黄土丘陵区生物结皮对坡面流水动力特征的影响

张慧妮[1]，王 兵[1,2]，张宝琦[3]，韩剑桥[1]，许欢欢[1]

(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；3.黄河水土保持西峰治理监督局，甘肃 庆阳 745000)

摘 要：[目的] 探究生物结皮对坡面流水动力特征的影响，为黄土高原丘陵区生物结皮防蚀机理研究提供理论指导。[方法] 设置生物结皮覆盖及破坏处理，进行人工模拟降雨试验。[结果] ①生物结皮覆盖及破坏处理下坡面流均属于层流急流。②生物结皮可显著降低坡面流流速，增加水流剪切力，阻力系数和水流功率($p<0.05$)。其中，藻结皮处理和苔藓结皮处理较裸地流速分别减少了 48.74%和 62.24%，水流剪切力、阻力系数、水流功率较裸地分别增加了 130.01%和 308.07%；703.35%和 2 532.01%；21.16%和 57.43%。③生物结皮破坏后其阻力系数与裸地无显著变化，流速、水流剪切力、水流功率均显著高于裸地($p<0.05$)。其中，藻结皮破坏和苔藓结皮破坏处理较裸地流速、水流剪切力、水流功率分别增加了10.84%和 16.46%；36.83%和 42.44%；60.90%和 62.14%。[结论] 生物结皮覆盖会增大坡面流阻力系数，降低流速。生物结皮破坏后坡面流阻力系数与裸地无差异，流速增加。此外，生物结皮覆盖及破坏处理均会增大坡面流水流剪切力及水流功率，进而增加径流侵蚀能量。

关键词：生物结皮；藻结皮；苔藓结皮；水动力学；结皮破坏

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2022)02-0016-06 **中图分类号**：S157.1

文献参数：张慧妮，王兵，张宝琦，等.黄土丘陵区生物结皮对坡面流水动力特征的影响[J].水土保持通报，2022，42(2)：16-21.DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2022.02.003；Zhang Huini，Wang Bing，Zhang Baoqi，et al. Effects of biocrusts on hydrodynamic characteristics of slope flow in hilly regions of Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2022，42(2)：16-21.

Effects of Biocrusts on Hydrodynamic Characteristics of Slope Flow in Hilly Regions of Loess Plateau

Zhang Huini[1]，Wang Bing[1,2]，Zhang Baoqi[3]，Han Jianqiao[1]，Xu Huanhuan[1]

(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 Science，Beijing* 100049，*China*；3.*Supervision Bureau of Soil and Water Conservation，Xifeng Governance，Qingyang，Gansu* 745000，*China*)

Abstract：[Objective] The effects of biological soil crusts (biocrusts) on the hydrodynamic characteristics of slope flow were investigated in order to provide theoretical guidance for the study of biocrusts anti-erosive mechanism in hilly regions of the Loess Plateau. [Methods] The treatments of biocrusts coverage and destruction were set，and the artificial rainfall simulation experiments were conducted in this study. [Results] ① The slope flow of biocrusts coverage and destruction treatments was the laminar jet stream. ②The biocrusts coverage significantly reduced slope velocity，whereas increased shear stress，resistance coefficient，and stream power ($p<0.05$). Compared with the bare land，the slope velocity of algal crust and moss crust treatment decreased by 48.74% and 62.24%. The shear force，resistance coefficient，and stream power increased by 130.01% and 308.07%，703.35% and 2532.01%，21.16% and 57.43%，respectively. ③ Compared with the bare land，the resistance coefficient was no significant difference after the biocrusts were destroyed，whereas

收稿日期：2021-08-14 **修回日期**：2021-10-26

资助项目：中国科学院“西部之光”西部青年学者 A 类项目“黄土高原退耕草地近地表特征变化及其对土壤侵蚀过程的影响”(XAB2019A04)；国家自然科学基金重点项目“黄土高原刺槐人工林结构与生态功能相互作用机制及调控”(42130717)

第一作者：张慧妮(1996—)，女(汉族)，陕西省西安市人，硕士研究生，研究方向为土壤侵蚀。Email：Zhanghuini@nwafu.edu.cn。

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

the flow velocity, shear stress, and stream power were significantly higher than the bare land ($p<0.05$). The slope velocity, shear stress, and stream power of the algae crust and moss crust treatments increased by 10.84% and 16.46%, 36.8% and 42.44%, 60.8 and 62.14%, respectively. [Conclusion] The biocrusts coverage increased slope flow resistance coefficient and decreased flow velocity. After the biocrusts were destroyed, the slope flow resistance coefficient was no different from the bare land, but the flow velocity increased. Furthermore, the biocrusts coverage and destruction treatment increased shear force and stream power of the slope flow, thereby increasing the runoff erosion energy.

Keywords: biological soil crusts; algae crust; moss crust; hydrodynamics; biocrusts destruction

土壤生物结皮是由生长在土壤表面及其以下的细菌、真菌、苔藓和地衣类等个体微小的生物成分与土壤相互作用而形成的复杂复合土层[1],具有重要的生态功能。生物结皮一方面可改变表层土壤黏结力,促进土壤团聚体形成,提高土壤的抗侵蚀能力[2-3],另一方面可改善坡面入渗,影响水动力特性进而对坡面侵蚀产生影响[4-5]。如生物结皮可增加表层斥水性,形成不透水层,影响产流过程[6-7],改变坡面流流态,降低坡面流流速[8],进而减少土壤侵蚀量。黄土高原实施退耕还林(草)工程后,以藻和苔藓为主要组成物的生物结皮得以广泛发育,其盖度可达 70%左右[9]。不同类型生物结皮组成和表面微形态具有差异,藻结皮黏连作用形成无机层使表面平滑,苔藓结皮植物体密集丛生[2,10],不同类型生物结皮形成的下垫面不同,其水动力特性具有差异。此外,踩踏、冻融交替等均是自然界常见干扰,适度干扰及冻融交替可缓解区域水分状况,但也使原有结构在一定程度受到破坏,边缘翻起[11-12]。研究[13]表明生物结皮在 11 Pa 水流剪切力下会出现失效点,成层揭开,而结皮破坏后的表土由于无物理结皮保护,土壤侵蚀可能反而加剧。目前,有关生物结皮直接作用于土壤侵蚀的研究较多[14-16],而对于生物结皮覆盖及破坏状态下坡面流水动力特性研究较少。基于此,本研究采用人工模拟降雨的试验方法,探究不同类型生物结皮破坏前后坡面流水力学特征,以期为黄土高原丘陵区生物结皮坡面流侵蚀水动力研究提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验方法

1.1.1　*试验土槽及接种方法*　试供土样采自黄土丘陵沟壑区安塞县纸坊沟流域,其土壤质地为粉质壤土,机械组成为黏粒 15.74%,粉粒 63.45%,砂粒 20.81%(土壤颗粒组成采用马尔文 MS2000 激光粒度分析仪进行测定)。将试供土样过 2 mm 筛备用,填土前,将土槽调至水平,在土槽底部均匀装填0.1 m 厚的天然沙,并在沙子表面铺上透水纱布,保证土壤能够有良好的透水性。按照容重 1.2 g/cm^3 分 4 层每层 10 cm 厚填土,填装下层之前将表土打毛,消除土壤之间的分层现象。接种材料及方法:藻结皮种源为硅藻,接种量为 50 g/m^2,将藻粉溶于 1 L 水中并均匀喷洒于试验土槽表面;苔藓结皮种源采自纸坊沟流域铁杆蒿样地,选取具有成熟孢蒴的藓结皮,铲取藓结皮同 1 cm 的土层,剔出肉眼可辨的植物残渣、土块、石子并装入洁净塑料袋中,运回实验室自然风干,用粉碎机粉碎后制成种子土,接种量为 1 000 g/m^2,均匀洒于试验土槽的土壤表面,定期浇水保证结皮正常生长。

1.1.2　*试验处理*　本试验共设置 5 个处理(表 1),其中每个处理 2 个重复,共 10 个试验土槽(2.0 m×0.5 m×0.5 m)。T_0 为静置 2 个月的裸地对照处理,T_1 为种植两个月的藻结皮处理(盖度为 68.3%,厚度变化范围为 1.18～1.87 mm),T_2 为种植两个月后铲除藻结皮处理,T_3 为种植两个月的苔藓结皮处理(盖度为 59.2%,厚度变化范围为 4.00～4.18 mm),T_4 为种植两个月后铲除苔藓结皮处理。破坏处理均为轻铲掉生物结皮,使其与土壤分离,用小刷子扫去表面浮土。

1.1.3　*试验降雨过程*　2019 年 6 月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模拟降雨试验。降雨试验前将土槽缓慢喷水至饱和,减少前期含水量差异对试验的影响,试验使用 QYJY-503 侧喷式人工降雨设备,降雨高度 18 m,可调节雨强范围为 30～300 mm/h,降雨均匀度大于 80%,雨滴终点速度近似天然降雨。降雨前率定降雨强度,以确保最终调试的降雨强度的误差在 5%内。本次试验降雨坡度为 25°,试验土槽坡长为 2 m,考虑到黄土高原极端降雨情况[17],平均雨强设置为 120 mm/h,为减小试验过程中人为干扰的影响,从坡面产流 4 min 后开始计时,降雨历时为 60 min,每隔 2 min接一次径流泥沙样称重,并使用高锰酸钾染色示踪法测定 2 次水流流经坡面中段 0.5～1 m 的时间以计算流速,同时记录水流温度以计算运动黏性系数。

表 1 生物结皮各处理试验设置及说明

处理编号	处理名称	试验处理	处理表征
T_0	裸 地	静置 2 月的裸地	通用对照
T_1	藻结皮	培育 2 月藻结皮	藻结皮及物理结皮的影响
T_2	藻结皮破坏	培育 2 月后铲除藻结皮	藻结皮失效后的影响
T_3	苔藓结皮	培育 2 月苔藓结皮	苔藓结皮及物理结皮的影响
T_4	苔藓结皮破坏	培育 2 月后铲除苔藓结皮	苔藓结皮失效后的影响

1.2 水动力参数计算

为了描述坡面流水动力特征的变化,本试验选取雷诺数(R_e)、傅汝德数(F_r)、流速(V,m/s)、水流剪切力(τ,Pa)、Darcy-Weisbach 阻力系数(f)、水流功率〔ω,N/(m·s)〕参数指标进行水动力特征描述,各参数的计算公式为:

$$R_e=\frac{Vh}{\gamma} \tag{1}$$

$$F_r=\frac{V}{\sqrt{gh}} \tag{2}$$

$$V=kV_m \tag{3}$$

$$h=\frac{q}{V} \tag{4}$$

$$\tau=\rho gRJ \tag{5}$$

$$f=\frac{8gRJ}{V^2} \tag{6}$$

$$W=\tau V \tag{7}$$

式中:V 为径流平均流速(m/s);h 为坡面水深(m);γ 为运动黏性系数(m^2/s),是水流温度的函数;g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2;V_m 为坡面流表层流速(m/s);k 为修正系数,取 0.67[18];q 为流经土槽的单宽流量〔$m^3/(s\cdot m)$〕;ρ 为水的容重(kg/m^3);R 为水力半径,用水深 h 代替水力半径(m);J 为水力坡度,取坡度的正切值。

2 结果与分析

2.1 流 态

本试验中各处理坡面流平均雷诺数由大到小依次为:$T_4>T_2>T_3>T_1>T_0$,生物结皮覆盖及破坏处理均不同程度增大了雷诺数,且生物结皮破坏处理(T_2,T_4)的雷诺数高于生物结皮处理(T_1,T_3),其中生物结皮处理(T_1,T_3)的雷诺数分布范围为 22.98～46.90,生物结皮破坏处理(T_2,T_4)雷诺数分布范围为 44.57～49.67。除藻结皮处理(T_1)雷诺数变化较大外,其余各处理分布都较为集中(图 1),且均远小于 500,表明各处理(T_1,T_2,T_3,T_4)在降雨过程中黏滞力占主导地位,坡面流均为层流。傅汝德数(Fr)常用来表示水流惯性力和重力的大小,其值与 1 的大小用来确定水流的流型,各处理坡面流平均傅汝德数由大到小依次为:$T_0>T_4>T_2>T_1>T_3>1$,各处理(T_1,T_2,T_3,T_4)坡面流均为急流。生物结皮处理(T_1,T_3)的傅汝德数变化范围为 1.21～3.06 显著低于裸地($p<0.05$),其中苔藓结皮处理(T_3)傅汝德数接近于 1,显著区别于藻结皮处理(T_1)($p<0.05$)。生物结皮破坏处理(T_2,T_4)的傅汝德数变化范围为 5.93～7.75 小于裸地。研究表明生物结皮覆盖可显著降低坡面流傅汝德数($p<0.05$),结皮破坏后坡面水流流态与裸地无显著差别。

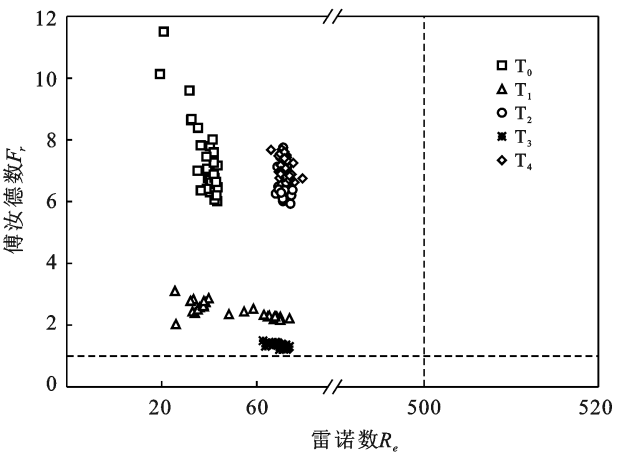


图 1 不同处理坡面水流流型、流态特征

2.2 流速和水流剪切力

流速作为坡面流观测的关键变量之一是水动力参数计算的基础[19],生物结皮处理(T_1,T_3)的流速变化较为平稳,生物结皮破坏处理(T_2,T_4)的流速波动变化(图 2)。各处理坡面流平均流速由大到小依次为:$T_4>T_2>T_0>T_1>T_3$,藻结皮处理(T_1)及苔藓结皮处理(T_3)较裸地(T_0)流速分别减少了 48.74%和 62.24%,藻结皮破坏处理(T_2)和苔藓结皮破坏处理(T_4)较裸地(T_0)流速分别增加了 10.84%,16.46%。研究表明结皮覆盖较裸地可以显著降低流速($p<0.05$),结皮破坏时流速显著增加($p<0.05$)。

水流剪切力作为一种基本的水动力学参数,对了解细沟侵蚀机理和建立侵蚀模型有重要的意义。各处理平均水流剪切力由大到小依次为:$T_3>T_1>T_2$

>T_4>T_0,水流剪切力随着降雨历时的延长均呈上升的变化趋势,其中藻结皮处理(T_1)在前 25 min 变化平稳,在 30 min 时呈快速增加的变化趋势(图 3)。藻结皮处理(T_1)及苔藓结皮处理(T_3)较裸地(T_0)水流剪切力分别增加了 130.01%和 308.07%,藻结皮破坏处理(T_2)和苔藓结皮破坏处理(T_4)较裸地(T_0)水流剪切力分别增加了 36.83%,42.44%。研究结果表明生物结皮覆盖下坡面流水流剪切力显著增加(p<0.05),结皮去除后水流剪切力较结皮覆盖减小但仍显著高于裸地(p<0.05)。

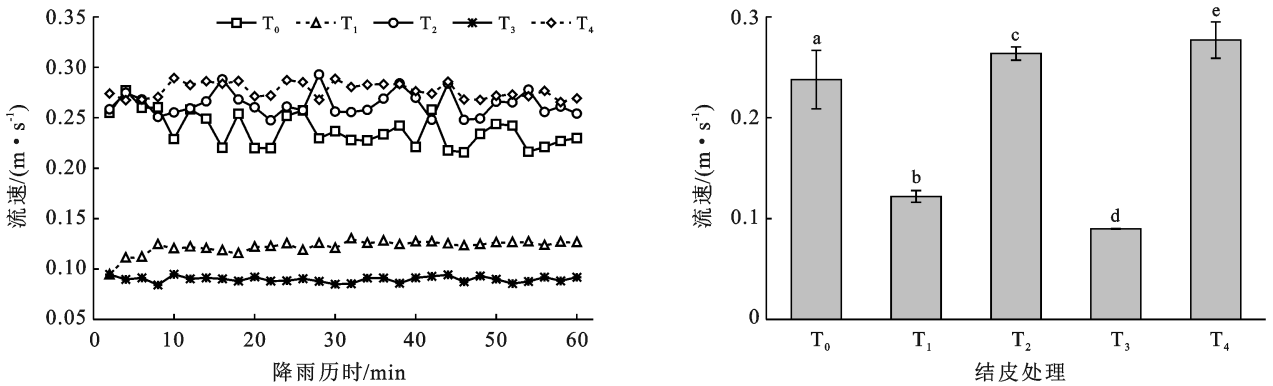


图 2　生物结皮各处理流速过程及平均值

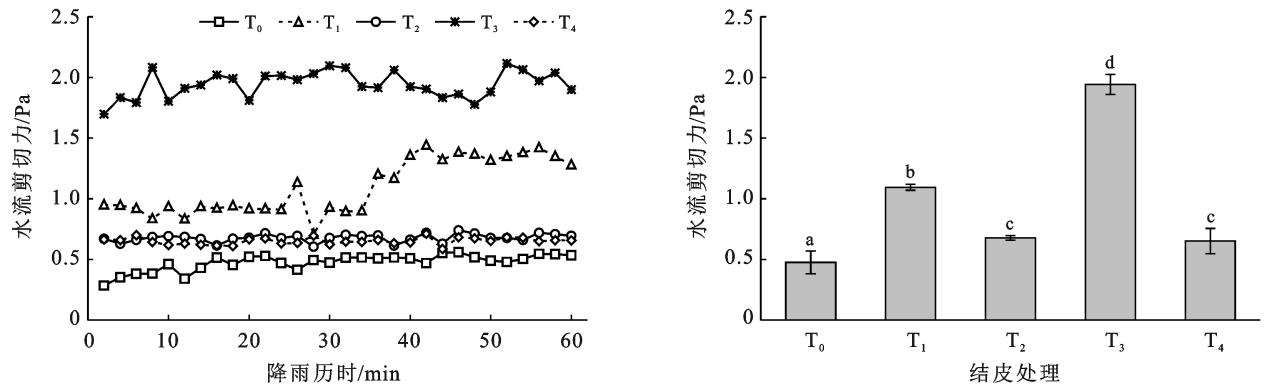


图 3　生物结皮各处理水流剪切力过程及平均值

2.3　Darcy-Weisbach 阻力系数

Darcy-Weisbach 阻力系数(f)的大小表征下垫面对水流的水力阻力状况。本试验中,阻力系数随着降雨历时的延长呈波动增加(图 4)。各处理坡面流 Darcy-Weisbach 阻力系数平均值由大到小依次为:T_3>T_1>T_2>T_0>T_4,藻结皮处理(T_1)及苔藓结皮处理(T_3)较裸地(T_0)的 Darcy-Weisbach 阻力系数分别增大了 703.35%和 2 532.01%,藻结皮破坏处理(T_2)及苔藓结皮破坏处理(T_4)与生物结皮处理(T_1,T_3)相比 Darcy-Weisbach 阻力系数分别减小了 86.52%和 96.44%,且与裸地(T_0)的 Darcy-Weisbach 阻力系数无显著差异,其中苔藓结皮破坏处理(T_4)的 Darcy-Weisbach 阻力系数甚至较裸地降低了 6.16%。试验表明生物结皮覆盖可显著增大 Darcy-Weisbach 阻力系数(p<0.05),影响坡面阻力状况,结皮破坏后 Darcy-Weisbach 阻力系数较生物结皮覆盖显著降低且与裸地无显著差别。

2.4　水流功率

水流功率表征一定高度水流在顺坡流动时所具有的势能,反映剥蚀一定量土壤所需功率。在整个降雨过程中水流功率随降雨历时呈波动增加,其中藻结皮处理(T_1)水流功率波动较大,与水流剪切力变化趋势相同,在前 25 min 变化平稳,在 30 min 时快速增加(图 5)。水流功率平均值由大到小依次为:T_4>T_2>T_3>T_1>T_0。各处理(T_1,T_2,T_3,T_4)水流功率较裸地 T_0 均不同程度显著增加(p<0.05),其中藻结皮处理(T_1)及苔藓结皮处理(T_3)较裸地(T_0)水流功率分别增大 21.16%和 57.43%,藻结皮破坏处理(T_2)和苔藓结皮破坏处理(T_4)较裸地(T_0)水流功率分别增大 60.90%和 62.14%。试验表明生物结皮覆盖下水流功率显著增加(p<0.05),结皮破坏后水流功率进一步增大。

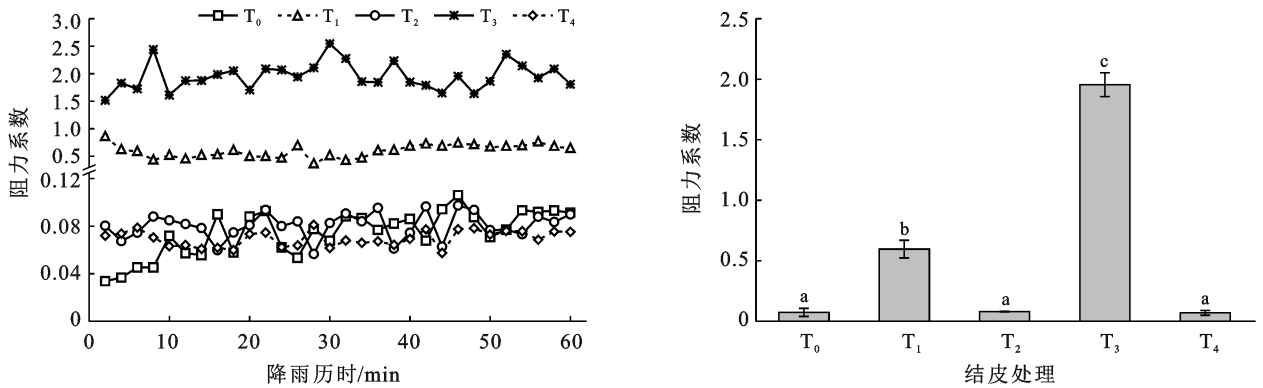


图 4 生物结皮各处理 Darcy-Weisbach 阻力系数过程及平均值

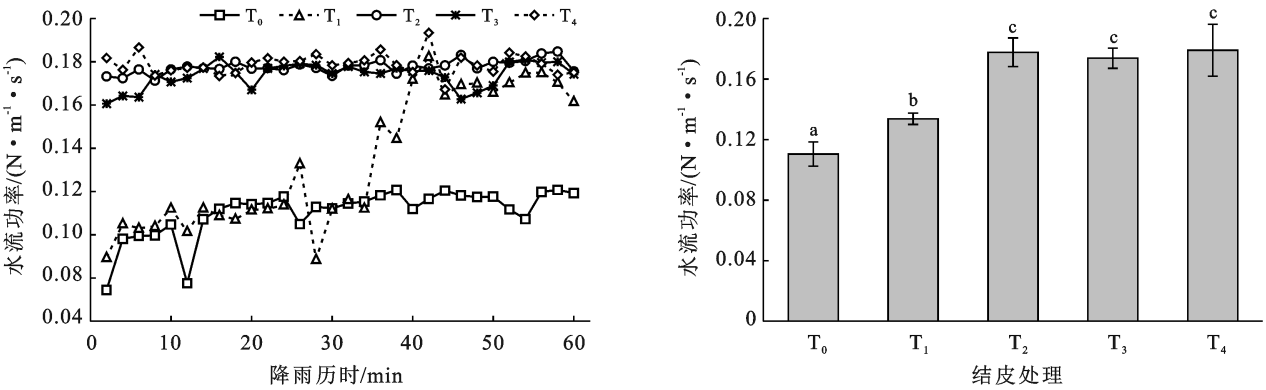


图 5 生物结皮各处理水流功率过程及平均值

3 讨 论

坡面径流作为三维、非恒定、非均匀的沿程变量流，其水动力参数非定值常数[20]，由于试验技术限制，当前研究坡面流水动力多采用借鉴明渠水流研究理论，本试验中也均借鉴明渠水流研究理论讨论坡面平均状况下的水动力特性。经典的明渠水流研究理论中雷诺数小于 500 时坡面流为层流[21]，本试验中各处理平均雷诺数均远小于 500 坡面流均为层流，薄层径流受到降雨影响虽属层流但其流体紊动强烈，当前对坡面流流态归属尚未有定论，但均认为坡面薄层水流的层流与明渠水流层流存在区别[22]。此外，当前研究表明生物结皮可显著改变坡面流流型，降低坡面径流能量[5]，本研究中生物结皮覆盖下流型虽未改变，但其坡面流傅汝德数仍显著降低($p<0.05$)，其径流流型接近于较为简单的缓流，降低坡面沟蚀发生的可能，结皮破坏后坡面流傅汝德数与裸地无显著差异。

生物结皮生长使土壤表层形成了一个渗透性和抗侵蚀性不同于下层的土层[3]，从而影响水动力过程。当前研究表明藻结皮生长发育会使表面糙度增加[23]，而苔藓结皮作为刚性植物的一种也可通过吸水体积膨胀，高度增高造成随机糙度的增大[12,24]，生物结皮通过增大表面糙度，影响坡面阻力状况，使流体动能减小，降低坡面流流速。然而，不同于藻结皮，苔藓结皮为具有一定高度的簇状生长，为径流提供通道的同时，对坡面径流形成阻水作用，使坡面形成壅水，增加径流能量消耗，因此，苔藓结皮坡面流流速较藻结皮显著降低($p<0.05$)。此外，当前研究表明生物结皮覆盖可降低土壤饱和导水率减少入渗，增加坡面径流量[25]，进而使坡面流势能增加，本试验中苔藓促进产流作用强于藻结皮，径流量的增加及流速的减小使坡面流水深增加，坡面流势能增大，表征侵蚀动力的水流剪切力及水流功率增加，生物结皮覆盖下径流潜在侵蚀能力提高。这与当前研究生物结皮可减少侵蚀的研究结果不符[14,26]，主要是由于生物结皮增加径流侵蚀力的同时，亦会影响土壤黏结力与团聚体含量，提高土壤抗冲性减少土壤侵蚀发生概率[16]。

生物结皮对环境改变、人为干扰较为敏感，生物结皮破坏后土壤可蚀性增大[15]，坡面水蚀过程取决于径流侵蚀力[27]。本试验中结皮破坏后阻力系数与裸地无差异，流速、水流剪切力、水流功率均显著高于裸地($p<0.05$)，其主要原因是结皮破坏后表面粗糙度降低，阻力状况与裸地无差异，坡面流消耗的能量减少造成流速的增加，且试验土壤为不同于沙土的粉质壤土，生物结皮破坏后土壤对水分渗透性的抑制作用不能立刻解除[3,28]，导致坡面径流量仍多余裸地，

造成了结皮破坏后流体能量的增加,水流剪切力及水流功率增高,坡面径流侵蚀力增强。

4 结 论

(1) 生物结皮覆盖及破坏下坡面流均属于层流急流,生物结皮可显著降低坡面流傅汝德数($p<0.05$),使径流运动状态接近于较简单的缓流,生物结皮破坏后坡面流流态与裸地无显著区别。

(2) 生物结皮一方面可改变地表粗糙度,增加坡面流阻力系数,增大径流消耗,降低坡面流流速。另一方面可通过增加坡面径流,使流体势能增加,增大坡面流水流剪切力及水流功率,增加径流侵蚀风险。此外,由于苔藓结皮与藻结皮结构的差异,两种类型生物结皮下坡面流水动力特征也有显著区别($p<0.05$)。

(3) 生物结皮破坏后坡面阻力状况与裸地相近,流体能量消耗减少,坡面水蚀过程取决于水流侵蚀力,坡面流流速、水流剪切力、水流功率均显著高于裸地($p<0.05$),径流侵蚀能力增强。

[参 考 文 献]

[1] Belnap J, Lange O L. Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2003.

[2] 张元明.荒漠地表生物土壤结皮的微结构及其早期发育特征[J].科学通报,2005,50(1):42-47.

[3] 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.

[4] Zhao Yunge, Xu Mingxiang. Runoff and soil loss from revegetated grasslands in the Hilly Loess Plateau Region, China: Influence of biocrust patches and plant canopies [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013,18(4):387-393.

[5] 张宝琦.生物结皮覆盖对坡面产流产沙过程的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2021.

[6] 张培培,赵允格,王媛,等.黄土高原丘陵区生物结皮土壤的斥水性[J].应用生态学报,2014,25(3):657-663.

[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] 吉静怡,赵允格,杨凯,等.生物结皮分布格局对坡面流水动力特征的影响[J].应用生态学报,2021,32(3):1015-1022.

[9] 秦宁强.黄土丘陵区生物土壤结皮对降雨侵蚀力的响应及影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2012.

[10] 王雪芹,张元明,张伟民,等.生物结皮粗糙特征:以古尔班通古特沙漠为例[J].生态学报,2011,31(14):4153-4160.

[11] 李新凯,卜崇峰,李宜坪,等.放牧干扰背景下藓结皮对毛乌素沙地土壤水分与风蚀的影响[J].水土保持研究,2018,25(6):22-28.

[12] 李盼盼,李彬彬,王兵,等.模拟氮沉降对白羊草地群落特征及其坡面流水动力特性的影响[J].农业工程学报,2020,36(16):52-61.

[13] Wang Bing, Zhang Guanghui, Zhang X C, et al. Effects of near soil surface characteristics on soil detachment by overland flow in a natural succession grassland [J]. Soil Science Society of America Journal, 2014,78(2):589-597.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 冉茂勇,赵允格,刘玉兰.黄土丘陵区不同盖度生物结皮土壤抗冲性研究[J].中国水土保持,2011(12):43-45.

[17] 李兆松,王兵,李盼盼,等.氮添加条件下白羊草种群及近地表生物结皮对土壤入渗性能的影响[J].山地学报,2018,36(3):354-363.

[18] Li Gang, Abrahams A D, Atkinson J F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1996,21(6):509-515.

[19] 张光辉.坡面薄层流水动力学特性的试验研究[J].水科学进展,2002,13(2):159-165.

[20] 张国彪.小型冲蚀槽设计中水力学参数获取及冲蚀试验效果[D].湖北 武汉:华中农业大学,2012.

[21] 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等.黄土坡面细沟与细沟间水流水动力学特性研究[J].泥沙研究,2013(6):45-52.

[22] 白玉洁,张风宝,杨明义,等.急陡黄土坡面薄层水流水力学参数变化特征[J].土壤学报,2018,55(3):641-649.

[23] 王国鹏,肖波,李胜龙,等.黄土高原水蚀风蚀交错区生物结皮的地表粗糙度特征及其影响因素[J].生态学杂志,2019,38(10):3050-3056.

[24] Wang Lunjiang, Zhang Guanghui, Zhu Liangjun, et al. Biocrust wetting induced change in soil surface roughness as influenced by biocrust type, coverage and wetting patterns [J]. Geoderma, 2017,306(15):1-9.

[25] 孙福海,肖波,李胜龙,等.黄土高原不同发育阶段生物结皮的导水和持水特征[J].草业学报,2021,30(6):54-63.

[26] 张丙昌,武志芳,李彬.黄土高原生物土壤结皮研究进展与展望[J].土壤学报,2021,58(5):1123-1131.

[27] 赵录友.基于侵蚀能量的坡面径流挟沙力研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2020.

[28] 叶菁.翻耙、踩踏对苔藓结皮的生长及土壤水分、水蚀的影响[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,2015.