

黄土高原典型生物结皮对坡面产流产沙过程的影响

许欢欢¹, 张宝琦¹, 汪建芳¹, 王兵^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: [目的] 明确不同类型生物结皮坡面产流产沙过程及其影响因素, 为评价生物结皮的水土保持功能提供理论依据。[方法] 选取黄土高原常见藻结皮和苔藓结皮为研究对象, 系统研究降雨条件下结皮类型及破坏前后对坡面产流产沙的影响。[结果] ①生物结皮可显著增强土壤黏结力, 藻结皮和苔藓结皮土壤黏结力是裸地(4.53 kPa)的1.52倍和1.25倍, 结皮破坏后其土壤黏结力仍高于裸地, 分别是裸地的1.22、1.10倍; ②生物结皮可以增加坡面产流, 抑制坡面产沙。藻结皮和苔藓结皮产流量分别增加了21.64%和55.75%, 产沙量分别减少了94.06%和89.24%。结皮破坏后, 产流量分别增加了58.76%和59.66%, 产沙量分别减少了16.18%和29.45%, 仍可促进产流, 抑制产沙; ③随累积径流量的增加, 累积产沙量增长速度由大到小依次为: 裸地>藻结皮去除>苔藓结皮去除>苔藓结皮覆盖>藻结皮覆盖。黏结力是表征生物结皮抑制土壤侵蚀的有效指标。随黏结力的增大, 产沙量呈线性降低($R^2=0.66$)。[结论] 增加生物结皮覆盖并有效防止生物结皮被破坏, 可最大程度发挥其水土保持功能。

关键词: 藻结皮; 苔藓结皮; 黏结力; 径流; 泥沙

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)06-0008-06

中图分类号: S157.1

文献参数: 许欢欢, 张宝琦, 汪建芳, 等. 黄土高原典型生物结皮对坡面产流产沙过程的影响[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 8-13. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.06.002; Xu Huanhuan, Zhang Baoqi, Wang Jianfang, et al. Effects of typical biological crusts on slope runoff and sediment load in Loess Plateau region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 8-13.

Effects of Typical Biological Crusts on Slope Runoff and Sediment Load in Loess Plateau Region

Xu Huanhuan¹, Zhang Baoqi¹, Wang Jianfang¹, Wang Bing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] The process of slope runoff and sediment yield and its influencing factors of different types of biological soil crust were clarified in order to provide theoretical basis for evaluating soil and water conservation function of biological soil crust. [Methods] The common cyanobacterial crust and moss crust in the Loess Plateau region were selected as the research objects, to systematically study the effects of crust types and destruction on runoff and sediment yield under the condition of rainfall. [Results] ① The coverage of biocrusts could significantly enhance the cohesion of soil surface. Soil surface cohesion of cyanobacterial crust and moss crust were 1.52 and 1.25 times higher than that on bare land (4.53 kPa), respectively. After the biocrusts were destroyed, the soil cohesion of soil surface was still higher than that of bare land, which was 1.22 and 1.10 times of that of bare land, respectively. ② Biocrusts could increase slope runoff and inhibited slope sediment yield. Compared with bare soil condition, cyanobacterial crust and moss crust increased the total runoff by 21.64% and 55.75% respectively, and decreased the sediment yield by 94.06% and 89.24% respectively. After the biocrusts were destroyed, it could still promote runoff and inhibit sediment yield. The

收稿日期: 2020-07-20

修回日期: 2020-08-26

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于RUSLE模型的黄土高原草地植被覆盖因子研究”(41771555); 国家自然科学基金重点项目“退耕驱动近地地表特性变化对侵蚀过程的影响及其动力机制”(41530858)

第一作者: 许欢欢(1997—), 女(汉族), 陕西省榆林市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。Email: xhh19970312@163.com。

通讯作者: 王兵(1982—), 男(汉族), 陕西省武功县人, 博士, 副研究员, 主要从事植被恢复与土壤侵蚀研究。Email: bwang@ms.iswc.ac.cn。

runoff was increased by 58.76% and 59.66%, and the sediment yield was decreased by 16.18% and 29.45%.

③ With the increase of cumulative runoff, the increasing rate of cumulative sediment yield from large to small was as follows: bare land > cyanobacterial crust removal > moss crust removal > moss crust coverage > cyanobacterial crust coverage. Cohesion was an effective indicator of biological crust to inhibit soil erosion. With the increase of cohesion, the sediment yield decreased linearly ($R^2=0.66$). [Conclusion] By increasing the biological soil crust coverage and prevent the biological crust from being damages, its function of soil and water conservation could be maximized.

Keywords: cyanobacterial crust; moss crust; cohesion; runoff; sediment

生物土壤结皮也被称为生物结皮,是指不同种类的蓝绿藻类、地衣、苔藓植物、细菌及真菌等生物组与其下层很薄的土壤共同形成的一个复合的生物土壤层^[1]。生物结皮是干旱、半干旱区普遍存在的地被物,在旱地生态系统中具有重要的生态功能。相关研究^[2-3]结果表明生物结皮遇水后能够迅速膨胀,阻塞土壤孔隙,从而减少降雨入渗,促进坡面径流产生。与此同时,发育良好的生物结皮可削减雨滴动能^[4-5],增加地表糙度和延缓流速,从而降低土壤侵蚀速率。生物结皮生长发育过程中表层土壤结构及其理化性状也随之改变^[6],进而对坡面侵蚀过程产生重要影响^[7]。有研究表明,生物结皮对土壤侵蚀最为关键的影响是生物结皮能够增强土壤团聚体的含量和稳定性^[8],另外,生物结皮在其生长发育过程中通过自身分泌物的胶结作用、假根系的缠绕与固结作用可显著增加表层土壤黏结力,从而增强土壤表面稳定性,降低土壤侵蚀速率。受土壤侵蚀过程和植被生长及演替过程的影响,生物结皮发育往往会受到干扰和破坏,降低其水土保持功能^[9-10]。已有研究^[11-12]结果表明,生物结皮受到扰动后会导致径流和侵蚀增加。生物结皮完全去除后,土壤侵蚀量较有结皮存在的坡面增加 70 倍左右^[13]。黄土高原是我国土壤侵蚀最严重的地区之一,自 1999 年退耕还林(草)工程实施以来,以蓝绿藻类、苔藓类、地衣类等先锋物种为主的生物结皮得以广泛发育,平均盖度可达到 60%~70%^[14],对于减少该区水土流失具有重要作用。然而有关生物结皮对产流产沙过程的影响机制尚不清楚,相关研究相对滞后。鉴于此,本研究通过人工培育黄土高原常见的生物结皮(藻结皮和苔藓结皮),系统研究生物结皮覆盖及破坏对坡面产流产沙过程的影响,为评价生物结皮的水土保持功能提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 生物结皮培育

本文试验于 2019 年 4 月进行,共布设 10 个土槽(200 cm×50 cm×50 cm)用于生物结皮培育。试验用土为安塞自然草地表层(0—20 cm),土壤类型为黄

绵土。填土前将供试土壤过 2 mm 孔筛,去除草根和砾石。对于每个土槽,底部铺 10 cm 厚的细砂,并盖上纱布用以隔开土和砂,保证试验过程中土壤水分均匀下渗;之后按照容重 1.2 g/cm³ 分 4 层填土,每层填土厚度 10 cm,共填土 40 cm;填土同时进行压实,填装下层之前将表土打毛,消除土壤的分层现象。填土结束后,4 个土槽用于种植藻结皮,4 个土槽用于种植苔藓结皮,2 个土槽作为对照,不做任何处理。藻结皮种源为硅藻,接种量为 50 g/m²,通过将藻粉溶于水(1 L)均匀喷洒于土槽表面进行接种;苔藓结皮采自纸坊沟流域铁杆蒿样地,接种量为 1 000 g/m²,通过粉碎后均匀播撒于土壤表面进行接种。培育时间为 2 个月,期间每周浇水 1 次,保证结皮正常生长。经过两个月的生长,藻结皮和苔藓结皮盖度分别为 68.3%和 59.2%,厚度变化范围分别为 1.18~1.87 mm 和 4.00~4.18 mm,藻结皮叶绿素含量为 0.592 mg/g,苔藓结皮生物量为 40.24 g/m²。

1.2 试验处理设置

试验共设置 5 个处理:裸地(T_0)、藻结皮覆盖(T_1)、藻结皮移除(T_2)、苔藓结皮覆盖(T_3)、苔藓结皮移除(T_4),每个处理重复 2 次。其中 T_0 处理为裸地对照,静置时间为 2 个月; T_1 处理为培育 2 个月的藻结皮; T_2 处理在 T_1 处理的基础上将藻结皮去除; T_3 处理为培育两个月的苔藓结皮; T_4 处理在 T_3 处理的基础上将苔藓结皮去除(表 1)。去除结皮时,用铁铲小心地从结皮层与下伏土壤分界处铲掉结皮,用刷子刷掉虚土,将对地表造成扰动降到最低。

表 1 试验处理及影响产流产沙的因素

处理编号	处理	影响因素
T_0	裸地对照	裸地对照处理
T_1	藻结皮覆盖	藻结皮和土壤性状共同作用
T_2	藻结皮去除	受藻结皮影响的土壤性状
T_3	苔藓结皮覆盖	苔藓结皮和土壤性状共同作用
T_4	苔藓结皮去除	受苔藓结皮影响的土壤性状

1.3 降雨试验过程

2019 年 6 月,进行人工模拟降雨试验。试验在

黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅进行,采用 QYJY-503 固定式人工降雨设备,该设备采用组合喷头降雨,喷头安置高度均为 18 m,雨滴大小控制在 0.4~0.6 mm,降雨均匀度大于 0.8,雨滴终点速度近似天然降雨。考虑到覆盖于地表的生物结皮往往在较大雨强下才会被破坏,故降雨强度设置为 120 mm/h,降雨历时为 1 h,土槽坡度为 25°。

试验开始前率定雨强至与设定雨强误差小于 5%;同时对所有土槽缓慢喷水至饱和,以消除前期土壤含水量对试验的影响。降雨开始后每 2 min 收集 1 次径流泥沙样。

为了避免结皮去除扰动对试验产生影响,坡面产流后前 4 min 径流泥沙样不予收集。降雨结束后对桶内径流泥沙样称重,然后静置澄清,待泥沙完全沉淀后倒掉上层液,将剩余泥沙样转移至铁盒内,置于烘箱中于 105 ℃ 烘干 24 h 后测定泥沙质量,并计算径流量。降雨结束后,测定所有土槽黏结力和容重。采用袖珍黏结力仪 (M1-1410e) 测定表层土壤黏结力,每个土槽沿坡向重复测定 8 次,其平均值作为该土槽土壤黏结力;考虑到生物结皮位于土壤表层,对于下伏土壤容重的影响深度有限,因此采用特制环刀 (内径 9.8 cm、高 2 cm) 测定 0—2 cm 土壤容重,每个土槽沿坡上、坡中和坡下采集 5 个容重土样,其平均值作为该土槽容重。

2 结果与分析

2.1 生物结皮对土壤黏结力和容重的影响

土壤黏结力是土壤颗粒相互作用和胶结能力的体现。不同处理下黏结力变化范围为 4.49~6.83 kPa (表 2);其中藻结皮覆盖 (T_1) 和苔藓结皮覆盖 (T_3) 土壤黏结力相对较大,是裸地 (4.49 kPa) 的 1.52 和

1.25 倍,表明结皮覆盖可以显著增强土壤表层黏结力,且藻结皮的作用强于苔藓结皮。当藻结皮和苔藓结皮去除后 (T_2 和 T_4),其表层土壤黏结力较藻结皮覆盖 (T_1) 和苔藓结皮覆盖 (T_3) 减少了 19.6% 和 12.1%,但仍高于裸地对照,分别是裸地对照的 1.22 和 1.10 倍。土壤容重总体变化范围为 1.22~1.23 g/cm³,各处理间没有显著差异。

表 2 各处理土壤物理性状特征

处理	黏结力/kPa	容重/(g·cm ⁻³)
T_0	4.49 ^a	1.23 ^a
T_1	6.83 ^c	1.22 ^a
T_2	5.49 ^b	1.22 ^a
T_3	5.60 ^b	1.23 ^a
T_4	4.92 ^{ab}	1.23 ^a

注:① T_0, T_1, T_2, T_3, T_4 分别代表裸地对照、藻结皮、移除藻结皮、苔藓结皮、移除苔藓结皮处理。下同。② 同一列内不同小写字母表示不同处理间存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

2.2 生物结皮对产流过程的影响

生物结皮覆盖可显著影响坡面产流过程 (图 1)。整个降雨过程中,结皮覆盖和结皮去除处理产流量均不同程度的高于裸地对照,其中藻结皮去除 (T_2)、苔藓结皮覆盖 (T_3) 和苔藓结皮去除 (T_4) 产流量相对较高,且 3 者间没有显著差异。随着降雨历时的增加,除了藻结皮覆盖处理外 (T_1),所有处理径流量均随降雨历时的延长呈现小范围的上下波动,并趋于平稳。藻结皮覆盖处理在产流 30 min 明显增加,且于产流 40 min 趋于稳定。总体而言,藻结皮覆盖和苔藓结皮覆盖可显著增加产流。藻结皮覆盖和苔藓结皮覆盖径流总量分别为 50.15 和 64.22 mm,相对于裸地对照增加了 21.64% 和 55.75%。而当结皮去除后,径流总量反而有所增加,较结皮覆盖分别增加了 30.50% 和 2.51%,较裸地对照增加了 58.76% 和 59.66%。

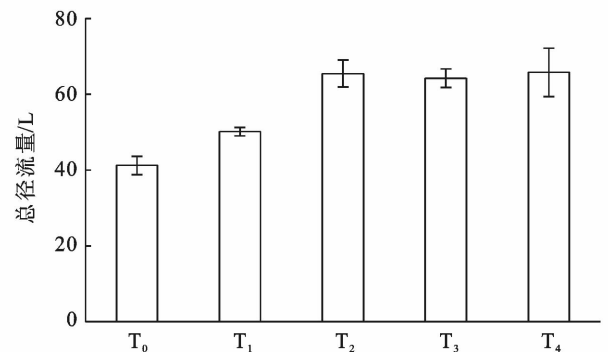
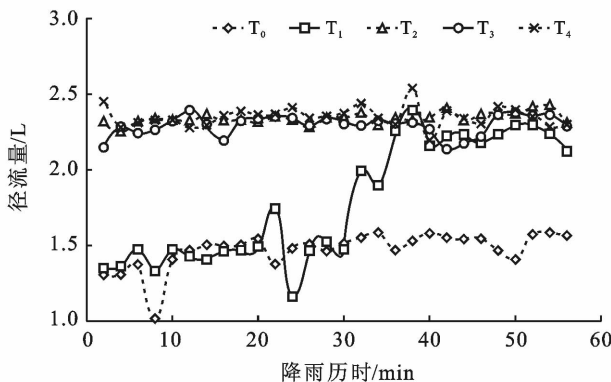


图 1 坡面生物结皮处理径流过程及总径流量

2.3 生物结皮对产沙过程的影响

生物结皮覆盖可显著影响坡面产沙过程(图 2)。整个降雨过程中,结皮覆盖处理(T_1 和 T_3)和结皮去除处理(T_2 和 T_4)产沙量均低于裸地对照。随着降雨历时的增加,结皮覆盖处理波动下降并趋于稳定,结皮去除处理呈波动增加并趋于稳定。总体而言,生物结皮覆盖可显著减少坡面产沙。相对于裸地对照,藻结皮覆盖和苔藓结皮覆盖产沙总量分别为 130.11 和 235.79 g,减少了 94.06%和 89.24%。而当结皮去除后,土壤表层失去了结皮的保护,产沙量有所增加;藻结皮去除和苔藓结皮去除产沙总量分别为

1 837.09 和 1 546.43 g,分别为藻结皮覆盖和苔藓结皮覆盖的 13 倍和 6 倍,但仍低于裸地对照,较裸地对照减少了 16.18%和 29.45%。

生物结皮生长发育显著增强了表层土壤黏结力,且随黏结力的增大,产沙量线性降低($R^2=0.66, p<0.05$;图 3a)。径流也是影响泥沙的主要因素,随着累积径流量的增加,生物结皮覆盖处理(T_1 和 T_3)和生物结皮去除处理(T_2 和 T_4)其坡面累积产沙量均呈线性增加($R^2\geq 0.99$;图 3b)。随着累积径流量的增加,裸地对照累积产沙量增速最大,生物结皮去除处理次之,生物结皮覆盖处理最小。

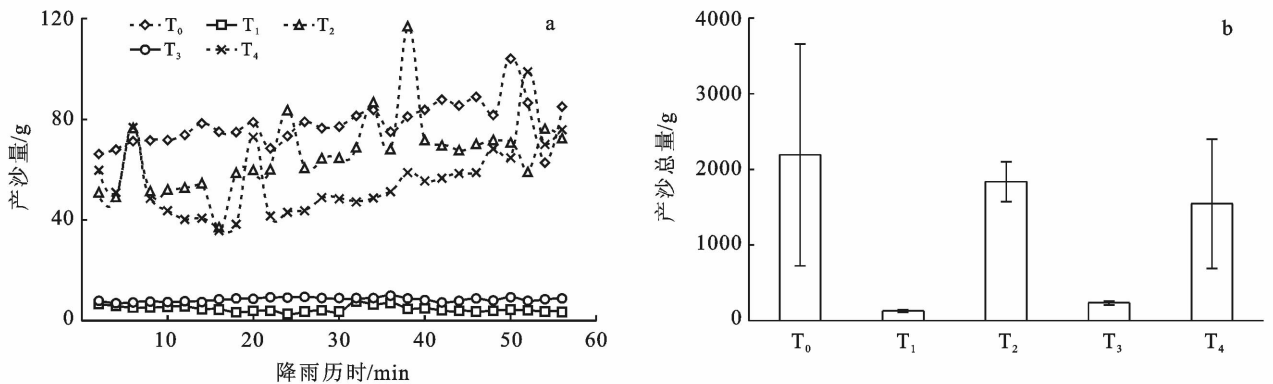


图 2 坡面生物结皮处理产沙过程和产沙总量

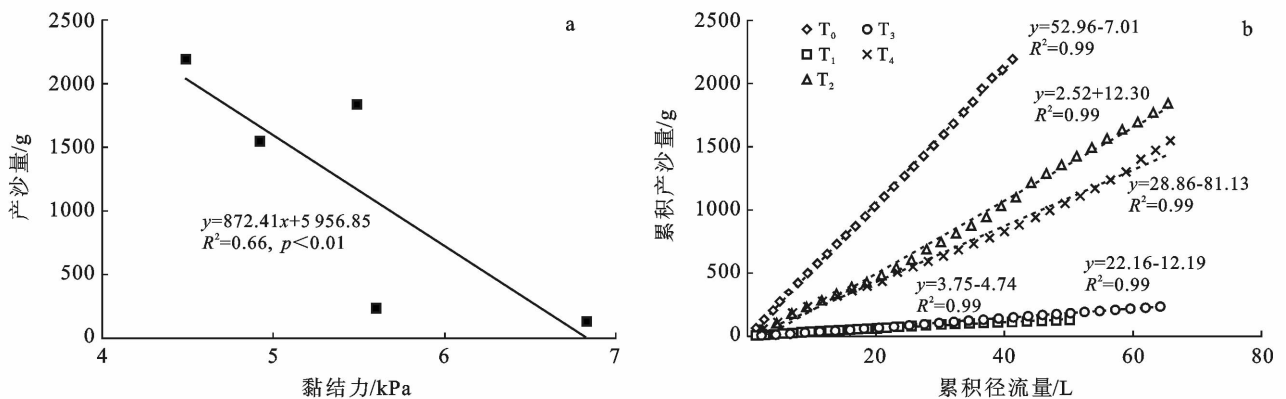


图 3 生物结皮处理黏结力与产沙量之间的关系以及累积泥沙量与累积产流量之间的关系

3 讨论

3.1 生物结皮对土壤黏结力和容重的影响

生物结皮广泛存在于干旱、半干旱地区,在改变土壤理化性质方面起着重要作用,生物结皮可以显著增加土壤黏结力、降低土壤容重。本研究结果表明藻结皮和苔藓结皮生长发育过程中均可以显著增加土壤黏结力。这主要是由于藻结皮和苔藓结皮生长发育过程中能够分泌胞外分泌物,对土壤颗粒具有黏结团聚作用,进而可以增强土壤黏结力^[15]。当生物结

皮被破坏或去除后,其分泌物在表层土壤中仍有少量残留,因此黏结力依然高于裸地对照。苔藓结皮和藻结皮与土壤颗粒黏结使得土壤黏结力显著增加,且苔藓结皮密集的假根系可“捆绑”表层土壤颗粒,其土壤黏结力往往高于藻结皮。但本研究中苔藓结皮对土壤黏结力的增强作用弱于藻结皮,且苔藓结皮去除后土壤黏结力也低于藻结皮去除处理,这主要是由于本次试验周期较短,苔藓结皮假根系还未完全发育,因此苔藓结皮的黏结力小于藻结皮。不同于黏结力,本研究中各处理土壤容重并没有显著差异,这主要是由

于试验结皮种植历时较短,相对于变化敏感的土壤黏结力,两个月的生物结皮生长发育还不足以对土壤容重产生影响。李盼盼等^[16]研究结果也表明,土壤容重及养分等指标变化相对缓慢,年内变化没有显著差异。

3.2 生物结皮对产流过程的影响

生物结皮会影响坡面产流过程,但由于生物结皮类型和组成、发育程度及干扰破坏等造成其在坡面产流过程中产生差异。本研究结果表明,藻结皮和苔藓结皮都可以促进坡面产流,这主要是由于生物结皮生长发育过程中可阻塞土壤孔隙,减少入渗^[17],增加坡面产流。同时,生物结皮具有疏水性,其遇水后会迅速膨胀,在表层土壤产生不透水层,使得降雨入渗能力下降,产流增加^[18]。结皮种类也可显著影响产流过程,在整个试验过程中苔藓结皮径流量始终高于裸地对照且趋于稳定,而藻结皮径流量在产流后 30 min 内仅略高于裸地对照,于产流 40 min 后明显高于裸地对照并逐渐趋于稳定。这可能与结皮自身形态特征有关,相对于苔藓结皮而言,生长了 2 个月的藻结皮对产流过程的影响还未达到稳定状态,因而会产生上下波动。但总体而言,藻结皮覆盖和苔藓结皮覆盖均可显著增加产流。另外,本研究中苔藓结皮产流量大于藻结皮,这可能是由于结皮厚度造成的。李新荣等^[19]研究结果也表明,生物结皮可以显著阻碍降水入渗,且降水入渗深度随生物结皮厚度的增加而降低。这也进一步说明试验中苔藓结皮产流量大于藻结皮的原因可能是苔藓结皮厚度较大。对于本研究,苔藓结皮厚度为 4.00~4.18 mm,显著高于藻结皮(1.18~1.87 mm)。此外,结皮去除后径流量高于裸地对照,这主要是由于本试验雨强较大,去除结皮层后相对疏松的土壤表面遭受雨滴打击后会迅速形成物理结皮,从而促进产流^[20]。生物结皮生长发育增大表层土壤黏结力的同时,也会影响水分向下层入渗,因此结皮被破坏后产流量高于裸地。

3.3 生物结皮对产沙过程的影响

生物结皮覆盖于地表可保护表层土壤免受降雨打击^[21],相对于裸地对照,藻结皮和苔藓结皮产沙量减少了 94.06% 和 89.24%。受结皮类型、盖度和厚度的差异,其对土壤侵蚀的抑制作用也有所不同。一般而言,苔藓结皮具有一定厚度,可增加地表糙度,从而增加水流阻力和拦蓄泥沙,进而减少产沙。本研究中苔藓结皮的产沙量略高于藻结皮,一方面是由于两个月的苔藓结皮仍处于生长发育初期,其对土壤侵蚀的抑制作用并没有完全体现;另一方面,藻结皮本身生长发育较快,分泌了较多的胞外多聚糖,这使得土

壤颗粒相互黏结,产沙量减少^[22]。当生物结皮被破坏或去除后,土壤表层失去了生物结皮的保护,土壤侵蚀显著增加。藻结皮去除和苔藓结皮去除后,其产沙量分别为藻结皮覆盖和苔藓结皮覆盖存在条件下的 13 倍和 6 倍。但藻结皮去除和苔藓结皮去除后其产沙量仍低于对照裸地,较对照裸地减少了 16.18% 和 29.45%,这主要是由于生物结皮生长发育很大程度上增强了表层土壤的黏结力所致,且随着黏结力的增加,产沙量线性降低。相关研究结果表明,土壤抗冲性与土壤有机质、黏结力、水稳性团聚体呈负相关关系,其中黏结力对结皮土壤抗冲性影响最大,达极显著水平^[23],这也在一定程度表明生物结皮对土壤黏结力的增强作用是其有效抑制土壤侵蚀另一个重要途径。

4 结论

(1) 藻结皮和苔藓结皮在其生长发育过程中能够分泌胞外分泌物黏结土壤颗粒,从而增强土壤黏结力。当结皮破坏后其分泌物在表层土壤中仍有少量残留,其土壤黏结力仍高于裸地。

(2) 生物结皮通过阻塞土壤孔隙和其自身疏水性,减少入渗,增加坡面产流,且在其生长发育过程中随着结皮厚度的增加,其对降水入渗的阻碍作用增强。去除结皮层后相对于疏松的土壤表面遭受雨滴打击后会迅速形成物理结皮,从而促进产流。

(3) 生物结皮覆盖于地表可保护表层土壤免受降雨打击,同时,结皮生长发育过程中可以分泌胞外多聚糖使得土壤颗粒相互黏结,从而有效抑制坡面产沙。当生物结皮被破坏或去除后,土壤表层失去了生物结皮的保护,相比于结皮覆盖条件下土壤侵蚀显著增加,但结皮被破坏后其对土壤颗粒的黏结作用仍然大于裸地,其抗侵蚀性也高于裸地。因此,黏结力是表征生物结皮抑制土壤侵蚀的有效指标,且随黏结力的增大,产沙量线性降低($R^2 = 0.66, p < 0.05$)。径流也是影响泥沙的主要因素,随着累积径流量的增加,生物结皮覆盖处理(T_1 和 T_3)和生物结皮去除处理(T_2 和 T_4)其坡面累积产沙量均线性增加($R^2 \geq 0.99$)。随着累积径流量的增加,裸地对照累积产沙量增速最大,生物结皮去除处理次之,生物结皮覆盖处理最小。

[参 考 文 献]

- [1] Whitton, B. Biological soil crust: Structure, function, and management [J]. Biological Conservation, 2002, 108(1), 129-130.
- [2] 周贵连,张万军.人工生物土壤结皮特性及其集雨潜力

- 的研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(10): 1329-1333.
- [3] 张健, 徐明, 邹晓, 等. 不同土壤和植被生境下生物结皮对土壤性质的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 323-328.
- [4] Kinnell P I A, Chartres C J, Watson C L, et al. The effects of fire on the soil in a degraded semiarid woodland(II): Susceptibility of the soil to erosion by shallow rain impacted flow [J]. Soil Research, 1990, 28(5): 779-794.
- [5] Zhao Yunge, Xu Mingxiang. Runoff and soil loss from revegetated grasslands in the hilly loess plateau region, Chian: Influence of biocrust patches and plant canopies [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18(4): 387-393.
- [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] 李林, 赵允格, 王一贺, 等. 不同类型生物结皮对坡面产流特征的影响[J]. 自然资源学报, 2015, 30(6): 1013-1023.
- [8] 张振国, 焦菊英, 白文娟. 黄土丘陵沟壑区退耕地植被恢复中生物土壤结皮特征[J]. 水土保持通报, 2006, 26(4): 33-37.
- [9] 杨永胜, 邱永利, 周小泉, 等. 毛乌素沙地人为干扰苔藓结皮的土壤水分和风蚀效应[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 20-24.
- [10] 杨雪芹, 许明祥, 赵允格, 等. 黄土丘陵区踩踏干扰对生物土壤结皮有机碳组分及碳矿化潜力的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(4): 1283-1290.
- [11] Calvo-Cases A, Boix-Fayos C, Imeson A C. Runoff generation, sediment movement and soil water behaviour on calcareous(limestone) slopes of some Mediterranean environments in southeast Spain [J]. Geomorphology, 2003, 50(1/3): 269-291.
- [12] Li X J, Li X R, Song W M, et al. Effects of crust and shrub patches on runoff, sedimentation, and related nutrient (C, N) redistribution in the desertified steppe zone of the Tengger Desert, Northern China [J]. Geomorphology, 2008, 96(1/2): p. 221-232.
- [13] Chamizo S, Cantón Y, Lázaro R, et al. Crust composition and disturbance drive infiltration through biological soil crusts in semiarid ecosystems [J]. Ecosystems, 2012, 15(1): 148-161.
- [14] 赵允格, 许明祥, 王全九, 等. 黄土丘陵区退耕地生物结皮理化性状初报[J]. 应用生态学报, 2006, 17(8): 1429-1434.
- [15] 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.
- [16] 李盼盼, 王兵, 刘国彬, 等. 氮添加对白羊草种群及土壤特征的影响[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(2): 35-42.
- [17] Al-Qinna M I, Abu-Awwad A M. Infiltration rate measurements in arid soils with surface crust [J]. Irrigation Science, 1998, 18(2): 83-89.
- [18] Kidron G J, Yaalon D H, Vonshak A. Two causes for runoff initiation on microbiotic crusts: Hydrophobicity and pore clogging [J]. Soil Science, 1999, 164(1): 18-27.
- [19] 李新荣, 贾玉奎, 龙利群, 等. 干旱半干旱地区土壤微生物结皮的生态学意义及若干研究进展[J]. 中国沙漠, 2001(1): 7-14.
- [20] Neave M, Rayburg S. A field investigation into the effects of progressive rainfall-induced soil seal and crust development on runoff and erosion rates; The impact of surface cover [J]. Geomorphology, 2007, 87(4): 378-390.
- [21] 高丽倩. 黄土高原生物结皮土壤抗水蚀机理研究[D]. 陕西 杨凌: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2017.
- [22] 鞠孟辰, 卜崇峰, 王清玄, 等. 藻类与微生物添加对高陡边坡生物结皮人工恢复的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(6): 124-128, 135.
- [23] 冉茂勇, 赵允格, 陈彦芹. 黄土丘陵水蚀区生物结皮土壤抗冲性试验研究[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(3): 37-40, 62.