosivity in Guizhou Province and the correlation with the El Niño Southern Oscillation [J]. The Science of the Total Environment, 2019, 691:835-847.
- [30] YANG F B, LU C H. Spatiotemporal variation and trends in rainfall erosivity in China's dryland region during 1961—2012 [J]. Catena, 2015, 133:362-372.
- [31] ZHU D Y, XIONG K N, XIAO H, et al. Variation characteristics of rainfall erosivity in Guizhou Province and the correlation with the El Niño Southern Oscillation [J]. The Science of the Total Environment, 2019, 691:835-847.
- (上接第 131 页)
- [25] 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子分析[J].中国水土保持科学, 2016,14(5):1-7.
- 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.
- [26] DENG Y S, XIA D, CAI C F, et al. Effects of land uses on soil physic-chemical properties and erodibility in collapsing-gully alluvial fan of Anxi County, China [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(8): 1863-1873.
- [27] DAI F C, LEE C F, NGAI Y Y. Landslide risk assessment and management: An overview [J]. Engineering Geology,2002,64(1):65-87.
- [28] IGWE O, FUKUOKA H. The effect of water-saturation on the stability of problematic slopes at the Iva Valley area, Southeast Nigeria [J]. Arabian Journal of Geosciences,2015,8(5):3223-3233.
- [29] 邓羽松.南方花岗岩区崩岗特性、分布与地理环境因素研究[D].武汉:华中农业大学,2018.
- DENG Y S. Study on characteristics, distribution and geographical environmental factors of granite collapse in Southern China [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2018.
- [30] ANDERSON R L, ROWNTREE K M, LE ROUX J J. An interrogation of research on the influence of rainfall on gully erosion [J]. Catena,2021,206:e105482.
- [31] TAO Y, HE Y B, DUAN X Q, et al. Preferential flows and soil moistures on a Benggang slope: Determined by the water and temperature co-monitoring [J]. Journal of Hydrology, 2017,553:678-690.