

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.002.

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 Mangzhou, WANG Jianfang. 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.

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

蒋忙舟¹, 汪建芳²

(1. 轨道交通工程信息化国家重点实验室(中铁一院), 西安 710043;

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 712100)

摘要: [目的] 阐明植被群落近地表特征对坡面流水动力参数的影响, 揭示植被群落近地表特征影响土壤侵蚀过程的作用机制, 以期评估黄土高原草地植被恢复的生态水文效应提供理论指导。 [方法] 选取黄土高原典型白羊草群落 [*Bothriochloa ischcemum* (Linn.) Keng] 和铁杆蒿群落 [*Artemisia vestita* Wall. ex Bess], 通过设置不同近地表要素, 进行了人工模拟降雨试验(雨强: 60 mm/h; 降雨历时: 60 min)。 [结果] (1) 随植物群落各要素依次减少, 流型从缓流变为急流。植被群落覆盖径流流速降低了 8.66%~76.79%, 径流量减少了一 12.45%~49.30%, Darcy-weisbach 阻力系数和曼宁糙率系数分别增加了 62.55%~4 346.92% 和 33.16%~717.25%。(2) 生物土壤结皮对流速降低作用最大, 分别较地上部分和根系增加了 54.44%~199.32% 和 225.31%~425.95%; 地上部分对 Darcy-weisbach 阻力系数和曼宁糙率系数增加作用最强, 分别较生物土壤结皮和根系增加了 175.76%~4 676.57% 和 29.68%~1 114.74%。近地表各要素对径流量的影响不一致, 白羊草群落地上部分和铁杆蒿群落生物土壤结皮可减少径流量, 而其余各要素均可增加径流量。(3) 白羊草群落地上部分和根系分别减小流速和增加 Darcy-weisbach 阻力系数的作用大于铁杆蒿, 而生物土壤结皮的作用小于铁杆蒿。白羊草群落地上部分和生物土壤结皮对曼宁糙率系数的增加效应低于铁杆蒿, 根系则高于铁杆蒿。白羊草群落地上部分减少径流量作用较铁杆蒿增加了 4 367.80%; 白羊草生物土壤结皮增加产流量的作用较铁杆蒿增加了 183.52%。白羊草和铁杆蒿群落的根系均可增加产流量, 且白羊草群落增加的作用较铁杆蒿减少了 49.77%。 [结论] 植被地上部分、生物土壤结皮和根系可减小流速、流量; 增加 Darcy-weisbach 阻力系数、曼宁糙率系数, 但因植物种类的差异可导致植被群落近地表特征对水动力特征的减少或增加量不同。

关键词: 流速; 径流量; 径流阻力; 白羊草; 铁杆蒿

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0061-08

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

JIANG Mangzhou¹, WANG Jianfang²

(1. State Key Laboratory of Rail Transit Engineering Informatization (FSDI), Xi'an 710043,

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)

Abstract: [Objective] The influence of near-surface characteristics of vegetation community on the hydrodynamic parameters of overland flow was elucidated, and the mechanism of the influence of near-surface characteristics of vegetation community on soil erosion process was revealed, in order to provide theoretical guidance for the evaluation of eco-hydrological effects of vegetation restoration in grassland on the Loess Plateau. [Method] Herbaceous plant communities of *Bothriochloa ischcemum* (Linn.) Keng and *Artemisia*

收稿日期: 2022-04-25

修回日期: 2022-05-26

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“基于 RUSLE 模型的黄土高原草地植被覆盖因子研究”(41771555)

第一作者: 蒋忙舟(1976—), 男, 陕西西安人, 高级工程师, 主要从事水土保持、环境保护及节能研究。E-mail: 331945747@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

vestita Wall. ex Bess were selected. Artificial simulated rainfall experiments (rainfall intensity: 60 mm/h; Rainfall duration: 60 min) were conducted in herbaceous plant communities with different near-surface characteristics. [Results] (1) With the decrease of plant community elements, the flow pattern changed from slow flow to rapid flow. Runoff velocity decreased by 8.66%~76.79%, runoff decreased by -12.45%~49.30%, and resistance increased by 62.55%~4346.92% and 33.16%~717.25%. (2) Biological soil crust had the greatest effect on the decrease of flow velocity, increasing by 54.44%~199.32% and 225.31%~425.95%, respectively, compared with aboveground part and root system. The aboveground part had the strongest effect on resistance increase, which increased by 175.76%~4676.57% and 29.68%~1114.74% compared with biological soil crust and roots, respectively. The effects of the near-surface factors on the runoff were not consistent. The biological soil crusts of aboveground part of *Bothriochloa ischcemum* (Linn.) Keng and *Artemisia vestita* Wall. ex Bess could reduce the runoff, while the other factors could increase the runoff. (3) The effects of overground part and root of *Bothriochloa ischcemum* (Linn.) Keng on decreasing velocity and increasing Darcy-Weisbach resistance coefficient were greater than those of *Artemisia vestita* Wall. ex Bess, while the effects of biological soil crusts were less than those of *Artemisia vestita* Wall. ex Bess. Aboveground part and biological soil crust of *Bothriochloa ischcemum* (Linn.) Keng on the Manning roughness coefficient increases effect was lower than *Artemisia vestita* Wall. ex Bess, the effect of root was higher than *Artemisia vestita* Wall. ex Bess. The decrease of runoff in aboveground part of *Bothriochloa ischcemum* (Linn.) Keng community increased by 4367.80% compared with *Artemisia vestita* Wall. ex Bess. The effect of soil crusts on increasing runoff yield was 183.52% higher than that of *Artemisia vestita* Wall. ex Bess. The root system of both *Bothriochloa ischcemum* (Linn.) Keng and *Artemisia vestita* Wall. ex Bess communities could increase runoff yield, and the increasing effect of *Bothriochloa ischcemum* (Linn.) Keng community was 49.77% less than that of *Artemisia vestita* Wall. ex Bess. [Conclusion] The aboveground part of vegetation, biological soil crust and root system can reduce the velocity and discharge. The Darcy-weisbach resistance coefficient and Manning roughness coefficient increased, but the decreasing or increasing of near-surface characteristics of vegetation communities on hydrodynamic characteristics was different due to the difference of plant species.

Keywords: flow velocity; runoff; overland flow resistance; *Bothriochloa ischcemum* (Linn.) Keng; *Artemisia vestita* Wall. ex Bess

植物群落诸如冠层/地上部分、生物土壤结皮及植物根系可显著影响坡面产汇流过程及径流特征^[1-3]。雷诺数、佛汝德数、流速、流量、达西魏斯巴赫阻力系数和曼宁糙率系数是表征坡面流水动力学特性的常用指标,一般与植被特征、地表糙率、土壤类型、降雨特征等密切相关^[4-7]。坡面径流作为土壤侵蚀发生的驱动因素,植被恢复其对水动力学特性的影响近年来备受关注^[8-9]。植物的密度、空间配置、植物弯曲度、类型和植被格局等均会改变坡面流流动特性。近年来,关于植被覆盖下水流的水动力学特性已经取得一些成果,但由于试验条件和研究方法的限制,存在较大争议,对植被冠层/地上部分、枯落物、生物土壤结皮及根系的研究设计甚少;相关研究结果表明,植被冠层/地上部分和地表枯落物蓄积可有效拦蓄降雨,延缓产流过程并减少坡面径流^[10-11];生物土壤结皮吸水后迅速膨胀、堵塞土壤孔隙降低土壤入渗速率^[12],其中苔藓结皮可增大地表糙度,增加径流阻力、降低流速,同时,也会对坡面流流态和流型产生影

响^[13];植物根系对坡面径流的影响一方面表现为根系生长过程中形成的土壤孔隙可增加土壤入渗、减少径流^[14],另一方面根基裸露在一定程度上增加水流阻力、降低流速^[15]。在上述研究中,植被特征对坡面径流水动力学特征的影响主要集中在植被覆盖、生物结皮和根系等单要素,而有关植被群落近地表特征对坡面径流水动力学特征的影响缺乏系统研究,且对于近地表特征各要素的贡献尚不清楚。

黄土高原是我国乃至全球水土流失最为严重的地区之一,也是我国生态环境最为脆弱的地区之一^[16]。自1999年退耕还林(草)工程实施以来,该区植被得以恢复,植被近地表特征发生了显著变化。如植被覆盖度提高、枯枝落叶蓄积及混入表层土壤、生物土壤结皮发育、植物根系穿插固结土壤等,从而对坡面流水动力学特征产生影响。基于此,本研究以黄土高原植被恢复驱动的植被近地表特征变化为切入点,选取该区植被恢复后期白羊草群落[*Bothriochloa ischcemum* (Linn.) Keng]和铁杆蒿群落(*Arte-*

misia vestita Wall. ex Bess)为研究对象,通过设置不同植被近地表特征处理,采用人工模拟降雨试验,系统研究黄土高原典型草地群落近地表特征差异对坡面流水动力学特性的影响,明确流型流态、流速、流量和阻力系数的变化特征及其在不同群落间的差异,计算植被近地表特征的减流增阻效应,以期为评估黄土高原草地植被恢复的生态水文效应提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验处理设置

选取黄土高原地带性白羊草群落和演替后期铁

杆蒿群落作为研究对象,每种群落均设置 3 个处理:全植被处理(T_1)、去除植被地上部分处理(T_2)和去除地上部分及生物土壤结皮处理(T_3);此外,设置一个裸地作为对照处理(T_0);每个处理 2 个重复。对于 T_1 处理,保留所有植被要素,反映草本群落整体对坡面径流水动力学特性的影响;对于 T_2 处理,在 T_1 处理的基础上去除草本群落地上部分,反映生物土壤结皮和根系对坡面径流水动力学特性的影响;对于 T_3 处理,在 T_2 处理的基础上去除生物土壤结皮,反映草本群落根系对坡面径流水动力学特性的影响。各处理设置详见表 1。

表 1 典型草本群落处理设置

编号	处理名称	影响要素	描述
T_1	全植被处理	地上部分+生物结皮+根系	不采取任何措施,反映群落整体的影响
T_2	去除地上部分处理	生物土壤结皮+根系	在 T_1 处理的基础上去除植被地上部分,反映生物土壤结皮和根系的影响
T_3	去除地上部分及生物土壤结皮处理	根系	在 T_2 处理的基础上去除生物土壤结皮,反映植被根系的影响
T_0	裸地对照	土壤性状	裸土,与上述处理置于相同环境,定期去除杂草,反映土壤本身的影响

1.2 草本群落种植

选取的铁杆蒿群落和白羊草群落,在试验土槽内进行人工种植,各种植 12 个土槽,另外设有 2 个裸地对照土槽。土槽长、宽、深分别为 2.0,0.5,0.5 m,坡度 15°。对于每个土槽,种植前对土槽底层填充 0.1 m 的细沙以保证草本群落生长过程中土壤水分均匀下渗,而后铺层纱布进行填土。供试土壤采自安塞退耕地表层土(0—40 cm),过 2 mm 筛去除石砾和草根,后按照容重 1.2 g/cm³ 分层填装,每层填土厚度 0.05 m,铺平、压实,填装下一层前将表土打毛,消除土壤之间的分层

现象,填土总高度为 0.3 m。填土结束后参照野外生长密度对铁杆蒿和白羊草进行穴播种植(20 株/m²),定期采取洒水等抚育措施,待长势稳定后进行间苗以控制植被密度。经过一个生长季后(4—9 月,共 183 d)。用无人机拍照发法及网格法测量植被盖度和生物结皮盖度。采用直尺测量植株高度。并按照预设试验处理对铁杆蒿和白羊草群落地上部分、生物土壤结皮进行去除后进行人工模拟降雨试验。降雨结束后分别采取植被地上部分、生物土壤结皮及植物根系进行烘干称重以测其生物量。其植被特征见表 2。

表 2 群落基本特征

植物群落	植被盖度/%	株数/株	株高/cm	地上生物量/(kg·m ⁻²)	结皮盖度/%	结皮生物量/(g·m ⁻²)	根系生物量密度/(kg·m ⁻³)
白羊草	60.95	30.00	43.00	1.30	41.33	79.26	1.62
铁杆蒿	60.85	35.00	46.00	0.62	44.67	72.27	1.01

1.3 人工模拟降雨及样品收集

试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室降雨大厅进行。降雨强度和降雨历时分别设置为 60 mm/h 和 60 min。降雨前对每个土槽进行少量、多次喷水至饱和,以消除土壤前期含水量对降雨试验的影响。降雨开始后,前 10 min 每间隔 2 min 收集 1 次径流和泥沙样,之后 50 min 每间隔 5 min 收集 1 次径流和泥沙样,共计收集 15 个径流和泥沙样。降雨过程中测定水温用以计算黏滞系数,每次收集径流和泥沙样的同时采用高锰酸钾指示剂测定坡面流表面流速。降雨结束后,对收集的径流进行称重。降雨结束后的第 5 天,对土壤理化性状进行测量,其中黏结力采用 Eijkelkamp pocket vane 黏结力

仪(14.10, Eijkelkamp Agrisearch Equipment)直接测量,土壤容重采用直径为 48 mm,高为 50 mm 的环刀测量,土壤团聚体采用湿筛法测量,土壤有机质采用重铬酸钾加热法测量(表 3),测量土壤理化性状后收集土槽内所有植物根系,水洗、烘干(80℃,24 h)后得到根系生物量。

表 3 土壤理化性状

物种	黏结力/kPa	容重/(g·cm ⁻³)	团聚体含量/%	土壤有机质/(g·kg ⁻¹)
白羊草	4.72	1.24	2.06	13.15
铁杆蒿	4.54	1.22	2.04	6.44
裸地	4.30	1.27	1.92	3.31

试验结束后计算雷诺数(Re)、弗汝德数(Fr)、Darcy-weisbach 阻力系数(f)和曼宁糙率系数(n),

并对表面流速乘以校正系数得到平均流速($V, \text{m/s}$), 坡面径流水动力学特性计算公式如下:

$$V = k V_m \quad (1)$$

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

$$\text{Re} = \frac{Vh}{\gamma} \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (4)$$

$$\text{Fr} = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (5)$$

$$f = \frac{8gRJ}{V^2} \quad (6)$$

$$n = \frac{R^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}}}{V} \quad (7)$$

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); t 为水流温度的函数($^{\circ}$); 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, 本研究中坡面径流为层流, 取 $k=0.67$; q 为流经土槽的单宽流量 [$\text{m}^2/(\text{s} \cdot \text{m})$]; 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 不同处理下径流流型流态及流速特征

雷诺数(Re)和佛汝德数(Fr)是表征坡面径流流型流态的常用参数^[15]。对于白羊草群落, T_1 , T_2 和 T_3 处理雷诺数变化范围分别为 $5.14 \sim 11.68$, $10.88 \sim 19.56$, $9.15 \sim 17.50$, 佛汝德数变化范围分别为 $0.30 \sim 0.18$, $0.35 \sim 0.43$, $1.01 \sim 1.11$ 。对于铁杆蒿群落, T_1 , T_2 和 T_3 处理雷诺数变化范围分别为 $13.74 \sim 19.30$,

$12.60 \sim 16.71$, $10.42 \sim 19.76$, 佛汝德数变化范围分别为 $0.20 \sim 0.40$, $0.37 \sim 0.44$, $0.92 \sim 1.21$ 。总体而言, 白羊草群落和铁杆蒿群落雷诺数都远小于 500, 坡面径流流型均属于层流; 白羊草群落和铁杆蒿群落 T_1 和 T_2 处理 Fr 小于 1, 坡面径流形态属于缓流; T_3 处理 Fr 大于 1, 坡面流流态属于急流(图 1)。

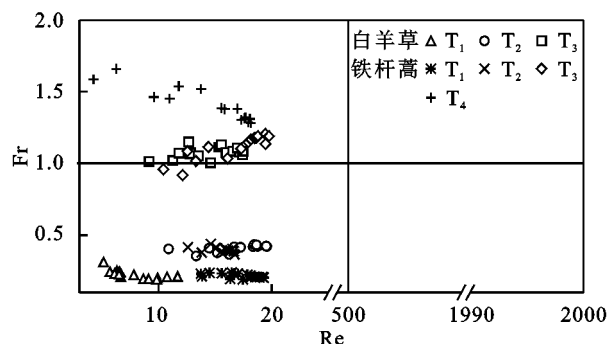
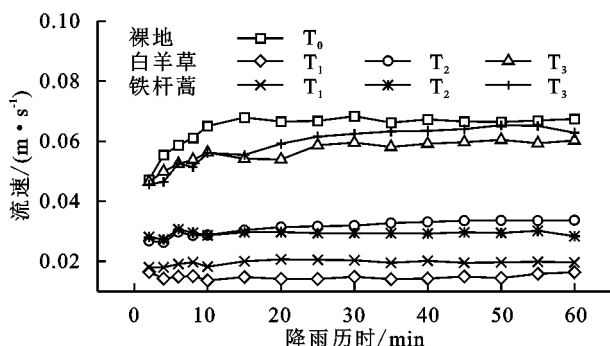


图 1 降雨过程坡面径流雷诺数和佛汝德数变化特征

流速是表征坡面径流运动学特性的常用指标。随着降雨历时的延长, 白羊草群落和铁杆蒿群落 T_1 和 T_2 处理平均流速随时间变化总体相对稳定, 降雨后 30 min 流速与整场降雨平均流速差异不大; T_3 处理平均流速总体表现为先增大后趋于稳定状态(图 2), 降雨后 30 min 平均流速较整场降雨平均流分别增加了 6.60%, 9.74%。总体而言, 随着植被近地表特征因素减少, 白羊草群落和铁杆蒿群落坡面径流平均流速显著增大, 均表现为 $T_1 < T_2 < T_3$ 。相对于裸地(0.064 m/s), 白羊草群落 T_1 , T_2 , T_3 处理平均流速分别降低了 76.79%, 51.36%, 12.08%; 铁杆蒿群落则分别降低了 69.39%, 54.18%, 8.66%。植被类型的差异也会导致径流流速在群落间也存在一定差异, 白羊草群落 T_1 与 T_3 处理的平均流速分别较铁杆蒿减少了 24.20%, 3.74%; T_2 处理平均流速较铁杆蒿群落增加了 6.15%。

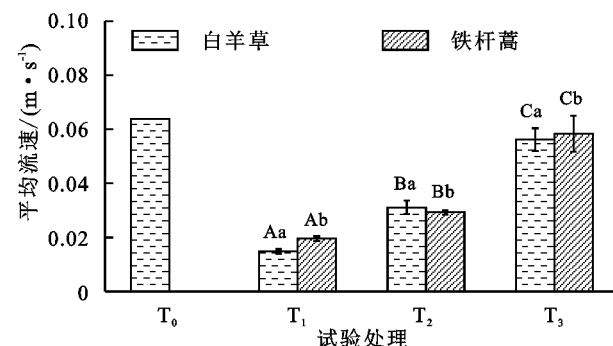


注: 大写字母相同表示各处理间没有显著差异($p>0.05$), 小写字母相同表示群落间没有显著差异($p>0.05$)。

图 2 坡面径流流速的变化特征

2.2 不同处理下坡面产流特征

白羊草群落和铁杆蒿群落坡面产流量随降雨历时延长均表现为增加趋势(图 3)。除白羊草群落 T_1 处理径流量持续增加外, 白羊草群落其他处理及



铁杆蒿全部处理径流量均在降雨后 30 min 趋于稳定。随着植被近地表因素增多, 白羊草群落和铁杆蒿群落径流总量存在一定差异。白羊草群落 T_1 处理下总径流量为 14.26 mm , 较裸地对照减少了 49.30%;

T_2 和 T_3 处理下总径流量分别为 34.87,29.86 mm,较裸地对照增加了 24.09%,6.26%;铁杆蒿群落各处理总径流量分别为 30.29,29.83,31.60 mm,各处理间径流量差异较小,分别较裸地对照增加了 6.16%~12.45%。坡面径流量在群落间也存在差异,白羊草群落 T_2 处理下径流总量较铁杆蒿群落增加了

16.88%, T_1 和 T_3 处理分别较铁杆蒿群落减少了 52.93%,5.51%。植被近地表特征因素的影响,坡面径流系数也存在差异。白羊草全植被处理下径流系数最低,为 0.24,白羊草其他处理和铁杆蒿群落所有处理径流系数变化范围为 0.50~0.58,降雨径流转化率 $\geq 50\%$ 。

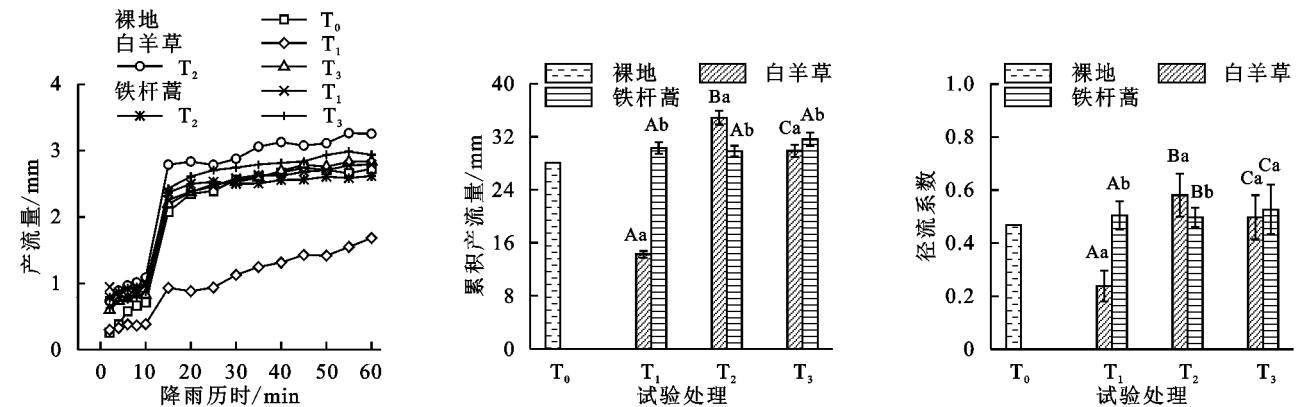


图 3 坡面流产流特征

2.3 不同处理下径流阻力特征

随降雨历时的延长,白羊草群落和铁杆蒿群落 Darcy-weisbach 阻力系数(f)和曼宁糙率系数(n)在 T_1 处理下均显著增加,而 T_2 和 T_3 处理下均相对平稳,变化不大(图 4)。总体而言,随着影响坡面径流阻力的植被近地表因素增多,白羊草群落 T_1 , T_2 和 T_3 处理 Darcy-weisbach 阻力系数较裸地增加了 70.25%~4 346.92%,曼宁糙率系数较裸地增加了 36.38%~666.24%;铁杆蒿群落 Darcy-weisbach 阻力系数较裸地增加了 62.55%~

4 133.57%,曼宁糙率系数较裸地增加了 33.16%~717.25%。群落间不同处理 Darcy-weisbach 阻力系数和曼宁糙率系数也存在一定差异,其中白羊草群落在 T_1 和 T_3 处理下 Darcy-weisbach 阻力系数较高,分别较铁杆蒿增加了 5.04%,4.60%, T_2 处理白羊草略低于铁杆蒿,较铁杆蒿减小了 3.86%。 T_1 和 T_2 处理白羊草曼宁糙率系数较低,分别较铁杆蒿较小了 6.24%,0.93%, T_3 处理下曼宁糙率系数较高,分别较铁杆蒿增加了 2.42%。

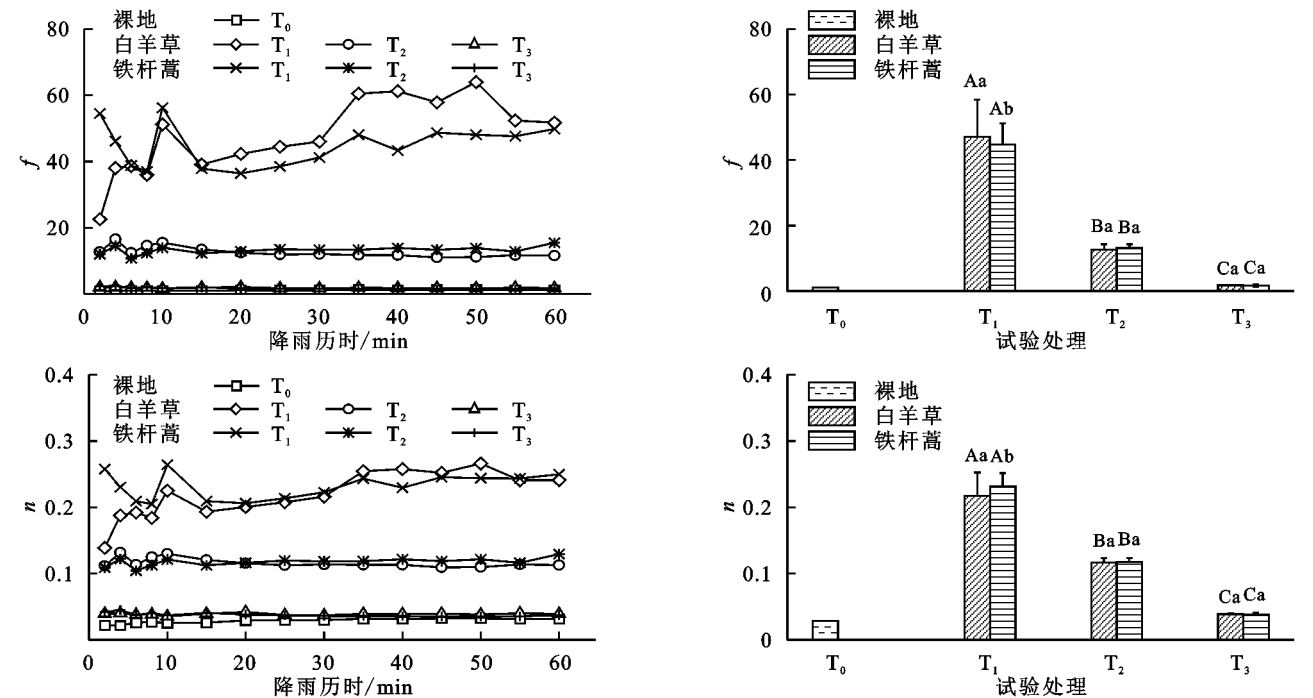


图 4 坡面径流阻力变化特征

2.4 植被近地表特征对坡面径流水力学特性的影响

植被地上部分、生物土壤结皮和根系减小流速、流

量和增加 Darcy-weisbach 阻力系数、曼宁糙率系数的效应不尽相同(图 5)。生物土壤结皮对流速的减少量最

大,分别较地上部分和植物根系增加了 54.44%~199.32%,225.31%~425.95%。植被地上部分、生物土壤结皮和根系对径流的影响不一致,白羊草群落地上部分和铁杆蒿群落生物土壤结皮可显著减小径流量,减少量分别为 20.61,1.77 mm,白羊草群落的生物土壤结皮、铁杆蒿群落的地上部分和两者的根系均可增加径流量,增加量为 0.46~5.01 mm。植被地上部分、生物结皮和根系均可增加 Darcy-weisbach 阻力系数、曼宁糙率系数,其中地上部分的增加量最大,分别较生物土壤结皮和根系增加了 175.76%~4 676.57%和 29.68%~1 114.74%。由于种间存在差异,导致植被地上部分、生物结皮及根系特征也存在一定的差异。对于白羊草群落而言,植物地上部分和植物根系降低流速效应较大,分别较铁杆蒿增加了 39.52%,67.25%,生物土壤结皮降低流速的效应低于铁杆蒿群落,较铁杆蒿群落减少了 13.70%。对于白羊草群

落而言,地上部分和根系增加 Darcy-weisbach 阻力系数高于铁杆蒿群落,较铁杆蒿群落增加了 8.75%,11.96%,而生物土壤结皮增阻效应低于铁杆蒿群落,较铁杆蒿群落降低 5.12%。白羊草群落地上部分和生物土壤结皮对曼宁糙率系数的增加效应低于铁杆蒿群落,分别较铁杆蒿群落降低 11.71%,2.5%,而根系的则高于铁杆蒿群落,较铁杆蒿群落增加了 9.72%。白羊草群落和铁杆蒿群落对径流的减少量存在显著的差异,白羊草群落地上部分可减小径流量,铁杆蒿群落地上部分可增加径流量,其白羊草群落地上部分较铁杆蒿群落增加了 4 367.80%;白羊草群落生物土壤结皮可显著增加径流量,而铁杆蒿群落则可抑制产流量,其白羊草生物土壤结皮增加产流量的作用高于铁杆蒿 183.52%。对于白羊草群落和铁杆蒿群落的根系而言,它们均可增加产流量,且白羊草群落增加的作用低于铁杆蒿 49.77%。

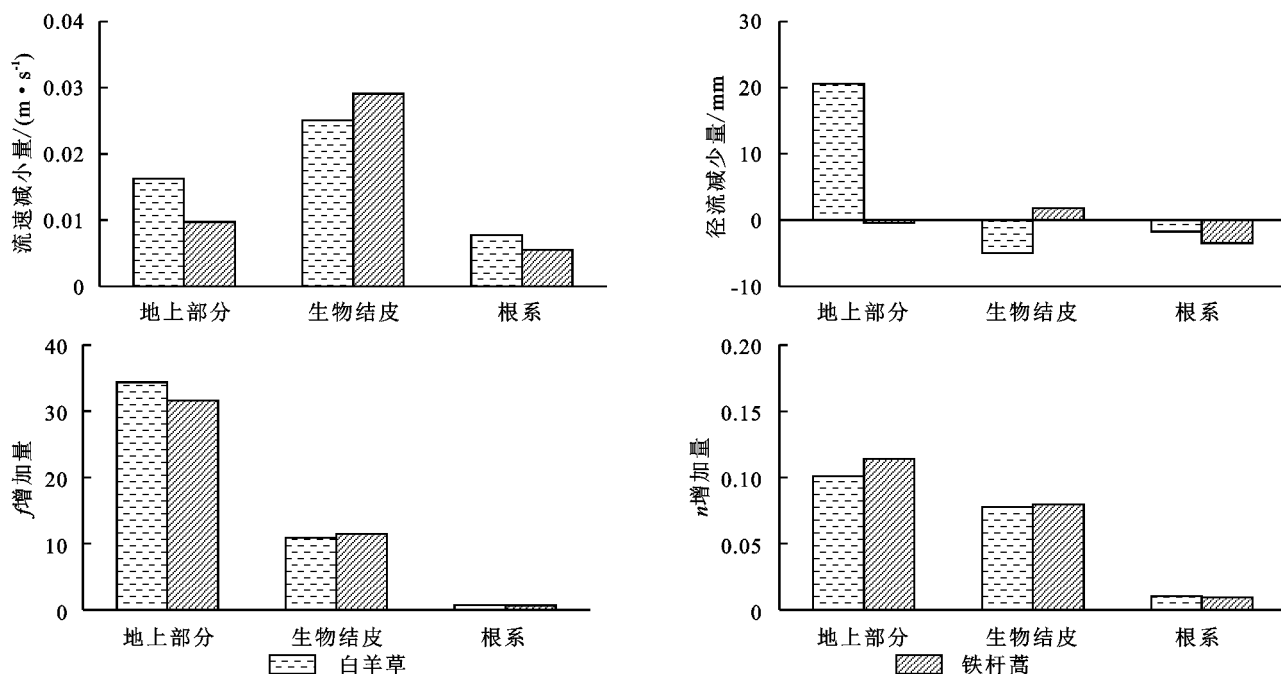


图5 植被群落近地表因素的对流速、径流量、阻力系数的减少量或增加量

3 讨论

3.1 草本植物近地表特征对坡面径流水动力学特性的影响

草本植物近地表特征的差异是影响坡面径流水动力学特征的主要原因。本研究结果表明,草本植被群落的雷诺数(Re)主要分布在 5.14~19.76,均处于层流范畴。草本植被群落的弗汝德数(Fr)小于裸土坡面。根据河流动力学原理,Fr 反映径流的流态,其值越大,径流挟沙能力越强^[17]。植被群落覆盖显著降低了径流流态,但是只有植物根系存在时流态依旧是急流,这与徐震等^[15]得到的结论一致。植被近地

表各要素的存在可显著增加地表糙度,进而降低坡面径流流速,增加阻力^[12-14]。对于坡面径流流速而言,随白羊草和铁杆蒿群落各地表要素的增加,流速显著减小,其中生物土壤结皮的流速减小量最小,其次为地上部分和根系;而对于 Darcy-weisbach 阻力系数和曼宁糙率系数,随地表各要素的增加显著增大;其中地上部分 Darcy-weisbach 阻力系数和曼宁糙率系数的增加量最大,其次为生物土壤结皮和根系。Darcy-weisbach 阻力系数和曼宁糙率系数的变化范围为 1.72~49.04,0.04~0.23。这与细沟流阻力系数有很大的差异。一般而言,细沟流 Darcy-weisbach 阻力系数是 0~8^[18-19],产生这一差异的主要原因是坡面

薄层水流并未形成集中水流,坡面流速很小,再加上植物群落对流速的延阻作用,虽然坡面水深也会影响 Darcy-weisbach 阻力系数,但是本研究平均水深较小(0.50 mm),较流速对 Darcy-weisbach 阻力系数的影响要小。因此,有植物群落覆盖的坡面径流 Darcy-weisbach 阻力系数高于无植被覆盖。对于坡面产流特征,白羊草群落的产流量最小,其中植被地上部分可减小径流量,生物结皮和根系可增加径流量。总体而言,当生物结皮存在时,其产流量大于植物根系的产流量,这主要是由于降雨过程中生物土壤结皮细胞外聚合物可以在几秒钟吸收自身体积 3~13 倍的水分而迅速膨胀并堵塞土壤孔隙,产流量因孔隙的堵塞而增大^[3,20]。铁杆蒿群落当只有根系存在时,产流量最大,这主要由于只有根系存在时,下垫面土壤受雨滴打击易形成物理结皮,进而增加了产流量^[21]。

3.2 草本植物类型对坡面流水动力特征的影响

由于物种的差异,白羊草群落和铁杆蒿群落坡面径流水动力学特征也存在显著差异。白羊草群落的流速和产流量均小于铁杆蒿群落,分别较铁杆蒿群落减少了 24.20%,3.74%及 52.93%,5.51%。一方面,白羊草叶片属于狭长型,植株上部柔性部分匍匐于地表时,叶片对降雨分配可能起到了一定的阻碍作用。另一方面,植物根系生长发育过程中通过穿插和挤压土壤,增加土壤孔隙,从而提高入渗、减少产流、降低坡面径流流速^[15];相较于直根系铁杆蒿而言,须根系白羊草根系大都集中分布于表层 30 cm 土壤中,其根系生物量是铁杆蒿的 1.60 倍,因而对坡面产流具有较强的延缓作用。此外,白羊草样地有机质含量是铁杆蒿样地的 2.04 倍,这也表明较高的有机质含量能更强的促进土壤入渗性能、减少产流、降低流速^[22]。当生物结皮和根系共同存在时,坡面径流流速白羊草群落较铁杆蒿群落增加了 6.15%。这主要是由于对于白羊草群落而言,当植被盖度到达 60%时,由于植株叶片匍匐于地表,实际的地表盖度远远大于 60%,有研究表明较高的植被盖度则抑制了藓结皮发育,有助于藻结皮的发育^[23],而藻结皮的存在可显著提高坡面径流流速、促进产流^[20]。本研究并没有将生物土壤结皮的类型加以区分,在今后的研究中将加强生物土壤结皮类型对坡面水动力学特征的影响。Darcy-Weisbach 阻力系数(f)反映了径流在流动过程中所受阻力的大小,曼宁系数(n)反映了坡面粗糙程度。对于白羊草群落而言,全植被和植物根系影响下 Darcy-Weisbach 阻力系数较高分别较铁杆蒿增加了 5.04%,4.60%。这主要是由于白羊草匍匐于地表生长和白羊草相对于铁杆蒿具有较大根基,其地表起伏/糙度较大^[24],因而具有较大

的阻力系数。而白羊草群落根系和生物结皮同时存在时,阻力系数较铁杆蒿减小了 3.86%。这主要是由于苔藓结皮可改变土壤微地形,增加地表糙度,进而增加了坡面径流阻力系数^[21]。

4 结论

(1) 草本植物群落近地表各要素覆盖下,Re 小于 500,属于层流。随植物群落各要素的依次减少,流型从缓流变为急流,Fr 均小于裸地。随植物群落各要素依次减少,流型从缓流变为急流。植被群落覆盖径流流速降低了 8.66%~76.79%,径流量减少了一12.45%~49.30%,阻力增加了 62.55%~4 346.92%和 33.16%~717.25%。

(2) 植被近地表各要素均会降低流速,增加阻力。生物土壤结皮对流速的降低作用最大,分别较地上部分和根系增加了 54.44%~199.32%和 225.31%~425.95%;地上部分对阻力增加作用最强,分别较生物土壤结皮和根系增加了 175.76%~4 676.57%和 29.68%~1 114.74%。近地表各要素对径流量的影响不一致,白羊草群落地上部分和铁杆蒿群落生物土壤结皮可减少径流量,而其余各要素均可增加径流量。

(3) 白羊草群落地上部分和根系减小流速和增加 Darcy-weisbach 阻力系数的作用大于铁杆蒿,生物土壤结皮减小流速和增加 Darcy-weisbach 阻力系数的作用小于铁杆蒿。白羊草群落地上部分和生物土壤结皮对曼宁糙率系数的增加效应低于铁杆蒿,根系则高于铁杆蒿。白羊草群落地上部分减少径流量作用较铁杆蒿增加了 4 367.80%;白羊草群落生物土壤结皮增加产流量的作用较铁杆蒿增加了 183.52%。白羊草群落和铁杆蒿群落的根系均可增加产流量,且白羊草群落增加的作用较铁杆蒿减少了 49.77%。

参考文献:

- [1] 潘成忠,上官周平.牧草对坡面侵蚀动力参数的影响[J].水利学报,2005,36(3):1-8.
- [2] Pan C Z, Shangguan Z P. Runoff hydraulic characteristics and sediment generation in sloped grass-plots under simulated rainfall conditions[J]. Journal of Hydrology, 2006,331:178-185.
- [3] 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.
- [4] 卜崇峰.表土结皮的发育机理及其侵蚀效应研究[D].北京:中国科学院地理科学与资源研究所,2006.
- [5] 徐宪立,马克明,傅伯杰,等.植被与水土流失关系研究进展[J].生态学报,2006,26(9):3137-3143.
- [6] 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.

- [7] 张宽地,王光谦,孙晓敏,等.坡面薄层水流水动力学特性试验[J].农业工程学报,2014,30(15):182-189.
- [8] 李毅,邵明安.草地覆盖坡面流水动力参数的室内降雨试验[J].农业工程学报,2008,24(10):1-5.
- [9] 孟铖铖,张会兰,杨坪坪.模拟植被类型及空间配置对坡面流水动力学特性的影响[J].水土保持学报,2017,31(2):50-56.
- [10] 赵健,魏天兴,陈致富,等.陕西吴起县退耕还林地不同植被水土保持效益分析[J].水土保持学报,2010,24(3):31-34.
- [11] 张晓艳,周正朝.黄土高原地区草地植被调控土壤水蚀机理的研究进展[J].草业科学,2015,32(1):64-70.
- [12] Coppola A, Basile A, Wang X, et al. Hydrological behavior of micro-biotic crusts on sand dunes: Example from NW China comparing infiltration in crusted and crust-removed soil[J]. Soil & Tillage Research, 2011, 117(34/43).DOI:10.1016/j.still.2011.08.003.
- [13] 张侃侃,卜崇峰,高国雄.黄土高原生物结皮对土壤水分入渗的影响[J].干旱区研究,2011,28(5):808-812.
- [14] 戴全厚,喻理飞,薛筵,等.植被控制水土流失机理及功能研究[J].水土保持研究,2008,15(2):32-35.
- [15] 徐震,高建恩,赵春红.草地植被结构对坡面流水动力学特性的影响研究[J].水利规划与设计,2018,12(6):112-117.
- [16] 董万荣,朱兴平,何增化,等.定西黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀规律研究[J].水土保持通报,1998,18(3):1-9.
- [17] 张宽地.坡面径流水动力学特性及挟沙机理研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2011.
- [18] Forster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics: I. velocity relationships[J]. Transactions of the Asae, 1984, 27(3):790-796.
- [19] Gilley J E, Kottwitz E R, Simanton J R. Hydraulic characteristics of rills[J]. Transactions of the Asae, 1990, 33(6):1900-1906.
- [20] Kinast S, Meron E, Yizhaq H, et al. Biogenic crust dynamics on sand dunes[J]. Physical Review E, 2013, 87(2).DOI:10.1103/PhysRevE.87.020701.
- [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,2021,40(6):8-13.
- [22] 高婵婵,赵传燕,王超,等.黑河上游天老池流域不同植被下土壤理化性质和入渗特征[J].水土保持学报,2016,30(1):117-121.
- [23] 卜崇峰,张朋,叶菁,等.陕北水蚀风蚀交错区小流域苔藓结皮的空间特征及其影响因子[J].自然资源学报,2014,29(3):490-499.
- [24] 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.

(上接第60页)

- [15] Yang Y Y, Li X H, Ratcliffe R G, et al. Characterization of ammonium and nitrate uptake and assimilation in roots of tea plants[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2013, 60(1):91-99.
- [16] 李裕元.坡地磷素迁移研究进展[J].水土保持研究, 2006, 13(5):1-4.
- [17] Hauck R D. Nitrogen in Crop Production [M]. Sheffield, UK: American Society of Agronomy, 1984.
- [18] 曹兵,徐秋明,任军,等.延迟释放型包衣尿素对水稻生长和氮素吸收的影响[J].植物营养与肥料学报,2005,11(3):352-356.
- [19] 杜建军,毋永龙,田吉林,等.控/缓释肥料减少氨挥发和氮淋溶的效果研究[J].水土保持学报,2007,21(2):49-52.
- [20] 张优,王东辉,吕闰强.缓释氮肥在茶园中施用效果研究[J].安徽农业科学,2008,36(2):651-652,678.
- [21] 陈勋,王红娟,毛迎新,等.缓释配方肥在茶树上的应用初探[J].湖北农业科学,2015,54(22):5625-5628,5640.
- [22] Ma L F, Shi Y Z, Ruan J Y. Nitrogen absorption by field-grown tea plants (*Camellia sinensis*) in winter dormancy and utilization in spring shoots[J]. Plant and Soil, 2019, 442:127-140.
- [23] Okano K, Komaki S, Matsuo K. Remobilization of nitrogen from vegetative parts to sprouting shoots of young tea (*Camellia sinensis* L.) plants[J]. Japanese Journal of Crop Science, 1994, 63(1):125-130.
- [24] 韩文炎,马立锋,石元值,等.茶树控释氮肥的施用效果与合理施用技术研究[J].植物营养与肥料学报,2007, 13(6):1148-1155.
- [25] 林燕萍,黄毅彪,胡泽波,等.氮肥减量下缓释肥对武夷岩茶品质的影响[J].茶叶通讯,2020,47(2):221-226.
- [26] 邓敏,徐泽,胡留杰,等.不同氮营养水平对福鼎大白茶产量及品质的影响[J].西南农业学报,2012,25(4):1330-1333.
- [27] Ruan J, Haerdter R, Gerendas J. Impact of nitrogen supply on carbon/nitrogen allocation: a case study on amino acids and catechins in green tea [*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze] plants[J]. Plant Biology, 2010, 12(5):724-734.