

黄土高原生物结皮混合群落对坡面流 流体阻力特征的影响

白洁¹, 王兵^{1,2}, 杨艳芬^{1,2}, 李成芳¹, 王静¹, 马金龙¹

(1. 西北农林科技大学水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 为明确生物结皮影响坡面流阻力作用机制, 研究不同生物结皮类型组成的混合群落对坡面流颗粒阻力(f_g)和形态阻力(f_i)的影响。[方法] 采集3种(以藻为主、藻藓比例相当、以藓为主)混合生物结皮原状土壤样品84个, 设置7组坡度和流量组合, 采用变坡水槽冲刷试验, 系统研究不同水动力条件下坡面流阻力特征对生物结皮响应。[结果] 1) 坡面流流经生物结皮覆盖区流速减少8.5%~57.3%, 水深增加5.4%~70.6%; 生物结皮混合群落缓流效率随藓类结皮占比的增加显著增强, 以藓为主混合生物结皮(T_3)缓流效率是其他生物结皮混合群落的1.1~2.5倍。藓类结皮占比的增加降低弗劳德数(Fr), 增加雷诺数(Re), 未改变流型流态。2) 生物结皮混合群落覆盖显著增加总阻力 f (Darcy-Weisbach阻力系数), 且 f 随 Re 和 Fr 的增加呈幂函数降低($R^2 \geq 0.46$, $p < 0.01$), 与藓生物量(M_{moss})呈显著正相关($p < 0.05$)。3) 生物结皮覆盖显著增加坡面流 f_i , 不同坡度、流量及生物结皮混合群落覆盖条件下, f_i 占 f 的主要部分; f_g 与泥沙浓度(q_s)呈显著相关($p < 0.05$), f_i 与 M_{moss} 呈显著正相关($p < 0.05$)。4) Savat模型计算的坡面流 f_g 不适用于生物结皮覆盖下的低泥沙浓度坡面流; 基于 f_g 和 f_i 的影响因子, 构建生物结皮覆盖下的坡面流 f 系数方程 $f = Re^{-1.0214} \times M_{\text{moss}}^{0.311} \times 10^{3.793}$ 。[结论] 生物结皮覆盖下, 坡面流 f_g 显著增加是导致其总阻力增加的主要原因, 且主要受藓类结皮占比影响。研究结果对深入理解生物结皮影响坡面流阻力作用机制具有重要意义, 可为黄土高原生物结皮防控土壤侵蚀提供理论基础。

关键词: 黄土高原; 生物结皮; 阻力系数; 颗粒阻力; 形态阻力

中图分类号: S154.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0177-10

Effects of Mixed Communities of Biological Crusts on Fluid Resistance Characteristics of Overland Flow on the Loess Plateau

BAI Jie¹, WANG Bing^{1,2}, YANG Yanfen^{1,2}, LI Chengfang¹, WANG Jing¹, MA Jinlong¹

(1. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of

Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to clarify the mechanisms by which biological soil crust (BSCs) influence overland flow resistance, focusing on the effects of mixed biocrust communities on grain resistance (f_g) and form resistance (f_i). [Methods] A total of 84 undisturbed soil samples with three different mixed BSCs compositions (algae-dominated, equal algae-moss ratio, and moss-dominated) were collected, flume scouring experiments under seven combinations of slope gradient and flow discharge were set up, and the response of overland flow resistance characteristics to BSCs was systematically investigate under different hydrodynamic conditions.

收稿日期: 2024-12-26

修回日期: 2025-02-21

录用日期: 2025-04-14

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-05-23

资助项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF1305103); 国家自然科学基金面上项目(42377352); 中国科学院“西部之光”西部青年学者A类项目(XAB2022YW03)

第一作者: 白洁(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 1608436422@qq.com

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

http://stbxb.alljournal.com.cn

[**Results**] 1) Biocrust coverage reduced the velocity of overland flow by 8.5%—57.3% and increased water depth by 5.4%—70.6%. The flow slowing effect of mixed BSCs was enhanced significantly with the increasing proportion of moss crust, with the flow slowing effect of moss-dominated community (T3) being 1.1 to 2.5 times greater than that of other mixed BSCs. Increased moss proportion reduced Froude number (Fr) and increased Reynolds number (Re) without altering the flow pattern or flow regime. 2) Coverage of mixed communities of biological crust significantly increased the total resistance (Darcy-Weisbach resistance coefficient) f , which decreased as a power function with the increase of Re and Fr ($R^2 \geq 0.46$, $p < 0.01$), and showed a significant positive correlation with the biomass of moss crust (M_{moss}) ($p < 0.05$). 3) BSCs coverage significantly increased the f_i of overland flow, which was the dominant part of the f of overland flow under different slope gradients, flow discharges, and BSCs coverage conditions. The f_g was significantly correlated with sediment load (q_s) ($p < 0.05$), and f_i was positively correlated with M_{moss} ($p < 0.05$). 4) The f_g calculated by Savat model was not applicable to overland flow with low q_s under BSCs coverage. Based on the influencing factors of f_g and f_i , a new equation for the f of overland flow under BSCs coverage was established: $f = Re^{-1.0214} \times M_{\text{moss}}^{0.311} \times 10^{3.793}$. [**Conclusion**] Under BSCs coverage, the main reason for the increase of the f of overland flow is the increase of the f_i , which is mainly affected by the proportion of moss crust. The study is of great significance for clarifying the mechanism of BSCs affecting overland flow resistance, and provides a theoretical basis for using BSCs to prevent and control soil erosion on the Loess Plateau.

Keywords: the Loess Plateau; biological soil crusts; resistance coefficient; grain resistance; form resistance

Received: 2024-12-26

Revised: 2025-02-21

Accepted: 2025-04-14

Online(www.cnki.net): 2025-05-23

生物土壤结皮(简称生物结皮)是细菌、真菌、蓝藻、苔藓和地衣等个体微小的生物成分与土壤颗粒间相互作用形成的有机复合层^[1]。作为干旱半干旱地区常见的地表覆被物^[2],生物结皮不仅通过保护土壤免受雨滴击溅和径流冲刷来减少土壤侵蚀^[3-4],还通过改变地表粗糙度而影响坡面流水动力学特征,进而调控土壤侵蚀和生态水文过程^[5]。受生物结皮类型的影响,其地表形态差异导致其对坡面水动力特性的影响有所不同,藓结皮吸水膨胀后,可形成一定高度的簇状形态,使其表面粗糙度增大,从而降低坡面流流速、并形成壅水,增加径流能量的消耗,进而削弱坡面流侵蚀动力^[6]。藻结皮则较藓结皮相对平滑,二者对于坡面入渗和产流过程的影响存在差异^[7]。坡面生物结皮多是由不同比例藻类、藓类等混生而成的群落,藻结皮和藓结皮的盖度及占比使得生物结皮混合群落对坡面流水动力学特性的影响更加复杂,导致生物结皮混合群落及其藻类和藓类比例影响坡面流阻力特征机制尚不清楚^[8-9]。

径流阻力主要由颗粒阻力、形态阻力、波阻力和降雨阻力组成。对于坡面而言,径流阻力主要受到颗粒阻力(f_g)和形态阻力(f_i)的影响^[10],波阻力和雨阻力相对较小可忽略^[11]。颗粒阻力主要与径流中泥沙浓度和水流 Re 有关^[12],形态阻力主要与地表覆被物形状、排列方式及覆盖率等因素有关^[13]。其中,颗粒阻力通常

采用 SAVAT^[14]算法计算而来,但对于泥沙质量分数较低的径流,该算法的适用性仍有待评估。对于形态阻力,多采用规则 PVC 管模拟并计算植被存在下坡面流形态阻力^[15-16]。然而自然植被往往形状差异较大,传统方法测定计算的形态阻力误差较大,坡面流形态阻力多采用总阻力(如 Darcy-Weisbach 阻力系数)与裸地处理下的颗粒阻力相减得到^[12]。

生物结皮可改变坡面流阻力特征,而现有研究^[17-18]多关注总阻力,而未区分颗粒阻力和形态阻力及二者对坡面流阻力的贡献,无法揭示其对坡面流阻力的影响机制。黄土高原地区曾是我国水土流失最严重的区域,随着退耕还林(草)工程的实施,水土流失得到有效控制,生物结皮广泛发育,其盖度可达 70% 以上^[2]。以藻类为主和以藓类为主,以及藻类和藓类比例接近是常见的生物结皮混合群落组成类型,其组成差异可显著影响坡面流阻力特征。鉴于此,本研究以不同组成类型的生物结皮混合群落为研究对象,通过设定不同坡度流量组合,系统研究生物结皮混合群落不同比例条件下坡面流流速和水深的变化特征及其对流型和流态影响;明确不同阻力形式的特征差异及其影响因素,量化颗粒阻力(f_g)和形态阻力(f_i)对总阻力的贡献;揭示生物结皮影响坡面流不同阻力形式的机制,构建基于水动力参数、泥沙浓度和生物结皮特征的总阻力拟合方程。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市安塞区(36°51′30″N, 109°19′23″E),室内冲刷试验依托于陕西安塞农田生态系统国家野外科学观测研究站进行。研究区域属典型的黄土高原丘陵沟壑区,海拔 1 068~1 309 m,年平均气温 8.8 ℃,年平均降水量 500 mm,降水年内分配不均,7—9 月降水量占全年的 95%,该区属暖温带半干旱大陆性季风气候,植被类型为森林草原区,森林覆盖率为 17.7%,土壤类型主要为黄绵土,黏粒、粉粒、砂粒质量分数分别为 14.53%、23.30%、61.54%。研究区生物结皮以藻类结皮和藓类结皮为主,已经鉴别的藓类结皮种类包括短叶对齿藓(*Didymodon tectorum*)、土生对齿藓(*Didymodon vinealis*)、银叶真藓(*Bryum argenteum*)、丛生真藓(*Bryum caespiticium*)、极地真藓(*Bryum arcticum*)、皱叶毛口藓(*Tichostomum crispulum*)、流苏藓(*Crossidium squamiferum*)和钝叶芦荟藓(*Aloina rigida*)8 种,其中短叶对齿藓和土生对齿藓为优势种

群落^[19]。藻类结皮一般分布在阳坡,以狭细席藻(*Phormidium angustissimum*)和小席藻(*Phormidium tenue*)为优势种,念珠藻(*Nostoc spp*)为次优势种群落^[20]。

1.2 试验处理及样品采集

本研究以黄土高原退耕后广泛发育的生物结皮为研究对象^[21],设置以藻为主混合生物结皮(T₁)、藻藓比例相当混合生物结皮(T₂)、以藓为主混合生物结皮(T₃)3 个处理。为避免生物结皮样地的空间异质性,所有样地具有相似的坡向、坡度和坡位;并去除表层生物结皮作为裸土对照(T₀)。生物结皮原状土样使用矩形环刀采集,长、宽和高分别为 40、10、10 cm。小心取样避免生物结皮破碎,用保鲜膜包裹并于 24 h 内完成样品冲刷试验。设置 7 组坡度流量组合,每组水动力条件下设置 4 个原状土壤样品作为重复。分别测定引流槽及生物结皮区域水动力学特性。本试验共计采集原状土壤样品 112 个,其中,生物结皮样品 84 个,原状裸土样品 28 个。考虑到该地区降雨强度及坡度的差异,结合试验条件,不同处理生物结皮混合群落特征及坡度流量组合见表 1。

表 1 生物结皮混合群落特征及坡度流量

Table 1 Characteristics of mixed communities of biological soil crusts and settings of slope discharges

处理	厚度/ mm	藓类结皮 生物量/ (g·cm ⁻²)	藓类结 皮盖度/%	藻类结 皮盖度/%	藓藻比例	坡度/(°)	流量/ (L·s ⁻¹)
以藻为主混合生物结皮(T ₁)	2.12	0.005 0	25.74	74.26	0.35	10	0.2、0.6、1
						5、10、15、20、25	1
藻藓比例相当混合生物结皮(T ₂)	3.88	0.005 2	51.00	49.00	1.05	10	0.2、0.6、1
						5、10、15、20、25	1
以藓为主混合生物结皮(T ₃)	9.59	0.021 0	88.82	11.18	8.21	10	0.2、0.6、1
						5、10、15、20、25	1
裸土(T ₀)						10	0.2、0.6、1
						5、10、15、20、25	1

注:藻类和藓类结皮盖度为相对于生物结皮混合群落总盖度的占比;厚度为加权厚度。

1.3 生物结皮特征参数测定

对于采集的生物结皮原状土壤样品,冲刷前采用三维激光扫描仪分别测定藻类结皮和藓类结皮的盖度。冲刷结束分别测定其厚度和生物量。对于每个生物结皮原状土壤样品,基于三维激光扫描仪生成的纹理图像,导入 ArcGIS 软件后解译得到计算藻类和藓类结皮的盖度。冲刷后土壤样品阴干至结生物皮层能剥离土壤时,使用游标卡尺分别测定藻类结皮、藓类结皮厚度。考虑到藻类和藓类生物结皮高度差别较大,采用二者面积作为权重加权得到生物结皮厚度。藓类生物结皮生物量采用水洗法测定,剥离后使用 0.25 mm 网筛洗净后放入烘箱 105 ℃烘干至恒重,称重、计算单位面积藓类结皮生物

量^[22]。对于藻类结皮,因其厚度相对一致(2 mm 左右),其生物量的差异可用盖度或面积表征^[21]。

1.4 坡面流水动力学特性测定

1.4.1 水动力参数测定方法 试验装置采用变坡水槽(4.0 m×0.1 m),主要包括供水系统、流量控制阀、稳流箱、引流槽、放样区、出水口等组成^[23]。对于给定的水动力条件,分别测定引流槽(冲刷区前 2 m 距离)和生物结皮区域的流速、水深和水温。表面流速采用高锰酸钾染色示踪法测定。为提高生物结皮所在区域流速的测定精度,在其上方架设高帧率摄像机记录时间。水深通过探针测定(精度 0.01 mm),流速和水深均重复 10 次,分别取其平均值作为表面流速和水深^[22]。冲刷过程中每 5 s 收集径流泥沙样,共

收集 5 次。对于收集到的径流泥沙样品,静置 12 h 后倒掉上清液,105 ℃ 烘干、称重后得到 5 组泥沙浓度,取其平均值作为该水动力条件下泥沙浓度。

1.4.2 水动力参数计算 本研究采用流速(V)、水深(h)、雷诺数(Re)、弗劳德数(Fr)、缓流速率(P)、Darcy-Weisbach 阻力系数(f)、颗粒阻力(f_g)和形态阻力(f_i)等指标表征坡面流水动力学特性。具体计算公式为:

$$Re = \frac{V_m R}{\vartheta} \quad (1)$$

$$R = \frac{A}{X} \quad (2)$$

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

式中: V_m 为坡面表层流速,m/s; R 为水力半径,m; A 为过水断面面积,m²; X 为湿周长,是在有效断面上与固体边界接触的周长,m^[24]; ϑ 为运动黏滞系数,m²/s; T 为水温,℃。雷诺数(Re)是流体力学中表征黏性影响的相似准则数,可判别流体的流动形态, $Re < 500$ 时,坡面流为层流, $500 < Re < 5\,000$ 时,坡面流为过渡流, $Re > 5\,000$ 时,坡面流为紊流^[25]。

$$V = kV_m \quad (4)$$

$$h = \frac{Q}{V} \quad (5)$$

式中: V 为流速,m/s; k 为修正系数,层流、过渡流、紊流的修正系数分别为 0.67、0.7、0.8^[24]; h 为水深,m; Q 为单宽流量,m²/s。

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (6)$$

式中: Fr 为弗劳德数,是流体力学中表征流体惯性力和重力相对大小的一个无量纲参数,可判别水流状态, $Fr < 1$ 时水流为缓流, $Fr = 1$ 时水流为临界流, $Fr > 1$ 时水流为急流^[25]; g 为重力加速度, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

$$P = \frac{(v_c - v_i)}{v_c} \quad (7)$$

式中: P 为缓流速率; v_c 为引流槽坡面流速,m/s; v_i 为冲刷区坡面流速,m/s。 P 越大,则对流速的延缓效果越好。

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

$$J = \sin \theta \quad (9)$$

式中: f 为 Darcy-Weisbach 阻力系数; J 为水力坡度,Pa; θ 为坡度,(°)。

$$f_i = f - f_g \quad (10)$$

$$q_s = \frac{1\,000\,m}{qt} \quad (11)$$

式中: f_i 为形态阻力^[15]; f_g 为颗粒阻力,通常由 SAVAT 算法^[14]得到,主要采用单宽流量、坡度、泥沙浓度(q_s)及占 90% 分布的颗粒粒径(D_{90})等 4 个变量; q_s 为泥沙浓度,mg/L; m 为泥沙质量,g; t 为接样时间,s。

1.5 统计分析

所有统计分析均在 Origin 2021b、SPSS 23.0 软件环境下进行。利用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差数法(LSD)对各生物结皮处理下的水动力参数进行差异显著性检验($p < 0.05$)。通过 Pearson 相关分析检测水动力参数与坡度、流量及生物结皮特征的相关性,明确生物结皮混合群落与单一生物结皮特征的关系。

2 结果与分析

2.1 生物结皮覆盖下坡面流水力学变化特征

2.1.1 坡面流流速和水深的变化特征 坡面流流速和水深是研究水动力参数的基础^[25],不同比例生物结皮混合群落可显著降低坡面流流速($p < 0.05$)。相较于引流槽区域,以藻为主混合生物结皮(T_1)、藻藓比例相当混合生物结皮(T_2)和以藓为主混合生物结皮(T_3)平均流速分别减少 8.52%~48.32%、14.90%~50.55% 和 16.83%~57.28%(图 1)。总体而言,不同比例生物结皮混合群落坡面流的平均流速随藓类结皮占比的增加而降低,表现为引流槽 > 以藻为主混合生物结皮(T_1) > 藻藓比例相当混合生物结皮(T_2) > 以藓为主混合生物结皮(T_3)。固定流量条件下,流速随坡度增加而增大;固定坡度条件下,流速随流量增加而增大。不同比例生物结皮混合群落覆盖均可显著降低缓流速率,随生物结皮混合群落中藓结皮占比增加,其缓流速率显著增强,以藓为主混合生物结皮(T_3)缓流速率是其他生物结皮混合群落的 1.1~2.5 倍。

不同比例生物结皮混合群落可显著增加坡面流水深($p < 0.01$)。相较于引流槽,以藻为主混合生物结皮(T_1)、藻藓比例相当混合生物结皮(T_2)和以藓为主混合生物结皮(T_3)等冲刷区的平均水深分别增加 5.35%~43.17%、21.31%~49.36% 和 39.19%~70.63%(图 1)。总体而言,不同比例生物结皮混合群落坡面流平均水深随藓类结皮占比的增加而增大,表现为以藓为主混合生物结皮(T_3) > 藻藓比例相当混合生物结皮(T_2) > 以藻为主混合生物结皮(T_1) > 引流槽。流量稳定条件下,水深随坡度的增加而降低;固定坡度条件下,水深随流量的增加而增大。水深与藓类、藻类结皮盖度及结皮厚度呈显著相关($p < 0.05$,表 2)。

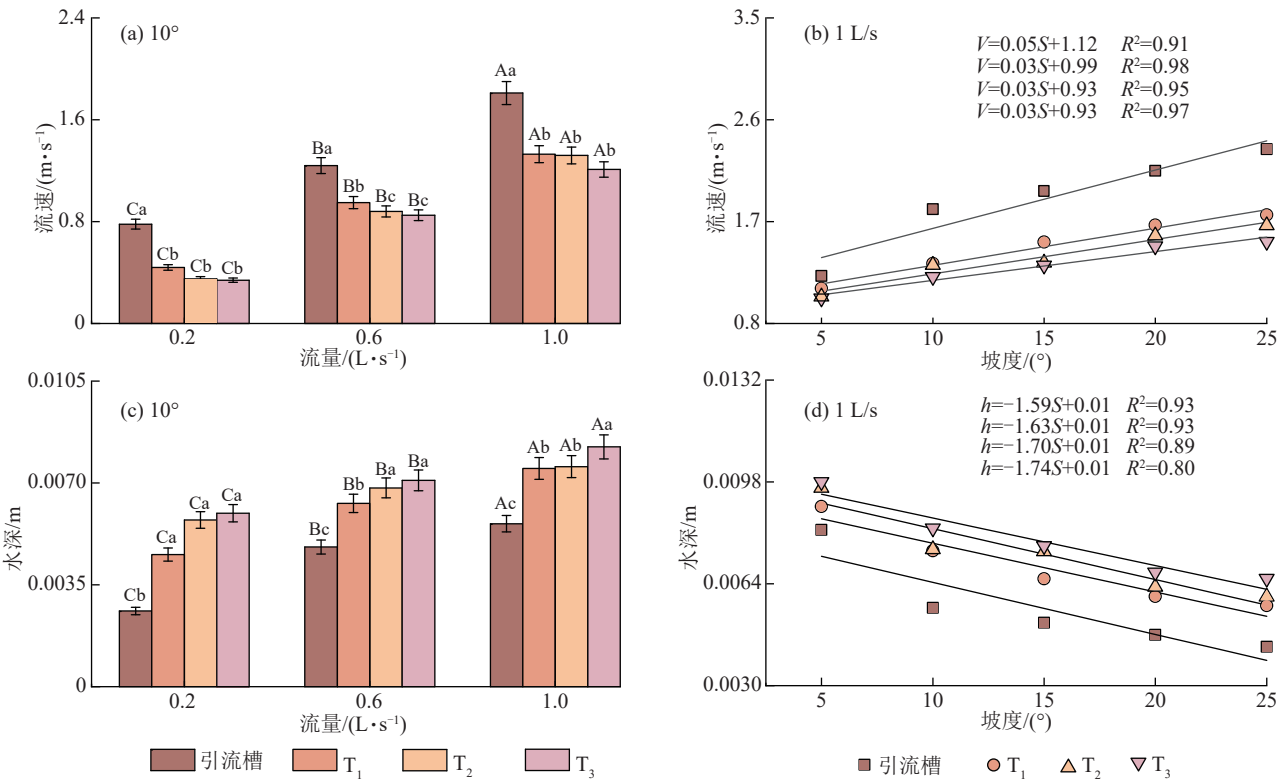


图 1 不同坡度流量下流速和水深变化特征

Fig. 1 Variation characteristics of flow velocity and water depth under different slope gradients and flow discharges
表 2 坡面流水力学参数与泥沙浓度及生物结皮特征相关性

Table 2 Results of correlation analysis between slope hydrodynamic parameters and sediment load and characteristics of biological crusts

特征参数	流速	水深	Re	Fr	f	f_g	f_i
泥沙浓度	0.302**	-0.163	0.037	0.344**	-0.153	-0.383**	-0.152
结皮厚度	-0.024	0.224*	0.397**	-0.073	0.108	0.088	0.108
藓类结皮生物量	-0.145	0.056	0.167	-0.159	0.226*	0.227*	0.225*
藓类结皮盖度	-0.085	0.278*	0.386**	-0.145	0.158	0.157	0.158
藻类结皮盖度	0.085	-0.278*	-0.386**	0.145	-0.158	-0.157	-0.158
藓藻比例	-0.042	0.278*	0.367**	-0.101	0.072	0.090	0.072

注:**表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著;*表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著。

2.1.2 坡面流流型和流态的变化特征 雷诺数(Re)和弗劳德数(Fr)是划分坡面流流态的重要参数^[26]。由图 2、图 3 可知,恒定流量条件下, Fr 和 Re 随坡度增加而增大;固定坡度条件下, Fr 和 Re 随流量的增加而增大。不同比例生物结皮混合群落的 Fr 随藓类结皮占比的增加而减小,而 Re 则相反,随藓类结皮占比增加而增大。不同比例生物结皮混合群落均可显著影响 Fr 和 Re ($p<0.01$),使得 Re 增加 4%~47%, Fr 减少 13%~72%。相关分析结果表明, Re 与结皮厚度、藓类结皮盖度和藓藻比例均呈显著正相关($p<0.01$)(表 2)。总体而言,生物结皮混合群落藓类结皮占比的增加虽然降低 Fr ,增加 Re ,但并未改变流型流

态,仍处于急过渡流区和急紊流区。

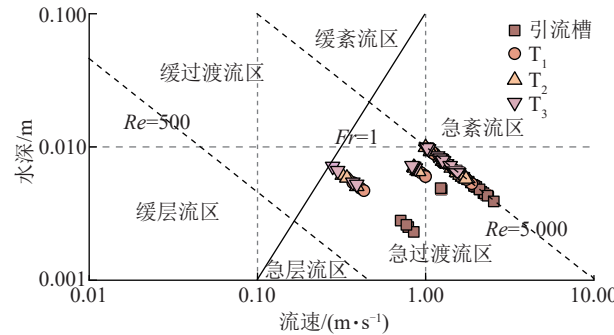
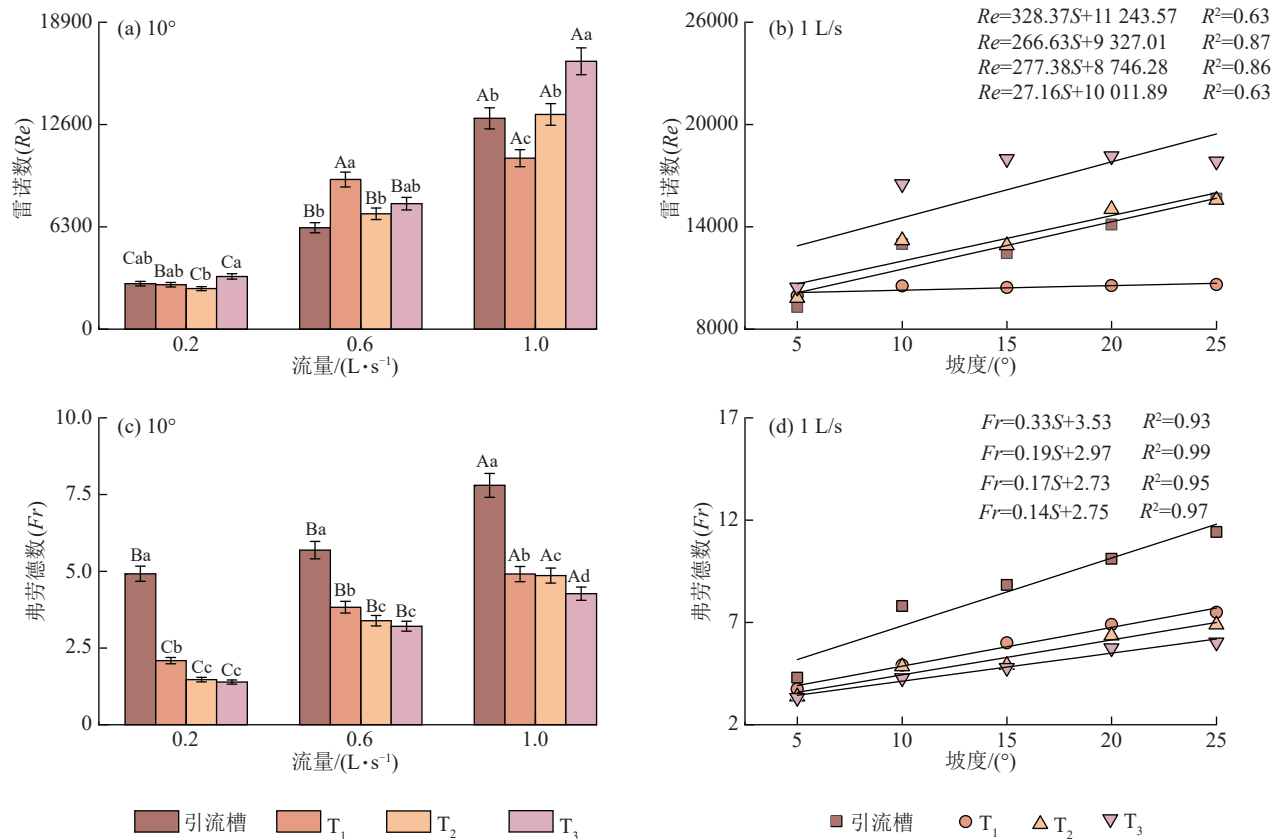


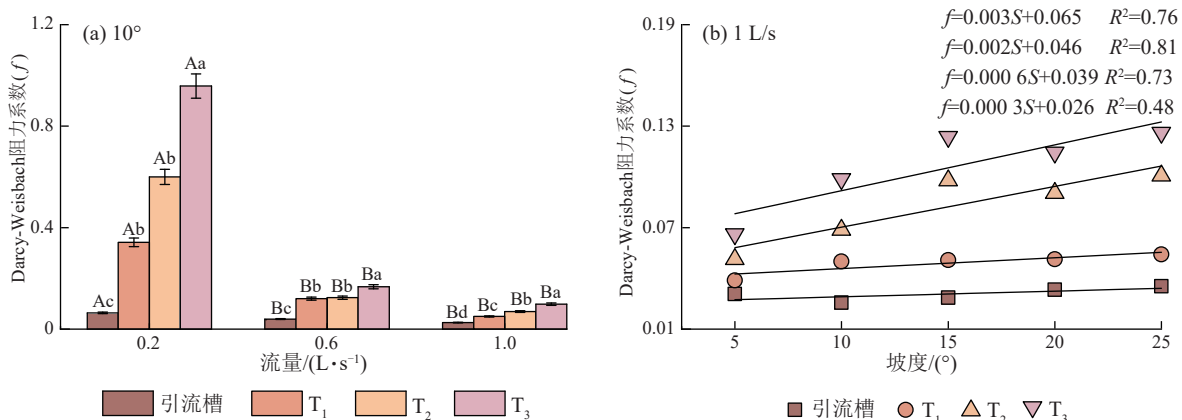
图 2 不同比例生物结皮混合群落覆盖下流型流态分区
Fig. 2 Partitions of downstream flow pattern under the coverage of mixed biological soil crusts at different proportions

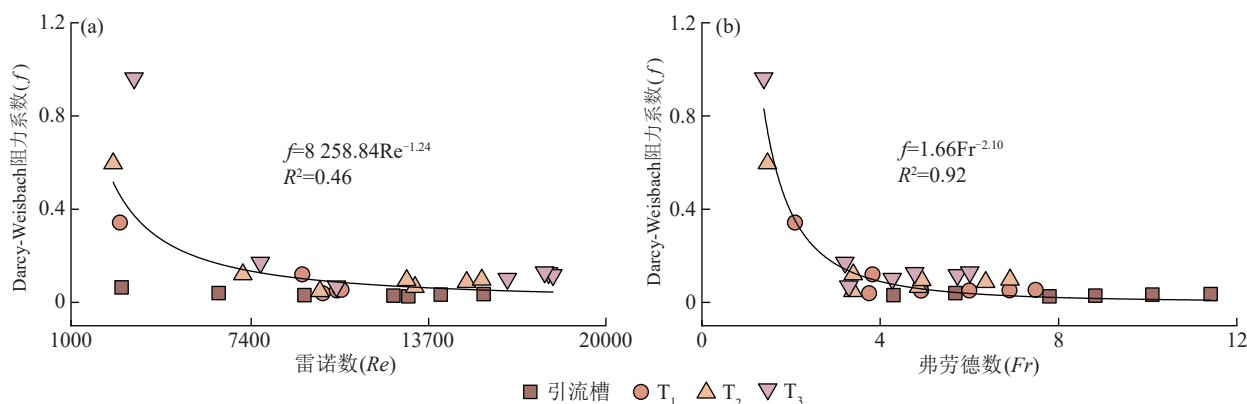
图 3 不同坡度流量下 Re 和 Fr 变化特征Fig. 3 Variation characteristics of Re and Fr under different slope gradients and flow discharges

2.2 生物结皮覆盖下坡面流流体阻力变化特征

2.2.1 坡面流 Darcy-Weisbach 阻力系数变化特征 Darcy-Weisbach 阻力系数 (f) 表征水流阻力状况, 阻力系数越大, 水流克服阻力所需要的能量越多^[25]。本研究中, 不同比例生物结皮混合群落可显著影响阻力系数 ($p < 0.05$)。其中, 以藻为主混合生物结皮 (T_1)、藻藓比例相当混合生物结皮 (T_2) 和以藓为主混合生物结皮 (T_3) 阻力系数分别是引流槽区域的 1.25~6.31、1.69~7.65、2.17~16.56 倍, 表明生物结皮覆盖可显著增加水流阻力,

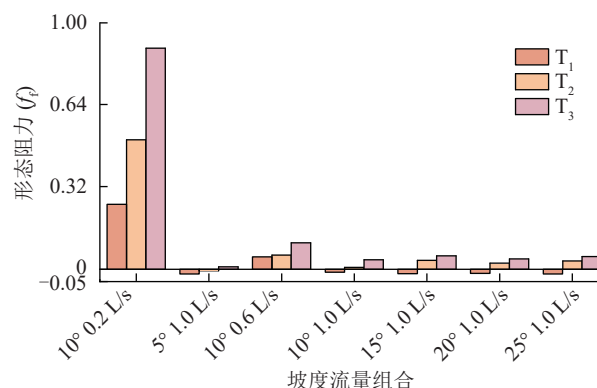
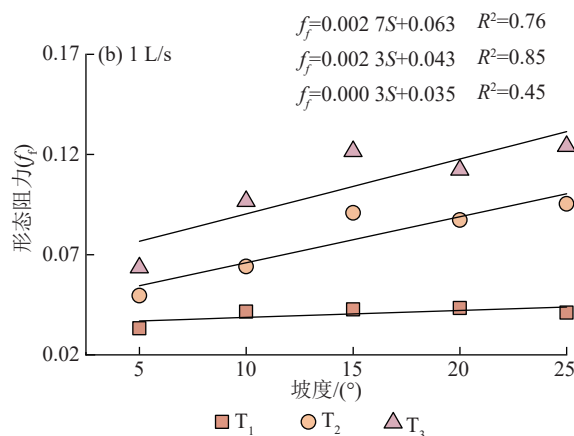
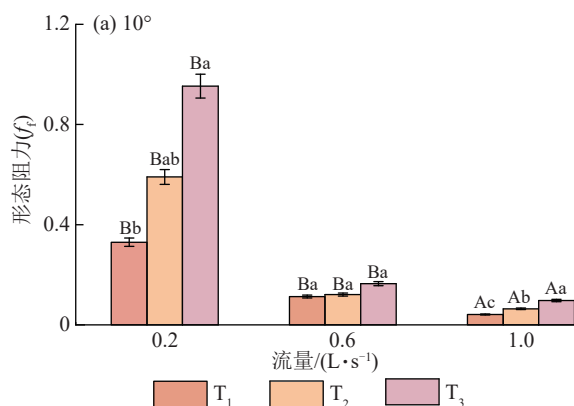
有效降低地表水蚀。不同比例生物结皮混合群落 f 随藓类结皮占比增加而增大, 表现为以藓为主混合生物结皮 (T_3) > 藻藓比例相当混合生物结皮 (T_2) > 以藻为主混合生物结皮 (T_1) > 引流槽。恒定流量条件下, f 随坡度增加而增大; 固定坡度条件下, f 随流量增大而减小 (图 4)。Darcy-Weisbach 阻力系数随 Re 和 Fr 增加均呈极显著幂函数降低 ($p < 0.01$, 图 5)。坡面水流紊动性随 Fr 增大而增强, 导致生物结皮对水流的阻滞作用逐渐减弱, 同时阻力系数降低。

图 4 不同坡度流量下 f 变化特征Fig. 4 Variation characteristics of f under different slope gradients and flow discharges

图5 f 随 Re 和 Fr 的变化特征Fig. 5 Variation characteristics of f with Re and Fr

2.2.2 坡面流颗粒阻力和形态阻力变化特征 通过SAVAT公式和公式(10)计算不同处理下坡面流的颗粒阻力(f_g)和形态阻力(f_i)表明,40%颗粒阻力高于Darcy-Weisbach阻力系数,导致其形态阻力为负值(图6),在一定程度上说明,SAVAT公式应用于生物结皮覆盖条件阻力特征研究存在明显局限性。相对于生物结皮覆盖,裸地表面较平整,且土壤性质相同,其坡面流形态阻力可假定为零,即颗粒阻力等于Darcy-Weisbach阻力系数,此时影响颗粒阻力的主要参数为泥沙浓度和 Re ^[12]。基于此,对于裸地对照,通过逐步回归分析构建颗粒阻力(Darcy-Weisbach阻力系数)与 Re 和泥沙浓度的回归方程($f_g = Re^{-0.883} \times q_s^{0.490}$, $R^2 = 0.697$),将生物结皮覆盖处理下测定的泥沙浓度代入该方程得到其颗粒阻力,基于公式(10)计算得到其形态阻力。表明以藻为主混合生物结皮(T_1)、藻藓比例相当混合生物结皮(T_2)和以藓为主混合生物结皮(T_3)覆盖下颗粒阻力变化为0.0016~0.0165、0.0015~0.0123、0.0010~0.0055,形态阻力变化为0.02~0.74、0.04~0.83、0.10~1.52,其中,形态阻力随着藓结皮占比的增加而变大。恒定流量条件下,形态阻力随坡度增加而增大;固定坡度条件下,形态阻力随流量增大而减小

(图7)。不同比例生物结皮混合群落的形态阻力随藓类结皮占比的增加而增大,表现为以藓为主混合生物结皮(T_3)>藻藓比例相当混合生物结皮(T_2)>以藻为主混合生物结皮(T_1)。总体而言,3个比例生物结皮混合群落覆盖条件下,形态阻力远高于颗粒阻力,分别是颗粒阻力的4.93~27.10、12.04~61.36、34.52~183.73倍,形态阻力占总阻力的76.0%~99.5%,表明生物结皮主要通过提高形态阻力而增强坡面流阻力。

图6 不同坡度流量下 f_i 变化特征(SAVAT算法)Fig. 6 Variation characteristics of f_i under different slope gradients and flow discharges (based on SAVAT calculation)图7 不同坡度流量下 f_i 变化特征Fig. 7 Variation characteristics of f_i under different slope gradients and flow discharges

2.3 混合生物结皮群落特征对坡面流流体阻力的影响

不同比例生物结皮混合群落覆盖对坡面流流体阻力的影响可用生物结皮混合群落结构特征参数来表征。逐步回归分析结果表明,形态阻力可表征为藓类结皮生物量的幂函数($f_i = M_{\text{moss}}^{0.343}$, $p < 0.01$) (图 8)。结合颗粒阻力拟合方程,基于公式(10)得到总阻力(Darcy-Weisbach 阻力系数)拟合方程 $f = Re^{-0.883} \times q_s^{0.490} + M_{\text{moss}}^{0.343}$ 。但该方程得到的大部分总阻力拟合值高于实测值,NSE 系数仅为 0.081 (图 9)。考虑到总阻力是颗粒阻力和形态阻力之和,因而将水力学参数、泥沙浓度、生物结皮混合群落特征参数等影响颗粒阻力和形态阻力的因素一并考虑进行逐步回归,表明总阻力可表征为 Re 和藓类结皮生物量的幂函数方程 $f = Re^{-1.024} \times$

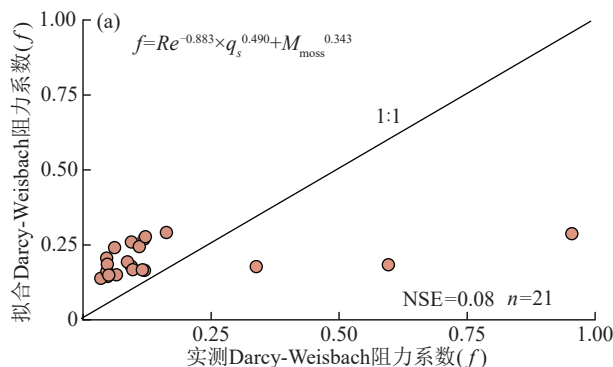


图 9 实测和拟合 Darcy-Weisbach 阻力系数的比较

Fig. 9 Comparison between measured and predicted Darcy-Weisbach resistance coefficients

3 讨论

不同比例生物结皮混合群落可显著降低坡面流速,增加坡面流水深(图 1)。随着藓类结皮占比的增加,缓流效率显著增强。归因于藓类结皮具有一定的高度(厚度)和较大的植株密度,增加生物结皮的迎水面积和壅水高度,导致水流穿过或绕过塔状丛生藓类结皮消耗更多的能量,显著降低流速,增强缓流效率^[5,22]。受上述因素的影响,不同比例生物结皮混合群落覆盖下 Fr 较引流槽有所降低,但均 > 1 属于急流, Re 虽有所增加,但仍处于过渡流区和紊流区。不同比例生物结皮混合群落总阻力(Darcy-Weisbach 阻力系数)随藓类结皮占比的增加得到显著增强。吉静怡等^[27]研究结果表明,生物结皮尤其是藓类结皮的发育可增强地表阻水抗蚀能力,导致径流阻力增加。一般而言,坡面流总阻力(Darcy-Weisbach 阻力系数)随流量和坡度的增加而降低^[9,12]。本研究中坡度的增加反而降低总阻力,与张光辉^[25]研究一致,主要因为坡度的增大虽然增加流速,但也导致径流深度(5.04 mm)变浅,使得生物结皮(6.22 mm)接近或处于非淹没状态,水流遇到的阻力增强,导致坡面流总阻力增大^[28]。坡度的增加增大坡面

$M_{\text{moss}}^{0.311} \times 10^{3.793}$ ($R^2 = 0.593$, $p < 0.01$)。除 1 个点存在低估外,该方程不同比例生物结皮混合群落所有总阻力拟合值与实测值较为接近, NSE 系数为 0.73 (图 9)。

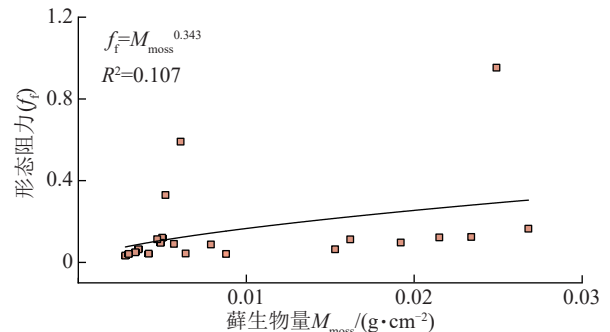
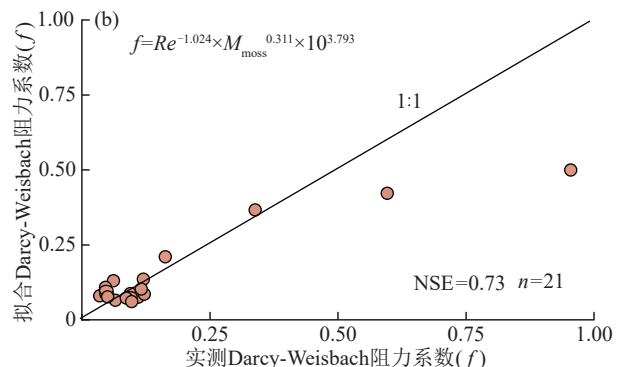


图 8 形态阻力 f_i 与生物量关系

Fig. 8 Relationship between form resistance f_i and biomass of biological soil crusts



比降,也在一定程度上增加总阻力。

颗粒阻力主要与泥沙浓度有关,生物结皮覆盖增强土壤的抗侵蚀性能,导致径流中泥沙浓度显著减小,进而降低坡面流颗粒阻力^[17]。不同比例生物结皮混合群落显著增加形态阻力,尤其是随着生物结皮混合群落中藓类结皮占比的增加,形态阻力显著增强。主要是生物结皮尤其是藓类结皮遇水后可迅速膨胀,导致其覆盖的地表起伏度显著增加,其形态阻力也随之增加^[29]。不同比例生物结皮混合群落均表现为形态阻力显著高于颗粒阻力,对总阻力的贡献最大。究其原因,相对于径流中的悬浮泥沙颗粒所形成的坡面流颗粒阻力,径流流经导致的生物结皮形态变化所造成的坡面流形态阻力对水流的阻延作用更强^[30]。同时,径流流经结皮的过程中可能形成漩涡,加强水流的紊动^[25],使得坡面流形态阻力进一步增强,在坡面流总阻力中的占比更大,甚至占主导地位。

颗粒阻力随着 Re 的降低和泥沙浓度的增加显著增强,可表征为 Re 和泥沙浓度的幂函数关系,坡面流形态阻力则随藓结皮生物量的增加呈幂函数增强。也在一定程度表明,坡面流颗粒阻力主要受到 Re 和

泥沙浓度的影响,而形态阻力则主要受到地表覆被物尺寸和形状等因素诸如生物结皮混合群落特征参数的影响^[12]。SAVAT模型^[14]计算的坡面流颗粒阻力不适用于生物结皮覆盖下的低泥沙浓度坡面流;而基于公式(10)得到的总阻力拟合方程虽然综合考虑水力学参数、泥沙浓度和生物结皮混合群落特征,但其拟合效果并不理想,得到的大部分总阻力拟合值高于实测值。很可能是生物结皮覆盖下径流中泥沙浓度过低,导致其对总阻力的贡献较弱。进一步逐步回归分析表明,坡面流总阻力仅与径流 Re 和藓类结皮占比有关,随着 Re 减小、藓类结皮生物量增加而增强,可表示为 Re 和藓类结皮生物量的幂函数。也再次证明生物结皮覆盖下, Re 和生物结皮混合群落特征是影响总阻力的主要因素。对于生物结皮影响坡面流阻力的主要因素的研究可为揭示生物结皮对土壤分离过程影响机理提供依据,进一步为黄土高原丘陵区生物结皮防蚀机理研究提供理论指导。

4 结论

1)生物结皮混合群落覆盖显著增加坡面流水深,减缓平均流速。其中,藓结皮的阻水缓流效果最好。随着生物结皮混合群落中藓类结皮占比的增加,其缓流效率显著增强;藓类结皮占比的增加降低 Fr ,增加 Re ,未改变流型流态。

2)生物结皮覆盖可增加20.2%~94.0%的坡面流总阻力,其中形态阻力占到总阻力的76.0%~99.5%,是导致坡面流总阻力增加的主要原因,且随藓类结皮占比的增大其贡献越大。

3)SAVAT模型计算的颗粒阻力不适用于生物结皮覆盖下的低泥沙浓度(40%高于总阻力);基于颗粒阻力和形态阻力求和推演的总阻力方程也因泥沙浓度过低导致总阻力拟合值高于实测值;生物结皮覆盖条件下,径流 Re 和生物结皮混合群落特征参数是影响坡面流总阻力的主要因素,且拟合效果较为理想。

参考文献:

- [1] BELNAP J. Nitrogen fixation in biological soil crusts from southeast Utah, USA [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(2): 128-135.
- [2] 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.
ZHAO Y G, XU M X, WANG Q J, et al. Impact of biological soil crust on soil physical and chemical properties of rehabilitated grassland in hilly Loess Plateau, China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(3): 441-448.
- [3] 陈琳, 王健, 宋鹏帅, 等. 黄土坡面结皮对土壤水稳性团聚体的稳定性和可蚀性的影响 [J]. *中国农学通报*, 2020, 36(18): 87-92.
- [4] CHEN L, WANG J, SONG P S, et al. Loess slope crust: Effects on the stability and erodibility of soil water-stable aggregates [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(18): 87-92.
- [5] 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.
- [6] 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.
ZHANG H N, WANG B, ZHANG B Q, 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.
- [7] WANG L J, ZHANG G H, ZHU L J, et al. Biocrust wetting induced change in soil surface roughness influenced by biocrust type, coverage and wetting patterns [J]. *Geoderma*, 2017, 306(15): 1-9.
- [8] 张宝琦, 王兵, 许欢欢, 等. 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 [J]. *水土保持研究*, 2024, 31(3): 128-134.
ZHANG B Q, WANG B, XU H H, et al. Effects of biological soil crust on dynamic parameters of slope flow under different rainfall intensities in the Loess Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(3): 128-134.
- [9] 田婧, 王兵, 马金龙, 等. 生物结皮生长发育对黄绵土抗侵蚀性能的影响 [J]. *水土保持学报*, 2024, 38(3): 73-81.
TIAN J, WANG B, MA J L, et al. Effects of biological soil crusts development on soil erosion resistance of loessial soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3): 73-81.
- [10] 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.
RAN M Y, ZHAO Y G, LIU Y L. Soil anti-scourability of biological soil crust with different coverage in loess hilly region [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2011(12): 43-45.
- [11] ZHAO C H, GAO J N, ZHANG M J, et al. Sediment deposition and overland flow hydraulics in simulated vegetative filter strips under varying vegetation covers [J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(2): 163-175.
- [12] 赵春红, 高建恩, 王飞, 等. 阻力形式对坡面流流速修正系数的影响 [J]. *农业机械学报*, 2013, 44(10): 130-135.
ZHAO C H, GAO J E, WANG F, et al. Effects of resistance forms on velocity correction factor of overland flow [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(10): 130-135.

- [12] 蒋昌波, 隆院男, 胡世雄, 等. 坡面流阻力研究进展[J]. 水利学报, 2012, 43(2): 189-197.
JIANG C B, LONG Y N, HU S X, et al. Recent progress in studies of overland flow resistance[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(2): 189-197.
- [13] JUDD H E, PETERSON D F. Hydraulics of large bed element channels[R]. Utah Water Research Laboratory, Utah State University, 1969: e113.
- [14] SAVAT J. Resistance to flow in rough supercritical sheet flow[J]. Earth Surface Processes, 1980, 5(2): 103-122.
- [15] ZHANG J Z, ZHANG S T, CHEN S, et al. Effects of sparse rigid stem vegetation coverage on hydrodynamic characteristics of overland flow in a gentle slope area[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(15): e1445.
- [16] 朱艳, 王平, 马岚, 等. 植被组合方式对坡面流水动力特性的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 74-85.
ZHU Y, WANG P, MA L, et al. Effects of vegetation combinations on hydrodynamic characteristics of overland flow[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 74-85.
- [17] 蒋忙舟, 汪建芳. 黄土高原典型群落近地表特征对坡面流水动力学特征的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 61-68.
JIANG M Z, WANG J F. Effect of patterns of land surface on the characteristics of hydrodynamics of overland flow in typical herbaceous communities of sloping lands on the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 61-68.
- [18] 杨坪坪, 张会兰, 王玉杰, 等. 刚性植被空间配置模式对坡面流水动力学特性的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 90-95.
YANG P P, ZHANG H L, WANG Y J, et al. Impact of spatial configuration mode of rigid vegetation on overland flow dynamics[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(1): 90-95.
- [19] 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.
ZHANG Y M. Microstructure and early developmental characteristics of desert surface biological soil crust[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(1): 42-47.
- [20] 高丽倩. 黄土高原生物结皮土壤抗水蚀机理研究[D]. 北京: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2017.
GAO L Q. Effects and the mechanism of biological soil crusts on water erosion prevention on the Loess Plateau[D]. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, the University of Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, 2017.
- [21] 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.
XU H H, ZHANG B Q, WANG J F, 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.
- [22] 许欢欢. 生物结皮发育对坡面水蚀过程的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
XU H H. Effect of biological soil crusts development on slope water erosion process[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2022.
- [23] 刘京晶, 马岚, 黎俊佑, 等. 不同覆盖条件下坡面流水力学特征试验研究[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(8): 115-123.
LIU J J, MA L, LI J Y, et al. Experimental study on hydrodynamic characteristics of overland flow under different resistance conditions[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(8): 115-123.
- [24] LI G, ABRAHAMS A D, ATKINSON J F. Correction factors in the determination of mean velocity of over-land flow[J]. Earth Surface Processes and Land Forms, 1996, 21(6): 509-515.
- [25] 张光辉. 坡面薄层流水动力学特性的实验研究[J]. 水科学进展, 2002, 13(2): 159-165.
ZHANG G H. Study on hydraulic properties of shallow flow[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(2): 159-165.
- [26] 张宽地, 王光谦, 孙晓敏, 等. 坡面薄层流水动力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 182-189.
ZHANG K D, WANG G Q, SUN X M, et al. Experiment on hydraulic characteristics of shallow open channel flow on slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(15): 182-189.
- [27] 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.
JI J Y, ZHAO Y G, YANG K, et al. Effects of the distribution of biological soil crust on the hydrodynamic characteristics of surface runoff[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(3): 1015-1022.
- [28] 姬昌辉, 谢瑞, 张幸农, 等. 淹没植被明渠边界切应力试验研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(5): 71-73.
JI C H, XIE R, ZHANG X N, et al. Experimental study on boundary shear stress of open channel with submerged vegetation[J]. Yellow River, 2021, 43(5): 71-73.
- [29] 曹颖, 张光辉, 唐科明, 等. 地表模拟覆盖率对坡面流阻力的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 86-89.
CAO Y, ZHANG G H, TANG K M, et al. Impact of simulated surface cover on resistance coefficient of overland flow[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(4): 86-89.
- [30] ZHANG K D, WANG Z G, WANG G Q, et al. Overland-flow resistance characteristics of nonsubmerged vegetation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2017, 143(8): 145-162.