

# 鄂东南崩壁不同深度土层微形态特征及稳定性评价

艾尚进<sup>1,2,3</sup>, 程虎<sup>1,2</sup>, 夏露<sup>1,2</sup>, 马悦阳<sup>1,2</sup>, 舒倩<sup>1,2</sup>, 许文年<sup>1,2</sup>, 夏栋<sup>1,2,3,4</sup>

(1.三峡大学 水泥基生态修复技术湖北省工程研究中心, 湖北 宜昌 443002;

2.三峡大学 防灾减灾湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 3.三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 4.自然资源部城市国土资源监测与仿真重点实验室, 广东 深圳 518040)

**摘要:**为了深入认识崩壁不同深度土层微观结构特征和稳定性状况,选取鄂东南通城县一处发育完整的崩壁为研究对象,通过观察土壤薄片,定量和定性分析了崩壁 6 个不同深度土层的微形态特征,在此基础上,采用主成分分析对崩壁稳定性进行评价,并构建了崩壁稳定性评价体系的微形态指标最小数据集(MDS)。结果表明:(1)崩壁不同深度土层微形态差异显著。表土层土壤基质颜色呈现暗红色,基质比较高(0.91),团聚体和孔隙状况发育成熟,孔隙连通性较好。红土层基质颜色以红色为基调,随深度增加逐渐变浅,基质比为 0.69(平均值),土壤团聚体结构弱发育,孔隙类型以囊孔和裂隙为主,连通性较差。砂土层主要以未风化完全的矿物颗粒为主,基质比极低(0.25),孔隙类型以矿物颗粒间隙为主。(2)各土层稳定性微形态评价得分从大到小排序为:表土层( $TC_1$ )>红土层( $TC_2 > TC_3 > TC_4$ )>砂土层( $TC_5 > TC_6$ ),与多数土壤微形态指标间呈现显著正相关( $p < 0.05$ )。(3)崩壁土体稳定性微形态评价的最小数据集(MDS)由土壤基质颜色、土壤基质类型、土壤基质比、土壤团聚体、土壤微结构、总孔隙百分比和有机质含量 7 个指标构成。综上,不同深度土层微形态特征差异是崩壁土体稳定性具有层次分异性的重要因素之一。基于土壤微形态分析及建立的最小数据集评价体系,可以对崩壁土体的稳定性进行初步的监测。

**关键词:**崩岗; 稳定性; 土壤微形态; 主成分分析; 最小数据集

中图分类号:S152.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0382-09

## Micromorphological Characteristics and Stability of Different Soil Layers of Collapsed Wall in Southeastern Hubei Province

AI Shangjin<sup>1,2,3</sup>, CHENG Hu<sup>1,2</sup>, XIA Lu<sup>1,2</sup>, MA Yueyang<sup>1,2</sup>,

SHU Qian<sup>1,2</sup>, XU Wennian<sup>1,2</sup>, XIA Dong<sup>1,2,3,4</sup>

(1.Hubei Provincial Engineering Research Center of Slope Habitat Construction Technique Using

Cement-based Materials, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2.Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 3.College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 4 Key Laboratory of Urban Land Resources Monitoring and Simulation, Ministry of Natural Resources, Shenzhen, Guangdong 518040, China)

**Abstract:** In order to gain a deeper understanding of the microstructural characteristics and stability conditions of the soil layers at different depths of the crumbling wall, a well-developed crumbling wall in Tongcheng County in southeast of Hubei was selected as the research object, and the micromorphological characteristics of the soil layers at six different depths of the crumbling wall were quantitatively and qualitatively analyzed by observing the soil thin sections, and on this basis, the stability of the crumbling wall was evaluated by using principal component analysis, and the minimum micromorphological indexes of the crumbling wall stability evaluation system were constructed. The results showed that: (1) the micromorphology of soil layers at different depths of the crumbling wall differs significantly; the soil matrix color of the topsoil layer shows dark red color, high matrix ratio (0.91), mature development of agglomerates and pore condition, and

收稿日期:2021-11-03

修回日期:2021-12-08

资助项目:自然资源部城市自然资源监测与仿真重点实验室开放基金资助项目(KF-2019-04-071);宜昌市自然科学研究项目(A20-3-010);国家重点研发计划项目(2017YFC0504902)

第一作者:艾尚进(1994—),男,湖北省丹江口市人,在读硕士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail:1051570973@qq.com

通信作者:夏栋(1985—),男,湖北省黄冈罗田县人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事土壤侵蚀和边坡生态防护理论与技术研究。E-mail:xiadongsanxia@163.com

good pore connectivity; the tone of matrix color of the laterite layer is red, and gradually becomes lighter with increasing depth, the red soil layer has a matrix ratio of 0.69 (mean), a weakly developed soil aggregate structure, pore type dominated by cystic pores and fissures, and poor connectivity; the sandy soil layer is mainly composed of mineral particles that have not weathered completely, with a very low matrix ratio (0.25), and the pore type is mainly the interstitial space between the mineral particles; (2) the evaluation scores of stability micromorphology of each soil layer decrease in the order: topsoil layer ( $TC_1$ ) > laterite layer ( $TC_2 > TC_3 > TC_4$ ) > sandy soil layer ( $TC_5 > TC_6$ ), which shows the significantly positive correlation with most soil micromorphology indicators ( $p < 0.05$ ); (3) the minimum data set (MDS) for microform evaluation of crumbling wall soil stability consists of seven indicators: soil matrix color, soil matrix type, soil matrix ratio, soil agglomerates, soil structural body, total pore percentage and organic matter content. From what has been discussed above, the difference in micro-morphological characteristics of soil layers at different depths is one of the important factors for the stability of crumbling wall soils with hierarchical differentiation. Based on the soil micromorphology analysis and the established minimum data set evaluation system, the stability of different soil layers of the crumbling wall can be preliminarily monitored.

**Keywords:** collapsed wall; stability; soil micromorphological; principal component analysis; minimum dataset (MDS)

崩岗是我国南方红壤侵蚀区最严重的土壤侵蚀类型,也被称为“生态溃疡”<sup>[1-2]</sup>。崩岗侵蚀主要是通过崩壁的崩塌来完成,崩壁失稳崩塌是崩岗发育过程中最活跃的过程,诱发外因是高强度、高降雨量对崩壁土体外部的持续性冲刷,内因是水分在土体内部诱发的不稳定过程<sup>[3]</sup>。崩壁土体的稳定性状况对崩岗发育具有极其重要的影响,学者们常从土壤某一宏观特性直接或间接反映崩壁不同层次土体的稳定性特征,如溅蚀特性<sup>[4]</sup>、崩解特性<sup>[5]</sup>、抗拉抗剪强度特性<sup>[6-7]</sup>、水力学特性等<sup>[8-9]</sup>,但并不能具体的反映崩壁各土层中的细微变化过程和土层微观特征。崩岗崩壁深厚的花岗岩风化壳并非一蹴而就,失稳现象的发生和发展必然开始于微细部分并始终与土体的微观变化密不可分。因此,开展崩壁的微形态特征研究,弄清土体的微形态特征随土层的变化规律可以增加对崩壁微观尺度上的认识,对崩岗治理具有重要的现实指导意义。

土壤微形态学是借助光学仪器直观观测原状土壤结构和微组构的重要方法<sup>[10-11]</sup>。根据对土壤薄片的观察,可以有效还原状土壤的机械组成、原始结构、成壤过程中物质淋溶、迁移、转化与淀积过程,对土壤稳定性特征有更强的解释效力<sup>[12]</sup>。此外,尽管土壤微形态研究已有了大量的技术基础和研究资料,但多集中于土壤微观信息的提取,如何将这些不同且相互关联的信息综合利用起来,一直是土壤微形态研究尚未解决且不可回避的问题,而建立微形态指标评价体系就是一种很好的解决方式<sup>[13-15]</sup>。主成分分析是目前应用在土壤评价中最主要的一类方法,此方法可以弱化评价指标间自相

关性所引起的误差,并将原始指标重新组合成互不相关的综合指标,通过加权求和等原理得到综合评价得分,进而对土壤功能进行更为准确的评价。

因此,本文借助土壤微形态研究方法,直观的观察和分析崩壁各土层的差异,并通过主成分分析对崩壁土体稳定性进行微形态评价。旨在从微观态角度进一步探讨崩壁土体稳定性特征,深入了解崩壁土体失稳原因。该研究不仅是崩壁在微观尺度研究内容上的有益补充,还为崩岗稳定性评估及监测提供一种较为准确和科学的方式。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

鄂东南通城县( $29^{\circ}2' - 29^{\circ}24'N$ ,  $113^{\circ}36' - 114^{\circ}4'E$ )是我国崩岗防治重点县。属亚热带湿润季风气候区。受幕阜山脉的影响,形成区域小气候,春季低温阴雨,夏季洪涝干旱。年均降雨量 1 600 mm。3—8 月是降雨主要集中时间,4—10 月降雨量占全年的 81%,年均蒸发量 1 344 mm。

### 1.2 样地选择及土壤样品采集

经过实地调查,在通城县五里镇五里社区( $29^{\circ}12'39"N$ ,  $113^{\circ}46'26"E$ )选择了一处发育完整的崩壁为研究对象。崩岗形态为瓢形,沟道 1 条,平均深度约为 5 m,崩壁高约为 9 m,沟口宽约为 2.9 m,沟道最大宽度约为 5.7 m。土壤类型为棕红壤,结构松散,风化程度强。

根据崩壁剖面土壤风化程度、结构、颜色、颗粒组成和植物残留物等特征,将取样剖面划分为 3 个土层

(表土层、红土层、砂土层),再根据崩壁剖面的深度将崩壁分为 6 个层次,分别为表土层 TC<sub>1</sub>,红土层 TC<sub>2</sub>, TC<sub>3</sub>和 TC<sub>4</sub>,砂土层 TC<sub>5</sub>和 TC<sub>6</sub>。在取样过程中对崩壁仔细观察,记录各层次的土体特征,见表 1。

原状土样的采集:沿崩壁自上而下设置采样点深度,见表 1。使用 100 cm<sup>3</sup> 取土环刀(Φ50.46×50

mm)和与之匹配的铝盒采集各土层表层原状土样,取土深度约为 5—8 cm。小心挖取原状土,再用保鲜膜紧密缠绕,标明方向(向上)。放入铝盒后,将空隙处塞满碾碎的散状土,用于防止原状土在搬运过程中因震动过大导致的损坏,盖好铝盒后,用胶带从外面固定稳固,小心带回实验室。

表 1 采样点崩壁剖面特征

土层	编号	采样深度/m	剖面特征
表土层	TC <sub>1</sub>	0~0.3	位于崩壁最上层,有植物,植被类型以灌木为主,少量乔木。分布有较多未完全分解的植物根系和植物残体。土粒触感细腻,孔隙丰富,有蚯蚓和蚂蚁等小动物出没。有少量石英颗粒,未发现明显的云母和长石
	TC <sub>2</sub>	0.8	土层颗粒大小分布比较均匀,土体细腻,结构紧实。土壤中含有少量植物根系,少见动物活动的迹象。土壤孔隙较少,土壤中长石和云母等矿物质风化完全,含有少量较大石英颗粒,石英颗粒主要呈现次棱状
红土层	TC <sub>3</sub>	2	土层颗粒大小分布均匀,土体和 TC <sub>2</sub> 相似,但土体出现较多裂隙。土壤中含有较多石英颗粒,石英颗粒有棱角。土壤中有明显云母片,云母片形状不规则
	TC <sub>4</sub>	4	土壤中无明显有机物质存在。土层较均匀,有一定的长石风化物分布,土壤有砂质感,石英颗粒较大,分布较多
砂土层	TC <sub>5</sub>	6	土体结构较疏松,粒径明显增大,用手搓捏有沙质感且易松散。矿物成分以石英和云母为主
	TC <sub>6</sub>	8.5	土体比较松散,粒径明显增大,但大颗粒石英砂很少,矿物成分以石英和云母为主,长石和云母未完全风化,尚可看到原花岗岩岩体,土体有较大裂隙,细粒物质较少,团聚体未发育

1.3 土壤微形态研究方法

土壤薄片委托中国地质大学(武汉)磨片室制备完成。使用 Olympus BX53 型偏光显微镜对制作好的薄片进行土壤微形态观察。图像经传感器传至 ToupCam 显微镜数码相机,然后在已安装配套 Image-Pro Plus 6.0 软件的计算机,拍摄得到放大 100 倍后单偏光和正交偏光下的土壤微形态照片。

利用 IPP 软件对土壤微形态图像进行对比度增强、背景平滑、背景校正等操作以提高测量精密度。之后,使用 IPP 软件中的 count/size 工具进行土壤微形态指标数据的提取;孔隙数据采用 Bernsen 图像二值化方法提取;土壤基质颜色借助标准门塞尔比色卡在单偏光下测定。

1.4 主成分分析

本文基于主成分分析构建的评价公式参考了土壤质量评价指数模型<sup>[16]</sup>和多因素综合评定法<sup>[17]</sup>。因子标准化分值乘以相应特征根的算术平方根即为主成分得分,综合主成分得分是每个主成分得分与其对应贡献率的乘积的总和。计算方式见公式 1。

$$SSI-(MDS/TDS)=\sum_{i=1}^n S_i \times (\sum_{i=1, k=1}^{n, m} A_{ik} \times Z_k) \quad (1)$$
式中:SSI-(MDS/TDS)为评价单元全量指标数据集(TDS)或最小数据集(MDS)得分指数,值越大,表示土体就越稳定性; $S_i$ 表示主成分*i*的方差贡献率; $A_{ik}$ 表示第*k*个指标在第*i*个主成分上的特征值; $Z_k$ 表示评价指标标准化值;*n*表示主成分个数;*m*表示评价

指标个数。其中 SSI-MDS 得分需要先对筛选出来的最小数据集再次进行主成分分析,之后再通过公式(1)计算基于最小数据集的 SSI-MDS。

2 结果与分析

2.1 崩壁不同深度土层微形态特征

2.1.1 土壤基质 借助标准门塞尔比色卡,可以明显观察到土壤基质颜色随土层深度增加逐渐变浅,依次表现为暗红(10 R 3/4)、红(10 R 4/8)、棕红(2.5 YR 4/8)、淡棕红(2.5 YR 5/8)、淡橙红(10 R 6/8)、灰白(5 Y 7/1)。基质类型显示表土层 TC<sub>1</sub>,红土层 TC<sub>2</sub>, TC<sub>3</sub>和 TC<sub>4</sub>均为铁质—黏粒基质,主要是含有铁氧化物的细粒物质,粗基质颗粒为一些风化严重的次生矿物。TC<sub>1</sub>至 TC<sub>4</sub>铁质侵染状况明显减弱,矿物颗粒大小逐渐增大。砂土层 TC<sub>5</sub>为浊松基质,是一种低级土壤基质类型,较为疏松,含有暗色矿物细屑和极少量铁质侵染物。砂土层 TC<sub>6</sub>主要以原生矿物为主的基质类型,矿物物质完整。

土壤基质比是土壤薄片土壤中土壤基质与粗骨颗粒的比例(相关分布),反映该土层总的颗粒组成特征<sup>[18]</sup>。土壤基质比越低,表明黏粒含量越少。由表 2 可知,表土层 TC<sub>1</sub>基质比最高,为 0.91;红土层整体上基质比(0.688 4,平均值)较表土层小;砂土层 TC<sub>5</sub>和 TC<sub>6</sub>主要以粗骨颗粒为主,细粒物质的基质较少,因此基质比(0.248 7,平均值)显著低于表土层和红土层。

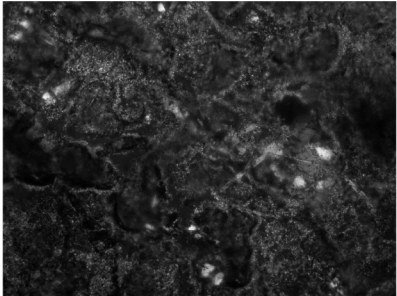


表 2 崩壁各土层微形态指标一般性描述

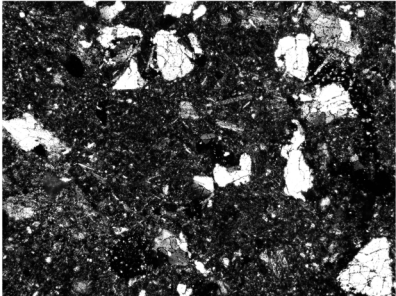
微形态指标	TC <sub>1</sub>	TC <sub>2</sub>	TC <sub>3</sub>	TC <sub>4</sub>	TC <sub>5</sub>	TC <sub>6</sub>
土壤微结构	海绵状结构	整块状和复合状结构	裂隙状结构	包粒结构	桥粒结构	紧粒结构
土壤团聚体	成熟团聚体	雏形团聚体	雏形团聚体	雏形团聚体	无	无
孔隙类型	堆叠孔隙和孔道	囊孔为主,部分孔道	裂隙和孔道	裂隙和孔道	单颗粒堆积裂隙和孔道	单颗粒堆积裂隙和孔道
土壤基质颜色	暗红(10 R 3/4)	红色(10 R 4/8)	棕红(2.5 YR 4/8)	淡棕红(2.5 YR 5/8)	淡橙红(10 R 6/8)	灰白(5 Y 7/1)
土壤基质类型	铁质—黏粒基质	铁质—黏粒基质	铁质—黏粒基质	铁质—黏粒基质	浊松基质	原生矿物
土壤基质比	0.91	0.77	0.72	0.57	0.29	0.2
有机质类型	植物残体	无定形有机物种	点状有机微粒	点状有机微粒	有机色素	有机色素
有机质含量/(g·kg <sup>-1</sup> )	23.37	6.81	6.06	2.68	1.2	1.02

2.1.2 土壤结构体 土壤结构体是指土壤固液气三相排列组合所表现的土壤物理性构成<sup>[19]</sup>。由图 1 可以明显看出崩壁各土层的结构体差异较为显著。表土层 TC<sub>1</sub>主要是疏松聚集的成熟团聚体,呈现海绵状微结构。位于表土层下方的红土层 TC<sub>2</sub>为弱发育土壤,团聚体结构不明显,没有分离的基块,呈现整块状

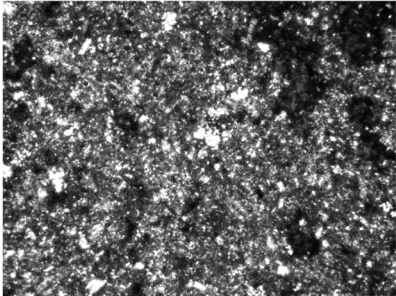
结构。红土层 TC<sub>3</sub>和 TC<sub>4</sub>土壤中砂砾大小的石英颗粒较多,且多数被细粒物质包膜,呈现包粒结构。砂土层 TC<sub>5</sub>几乎观察不到团聚体结构,主要以较大的石英、云母等矿物质为主,它们之间被细物质所桥接,土体呈现桥粒结构。TC<sub>6</sub>由许多完整的光滑颗粒和粗糙面颗粒紧密连接,呈现紧粒结构。



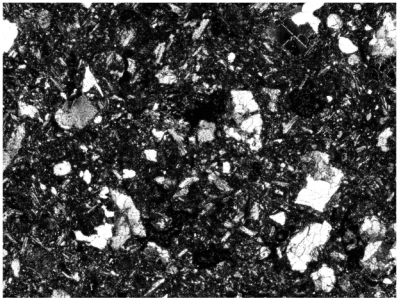
TC<sub>1</sub>海绵状结构(X100,正交偏光)



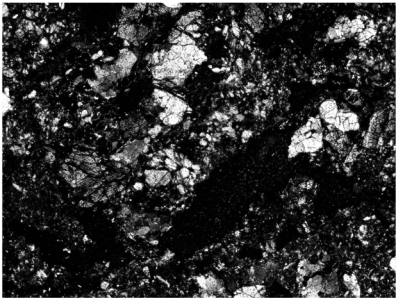
TC<sub>2</sub>整块状结构(X100,正交偏光)



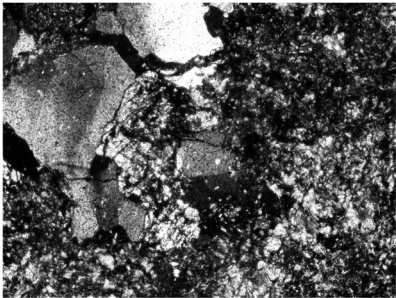
TC<sub>3</sub>包粒结构(X100,正交偏光)



TC<sub>4</sub>包粒结构(X100,正交偏光)



TC<sub>5</sub>桥粒结构(X100,正交偏光)



TC<sub>6</sub>紧粒结构(X100,正交偏光)

图 1 通城县崩壁剖面各土层微形态特征

2.1.3 土壤孔隙 由表 2 可知,表土层 TC<sub>1</sub>孔隙类型主要为堆叠孔隙和部分孔道,是由单粒或团聚体堆积而形成的一种开放性孔隙,连通性较好。其孔隙壁就是单粒或团聚体的表面,发育较好的呈现复杂堆集状,稍差的呈现简单堆集状。红土层 TC<sub>2</sub>主要以囊孔和孔道为主,孔隙周围是致密的土壤,孔道间不相连且分布有未完全分解的矿质颗粒和无定形有机物质。红土层 TC<sub>3</sub>和 TC<sub>4</sub>较 TC<sub>2</sub>孔隙逐渐增加,孔隙形态以裂隙和孔洞为主,且裂隙中含有风化较强的细小矿物质。砂土层 TC<sub>5</sub>和 TC<sub>6</sub>多为单粒形成的简单堆集性裂隙和部分孔洞结构,孔隙主要为颗粒堆积在一起形成的颗粒与颗粒间的间隙,或者大颗粒矿物质裂解形

成的裂隙。孔隙定量分析结果(图 2)显示,各土层总孔隙度除 TC<sub>2</sub>外,均较高(45.59%~49.41%)且相差不大。毛管孔隙度显示表土层和红土层相差不大,砂土层毛管孔隙度最小,仅为 12.24%。

2.1.4 土壤粗骨颗粒 粗骨颗粒是土壤中颗粒直径大于>0.01 mm 的矿物颗粒和岩屑,是物理风化作用下的产物<sup>[20]</sup>。由表 3 可知,崩壁各土层中的粗骨颗粒分布特征差异较大。各土层粗骨颗粒平均面积范围为 392.30~3 410.39 μm<sup>2</sup>,随着土层深度的增加,土体中粗骨颗粒的直径和总面积都逐渐增大,这表明崩壁土体的风化程度随深度增加而减小。红土层 TC<sub>2</sub>粗骨颗粒总面积显著大于表土层,但平均面积和

表土层相当。红土层 TC<sub>3</sub> 和 TC<sub>4</sub> 颗粒大小和数量都明显增大,磨圆度相对较高。砂土层 TC<sub>5</sub> 和 TC<sub>6</sub> 粗骨颗粒数量明显减少,但是其粗骨颗粒所占总面积百分比明显增大。

2.2 崩壁不同土层稳定性微形态评价

2.2.1 指标选取及标准化处理 根据崩壁土体特征,参考刘颖等<sup>[17]</sup>构建的土壤微形态评价体系。基于代表性、差异性、完整性原则,选取反映土壤基质特征的基质颜色、基质类型、基质比,反映土壤结构体特征的团聚体、土壤微结构,指示土壤孔隙特征的孔隙类型、总孔隙百分比、毛管孔隙占比,表征粗骨颗粒特征的平均粒径、磨圆系数、面积百分比,以及反映土壤中有机物质特

征的有机物质类型、有机物质频率,共计 13 个微形态评价指标。实地调查发现仅表土层存在动植物残体,因此采用有机质含量替换有机物质频率。

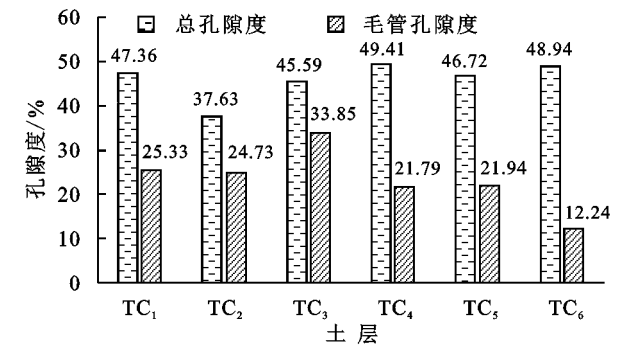


图 2 崩壁各土层孔隙度

表 3 崩壁各土层粗骨颗粒分布特征

土层	粗骨颗粒 平均面积/ $\mu\text{m}^2$	直径/ $\mu\text{m}$	磨圆度	粗骨颗粒占 总面积百分比/%	最大颗粒 面积/ $\mu\text{m}^2$	粗骨颗粒 数量
TC <sub>1</sub>	392.30	18.80	1.81	4.96	3459.56	313
TC <sub>2</sub>	374.74	17.08	1.96	11.47	9863.79	757
TC <sub>3</sub>	427.17	16.31	2.05	15.16	93763.31	878
TC <sub>4</sub>	747.02	21.38	1.94	22.83	29994.35	1183
TC <sub>5</sub>	1404.86	23.65	1.87	35.72	106036.13	403
TC <sub>6</sub>	3410.39	27.68	1.98	40.67	310791.11	296

崩壁剖面土壤微形态特征自上而下具有较为明显的层次感。基于此,并参考已有研究和前人经验<sup>[17]</sup>,本文对基质类型、基质颜色、孔隙类型、有机物质类型、土壤团聚体、土壤微结构这 6 个定性指标依照等差数列进行赋值,然后采用极差法进行无量纲化处理,定量指标直接进行无量纲化处理。标准化分值见表 4。

表 4 微形态评价指标标准化分值

土壤微形态指标	TC <sub>1</sub>	TC <sub>2</sub>	TC <sub>3</sub>	TC <sub>4</sub>	TC <sub>5</sub>	TC <sub>6</sub>
土壤基质颜色	1	0.75	0.50	0.25	0.13	0
土壤基质类型	1	1	1	0.88	0.5	0
土壤基质比	1	0.8	0.73	0.52	0.13	0
土壤团聚体	1	0.63	0.63	0.63	0	0
土壤结构体	1	0.75	0.75	0.25	0	0
总孔隙百分比	0.17	1	0.32	0	0.23	0.04
毛管孔隙占比	0.61	0.58	1	0.44	0.45	0
孔隙类型	1	0.75	0.5	0.25	0	0
粗骨颗粒面积百分比	1	0.82	0.71	0.14	0.49	0
粗骨颗粒粒径大小	0.78	0.93	1	0.56	0.36	0
粗骨颗粒磨圆度	1	0.42	0	0.45	0.75	0.29
有机质类型	1	0.75	0.5	0.5	0	0
有机质含量	1	0.26	0.23	0.07	0.01	0

2.2.2 主成分确定及分组 在本文中,通过主成分分析,将每个特征值>1 的主成分和因子荷载>0.5 的土壤微形态指标划分为一组,如果某个微形态指标

在两个主成分中的因子荷载均>0.5,则将该指标划分到与其他参数相关性较小的另外一组。如果某一因素与该组中其他指标相关性指数均较小,说明组内的其他指标都不能代表该指标所包含的土壤微形态指标,则将该指标单独划分为一组。

主成分分析和 Norm 值计算结果见表 5。共提取出特征值大于 1 的主成分 2 个,其贡献率分别为 69.051%和 15.439%,累计贡献率为 84.489%,表示 2 个主成分就可以解释大部分微形态参评指标。各个指标中总孔隙百分比和粗骨颗粒磨圆指数在主成分 1 上的因子荷载分别为 0.579,0.189,相比与其他指标的因子载荷小,且这两个指标与其他指标相关性较低,所以将这两个指标各划分为一组。有机质在两个主成分中的因子荷载均>0.5,故将其单独成组。其他高因子指标都有较高的 Norm 值,故成一组。最终排序的结果为第 1 组为土壤基质类型、土壤基质颜色、土壤基质比、土壤微结构、团聚体、孔隙类型、毛管孔隙占比、粗骨颗粒平均粒径、粗骨颗粒面积百分比和有机物质类型;第 2 组中只有有机质含量;第 3 组和第 4 组分别为总孔隙百分比和粗骨颗粒磨圆指数。

2.2.3 最小数据集(MDS)建立 运用主成分分析对崩壁各土层稳定性进行评价时,选取的微形态指标较多,而不同指标间的相关性若较强必然会产生数据冗



余。通过建立最小数据集,可以实现减少数据冗余和选出反映土壤信息的最少指标集合<sup>[16]</sup>。由表 5 可知,所有指标分为四组。其中 3 组和 4 组分别是总孔隙百分比和粗骨颗粒磨圆指数,尽管其 Norm 值较小,但每组只有一个因子指标,故两者都保留。而第 2 组中只有有机质含量,并且有机含量具有较高的 Norm 值,故保留。第 1 组中具有较多的指标,根据相关程度和 Norm 值大小,剔除孔隙类型、粗骨颗粒面积百分比、粗骨颗粒粒径大小、有机质类型。

表 5 主成分荷载矩阵、指标分组和各指标 Norm 值

指标	主成分 1	主成分 2	分组	Norm 值
土壤基质颜色	0.960	0.232	1	2.89
土壤基质类型	0.904	-0.116	1	2.71
土壤基质比	0.902	0.122	1	2.71
土壤团聚体	0.878	0.193	1	2.64
土壤微结构	0.865	-0.456	1	2.67
总孔隙百分比	0.579	-0.494	3	1.87
毛管孔隙占比	0.757	-0.337	1	2.32
孔隙类型	0.932	-0.109	1	2.80
粗骨颗粒面积百分比	0.914	0.123	1	2.74
粗骨颗粒粒径大小	0.926	-0.310	1	2.81
粗骨颗粒磨圆指数	0.189	0.880	4	1.37
有机质类型	0.922	0.207	1	2.78
有机质含量	0.742	0.617	2	2.39
特征值	8.977	2.007	—	—
贡献率/%	69.051	15.439	—	—
累积贡献率/%	69.051	84.489	—	—

最终筛选后得到的微形态评价的最小数据集为土壤基质颜色、土壤基质类型、土壤基质比、土壤团聚体、土壤微结构、总孔隙百分比和有机质含量 7 个指标。

2.2.4 微形态评价得分及最小数据集验证 由图 3 可知,SSI-TDS 指数和 SSI-MDS 指数得分均显示:表土层(TC<sub>1</sub>)>红土层(TC<sub>2</sub>>TC<sub>3</sub>>TC<sub>4</sub>)>砂土层(TC<sub>5</sub>>TC<sub>6</sub>),具有明显的纵向层次递减特征。对两种结果进行线性拟合,拟合方程为:SSI-TDS=0.5739SSI-MDS-0.081,调整后的 R<sup>2</sup> 为 0.993 2,拟合效果较好,这表明 MDS 可以反映崩壁土壤大部分信息。

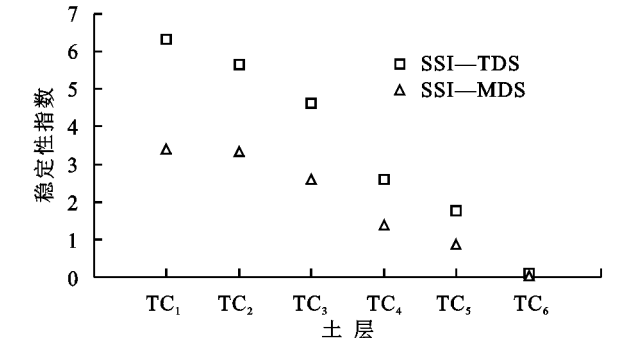


图 3 崩壁各土层稳定性指数

### 3 讨论

#### 3.1 崩壁不同深度土层间的微形态差异

基质颜色、类型是反映土壤基质特征的主要指标<sup>[20]</sup>。本文中,表土层和红土层基质类型均为铁质—黏粒基质,颜色以红色为基调且随深度增加逐渐变浅,这表明崩壁土体受铁质侵染,且侵染状况随深度增加而逐渐降低。原因在于崩岗发生区域雨热同期,高温氧化条件较为充分,铁质通过氧化还原反应侵入土壤基质,致使土体显红色<sup>[5]</sup>。同时,导致土体颜色逐渐变浅的原因有两点:一是风化程度越高,土体越易受铁质侵染,颜色就越深;二是 Fe<sup>3+</sup> 在土壤失水过程中易以铁质胶膜的方式沉积在孔道和周边基质中<sup>[12]</sup>,图 1 可以明显观察到崩壁土体孔隙发育状况随深度增加而逐渐变差,可能导致铁质胶膜的沉积量逐渐减少,进而导致土体颜色变浅。周艺红等<sup>[5]</sup>在崩壁土体的化学性质研究中也指出,铁铝氧化物属积累值,越靠近地表,含量越高,反之则越低。

土壤结构体是反映土壤微形态特征的重要组成部分<sup>[20]</sup>。本文中,仅表土层团聚体结构发育成熟,这主要是因为表土层基质比(0.91)较高,土壤细颗粒物较多,且植被提供了稳定的有机质来源,团聚体结构的形成和发育具备必要的物质基础<sup>[21]</sup>。红土层尽管基质比也较高(0.69),但有机质含量较低(0.52%),可能是因为红土层是崩壁崩塌的主要部位,植被生存受到胁迫,无法提供稳定的胶结物质来源,限制了土壤团聚体的形成和发育。砂土层基质比较低(0.25),黏粒含量极少,且几乎不含铁氧化物和有机质(0.11%),土壤团聚体结构未发育。这和林敬兰等<sup>[22]</sup>研究发现崩壁土壤的团聚状况和团聚度是随深度加深逐渐减小是一致的。

土壤孔隙是土壤单粒、团聚体间或团聚体内部的空隙,其发育状况受土壤结构体影响较大<sup>[23]</sup>。由图 1 可以明显观察到,仅表土层 TC<sub>1</sub> 孔隙发育较好,连通性较好,原因在于表土层土壤团聚体发育成熟,相互堆叠会促使土壤孔隙具有小、多、连通性好等特点<sup>[24]</sup>。红土层孔隙类型以孔道和裂隙为主,主要是因为红土层团聚体结构弱发育,受淋溶作用和土体干湿胀缩作用影响较大<sup>[12]</sup>。砂土层因为风化程度较低,未形成团聚体结构,孔隙类型主要是矿物颗粒的裂隙和间隙。此外,裂隙的产生和发育是崩壁土体受干湿循环作用下的主要特征之一<sup>[25]</sup>。从图 1 可以明显观察到,仅有红土层 TC<sub>3</sub> 和 TC<sub>4</sub> 有裂隙产生。这周红艺等<sup>[26]</sup>研究发现崩壁红土层更容易产生裂隙一

致,但和王佳妮等<sup>[25]</sup>研究发现在室内干湿循环条件下表土层的裂隙发育速率要高于红土层略有差异。自然干湿循环条件下,土壤裂隙为水分运移的优先通道,可将一些粗物质带入裂隙,从而对裂隙不断填充,因而裂隙并不是随干湿循环的次数增加而不断发育。Monika 等<sup>[27]</sup>也从微观角度证实了细小物料可以有效填充土壤中的大孔隙。室内试验虽然可以清晰的反映崩壁土体裂隙发育特征,但干湿循环的条件却是恒定的,与自然状况差别较大。因此,未来的研究应该多着眼于崩壁原状土样的微观观测,得到的结果可能更贴近真实值。

粗骨颗粒主要来源于母质,多为成壤过程中形成的比较稳定的风化矿物<sup>[28]</sup>。本文中,砂土层粗骨颗粒平均面积、总面积比、最大颗粒面积最大,红土层次

之,表土层最小,这表明崩壁土体的风化程度随深度增加而逐渐减弱,和已有研究结果一致<sup>[29]</sup>。

3.2 崩壁不同深度土体稳定性的微形态影响因素

基于主成分分析得到的崩壁土体的稳定性评价结果显示,土体稳定性随深度增加而降低,和已有研究结果一致<sup>[30]</sup>。将评价结果与 13 个微形态指标在置信度为 95% 水平下进行 Pearson 相关性分析(表 6),结果显示最小数据集稳定性指数与土壤基质颜色、基质类型、基质比、土壤团聚体、土壤结构体、孔隙类型、粗骨颗粒面积百分比、粗骨颗粒粒径大小、有机质类型 9 个指标间均呈现显著正相关( $p<0.05$ ),这表明崩壁不同深度土层稳定性状况和微形态特征有很好的对应关系,接下来应进一步探讨影响崩壁不同深度土体稳定性的微形态因素。

表 6 SSI-MDS 指数与微形态指标间的相关性分析

参数	SSI-MDS	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
SSI-MDS	1												
A	0.968 **	1											
B	0.870 *	0.789	1										
C	0.889 *	0.883 *	0.730	1									
D	0.867 *	0.886 *	0.865 *	0.652	1								
E	0.885 *	0.755	0.779	0.691	0.679	1							
F	0.619	0.486	0.436	0.549	0.213	0.795	1						
G	0.707	0.578	0.842 *	0.722	0.612	0.697	0.347	1					
H	0.959 **	0.914 *	0.779	0.775	0.794	0.925 **	0.745	0.548	1				
I	0.903 *	0.898 *	0.741	0.999 **	0.670	0.707	0.562	0.713	0.796	1			
J	0.905 *	0.787	0.949 **	0.790	0.789	0.903 *	0.584	0.910 *	0.832 *	0.797	1		
K	0.174	0.364	0.095	0.345	0.214	-0.256	-0.130	-0.188	0.093	0.349	-0.104	1	
L	0.927 **	0.952 **	0.839 *	0.724	0.972 **	0.740	0.380	0.541	0.893 *	0.746	0.783	0.291	1
M	0.742	0.880 *	0.535	0.744	0.794	0.380	0.067	0.350	0.631	0.753	0.479	0.584	0.825 *

注: \* 表示在  $p<0.05$  水平显著相关; \*\* 表示  $p<0.01$  水平极显著相关。A 代表土壤基质颜色;B 代表土壤基质类型;C 代表土壤基质比;D 代表土壤团聚体;E 代表土壤微结构;F 代表总孔隙百分比;G 代表毛管孔隙百分比;H 代表孔隙类型;I 代表粗骨颗粒面积百分比;J 代表粗骨颗粒粒径大小;K 代表粗骨颗粒磨圆度;L 代表有机质类型;M 代表有机质含量。

崩壁失稳是以水力侵蚀为诱因,重力侵蚀为结果的特殊侵蚀机制,几乎所有的土壤性质直接或间接影响崩壁土体的稳定性<sup>[31-32]</sup>。从土壤基质而言,土壤基质类型、颜色和基质比可以很好的鉴定土壤铁质侵染状况、铁氧化物含量和颗粒组成等<sup>[20,28]</sup>。铁氧化物作为红壤中重要胶结物质之一,含量越高,土壤颗粒间黏聚力就越强,土壤稳定性就越好<sup>[2,33]</sup>。此外,土壤基质比越小,表明土壤黏粒含量较少,粘化作用就越弱,水土流失现象就越严重<sup>[20]</sup>。前文已经讨论到崩壁土体铁氧化物含量、基质比随深度增加而减少,这可能是导致崩壁土体稳定性随深度增加而减小的重要因素之一。

从土壤结构体而言,土壤团聚体作为土壤单粒或团粒在胶结物质作用下形成的自然结构体,其发育状况对崩壁土体稳定性影响较大<sup>[34]</sup>。已有研究表明,土壤团聚体结构发育越成熟,水稳性越好,土体就越稳定<sup>[24]</sup>。本文崩壁土体团聚体发育状况随深度增加而变差,同样是导致崩壁土体稳定性随深度增加而减小的重要因素之一。表土层土壤团聚体发育成熟,本身具备一定的重量和粗糙的表面,团粒间的摩擦力较大,只有当降雨产生的径流冲刷力和溅蚀力超过团粒本身的重力和团粒间的摩擦力,土体才可能发生侵蚀并失稳。红土层团聚体结构发育不明显,主要是铁铝氧化物等无机胶体胶结了较多细小土壤颗粒,形成铁

质凝团,但这种结构极易水解并释放大量黏粒<sup>[12]</sup>,形成土壤结皮,显著提升红土层的抗蚀性,这可能是导致红土层失稳现象为整体滑移而非面蚀的重要原因之一。砂土层无土壤团聚体结构,主要以未风化完全的矿物颗粒为主,当水分进入颗粒间隙,导致颗粒与颗粒间的摩擦力急剧减弱,稳定性较差。

从土壤孔隙特征而言,严重的水土流失会导致崩壁土体长期处于不稳定的环境中,进而影响孔隙发育,因而孔隙发育状况可以很好的反映土壤发育环境的稳定性程度<sup>[12,35]</sup>。本文中,除表土层  $TC_1$  外,孔隙发育状况普遍不好,这表明红土层和砂土层水土流失较为严重,稳定性状况较差。同时,受孔隙类型的影响,崩壁不同深度土层间的大孔隙和毛管孔隙度差异明显(图2)。有研究指出,大孔隙(非毛管孔隙)在降雨条件下转变为水分运移的优先通道,导致水分运动速率要远高于毛管孔隙<sup>[22]</sup>,而水分剧烈变化会挤压土体内部空气,即产生消散作用加速土体结构破坏<sup>[36]</sup>。本文中,受孔隙类型和黏粒含量的影响,表土层和红土层毛管孔隙度高,水分扩散速率相对较慢,消散作用的影响可能较小。辜婧瑶等<sup>[8]</sup>人的研究也表明毛管作用力增强会显著降低水分扩散速率,进而降低红土层的崩解速率。相反,砂土层粗骨颗粒占比高、粒径大,导致大孔隙较多,当水分进入土体,水分变化速率较快,挤压土体内部空气而产生的消散作用就越强烈,因而稳定性较差。

崩壁土体稳定性的影响因素众多,不同的因素对土体稳定性的影响程度各不相同,且崩壁稳定性综合评价体系的建立及应用是一个极其复杂的工程,牵涉面较广,本文仅提供了土壤微形态特征作为评价体系的指标,这样只是有利于积累丰富的基础数据,为评价体系的深入研究提供基础,怎样将微形态特征和土壤表观特性更好的有机结合还需进一步研究。

## 4 结论

(1) 崩壁土体微形态特征随深度变化呈现层次分异性。沿剖面自上而下,土壤基质颜色由红向浅白逐渐变化,对崩壁土体受铁质侵染状况有较好的指示作用。除表土层外,崩壁土壤团聚体和孔隙发育状况普遍不好,表土层土壤团聚体发育状况成熟,孔隙类型以堆叠孔隙和部分孔道为主,连通性较好;红土层土壤团聚体发育不明显,孔隙类型以以囊孔和裂隙为主,连通性较差;砂土层团聚体结构不发育,孔隙类型以矿物颗粒间隙为主。

(2) 本文基于主成分分析得到的崩壁土体稳定性指数 SSI-MDS 显示:表土层( $TC_1$ )>红土层( $TC_2$ > $TC_3$ > $TC_4$ )>砂土层( $TC_5$ > $TC_6$ ),随土层深度增加而逐渐降低,且与团聚体发育状况、胶结物质类型、孔隙和裂隙发育特征等有很好的对应关系( $p<0.05$ )。崩壁不同深度土层微形态特征差异是土体稳定性具有层次分异性的重要因素之一。基于主成分分析构建的微形态评价体系可以很好地指示崩壁不同深度土层的稳定性。

(3) 崩壁土体稳定性微形态综合评价的最小数据集(MDS)由土壤基质颜色、土壤基质类型、土壤基质比、土壤团聚体、土壤结构体、总孔隙百分比和有机质含量7个指标构成。最小数据集和全量指标数据集得分结果线性拟合方程为:SSI-TDS=1.7305SSI-MDS+0.1633,调整后的  $R^2$  为 0.993 2。因而实际对崩壁土体稳定性进行评价时,最小数据集7个微形态指标可以代替原始的13个微形态指标反映崩壁土体稳定性状况。

### 参考文献:

- [1] 张婉璐,袁再健,李定强,等.“崩岗”概念及其英文译法探析[J].中国水土保持科学,2020,18(5):136-143.
- [2] 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.
- [3] Wei Y, Liu Z, Wu X, et al. Can Benggang be regarded as gully erosion[J]. Catena, 2021,207:105648.
- [4] 梁双双,林金石,黄炎和,等.模拟雨滴条件下崩壁不同土层的溅蚀特征[J].水土保持研究,2017,24(1):43-48.
- [5] 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.
- [6] 冯延云,张晓明,丁树文,等.干湿循环作用下崩岗土体抗拉强度的衰减性分析[J].水土保持学报,2020,34(3):168-174.
- [7] 冯舒悦,王军光,文慧,等.赣南崩岗侵蚀区不同部位土壤抗剪强度及影响因素研究[J].土壤学报,2020,57(1):71-83.
- [8] 辜婧瑶,阳邦戈,魏玉杰,等.崩岗不同土层土壤水力学特性差异性分析[J].水土保持学报,2021,35(2):61-67.
- [9] Tao Y, Zou Z, Guo L, et al. Linking soil macropores, subsurface flow and its hydrodynamic characteristics to the development of Benggang erosion[J]. Journal of Hydrology, 2020,586:124829.
- [10] Alvarez M F, Poch R M, Osterrieth M. Bioporosity in thin sections of luvic phaeozems of southeast of buenos aires, argentina, and its possible role as an indicator of soil quality: An micromorphological approach[J]. Eur-



- asian Soil Science, 2021, 54(6): 918-926.
- [11] Gerasimova M I, Savitskaya N V. Micromorphological interpretation of natural and anthropogenic evolution of soils in bykovo lacustrine-alluvial section of the moskva river floodplain[J]. Eurasian Soil Science, 2020, 53(7): 950-959.
- [12] 张蕾, 张凤荣, 靳东升, 等. 黄土高原淋溶土黏粒、氧化铁与颜色的关系及发生学解释: 以山西土系调查的31个黏化层为例[J]. 土壤学报, 2021, 58(4): 876-886.
- [13] 庞奖励, 淮态, 邱海燕, 等. 土壤微形态研究进展综述及前瞻[J]. 土壤, 2008, 40(5): 685-690.
- [14] 廖凯涛, 刘艳, 刘荃, 等. 赣州市崩岗侵蚀分布特征与影响因子分析[J]. 水土保持研究, 2021, 28(6): 126-130.
- [15] 冯春杰, 邓羽松, 何溢钧, 等. 基于主成分—聚类分析的崩岗侵蚀强度评价[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 41-46.
- [16] 赵冰琴, 夏栋, 夏露, 等. 向家坝工程扰动区植被恢复土壤质量评价[J]. 中国环境科学, 2020, 40(3): 1224-1234.
- [17] 刘颖, 王数, 张凤荣, 等. 不同改良措施下砂质土壤肥力的微形态评价: 以内蒙古科尔沁沙地为例[J]. 土壤, 2017, 49(5): 1023-1031.
- [18] Gerasimova M I, Kovda I V, Lebedeva M P, et al. Micromorphological terms: the state of the art in soil microfabric research[J]. Eurasian Soil Science, 2011, 44(7): 739-752.
- [19] 刘颖, 王数, 张凤荣, 等. 北京妙峰山优质玫瑰生产基地的土壤微形态特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 636-645.
- [20] 李珍珍, 王数, 张宏飞, 等. 黏土对沙地土壤改良效果的微形态研究: 以内蒙古科尔沁沙地为例[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(11): 115-123.
- [21] 张相, 李肖, 林杰, 等. 南方红壤丘陵区侵蚀沟道内土壤团聚体及有机碳特征[J]. 农业工程学报, 2020, 36(19): 115-123.
- [22] 林敬兰, 黄炎和, 蒋芳市, 等. 崩岗土体的渗透性能机理研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 53-56.
- [23] 赵玥, 韩巧玲, 赵燕东. 基于CT扫描技术的土壤孔隙定量表达优化[J]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 252-259.
- [24] 赵冬, 许明祥, 刘国彬, 等. 用显微CT研究不同植被恢复模式的土壤团聚体微结构特征[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 123-129.
- [25] 王佳妮, 马戌, 张晓明. 干湿循环下崩岗土体裂隙发育对其渗透性能的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 90-95.
- [26] 周红艺, 李辉霞, 叶奇, 等. 华南活动崩岗崩壁土体裂隙发育规律试验研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 338-342.
- [27] Mierzwa-Hersztek M, Gondek K, Lahori A H, et al. Soil micromorphological and physical properties after application of composts with polyethylene and biocomponent-derived polymers added during composting[J]. Pedosphere, 2021, 31(4): 560-571.
- [28] 张晓娜, 王数, 王秀丽, 等. 北京地区不同土纲典型剖面的土壤微形态特征[J]. 土壤, 2016, 48(3): 565-573.
- [29] Wu Z, Deng Y, Cai C, et al. Multifractal analysis on spatial variability of soil particles and nutrients of Benggang in granite hilly region, China[J]. Catena, 2021, 207: 105594.
- [30] 刘昌鑫, 潘健, 邓羽松, 等. 干湿循环对崩岗土体稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 253-258.
- [31] Jiang F, He K, Huang M, et al. Impacts of near soil surface factors on soil detachment process in benggang alluvial fans[J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125274.
- [32] Zhou X, Hu J, Wei Y, et al. Estimation of soil detachment capacity on steep slopes in permanent gullies under wetting-drying cycles[J]. Catena, 2021, 206: 105450.
- [33] 张越, 赵冬峰, 郑勤敏, 等. 花岗岩红壤丘陵区崩岗土体界限含水量的温度效应研究[J]. 土壤学报, 2020, 59(1): 118-128.
- [34] 王小红, 杨智杰, 刘小飞, 等. 中亚热带山区土壤不同形态铁铝氧化物对团聚体稳定性的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(9): 2588-2596.
- [35] Pessoa T N, Cooper M, Nunes M R, et al. 2D and 3D techniques to assess the structure and porosity of Oxisols and their correlations with other soil properties[J]. Catena, 2022, 210: 105899.
- [36] Yang Y J, Liu S R, Wang H, et al. Reduction in throughfall reduces soil aggregate stability in two subtropical plantations[J]. European Journal of Soil Science, 2019, 70(2): 301-310.