

# 崩岗土体物理化学性质及其内部分异

## ——以广东省德庆县 3 个典型崩岗为例

卓瑞娜, 刘希林, 岳梦

(中山大学 地理科学与规划学院, 广东 广州 510275)

**摘要:** [目的] 研究崩岗土体物理性质的内部分异和崩岗土体化学物质组成, 为更好地理解崩岗的侵蚀过程提供理论参考。[方法] 以广东省德庆县 3 个典型崩岗为例, 采用筛分法、烘干法、激光粒度分析、液塑限分析、X 射线衍射分析和 X 射线荧光光谱分析, 对崩岗不同地貌部位的土体物理性质、矿物组成和化学元素进行测定。[结果] ① 崩壁土体容重略大于崩积体、沟道和洪积扇的土体容重; 崩壁和崩积体的含水率和界限含水率大于沟道和洪积扇的土体含水率和界限含水率。② 崩岗土体中值粒径表现为: 崩壁 < 崩积体 < 沟道 < 洪积扇; 崩壁和崩积体土体颗粒级配曲线呈双峰型, 沟道和洪积扇土体颗粒级配曲线呈单峰型。③ 崩岗土体的矿物成分以黏土矿物高岭石为主, 石英和白云母次之; 化合物以  $\text{SiO}_2$  含量最多, 其次为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 化学元素以 Ti 含量最高, S 含量次之。[结论] 崩岗不同地貌部位的土体物理性质具有一定的分异现象, 水力—重力复合侵蚀作用机制是这一内部分异形成的原因。强化学风化作用下, 崩岗土体黏土矿物以高岭石为主, 化学物质在崩岗内部没有出现明显的元素迁移和富集现象。

**关键词:** 崩岗土体; 理化性质; 内部分异; 广东省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)02-0038-08

中图分类号: P934, S157.1

**文献参数:** 卓瑞娜, 刘希林, 岳梦. 崩岗土体物理化学性质及其内部分异[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 38-45. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2022.02.006; Zhuo Ruina, Liu Xilin, Yue Meng. Physical and chemical properties of Benggang soils and their interior differentiation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 38-45.

## Physical and Chemical Properties of Benggang Soils and Their Interior Differentiation

—Three Cases of Typical Benggangs at Deqing County, Guangdong Province

Zhuo Ruina, Liu Xilin, Yue Meng

(School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China)

**Abstract:** [Objective] The physical properties and their internal differentiations, and the mineral compositions and chemical elements of Benggang soil were studied in order to provide a theoretical reference for a better understanding on the benggang erosion processes. [Methods] Taking three typical Benggangs in Deqing County, Guangdong Province as examples, the methods of screening, drying, laser particle size analysis, liquid plastic limit analysis, X-ray diffraction analysis, and X-ray fluorescence spectrometry were used, to measure the basic physical properties, mineral composition and chemical elements in the different landform positions of the Benggang soil. [Results] ① Soil bulk densities of the headwalls were slightly larger than those of the colluvium, gully and diluvial fan. The water contents and limit water content of headwalls and colluvium were greater than those of the gully and diluvial fan. ② The median particle sizes of the soils were headwall < colluvium < gully sediments < diluvium. Grain size distributions of the headwall and colluvium were bimodal, and those of the gully sediments and diluvium were single peak. ③ The mineral composition

收稿日期: 2021-08-29

修回日期: 2021-10-25

资助项目: 国家自然科学基金项目“模拟降雨条件下华南崩岗泥砂流产生流输沙试验研究”(41971006)

第一作者: 卓瑞娜(1999—), 女(汉族), 陕西省咸阳市人, 硕士研究生, 研究方向为地貌过程与灾害防治。Email: zhuorn@mail2.sysu.edu.cn.

通讯作者: 刘希林(1963—), 男(汉族), 湖南省新邵县人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事灾害地貌过程及评估研究。Email: liuxilin@mail.sysu.edu.cn.

of the soils was mainly clay mineral Kaolinite, and followed by Quartz and Muscovite. The chemical components contained  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , which were the top two in content. The content of Ti was the highest, and followed by S. [Conclusion] The physical properties of soil in different topographic position of the Benggangs displayed a certain differentiation phenomena from headwall to diluvium, and the hydraulic gravity composite erosion mechanism was the reason for the formation of this internal differentiation. Under strong chemical weathering, the composition of clay minerals was mainly composed of Kaolinite, and there was no obvious element migration and enrichment in the Benggangs.

**Keywords: benggang soil; physical and chemical property; interior differentiation; Guangdong Province**

崩岗是分布于华南热带和亚热带花岗岩风化壳上的一种特殊侵蚀地貌,是水力—重力复合侵蚀形成的具有“圆形露天剧场”般沟头的侵蚀沟<sup>[1-2]</sup>。崩岗不仅破坏土地资源,还可侵吞农田,淤堵河道,甚至冲毁民舍,给当地人们生产、生活和生态安全带来威胁<sup>[3-4]</sup>。完整的崩岗沟谷流域通常由集水坡面、崩壁、崩积体、沟道和洪积扇 5 个地貌部位组成<sup>[2]</sup>。许多学者对崩岗不同地貌部位的土体物理化学性质进行了研究,尤其对崩岗土体物理性质研究较为深入,且以单个地貌部位的研究为主,如谢炎敏等<sup>[5]</sup>测定了福建长汀县崩岗崩壁上不同层次土体的容重、液塑限、粒径分布及有机质含量,探讨了土体界限含水率的特征和影响因素,以及与其物理和化学性质之间的关系。邓羽松等<sup>[6]</sup>阐述了鄂东南崩岗洪积扇土体的容重、孔隙度和持水性,并对其空间分异特性进行了分析,为崩岗洪积扇土体物理性质的改良提供了科学依据。蒋芳市等<sup>[7-8]</sup>将崩壁和崩积体进行对比研究,分析了两者土体的含水率、质地、有机质及微团聚体的特性,为研究崩积体的渗透特性、颗粒组成和分形特征提供了科学基础。刘希林等<sup>[9-10]</sup>对广东五华县莲塘岗崩岗开展了垂直和水平方向上土体物理性质的研究,发现崩岗不同地貌部位的土体物理性质存在分异现象。崩岗发育的物质基础是花岗岩风化壳及其风化土体<sup>[11]</sup>。Ban 等<sup>[12]</sup>对花岗岩风化土体进行了 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)和 X 射线荧光光谱(X-ray fluorescence, XRF)分析及粒度分析,得到花岗岩孔隙度、砂含量以及矿物和元素含量及其化学风化指标,以此解释了花岗岩的风化机理。Kim 和 Park<sup>[13]</sup>测定了花岗岩从砾石到黏土的粒度分布曲线,认为修正后的风化潜在指数(modified weathering potential index, MWPI)和触发流失率(loss on ignition, LOD)与花岗岩风化土体的理化性质没有明显的相关关系(干密度除外),并推荐用土体理化性质来进行花岗岩风化等级的划分。郝芮等<sup>[14]</sup>测定了花岗岩风化土体的颗粒组成、阳离子交换量、黏聚力和各种氧化物所占质量比例,分析了不同层次氧化物含量并计算其风化强度,得出了花岗岩土体剖面的下层风化程度

弱、黏粒比例低且黏聚力小、更容易形成崩岗的结论。这些研究成果为认识花岗岩风化壳的化学风化过程提供了有益的启示。本研究以广东省德庆县 3 个典型崩岗为例,通过测定崩岗不同地貌部位土体的物理性质、矿物组成和化学元素,探讨崩岗土体物理特性及其在各不同地貌部位的内部分异,并解释其与崩岗侵蚀作用的成因关系,旨在更好地了解和认知崩岗发育的土体物质基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

德庆县地处广东省中西部西江中游北岸,位于北纬  $23^{\circ}04'—23^{\circ}30'$ ,东经  $111^{\circ}32'—112^{\circ}17'$  之间。受亚热带季风气候影响,热量丰富,降雨量大,且雨热同期。据 2019 年肇庆市气候公报,德庆县年平均气温为  $22.5^{\circ}\text{C}$ ,年降雨量  $1\ 356\ \text{mm}$ ,雨季为每年 5—9 月。德庆县崩岗发育历史悠久,数量众多,是广东省崩岗发育较为严重的地区之一<sup>[15-16]</sup>。德庆县属低山丘陵及河流冲积地貌,出露的花岗岩面积占全县出露地层的 71.5%。花岗岩在自然条件下极易风化,通常成为该地区的成土母质而发育成赤红壤、红壤或黄壤<sup>[17]</sup>。德庆县官圩镇出露的地层主要为黑云母花岗岩,厚度约为  $30\sim 60\ \text{m}$ <sup>[18]</sup>。本文中的 3 个典型崩岗分别位于官圩镇五福村的栗子岗、平山垠和径深,由此分别命名为栗子岗崩岗( $23^{\circ}16'30''\text{N}, 111^{\circ}48'21''\text{E}$ )、平山垠崩岗( $23^{\circ}15'57''\text{N}, 111^{\circ}48'50''\text{E}$ )和径深崩岗( $23^{\circ}15'8''\text{N}, 111^{\circ}49'6''\text{E}$ )。

### 1.2 土样采集与测试分析

崩岗土体样品采集点主要考虑崩岗不同地貌部位,同时兼顾野外采样的可行性,共计 30 个采样点(图 1)。2020 年 10 月 10 日,在 3 个崩岗的 4 个地貌部位(崩壁、崩积体、沟道和洪积扇)分别采集表层土(0—10 cm)扰动土样品和原状土样品,原状土样品用环刀(内径 50 mm,深度 50 mm)采集,扰动土样品用兵工铲铲取表层土装入塑料密封袋中,每个扰动土样品重量约为  $1.5\sim 2\ \text{kg}$ 。由于崩壁取样较为困难,只采集了一个原状土样和一个扰动土样。崩积体按

左、中、右,沟道和洪积扇则按上、中、下 3 个部位分别采集 3 个扰动土样,并在中部崩积体和沟道及洪积扇的中部采样点各采集一个原状土样。然后分别将崩积体、沟道和洪积扇的 3 个扰动土均匀混合,取其约 1.5 kg 的混合土制成混合扰动土样,装入密封袋后进行登记编号,带回实验室进行测试分析。本次野外采样共获取崩岗原状土样 12 个,扰动土样 3 个,混合扰动土样 9 个,共计 24 个崩岗土体样品。

对上述 24 个崩岗土体样品的容重、含水率、液塑限、颗粒级配、矿物组成和化学元素分别进行测定。

其中,土体颗粒级配使用筛分法(质量百分比),并用马尔文激光粒度仪(Mastersizer 2000)对 2 mm 及以下的土体颗粒进行粒径含量测定(体积百分比);土体质量用电子天平进行计量;土体含水率用烘干法测定(质量百分比);土体液塑限使用液塑限联合仪测定(质量百分比);以上测试项目均在中山大学地理科学与规划学院地理综合实验室完成。崩岗土体的矿物成分采用 X 射线粉末衍射分析,由中山大学测试中心完成;崩岗土体的化学元素采用 X 射线荧光光谱分析,由广东省地质检测中心完成。

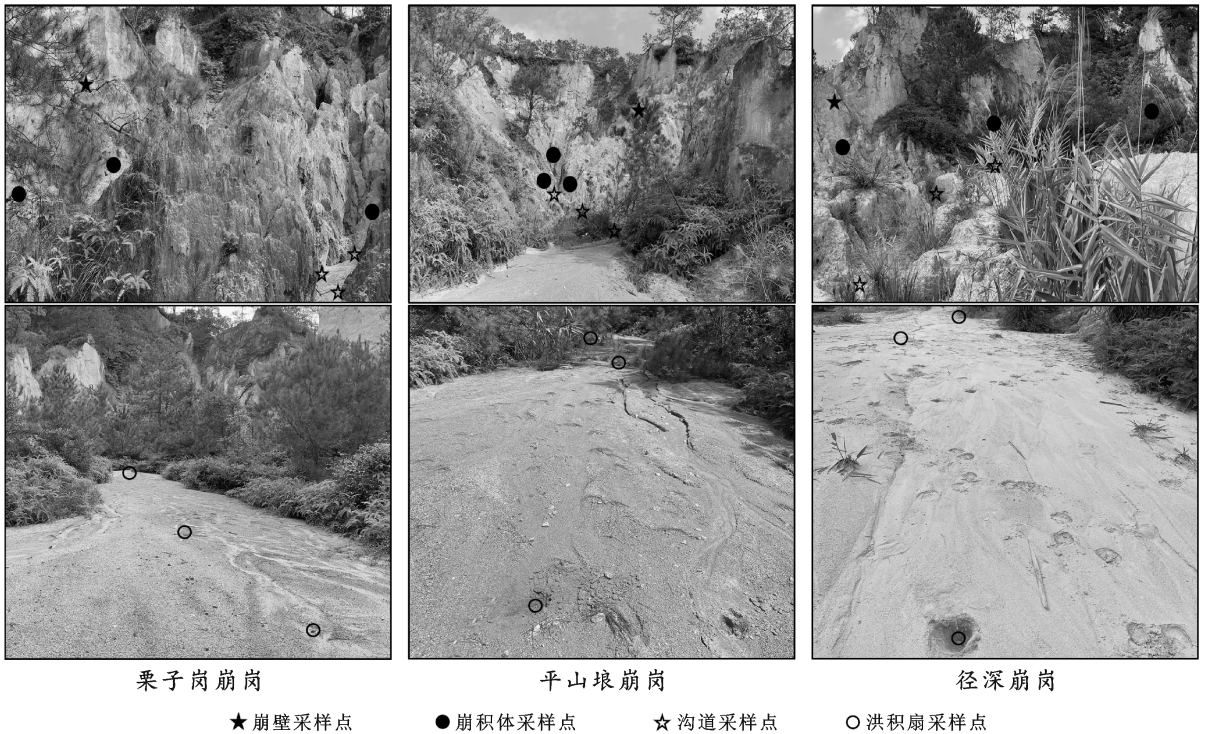


图 1 德庆县典型崩岗土体样品采集点示意图

## 2 结果与分析

### 2.1 崩岗土体物理特性

2.1.1 崩岗土体容重 土体容重是土体性质的重要参数之一<sup>[19]</sup>。由表 1 可知,德庆县典型崩岗不同地貌部位的土体容重介于 1.06~1.43 g/cm<sup>3</sup> 之间。崩壁土层致密,土体容重较大,以重力崩塌为主;崩积体土体松散,土体容重较小。崩积体以坡面侵蚀为主,也易于由沟道侵蚀掏蚀坡脚形成临空面而发生重力崩塌的“二次侵蚀”<sup>[20]</sup>,因而崩积体是崩岗内部最容易遭受侵蚀的部位。相对于洪积扇来说,沟道的土体容重大,因为沟道受水流冲刷,细粒物质被带走,沟床表层粗化;洪积扇是崩岗的沉积区,有大量细粒物质在此沉积,从而导致其土体容重比沟道小(图 2)。

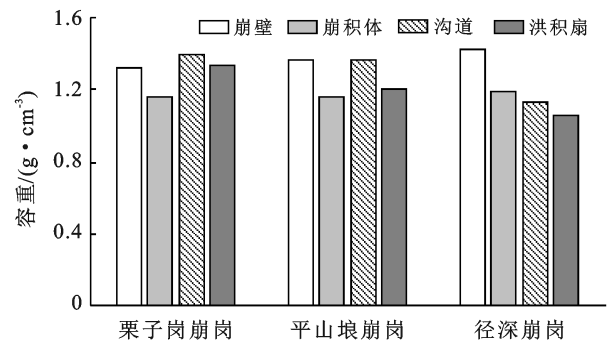


图 2 德庆县典型崩岗 4 个地貌部位的土体容重

2.1.2 崩岗土体含水率与界限含水率 降雨是崩岗发育的主要驱动力,降雨通过增加土壤含水率,使土体的岩土力学性质发生改变,从而降低了土体的抗剪强度<sup>[21]</sup>。土体含水率也影响土体的崩解特性<sup>[6]</sup>。本

次测定的崩岗土体含水率(质量百分比)为非雨季的含水率和界限含水率(表1和图3)。由图3可知,崩壁和崩积体的土体含水率高于沟道和洪积扇的土体

含水率。崩积体含水率高,与崩积体上部的崩壁汇水渗入直接相关。沟道和洪积扇的土体渗水性强、保水性差,土体含水率低。

表1 崩岗土体基本物理性质

采样位置	容重/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	含水率/ %	塑限/ %	液限/ %	不同粒径土体颗粒质量比例/%						中值 粒径/mm	
					20~5 mm	5~2 mm	2~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.075 mm	0.075~0.05 mm		<0.05 mm
栗子岗崩壁	1.32	12.36	35.44	54.64	2.28	20.52	27.47	9.21	16.45	15.08	8.99	0.507
栗子岗崩积体	1.16	19.33	35.13	50.88	2.37	24.42	28.70	9.56	15.35	9.56	10.04	0.738
栗子岗沟道	1.40	8.58	21.87	39.12	0.86	24.49	45.50	11.98	10.08	5.54	1.55	1.053
栗子岗洪积扇	1.33	10.13	29.65	45.4	1.12	28.76	37.09	10.23	12.89	8.25	1.66	1.076
平山垠崩壁	1.37	17.51	31.01	48.41	0.63	15.99	38.75	11.59	13.23	11.51	8.30	0.673
平山垠崩积体	1.16	21.80	36.48	54.18	0.86	15.65	34.47	10.16	14.15	21.53	3.18	0.543
平山垠沟道	1.36	5.49	28.08	38.13	0.39	11.30	54.78	13.10	10.07	9.50	0.86	0.850
平山垠洪积扇	1.20	6.95	24.76	35.56	0.45	15.37	56.76	12.47	8.95	5.24	0.76	0.964
径深崩壁	1.43	13.38	34.75	45.1	0.00	3.21	38.73	14.49	16.92	17.23	9.42	0.286
径深崩积体	1.19	13.90	23.38	60.43	0.26	4.54	40.70	14.35	15.78	13.38	10.99	0.364
径深沟道	1.13	7.64	20.94	32.64	0.00	1.71	44.15	23.58	20.91	8.53	1.12	0.398
径深洪积扇	1.06	2.35	19.4	30.65	0.00	3.47	51.85	23.65	16.11	3.06	1.86	0.615

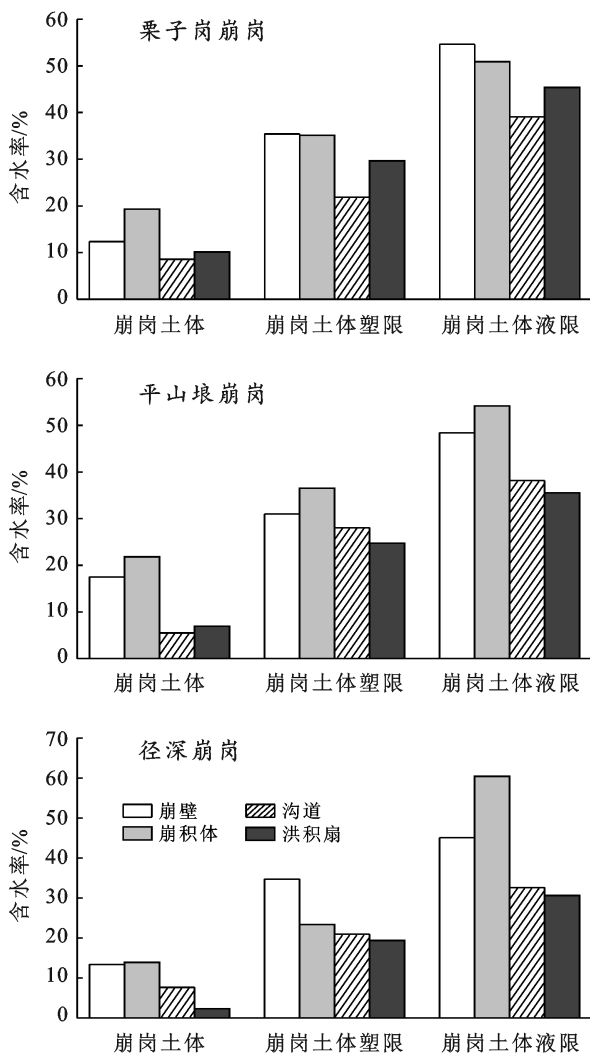


图3 崩岗土体含水率与界限含水率

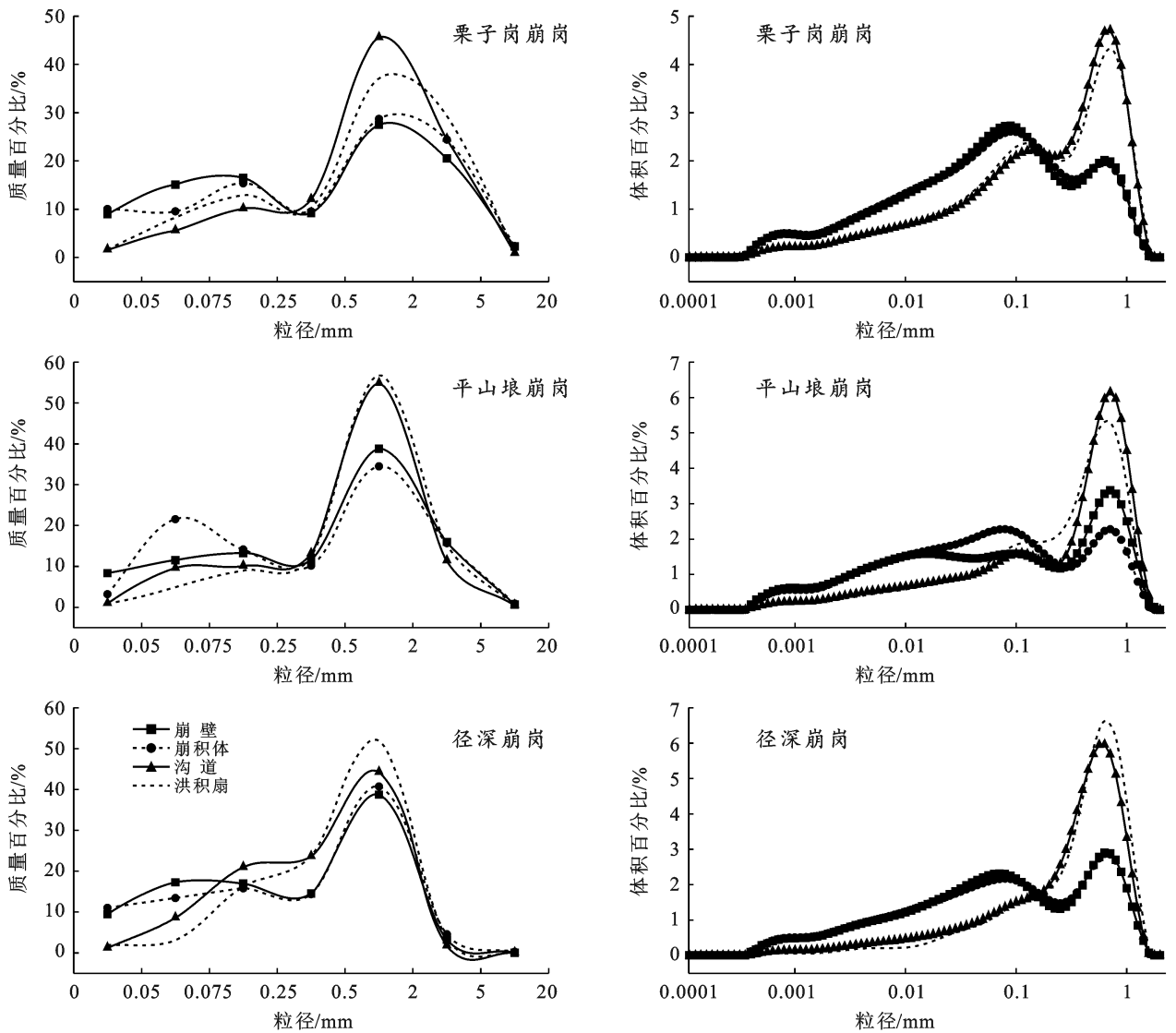
界限含水率也是土体的基本物理性质之一。塑限是指黏性土体呈可塑状态的下限含水率,液限是指黏性土体由可塑性状态过渡到流动状态的界限含水率<sup>[22]</sup>。由表1和图3可知,崩壁和崩积体的土体液塑限均高于沟道和洪积扇的土体液塑限,这可能与崩壁和崩积体土体容重较大且其黏粒含量高、土体塑化和液化所需的含水率较大有关。而沟道和洪积扇土体的液塑限较低,因为其粗砂含量较多且黏粒含量相对较少,由于黏粒对水分的吸附作用,导致沟道和洪积扇的土体液塑限相对较低。

2.1.3 崩岗土体颗粒级配 崩岗4个地貌部位土体样品均以砂粒含量为最高。细砂、中砂和粗砂合计含量均在50%以上,其中径深崩岗洪积扇土体样品的砂粒含量高达91.61%。粗砂又占砂粒含量的主要部分(27.47%~56.76%)(表1)。由此可见,粗砂是崩岗土体最为显著的粒度特征。根据《土类分类标准(GB/T50145-2007)》,可将崩岗土体总体上归属为“含砾粗砂土”,其中值粒径表现为:崩壁<崩积体<沟道<洪积扇,反映了沟谷流水对沟道沉积物和洪积扇洪积物冲刷后的粗化作用。

颗粒级配直观反映了土体粒径的分布状态。由图4可见,3个崩岗的颗粒级配曲线表现出较好的一致性。崩壁和崩积体的土体颗粒级配曲线为双峰型,粒径峰值为0.6~0.8 mm(粗砂)和0.08 mm(细砂),崩积体是崩壁在重力作用下崩塌而成,其土体颗粒分选较差,这也是许多混杂堆积物包括泥石流源地土的

共有特征<sup>[5]</sup>。沟道和洪积扇的土体颗粒级配曲线为单峰型,粒径峰值为 0.6~0.8 mm(粗砂)。单峰型粒

度曲线表明土体颗粒经过水力分选,是水力作用的产物。



注:质量百分比为全粒径,体积百分比为 $\leq 2$  mm的粒径

图 4 崩岗土体颗粒级配分布

## 2.2 崩岗土体矿物组成和化学元素成分

2.2.1 崩岗土体矿物组成 花岗岩风化壳中的黏土矿物是崩岗土体微观结构重要特征,对崩岗形成和发育具有独特的作用<sup>[23]</sup>。采用 XRD 方法对 12 个崩岗扰动土样中的黏粒进行测试分析,得到 XRD 图谱(图 5),图中横坐标为衍射角度  $2\theta/^\circ$ ,位置表示晶体中符合布拉格条件的面网衍射;纵坐标表示计数管中所检测的光量子点数,即衍射强度  $I$ ,计点数以 CPS 为单位<sup>[24]</sup>。衍射强度与物相成分和结构以及物相在混合物中的含量有关<sup>[25]</sup>。运用 MDJ Jade 6.5 软件,由布拉格公式得到晶面间距  $d$  值,单位为  $(\text{Å}, 10^{-10} \text{ m})$ 。通过对 XRD 图谱的鉴定,三个崩岗土体中的主要矿

物依次为高岭石(Kln)、石英(Q)和白云母(Ms)。

2.2.2 崩岗土体化合物及化学元素 采用 XRF 方法对 12 个崩岗扰动土样中的黏粒进行测试分析,得到崩岗的主要化合物组成(表 2)。3 个崩岗 4 个地貌部位的土体以 7 种化合物为主,其中二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )含量最高,平均含量为 58.13%;其次为三氧化二铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ),平均含量为 12.41%;再次为氧化钙( $\text{CaO}$ )和总铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ ),平均含量分别为 3.66%和 3.17%。其余化合物含量均较低,分别是氧化钾( $\text{K}_2\text{O}$ )(1.36%~3.20%)、氧化镁( $\text{MgO}$ )(0.17%~1.07%)和氧化钠( $\text{Na}_2\text{O}$ )(0.13%~0.94%)。崩岗土体的主要化合物与崩岗土体的主要矿物组成相对应,

高岭石的化学式为  $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$ , 主要含  $Al_2O_3$  和  $SiO_2$ ; 石英的主要成分为  $SiO_2$ ; 白云母的化

学式为  $K\{Al_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2\}$ , 其中含有 45.2% 的  $SiO_2$ , 38.5% 的  $Al_2O_3$ , 11.8% 的  $K_2O$ 。

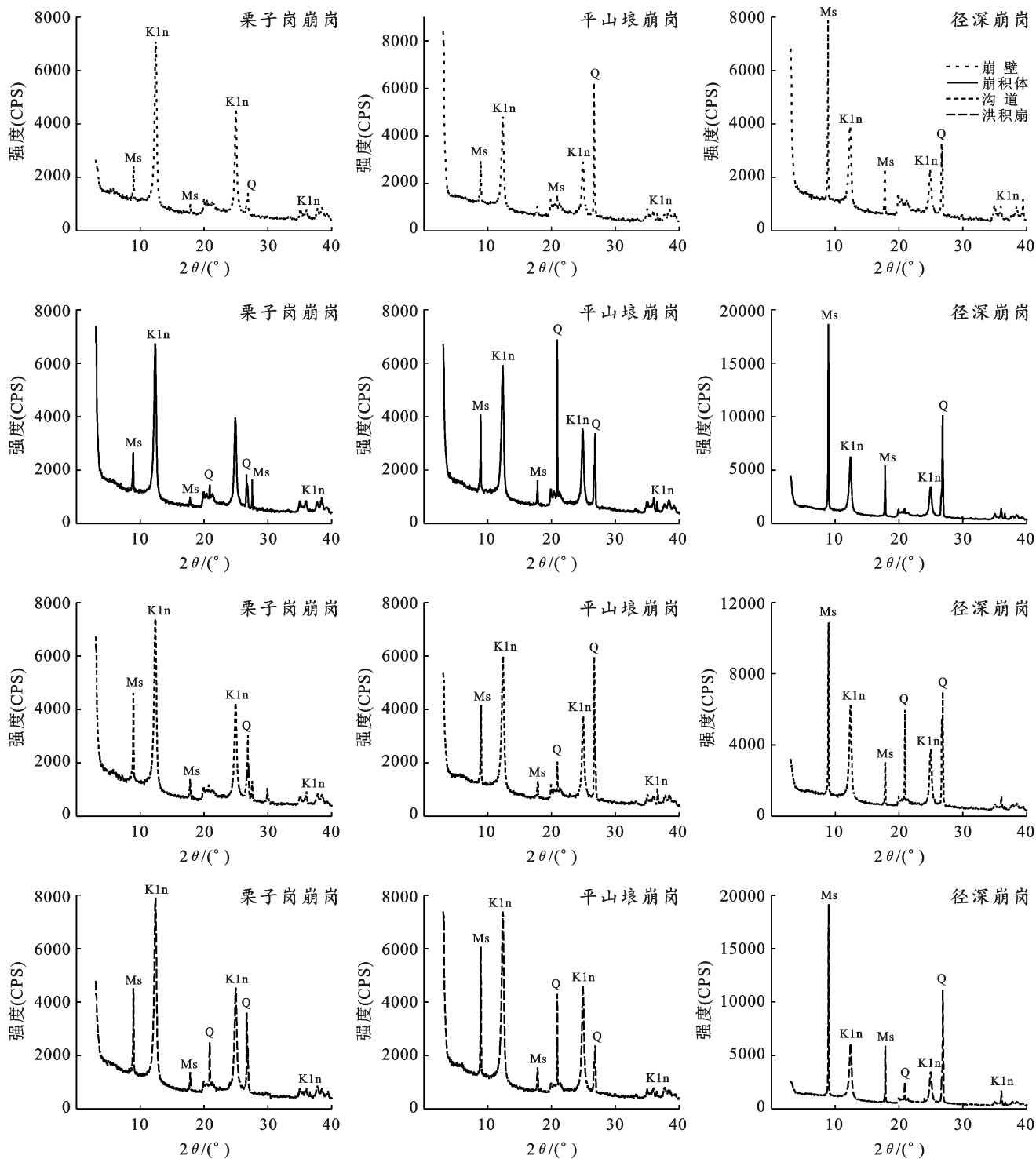


图 5 崩岗 4 个地貌部位的土体 XRD 图谱

构成崩岗土体的化学元素主要包括重金属元素锰、锆、钒、铈、铊、铍和铬等, 轻金属元素钛、钡、铷、锶和铅, 非金属元素硫、磷和氯, 以及稀土元素钇等(表 3)。

一般情况下, 土壤中重金属元素锰、铊和钼含量极少, 但本次测定发现, 崩岗土体样品中锰的含量相

对较高, 平均值为 0.0451%, 且发现有稀土元素钇存在。3 个崩岗不同地貌部位的矿物组成与化学物质并没有表现出有规律性的内部分异。表明在崩岗这样一个水文地貌单元内, 地球化学过程是相对微弱的, 崩岗的侵蚀、搬运和堆积过程, 没有导致明显的化学元素迁移和富集现象。

表 2 崩岗土样的主要化合物(质量百分比)

土样名称	质量百分比/%						
	二氧化硅 SiO <sub>2</sub>	三氧化二铝 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	氧化钙 CaO	总铁 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FeO	氧化钾 K <sub>2</sub> O	氧化镁 MgO	氧化钠 Na <sub>2</sub> O
栗子岗崩壁	56.87	11.32	8.61	2.68	3.20	1.07	0.94
栗子岗崩积体	56.62	16.40	5.06	2.83	3.73	0.64	0.79
栗子岗沟道	60.87	14.18	4.47	2.67	2.93	0.58	0.33
栗子岗洪积扇	63.66	13.00	0.47	2.73	2.30	0.67	0.28
平山垠崩壁	58.40	20.42	0.51	3.17	2.99	0.77	0.27
平山垠崩积体	81.10	4.43	0.28	1.44	1.36	0.17	0.13
平山垠沟道	65.21	8.56	6.68	2.19	2.85	0.49	0.52
平山垠洪积扇	62.31	11.06	6.46	2.53	2.66	0.60	0.35
径深崩壁	60.00	16.18	1.28	3.53	2.64	0.82	0.30
径深崩积体	68.77	9.35	3.61	2.88	2.70	0.45	0.50
径深沟道	61.34	12.13	0.72	7.86	2.16	0.87	0.24
径深洪积扇	58.75	11.83	5.76	3.58	2.70	0.55	0.41

表 3 崩岗土样的主要化学元素(质量百分比)

土样名称	质量百分比/%															
	钛	硫	锰	磷	钡	铷	锆	锶	氯	铅	钒	铌	锌	钇	钼	铬
栗子岗崩壁	0.282	0.137	0.055	0.051	0.063	0.016	0.015	0.013	0.016	0	0.004	0.003	0.002	0	0.001	0
栗子岗崩积体	0.323	0.085	0.053	0.078	0.042	0.024	0.017	0.008	0.019	0.005	0.003	0.004	0.006	0.002	0.001	0
栗子岗沟道	0.350	0.189	0.037	0.039	0.037	0.016	0.016	0.006	0.024	0.005	0.003	0.003	0	0	0.001	0
栗子岗洪积扇	0.429	0.461	0.043	0.021	0.036	0.010	0.034	0.004	0.015	0	0.003	0.003	0	0.002	0.001	0
平山垠崩壁	0.597	0.159	0.013	0.029	0.048	0.017	0.028	0.006	0	0.005	0.008	0.004	0	0.002	0	0.002
平山垠崩积体	0.087	0.131	0.021	0.012	0.015	0.006	0.009	0.002	0	0	0	0	0	0	0.001	0
平山垠沟道	0.168	0.120	0.032	0.049	0.037	0.015	0.010	0.008	0.020	0.005	0	0	0	0	0.001	0
平山垠洪积扇	0.276	0.161	0.040	0.036	0.030	0.014	0.018	0.008	0	0.004	0	0	0.001	0	0.001	0
径深崩壁	0.503	0.406	0.060	0.032	0.038	0.013	0.032	0.006	0.010	0	0.004	0.003	0	0.003	0.001	0
径深崩积体	0.212	0.196	0.050	0.036	0.026	0.014	0.017	0.006	0	0	0	0	0	0	0.001	0
径深沟道	0.392	0.791	0.096	0.051	0.026	0.010	0.032	0.005	0	0	0.004	0.003	0.002	0.003	0	0
径深洪积扇	0.329	0.170	0.043	0.045	0.039	0.015	0.017	0.011	0.016	0.008	0.004	0.004	0.031	0	0.001	0.003

## 3 讨论

### 3.1 崩岗土体物理性质的分异

崩壁土体容重略大于崩积体、沟道和洪积扇的土体容重,以及崩壁和崩积体的含水率和界限含水率均大于沟道和洪积扇的土体含水率和界限含水率,这一现象易于理解,也表明崩壁和崩积体是崩岗的主要被侵蚀体和泥沙来源。土体中值粒径在崩岗 4 个地貌部位的变化趋势为:崩壁<崩积体<沟道<洪积扇,展示出自崩岗沟谷流域上游(崩壁)至沟谷流域出口(洪积扇),流水作用将细粒物质逐渐冲刷带走,而将粗粒物质依次沉积留下的水力分选和粗化过程。崩壁和崩积体的土体颗粒级配曲线呈双峰型,沟道和洪积扇的土体颗粒级配曲线呈单峰型,也表明了前者以重力作用为主,崩积物分选较差,后者经过水力作用,沉积物有一定分选。

崩岗 4 个地貌部位土体物理性质的分异现象可由水力—重力复合侵蚀来解释。崩壁主要遭受重力

侵蚀,且风化壳土体力学性质受到水力作用的影响,土体内摩擦角减小,抗剪强度下降,在重力作用下极易发生土体崩塌<sup>[11]</sup>。崩壁土体的崩落和滑塌,在崩壁底部形成崩积体。初期,崩积体未遭受明显的水力分选,保留着与崩壁土体基本相同的颗粒级配,因此,崩积体物理性质与崩壁较为一致,仅表现为容重由于土体散落而相对较小。在崩积体形成的后期,水力侵蚀对崩积体的物质搬运和输移起到较大作用。由于崩积体土体结构疏松,且缺乏植被保护,土体常常再次遭受严重侵蚀<sup>[26]</sup>,也即“二次侵蚀”,包括降雨溅蚀、片流冲刷和径流侵蚀。受流水的侵蚀和搬运作用,导致崩积体从顶部至底部土体颗粒由粗变细,坡脚处颗粒粒径变小、可蚀性加大<sup>[9]</sup>。形成泥砂流后,带出崩口的崩积物在沟道内泥砂流的搬运作用下,一部分粗砂沉积下来,大部分细粒物质被带走<sup>[27]</sup>。因此,沟道和洪积扇土体颗粒呈现出流水搬运后的粒度特征。

### 3.2 崩岗土体化学物质的成因

崩岗土体主要由花岗岩风化壳提供。花岗岩致

密、坚硬、透水性差,矿物组成主要为石英、长石和白云母。石英质地坚硬,主要成分为  $\text{SiO}_2$ , 抗风化能力强,理化性质较为稳定。化合物测定表明,崩岗土体中  $\text{SiO}_2$  最多,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  次之,其他氧化物相对较少,这与吴志峰和王继增在有关华南花岗岩风化壳岩土特性中得出的结论是一致的<sup>[11]</sup>。长石是一种含钙、钠和钾的铝硅酸盐类矿物,一般经化学风化,如水解作用、碳酸化作用等向黏土矿物转化<sup>[17]</sup>。花岗岩风化壳的化学成分与母岩相比略有不同<sup>[28]</sup>。风化壳中的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  明显增多,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  相对减少。这可能与白云母的化学风化过程有关,在白云母的化学风化过程中,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  的含量逐渐减少,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  逐渐富集<sup>[29]</sup>。黏土矿物多由花岗岩风化壳在其成土过程中形成<sup>[30]</sup>。黏土矿物高岭石是长石和其他硅酸盐矿物天然蚀变的产物,矿物晶格稳定,具有较高的水稳性,且一般可以看作是强烈风化作用的最终产物<sup>[31]</sup>。本文中的黑云母花岗岩母岩化学风化后产生的次生矿物主要由长石组成,比其他矿物更容易风化解成为高岭石<sup>[13]</sup>,广东湿热的气候条件导致岩石强烈分解,也更加有利于高岭石的结晶。崩岗土体中高岭石与水的结合,使崩岗土体发生膨胀、分散和凝聚,也使得崩岗土体的黏性、触变性和可塑性发生变化,从而改变崩岗土体的理化性质而影响崩岗的发育。与此同时,崩岗土体中的石英砂与红壤土混合后,导致钙质胶结缺乏而形成厚层疏松土层,一旦失去植被覆盖,极易引起水土流失而导致红壤土的强烈侵蚀<sup>[17]</sup>。

## 4 结论

崩岗侵蚀地貌系统内不同地貌部位的土体物理性质具有一定的分异现象。崩岗土体物理特性的内部分异与侵蚀作用关系表现为:崩壁→崩积体→沟道→洪积扇,土体颗粒粒径由细逐渐变粗,地貌营力由重力转变为水力,地貌过程由侵蚀转变为堆积。这一相互关系符合崩岗侵蚀过程中水力—重力复合侵蚀的作用机制。崩岗侵蚀发育与花岗岩土体特性密切相关,以高岭石为主的黏土矿物组成表明崩岗土体是强烈风化作用的产物。本研究表明,崩岗土体化学物质在崩岗内部没有表现出规律性的元素迁移和富集现象。

**致谢:** 庙成博士和邓铭坤参加了本次研究的现场选点和野外采样工作。谨此致谢!

### [参 考 文 献]

[1] Xu Jiongxin. Benggang erosion: The influencing factors

- [J]. *Catena*, 1996, 27(3): 249-263.
- [2] 刘希林. 全球视野下崩岗侵蚀地貌及其研究进展[J]. *地理科学进展*, 2018, 37(3): 342-351.
- [3] 李思平. 广东崩岗形成的岩土本质[J]. *福建水土保持*, 1991(4): 28-33.
- [4] 谢建辉. 德庆县崩岗治理及其防治对策[J]. *亚热带水土保持*, 2006, 18(2): 52-54.
- [5] 谢灵敏. 崩壁土壤界限含水率特征及影响因子研究[J]. *人民珠江*, 2017, 38(12): 96-99.
- [6] 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[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(24): 4850-4857.
- [7] 蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 等. 崩岗崩积体土壤渗透特性分析[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(3): 49-54.
- [8] 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.
- [9] 刘希林, 张大林, 贾瑶瑶. 崩岗地貌发育的土体物理性质及其土壤侵蚀意义: 以广东五华县莲塘岗崩岗为例[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(7): 802-811.
- [10] 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.
- [11] 吴志峰, 王继增. 华南花岗岩风化壳岩土特性与崩岗侵蚀关系[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(2): 31-35.
- [12] Ban J D, Moon S W, Lee S W, et al. Physical and chemical weathering indices for biotite granite and granitic weathered soil in Gyeongju [J]. *The Journal of Engineering Geology*, 2017, 27(4): 451-462.
- [13] Kim S, Park H. The relationship between physical and chemical weathering indices of granites around Seoul, Korea [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2003, 62(3): 207-212.
- [14] 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.
- [15] Jin Changxing. The development of Benggang in Guangdong Province, South China [J]. *International Journal of Sediment Research*, 1994, 9(S): 46-56.
- [16] 黄少敏, 黄山. 广东的崩岗灾害地貌[J]. *热带地貌*, 1992, 13(1): 115-122.
- [17] 广东省土壤普查办公室. *广东土壤* [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [18] 德庆县地方志编纂委员会. *德庆县志(1979—2000)* [M]. 广东广州: 广东人民出版社, 2013.
- [19] 刘强, 穆兴民, 高鹏, 等. 土壤水力侵蚀对土壤质量理化指标影响的研究综述[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(6): 386-392.
- [20] 刘希林, 张大林. 基于三维激光扫描的崩岗侵蚀的时空分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 204-211.



- [13] 常恩浩.黄土丘陵退耕区植物群落根系动态特征及其土壤水分利用来源解析[D].陕西 西安:西安理工大学.
- [14] 张帆.幼龄柠条林地不同位点细根动态比较研究[D].陕西 太原:山西大学,2012.
- [15] 张光辉.坡面水蚀过程水动力学研究进展[J].水科学进展,2001,12(3):395-402.
- [16] 许明祥,刘国彬,温仲明,等.黄土丘陵区小流域土壤特性时空动态变化研究[J].水土保持通报,2000,20(1):24-26.
- [17] 刘增文,吴发启.水土保持试验研究方法[M].北京:科学出版社有限责任公司,2011.
- [18] 赵其国.土壤理化分析[M].上海:上海科技出版社,1981.
- [19] 刘红岩,周正朝,王宁,等.黄土丘陵沟壑区不同植被群落土壤分离速率及其与影响因素的关系[J].河南科学,2017,35(6):897-902.
- [20] 宋日,刘利,吴春胜,等.大豆根系分泌物对土壤团聚体大小和稳定性的影响[J].东北林业大学学报,2009,37(7):84-86.
- [21] Bui E N, Box J E. Growing Corn root effects on inter-rill soil erosion [J]. Soil Science Society of America Journal, 1993,57(4):1066-1070.
- [22] Prosser I P, Dietrich W E, Stevenson J. Flow resistance and sediment transport by concentrated overland flow in a grassland valley [J]. Geomorphology, 1995, 13(1):71-86.
- [23] Reid J B, Goss M J. Effect of living roots of different plant species on the aggregate stability of two arable soils [J]. Journal of Soil Science, 1981,32(4):521-541.
- [24] 李静,周正朝,张强,等.黄土区不同退耕年限草地土壤分离速率及其理化性质[J].干旱区研究,2017,34(3):504-510.
- [25] Li Qiang, Liu Guobin, Zhang Zheng, 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.
- [26] 卢立霞.三峡库区岸生植物根系固土效能研究[D].重庆:西南大学,2006.
- [27] 葛芳红,周正朝,刘俊娥,等.黄土丘陵区4种典型植物根系分布特征及对土壤分离速率的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):164-169.

(上接第45页)

- [21] 陈晓安,杨洁,熊永,等.红壤区崩岗侵蚀的土壤特性与影响因素研究[J].水利学报,2013,44(10):1175-1181.
- [22] 陈雨波,朱伯龙.中国土木工程百科全书·建筑结构[M].北京:中国建筑工业出版社,1999.
- [23] 尚彦军,吴宏伟,曲永新.花岗岩风化程度的化学指标及微观特征对比:以香港九龙地区为例[J].地质科学,2001,36(3):279-294.
- [24] 徐蕾,袁会敏,江荣风,等. X射线衍射法在土壤黏粒矿物测定方面的研究进展[J].光谱学与光谱分析,2020,40(4):1227-1231.
- [25] 李国武,廖立兵. X射线衍射方法与应用[M].北京:地质出版社,2008.
- [26] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等.多场次降雨对崩岗崩积体细沟侵蚀的影响[J].中国水土保持科学,2014,12(6):1-7.
- [27] 张大林,刘希林.崩岗泥砂流粒度特性及流体类型分析:以广东五华县莲塘岗崩岗为例[J].地球科学进展,2014,29(7):810-818.
- [28] 陈昌盛,谢财富,费光春.广东三岗山二长花岗岩体形成时代、地球化学特征及地质意义[J].矿物岩石地球化学通报,2021,40(4):925-937.
- [29] 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):157-162.
- [30] 尚彦军,王思敬,岳中琦,等.全风化花岗岩孔径分布—颗粒组成—矿物成分变化特征及指标相关性分析[J].岩土力学,2004,25(10):1545-1550.
- [31] 秦效荣,姚玉增,何宏平,等.广东梅州花岗岩风化壳剖面的可见光—短波红外反射光谱特征及其对风化强度的指示[J].地球化学,2020,49(4):422-434.