

黄土高原不同降雨强度下生物土壤结皮对坡面流水动力参数的影响

张宝琦¹, 王兵^{2,3}, 许欢欢², 张慧妮², 马金龙²

(1. 黄河水利委员会西峰水土保持科学试验站, 甘肃 庆阳 745000;

2. 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 712700; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712700)

摘要: [目的]明确不同降雨强度下生物土壤结皮对坡面流水动力参数的影响, 进一步评估生物结皮的水土保持功能。[方法]以黄土高原典型藻结皮和苔藓结皮为研究对象, 系统研究了 60, 90, 120, 150, 200 mm/h 雨强下生物土壤结皮对坡面流水动力参数的影响。[结果](1) 所有雨强下藻结皮和苔藓结皮坡面流流型均为层流, 除 200 mm/h 雨强下苔藓结皮坡面流为急流外, 所有雨强下藻结皮和苔藓结皮流态均为急流;(2) 藻结皮在 90, 120, 150, 200 mm/h 雨强下流速、径流量和径流系数分别是 60 mm/h 雨强的 1.76~3.9, 4.89~9.26, 3.91~4.13 倍, 苔藓结皮则为 1.34~2.56, 5.86~13.81, 2.46~4.26 倍, 流速和径流量均随雨强呈线性函数增加($R^2 \geq 0.85$, $p < 0.01$), 径流系数呈幂函数增加($R^2 \geq 0.49$, $p < 0.05$); (3) 60, 90, 120, 150, 200 mm/h 雨强下藻结皮阻力系数和曼宁糙率系数变化范围分别为 0.15~0.74, 0.01~0.03, 苔藓结皮则为 0.82~3.02, 0.03~0.06, 阻力系数和曼宁系数均随雨强成指数函数降低($R^2 \geq 0.47$, $p < 0.05$); (4) 降雨强度与生物结皮种类均与坡面水动力参数显著相关。所有雨强下, 藻结皮坡面流速显著高于苔藓结皮(11.77%~118.31%), 而径流量、阻力系数和曼宁系数则低于苔藓结皮(1.41%~37.55%, 53.32%~90.42%和 38.08%~73.00%)。[结论]生物结皮对黄土高原坡面流水动力参数有较大影响, 未来应加强生物结皮对坡面流水动力参数的研究。研究对于黄土高原生物土壤结皮坡面流水动力参数特征具有重要意义, 可对精准侵蚀预报模型提供理论支撑。

关键词: 藻结皮; 苔藓结皮; 降雨雨强; 水动力学; 黄土高原

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0128-07

Effects of Biological Soil Crust on Dynamic Parameters of Slope Flow Under Different Rainfall Intensities in the Loess Plateau

Zhang Baoqi¹, Wang Bing^{2,3}, Xu Huanhuan², Zhang Huini², Ma Jinlong²

(1. Xifeng Soil and Water Conservation Scientific Experimental Station, Yellow River Water Conservancy

Commission, Qingyang, Gansu 745000, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland

Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 3. Institute Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to elucidate the vital role of biological soil crust in slope flow dynamic parameters under different rainfall intensities, and evaluate the soil and water conservation function of biological soil crust. [Methods] Cyanobacteria and moss crusts were chosen as the typical model crusts to

收稿日期: 2023-02-08

修回日期: 2023-06-09

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“坡面土壤分离与泥沙输移耦合关系对生物结皮发育的响应机制”(42377352); 国家自然科学基金面上项目“黄土高原疏伐强度对刺槐人工林能水平衡的影响机制”(42271042)

第一作者: 张宝琦(1994—), 女, 甘肃省会宁县人, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 18829489183@163.com

通信作者: 王兵(1982—), 男, 陕西省武功县人, 博士, 研究员, 主要从事植被恢复与土壤侵蚀研究。E-mail: bwang@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

assess the effects of biological soil crusts on slope flow dynamic parameters under rainfall intensities of 60 mm/h, 90 mm/h, 120 mm/h, 150 mm/h, and 200 mm/h, respectively. [Results] (1) Under all the tested rain intensifications, both flow patterns on the slopes with the Cyanobacteria and the moss crust present a laminar type. In addition, the flow patterns on the slopes with Cyanobacteria and moss crust show a rapid type under all tested rain intensities except for rapid flow type on the slope with the bryophyte crust flow under 200 mm/h rain intensification. (2) At 90, 120, 150 and 200 mm/h rainfall intensity, the velocity, runoff, and runoff coefficient on the slope with the Cyanobacteria under other rain intensities are 1.76~3.9, 4.89~9.26, and 3.91~4.13 times of those under the rainfall intensity of 60 mm/h, respectively, while the same evaluation is applied to the moss crust, the parameters are 1.34~2.56, 5.86~13.81, and 2.46~4.26, respectively. Additionally, the flow velocity and runoff increase linearly with the rainfall intensity ($R^2 \geq 0.85$, $p < 0.01$), and the runoff coefficient increases linearly with the power function ($R^2 \geq 0.49$, $p < 0.05$). (3) Under the rainfall intensities of 60, 90, 120, 150 and 200 mm/h, the drag coefficient and Manning roughness coefficient on the slope with Cyanobacteria vary in the range of 0.15 to 0.74 and 0.01 to 0.03, respectively, while the drag coefficient and manning roughness coefficient the slope with moss vary from 0.82 to 3.02 and 0.03 to 0.06, respectively. With increase of rainfall intensity, the drag coefficient and Manning coefficient decrease exponentially ($R^2 \geq 0.47$, $p < 0.05$). (4) Rainfall intensity and biological crusts are strongly correlated with slope hydrodynamic parameters. Under all the tested rainfall intensities, the velocity of Cyanobacteria is much higher than that of moss crust (11.77%~118.31%), while the runoff, drag coefficient, and Manning coefficient of algal crust are significantly lower than those of moss crust (1.41%~37.55%, 53.32%~90.42%, and 38.08%~73.00%). [Conclusion] The results of this study are of great significance to the characteristics of flow dynamic parameters on the slope with biological soil crust on the Loess Plateau, and provide the theoretical support for the accurate erosion prediction model.

Keywords: Cyanobacteria; mossy crust; rainfall intensity; hydrodynamics; Loess Plateau

坡面流是在经过降水或雪水融化过程中,除去土壤入渗、地表填注和植物截流等损耗后,由重力引起的地表径流^[1]。坡面流水动力学特性主要包括水流的流型流态、流速及阻力规律等^[2],其主要受坡面土壤类型、地表形态、降雨强度、土壤近地表特征等的影响^[3-5]。生物结皮是由一些微小的生物群落组成的复杂结构体,包括蓝藻、地衣和苔藓及其他微生物^[6]。我国在黄土高原地区已形成了大量的生物结皮,其覆盖程度达到70%,生物结皮具有改善土壤理化性质、提高土壤肥力^[7-8]、促进荒漠系统的物质循环^[9]、影响土壤水循环^[10]、增强土壤稳定性^[11]以及提高土壤抗侵蚀能力的生态学功能^[12-13]。坡面流水动力学特性主要包括水流的流型流态、流速及阻力规律等,同时还包含了滚波的一些演化特点。有研究表明,生物结皮对坡面的径流流速和径流深有较大的影响,从而影响坡面侵蚀动力,其影响程度与生物结皮的种类密切相关^[14]。目前有关生物结皮影响坡面流的研究多以产汇流为重点,有关坡面流对流速、阻力系数等水动力学特征的影响相对滞后,这也是造成当前生物土壤

结皮对土壤流失的作用机理尚不明确的重要因素。因此,本研究主要是以黄土高原上常见的藻结皮和苔藓为试验对象,系统研究生物土壤结皮覆盖下坡面流水动力参数的响应特征,进一步明确生物结皮对坡面水动力参数的影响机制,以期评价生物结皮对水土保持功能提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验处理

结皮种植阶段,对于藻结皮,取50 g硅藻藻粉,溶于1 L水中,均匀喷洒于裸土表面,种植面积为1 m²,共计种植12 m²;对于苔藓结皮,在安塞县铁坊沟流域选取铁杆蒿样地,采集地表苔藓结皮,风干、研磨、取1 000 g均匀撒于土壤表面,种植面积为1 m²,共计种植12 m²。种植后,每隔10 d浇水3 L。设置1组对照(裸土无处理),每个处理均2个重复。

1.2 试验方法

试验土壤采自安塞退耕土地(0—40 cm)的黄绵土,其物理特性如表1所示。在填埋土槽前,用2

mm 孔筛筛分土壤,去除残留植被和砾石。在填土槽时,应在基坑底部填入 10 cm 的细沙,以确保土壤水分均匀下渗,并在沙层与土层之间铺设一层纱布。在填过程中,分层填埋,每层 5 cm,共 6 层,每层填土前先把表层刮掉,以消除分层。各层填土容重为 1.2 g/cm³。填土完成后沉降 2 个月,再将藻结皮和苔藓结皮分别喷洒于土壤表层,每个土槽喷洒等量的水,然后在两个月后进行降雨试验。苔藓结皮种源产于陕西西安塞县的纸坊沟、县南沟。

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil for experiment

有机质/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	土壤颗粒组成/%		
			黏粒	粉粒	沙粒
3.518	0.02	1.355	15.74	63.45	20.81

1.3 降雨过程及指标测定

降雨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。本装置使用 QYJY-503 固定人工装置,该设备采用组合喷头进行降雨,喷头设置高度为 18 m,雨滴大小为 0.4~6 mm,可调节雨强 30~300 mm/h,降雨均匀度大于 0.8,雨滴终点速度近似自然降雨。该试验选取生长特性最佳的苔藓结皮和藻结皮处理,设定不同的降雨量梯度(60, 90, 120, 150, 200 mm/h),试验坡度为 25°。

降雨前一天,对每个土槽开始洒水,直至土槽含水量达到饱和,静置一晚后开始降雨,以确保降雨时前期含水量达到一致。在对试验土槽降雨前,先用塑料布将其覆盖,等降水强度稳定后,率定雨强,再进行降雨;揭开塑料布之后开始计时,记录坡面开始产生径流时的产流时间,用塑料桶收集第一个泥沙样品;接着每隔 2 min 进行 1 次。降水持续时间为 60 min,共计 30 个样品;每接一个样之前用高锰酸钾溶液测量其流速;在降雨前、中、末 3 个时段记录水温。此外,在降雨完成之后,再用 5 min 时间率定雨强,以确保降雨强度的大小前后是否一致。

1.4 水动力参数计算

此次试验中采用的水动力参数指标主要是雷诺数(Re)、弗汝德数(Fr)、阻力系数(f)、曼宁糙率系数(n),具体计算过程如下所示:

$$Re = \frac{Vh}{\nu} \quad (1)$$

$$h = \frac{q}{v} \quad (2)$$

$$n = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.00221t^2} \quad (3)$$

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (4)$$

$$f = \frac{8gRJ}{V^2} \quad (5)$$

$$n = \frac{R^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}}}{V} \quad (6)$$

式中: q 为单宽流量(m²/s); V 为水流流速(m/s); h 为水深(m); ν 为运动黏滞系数(m²/s); R 为水力半径,用水深 h 代替(m); t 为水温(°C); g 为重力加速度(m/s²); J 为水力能坡(Pa)。

2 结果与分析

2.1 不同降雨强度坡面流速的变化

生物结皮和裸地坡面流速与降雨强度之间存在显著的相关关系,随着降雨强度的增加,坡面流速显著增大。当降雨强度为 60, 90, 120, 150, 200 mm/h 时,藻结皮和苔藓结皮坡面流速均值分别为 0.06, 0.09, 0.10, 0.17, 0.19 m/s, 相对于裸地处理坡面流速分别减少了 21.48%, 1.47%, 45.65%, 12.88%, 42.49%。生物结皮种类在不同降雨条件下,对坡面流流速的影响表现为藻结皮 > 苔藓结皮。通过对降雨强度与生物结皮坡面流流速的相关性分析进一步表明,藻结皮、苔藓结皮和裸地坡面流流速均随降雨强度的增加呈线性增大趋势,其函数形式均能表现为 $y = ax + b$ 形式($R^2 \geq 0.85$, $p < 0.05$)。

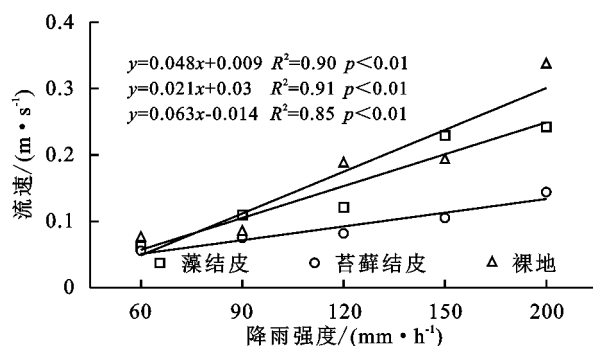


图 1 生物结皮覆盖坡面降雨强度与流速的关系

Fig. 1 Relationship between rainfall intensity and flow velocity on slope covered by biological crust

2.2 降雨强度对生物结皮坡面流量和径流系数的影响

降雨对坡面径流量有显著影响。随着降雨历时的延长,藻结皮、苔藓结皮和裸地坡面的径流总体上呈现出稳定的趋势。相对于裸地坡面,在 60, 200 mm/h 雨强下,藻结皮坡面径流量分别减少了 71.92% 和 14.55%,苔藓结皮坡面径流量减少了 55.04% 和 8.26%,在 90, 120, 150 mm/h 雨强下,藻结皮坡面径流量增大了 27.32%, 22.59% 和 14.55%,苔藓结皮坡面径流量增加了 70.04%,

18.53%和 11.67%。由图 3 图可知,藻结皮、苔藓结皮和裸地坡面降雨强度与总径流量呈现极显著的线性函数增大关系($R^2 \geq 0.90$; $p < 0.01$)。坡面总产流量整体上表现为苔藓结皮>裸地>藻结皮。

随着雨强的增大,生物结皮覆盖坡面径流系数整体上呈增大趋势。在 60~200 mm/h 雨强中,苔藓结皮坡面径流量较藻结皮增加了 7.37%。与裸地对照

相比,在 60,200 mm/h 雨强中,藻结皮坡面径流系数分别减少了 20.87%,2.75%,苔藓结皮坡面径流系数增大了 55.04%,8.26%;在 90,120,150 mm/h 雨强中,藻结皮径流系数增加了 1.89%~27.32%,苔藓结皮径流系数增加了 11.67%~70.04%。由图 3 图可知,藻结皮、苔藓结皮和裸地坡面降雨强度与径流系数呈现极显著的幂函数增大关系($R^2 > 0.49$; $p < 0.05$)。

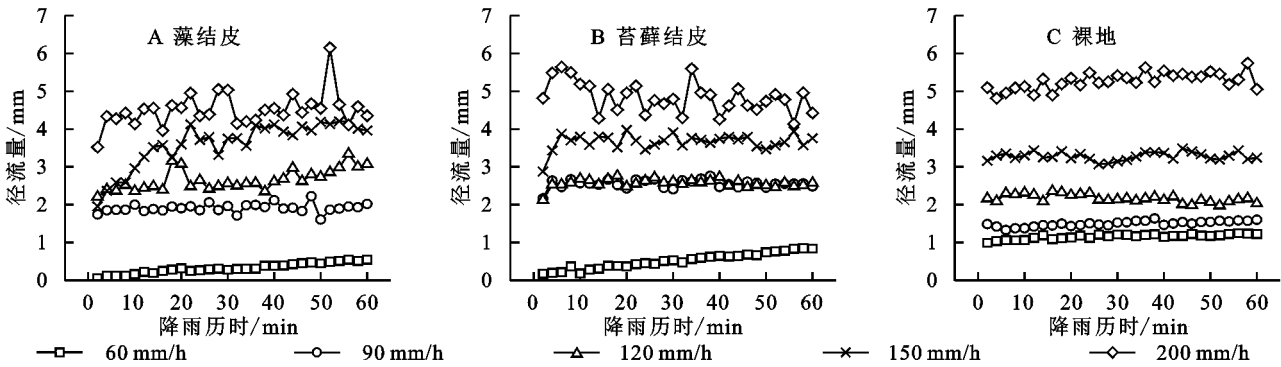


图 2 不同降雨强度下生物结皮覆盖坡面径流量随降雨历时变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of slope runoff covered by biological crust with rainfall duration under different rainfall intensities

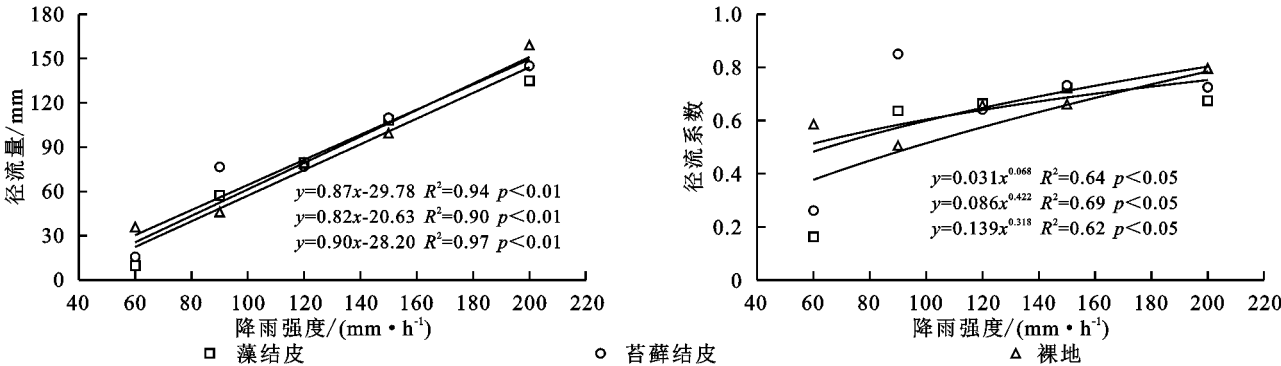


图 3 生物结皮覆盖坡面降雨强度与径流量和径流系数的关系

Fig. 3 Relationship between rainfall intensity and runoff and runoff coefficient on slope covered by biological crust

2.3 不同降雨强度坡面流流态的变化

水流流态是反映坡面薄层流动力学特征的基本参数,与坡面径流计算及输沙密切相关,因此研究坡面薄层水流流态具有重要的科学意义,可用雷诺数和弗汝德数进行判别^[10]。根据明渠均匀流的基本理论,当雷诺数(Re)大于 500 时,属于紊流,雷诺数(Re)小于 500 时,属于层流,雷诺数(Re)在 500 左右时属于过渡流。此外,弗汝德数也是反映水流流态的重要指标,反映了流速与径流深的对比关系。当弗汝德数 $Fr \geq 1$ 时,坡面流流态属于急流,弗汝德数 $Fr < 1$ 时,坡面流流态属于缓流。在此次研究中,生物结皮坡面雷诺数和弗汝德数均随降雨强度的增加而增加。在不同降雨条件下,藻结皮和苔藓的雷诺数在 5.25~77.81 区间,均小于 500,因此水流流态属于层流。藻结皮坡面弗汝德数均 > 1 ,属于急流,苔藓结皮在雨强为 200 mm/h 时弗汝德数 > 1 ,属于急流,其他

降雨条件下均属于缓流。

2.4 降雨强度对生物结皮坡面 Darcy-weisbach 阻力系数和曼宁系数的影响

阻力系数 f 反映了坡面流在流动过程中所受的阻力大小,阻力系数愈高,水流克服坡面阻力所消耗的能量愈多,为坡面侵蚀与泥沙输移所需的能量愈小^[15],曼宁糙率系数也是反映阻力作用的参数。随着降雨强度的增加,生物结皮与裸地坡面阻力系数整体呈降低趋势,且均与降雨强度呈显著的指数函数关系($R^2 \geq 0.47$, $p < 0.05$)。在 60,90,120,150,200 mm/h 雨强下,苔藓结皮阻力系数和曼宁糙率系数是藻结皮坡面的 2.14~10.44 倍和 1.02~11.31 倍,是裸地坡面的 1.62~3.70 倍和 1.63~3.83 倍。在 60,90,150 mm/h 雨强中,藻结皮坡面阻力系数较裸地坡面减少了 59.02%,50.61%和 45.08%,曼宁系数较裸地坡面减少了 48.09%,28.69%和 25.01%;在 120,200

mm/h 雨强中,藻结皮坡面阻力系数是裸地坡面的 3.72, 2.20 倍,曼宁糙率系数是裸地坡面的 2.09, 1.53

倍。结果表明:苔藓覆盖能明显提高土壤的阻力系数,而藻结皮覆盖对坡面阻力系数无显著规律性。

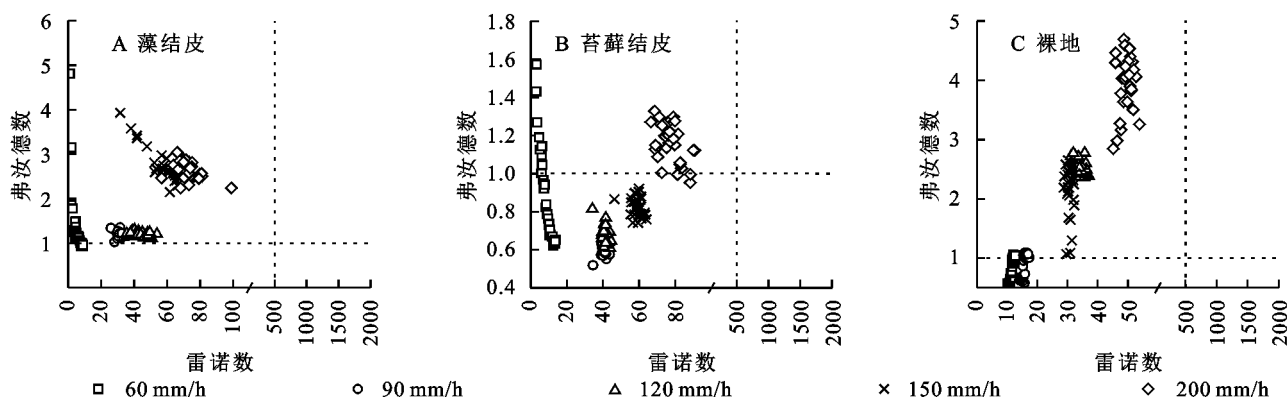


图4 不同降雨强度下生物结皮覆盖坡面水流流态流型特征

Fig. 4 Flow pattern characteristics of biological crust-covered slope under different rainfall intensities

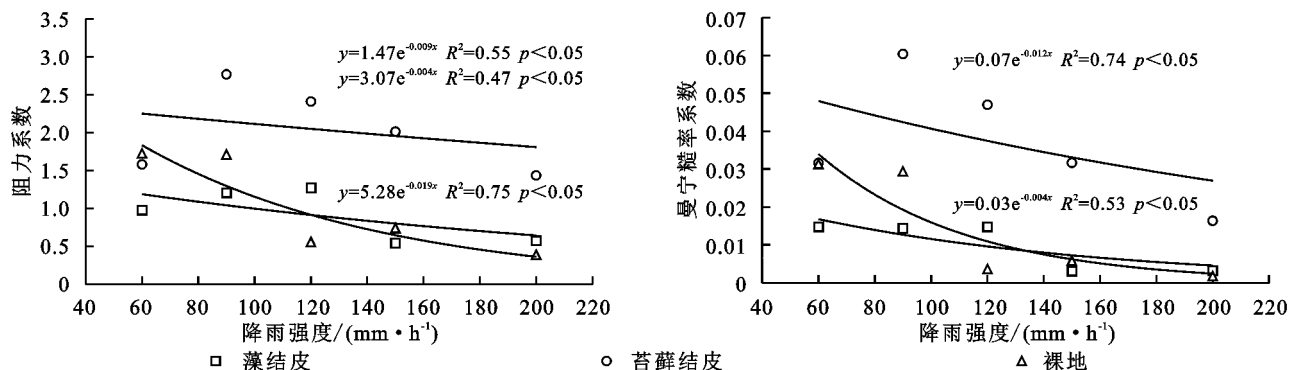


图5 生物结皮覆盖坡面降雨强度与阻力系数和曼宁系数的关系

Fig. 5 Relationship between rainfall intensity and resistance coefficient and Manning coefficient on slope covered by biological crust

3 讨论

降雨作为重要的驱动力来源,其对坡面流态特征和土壤侵蚀过程产生显著影响^[16]。降雨强度通过影响坡面流流速和径流深进而影响坡面流流型和流态特征及水动力参数^[17],径流量越大,坡面流速也越大,水流沿坡面的惯性力越大^[18],坡面的径流侵蚀能随之增大。在此次研究中,雷诺数、弗汝德数随降水强度的增加而增加,但坡面雷诺数均小于 500,属于层流,薄层径流受到降雨影响虽属层流但其流体紊动强烈。另外,Darcy-weisbach 阻力系数和曼宁糙率系数是反映水流阻力特性的重要参数。随着降雨强度的增加,坡面阻力系数和曼宁糙率系数也不断增大,表明降雨强度“减阻”作用越明显,这是由于暴雨打击坡面薄层水流的能量增强,从而削弱了坡面流的打击和扰动,进而提高平均流速。这与王俊杰等^[19]在不同雨强和糙度条件下模拟试验所得阻力系数随着降雨强度增加而减小的结论一致。通过对降雨强度与水动力参数的双因素方差分析得出,降雨强度与流速、径流量、阻力系数和曼宁糙率系数显著相关。

除降雨强度影响坡面水动力参数,下垫面性质也会影响坡面水动力参数。生物结皮是黄土高原地区广泛存在的地被物,盖度高达 70% 以上,对坡面水动力参数有显著的影响,通过对生物结皮类型与坡面水动力参数的双因素方差分析得出,结皮类型与坡面流速、径流量、阻力系数和曼宁糙率系数显著相关(表 2)。藻结皮以光滑的膜附着在土壤表面,相对于苔藓结皮地表光滑,地表粗糙度较小,而苔藓结皮是具有一定高度的簇状生长^[20],通过吸水、失水以及土壤胀缩导致的地表凹凸程度的变化^[21],为径流提供通道的同时,对坡面径流形成阻水作用,因此,苔藓结皮坡面流速低于藻结皮,增大了坡面阻力系数和曼宁系数。此外,本试验中,苔藓结皮坡面促进坡面产流方面显著高于藻结皮坡面,可能藻结皮较苔藓结皮更不易堵塞毛孔,因为苔藓结皮面积较大,足以完全填满土壤孔隙,从而使入渗速度减缓。Wang 等^[22-23]对黄土高原生物结皮入渗的研究认为苔藓结皮阻渗作用显著高于藻结皮。Li 等^[24]对毛乌素沙地的研究表明苔藓结皮阻渗作用高于藻结皮;而且随着结皮厚度的增大,渗透率也随之增大,渗透深度也随之下降。

表 2 生物结皮类型、降雨强度与水动力参数的双因素方差分析

Table 2 Two-factor variance analysis of biological crust type, rainfall intensity and hydrodynamic parameters

水动力参数	因素	Df	III 型平方和	均方	F	p-value
流速	降雨强度	4	0.107	0.027	14.461	<0.001
	结皮种类	1	0.008	0.008	4.530	0.046
	降雨强度×结皮种类	4	0.008	0.002	1.125	0.037
径流量	降雨强度	4	45053.417	11263.354	1142.819	<0.001
	结皮种类	1	279.014	279.014	28.310	<0.001
	降雨强度×结皮种类	4	337.969	84.492	8.573	<0.001
阻力系数	降雨强度	4	7.393	1.848	44.781	<0.001
	结皮种类	1	15.250	15.250	369.485	<0.001
	降雨强度×结皮种类	4	2.299	0.575	13.925	<0.001
曼宁系数	降雨强度	4	0.002	0.000	77.991	<0.001
	结皮种类	1	0.004	0.004	723.063	<0.001
	降雨强度×结皮种类	4	0.000	9.605×10^{-5}	18.237	<0.001

4 结 论

(1) 藻结皮对水动力参数的影响低于苔藓结皮。所有雨强中,藻结皮和苔藓结皮坡面雷诺数介于 5.25~77.81 之间,均小于 500,因此水流流态属于层流。藻结皮坡面弗汝德数均>1,属于急流,苔藓结皮在雨强为 200 mm/h 时弗汝德数>1,属于急流。

(2) 降雨强度对水动力参数及径流量有显著影响。随着降雨强度的增加,藻结皮、苔藓结皮和裸地坡面流速、径流量和径流系数不断增大,阻力系数和曼宁系数不断减小。同时,降雨强度与藻结皮、苔藓结皮和裸地坡面流速和径流量呈显著的线性函数增大关系,与径流系数呈显著的幂函数增加关系,与阻力系数和曼宁系数呈显著的指数函数减小关系。

(3) 生物结皮种类与水动力参数均显著相关,藻结皮覆盖坡面平均流速高于苔藓结皮,径流量、阻力系数和曼宁糙率系数均低于苔藓结皮,因此苔藓结皮可以促进坡面产流,对坡面水动力参数的影响高于藻结皮。苔藓结皮对水力参数及径流量的影响显著高于裸地,但藻结皮和裸地之间并无显著差别。

参考文献(References):

[1] 张光辉.国外坡面径流分离土壤过程水动力学研究进展[J].水土保持学报,2000,14(3):112-115.
Zhang G H. Summary study on runoff detachment processes based on hydraulics[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2000,14(3):112-115.

[2] 赵春红.坡面侵蚀性降雨径流水动力学特性及其对输沙的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2014.
Zhao C H. Slopeland Erosive Rainfall Runoff Hydraulics

and Its Effect on Sediment Transport [D]. Yangling Shannxi: Northwest A&F University, 2014.

[3] 王晨沣,王彬,王玉杰,等.不同土壤前期含水率和坡度下黄壤分离临界水动力特性[J].农业机械学报,2017,48(4):224-232.
Wang C F, Wang B, Wang Y J, et al. Critical hydraulic characteristics of yellow soil detachment under different antecedent soil moisture contents and slope gradients [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(4): 224-232.

[4] 张光辉.退耕驱动的近地表特性变化对土壤侵蚀的潜在影响[J].中国水土保持科学,2017,15(4):143-154.
Zhang G H. Potential effects of changes in near soil surface characteristics driven by farmland abandonment on soil erosion[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017,15(4):143-154.

[5] Wang J W, Zhang K D, Yang M Y, et al. The effect of roughness and rainfall on hydrodynamic properties of overland flow[J]. Hydrology Research, 2019, 50(5): 1324-1343.

[6] Bowker M A. Biological soil crust rehabilitation in theory and practice: An underexploited opportunity[J]. Restoration Ecology, 2007,15(1):13-23.

[7] 贺韵雅,于海峰,逢圣慧.生物土壤结皮的生物学功能及其修复研究[J].地球与环境,2011,39(1):91-96.
He Y Y, Yu H F, Pang S H. Studies of biological functions and restoration of biological soil crusts[J]. Earth and Environment, 2011,39(1):91-96.

[8] 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矿化潜力的影响[J].应用生态学报,2018,29(4):1283-1290.

- Yang X Q, Xu M X, Zhao Y G, et al. Effects of trampling disturbance on soil organic carbon fractions and mineralization potential of biological soil crusts in the Loess Plateau Region, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(4):1283-1290.
- [9] Jeffries D L, Klopatek J M, Link S O, et al. Acetylene reduction by cryptogamic crusts from a blackbrush community as related to resaturation and dehydration[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1992, 24(11):1101-1105.
- [10] Darby B J, Neher D A, Belnap J. Soil nematode communities are ecologically more mature beneath late-than early-successional stage biological soil crusts[J]. Applied Soil Ecology, 2007, 35(1):203-212.
- [11] Eldridge D J, Kinnell P I A. Assessment of erosion rates from microphyte-dominated calcareous soils under rain-impacted flow[J]. Soil Research, 1997, 35(3):475-490.
- [12] 秦宁强, 赵允格. 生物土壤结皮对雨滴动能的响应及削减作用[J]. 应用生态学报, 2011, 22(9):2259-2264.
- Qin N Q, Zhao Y G. Responses of biological soil crust to and its relief effect on raindrop kinetic energy[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(9):2259-2264.
- [13] 谢申琦, 高丽倩, 赵允格, 等. 模拟降雨条件下生物结皮坡面产流产沙对雨强的响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(2):391-397.
- Xie S Q, Gao L Q, Zhao Y G, et al. Responses of runoff and soil loss from biological soil crustal slope to rainfall intensity under simulated rainfall[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(2):391-397.
- [14] 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.
- Li L, Zhao Y G, Wang Y H, et al. Impact of different types of biological soil crusts on slope runoff generation[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(6):1013-1023.
- [15] 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.
- Li P P, Li B B, Wang B, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on the *Bothriochloa ischaemum* community and its hydrodynamic characteristics of overland flow[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(16):52-61.
- [16] 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.
- Bai Y J, Zhang F B, Yang M Y, et al. Variation of hydraulic parameters of shallow flow on steep loess slope[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(3):641-649.
- [17] 张科利. 黄土坡面发育的细沟水动力学特征的研究[J]. 泥沙研究, 1999(1):56-61.
- Zhang K L. Study on hydrodynamic characteristics of rills developed on loess slope[J]. Journal of Sediment Research, 1999(1):56-61.
- [18] 安妙颖, 韩玉国, 王金满, 等. 黄土丘陵区坡面薄层水流动力学特性及其对土壤侵蚀的影响[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(2):142-150.
- An M Y, Han Y G, Wang J M, et al. Hydrodynamic characteristics of overland flow and its impact on erosion in Loess Hilly Region[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(2):142-150.
- [19] 王俊杰, 张宽地, 杨苗, 等. 雨强和糙度对坡面薄层水流动力学特性的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9):147-154.
- Wang J J, Zhang K D, Yang M, et al. Influence of rainfall and roughness on hydrodynamic characteristics of overland flow[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(9):147-154.
- [20] Wang L J, Zhang G H, Zhu L J, et al. Biocrust wetting induced change in soil surface roughness as influenced by biocrust type, coverage and wetting patterns[J]. Geoderma, 2017, 306:1-9.
- [21] 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]. 生态学报, 2019, 38(10):3050-3056.
- Wang G P, Xiao B, Li S L, et al. Surface roughness of biological soil crusts and its influencing factors in the water-wind erosion crisscross region on the Loess Plateau of China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(10):3050-3056.
- [22] Wang H, Zhang G H, Liu F, et al. Effects of biological crust coverage on soil hydraulic properties for the Loess Plateau of China[J]. Hydrological Processes, 2017, 31(19):3396-3406.
- [23] Wang H, Zhang G H, Liu F, et al. Temporal variations in infiltration properties of biological crusts covered soils on the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2017, 159:115-125.
- [24] Li B, Gao J R, Wang X R, et al. Effects of biological soil crusts on water infiltration and evaporation Yanchi Ningxia, Maowusu Desert, China[J]. International Journal of Sediment Research, 2016, 31(4):311-323.