

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.019.

李晓非, 张越, 吴云博, 等. 添加硫酸钙对崩壁碎屑层土壤抗剪强度的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 161-167.

Li Xiaofei, Zhang Yue, Wu Yunbo, et al. Analysis of the Enhancing Effect of Calcium Sulfate on the Shear Strength of Clastic Layer Soil[J].

Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 161-167.

添加硫酸钙对崩壁碎屑层土壤抗剪强度的影响

李晓非¹, 张越^{1,2}, 吴云博¹, 杨璐¹,
林金石^{1,2}, 蒋芳市^{1,2}, 葛宏力¹, 黄炎和^{1,2}

(1. 福建农林大学 资源与环境学院, 福州 350002;

2. 自然资源部东南生态脆弱区监测修复工程技术创新中心, 福州 350013)

摘要: [目的] 探究福建省崩壁碎屑层土壤在不同硫酸钙施用条件下的力学强度及微观特征, 为今后崩壁土壤恢复和水土保持治理提供数据支撑。[方法] 以福建省典型花岗岩崩岗碎屑层土壤为研究对象, 以硫酸钙为改良剂, 设置 0, 5, 10, 15 g/kg 4 个浓度梯度, 通过室内重塑土试验, 使用直剪试验获得了不同剂量下改良土壤的黏聚力和内摩擦角, 采用扫描电子显微镜获得了不同浓度下土壤的表观孔隙率。[结果] 添加 15 g/kg 硫酸钙土壤抗剪强度提升效果最佳, 在 300 kPa 垂直荷载条件下, 抗剪强度增加 9.04%。随着使用量增加, 土壤黏聚力比对照处理依次增加 27.24%, 53.57%, 49.39%。改良后土壤内摩擦角变化均不显著, 但随着施用浓度的增加均表现出先降低再增加的趋势, 且低于空白对照, 依次降低 8.73%, 17.35%, 3.91%。添加硫酸钙通过促进土壤形成大团聚体改变了碎屑层土壤的微观结构, 低浓度硫酸钙添加下, 土壤颗粒呈现大块片状为主, 各颗粒之间相距较远且孔隙度大, 添加量为 15 g/kg 时, 土壤形成特殊堆叠书页状为主的结构, 随着施用浓度增加, 土壤表观孔隙率依次减小了 15%, 25%, 47.5%。[结论] 添加硫酸钙可以增加碎屑层土壤的力学强度, 对治理崩岗有重要指导意义。

关键词: 土壤侵蚀; 土壤改良剂; 直剪试验; 扫描电子显微镜; 崩岗

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0161-07

Analysis of the Enhancing Effect of Calcium Sulfate on the Shear Strength of Clastic Layer Soil

Li Xiaofei¹, Zhang Yue^{1,2}, Wu Yunbo¹, Yang Lu¹,
Lin Jinshi^{1,2}, Jiang Fangshi^{1,2}, Ge Hongli¹, Huang Yanhe^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University,

Fuzhou 350002, China; 2. Technology Innovation Center for Monitoring and Restoration of

Ecologically Fragile Areas in Southeast China, Ministry of Natural Resources, Fuzhou 350013, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the mechanical strength and microscopic characteristics of soil in the debris layer of collapsed walls in Fujian Province under different conditions of calcium sulfate application, and to provide data support for future soil restoration and soil and water conservation management. [Methods] This study focuses on the debris layer soil of typical granite collapsed rock gullies in Fujian Province. Calcium sulfate was employed as the ameliorating agent, with four concentration gradients (0, 5, 10, 15 g/kg). Through indoor remolding soil tests and direct shear tests, cohesive force and internal friction angle of the ameliorated soil at different doses were obtained. The apparent porosity of soil at different concentrations was obtained by using Scanning Electron Microscopy

收稿日期: 2024-01-13

修回日期: 2024-02-18

资助项目: 国家自然科学基金(41907043); 福建省科技创新项目资金(KY-090000-04-2021-001); 福建农林大学科技创新专项基金(CXZX2020075A)

第一作者: 李晓非(1998—), 男, 甘肃金塔人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与防治。E-mail: 993024856@qq.com

通信作者: 黄炎和(1962—), 男, 广东饶平人, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与防治研究。E-mail: yanhehuang@fafu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

(SEM). [Results] The optimal enhancement in shear strength is achieved with the addition of 15 g/kg calcium sulfate, resulting in a 9.04% increase under a 300 kPa vertical load. As the dosage increases, the soil cohesive force sequentially increases by 27.24%, 53.57%, and 49.39% compared to the control treatment. The change in the internal friction angle of the ameliorated soil is not significant, but it exhibits a trend of initial reduction followed by an increase with increasing application concentration, consistently lower than the blank control, decreasing by 8.73%, 17.35%, and 3.91%, respectively. The addition of calcium sulfate promotes the formation of large aggregates in the soil and changes the microstructure of the detrital layer soil. With the addition of low concentration calcium sulfate, the soil particles are mainly in the form of large blocks and flakes, and the distance between each particle is far and the porosity is large. When the addition amount is 15 g/kg, the soil forms a special stacked book page structure, and as the application concentration increases, the apparent porosity of the soil decreases by 15%, 25%, and 47.5%, respectively. [Conclusion] In summary, adding calcium sulfate can increase the mechanical strength of soil in the debris layer, which has important guiding significance for the Benggang management.

Keywords: soil erosion; soil amendment; direct shear test; SEM; Benggang

崩岗主要分布在东南地区热带和亚热带的低缓丘陵山区,是发生在花岗岩风化壳上的一种特殊侵蚀地形,以水力和重力复合侵蚀形成的以侵蚀沟为主体的地貌^[1]。崩岗侵蚀区年均土壤侵蚀模数达 4.91 万 t/(km²·a),远超过剧烈侵蚀强度标准。据国家对南方 7 省的崩岗普查资料统计,该区域共有大中小型崩岗共计 23.91 万个,崩岗总面积可达 1 220 km²,崩岗防治总面积 2 436 km²。崩岗不仅破坏土地资源,还会覆盖农田,拥堵水利设施,甚至冲毁屋舍,给当地人们生产、生活和生态安全带来威胁^[2-4]。因此,为了区域生态和人居安全,探究如何防治崩岗具有重要意义。

前人研究表明崩壁土体的抗剪强度是控制崩岗发生的关键因素^[5-7]。崩壁由于风化程度不同,主要分为 3 个土层,包括红土层、砂土层以及碎屑层,其中碎屑层土壤风化程度较低,黏粒含量和胶结物质含量低于红土层和砂土层土壤,土体易松散,导致碎屑层土壤抗蚀能力最差^[8]。在南方夏季高温多雨的条件下,崩壁碎屑层容易被径流侵蚀形成窝^[9],作为崩岗发育的原始阶段,遏制窝穴发育是防治崩岗的关键^[9-10]。因此,提高碎屑层土壤的力学强度有利于提高崩壁稳定性和指导崩岗的防治。

对于土壤的力学性质改良,常用的改良剂包括 PAM、碳酸钙、生物炭、凹凸棒土等^[11-12]。脱硫石膏作为第二大工业固体废弃物,其产量高但是利用率较低。脱硫石膏的主要成分是硫酸钙,施入土壤中能大幅增加土壤溶液中 Ca²⁺ 含量,土壤胶体对 Ca²⁺ 的吸附选择性较高,吸附 Ca²⁺ 的土壤胶体颗粒表层具有疏水性,胶体微粒能够互相靠近团聚而形成微粒团,这些微团体的形成能够通过改变土壤内部结构进而影响其力学性质^[13]。李传福等^[14]研究得出在脱硫石膏配施措施

下,可以促进盐碱土团聚体的形成和稳定。毛玉梅等^[15]发现脱硫石膏可促进黏土与有机物的结合,从而改善土壤的结构状态。Wei 等^[16]研究表明粉质黏土在添加硫酸钙溶液后,黏聚力随硫酸钙浓度的增加先增大后减小,内摩擦角则呈现相反的规律。以上研究说明石膏可以改良崩岗土壤物理结构,但是否能够增加碎屑层土壤力学稳定性还有待进一步研究。

本试验以崩岗崩壁碎屑层土壤为研究对象,通过室内重塑土试验,利用土壤直剪试验和 SEM 微观扫描,分别从抗剪强度和微观参数方面进行分析,探究添加硫酸钙对崩壁碎屑层土壤力学性质的影响,揭示改良剂的作用机理,该研究可为崩岗治理提供新途径。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域定于福建省泉州市安溪县龙门镇(118°03′49.31″E,24°57′08.29″N),地势属低山河谷盆地,由南向北倾斜。自然气候属南亚热带海洋性季风气候,年平均降雨量 1 600~2 000 mm,年平均温度 16~22 ℃。安溪县崩岗总面积为 2 305.43 hm²,占全省崩岗总面积的 35.99%,崩岗数量为 12 828 个,占全省崩岗总数的 49.28%,龙门镇的崩岗群是安溪县崩岗的典型代表区之一,全镇范围内崩岗发育多达 1 228 处,是南方花岗岩崩岗发育的典型区域(图 1)。

1.2 试验设计

1.2.1 样品采集 本试验选取研究区代表性的崩岗,采集碎屑层混合土样,避光处室温风干,挑拣出动植物残体和石块,研磨后通过 2 mm 的筛网,留存备用。使用激光粒度仪(BT-9300 ST,中国辽宁贝特氏仪器有限公司)测量土壤试样的粒度分布;使用 pH

计以 1 : 2.5 的土水比测量土壤的 pH 值;土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定;土壤容重使用环刀法取样后,105 ℃烘干至恒重,测定单位体积的土壤质量。土壤基本理化性质见表 1。



图 1 研究区区位概况

Fig. 1 Overview of the research area location

表 1 碎屑层基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of clastic layer soil in Benggang

指标		数值
有机质含量/(g · kg ⁻¹)		3.10
pH 值		5.28
容重/(g · cm ⁻³)		1.50
机械组成/mm	细黏粒(<0.001)	2.01
	粗黏粒(0.001~0.002)	3.92
	细粉粒(0.002~0.005)	10.32
	中粉粒(0.005~0.01)	12.31
	粗粉粒(0.01~0.05)	35.96
	细砂粒(0.05~0.25)	10.58
	粗砂粒(0.25~1)	8.98
质地		壤土

注:土粒分级标准依据中国制。

1.2.2 改良剂添加 在本试验中土壤改良剂选择硫酸钙,依次设置 4 个浓度梯度(分别为 0,5,10,15 g/kg),浓度设置参考了前期研究以及相关文献^[17-19],其中 0 g/kg 作为空白对照。添加改良剂时,应分别按照对应比例制备相应浓度的土壤样品,制备完成后将土壤与硫酸钙充分搅拌混合均匀,加入去离子水,使其含水率达到 28% (接近田间持水量),混匀后过 2 mm 筛网转入自封袋中静置一晚,所有试样重复上面步骤。处理完成重塑制成体积为 60 cm³ 的环刀试样(碎屑层容重为 1.50 g/cm³),将制好后环刀样品放置在培养罐中,封口做好保湿处理并放入恒温恒湿培养箱中培养 7 d,培养温度设定 25 ℃,湿度 80%,培养完成即可进行测定。

1.3 抗剪强度参数

培养结束后试样采用四联直剪仪(LH-DDS-4)进行

土体的抗剪强度试验。测定过程中垂直压力 σ 分别设定为 50,100,200,300 kPa,设置剪切速率为 0.8 mm/min,最大剪切位移为 6 mm,得出不同压力下的剪切应力。在直剪仪显示最大剪切位移为 6 mm 时,读取软件剪切过程中最大剪切应力(即剪切应力曲线峰值),若在剪切过程中切应力曲线无峰值出现,则以剪切位移达到 4 mm 时的切应力为准^[20]。根据不同垂直荷载下的最大剪切应力,利用库伦公式计算抗剪强度的相关指标:黏聚力和内摩擦角,公式如(1)所示:

τ=C+σtanφ (1)

式中:τ 为抗剪强度(kPa);C 为黏聚力(kPa);σ 为剪切破坏面上的垂直荷载(kPa);φ 为内摩擦角(°)。

1.4 表观孔隙率测量方法

培养结束后使用冷冻干燥机冻干,取出一部分土样,首先用氮气吹扫,进行电镜制样后喷金,放入 SEM 中进行 5 000 倍微观参数测定。本试验 SEM 图像拍摄使用的是荷兰生产的型号为 Pro-X 飞纳台式扫描电镜。图像采用 image pro-plus 6.0 图像处理软件,以添加不同浓度硫酸钙的碎屑层土壤为研究对象,对其 SEM 图像进行处理分析后测定各种微观定量参数。首先要对图像进行预处理(降噪、增强等),后续图像处理主要分为两个步骤:(1) 图像分割。即要确定分割对象结构体的阈值;(2) 特征值获取。阈值确定后,通过阈值将 SEM 图像转化为二值化图像,从而获取相应的微观定量参数。本研究主要统计样品的表观孔隙率,是指研究对象图像平面孔隙面积与研究区面积二者比值。

1.5 数据分析及分析方法

采用 SPSS 18.0 进行单因素 ANOVA 检验(p<0.05),使用 Origin 2018 以及 Excel 2016 进行图像和表格的绘制、数据处理。

2 结果与分析

2.1 硫酸钙对土壤抗剪强度的影响分析

50 kPa 荷载条件下,土壤在添加 5,10,15 g/kg 硫酸钙时,土壤抗剪强度与空白对照无显著差异;100 kPa 荷载时添加 5 g/kg 硫酸钙和空白对照并无差异,但随着添加浓度增加,在 10 g/kg 和 15 g/kg 时抗剪强度分别比空白对照提升了 6.68%,15.75%,对于空白对照,两组高浓度数据均有显著提升;200 kPa 荷载条件下,5 g/kg,10 g/kg 与空白对照抗剪强度无明显差异,而 15 g/kg 时比空白对照提升 9.52%;300 kPa 垂直荷载条件下,添加 10 g/kg 硫酸钙比空白对照减少了 3.48%,但空白对照、5 g/kg、10 g/kg 条件下均无显著差异,15 g/kg 时比空白对照有显著增加,提升了 9.04%

添加 5 g/kg 的硫酸钙,由于使用剂量较小,相较于整个变化趋势都无明显差异(图 2),趋势线在 4 个垂直荷载下与空白对照较为重合。在 10 g/kg 条件下随着垂直荷载提升,抗剪强度呈现先增加再下降的趋势,并在 100 kPa 时提升效果最好;添加了 15 g/kg 硫酸钙的抗剪强度数据最为明显,在 50, 100, 200, 300 kPa 4 个梯度荷载下依次比空白值增加了 6.68%, 15.75%, 9.52%, 9.04%。在相同荷载条件下,50 kPa 和 100 kPa 两个低荷载,随着使用浓度的增加,土壤抗剪强度呈现先减少再增加的趋势,最小值均出现在 5 g/kg;在 200 kPa 和 300 kPa 高荷载条件下,随着硫酸钙浓度提升,土壤抗剪强度也是先减小再增加,但最小值出现在 10 g/kg。

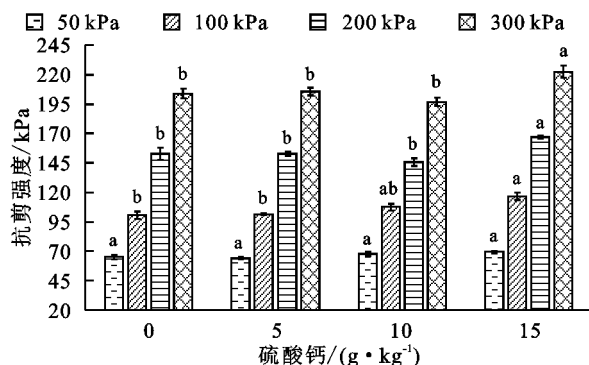


图 2 不同垂直荷载下土壤梯度添加硫酸钙后抗剪强度的变化

Fig. 2 Changes in shear strength after adding calcium sulfate to soil gradients under different vertical loads

2.2 添加不同改良剂后抗剪强度参数差异分析

相比于对照处理土壤,添加硫酸钙均能提高土壤的黏聚力(图 3)。随着施用硫酸钙浓度的增加,土壤黏聚力表现出先增加再减少的趋势,但并没有在 15 g/kg 低于空白对照值,在 10 g/kg 时土壤的黏聚力达到峰值 49.28 kPa,此时硫酸钙对土壤黏聚力的提升效果最佳。3 个浓度下,随着使用剂量增加,土壤黏聚力依次增加 27.24%, 53.57%, 49.39%。

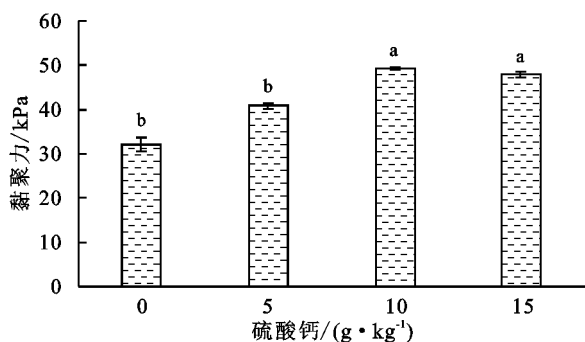


图 3 添加不同浓度硫酸钙后土壤黏聚力变化

Fig. 3 Changes in soil cohesion after adding different concentrations of calcium sulfate

土壤内摩擦角变化较小,总体数值在 26.28°~31.79°范围内浮动(图 4)。通过对比对照处理土壤,

添加硫酸钙后的土壤内摩擦角均低于对照值。随着施用硫酸钙浓度的增加,土壤内摩擦角表现出先减少再增加的趋势,在 10 g/kg 时土壤的黏聚力达到最小值,为 26.28°。随着使用剂量增加,土壤内摩擦角依次减少 8.73%, 17.34%, 3.89%。

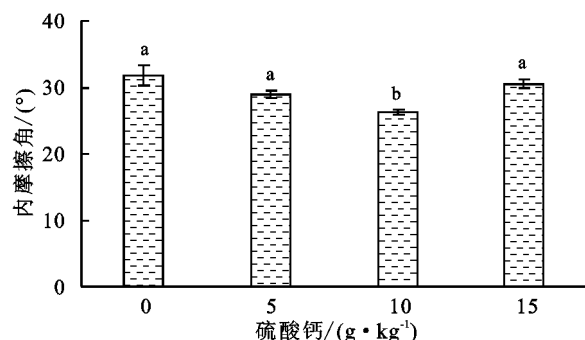


图 4 添加不同浓度硫酸钙后土壤内摩擦角变化

Fig. 4 Changes in soil internal friction angle after adding different concentrations of calcium sulfate

2.3 SEM 图像及土壤微观定量参数分析

在电镜 5 000 倍下没有添加改良剂的土壤试样孔隙较多,微观结构也较为松散,表观孔隙率为 0.4。土壤颗粒主要以片状为主互相堆叠而成,接触形式以面—面接触为主。低浓度硫酸钙添加下土壤颗粒呈现大块片状为主,各颗粒相距较远且孔隙度大,这与空白对照处理土壤结构相似。随着施用浓度增加,颗粒逐渐变小,大块结构逐渐解体,孔隙度减小。在 15 g/kg 时达到最大并形成堆叠书页状为主的结构。为了进一步定量分析试样之间微观结构的差异,利用 SEM 图像分析了土样的表观孔隙率(图 5)。添加硫酸钙后,随着使用量增加土壤表观孔隙率逐渐减小,浓度从低到高分别低于空白对照 15%, 25%, 47.5% (图 6),表观孔隙率越小,土壤抗剪强度越大,因此可看出土壤抗剪强度与表观孔隙率成反比关系,减小的表观孔隙率反映出添加硫酸钙后土壤内部致密程度较高,进而影响土壤结构稳定性。

3 讨论

3.1 硫酸钙对土壤结构的影响

添加硫酸钙会使土壤微观结构发生变化,添加量为 5 g/kg 时,土壤颗粒为单一片状,随着添加量增加,片与片之间重叠在一起形成堆叠结构,土壤表观孔隙率随着使用量增大逐渐减小。孔祥辉等^[21]利用脱硫石膏改良疏浚底泥时发现了类似的结果,即添加脱硫石膏后疏浚底泥的结构更加紧密。硫酸钙添加到土壤中起到胶结和填充孔隙的作用,随后通过絮凝过程改变土壤内部结构,使得微观形态结构发生变化^[21-22]。卢前明等^[23]研究发现污泥掺入 9%

脱硫石膏后,在微观结构上水化产物中板状氢氧化钙及针状钙矾石晶体填充于水化硅铝(铁)酸钙凝胶孔隙中,提高了试样结构密实度。此外,试样中的 Al^{3+} 为高价离子可以使土壤胶体表面的电位势降低,增加土壤中的 Ca^{2+} ,含 Ca^{2+} 胶体微粒的外层不吸附水分子,胶体微粒相互靠近并聚团形成微粒团,

有助于土壤胶体凝聚形成团粒结构,改善了土壤结构^[24-25]。本研究中硫酸钙添加量为 15 g/kg 时,土壤颗粒为较小的土粒,颗粒与颗粒结合得更紧密,随着含量的增加,土壤颗粒间逐渐形成水稳性团聚体(图 5),形成的大团粒结构促使土粒之间咬合更加稳定,团粒结构更大。

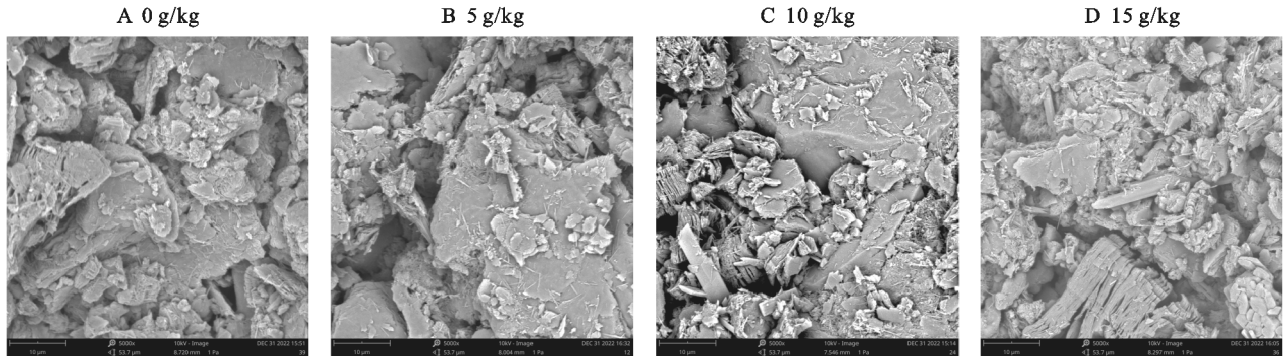


图 5 不同浓度硫酸钙添加下碎屑层微观结构特征

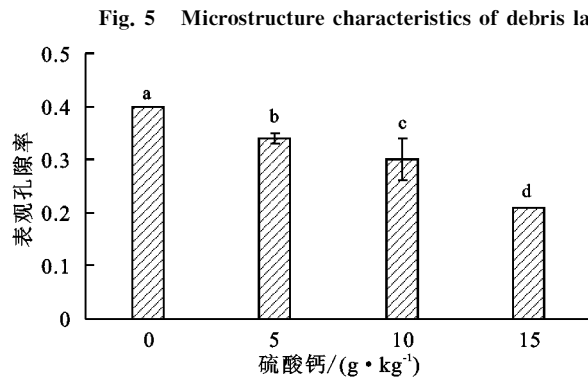


图 6 添加硫酸钙后微观表观孔隙率变化特征

Fig. 6 Characteristics of changes in micro apparent porosity after adding calcium sulfate

3.2 硫酸钙对土壤抗剪特性的影响

硫酸钙添加后,在 50 kPa 和 100 kPa 垂直荷载时,随着添加浓度增加,土体抗剪强度逐渐增加;而在 200 kPa 和 300 kPa 高垂直荷载时,土体抗剪强度呈先降低再提升的趋势。在不同垂直荷载下,15 g/kg 的硫酸钙效果最好,土体抗剪强度均有一定程度上的提升,平均提高了 10.25%。土壤添加硫酸钙后改变了土壤内部微观结构(图 5),土壤抗剪强度与其特殊的微观结构有关^[22]。本研究中,随着硫酸钙使用量增多,土壤形成的堆叠结构,使得土粒结合更紧密,进而提升土壤抗剪强度。由库伦公式可得,内摩擦角和黏聚力两个参数共同决定土体的抗剪强度。随着硫酸钙使用量增加,土壤黏聚力呈现逐渐增加的趋势,内摩擦角先减小再增加,土壤抗剪强度也呈现先减少再增加趋势。因此,在浓度大于 15 g/kg 时,土壤整体抗剪强度仍会增强。孔祥辉等^[21]在疏浚底泥中添加硫酸钙,其土体的力学强度提升效果显著高于本研

究的结果,原因可能是其土体内部形成致密的网状结构,不同于本研究中发现的堆叠结构。Wei 等^[16]在粉质黏土中添加硫酸钙,发现随着硫酸钙溶液浓度的增加,黏聚力随硫酸钙浓度的增加先增大后减小,内摩擦角则呈现相反的规律,这与本文所得出的结论相似。而在谢兴富等^[26]对粉煤灰-脱硫石膏混合体进行淋滤后,随着脱硫石膏的含量增加,黏聚力和内摩擦角均为先增大再减小,内摩擦角的变化规律与本文相反,这主要是淋滤后的混合体内部结构在吸收水分后孔隙变大,内部结构发生变化导致的。土壤黏聚力主要包括两个部分:一部分是由于土粒间分子引力所形成的原始黏聚力,另外一部分是由于土中化合物的胶结作用形成的固化黏聚力^[27-28]。随着硫酸钙添加量增加,土壤黏聚力也随之增加,并在使用量达到 10 g/kg 时,黏聚力提升效果最好。对于土壤无机胶体而言, $CaSO_4$ 溶解的 Ca^{2+} 吸附在黏土颗粒上形成类晶团聚体,每个类晶团聚体由几个黏土颗粒组成,形成的类晶团聚体促进了胶体的絮凝^[13]。随着 $CaSO_4$ 浓度的增加,越来越多的类晶团聚体在土壤中形成,促进了土壤团聚体的形成,团聚体与团聚体相互嵌合,进而形成更稳定的结构,故随着施用量增加,其黏聚力也提升^[27]。土壤内摩擦角反映了土壤的内部各颗粒之间的摩擦力大小,一般包括土壤颗粒之间的滑动摩擦力和颗粒间的咬合力两部分^[29-30]。由于碎屑层中有大量 Fe^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} 离子,加入硫酸钙以后能够促进 3 种离子絮凝^[13],之后土壤内部结构重新排列组合,团粒形成使土粒的圆度减小,但随着硫酸钙浓度增加,土壤间隙减小,较小的孔隙度导致土壤

颗粒间滑动摩擦力小,导致了土样内摩擦角降低。

4 结论

本研究以硫酸钙为改良剂,探究不同浓度硫酸钙对崩岗碎屑层土壤抗剪强度参数以及微观形态的影响,得出主要结论如下:在添加 15 g/kg 硫酸钙后,土壤颗粒团聚在一起形成不同于其他浓度的独特的堆叠结构,表观孔隙率显著降低,结构更稳定。添加硫酸钙显著增加了土壤黏聚力,在添加量为 10 g/kg 时最显著;土壤内摩擦角呈现先减小再增大的趋势;添加硫酸钙有增加土壤总体的抗剪强度的趋势,在添加量为 15 g/kg 时最显著。综上可知,硫酸钙显著改变碎屑层土壤的微观结构,进而影响土壤黏聚力和内摩擦角,提升土壤抗剪强度,该研究可为南方崩岗的治理提供新思路。今后还需进一步开展野外验证试验,探究不同改良剂提升崩岗土壤力学性能的效果。

参考文献(References):

- [1] Jin X, Wang T H, Zhao Z K, et al. Collapse potential of loess under unloading effect[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021,2021:6617228.
- [2] Zhang L T, Sun S J, Lin M Q, et al. Study on soil-water characteristic curves in the profiles of collapsing walls of typical granite Benggang in southeast China[J]. *PeerJ*, 2022,10:e13526.
- [3] Chen P J, Liu X, Yu S, et al. Stability assessment of the restored Benggang units in a weathered granite crust region of South China [J]. *Ecological Engineering*, 2022,182(3):106709.
- [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] Zou Z Q, Tao Y, Gao Y H, et al. Soil moisture dynamics near a gully head in relation to the trigger of collapse in granite red soil slope in southern China[J]. *Geomorphology*, 2022,420(1):108493.
- [6] Wang H, Chen W, Zhou M, et al. Runoff and sediment characteristics of a typical watershed after continuous soil erosion control in the red soil region of Southern China[J]. *Catena*, 2023,233(2):107484.
- [7] Zhang Y, Zhao D F, Zheng Q M, et al. Evaluating the effects of temperature on soil hydraulic and mechanical properties in the collapsing gully areas of South China [J]. *Catena*, 2022,218(3):106549.
- [8] 邓羽松,李双喜,丁树文,等.鄂东南崩岗不同层次土壤分形特征及抗蚀性研究[J].*长江流域资源与环境*,2016,25(1):63-70.
- [9] Deng Y S, Li S X, Ding S W, et al. Research on different soil layers of collapsing gully fractal characteristics and erosion characteristics in Tongcheng [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016,25(1):63-70.
- [9] 何玲,邓羽松.南方崩岗侵蚀区崩壁龛穴发育特征与稳定性初探[J].*水土保持学报*,2023,37(3):60-65.
- [9] He L, Deng Y S. Preliminary study of the development and stability of niches in collapsing wall in Benggang erosion areas of southern China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023,37(3):60-65.
- [10] 邓羽松,丁树文,刘辰明,等.鄂东南花岗岩崩岗崩壁土壤水分特征研究[J].*水土保持学报*,2015,29(4):132-137.
- [10] Deng Y S, Ding S W, Liu C M, et al. Soil moisture characteristics of collapsing gully wall in granite area of southeastern Hubei [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015,29(4):132-137.
- [11] Wang P J, Lin X L, Liu Q, et al. Interactions between flue gas desulfurization gypsum and biochar on water infiltration characteristics and physicochemical properties of saline-alkaline soil[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023,195(11):1273.
- [12] Kim D, Kim T, Jeon J, et al. Development of soil conditioner for reclaimed land desalinization based on high-iron fly ash[J]. *Paddy and Water Environment*, 2022,20(2):277-286.
- [13] 张文新,张文超,王淑娟,等.脱硫石膏对碱化土壤胶体絮凝的影响[J].*土壤*,2021,53(3):555-562.
- [13] Zhang W X, Zhang W C, Wang S J, et al. Effect of flue gas desulphurization gypsum on colloidal flocculation in sodic soil[J]. *Soils*, 2021,53(3):555-562.
- [14] 李传福,朱桃川,明玉飞,等.有机肥与脱硫石膏对黄河三角洲盐碱地土壤团聚体及其有机碳组分的影响[J].*生态环境学报*,2023,32(5):878-888.
- [14] Li C F, Zhu T C, Ming Y F, et al. Effect of organic fertilizer and desulphurized gypsum on soil aggregates and organic carbon and its fractions contents in the saline-alkali soil of the Yellow River Delta[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023,32(5):878-888.
- [15] 毛玉梅,李小平.烟气脱硫石膏对滨海滩涂盐碱地的改良效果研究[J].*中国环境科学*,2016,36(1):225-231.
- [15] Mao Y M, Li X P. Amelioration of flue gas desulfurization gypsum on saline-sodic soil of tidal flats and its effects on plant growth [J]. *China Environmental Science*, 2016,36(1):225-231.
- [16] Wei T, Chen G Q, Sun X, et al. Shear strength and microstructure of silty clay subjected to CaSO₄ solution and stability effect on a gypsum dump[J]. *Bulletin of*

- Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(5):4143-4157.
- [17] 张灵芝,李蒙,李洪义,等.脱硫石膏与聚谷氨酸配施对盐碱化土壤的改良效果[J].水土保持通报,2023,43(6):115-125.
- Zhang L Z, Li M, Li H Y, et al. Effects of desulfurized gypsum applied combined with polyglutamic acid on improving saline soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(6):115-125.
- [18] 喜银巧,赵英,李生字.三种土壤改良剂对风沙土抗剪强度的影响[J].土壤学报,2018,55(6):1401-1410.
- Xi Y Q, Zhao Y, Li S Y. Effects of three kinds of soil amendments on shear strength of aeolian soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018,55(6):1401-1410.
- [19] 魏佳.离子电动加固对花岗岩崩岗土体抗剪特性的影响[D].福州:福建农林大学,2018.
- Wei J. Effect of Ion-Electrokinetic Consolidation on Soil Shear Strength Characteristics in Collapsing Hill [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2018.
- [20] 郑勤敏,王祖梅,黄奕铭,等.东南崩岗侵蚀区崩壁土壤岩土特性的空间分异特征[J].森林与环境学报,2022,42(1):53-62.
- Zheng Q M, Wang Z M, Huang Y M, et al. Spatial differentiation of geotechnical characteristics of soil in a Benggang gully wall in southeast China[J]. Journal of Forest and Environment, 2022,42(1):53-62.
- [21] 孔祥辉,梁允鹏,张进港,等.氧化镁-脱硫石膏-钢渣联合固化疏浚底泥试验研究[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2023,42(12):61-69.
- Kong X H, Liang Y P, Zhang J G, et al. Experimental study on dredged sediment solidified with magnesium oxide-desulfurization gypsum-steel slag[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2023,42(12):61-69.
- [22] 董金梅,朱华,边疆,等.高分子材料改性粉土力学特性试验研究及机制探讨[J].岩石力学与工程学报,2014,33(S2):4326-4333.
- Dong J M, Zhu H, Bian J, et al. Experimental study on mechanical properties and mechanism of polymer modified silt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014,33(S2):4326-4333.
- [23] 卢前明,王雪晴,付少君,等.脱硫石膏对污泥灰胶凝体系强度及微观结构的影响[J].郑州大学学报:工学版,2021,42(3):99-104.
- Lu Q M, Wang X Q, Fu S J, et al. Effect of desulfurization gypsum on the strength and microstructure of the sludge ash cementitious system[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2021,42(3):99-104.
- [24] 赵永敢,王淑娟,李彦,等.脱硫石膏改良盐碱土技术发展历程与展望[J].清华大学学报:自然科学版,2022,62(4):735-745.
- Zhao Y G, Wang S J, Li Y, et al. Prospects of using flue gas desulfurization gypsum to ameliorate saline-alkaline soils [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2022,62(4):735-745.
- [25] 姜展博,宁松瑞,王全九.脱硫石膏改良盐碱土壤综合评价研究[J].土壤学报,2023,76(5):1-18.
- Jiang Z B, Ning S R, Wang Q J. A Comprehensive evaluation of the effect of desulfurized gypsum for improving saline-alkali soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023,76(5):1-18.
- [26] 谢致富,吴勇,王辉,等.粉煤灰-脱硫石膏混合体淋滤后抗剪性能试验研究[J].四川冶金,2017,39(5):17-20.
- Xie X F, Wu Y, Wang H, et al. Experimental studies of the strength variation of mixture of fly ash and gypsum after leaching[J]. Sichuan Metallurgy, 2017,39(5):17-20.
- [27] 李涛,吕春娟,姜成刚,等.含水率和聚丙烯酰胺分子量对重构铁尾矿砂抗剪强度的影响[J].水土保持通报,2022,42(2):89-97.
- Li T, Lyu C J, Jiang C G, et al. Effects of water content and polyacrylamide molecular weight on shear strength of reconstructed iron tailing sand[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(2):89-97.
- [28] 娄义宝,康宏亮,王文龙,等.黄土高原沟壑区沟头植被根系垂直分布及其对土壤抗侵蚀性的影响[J].中国农业科学,2023,56(1):90-103.
- Lou Y B, Kang H L, Wang W L, et al. Vertical distribution of vegetation roots and its influence on soil erosion resistance of gully heads on the gullied Loess Plateau [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023,56(1):90-103.
- [29] 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.
- 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.
- [30] 张健乐,史东梅,刘义,等.土壤容重和含水率对紫色土坡耕地耕层抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2020,34(3):162-167,174.
- Zhang J L, Shi D M, Liu Y, et al. Effects of soil bulk density and water content on shear strength of cultivated-layer in purple soil sloping farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(3):162-167,174.