

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.005; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.005.

高慧茹, 张会兰, 谷方正, 等. 凸型坡面植被空间配置调控坡面流动力学特性的机制[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1):120-128.

Gao Huiru, Zhang Huilan, Gu Fangzheng, et al. Mechanisms of spatial configuration of vegetation on convex slopes regulating hydrodynamic characteristics of overland flow[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1):120-128.

凸型坡面植被空间配置调控坡面流 水动力学特性的机制

高慧茹¹, 张会兰^{1,2}, 谷方正¹, 袁伟诚¹

(1. 水土保持国家林业和草原局重点实验室 北京林业大学, 北京 100083;

2. 北京林业大学 重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083)

摘要: [目的] 明确黄土高原地区凸型坡面下防治水土流失最佳植被带位置, 揭示坡面形态与植被布局的耦合作用对地表径流水动力学过程的调控作用, 为水土保持措施植被优化配置提供理论依据。[方法] 通过室内水槽试验, 设置曲率半径分别为 $r_1=6.1951\text{ m}$, $r_2=9.2301\text{ m}$, $r_3=18.3853\text{ m}$ 的 3 种凸型坡, 并以平坡作为对照。在单宽流量分别为 3.1, 4.2, 5.3, 6.4, 7.5 L/(m·s) 的 5 种条件下, 系统观测坡面上部(L₁)、坡面中上部(L₂)、坡面中部(L₃)、坡面中下部(L₄)和坡面下部(L₅)不同植被带位置的水动力学特性。[结果] (1) 植被覆盖显著改变坡面流态特征, 与裸坡相比, 水位可壅高 0.93~1.35 倍, 流速降低 2.6%~27.5%。凸型坡面水深沿程呈现先降后升的非线性分布特征, 最大降幅 83.2%, 且空间异质性显著高于平直坡面。(2) 雷诺数(Re)与流量呈强线性正相关关系($R^2>0.99$), 但受坡型影响不显著。植被带通过增加阻力系数(f)促使水流向缓流流态转变, 且 f 与 Re 符合幂函数关系($R^2>0.82$)。(3) 植被带位置对流速调控具有显著的空间异质性($p<0.01$)。平坡条件下植被带 L₂ 位置减速效果最佳, 而凸型坡下植被带 L₄ 位置减速率最好, 延缓率最高达 27.5%。[结论] 黄土高原凸型坡面地区将植被带布设于坡面中下部(L₄)位置可显著提升水土保持效益, 且坡面曲率可以改变坡面流势能分布, 增强植被带的阻流效果, 实际应用中应结合地形特征优化植被带布设位置。

关键词: 凸型坡面; 坡面流; 水动力学特性; 植被配置; 调控机制

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0120-09

Mechanisms of spatial configuration of vegetation on convex slopes regulating hydrodynamic characteristics of overland flow

Gao Huiru¹, Zhang Huilan^{1,2}, Gu Fangzheng¹, Yuan Weicheng¹

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation, National Forestry and Grassland Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Jinyun Mountain Three Gorges Reservoir Area Forest Ecosystem National Research Station, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] This study aims to determine the optimal location of vegetation belts for preventing soil erosion on convex slopes in the Loess Plateau, clarify how the coupling between slope morphology and vegetation layout regulates surface runoff hydrodynamics, and provide theoretical support for optimizing vegetation configurations in soil and water conservation practices. [Methods] An indoor flume experiment was conducted using three convex slopes with curvature radii of $r_1=6.1951\text{ m}$, $r_2=9.2301\text{ m}$, and $r_3=18.3853\text{ m}$, and a flat slope as the control. Under five conditions of single-width flow rates of 3.1, 4.2, 5.3, 6.4 and 7.5 L/(m·s), the hydrodynamic characteristics were systematically observed at different vegetation belt locations: the upper part of

收稿日期: 2025-04-12

修回日期: 2025-05-12

接受日期: 2025-05-05

资助项目: 内蒙古自治区揭榜挂帅项目“不同生态修复空间风沙水沙靶向阻控技术”(2024JBGS0023); 国家自然科学基金项目“植被结构影响下的坡面流挟沙力动力机制研究”(52279056)

第一作者: 高慧茹(2001—), 女, 山东省淄博人, 在读硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: gaohuiru@bjfu.edu.cn

通信作者: 张会兰(1984—), 女, 河北省保定人, 博士, 教授, 主要从事水文与水沙动力过程研究。E-mail: zhanghl@bjfu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

the slope (L_1), the middle and upper part of the slope (L_2), the middle part of the slope (L_3), the middle and lower part of the slope (L_4) and the lower part of the slope (L_5). [Results] (1) Vegetation cover significantly changed the overland flow regime. Compared with bare slopes, water level increased by 0.93~1.35 times, while flow velocity decreased by 2.6%~27.5%. On convex slopes, water depth along the longitudinal direction showed a nonlinear distribution pattern of first decreasing and then increasing, with a maximum decrease of 83.2%, and spatial heterogeneity was significantly higher than that on flat slopes. (2) The Reynolds number (Re) showed a strong positive linear correlation with flow rate ($R^2 > 0.99$), but the influence of slope shape was not significant. Vegetation belts increased the resistance coefficient (f), promoting a transition to a tranquil flow regime. f and Re followed a power function relationship ($R^2 > 0.82$). (3) Vegetation belt location influenced flow velocity regulation with significant spatial heterogeneity ($p < 0.01$). Under flat slope conditions, the vegetation belt at L_2 location showed the best deceleration effect, while on convex slopes, the L_4 location exhibited the highest flow deceleration rate, with a maximum delay rate of 27.5%. [Conclusion] On convex slopes of the Loess Plateau, placing vegetation belts at the middle and lower part of the slope (L_4) can significantly improve soil and water conservation effectiveness. Slope curvature can alter the distribution of flow potential energy along the slope, thereby strengthening the flow resistance effect of the vegetation belts. In practical applications, the location of vegetation belts should be optimized based on topographic characteristics.

Keywords: convex slope; overland flow; hydrodynamic characteristics; vegetation configuration; regulatory mechanism

水土流失是全球面临的重要生态环境问题,黄土高原地区表现尤为严峻。该区域 1901—2016 年均土壤侵蚀模数高达 5 000~10 000 t/(km²·a),侵蚀强度远超土壤自然再生速率,当地生态环境极为脆弱^[1-3]。因水土流失加剧导致黄河流域下游河道泥沙淤积,严重破坏河道泥沙动态平衡^[4-5],导致生态环境发展面临严重挑战。

植被作为防治泥沙流失的关键调控因子,在水土保持工作中发挥着极为重要的作用^[6]。而坡面是发生水土流失的最小地理单元,坡面流水动力学特性也直接决定水力侵蚀的强度与空间分异规律^[7]。研究表明植被借助地上部分的冠层对降雨进行拦截、地下根系稳固土壤并促进入渗以及地表覆盖延缓径流流速等综合作用机制,发挥出显著的阻蚀减沙效果^[8-9]。Li 等^[10]研究指出,植被作为景观的关键组成部分,其种类、数量及配置方式均对侵蚀产沙具有显著影响,在较大空间尺度下,植被格局的影响更为突出。丁琳等^[11]在不同植被分布格局试验中发现,横带状植被配置比均匀覆盖更能有效减小径流侵蚀,显著抑制泥沙的分离和输移。但大多研究均为基于室内水槽开展的顺直坡面水沙运移试验^[12-17]。然而自然界中,坡面普遍呈现复合曲率特征,其中陡坡坡面微地形在黄土高原沟壑区占比超过 23.1%^[18],由于降雨入渗分布不均衡,导致径流入渗程度以及土壤侵蚀发生呈现明显的空间异质性^[19],地形—水动力耦合效应使传统平坡研究结论难以指导实际侵蚀防治^[20-21]。

因此,本研究从自然坡型视角切入,基于黄土高原地区的实际地形特征,开展平坡与凸型坡面的对比冲刷试验,进一步深入探讨凸型坡与植被带不同配置位置对水动力特性的协同作用机制。该研究可为揭示侵蚀原理、侵蚀过程提供科学依据,同时为生态修复中的植被优化配置提供理论支撑。

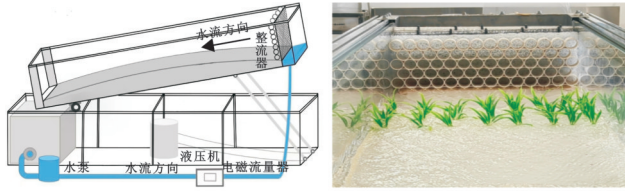
1 试验装置与方法

1.1 试验装置与设计

本试验于 2024 年 5—7 月在北京林业大学沟槽侵蚀机理与过程实验室进行。黄土高原地区地形复杂,坡面形态多样,为了贴近实际地形开展研究,试验装置的设计充分参考了该地区的地貌特征。装置如图 1 所示,试验水槽长为 2.7 m,宽 0.5 m。本试验对研究地区复合坡面进行概化,采用曲率半径 r ^[22]量化凸起坡面的隆起程度,建立物理试验模型进行试验。试验充分考虑研究区降雨强度以及引起土壤侵蚀的临界雨强,与本试验条件相结合后,选取 5 组流量作为本试验流量,五组单宽流量为 3.1, 4.2, 5.3, 6.4, 7.5 L/(m·s)。为使试验结果表现出明显差异,将植被覆盖度设定为 20%,坡度设定为 15°^[23]。试验采用光滑 EPS 泡沫板模拟凸型坡面,设置 3 种不同曲率半径,分为坡型 1 ($r_1=6.1951$ m)、坡型 2 ($r_2=9.2301$ m) 和坡型 3 ($r_3=18.3853$ m),并设置平坡进行对照。

试验采用人工塑料矮草来模拟当地常见优势种植物。选取试验位置长度 2 m,均匀分为五段,草带沿

水流方向宽度为40 cm,均匀排列,将其分五次分别固定于坡面上部(L₁)、坡面中上部(L₂)、坡面中部(L₃)、坡面中下部(L₄)、坡面下部(L₅),并设置裸坡(L₀)与覆盖草带坡面进行对照分析。试验工况共计120组(图1)。



位置L ₀	(裸坡)					
位置L ₁	(坡面上部)	■				
位置L ₂	(坡面中上部)		■			
位置L ₃	(坡面中部)			■		
位置L ₄	(坡面中下部)				■	
位置L ₅	(坡面下部)					■

图1 试验装置及草带分布示意图

Fig. 1 Experimental setup and schematic diagram of grass belt distribution

1.2 测点设置

试验前通过水平尺校正水槽坡度,确保坡面平整度。调试流量控制系统,待水流稳定后开展测量工作。鉴于染色法存在无法获取断面平均流速、易受溶液扩散及人眼识别误差影响,且本试验凸型坡面缺乏统一表面流速修正标准等局限性,故采用流量法测定断面平均流速。沿草带方向设置6个观测断面(间距40 cm),每个断面横向均布3个测点(间距10 cm),共18个测量点位,累计获取2 160组水深数据。采用精度0.01 mm水位测针进行测量,每个测点重复测量3次(标准差<5%),取平均值作为该测点水深;各断面3个测点取均值,得到断面平均水深。根据流量与断面平均水深,计算断面平均流速,并记录各工况下水温。

1.3 坡面流水动力参数

1.3.1 曲率半径计算公式

$$R = \frac{e^2}{8h} + \frac{h}{2} \quad (1)$$

式中: R 为坡面的曲率半径(m); e 为坡顶到坡底的水平距离; h 为坡面凸起最高点到 e 两者之间的垂直高度差。

1.3.2 平均流速

$$v = Q/hb \quad (2)$$

式中: v 为断面平均流速(m/s); Q 为放水流量(m³/h); h 为实测中断面水深(m); b 为有效过流宽度(m),由于本研究所用人工草直径尺寸较小,其植被覆盖层对过流宽度的减小可忽略不计,故将试验的有效过流宽度确定为水槽宽度0.5 m。

1.3.3 雷诺数和弗劳德数

$$Re = vR/\mu \quad (3)$$

式中: R 为水力半径(m),薄层水流的水力半径近似等于断面水深 h ; μ 为水流运动黏滞系数(cm²/s), $\mu = 0.01775/(1+0.0337t+0.000221t^2)$; t 为水温(°C)。

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

式中: Fr 为弗劳德数; g 为重力加速度,值为9.8(m/s²)。

1.3.4 阻力系数

$$f = 8gRJ/v^2 \quad (5)$$

式中: J 为水流能坡, $J = \sin\theta$; θ 为水槽坡度(°)。

1.3.5 不同植被带位置下流速的延缓率

$$P = \frac{v_0 - v_g}{v_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中: v_0 为裸坡面平均流速(m/s); v_g 为植被带位置下坡面平均流速(m/s)。 P 越大,表明对流速的延缓效果越好。

1.3.6 不同植被带位置下水位升高倍数

$$n = h_g/h_0 \quad (7)$$

式中: n 为水位升高倍数; h_g 为植被带位置下坡面水深(mm); h_0 为裸坡坡面水深(mm)。

2 结果与分析

2.1 不同植被带位置条件下的沿程水深变化

图2为单宽流量5.3 L/(m·s)条件下不同植被带位置在4种坡型条件下的沿程水深变化。裸坡条件下水深呈明显下降趋势,阻力降低水流势能,水深整体较低,流速较快。植被覆盖条件下因植被带阻流作用重构水面线,形成局部壅水区,总体水深下降趋势变缓。

在平坡条件下,植被带布局直接影响局部壅水位置,其中L₂、L₃、L₄位置下壅水效果最为明显,产生最高壅水峰值分别为8.17 mm、10.18 mm、8.31 mm,水深变异系数分别为0.16、0.28、0.20,其中L₂位置平均水深最高为6.59 mm,且水深变异系数最低,表现出更好的稳流特性。凸坡条件下表现出地形与植被的协同作用。将断面1到断面3划分为上坡段,断面4到断面6划分为下坡段,由图2可见坡型1上坡段由于地形曲率影响产生强壅水效应,对水深的影响显著高于植被带的局部调控作用($p < 0.01$),最大水深可达28.86 mm;坡型2下L₄和L₃位置分别形成9.80 mm和10.11 mm水深峰值,但L₄位置下坡段水深降幅为38.9%,显著低于L₃位置49.4%,其阻流效果更为稳定;坡型3中上坡段L₂、L₃位置壅水效果更佳,下坡段L₄位置壅水效果更佳,其上坡段L₂、L₃位置与下坡段L₄位置通过分段阻流实现水深调控作用。坡面下坡段中L₄位置

水深变化更为平稳,且水深更深,对水流的减缓作用更好。整体而言,水深最小的为裸坡坡面,在平坡下

整体降低水流流速效果最好的为 L_2 位置,在凸坡下降低水流流速效果最好的为 L_4 位置。

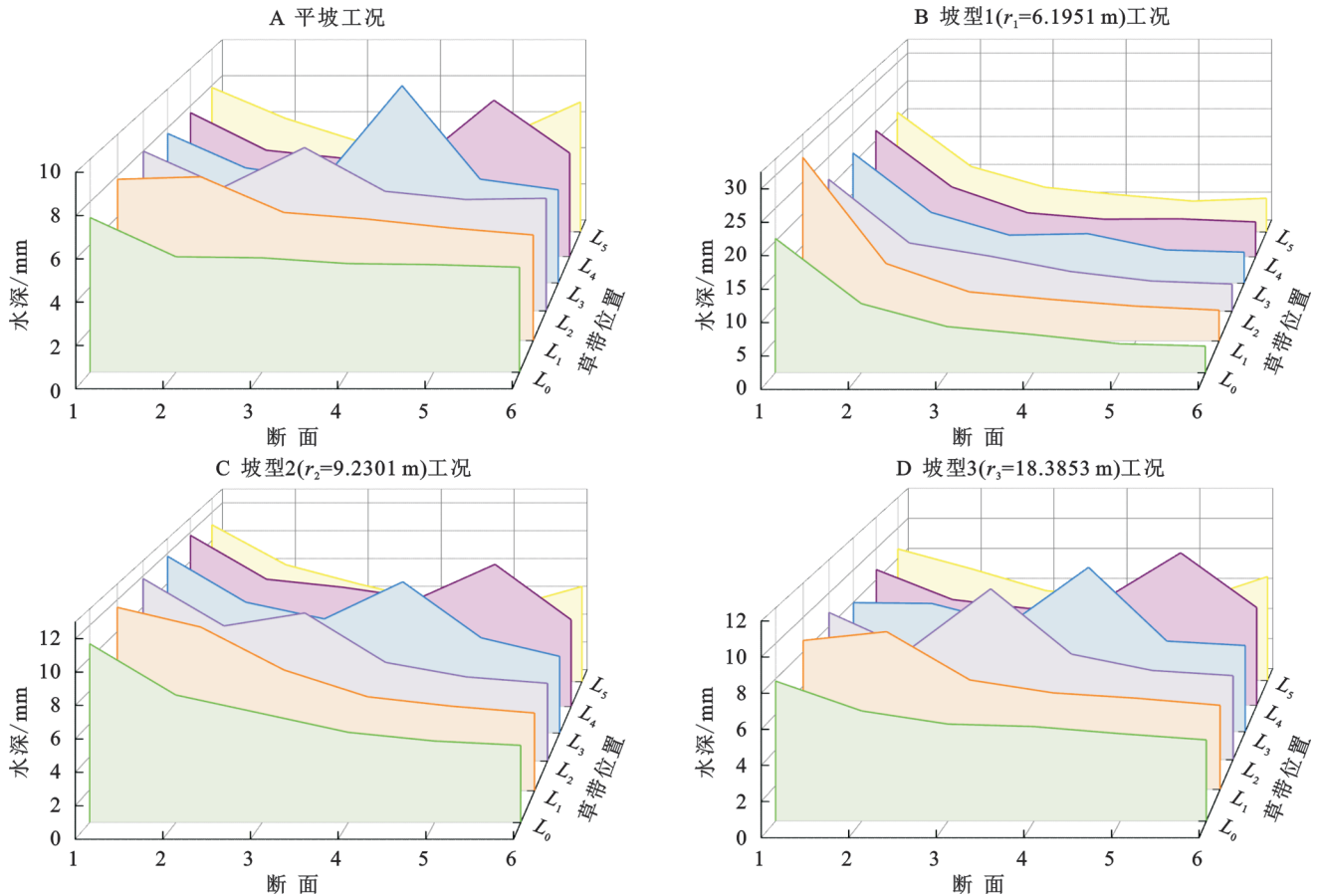


图 2 不同坡型与植被带位置条件下的沿程水深变化

Fig. 2 Variations in water depth along longitudinal direction under different slope types and vegetation belt locations

2.2 不同植被带位置条件下的流速变化

图 3 为不同植被带位置在 4 种坡型下平均流速随流量的变化情况。在平坡的 L_1 — L_5 位置、坡型 1 的 L_1, L_3 — L_5 位置、坡型 2 的 L_0, L_2 — L_4 位置及坡型 3 的 L_3 位置,流速与流量呈显著线性相关($R^2 > 0.99$),流速随流量的增加而变大。其他部分实测数据与理论线性关系偏离,表明坡面流在流动的过程中存在能量损失,流量增加使坡面流能量损失加剧,导致流速增速趋缓,故而其余位置实际流速与流量线性关系不显著。

分析各工况下平均流速可知,裸坡下平均流速峰值达 1.1 m/s,显著高于各植被覆盖坡面($p < 0.01$),有效体现植被覆盖壅水滞流作用。平坡下 L_2 位置平均流速最低,与其他植被带位置下平均流速差异显著($p < 0.05$);凸坡下 L_4 位置平均流速最低,与其他植被带位置下平均流速差异极显著($p < 0.01$)。结果表明将植被带布设于平坡 L_2 位置、凸坡 L_4 位置抑制径流加速效果更优,壅水滞流作用优于其他布局。

表 1 为不同植被带位置下的壅高水位倍数(n)与流速延缓率(P), n 越高, P 越大,表明对流速的延缓

效果越好。平坡条件下, L_1 位置产生最大壅高水位倍数 1.06~1.20 倍; L_2 位置呈现最高流速延缓率 12.8%~18.0%,其综合减流效能排序为 $L_2 > L_1 > L_3 > L_4 > L_5$ 。凸坡条件下,植被带布设于 L_4 位置壅高水位倍数与流速延缓率相较于其他位置更高,表现出更佳的调控作用。坡型 1、坡型 2、坡型 3 对应的 n 分别达 1.15~1.21, 1.21~1.29, 1.23~1.40 倍, P 分别提升至 15.8%~22.2%, 17.5%~25.7% 和 16.3%~27.5%,减流效能排序为 $L_4 > L_3 > L_2 > L_1 > L_5$ 。

2.3 不同植被带位置条件下的流态变化

雷诺数(Re)是判断水流流态的核心参数,按照明渠水流流态理论划分, $Re < 500$ 为层流, $500 \leq Re \leq 5000$ 为过渡流, $Re > 5000$ 为紊流^[24]。图 4 为不同植被带位置在 4 种坡型下的雷诺数变化。由图 4 可知,同一坡型下植被不同位置对雷诺数变化无显著差异($p > 0.05$),主要受流量变化影响,随流量的增大呈线性增加趋势($R^2 > 0.99$)。无论是否有植被覆盖,当单宽流量增至 4.2 L/(m·s) 时,流态由过渡流转为紊流,且紊动强度随流量增加而增强。

由图 5 可知,所有工况下 $Fr > 1$,表明水流处于急

流状态。由于植被茎叶通过增加床面糙率,削弱水流惯性力;诱导紊流结构重组,提升能量耗散效率。植被覆盖显著降低 Fr 值($p<0.05$),其中平坡 L_2 与凸

坡 L_4 布局的 Fr 分别达到最小值3.11,1.83,较裸坡降低23.2%和23.1%。裸坡因缺乏阻力调控, Fr 峰值达4.17,导致侵蚀风险提升。

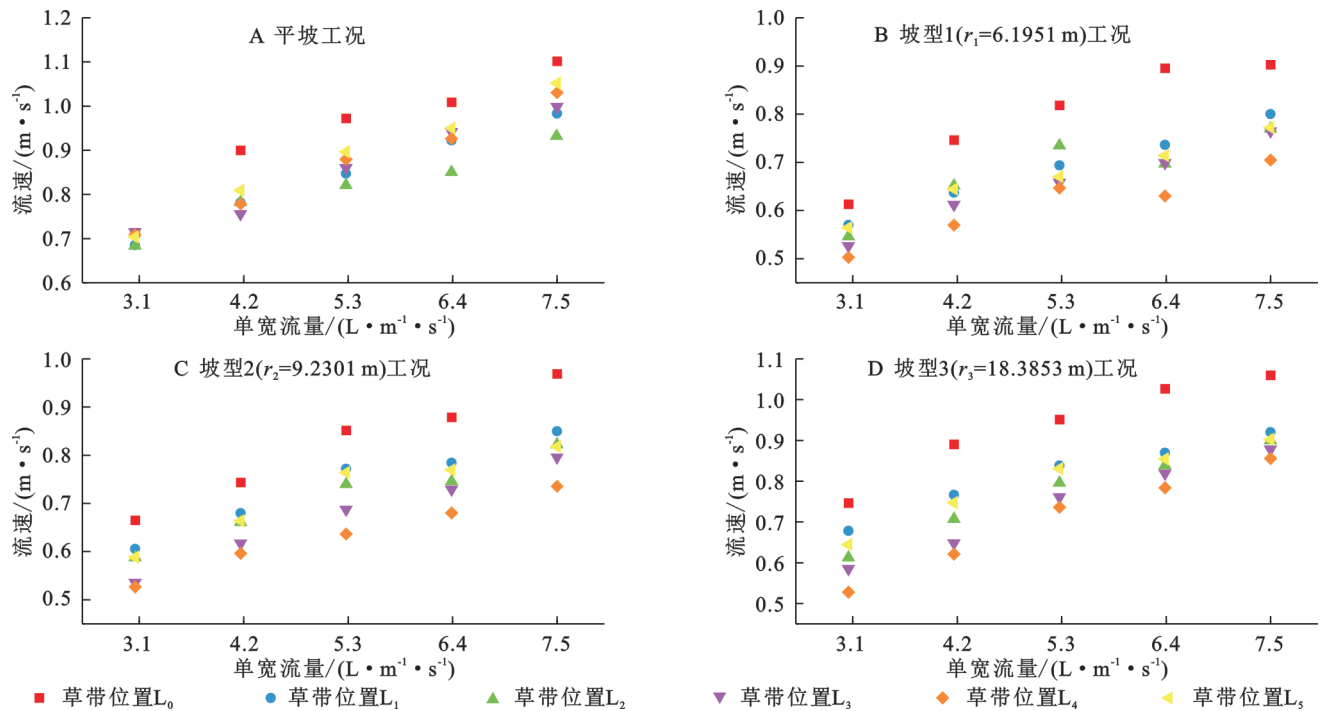


图3 不同坡型与植被带位置条件下流速变化

Fig. 3 Variations in flow velocity under different slope types and vegetation belt locations

表1 不同坡型与植被带位置条件下的壅高水位倍数、流速延缓率

Table 1 Multiples of water level rise and flow velocity deceleration rates under different slope types and vegetation belt locations

草带位置	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
平坡水位升高倍数	1.06~1.17	1.00~1.07	0.94~1.04	0.97~1.00	0.93~1.01
平坡流速延缓率/%	8.4~13.6	12.8~15.4	4.7~15.8	5.1~13.8	2.6~11.1
坡型1水位升高倍数	1.18~1.28	1.09~1.15	1.13~1.16	1.15~1.21	1.06~1.12
坡型1流速延缓率/%	10.2~18.8	9.7~18.8	12.2~17.5	15.8~22.2	6.8~14.5
坡型2水位升高倍数	1.11~1.14	1.13~1.18	1.19~1.23	1.21~1.29	1.09~1.12
坡型2流速延缓率/%	9.0~14.1	10.7~15.9	15.6~18.0	17.5~25.7	8.7~13.2
坡型3水位升高倍数	1.13~1.20	1.21~1.29	1.22~1.35	1.23~1.40	1.13~1.18
坡型3流速延缓率/%	9.7~15.4	15.2~20.6	16.0~25.9	16.3~27.5	10.6~14.9

注:水位升高倍数与流速延缓率均为同一植被带位置下与裸坡面对比。

2.4 不同植被带位置条件下的阻力系数变化

阻力系数反映地表物质对坡面径流所产生的阻力大小。在本研究中,为简化分析,我们忽略其他形式的阻力,并采用达西阻力系数来具体衡量由于植被带存在而对坡面流产生的阻力影响。由图6可知,各类工况条件下 f 与 Re 呈正相关关系。当水流处于小流量状态时,水面相对平静且波动幅度较小。随着流量逐渐增大,水流与植被之间的相互作用更为剧烈导致能量损耗,使得坡面 f 增加。

坡面阻力不仅与地表粗糙单元有关,还与坡面流流态息息相关。在层流时,流体微元间紊动小,阻力较小;在紊流时,流体微元间出现撞击,阻力较大。在

本次试验中, f 与 Re 间关系如图6所示,各工况条件下,随着 Re 的增加 f 也随之增加, f 与 Re 之间呈正相关关系,且随着 Re 增大, f 呈幂函数递增($R^2>0.94$)。

3 讨论

在不同坡型上,植被带位置会影响其对径流的调控效果。苏远逸等^[25]研究发现坡面种植植被后,产流强度与裸坡相比有不同程度的降低。说明植被带通过改变坡面的水流路径和流速,减少径流的产生,从而降低水土流失的风险。该试验结果表明将植被带布设于平坡 L_2 位置、凸坡 L_4 位置抑制径流加速效果更佳,壅水滞流作用优于其他布局。该结论

与张霞^[26]研究结果相一致,植被带布设于坡体中下部具有更好的缓冲作用,通过缓流拦沙与滞流消能的双重机制,可显著提升侵蚀防控效能,但过近坡脚的布设位置反而削弱此效应。流态分析结果显示植

被的存在会明显降低坡面流 Fr 的数值,且 Fr 的衰减程度与植被带位置存在非线性响应关系;各工况条件下,随着 Re 的增加 f 也随之增加, f 与 Re 之间呈正相关关系,本试验结果与前人研究相一致^[27]。

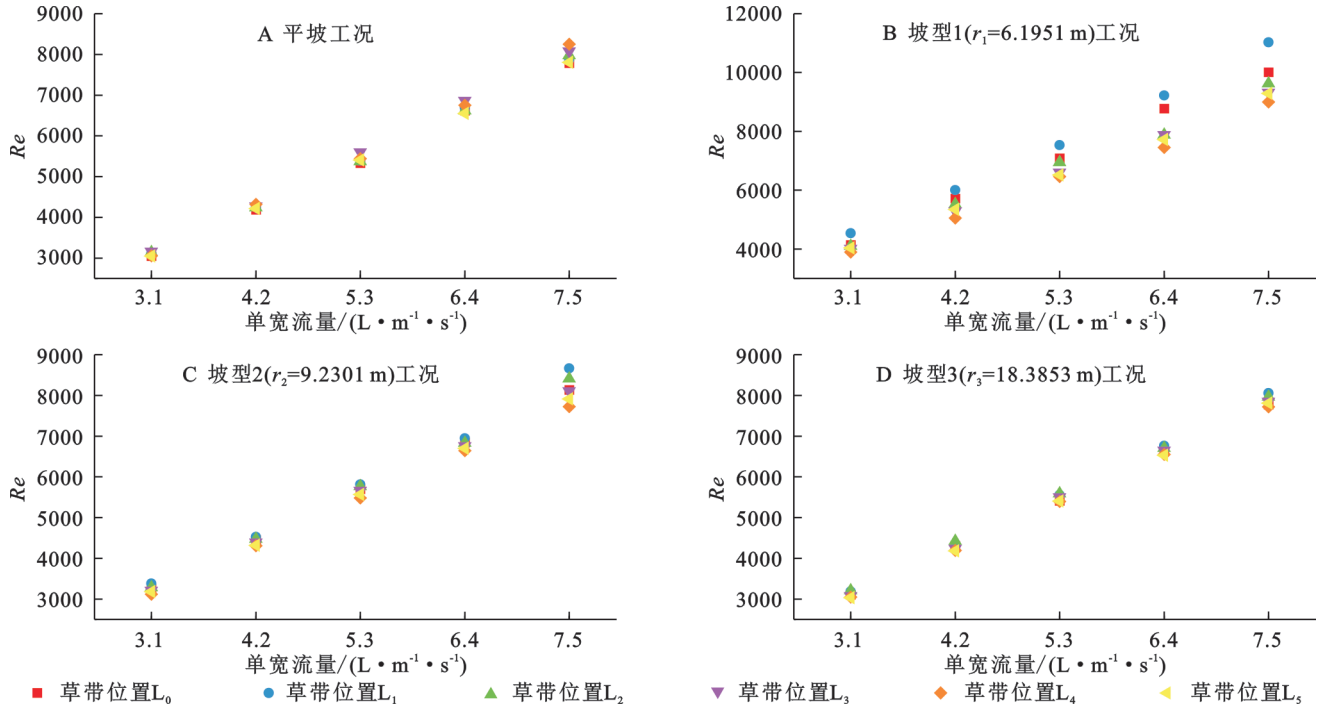


图 4 不同坡型与植被带位置条件下的雷诺数变化

Fig. 4 Variations in Reynolds number under different slope types and vegetation belt locations

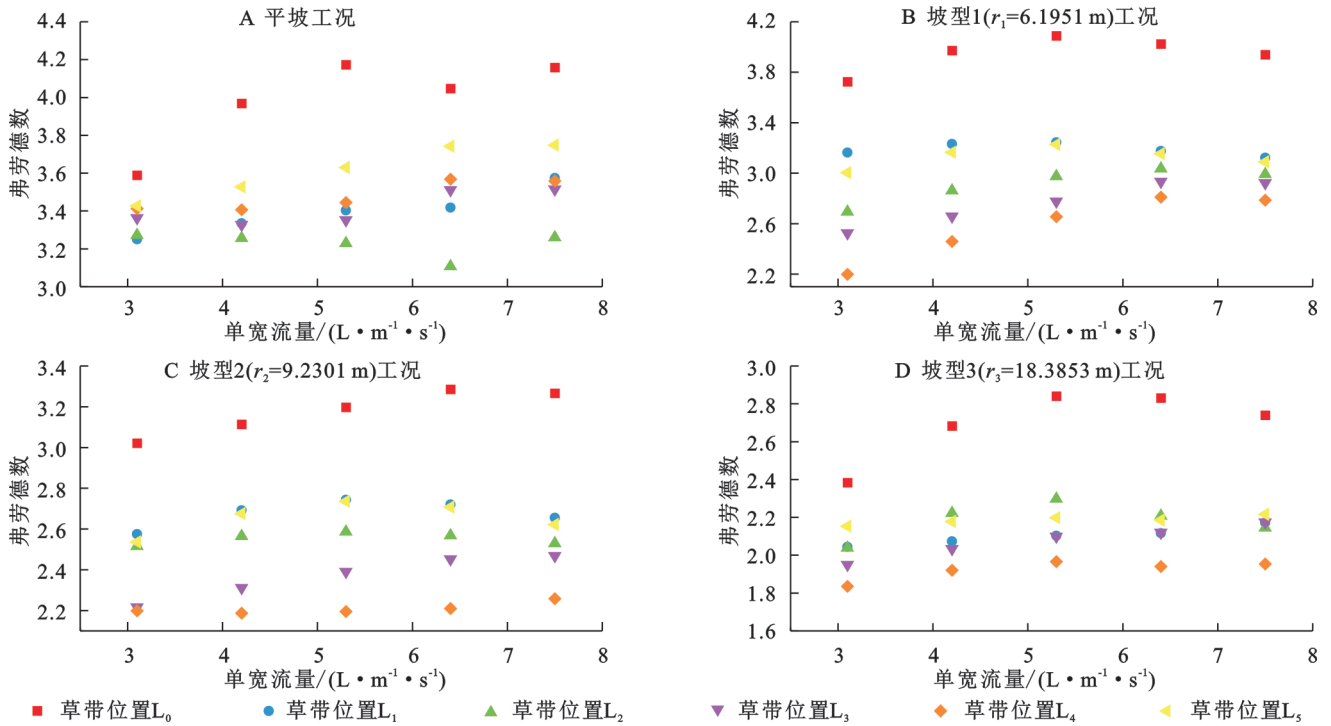


图 5 不同坡型与植被带位置条件下的弗劳德数变化

Fig. 5 Variations in Froude number under different slope types and vegetation belt locations

针对 L_4 植被带位置下不同坡型的水流流态特征展开分析。由于本次试验所用流量较大,各坡型均未能形成缓流态,水流流态集中分布于急过渡流区和急

紊流区(图 7),且 Re 值较其他研究结论相比^[28]提高约 5 倍,归因于非渗透性光滑下垫面减少了边界阻力,而土壤基质的下渗作用与糙率效应会显著降低流速及

Re 值。各工况下平均流速与水深大致呈线性关系。在坡型不变的条件下,随着流量的增加,平均流速和 水深也随之增加,水流从急过渡流转变为急紊流;当

流量不变时,平坡状态下 Fr 最大水流最急,凸坡下随着 曲率半径减小水流由急流趋向缓流,这种差异源于 凸坡曲率变化引起的能量耗散增强效应。

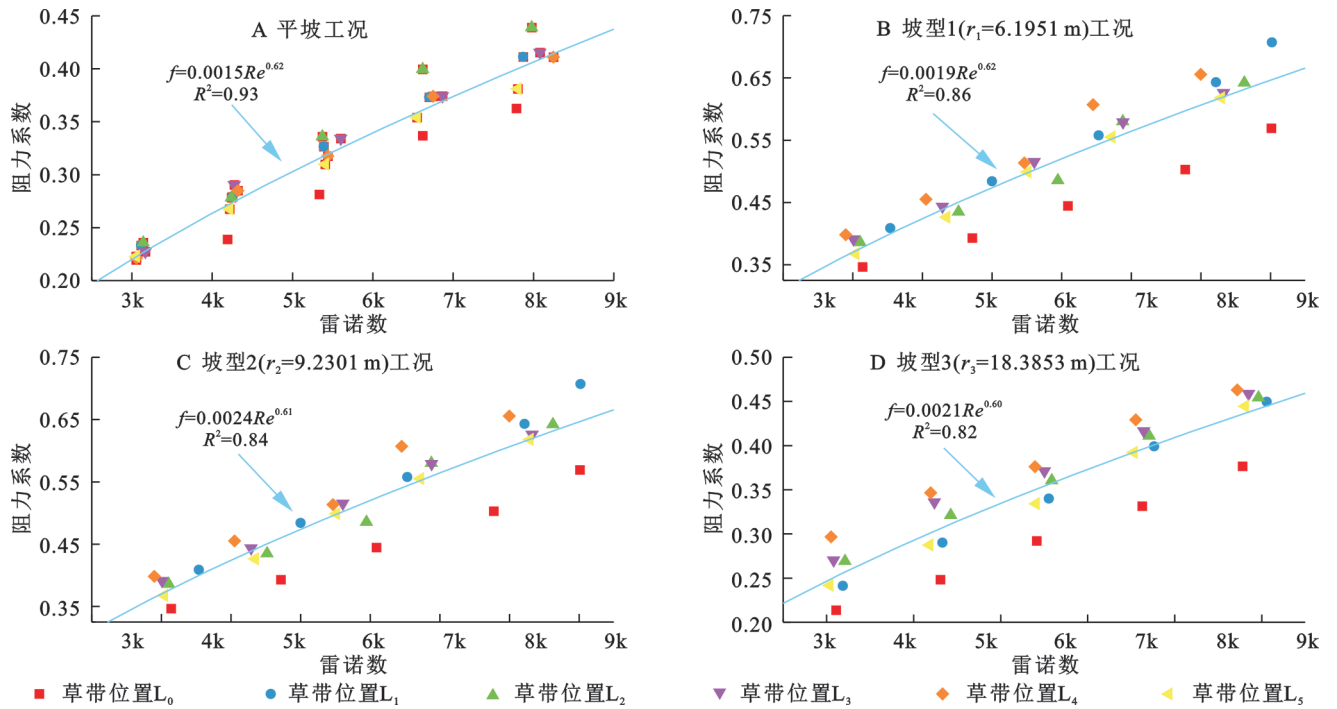


图 6 不同坡型与植被带位置条件下的阻力系数变化

Fig. 6 Variations in resistance coefficient under different slope types and vegetation belt locations

基于同一植被带位置下不同坡型对 f 的影响,随 f 越大,水流克服阻力消耗越多,水流用于泥沙输移的 能量越少。由图 8 可知,曲率半径显著影响阻力系数 f 变化特征 ($p < 0.05$),平坡下植被带 L_4 位置的 f 最小, 凸坡下 L_4 植被带位置在坡型 3 下 f 最大,即 L_4 位置在 坡型 3 时较其他坡型有更好的阻水缓流效应,试验结果 表明并非坡型的曲率半径越大和越小, f 就会越高。 结合于北方黄土坡面,潘成忠等^[29]发现植被带的分布 位置对径流的影响相对较小,植被带位置与不同的坡 型结合,在一定程度上可影响径流的产生和流动,这

反映了植被带位置与坡型对侵蚀过程的综合影响。 黄土高原地形破碎,沟壑密集,针对该地区凸型坡面 独特的侵蚀产沙机制,更应系统结合坡型与植被配置 的协同调控机制^[25]。结合当地实际情况可选择改善 一定的坡型后于最优位置种植植被,以达到更好的减 缓水土流失的效果。综上,坡型与草带位置对水土流 失防治具有综合作用机制。不同坡型具有不同的特 点和水土流失风险,而草带在不同位置的水土保持功 效也有所差异。通过合理选择草带位置和结合不同 坡型的特点,可以更有效地防治水土流失。

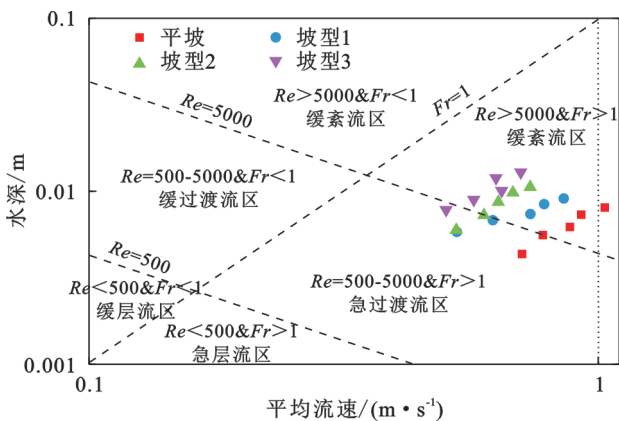


图 7 不同坡型下 L_4 草带位置流态分区

Fig. 7 Flow regime zoning at L_4 grass belt location under different slope types

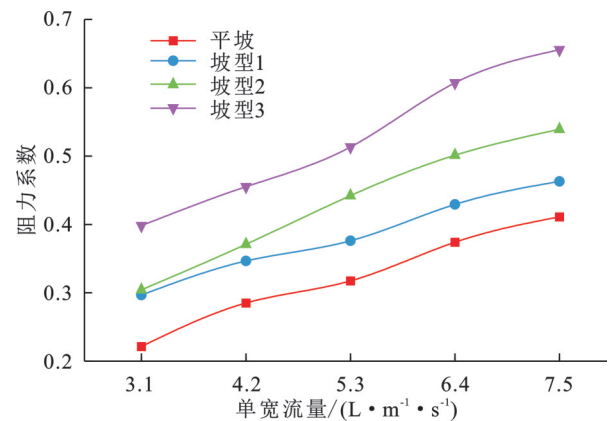


图 8 L_4 位置阻力系数变化趋势

Fig. 8 Variation trends of resistance coefficient at L_4 grass belt location

4 结论

(1) 基于室内径流模拟试验表明,不同曲率半径的坡型通过改变径流势能的分布增强植被带阻流效应,植被带位置显著影响坡面流水动力学特性。其中植被带布设于平坡 L_2 与凸坡 L_4 位置时显现出更强的流速抑制效应。

(2) 各工况下平均流速与流量呈显著线性正相关关系($R^2 > 0.99$),雷诺数(Re)与流量呈强线性关系($R^2 > 0.99$),试验范围内 Re 值介于 3 000~10 000,表征流态以过渡流—紊流为主;弗劳德数(Fr)均大于 1,水流为急流。各工况条件下 f 随流量增大而增加,与 Re 之间呈幂函数递增关系($R^2 > 0.94$)。

(3) 该试验考虑了地形与植被的协同作用,结果体现了植被阻流效能不同坡型下的空间差异。试验结果表明平坡 L_2 与凸坡 L_4 位置分别为最优阻流位置,在实际应用中可结合地形优化植被带布设位置。不能忽视坡型对水流流态的影响,可采用坡型重塑与植被配置的协同设计实现水土保持效益的最大化。

参考文献(References):

- [1] 李宗善,杨磊,王国梁,等.黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J].生态学报,2019,39(20):7398-7409.
Li Z S, Yang L, Wang G L, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: present situations, problems, and counter-solutions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20):7398-7409.
- [2] 穆兴民,李朋飞,刘斌涛,等.1901—2016年黄土高原土壤侵蚀格局演变及其驱动机制[J].人民黄河,2022,44(9):36-45.
Mu X M, Li P F, Liu B T, et al. Spatial-Temporal Development and Driving Mechanisms of Erosion on the Chinese Loess Plateau Between 1901 and 2016 [J]. *Yellow River*, 2022, 44(9):36-45.
- [3] 张霞,李鹏,李占斌,等.不同植被格局下凸型坡径流流速时空变化及产沙研究[J].水土保持学报,2018,32(6):16-21.
Zhang X, Li P, Li Z B, et al. Study on Temporal and Spatial Variation of Runoff Velocity and Sediment in the Convex Hillslope Under Different Vegetation Patterns [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(6):16-21.
- [4] 万世龙,杨海楠,马丽,等.黄河流域城市群水生态系统服务与城镇化权衡协同关系[J].资源科学,2024,46(3):505-523.
Wan S L, Yang H N, Ma L, et al. Trade-offs/synergistic relationship between water ecosystem services and urbanization in the Yellow River Basin urban agglomeration [J]. *Resources Science*, 2024, 46(3):505-523.

- [5] 卢琦,肖春蕾,包英爽,等.打赢“三北”攻坚战,再造一个“新三北”:实现路径与战略规划[J].中国科学院院刊,2023,38(7):956-965.
Lu Q, Xiao C L, Bao Y S, et al. Implementation path and strategic planning of winning the battle of “Three-North” and reconstructing “New Three-North” [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, 38(7):956-965.
- [6] Li L, Nearing M A, Polyakov V O, et al. Evolution of rock cover, surface roughness, and its effect on soil erosion under simulated rainfall [J]. *Geoderma*, 2020, 379:114622.
- [7] 霍云霏,朱冰冰.坡面草被覆盖对侵蚀产沙影响的模拟试验[J].水土保持研究,2022,29(5):14-20.
Huo Y P, Zhu B B. Experimental Study on Impacts of Vegetation Patterns on Sediment Yield of Slope [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(5):14-20.
- [8] 秦伟,曹文洪,郭乾坤,等.植被格局对侵蚀产沙影响的研究评述[J].生态学报,2017,37(14):4905-4912.
Qin W, Cao W H, Guo Q K, et al. Review of the effects of vegetation patterns on soil erosion and sediment yield [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(14):4905-4912.
- [9] 王晓光,王力.水土流失区生态修复政策绩效评价与植被恢复贡献[J].林业科技通讯,2024(11):45-54.
Wang X G, Wang L. Performance evaluation of ecological restoration policies and contribution of vegetation restoration in soil erosion areas [J]. *Forest Science and Technology*, 2024(11):45-54.
- [10] Li W Q, Liu Y J, Zheng H, et al. Complex vegetation patterns improve soil nutrients and maintain stoichiometric balance of terrace wall aggregates over long periods of vegetation recovery [J]. *Catena*, 2023, 227:107141.
- [11] 丁琳,秦伟,殷哲,等.坡面植被格局对径流水动力学特性的影响[J].中国水土保持,2023(12):49-54.
Ding L, Qin W, Yin Z, et al. The impact of slope vegetation pattern on runoff dynamics [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2023(12):49-54.
- [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] 王婷婷,沈海鸣,梁羽石,等.不同坡度条件下连续降雨及汇流对黑土坡面侵蚀的影响[J].水土保持学报,2025,39(2):12-20,29.
Wang T T, Shen H O, Liang Y S, et al. Effects of continuous rainfall and runoff under different slope conditions on hillslope soil erosion in the black soil region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(2):12-20,29.
- [14] 贺元,张会兰,谷方正,等.模拟刚性植被盖度及配置方

- 式对坡面流水动力参数及紊动特性的影响[J]. 水土保持研究, 2025, 32(3): 8-17.
- He Y, Zhang H L, Gu F Z, et al. Simulation of the influence of rigid vegetation coverage and configuration on overland flow hydrodynamics and turbulence characteristics [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(3): 8-17.
- [15] 蔡泽康, 王薇, 尚海鑫, 等. 草被覆盖度下坡面流流速变化及缓流机制研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(3): 225-231, 240.
- Cai Z K, Wang W, Shang H X, et al. Flow velocity change and slow-flow mechanism of overland flow under different vegetation coverage [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2021, 32(3): 225-231, 240.
- [16] Dan C X, Liu G, Zhang Q, et al. The coupling effects of grass and shrub with biological crust on the overland flow hydrodynamic characteristics [J]. *Catena*, 2024, 245: 108281.
- [17] 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.
- [18] 邝高明, 朱清科, 赵磊磊, 等. 黄土丘陵沟壑区陡坡微地形分布研究[J]. 干旱区研究, 2012, 29(6): 1083-1088.
- Kuang G M, Zhu Q K, Zhao L L, et al. Study on distribution of microrelieves on steep slopes in a loess hilly-gully region [J]. *Arid Zone Research*, 2012, 29(6): 1083-1088.
- [19] 邢伟民, 王懿潼, 徐浩林, 等. 坡形和PAM对黄土坡地水土养分迁移特征的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 135-142.
- Xing W M, Wang Y T, Xu H L, et al. Effects of polyacrylamide and slope shape on transportation of soil water and nutrients from the loess sloping land [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(6): 135-142.
- [20] Guo S, Jiang Y H, Tang Y, et al. Experimental study on the soil erosion through a defective pipe under the cyclic infiltration-exfiltration flow [J]. *Transportation Geotechnics*, 2023, 42: 101085.
- [21] 魏霞, 李勋贵, 李占斌, 等. 植被覆盖下黄土凸型复合坡面水流特征[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22): 147-154.
- Wei X, Li X G, Li Z B, et al. Flow characteristics of convex composite slopes of loess under vegetation cover [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(22): 147-154.
- [22] 陈宇航, 李俊锋. 坡表形态对边坡稳定性影响及力学分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2022, 58(7): 37-41, 54.
- Chen Y H, Li J F. Influence of slope surface morphology on slope stability and mechanical analysis [J]. *Gansu Water Resources and Hydropower Technology*, 2022, 58(7): 37-41, 54.
- [23] Zhang X, Yu G Q, Li Z B, et al. Experimental study on slope runoff, erosion and sediment under different vegetation types [J]. *Water Resources Management*, 2014, 28(9): 2415-2433.
- [24] 蒋利斌, 张会兰, 杨坪坪, 等. 降雨和坡面流共同作用下的坡面薄层流水动力学特性[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(8): 77-86.
- Jiang L B, Zhang H L, Yang P P, et al. Hydrodynamics of overland flow under combined effects of precipitation and slope discharge [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(8): 77-86.
- [25] 苏远逸, 李鹏, 任宗萍, 等. 植被空间配置对凸型坡侵蚀及泥沙颗粒分选的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 145-151.
- Su Y Y, Li P, Ren Z P, et al. Effects of vegetation spatial position on convex slope erosion and sediment particle size fractionation [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(4): 145-151.
- [26] Zhang X, Li P, Li Z B, et al. Effects of precipitation and different distributions of grass strips on runoff and sediment in the loess convex hillslope [J]. *Catena*, 2018, 162: 130-140.
- [27] Liu C L, Zhang K D, Wei S E, et al. Evaluation of the effects of grass and shrub cover on overland flow resistance and its attributes under simulated rainfall [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 626: 130285.
- [28] 张霞, 李鹏, 李占斌, 等. 坡面草带分布对坡沟水土流失的防控作用及其优化配置[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 122-128.
- Zhang X, Li P, Li Z B, et al. Prevention and control of grass strips distribution on soil and water loss and its optimal configuration of slope-gully system [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(7): 122-128.
- [29] Pan C Z, Ma L. How the spatial distribution of grass contributes to controlling hillslope erosion [J]. *Hydrological Processes*, 2020, 34(1): 68-81.