

滇东石漠化坡地浅层裂隙漏失土壤的 抗剪强度及其影响因素

何 停, 范 弢, 徐宗恒, 李河辉, 陈培云

(云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 云南师范大学 地理学部, 昆明 650500)

摘 要: [目的] 探讨滇东岩溶断陷盆地植被恢复对改善浅层裂隙土壤理化性质及增强土壤抗剪强度的影响, 为减缓土壤漏失, 有效遏制该区石漠化态势提供科学参考。[方法] 通过野外调查取样和室内土壤团聚体湿筛、土壤抗剪试验等方法, 分析云南松次生林、小铁仔灌丛裂隙土壤基本性质、土壤抗剪性能的垂直变化特征。[结果] ①植被恢复能改善裂隙土壤理化性质, 但随着土层深度的变化出现差异。两对比群落裂隙土壤有机质、砂粒含量、水稳性团聚体(>0.25 mm)随着土层深度的加深呈递减趋势, 土壤黏粒含量、水稳性团聚体(<0.25 mm)呈递增趋势; 云南松次生林裂隙土壤砂粒(55.46%)、有机质(19.63 g/kg)、水稳性团聚体(76.51%)含量 $>$ 小铁仔灌丛裂隙(50.16%, 11.31 g/kg, 67.57%), 粉粒(17.55%)、黏粒(26.99%)、小颗粒团聚体(23.49%)含量 $<$ 小铁仔灌丛裂隙(22.56%, 27.27%, 31.43%)。②两对比群落裂隙土壤黏聚力都随着土壤黏粒、水稳性细颗粒团聚体的增多而增大($p<0.05$), 土壤内摩擦角随着砂粒、有机质、水稳性大颗粒团聚体的减少而逐渐减小($p<0.05$)。③两对比群落裂隙土壤抗剪强度随土层深度的加深而减小, 但云南松群落在提升浅层裂隙土壤抗剪性能上要优于灌丛群落, 尤其是在中层和深层裂隙土壤, 云南松群落抗剪强度大于小铁仔灌丛, 两对比群落裂隙的抗剪强度差异性极显著($p<0.01$)。[结论] 在滇东断陷盆地石漠化地区, 乔林群落更有助于改善中层和深层土壤理化性质, 提高土壤抗剪强度, 减缓浅层裂隙土壤漏失效应更显著。

关键词: 岩溶裂隙; 漏失土壤; 土壤理化性质; 土壤抗剪强度; 植被恢复; 滇东地区; 岩溶断陷盆地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)03-0031-09

中图分类号: S157.1

文献参数: 何停, 范弢, 徐宗恒, 等. 滇东石漠化坡地浅层裂隙漏失土壤的抗剪强度及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 31-39. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.005; He Ting, Fan Tao, Xu Zongheng, et al. Loss soil shear strength and its influencing factors in shallow fractures of rocky desertification slopes in Eastern Yunnan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3): 31-39.

Loss Soil Shear Strength and Its Influencing Factors in Shallow Fractures of Rocky Desertification Slopes in Eastern Yunnan Province

He Ting, Fan Tao, Xu Zongheng, Li Hehui, Chen Peiyun

(Yunnan Key Laboratory of Plateau Geographical Processes and Environmental Change, Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: [Objective] The influence of vegetation restoration on soil physical and chemical properties of shallow fissures and soil shear strength in karst-faulted basins in Eastern Yunnan Province was explored in order to provide a scientific reference for the mitigation of soil loss and the effective control of rocky desertification in this area. [Methods] The vertical variation characteristics of soil properties and soil shear resistance in the shrub crannies of a secondary forest of *Pinus yunnanensis* and *Myrsine africana* shrub were analyzed by field sampling, indoor wet screening of soil aggregates and soil shear test. [Results] ① Vegetation restoration could improve the physical and chemical properties of fractured soil, but there were differences with changes in soil depth. Organic matter, sand content, and water stable aggregates (>0.25 mm) in the fissured soil of

收稿日期: 2020-10-05

修回日期: 2021-01-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“滇东岩溶高原云南松水源林产水功能恢复机理研究”(41661004), “典型斜坡非饱和带优先域及其降雨入渗机制研究”(41502340)

第一作者: 何停(1996—), 女(汉族), 贵州省盘州市人, 硕士研究生, 研究方向为喀斯特环境与水资源。Email: 1250782559@qq.com。

通讯作者: 范弢(1969—), 男(汉族), 江西省赣州市人, 教授, 博士, 主要从事喀斯特生态水文研究。Email: fantaojx@163.com。

two different vegetation communities decreased with increasing soil depth, while the clay content and water stable aggregates (<0.25 mm) increased with soil depth. The contents of sand particles (55.46%), organic matter (19.63 g/kg), and water stable aggregates (>0.25 mm, 76.51%) in cracked soil of a secondary forest of *P. yunnanensis* were more than *M. africanan* shrub (50.16%, 11.31 g/kg, 67.57%, respectively). The contents of silt (17.55%), clay (26.99%), and small water stable aggregates (23.49%) were more than *M. africanan* shrub (22.56%, 27.27%, 31.43%). ② The cohesion of fractured soil in both communities increased with the increasing water stable aggregates (>0.25 mm) ($p < 0.05$), and the friction angle of soil decreased with decreasing aggregates of sand, organic matter, and water stable aggregates (<0.25 mm) ($p < 0.05$). ③ The shear strength of the fissured soil in the two communities decreased with increasing soil depth, and the secondary forest of *P. yunnanensis* community was better than the shrub community in improving the shear strength of the shallow fissured soil, especially in the middle and deep fissured soil. The shear strength of the secondary forest of *P. yunnanensis* $>$ *M. africanan* shrub fissure. The difference in shear strength of the fissured soil in the two communities was very significant ($p < 0.01$). [Conclusion] In the rocky desertification region of the fault basin in Eastern Yunnan Province, the arbor community is more helpful in improving the physical and chemical properties of the middle and deep soil, improving soil shear strength, and alleviating the loss of shallow fissured soil.

Keywords: karst fissure; loss soil; soil physical and chemical properties; soil shear strength; Eastern Yunnan Province; vegetation restoration; karst faulted basin

滇东岩溶断陷盆地地区石漠化面积占滇东岩溶区总面积的 40.11%^[1], 重石漠化地区。其垂直裂隙发育, 丰富的降水和水文过程使其下伏基岩受到水化学作用, 逐渐形成地下岩溶管道系统, 一些紧密闭合的裂隙常被地表土壤或受到流水的侵蚀溶蚀残积物所填充, 在重力的作用下通过倾泻、蠕滑或塌陷的土壤被径流沿着地下管道发生垂直迁移, 使得土壤漏失成为土壤流失的重要途径, 也是造成喀斯特石漠化的主要原因^[2-6]。随着土层深度的加深, 浅层裂隙土壤黏聚力总体随土层深度不断增大, 土壤内摩擦角先增大后减小, 土壤抗剪强度减小^[7]。土壤抗剪强度是土体力学性质的一个重要指标, 土壤抗剪强度大, 则在外作用力下, 土壤抵抗径流的剪切破坏能力也就增加, 从而可以减缓土壤侵蚀及漏失的发生^[7-8], 因此研究土壤抗剪强度对减缓土壤漏失有重要意义。

喀斯特石漠化地区, 植被破坏、土壤渗漏严重, 植物—土壤系统恢复是喀斯特裂隙地区主要的问题^[8-9]。随着植被的逐渐恢复, 林下表层凋落物返还增多、根系含量日益发育, 改善土壤结构, 土壤漏失得到减缓^[10-14]。此外, 植被群落垂直分层有助于水土保持, 高大的乔木有助于截留降雨, 减缓雨水对土壤的溅蚀和淋溶, 乔林下植被对降雨能够形成二次缓冲带, 减轻林下土壤侵蚀的发生; 同时林下植被的根系增多, 能固结土壤, 减缓土壤沿裂隙土—石界面发生漏失, 从而有助于土壤恢复^[15-16]。浅层裂隙具有改良小生境、水分和养分积累的功能, 为表层植物的生长提供了生长所需的空间和养分。植被恢复有助于其

形成相对较好的“裂隙—土壤—植物”系统, 因而植被恢复改善理化性质的正效应在浅层裂隙更能得到突显。

喀斯特断陷盆地是滇东典型的地貌特征, 其复杂的地理环境要素和剧烈变化的“盆—山”地形, 导致植被立地条件差^[17]。云南松是滇东的主要恢复树种, 其深根系可以渗透到喀斯特裂隙中, 增加根系与土壤的接触面积, 扩大水分和养分吸收的来源, 改善土壤理化性质^[18], 但目前对云南松的研究主要集中在对表层土壤的改善作用, 减少降雨对表层土壤的侵蚀程度^[18-20], 云南松对浅层裂隙土壤是否具有相同的协同作用以及对土壤抗剪性能的机理尚未清楚。因此, 本文选择滇东海峰岩溶断陷盆地坡地区, 对比普遍发育的云南松次生林、小铁仔灌丛群落两类典型裂隙来探讨植被恢复对浅层裂隙土壤抗剪性能的影响, 以期对滇东岩溶断陷盆地石漠化坡地地区植被恢复改善土壤理化性质, 增强土壤抗剪性能, 减缓土壤漏失的治理措施提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省曲靖市沾益县西部海峰自然保护区(103°29′—103°39′E, 25°35′—25°57′N), 地处滇东高原北部, 是岩溶断陷盆地发育最典型的地区之一, 裂隙发育, 漏失严重。海拔 1 783~2 414 m, 相对高差 631 m, 境内东西宽 22 km, 南北长 41 km, 总面

积 27 846 hm²,属于亚热带高原季风气候类型,干湿季分明,全年平均气温 13.8~14℃,无霜期 256 d,年均日照时数 2 098 h,年降水量 1 073~1 089.7 mm。该区具有较好的森林植被类型,森林覆盖率 75.7%,云南松生林分布广泛(占 83.0%以上),具有完备的云南松群落演替序列,石灰岩灌丛占 3.4%。该区以红壤土类为主,约占总面积的 85%。

本研究选择裂隙比较发育的云南松(*Pinus yunnanensis*)次生林、小铁仔灌丛(*Myrsine africanan*)两个典型群落(表 1),其两个裂隙属于狭长型裂隙,云南松次生林裂隙露出总体长为 330 cm,小铁仔灌丛裂隙长 295 cm。小铁仔灌丛浅根系,其根系长约 20 cm,云南天然次生林属于深根系植被,枯落物总蓄积量 9.93 t/hm²,是小铁仔灌丛的 2.15 倍,云南松根系多,根系生物量总量为 18.91 t/hm²,小铁仔根系少,仅 4.06 t/hm²。

1.2 样品采集与测定

2019 年 5 月,在岩溶盆地海峰湿地的核心区兰石坡海子(103°35′—103°37′E,25°46′—25°48′N)岩溶小流域内建立云南松次生林、小铁仔灌丛两块典型

监测样地(20 m×20 m),根据两个群落裂隙根系的特征以及前期对土壤颗粒特点的认识,用剖面刀修整土壤剖面,每个裂隙以 40 cm 为一层,自下而上分层采集裂隙土壤样品,共 8 层(0—280 cm)。将土样装入自封袋中带回实验室,自然风干后,将土样中的植物落叶、残根、砾石、动物残体等挑出,用于机械组成、有机质、抗剪强度的测定。

土壤的机械组成试验步骤按照鲍氏比重计法^[21]的要求进行试验,采用国际制土壤颗粒分级标准将土壤颗粒分为黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.05~0.002 mm)、砂粒(2~0.05 mm)。有机质采用重铬酸钾容量法^[22]进行检测。

土壤团聚体水稳性采用湿筛方法进行,并将其分为>5,5~2,2~1,1~0.5,0.5~0.25 mm 以及<0.25 mm,共 6 个粒级。测定土壤抗剪强度所用仪器为南京土壤仪器厂 ZJ 型应变控制式直剪仪,试验操作参照《土工试验方法标准 GB/T50123-1999》的标准^[7]进行,采用 4 r/min 的速度以及 4 个竖向压力(100,200,300,400 kPa)条件下对相同含水率 30%的重塑土样进行直接剪切试验。

表 1 样地基本特征

| 裂隙样地 | 地理坐标 | 海拔/m | 平均树龄/a | 各土层根系生物量/(t·hm ⁻²) | | | |
|--------|---------------------------|---------|--------|--------------------------------|----------|----------|-----------|
| | | | | 0—10 cm | 10—20 cm | 20—30 cm | 30—200 cm |
| 云南松次生林 | 25°47′39″N 103°33′50″E | 1 990.8 | >50 | 5.52 | 6.20 | 6.00 | 1.19 |
| 小铁仔灌丛 | 25°46′33″N 103°34′04″E | 2 004.4 | 10 | 1.91 | 0.37 | 1.62 | 0.16 |

1.3 数据处理

根据直剪试验得到抗剪强度,利用库伦公式计算相关指标:

$$t = c + \sigma \tan \varphi$$

式中: τ 为土体抗剪强度; c 为黏聚力; σ 为作用在剪切面上的法向压力; φ 为内摩擦角。使用 Excel 2013 进行抗剪指标、土壤基本性质的数据处理,SPSS 21.0 软件进行数据统计、相关性、差异性分析,Origin 2018 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 两对比群落浅层裂隙土壤理化性质的变化特征

(1) 土壤颗粒。随着土层深度的加深,土壤砂粒含量都逐渐减少,黏粒含量逐渐增多,粉粒含量时增时减,规律不明显(图 1)。云南松次生林裂隙砂粒变化范围在 49.36%~58.22%之间,粉粒在 16.03%~

21.03%之间,黏粒在 23.92%~29.61%之间,小铁仔灌丛裂隙砂粒在 43.63%~58.70%之间,粉粒在 16.36%~25.86%之间,黏粒在 24.56%~30.86%之间,表明云南松次生林裂隙砂粒多于小铁仔灌丛裂隙,粉粒和黏粒相反。在 0—40 cm 土层内(图 2a),两对比群落裂隙土壤机械组成含量差异较小。在 40—240 cm 土层内(图 2b),随着土层深度的加深,两对比群落裂隙砂粒缓慢都减小,黏粒缓慢都增大,粉粒时增时减,但云南松次生林裂隙砂粒明显多于小铁仔灌丛裂隙,粉砂粒相反,黏粒差异不明显。在 240—280 cm 土层内(图 2c),随着土层深度的加深,两对比群落裂隙砂粒缓慢减少,粉粒、黏粒缓慢增多,云南松次生林裂隙砂粒多于小铁仔灌丛裂隙,黏粒、粉粒相反。两对比群落裂隙的砂粒、粉粒差异显著($p < 0.05$),黏粒差异性不显著($p > 0.05$);同一群落裂隙砂粒、黏粒、黏粒之间差异性极显著($p < 0.01$)(图 2d)。

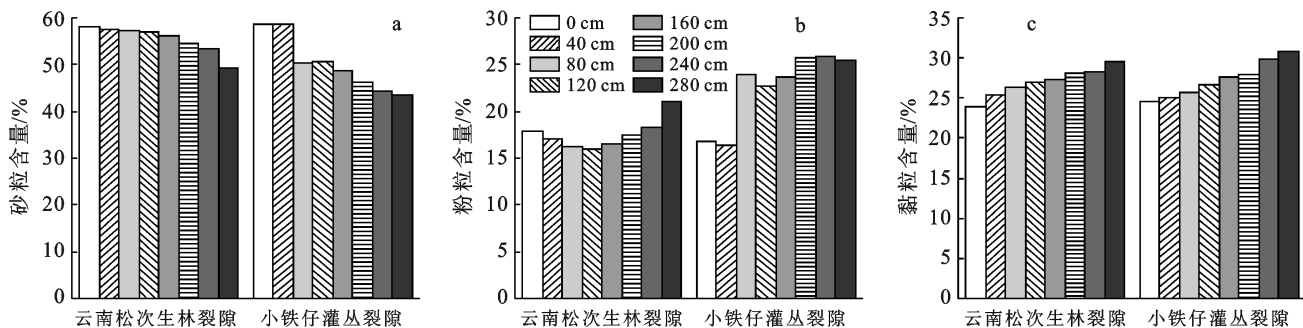
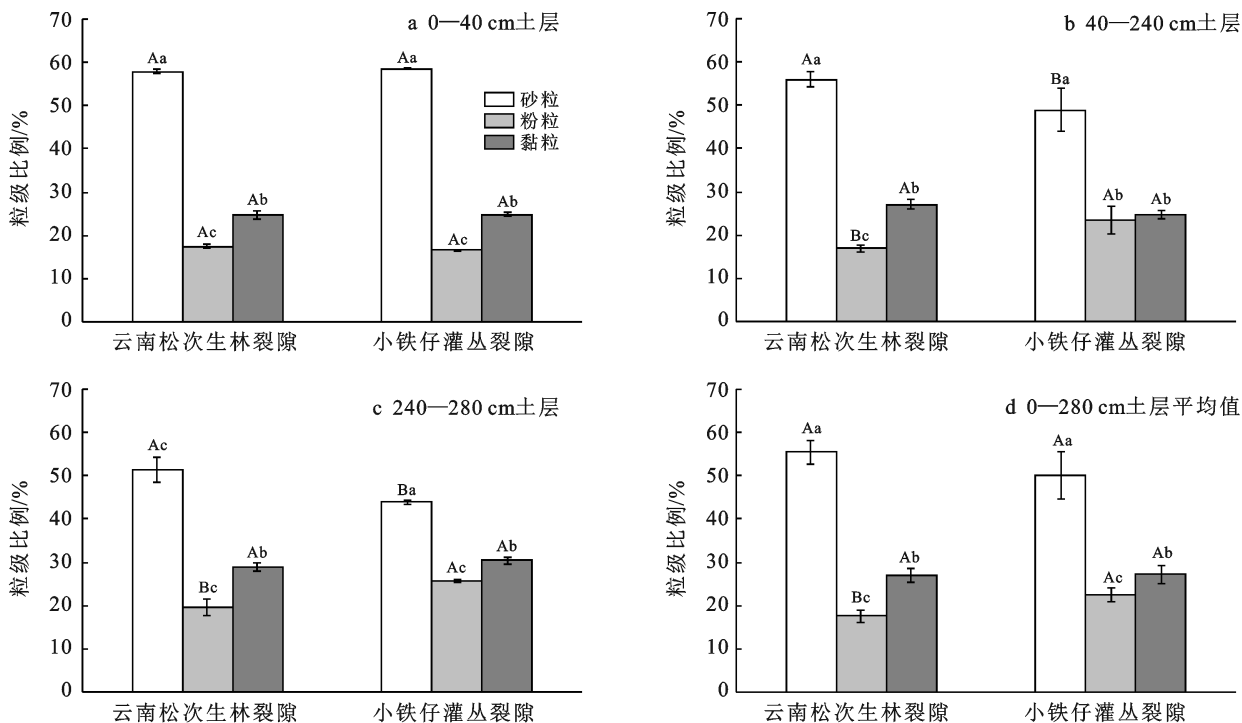


图 1 两对比群落浅层裂隙土壤机械组成的垂直变化



注:不同大写字母表示同一粒级不同群落差异显著($p < 0.05$),不同小写字母表示同一群落不同粒级差异显著($p < 0.05$)。

图 2 两对比群落浅层裂隙土壤机械组成差异性

(2) 土壤水稳性团聚体。云南松次生林裂隙水稳性大颗粒团聚体随土层深度加深而减小,水稳性细颗粒增多(图 3)。云南松次生林裂隙水稳性团聚体 > 0.25 mm 质量分数在 70.37%~85.91%之间,小铁仔灌

丛裂隙在 55.02%~83.78%之间,云南松次生林裂隙水稳性团聚体 < 0.25 mm 质量分数在 14.06%~29.63%之间,小铁仔灌丛裂隙在 16.22%~44.98%之间,表明云南松次生林裂隙大颗粒团聚体多于小铁仔灌丛裂隙。

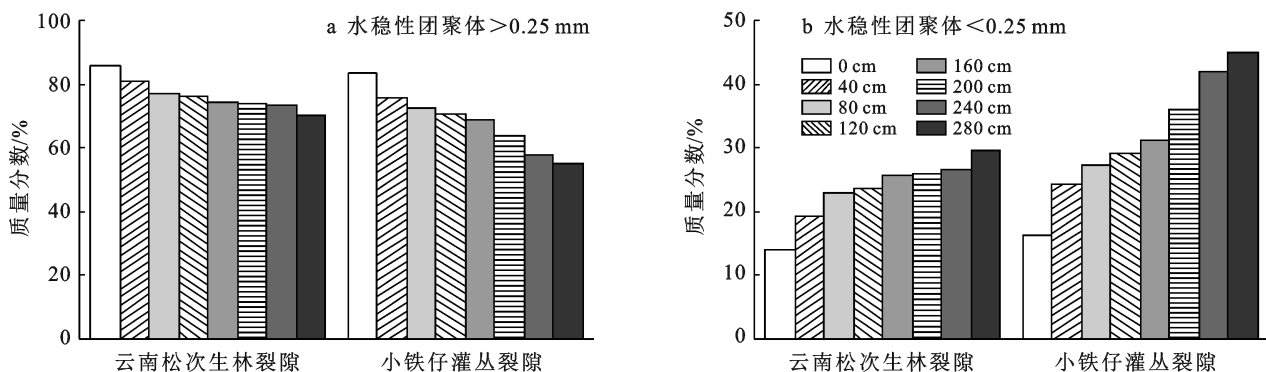
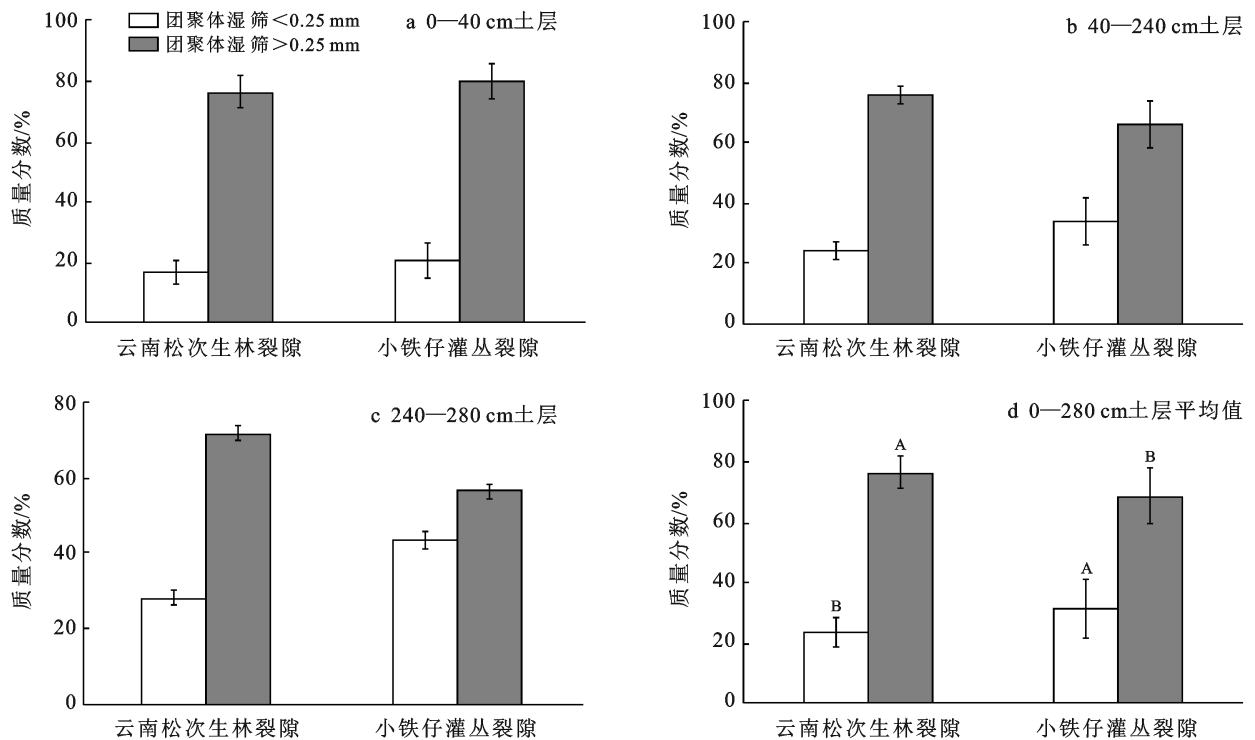


图 3 两对比群落浅层裂隙土壤水稳性团聚体垂直变化

在 0—40 cm 土层内(图 4a),两对比群落裂隙大颗粒团聚体快速减小,小颗粒团聚体快速增大,小铁仔灌丛裂隙大颗粒团聚体多于云南松次生林裂隙。在 40—240 cm 土层内(图 4b),随着土层深度的继续加深,两对比群落裂隙大颗粒团聚体减少,细颗粒团聚体逐渐增多,且云南松次生林裂隙大颗粒团聚体多

于小铁仔灌丛裂隙。在 240—280 cm 土层内(图 4c),两对比群落裂隙大颗粒团聚体缓慢减小,小颗粒团聚体都缓慢增大,云南松次生林裂隙大颗粒团聚体明显多于小铁仔石灰岩灌丛裂隙,小颗粒团聚体相反,两对比群落裂隙粒水稳性大颗粒团聚体和水稳性小颗粒团聚体都差异性显著($p < 0.05$)(图 4d)。



注:不同大写字母表示两对比群落土壤水稳性团聚体差异显著($p < 0.05$)。

图 4 两对比群落浅层裂隙土壤水稳性团聚体差异性

(3) 土壤有机质。云南松次生林和小铁仔灌丛裂隙的有机质都随着土层深度的加深而逐渐降低(图 5)。云南松次生林裂隙土壤有机质含量在 11.60~32.85 g/kg 之间;小铁仔灌丛含量在 6.15~21.69 g/kg 之间,表明云南松次生林裂隙的有机质多于小铁仔灌丛有机质。

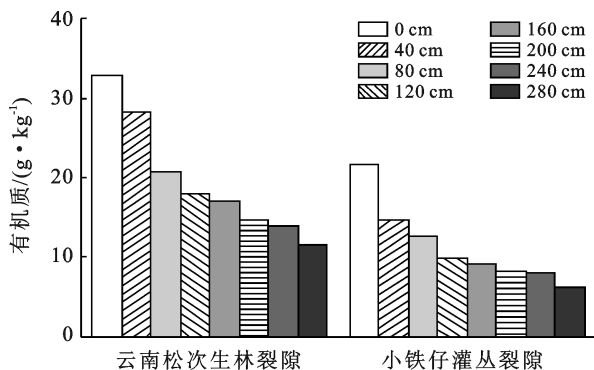


图 5 两对比群落浅层裂隙不同深度土壤有机质差异性

如图 6 所示,在 0—40 cm 土层内,随着土层深度的加深,两对比群落裂隙土壤有机质快速减小云南松次生林裂隙有机质相对较多。在 160—240 cm 土层内,随着土层深度继续加深,两对比群落裂隙有机质含量继续减小,但云南松有机质明显多于小铁仔灌丛裂隙。在 240—280 cm 土层内,两对比群落裂隙缓慢减小,云南松次生林裂隙有机质在各层明显都多于小铁仔灌丛。两对比群落裂隙土壤有机质存在显著性差异($p < 0.05$)。

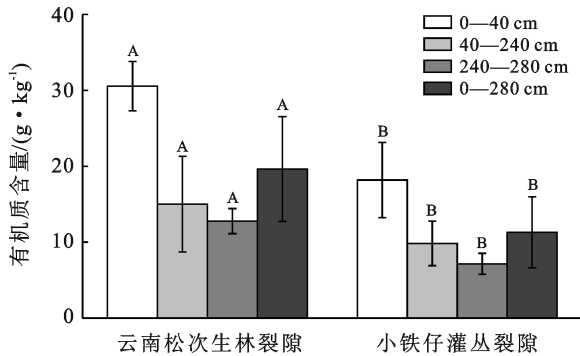
2.2 两对比群落浅层裂隙土壤抗剪强度垂直变化特征

2.2.1 土壤黏聚力的垂直变化特征

土壤黏聚力是由于颗粒间的胶结作用以及电子吸引微小颗粒所产生的^[23]。本研究结果显示云南松次生林、小铁仔灌丛裂隙土壤黏聚力都随着土层深度的加深而增大(图 7)。

云南松次生林裂隙土壤黏聚力在 8.00~28.32 kPa 之间,小铁仔灌丛裂隙的黏聚力在 15.70~45.50 kPa

之间,表明云南松次生林裂隙黏聚力小于小铁仔灌丛裂隙(图 8)。在 0—40 cm 土层内,两对比群落裂隙土壤黏聚力随着土层深度加深缓慢增大,小铁仔黏聚力更大。在 40—240 cm 土层内,随着土层深度的加深,云南松次生林裂隙土壤黏聚力先缓慢增大,后快速增大,小铁仔灌丛裂隙深缓慢增长。在 240—280 cm 土层内,两对比群落裂隙土壤黏聚力随着土层深度的继续加深缓慢增大。总之小铁仔灌丛裂隙土壤黏聚力在每一层都明显大于云南松次生林裂隙,两对比群落裂隙土壤黏聚力差异性极显著($p < 0.01$)。



注:不同大写字母表示两对比群落土壤有机质差异显著($p < 0.05$)。

图 6 两对比群落浅层裂隙不同深度土壤有机质差异性

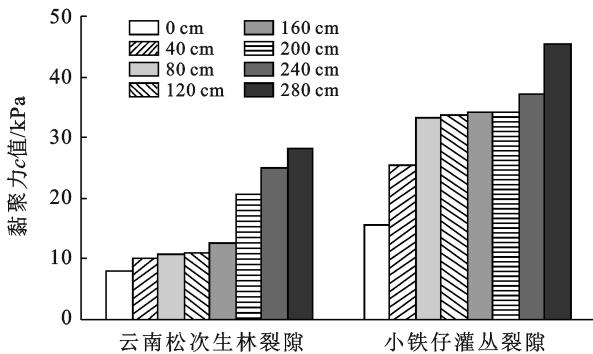
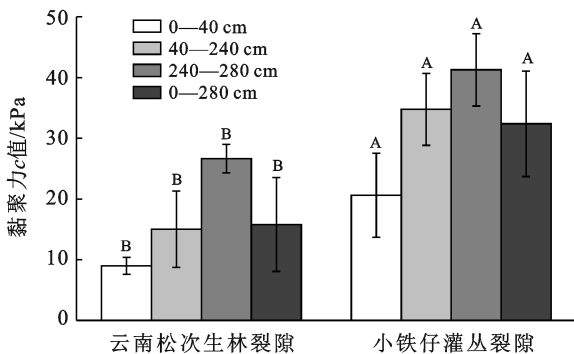


图 7 两对比群落浅层裂隙不同深度土壤黏聚力垂直变化



注:不同大写字母表示两对比群落土壤黏聚力差异显著($p < 0.05$)。

图 8 两对比群落浅层裂隙不同深度土壤黏聚力差异性

2.2.2 土壤内摩擦角的垂直变化特征 内摩擦角主要由于土粒间发生相对滑动和颗粒间咬合而产生的摩擦力形成^[24]。两对比群落裂隙土壤内摩擦角都随着土层深度的加深而缓慢减小(图 9)。云南松次生林裂隙土壤内摩擦角在 19.39°~28.80°之间,小铁仔灌丛土壤内摩擦角在 2.52°~17.97°之间,表明云南松次生林裂隙土壤内摩擦角大于小铁仔灌丛裂隙。

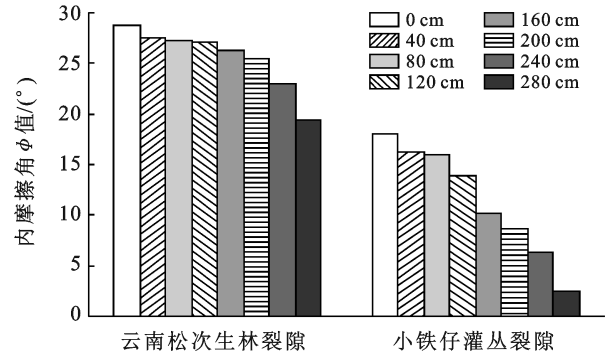
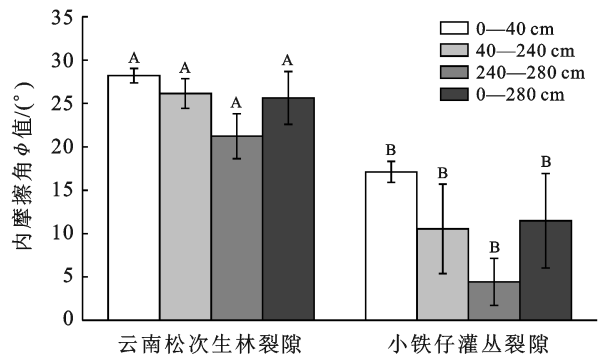


图 9 两对比群落浅层裂隙不同深度土壤内摩擦角垂直变化

云南松次生林裂隙土壤内摩擦角在每一层都明显大于小铁仔灌丛裂隙,但其减小速度随土层深度变化有差异(图 10)。在 0—40 cm 土层内,两对比群落裂隙土壤内摩擦角都缓慢减小,云南松次生林裂隙土壤内摩擦角相对较大;在 80—240 cm 土层内,随着土层深度的加深,云南松次生林裂隙土壤内摩擦角持续缓慢减小,小铁仔灌丛裂隙快速减小,云南松次生林裂隙土壤内摩擦角明显大于小铁仔灌丛裂隙;在 240—280 cm 土层内,两对比群落裂隙土壤内摩擦角都缓慢减小,云南松次生林裂隙土壤内摩擦角依然大于小铁仔灌丛裂隙。两对比群落裂隙土壤内摩擦角差异性显著($p < 0.01$)。



注:不同大写字母表示两对比群落土壤内摩擦角差异显著($p < 0.05$)。

图 10 两对比群落浅层裂隙不同深度土壤内摩擦角差异性

2.2.3 土壤抗剪强度的垂直变化特征 从垂向力 100 kPa 增至 400 kPa,云南松次生林、小铁仔灌丛裂隙土壤抗剪强度不断增大(图 11)。

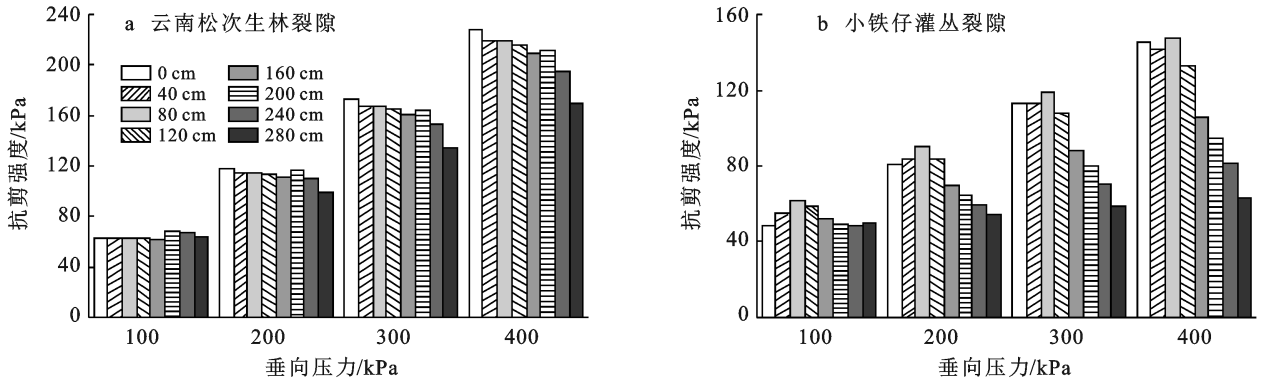
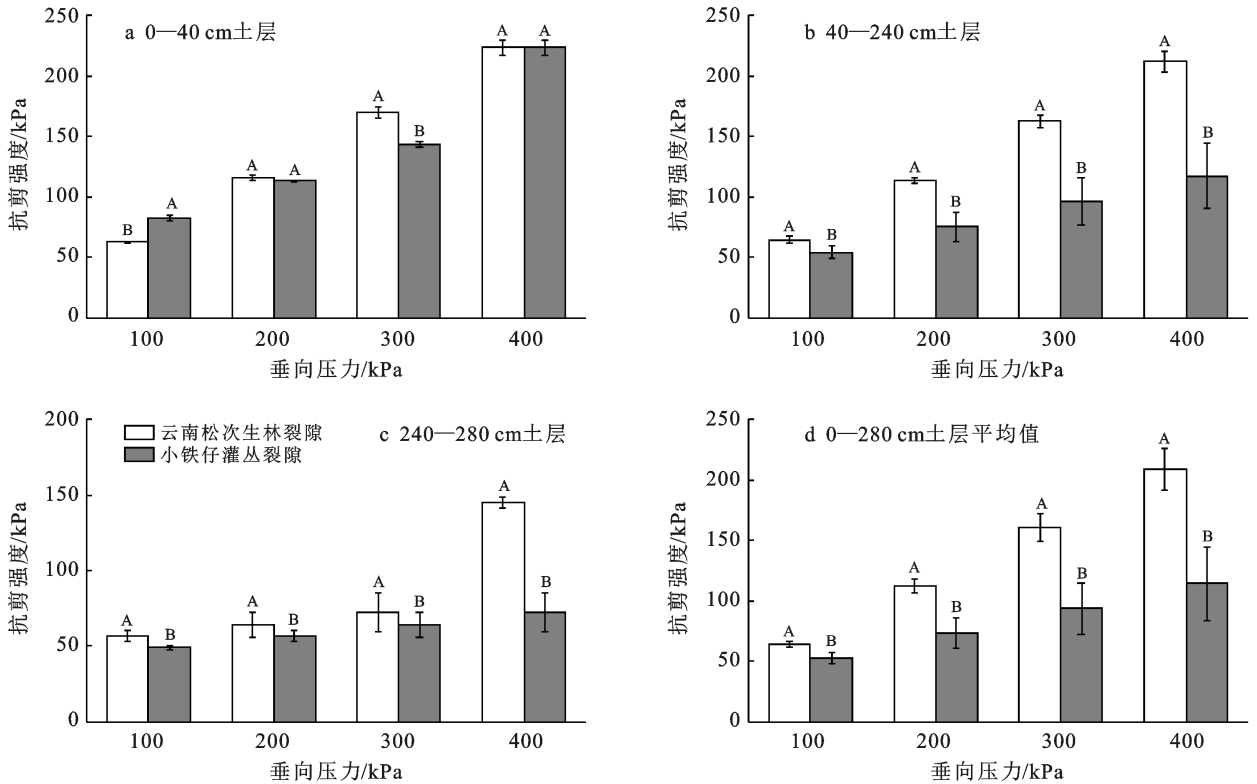


图 11 两对比群落浅层裂隙不同深度土壤抗剪强度垂直变化

在垂向力 200 kPa 下,在 0—40 cm 土层内,云南松次生林裂隙土壤抗剪强度缓慢减小,小铁仔灌丛裂隙土壤抗剪强度增大,两对比群落抗剪强度差异不明显;在 40—240 cm 土层内,随着土层深度的继续加深,小铁仔灌丛裂隙土壤抗剪强度快速减小,云南松次生林裂隙土壤抗剪强度时增时减,其抗剪强度大于小铁仔

灌丛裂隙。在 240—280 cm 土层内,两对比群落裂隙都缓慢减小,其云南松次生林抗剪强度依然大于小铁仔灌丛裂隙。总体来看,表层两对比群落抗剪强度差异不明显,但随着土层深度的加深,云南松次生林的抗剪强度在中层和深层都大于小铁仔灌丛抗剪强度,两对比群落裂隙土壤抗剪强度差异极显著($p < 0.01$)(图 12)。



注:不同大写字母表示两对比群落土壤抗剪强度差异显著($p < 0.05$)。

图 12 两对比群落浅层裂隙土壤抗剪强度差异性

2.3 两对比群落浅层裂隙土壤理化性质与抗剪强度指标的相关性分析

土壤抗剪强度的大小受多种因素的综合影响,本文选取有机质、砂粒、粉粒、黏粒、水稳性性团聚体与土壤在含水率为 30% 时的内摩擦角、黏聚力、土壤抗

剪强度(200 kPa)进行相关分析,分析表明土壤粉粒、小颗粒水稳性团聚体与土壤抗剪强度呈极显著负相关关系,土壤有机质、砂粒含量、大颗粒水稳性团聚体与土壤抗剪强度及土壤内摩擦角呈显著的正相关关系,与黏聚力呈极显著负相关关系(表 2)。

表 2 两对比群落浅层裂隙土壤抗剪强度与土壤理化性质的相关性分析

| 项目 | | 砂粒 | 粉粒 | 黏粒 | 有机质 | 团聚体 ($<0.25\text{ mm}$) | 团聚体 ($>0.25\text{ mm}$) |
|------|-------|----------|----------|---------|----------|------------------------------|------------------------------|
| 抗剪强度 | 相关系数 | 0.762** | -0.809** | -0.438 | 0.717** | -0.754** | 0.754** |
| | p 值 | 0.001 | 0.000 | 0.090 | 0.002 | 0.001 | 0.001 |
| 黏聚力 | 相关系数 | -0.901** | 0.891** | 0.647** | -0.889** | 0.870** | -0.870** |
| | p 值 | 0.000 | 0.000 | 0.007 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 内摩擦角 | 相关系数 | 0.845** | -0.872** | -0.537* | 0.797** | -0.832 | 0.832 |
| | p 值 | 0.000 | 0.000 | 0.032 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

注: * 为在置信度(双测)为 0.05 时相关性显著; ** 为在置信度(双测)为 0.01 时相关性显著。

3 讨论

3.1 两对比群落根系及土壤理化性质对浅层裂隙土壤抗剪强度的影响

3.1.1 土壤根系及土壤理化性质的差异性 通过分析发现,两对比群落裂隙表层土壤有机质含量高,土壤大颗粒团聚体多,但随着土层深度的加深,两对比群落的有机质、大颗粒团聚体都逐渐减少^[21,25-28],说明岩溶裂隙遵循土壤养分表层汇聚特性,因两对比群落凋落物在土壤表层比较多,枯枝落叶死亡后分解形成的腐殖质,增加了表层土壤有机质含量,造成土壤有机质有表聚现象,从而大颗粒团聚体比较多,所以二者在表层差异不大。但在滇东岩溶断陷盆的地质背景下,裂隙比较发育,因此随着土层深度的加深,两对比群落土壤有机质、砂粒、大颗粒水稳性团聚体等在中层沿裂隙岩—土界面流失而减少,细颗粒团聚体、黏粒在深层增多,形成“反序粒”结构,地表土壤出现粗颗粒化,底层土壤黏化的现象。云南松次生林属于二态根系植被,除岩—土界面外,其发育的深根系使得土壤水沿着根—土界面形成优先流,推动表层的土壤有机质(SOM)及大团聚体向中层和深层流动,其深根在生长过程或死亡过程中易形成孔道,导致云南松次生林裂隙土壤“筛滤效应”强于小铁仔灌丛裂隙,同时云南松次生林裂隙凋落物多、深根系生物量多,其总根系生物量为 18.91 t/hm^2 ,约是小铁仔灌丛裂隙根系生物量的 5 倍,其中云南松粗根生物量占整个根系生物量的 64.8%,在微生物活动频繁分解下,为土壤提供了大量的营养物质,使得有机质、砂粒、大颗粒水稳性团聚体都多于小铁仔灌丛裂隙,土壤性质相对较好,结构稳定。

3.1.2 植被根系及土壤基本性质对土壤抗剪强度的影响 土壤抗剪强度的大小主要来源于土粒颗粒之间剪切过程的滑动摩擦以及嵌入产生的咬合力和来源黏粒的胶结作用的黏聚力^[29],因而植被根系及土壤基本性质对土壤抗剪强度的影响来源于对土壤黏聚

力和土壤内摩擦角的影响。通过数据分析发现,随着土层深度的加深,两对比群落土壤抗剪强度都逐渐减小,说明虽然滇东岩溶断陷盆地有表层集聚养分的功能,但其本身性质导致地下裂隙纵横,土壤渗漏严重,因此两对比群落裂隙土壤砂粒、有机质、大颗粒团聚体随着土层深度的加深都减少,土壤黏粒小颗粒团聚体都增多。黏粒和小颗粒团聚体的增加,降低了土壤颗粒间的粗糙度,减少了土粒间的镶嵌和锁套能力,土壤内摩擦角减小;有机质降低,土壤密度增大,土壤间的距离减小,加上土壤黏粒、小颗粒团聚体含量增多,单位面积上土粒的接触点多,黏结力增强,土壤黏聚力增大^[7,30-31],两对比群落裂隙因土壤颗粒间的滑动摩擦力以及嵌入产生的咬合力占主导,导致土壤抗剪整体减小。

两对比群落裂隙表层都有汇聚功能,故而土壤抗剪强度在表层差异不明显。随着土层深度的加深,土壤渗漏严重,土壤沿着裂隙土—石界面流失,云南松发育的深根系残体为中层和深层裂隙土壤提供土壤有机碳(SOC),但沿根—土界面的土壤水优先流也带动 SOC 及大颗粒团聚体的下移,导致沿土壤剖面中层和深层云南松次生林裂隙的砂粒、大颗粒团聚体、有机质多于小铁仔灌丛裂隙,土壤抗剪强度大于小铁仔灌丛裂隙。此外,相比小铁仔灌丛群落,云南松的侧根和主根明显比灌木和草本植物的粗、深,因此,根系通过牵引力和竖向锚定穿插、缠绕在土壤中,土体在更深更广的范围内固结,使得根系与土壤颗粒间咬合力增大,加上云南松次生林裂隙土壤砂粒、大颗粒团聚体相对较多,粗糙的表面及稳定的结构会引起颗粒间镶嵌和锁套能力增大,土粒间的摩擦力增强,内摩擦角大^[18,20],导致云南松次生林裂隙土壤抗剪强度在中层和深层明显大于小铁仔灌丛裂隙。

3.2 两对比群落土壤抗剪强度对浅层裂隙土壤漏失的影响

土体中的应力在外作用力下会发生变化,当剪应力超过土体的抗剪强度时,土体会沿其中一个裂缝面

滑动,土壤整体稳定性丧失^[32],土壤易流失。土壤抗剪强度越大,稳定性越强,反之土壤抗剪性能越差^[29-30]。随着土层深度的加深,土壤养分、水分、颗粒等会沿着裂隙岩—土界面、根—土界面流失而减少,理化性质随深度的加深而变差,导致两对比群落裂隙土壤抗剪强度随深度的加深都减小,其减缓土壤漏失的能力随土层深度的加深而减弱。但两对比群落在垂向力不断增大时,其抗剪强度都增大,说明两对比群落都有助于提高土壤抗剪强度,在外力作用下,两对比群落浅层裂隙土壤不易随着岩土界面或根土复合界面发生土壤漏失。此外,云南松次生林大颗粒团聚体多,结构稳定,垂直深根系的“加筋”作用导致云南松林群落在提升浅层裂隙土壤抗剪性能上要优于灌丛群落,尤其在提升中层和深层裂隙土壤抗剪强度更突出,更有助于减缓裂隙土壤漏失。裂隙具有汇聚养分的功能,成为了滇东岩溶断陷盆地植被生长的重要小生境,因此在以后可以加强对不同群落下裂隙土壤的理化性质及其抗剪性能机理的研究,进一步提升对生物工程增强土壤抗剪强度,缓解裂隙土壤漏失机理的认识。

4 结论

(1) 云南松天然次生林、小铁仔灌丛裂隙土壤黏聚力都随着土壤黏粒、细颗粒水稳性团聚体的增多而增大($p < 0.05$),土壤内摩擦角随着砂粒、粗颗粒水稳性团聚体、有机质的减少而减小($p < 0.05$),土壤抗剪强度总体逐渐减小。因两对比群落土壤基本性质差异显著($p < 0.05$),导致土壤抗剪强度差异极其显著($p < 0.01$)。

(2) 云南松林群落、灌丛群落都具有改善土壤理化性质,提升土壤抗剪强度的作用,但灌丛群落提升土壤抗剪强度作用体现在表层,云南松林群落更有助于提升浅层裂隙中层和深层的土壤抗剪强度。

(3) 在滇东岩溶断陷盆地,裂隙发育的立地条件下,可种植云南松等二态根系植被提高土壤抗剪性能,逆转滇东岩溶断陷盆地坡地裂隙地区加剧的石漠化态势。

[参 考 文 献]

[1] 王宇,张贵.滇东岩溶石山地区石漠化特征及成因[J].地球科学进展,2003,18(6):933-938.

[2] Worthington S R H. Diagnostic hydrogeologic characteristics of a Karst aquifer(Kentucky, USA) [J]. Hydrogeology Journal, 2009,17(7):1665-1678.

[3] Fackrell J K, Glenn C R, Thomas D, et al. Stable isotopes of precipitation and groundwater provide new insight into groundwater recharge and flow in a structurally complex hydrogeologic system: West Hawai'i, USA

[J]. Hydrogeology Journal, 2020,28(4):1191-1207.

- [4] Wang Jianxiu, Zou Baoping, Liu Yan, et al. Erosion-creep-collapse mechanism of underground soil loss for the karst rocky desertification in Chenqi village, Puding County, Guizhou, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2014,72(8):2751-2764.
- [5] Zhang Xinbao, Bai Xiaoyong, He Xiubin. Soil creeping in the weathering crust of carbonate rocks and underground soil losses in the Karst mountain areas of Southwest China [J]. Carbonates and Evaporites, 2011,26(2):149-153.
- [6] Fu Z Y, Chen H S, Zhang W, et al. Subsurface flow in a soil-mantled subtropical dolomite karst slope: A field rainfall simulation study [J]. Geomorphology, 2015,250:1-14.
- [7] Zhou Jie, Tang Yiqun, Yang Ping, et al. Inference of creep mechanism in underground soil loss of karst conduits (I): Conceptual model [J]. Natural Hazards, 2012,62(3):1191-1215.
- [8] 陈晨,杨苑君,陈奇伯,等.典型石漠化区土壤理化性质对其抗剪性能的影响[J].西部林业科学,2020,49(2):91-98.
- [9] Dai Quanhong, Peng Xudong, Zhao Longshan, et al. Effects of underground pore fissures on soil erosion and sediment yield on karst slopes[J]. Land Degradation & Development, 2017,28(7):1922-1932.
- [10] 高华端,孙泉忠,袁勇.喀斯特地区不同土地利用类型土壤侵蚀特征研究[J].水土保持通报,2010,30(2):92-96.
- [11] Fattet M, Fu Y, Ghestem M, et al. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength [J]. Catena, 2011,87(1):60-69.
- [12] 胡芳,杜虎,曾馥平,等.典型喀斯特峰丛洼地不同植被恢复对土壤养分含量和微生物多样性的影响[J].生态学报,2018,38(6):2170-2179.
- [13] 胡阳,邓艳,蒋忠诚,等.典型岩溶山区植被恢复对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J].水土保持通报,2015,35(1):61-67.
- [14] 冯娜,刘冬冬,赵荣存,等.岩溶山地植被恢复中碳酸盐岩红土入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报,2019,33(6):162-169.
- [15] 张海东,于东升,董林林,等.侵蚀红壤恢复区植被垂直结构对土壤恢复特征的影响[J].土壤,2014,46(6):1142-1148.
- [16] 吕文凯,周金星,万龙,关颖慧,等.滇东岩溶断陷盆地水资源脆弱性评价[J].地球学报,2020,12(17):1-11.
- [17] 李强,蒲俊兵,黄妮,等.断陷盆地生态环境地质分异及石漠化演变机理的研究途径[J].地球科学进展,2017,32(9):899-907.

- 18(4):125-133.
- [19] 孙庆艳,余新晓,杨新兵,等.密云水库集水区防护林不同树种林冠截留研究[J].中国水土保持科学,2009,7(3):76-81.
- [20] 黄团冲,贺康宁,王先棒.青海大通白桦林冠层降雨再分配与冠层结构关系研究[J].西北林学院学报,2018,33(3):1-6.
- [21] 曹光秀,王克勤,赵洋毅,等.中亚热带地区常绿阔叶林地表径流和产沙影响机制[J].水土保持学报,2018,32(4):30-36.
- [22] 秦富仓,余新晓,张满良,等.植被对小流域汇流及侵蚀产沙影响研究[J].干旱区资源与环境,2005,19(5):165-168.
- [23] 展小云,郭明航,赵军,等.基于粒子成像瞬态测量技术的雨滴微物理特性及降雨动能研究[J].农业工程学报,2018,34(2):107-113.
- [24] Song Zhengshan, Steffen S, Zhu Panpan, et al. Spatial distribution of LAI and its relationship with through-fall kinetic energy of common tree species in a Chinese subtropical forest plantation [J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 425(5):189-195.
- [25] 王恒松,张芳美.黔西北乡土植物篱对典型石漠化区石灰土侵蚀动力学过程的调控[J].水土保持学报,2019,33(4):16-23,80.
- [26] 赵赫,文志,刘艳秋,等.典型热带森林生态系统林冠穿透雨特征及影响因素[J].生态科学,2020,39(4):74-80.
- [27] 侯沛轩,孙佳美,余新晓,等.模拟降雨条件下植被调控坡面水沙输出过程研究[J].土壤,2016,48(4):819-823.
- [28] 国家林业局调查规划设计院. GB/T26424-2010 森林资源规划调查技术规程 中国标准书号[S].北京:中国标准出版社,2011.
- [29] 国家林业局调查规划设计院,黑龙江省林业监测规划院. LY/T 2908—2017 主要树种与龄组划分[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [30] 张泽铭,张翠翠,侯红运,等.《降水量等级》(GB/T 28592—2012)应用实例[J].现代农业科技,2016(19):223-226.
- [31] 李桂静,周金星,崔明,等.南方红壤区马尾松林冠对降雨雨滴特性的影响[J].北京林业大学学报,2015,37(12):85-91.
- [32] 史宇,余新晓,张建辉,等.北京山区侧柏林冠层对降雨动力学特征的影响[J].生态学报,2013,33(24):7898-7907.
- [33] Geizler C, Kühna P, Bohnke M, et al. Splash erosion potential under tree canopies in subtropical SE China [J]. *Catena*, 2012, 91(10):85-93.
- [34] 康文星,邓湘雯,赵仲辉.林冠截留在杉木林生态系统能量转换过程中的作用[J].林业科学,2007,43(2):15-20.
- [35] 吴光艳,成婧,等.黄土高原南部人工林林冠对降雨特征的影响分析[J].水土保持研究,2011,18(4):32-35,42.

(上接第39页)

- [18] 毛蓉,孟广涛,周跃.云南省金沙江流域水土流失防治对策研究[J].水土保持研究,2006,13(1):184-185.
- [19] Lukina N V, Orlova M A, Bakhmet O N, et al. The influence of vegetation on the forest soil properties in the Republic of Karelia [J]. *Eurasian Soil Science*, 2019, 52(7):793-807.
- [20] 王震洪,段昌群,文传浩,等.滇中3种人工林群落控制土壤侵蚀和改良土壤效应[J].水土保持通报,2001,21(2):23-27.
- [21] 李焱秋,戴全厚,任青青,等.喀斯特浅层裂隙土壤垂向渗透性及影响因素[J].水土保持学报,2020,34(3):150-155.
- [22] 张晓勉,张金池,王云南,等.钱塘江源头主要植被类型土壤抗剪强度研究[J].水土保持研究,2015,22(4):79-84.
- [23] 王楠,赵友朋,郭晓平,等.土壤含水率和干容重对不同植被类型边坡土壤抗剪强度的影响[J].水土保持通报,2018,38(6):88-94.
- [24] 李想,王瑄,盛世博,等.不同土地利用方式土壤抗剪强度及其影响因子分析[J].水土保持学报,2016,30(5):102-106.
- [25] 吴丽萍,陈洪松,付智勇,等.喀斯特岩溶裂隙对地下径流和氮素垂直渗漏的影响[J].水土保持学报,2017,31(5):64-71.
- [26] Yan Youjin, Dai Quanhou, Wang Xiangdong, et al. Response of shallow karst fissure soil quality to secondary succession in a degraded karst area of Southwestern China [J]. *Geoderma*, 2019, 348:76-85.
- [27] 雷俐,魏兴琥,徐喜珍,等.粤北岩溶山地土壤垂直渗漏与粒度变化特征[J].地理研究,2013,32(12):2204-2214.
- [28] 杨宇琼,戴全厚,严友进,等.黔中喀斯特坡地浅层裂隙土壤机械组成对降雨的响应[J].应用生态学报,2019,30(2):545-552.
- [29] 徐宗恒,黄丽苹,杨正辉,等.不同根系含量对山原红壤抗剪强度的影响[J].水土保持通报,2019,39(5):54-59.
- [30] 张晓明,王玉杰,夏一平,等.重庆缙云山典型植被原状土抗剪强度的灰色关联度分析与评价[J].水土保持研究,2007,14(2):145-147.
- [31] Su Lijun, Zhou Wanhuan, Chen Weibin, et al. Effects of relative roughness and mean particle size on the shear strength of sand-steel interface [J]. *Measurement*, 2018, 122:339-346.
- [32] 孙泉忠,郭菁,王钰,等.岩溶地区不同利用方式土壤土力学特性垂直变化特征[J].中国岩溶,2013,32(3):287-291.