

喀斯特坡面生物结皮发育对土壤抗蚀性能的影响

张思琪, 张科利, 马芊红

(北京师范大学地理科学学部, 北京 100875)

摘要: 西南喀斯特地区普遍发育的生物结皮, 对土壤侵蚀有显著的抑制作用。以贵州喀斯特坡面不同退耕年限地块(0, 3, 5, 8, 11 年)生物结皮为研究对象, 对不同流量水平(0.2, 0.3, 0.4, 0.5 L/s)和坡度(5°, 12°, 17°, 23°)条件下生物结皮对土壤抗蚀性能的影响机制进行研究。结果表明: (1) 生物结皮发育能够促进土壤颗粒胶结, 增强土壤团聚体稳定性, 改善土壤结构, 提高土壤持水和透水能力。 (2) 生物结皮发育可增强土壤抗崩解和抗剪切能力, 与去除结皮处理相比, 结皮存在时的土壤抗崩解和抗剪切能力分别提高 24.83%~46.62% 和 25.77%~37.73%。 (3) 发育年限内(3~11 年)结皮层抗拉力变化范围为 1.95~5.76 N, 随着生物结皮发育年限增加, 结皮层结构越趋稳定, 其抵抗破坏的能力也越强。 (4) 生物结皮可明显提高土壤抗冲性能, 且受流量和坡度的双重制约, 流量和坡度都存在临界值, 分别为 0.4 L/s 和 17°, 超过临界值后, 其保护作用显著减弱。研究结果对于喀斯特地区准确估算土壤流失和生态恢复建设正确评价具有重要意义。

关键词: 喀斯特; 生物结皮; 土壤抗蚀性; 抗崩解; 抗剪切力

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)05-0064-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2023.05.008

Effects of Biological Soil Crusts Development on Soil Anti-erodibility on Karst Slope

ZHANG Siqi, ZHANG Keli, MA Qianhong

(Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract: Biological soil crusts (biocrusts), which develop commonly in the southwestern karst regions, have a significant effect on reducing soil erosion. To explore the effect of biocrusts on soil anti-erodibility, biocrusts with different rehabilitation ages (0, 3, 5, 8, 11 a) were studied on a karst hillslope in Guizhou, and different levels of flow discharge (0.2, 0.3, 0.4, 0.5 L/s) and slope gradients (5°, 12°, 17°, 23°) were designed. The results showed that: (1) Biocrusts on karst hillslopes could promote soil particles cementation, strengthen soil aggregate stability, improve soil structure, and enhance soil water holding capacity and permeability. (2) The biocrusts greatly enhanced the anti-disintegration and anti-shear strength of soil. Compared with the treatment of removing biocrusts, the soil's anti-disintegration and anti-shear strength of the treatment of retained biocrusts increased by 24.83%~46.62% and 25.77%~37.73%, respectively. (3) The tensile strength of the biocrust layer ranged from 1.95 to 5.76 N during the rehabilitation ages (3~11 a). As the development age of biocrusts increased, the structure of the biocrust layer became more stable, and its ability to resist damage became stronger. (4) The biocrusts could also significantly improve the soil anti-scour capacity, which was regulated by flow discharge and slope gradient. The critical value for flow discharge and slope gradient was 0.4 L/s and 17°, respectively, beyond which the protective effect of biocrusts was significantly weakened. These results were of great significance for accurately estimating soil erosion and correctly evaluating ecological restoration construction in karst regions.

Keywords: karst; biological soil crusts; soil anti-erodibility; anti-disintegration; anti-shear strength

收稿日期: 2023-02-09

资助项目: 国家自然科学基金重点项目(41730748)

第一作者: 张思琪(1997—), 女, 博士研究生, 主要从事喀斯特坡面土壤侵蚀研究。E-mail: zhangsiqi@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 张科利(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: keli@bnu.edu.cn

生物土壤结皮是指由细菌、真菌、蓝绿藻、地衣和苔藓植物与土壤形成的有机复合体^[1]。作为生态系统恢复与重建的拓殖先锋,生物结皮广泛发育于各种退化生态系统,是近地表系统的重要组成成分,对区域生态水文和侵蚀过程具有重要影响^[2-3]。20 世纪 80 年代,国内学者开始在西北干旱区和半干旱区开展大量生物结皮对土壤抗蚀性影响的研究表明,生物结皮发育对土壤抗蚀性的影响表现为内外双重机制。内在机制主要表现为生物结皮发育对土壤理化性质的影响。有研究^[4-5]表明,生物结皮发育可以增加土壤团聚体稳定性和有机质含量,改善土壤结构和渗透性能^[6],提高土壤抗剪切强度^[7]。外在机制则主要表现为生物结皮覆盖能够有效削减降雨动能,改变地表微地形,降低雨滴击溅侵蚀和径流冲刷强度^[8-9]。

值得关注的是,近年来国家大力推进“退耕还林”石漠化生态治理工程的实施,加上喀斯特地区良好的水热条件,生物结皮广泛发育于各类岩溶生境中^[10]。生物结皮的存在不仅可以抑制土壤侵蚀强度,而且也增加喀斯特地区土壤侵蚀量估算的不确定性。尽管在喀斯特地区,已有很多生物结皮相关的研究证实生物结皮发育有效降低喀斯特石漠化地区土壤 pH,改善土壤养分状况,提高土壤有机质含量^[11-12],增强土壤抗蚀能力^[13-15],提升土地承载能力^[16]。然而,生物结皮对土壤抗蚀性能的影响研究还比较缺乏,对喀斯特地区生物结皮抗蚀性能的机理尚不明确。本文选择贵州典型喀斯特坡面生物结皮为研究对象,通过野外采样、冲刷试验、室内静水崩解试验及土壤性质测定,探究喀斯特坡面生物结皮发育对土壤抗蚀性能的影响,研究结论对于喀斯特地区科学估算土壤流失和生态恢复建设具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省遵义市汧洋水小流域(106°39′59″E,27°36′20″N)。气候类型为中亚热带湿润季风气候,年平均气温 14.6℃,年平均降水量 1 024 mm,主要集中在 5—9 月,约占全年降水的 67%,年均相对湿度约 82%。地貌类型属喀斯特高原地貌类型区,平均海拔为 900~1 050 m,土壤类型为黄壤,结皮类型以苔藓结皮为主,其平均盖度约为 30%。主要植被类型包括白茅(*Imperata cylindrica*)、马兰(*Kalimeris indica*)、飞蓬(*Erigeron acris*)和鬼针(*Bidens pilosa*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与土壤性质测定 在前期调研的基础上,于 2022 年 5—7 月在贵州省遵义市汧洋水小流域研究坡面选取 4 个不同退耕年限(3,5,8,11 年)样

地以种植玉米的耕地为对照,在每个退耕地块内随机设置 3 个调查样方,样方大小为 25 cm×25 cm,调查地上植被及地表结皮发育状况(表 1)。每个样方内用钢尺随机揭起小块的生物结皮,借助游标卡尺测定结皮厚度,此过程重复 5 次,以调查样方内生物结皮出现的次数占总调查数的百分比作为结皮盖度。使用十字板剪切力仪测定土壤抗剪强度。测定前,先用喷壶对采样点进行湿润,使其达到饱和含水量。每个调查样方先测定保留结皮时 0—5 cm 的土壤抗剪切力,去除结皮后再次测定,每种处理测定 5 次重复。结皮层抗拉力使用数显拉力计进行测定,先将数显拉力计下方挂钩伸入结皮层,调整位置使挂钩与结皮层方向相互垂直,然后将拉力计缓缓向上提起,生物结皮层被破坏瞬间拉力计显示的读数即为结皮层抗拉力,每个样方重复测定 5 次。

表 1 不同退耕年限地块基本概况

退耕 年限/a	主要植被 类型	植被 高度/cm	结皮 盖度/%	结皮 厚度/mm
0	玉米	150.08±2.14	9.50±2.06c	1.20±1.22c
3	白茅、蒿类	69.28±10.56	91.00±4.14a	8.33±2.22b
5	鬼针、蒿类	56.09±12.89	82.33±2.05b	7.01±3.04b
8	飞蓬、白茅	81.42±19.58	93.33±4.71a	9.37±3.07b
11	马兰、蒿类	57.72±6.64	96.00±4.32a	14.68±2.30a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同退耕年限地块间差异显著($p<0.05$)。下同。

测量结束后,用铲子在表层取 5 cm×5 cm×5 cm 大小的土样直接装入饭盒带回实验室用作崩解试样,试样设置保留结皮和去除结皮 2 种处理。去除结皮时,用铲子轻轻地移除结皮层,尽量避免对地表造成扰动。在每个样地按照“S”形 5 点采样法采集多点混合土样,带回室内风干后测定其土壤粒径组成、有机质含量及水稳性团聚体。用标准环刀采集各结皮发育年限地块表层原状土样(0—5 cm),带回室内测定其土壤容重、孔隙度及饱和导水率,每个样地 3 个重复。为了避免植被根系的影响,试样采集及指标测定均在植株间隙进行。

1.2.2 静水崩解试验 土壤崩解是指在静水状态下土壤发生破裂崩解塌落的一种现象,是发生降雨侵蚀的先决条件,可作为评价土壤抗蚀性能的重要指标之一^[17]。静水崩解试验在采用由拉力计、笔记本电脑、电子秤、水桶、筛子(孔径 10 mm)等组成的自制土壤静水崩解装置上进行(图 1)。试验前将崩解试样放置在托盘中,加入 1 cm 左右的水使试样吸水饱和,以消除土壤含水量的差异。将吸水饱和的试样放置于筛子中心位置,悬挂于数显拉力计下方,然后轻轻地将筛子放入水桶中至试样上方距水面约 5 cm 的位置。此时,立刻记录数显拉力计(艾德堡 SH100N,精

度 0.01 N) 读数, 并将电子秤(精度 0.01 g)置零后开始计时。试验过程中, 受水分子作用力发生崩解的土粒通过筛孔掉落到水桶中, 拉力计用于记录崩解试样重力与

浮力的差值变化情况, 电子天平用于记录发生崩解的土样质量变化情况, 试验过程中每隔 3 min 读取并记录拉力计和电子秤读数, 每个试样观测时长为 3 h。

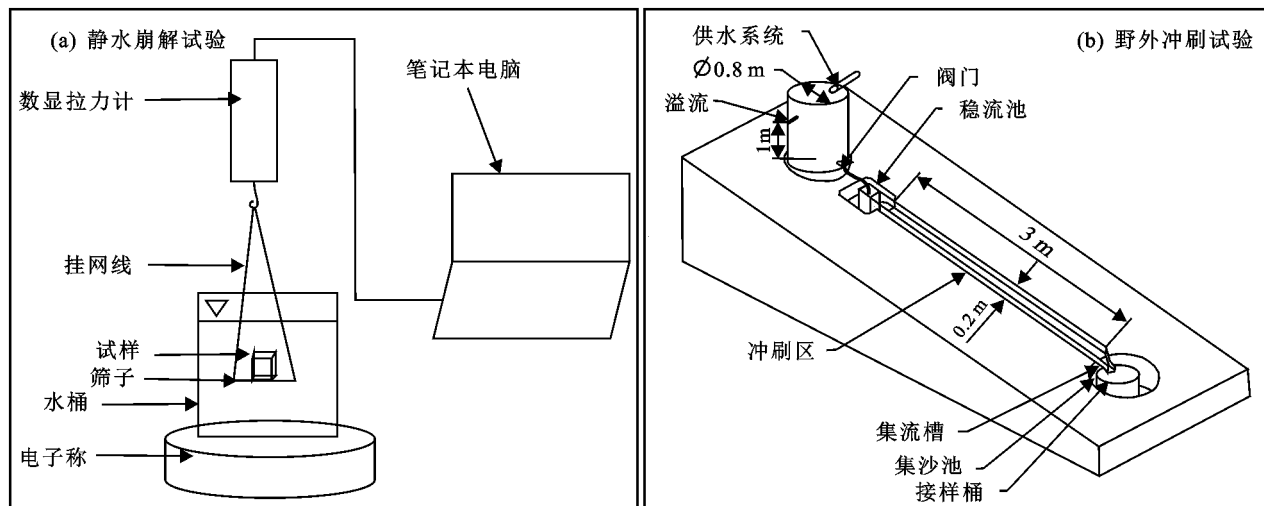


图 1 试验过程示意

1.2.3 冲刷试验 在遵义许洋水小流域研究坡面开展原位冲刷试验, 试验过程中对样地进行保留结皮和去除结皮 2 种处理。试验小区长 2.8 m、宽 0.2 m, 由不锈钢板围合而成, 将钢板垂直插入土中 0.15 m, 上方距离地面 0.15 m, 钢板连接处打上玻璃胶以保证其封闭性, 在集流槽下方放置接样桶收集径流泥沙样。每场试验前, 用喷壶均匀湿润地表至基本饱和, 以保证初始土壤含水量相同。试验设置 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 L/s 4 个冲刷流量和 5°, 12°, 17°, 23° 4 个坡度条件。为了避免地形因素带来的误差, 每场试验时长控制在 11~13 min。试验结束后, 将浑水样品收集带回实验室静置 24 h, 倒掉上清液, 将沉积的泥沙转入饭盒中, 在 105 °C 的烘箱中烘干 24 h, 称重并计算含沙量(g/L)。

1.3 数据处理

土壤团聚体稳定性通过干筛法和湿筛法进行测定, 团聚体平均质量直径(mean weight diameter, MWD)计算公式为:

$$MWD = \sum_{i=1}^n (x_i \times W_{ji}) \quad (1)$$

式中: MWD 为团聚体平均质量粒径(mm); x_i 为套筛中 2 个相邻筛子直径的平均值(mm); W_{ji} 为第 i 个筛子上团聚体的质量百分数; n 为筛子编号。

>0.25 mm 土壤团聚体是维持土壤架构的重要基础, 其在土壤中的含量越高, 则表示土壤结构越稳定^[18]。>0.25 mm 团聚体结构破坏率用来表示团聚体受破坏的容易程度, 计算公式为:

$$PAD_{>0.25 \text{ mm}} = \frac{>0.25 \text{ mm 团聚体含量(干筛-湿筛)}}{>0.25 \text{ mm 团聚体含量(干筛)}} \times 100\% \quad (2)$$

生物结皮土壤抗冲系数用来表征生物结皮对土

壤抗冲性的影响, 是指相同坡度和流量条件下保留结皮与去除结皮处理含沙量的比值。计算公式为:

$$C_{\text{结皮}} = \frac{S_{\text{保留结皮}}}{S_{\text{去除结皮}}} \quad (3)$$

式中: $C_{\text{结皮}}$ 为结皮土壤抗冲系数, 其值介于 0~1, $C_{\text{结皮}}$ 值越接近于 0, 则表明生物结皮对表层土的保护作用越好; 反之, 值越接近 1, 则表示保护效果越差。 $S_{\text{保留结皮}}$ 为保留结皮处理的含沙量(g/L); $S_{\text{去除结皮}}$ 为相同条件下去除结皮处理的含沙量(g/L)。

在 Excel 2016 中进行数据整理和统计分析, 在 SPSS 22.0 中对不同退耕年限地块结皮发育状况和土壤性质指标进行单因素方差分析和 Duncan 多重比较, 在 Origin 2022 软件中完成绘图。

2 结果与分析

2.1 不同退耕年限地块表层土壤特性

与对照耕地相比, 整体上退耕地块的黏粒和砂粒含量有所增大, 且黏粒含量的增幅大于砂粒(图 2)。不同退耕年限土壤黏粒含量增幅在退耕 8 年地块最大, 其次为退耕 3 年地块, 退耕 11 年地块增幅最小, 可见生物结皮发育明显增加土壤黏粒含量, 但这种作用并不随退耕年限的延长呈线性变化。退耕地块土壤容重均小于对照耕地, 对照耕地和退耕 11 年地块间土壤容重差异显著(表 2)。整体上随退耕年限的延长, 土壤容重逐渐减小。退耕地块土壤水分和土壤孔隙度均大于对照耕地, 随退耕年限的延长先增大后减小。退耕 8 年地块土壤水分最大, 且与对照耕地差异显著。退耕地块土壤饱和导水率为 0.95~1.06 mm/min, 均大于对照耕地的土壤饱和导水率, 表明退耕后生物结皮发育可改善土壤结构, 增强土壤透水能力, 但这种作用随退耕年限的增

加变化不显著。结皮发育土壤的平均质量直径变化为 1.97~3.46 mm,为对照耕地的 1.54~2.70 倍。除退耕 5 年地块外,其余退耕地块的平均质量直径均与对照耕地存在显著差异。退耕地块 >0.25 mm 团聚体结构破坏率为 14.08%~25.62%,均小于对照耕地的团聚体结构破坏率。除退耕 3 年地块的土壤有机质含量较高外,其余退耕地块土壤有机质含量与对照耕地差异不显著。上述分析表明,喀斯特坡面生物结皮发育能够促进土壤颗粒胶结,增强土壤团聚体稳定性,改善土壤结构,提高土壤持水和透水能力。

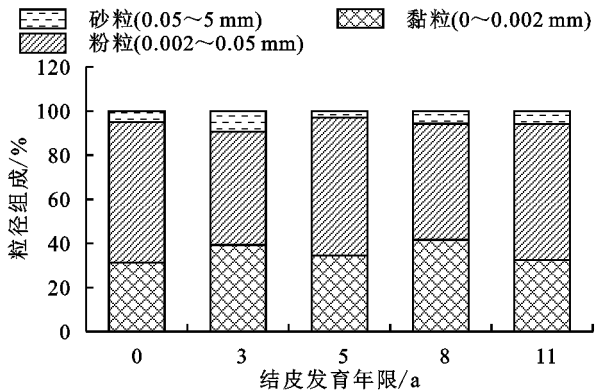


图 2 不同结皮发育年限土壤粒径组成

表 2 不同退耕年限地块表层(0—5 cm)土壤性质

退耕 年限/a	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	土壤 水分/%	土壤 孔隙度/%	有机质 含量/%	土壤饱和导水率/ (mm·min ⁻¹)	平均质量 直径/mm	>0.25 mm 结构破坏率/%
0	1.17±0.08a	21.83±1.46c	46.44±3.35b	1.72±0.06b	0.52±0.26a	1.28±0.09b	28.97±3.16a
3	1.09±0.07ab	24.45±3.40bc	50.90±2.78ab	2.42±0.03a	0.96±0.82a	3.25±0.02a	14.08±0.27a
5	1.10±0.05ab	27.43±2.50ab	53.77±30.7a	1.68±0.02b	1.06±1.22a	1.97±0.48b	25.62±6.27a
8	1.09±0.06ab	30.21±5.02a	52.24±4.48a	1.74±0.02b	1.02±1.61a	3.23±0.47a	15.93±7.21a
11	1.02±0.08b	27.45±2.50ab	50.27±53.84ab	1.73±0.03b	0.96±0.53a	3.34±0.19a	17.01±4.84a

2.2 生物结皮对土壤抗崩解性能的影响

图 3 为静水崩解过程中累积崩解量随时间的变化,不同退耕年限保留结皮处理的土壤崩解速率明显小于耕地,而去除结皮时,对照耕地与退耕地块间土壤崩解速率的差值减小。由于在崩解试验开始前,将试样进行吸水饱和,试验过程中崩解现象发生的阶段性不明显。根据试验过程的观察,试样崩解的方式有 2 种表现:一种是在将土样放入试验水桶瞬间,土体

周边部分松散的小土块快速崩解塌落,这个阶段崩解速率较大;另一种则是在静水过程中,随着水分子慢慢地侵入,土壤颗粒间的非水稳性胶结键在水分浸润作用下被削弱或断裂,此时发生部分崩解,由于这个过程需要一定的时间,因此崩解速率呈波动的变化。在试验过程中,发生崩解的部分主要位于土样的边角上,所有试样都只发生部分崩解。

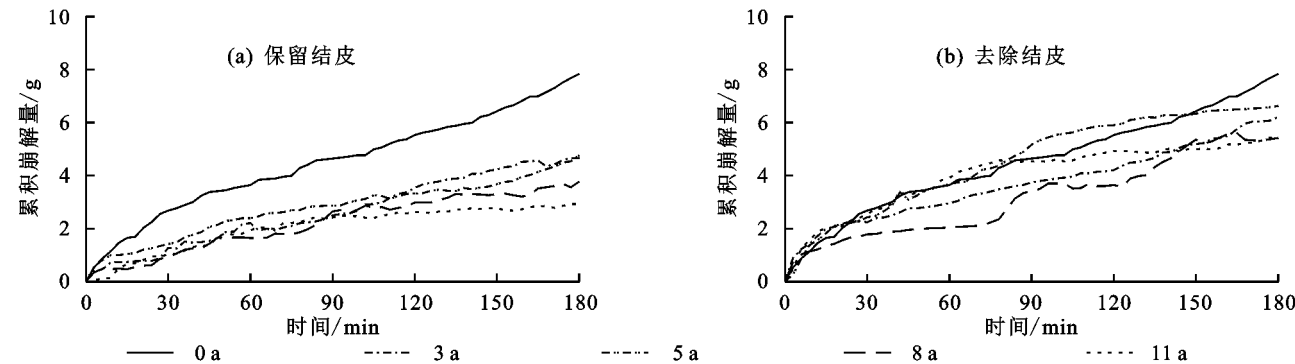


图 3 不同发育年限生物结皮原状土静水崩解过程

由图 4 可知,对照耕地累积崩解量为 7.91 g,明显大于退耕地块保留结皮和去除 2 种处理的土壤崩解量。在同一退耕地块,去除结皮处理的土样崩解量明显大于保存结皮处理,说明生物结皮发育有助于增强土壤抗崩解能力,从而提高土壤抗蚀性能。由于退耕 5 年地块微生物活动频繁,土壤质地较疏松,导致该地块试样较其他退耕地块更易发生崩解。因此,为了消除退耕年限及微生物活动等对土壤抗崩解性能的影响,用土壤崩解量降低率表示在同一退耕地块,与去除结皮处理相比,保留结皮处理的土壤崩解量降低率。由图 4(b)可以

看出,不同退耕地块保留结皮处理较去除结皮处理土壤崩解量的降低率随退耕年限的增加而增大。当结皮发育年限为从 3 年增加到 11 年时,土壤崩解量变化率从 24.83%增加至 46.62%,说明退耕年限内生物结皮发育可减少 24.83%~46.62%的土壤崩解量,特别是当发育年限达到 11 年时,可减少接近 1/2 的土壤崩解量。这是因为随着结皮发育年限的延长,生物结皮组成、结构及土壤性质等都发生变化。调查年限内(3~11 年)生物结皮持续发育,生物量不断积累,土壤颗粒间胶结作用增强,因此其对土壤抗崩解能力的影响程度逐渐增大。

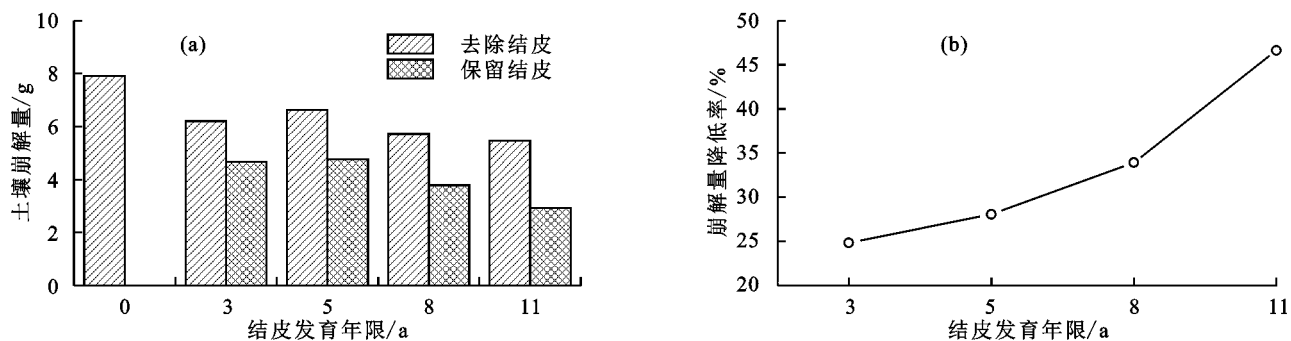


图 4 不同发育年限生物结皮原状土静水崩解量及其变化率

2.3 生物结皮对土壤抗剪切力的影响

土壤抗剪强度从力学角度反映土壤的抗蚀性能,是评价土壤抵抗径流冲刷和搬运能力的重要指标之一。由图 5 可知,对照耕地表层土壤抗剪切力为 29.29 kPa,明显小于退耕地块去除结皮和保留结皮 2 种处理的土壤抗剪切力。在同一退耕地块,保留结皮处理的土壤抗剪切力均大于去除结皮处理。随着退耕年限的延长(3,5,8,11 年),保留结皮处理土壤抗剪切力相比去除结皮处理分别提高 32.54%,37.73%,25.77%,27.09%,表明生物结皮发育早期(3~5 年)对土壤抗剪切力的影响逐渐增强,随着退耕年限继续延长(8~11 年),结皮发育对土壤抗剪强度的影响减弱并趋于平稳。从均值来看,去除结皮和保留结皮处理的土壤抗剪切力分别为 48.58,62.01 kPa,可见生物结皮发育明显提高土壤抗剪切力。此外,生物结皮作为保护地表免遭雨滴击溅和径流冲刷的缓冲区,其对

于破坏作用的反馈至关重要。由图 5(b)可知,随着退耕年限延长(3,5,8,11 年),结皮层抗拉力分别为 1.95,4.03,4.22,5.76 N。这表明结皮发育年限越长,其发育的层状结构越稳定,抵抗外界破坏的能力越强,对地表的保护作用越好。

土壤抗崩解与抗剪切强度是评价土壤抗蚀性能的 2 个重要指标,前者反映土壤抵抗水分子分解的能力,表现为土壤颗粒与水分子之间的相互作用;后者从力学角度反映土壤的抗蚀特性,是土壤颗粒间相互作用力的体现。从图 6 可以看出,退耕地块保留结皮和去除结皮 2 种处理的土壤崩解量与土壤抗剪切力均呈负相关关系,即随着土壤抗剪切力的增大,土样崩解量呈减小的变化趋势。这是由于随着土壤颗粒间凝聚力和摩擦力的增大,水分子难以侵入土壤颗粒间缝隙,破坏土粒间相互作用力的难度增大,因此土体不易发生崩解。

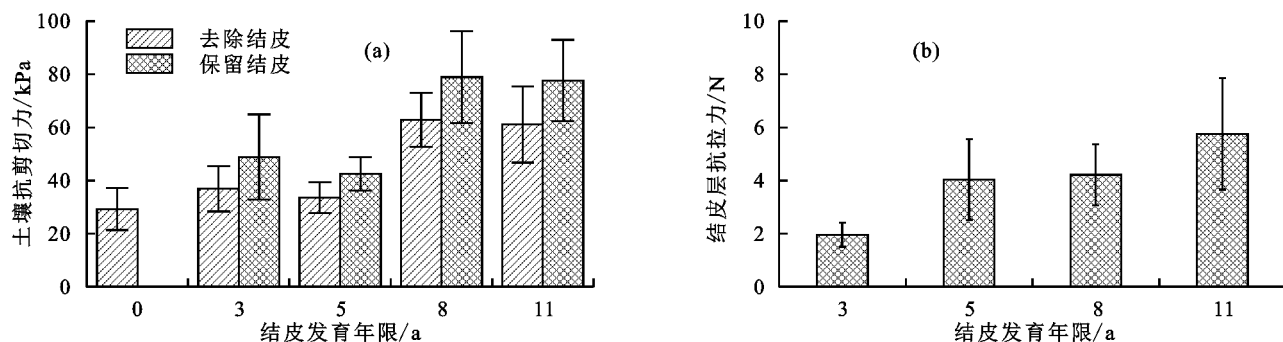


图 5 不同结皮发育年限表层(0~5 cm)土壤剪切力和结皮层抗拉力特征

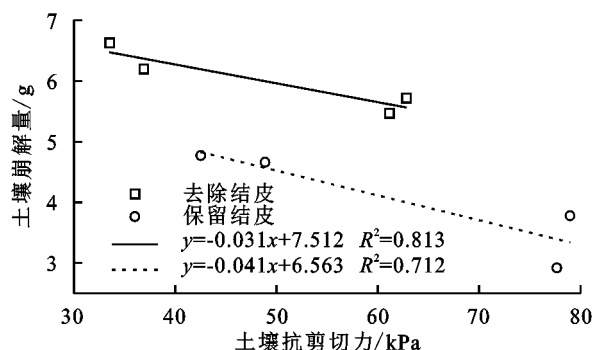


图 6 生物结皮土壤崩解量与抗剪切力的关系

2.4 生物结皮对土壤抗冲性能的影响

从图 7 可以看出,生物结皮土壤抗冲系数的变化

范围为 0.300 2~0.862 7,表明生物结皮可有效提高土壤抗冲性能,但在不同的坡度和流量条件下,其变化趋势有所差异。在缓坡(5°,12°)坡面,结皮土壤抗冲系数随流量的增大呈先减小后增大的变化趋势,拐点处流量为 0.4 L/s;而在陡坡坡面(17°,23°),结皮土壤抗冲系数随流量的增大而增大,说明在陡坡条件下,结皮对地表的保护作用随流量的增大逐渐被削弱。当流量较小时(0.2,0.3 L/s),陡坡(17°,23°)坡面结皮土壤抗冲系数小于缓坡(5°,12°)坡面;当流量增大到 0.4,0.5 L/s 时,陡坡(17°,23°)坡面结皮土壤抗冲系数反而大于缓坡(5°,12°)坡面,表明当流量较

小时(0.2, 0.3 L/s), 陡坡坡面生物结皮抵抗径流冲刷和侵蚀的能力明显大于缓坡, 但随着流量继续增大至0.4 L/s及以上时, 坡面水流流速急剧加快, 径流冲刷和搬作用力大大增强, 在水流快速侵入生物结皮层时破坏其结构体稳定性及其与土壤间的紧密接触, 此时陡坡坡面生物结皮对土壤的保护作用较缓坡有所削弱。上述分析表明, 生物结皮对土壤抗冲性的影响受到流量和坡度的双重调控, 在小流量条件下陡坡坡面生物结皮保土效果大于缓坡; 反之, 在大流量条件下缓坡坡面生物结皮保土效果大于陡坡, 其临界流量和坡度分别为0.4 L/s和17°。

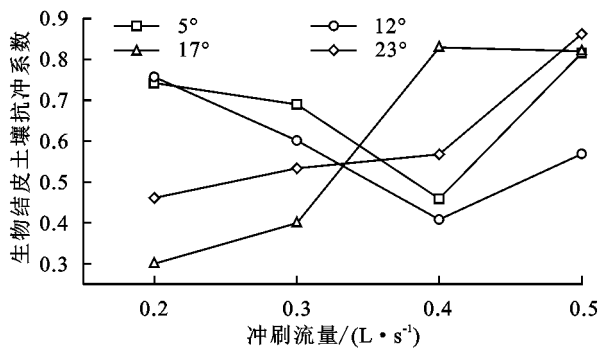


图7 不同坡度和流量下生物结皮土壤抗冲系数变化特征

3 讨论

3.1 生物结皮影响黄壤抗蚀性能的内在机制

在西南喀斯特地区陡坡分布, 地形破碎, 土壤瘠薄的生境条件下, 部分高等植物适生性差, 植被恢复进程缓慢。土地退耕后生物结皮发育能够改善土壤结构, 进一步影响土壤稳定性及保水保肥能力^[19]。生物结皮发育形成浓密的假根穿插到土壤中, 从而改善土壤孔隙结构, 增强土壤持水和导水能力, 退耕后土壤黏粒和砂粒含量较耕地不同程度增加, 粉粒含量减少。这可能是因为: 一方面生物结皮发育本身在一定程度上能黏化土壤, 使得土壤细颗粒物质增加; 另一方面, 由于生物结皮发育过程中分泌胞外多聚糖能够增加土壤颗粒间的黏结力, 使其胶结固定在一起, 形成微团聚体。从黏粒含量和砂粒含量的变幅来看, 生物结皮发育过程对土壤的黏化作用占主导, 研究结论与肖波等^[20]、高丽倩等^[21]在黄土丘陵区得出生物结皮发育能够细化土壤的结论一致; 张军红等^[22]在沙地的研究同样表明, 生物结皮发育能够增加土壤细颗粒成分。此外, 随着生物结皮发育, 生物结皮假根对土壤颗粒的穿插、捆绑和固结作用使得土壤颗粒间相互黏结作用增强, 而且微生物细胞带负电荷, 静电引力作用也使得土壤颗粒相互连接, 形成稳定的微团粒结构^[23], 有助于增强土壤颗粒抵抗水分子的分解能力^[24]。喀斯特坡面生物结皮对土壤性质的影响进一步改善土壤的水肥状况, 比如, 土壤质地黏化可增

强土壤养分的吸附能力, 改善土壤养分状况^[20]; 结皮覆盖下土壤持水和导水能力的提高, 一定程度上能够缓解喀斯特岩溶干旱环境下植被的生存压力; 着生于岩石表面的结皮分泌酸性物质, 加快岩石的风化过程, 促进成土速率^[15]。生物结皮可为喀斯特地区植被恢复创造有利条件, 在区域水土流失和石漠化治理工作中具有很大的应用前景。

3.2 生物结皮影响黄壤抗蚀性能的外在机制

生物结皮发育增强土壤抗剪切能力, 这是由于生物结皮发育形成大量的假根和菌丝, 其本身具有一定的抗剪切能力; 生物结皮浓密的假根对土壤颗粒的穿插、缠绕和固结作用增强土体稳定性, 同样能够提高土壤抗剪切能力^[25]。此外, 生物结皮的强稳定层状结构也是其增强土壤抗蚀性能的重要原因之一, 且生物结皮发育年限越长, 其发育的层状结构越趋稳定, 抵抗外界破坏作用力的能力也越强, 从而能更好地保护下覆土壤免遭雨滴击溅和径流冲刷^[8-9, 14]。喀斯特石漠化地区苔藓结皮喜钙耐旱, 吸水持水能力强, 平均生物量达到161~6690 kg/hm²^[26], 犹如一层“海绵”覆盖于地表, 对喀斯特坡面地表径流的形成和降水下渗过程具有一定的控制作用^[27]。在长期强烈的岩溶作用下, 喀斯特地区形成独特的地上地下二元地质结构, 区域水文过程更加复杂化, 地表侵蚀与地下漏失并存^[28]。生物结皮改变地表微地形, 增大地表粗糙程度^[29], 发挥截流消能的作用, 从而增加地表入渗, 减少地表产流产沙和地下漏失^[30-31]。根据野外调查, 天然降雨条件下喀斯特自然坡面很难观察到高含沙水流, 且很少发生细沟侵蚀, 这可能与地表生物结皮发育增强土壤抗蚀性能有关。然而, 在广泛使用的RUSLE、USLE、CSLE等土壤侵蚀模型中, 往往忽略生物结皮对土壤侵蚀过程的影响, 这可能导致土壤流失量的高估。因此, 在今后区域水土流失预报工作中, 应当考虑将生物结皮因子纳入到土壤侵蚀模型中, 提高估算结果的准确性, 以便更好地指导石漠化地区水土流失防治工作。

4 结论

(1) 与对照耕地相比, 生物结皮发育能够促进土壤颗粒胶结, 增强土壤团聚体稳定性, 改善土壤结构, 提高土壤持水和透水能力, 为喀斯特地区植被恢复创造条件。

(2) 喀斯特坡面生物结皮发育明显提高黄壤抗崩解和抗剪切能力。与去除结皮处理相比, 发育年限内(3~11年)保留结皮处理的抗崩解和抗剪切能力分别提高24.83%~46.62%和25.77%~37.73%。

(3) 发育年限内(3~11年)结皮层抗拉力大小为1.95~5.76 N, 随着生物结皮发育年限的延长, 结皮

层结构越稳定,其抵抗外界破坏的能力也越强,可有效保护结皮层下覆土壤免遭雨滴击溅和径流冲刷。

(4)生物结皮发育有助于增强黄壤抗冲刷和抗侵蚀能力,且受到流量和坡度的调控作用。当流量较小时生物结皮提高土壤抗冲性能在陡坡上表现更明显,当流量较大时则在缓坡上更明显,其临界流量和坡度分别为 0.4 L/s 和 17°。

参考文献:

- [1] 张元明,王雪芹.荒漠地表生物土壤结皮形成与演替特征概述[J].生态学报,2010,30(16):4484-4492.
- [2] Gao L, Bowker M A, Sun H et al. Linkages between biocrust development and water erosion and implications for erosion model implementation[J]. *Geoderma*, 2020, 357: e113973.
- [3] 李新荣,张元明,赵允格.生物土壤结皮研究:进展、前沿与展望[J].地球科学进展,2009,24(1):11-24.
- [4] 张元明,杨维康,王雪芹,等.生物结皮影响下的土壤有机质分异特征[J].生态学报,2005,25(12):3420-3425.
- [5] Gao L, Bowker M A, Xu M, et al. Biological soil crusts decrease erodibility by modifying inherent soil properties on the Loess Plateau, China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 105: 49-58.
- [6] 赵允格,许明祥,王全九,等.黄土丘陵区退耕地生物结皮对土壤理化性状的影响[J].自然资源学报,2006,21(3):441-448.
- [7] 李聪会,朱首军,陈云明,等.黄土丘陵区生物结皮对土壤抗蚀性的影响[J].水土保持研究,2013,20(3):6-10.
- [8] Zhao Y, Qin N, Weber B, et al. Response of biological soil crusts to raindrop erosivity and underlying influences in the hilly Loess Plateau region, China[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2014, 23(7): 1669-1686.
- [9] Guo Q, Wang Z, Shen N, et al. Impacts of biocrusts on sheet erosion and its detachment- and transport-limited processes: A case study from the Loess Plateau, China [J]. *Biosystems Engineering*, 2022, 223: 18-28.
- [10] Warren S D, Rosentreter R, Pietrasiak N. Biological soil crusts of the Great Plains: A review[J]. *Rangeland Ecology and Management*, 2021, 78: 213-219.
- [11] 程才,李玉杰,张远东,等.石漠化地区苔藓结皮对土壤养分及生态化学计量特征的影响[J].生态学报,2020, 40(24): 9234-9244.
- [12] 郑智恒,熊康宁,容丽,等.两种等级喀斯特石漠化地区生物结皮对土壤养分恢复的影响[J].生态环境学报, 2021, 30(6): 1202-1212.
- [13] Ma Q H, Zhang K L, Cao Z H, et al. Impacts of different surface features on soil detachment in the subtropical region[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021, 9(4): 555-565.
- [14] 任乐,张科利,郭继成.基于冲刷试验的贵州耕地土壤抗冲性研究[J].水土保持学报,2013,27(1):56-59.
- [15] 张显强,刘天雷,从春蕾.贵州 5 种喀斯特石生藓类成土及保土生态功能研究[J].中国岩溶,2018,37(5): 708-713.
- [16] 罗征鹏.喀斯特石漠化环境生物土壤结皮改善草地环境应用研究[D].贵阳:贵州师范大学,2018.
- [17] 保锐琴,和贵祥,黄广杰,等.土壤崩解研究进展[J].贵州农业科学,2022,50(1):30-41.
- [18] 丁文峰,丁登山.黄土高原植被破坏前后土壤团粒结构分形特征[J].地理研究,2002,21(6):700-706.
- [19] Wang H, Zhang G H, Li N N, et al. Soil erodibility influenced by natural restoration time of abandoned farmland on the Loess Plateau of China[J]. *Geoderma*, 2018, 325: 18-27.
- [20] 肖波,赵允格,邵明安.陕北水蚀风蚀交错区两种生物结皮对土壤理化性质的影响[J].生态学报,2007,27(11):4662-4670.
- [21] 高丽倩,赵允格,秦宁强,等.黄土丘陵区生物结皮对土壤物理属性的影响[J].自然资源学报,2012,27(8): 1316-1326.
- [22] 张军红,吴波.油蒿与臭柏沙地生物结皮对土壤理化性质的影响[J].东北林业大学学报,2012,40(3):58-61.
- [23] Yang K, Zhao Y G, Gao L Q. Biocrust succession improves soil aggregate stability of subsurface after "Grain for Green" Project in the Hilly Loess Plateau, China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 217: e105290.
- [24] 张晨晖,肖波,李胜龙,等.东北黑土区农田生物结皮的特征及其对表层土壤崩解的影响[J].应用生态学报, 2022, 33(7): 1773-1782.
- [25] 李宁宁,张光辉,王浩,等.黄土丘陵沟壑区生物结皮对土壤抗蚀性能的影响[J].中国水土保持科学,2020,18(1):42-48.
- [26] 李冰,张朝晖.喀斯特石漠结皮层藓类物种多样性及在石漠化治理中的作用研究[J].中国岩溶,2009,28(1): 55-60.
- [27] 张显强,龙华英,刘天雷,等.贵州喀斯特地区 5 种石生藓类的持水性能及吸水特征比较[J].中国岩溶,2018, 37(6): 835-841.
- [28] 马芊红,张科利.西南喀斯特地区土壤侵蚀研究进展与展望[J].地球科学进展,2018,33(11):1130-1141.
- [29] Caster J, Sankey T T, Sankey J B, et al. Biocrust and the soil surface: Influence of climate, disturbance, and biocrust recovery on soil surface roughness[J]. *Geoderma*, 2021, 403: e115369.
- [30] 张思琪,张科利,曹梓豪,等.喀斯特坡面生物结皮发育特征及其对土壤水分入渗的影响[J].应用生态学报, 2021, 32(8): 2875-2885.
- [31] 程才,李玉杰,龙明忠,等.苔藓结皮在我国喀斯特石漠化治理中的应用潜力[J].应用生态学报,2019,30(7): 2501-2510.