

刚性植被覆盖与生长方向对坡面径流分离能力的影响

蔡泽康¹ 雷丰泽² 谢佳柏¹ 王晨沣¹ 王健^{1,3}

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2. 榆林市横山区水保生态建设中心, 榆林 719000;
3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为探讨刚性植被茎秆覆盖度及生长方向对坡面径流分离能力(RDC)的影响,通过不同坡度(5°~20°)、覆盖度(0~15.89%)及两种植被生长方向(垂直于坡面(BS)和垂直于水平面(BH))的组合进行模拟试验。结果表明,坡度显著影响RDC分布范围($p < 0.05$),且该影响在BH条件下更明显。BS条件下RDC均值为裸坡的2.05~2.51倍,BH条件下为1.53~2.03倍。径流分离能力相对变化率小于0仅在植被数量 $N=95$ 时出现(-6.87%~-0.51%),而 $N=187$ 和 $N=286$ 时分别为17.95%~88.49%和66.44%~156.57%。剪切力和水流功率为影响RDC的关键水力参数,BS条件下剪切力(相关系数为0.89)和水流功率(相关系数为0.82)与RDC显著正相关,BH条件下流速对RDC(相关系数为0.64)影响较强,阻力系数(相关系数为-0.11)影响较弱。SPSS回归分析表明剪切力和水流功率为预测RDC的关键参数,模型精度较高($R^2=0.98$ 、纳什效率系数为0.98)。

关键词: 径流分离能力; 刚性植被; 植被方向; 预测模型

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)03-0467-09 **OSID:** 

Impact of Rigid Vegetation Coverage and Growth Orientation on Slope Runoff Detachment Capacity

CAI Zekang¹ LEI Fengze² XIE Jiabo¹ WANG Chenfeng¹ WANG Jian^{1,3}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Water and Soil Conservation and Ecological Construction Center of Hengshan District, Yulin City, Yulin 719000, China
3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Aiming to investigate the effects of rigid vegetation stem coverage and growth orientation on the runoff detachment capacity (RDC) of slopes, a series of simulated experiments were conducted under different combinations of slope gradients (5°~20°), coverage levels (0~15.89%), and two vegetation growth orientations (perpendicular to the slope surface (BS) and perpendicular to the horizontal plane (BH)). The results showed that slope gradient significantly influenced the distribution range of RDC ($p < 0.05$), with this effect being more pronounced under the BH condition. Under the BS condition, the mean RDC was 2.05~2.51 times that of bare slopes, while under the BH condition, it was 1.53~2.03 times. A relative change rate of RDC less than 0 was observed only when the vegetation coverage was $N=95$ (ranging from -6.87% to -0.51%), whereas for $N=187$ and $N=286$, the relative change rates were 17.95%~88.49% and 66.44%~156.57%, respectively. Shear stress and stream power were identified as the key hydraulic parameters influencing RDC. Under the BS condition, shear stress (correlation coefficient: 0.89) and stream power (correlation coefficient: 0.82) were significantly positively correlated with RDC, while under the BH condition, flow velocity (correlation coefficient: 0.64) had strong influence, and the resistance coefficient (correlation coefficient: -0.11) had weak effect. SPSS regression analysis indicated that shear stress and stream power were the critical parameters for predicting RDC, with the model demonstrating high accuracy ($R^2=0.98$, Nash efficiency coefficient = 0.98).

Key words: runoff detachment capacity; rigid vegetation; vegetation orientation; prediction model

收稿日期: 2024-10-11 修回日期: 2025-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(42377332)

作者简介: 蔡泽康(2000—),男,硕士生,主要从事坡面侵蚀与水土保持研究,E-mail: Zekang@163.com

通信作者: 王健(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事水土高效利用研究,E-mail: wangjian@nwafu.edu.cn

0 引言

严重的土壤侵蚀制约农业可持续发展^[1], 不仅导致表层土壤流失和土地生产力下降, 还加剧贫困与饥饿问题。土壤分离作为土壤侵蚀的初始阶段, 指土壤颗粒在降雨或径流作用下被剥离并移位的过程^[2-3]。研究其变化机制对理解土壤侵蚀机理及建立精确模型具有重要意义。

在防治土壤侵蚀的方法中, 植被是最有效的水土保持措施之一^[4-5]。植被不仅能降低降雨溅蚀对土壤的破坏, 还能通过地下根系和地上部分影响坡面径流的水动力学特征。根系通过加固土壤结构、提高渗透性和增强抗剪强度, 有效降低土壤侵蚀^[6-7]。然而, 刚性植被地上部分, 尤其是植被茎秆, 对径流分离能力的影响尚缺乏系统研究。与根系不同, 地上部分通过改变坡面流的动力学特性(如流速、剪切力、湍流强度等), 直接影响水流对土壤颗粒的分离与搬运能力。刚性植被茎秆可改变径流流态和流速分布。杨婕等^[8]研究表明, 刚性植被具有良好的阻流效果, 降低坡面流流速并增大阻力系数; 但也有研究发现, 刚性植被会改变过水断面面积, 使水流加速通过非植被区域, 从而增大坡面流流速^[9]。CEN 等^[10]认为植被覆盖度存在阈值, 低于阈值时流速随覆盖度增加而增大, 反之则减小。此外, 部分研究指出植被覆盖可使坡面流由过渡流向紊流发展, 雷诺数随覆盖度增加而增大, 佛汝德数则减小, 波浪效应加速水流能量消耗, 降低土壤侵蚀风险^[11-12]。然而, 孙佳美等^[13]发现覆盖度对坡面流流态影响不显著, 降雨强度才是雷诺数变化的主导因素。水力学参数常用于预测土壤侵蚀, 如 DING 等^[14]研究表明, 流速、雷诺数和佛汝德数与侵蚀速率显著正相关($p < 0.05$), 与阻力系数显著负相关($p < 0.05$)。由于植被对水力学参数的影响复杂, 需进一步量化刚性植被茎秆对径流分离能力的影响。

植被覆盖坡面的径流分离能力受植被类型、空间格局及水力条件等多因素影响。在自然条件下, 植被生长方向通常受向地性和向光性控制, 根部向地心生长, 茎部垂直于地平面生长。然而, 在高密度或光照不足的环境中, 植被可能垂直于坡面生长。目前, 大多数研究聚焦于植被垂直于坡面(BS)生长时的径流特征, 而对植被垂直于水平面(BH)生长的研究较少, 导致该领域研究相对欠缺^[15-16]。由于植被阻力具有各向异性^[17], 不同生长方向的植被可能对坡面径流和侵蚀机制产生差异。因此, 探讨 BS 和 BH 两种生长方向对土壤侵蚀的影响具有重要意义。基于此, 本研究主要分析刚性植被覆盖度及其

两种生长方向(BS 和 BH)对径流分离能力的影响, 探讨其在不同水力条件下的响应机制; 构建径流分离能力预测模型, 并比较不同模型精度与适用性, 以深化对坡面水流机制的理解, 为水土保持提供理论依据和数据支持。

1 试验设计与水力参数

1.1 试验设计方法

本试验在西北农林科技大学水土保持工程实验室进行, 试验装置为亚克力玻璃水槽(3.8 m × 0.3 m × 0.2 m)(图 1a), 坡度可调范围为 0° ~ 30°, 通过变坡支架调节。水槽进水端设置栅格稳流板以保证水流稳定, 并安装精度为 0.1℃ 的温度计记录水温。供水系统由矩形水箱和 QDX100-8-3.5 型小流量水泵组成, 流量通过 LZB-40 型玻璃转子流量计调节, 范围为 250 ~ 2 500 L/h。为便于观察和测量坡面流特征, 采用定床冲刷, 床面覆盖 40 目砂纸。试验使用直径 2 cm 的 PVC 管模拟刚性植被, 设置两种类型: 垂直于坡面(BS)和垂直于水平面(BH)(图 1c)。分别使用 95、187、286 根植被模拟不同覆盖度($N = 95, N = 187$ 和 $N = 286$), 植被覆盖度(Cr)为刚性植被横截面积与植被覆盖试验段坡面面积比值, 不同坡度下覆盖度如表 1 所示。

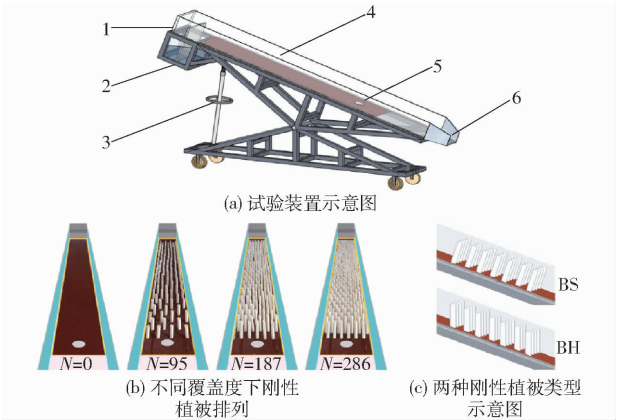


图 1 试验装置和不同覆盖度下刚性植被类型

Fig. 1 Experimental setup and types of rigid vegetation under different coverage levels

1. 稳流板 2. 顶端水箱 3. 变坡支架 4. 砂纸 5. 环刀 6. 出水口

表 1 不同坡度下刚性植被覆盖度

Tab. 1 Rigid vegetation coverage under different

		slopes						%
坡度/ (°)	0	BS			BH			
		95	187	286	95	187	286	
5	0	4.97	9.79	14.97	4.99	9.83	15.03	
10	0	4.97	9.79	14.97	5.05	9.94	15.20	
15	0	4.97	9.79	14.97	5.15	10.13	15.49	
20	0	4.97	9.79	14.97	5.28	10.39	15.89	

为更好对比两种方向刚性植被 (BS 和 BH) 覆盖下径流分离能力,分别选取试验坡度 θ 为 5° 、 10° 、 15° 、 20° ,即水力坡度 S 分别为 0.087 2、0.173 7、0.258 8 和 0.342 0。流量选取 20 L/min。试验土壤取自关中盆地杨凌区 ($34^\circ16'N$, $108^\circ04'E$) 0 ~ 20 cm 表层壤土,测试土样砂粒、粉粒、黏粒含量分别为 10.20%、61.60% 和 28.20%。将土样风干过筛混合,去除根系和砾石等杂物。随后采用分层填土填入圆形环刀,填土容重控制为 1.25 g/cm^3 ,分 3 层填装。试验前对土样进行饱和处理,消除土壤含水率对径流分离能力的影响,冲刷前静置 30 min 以消除重力水对试验结果的影响。

1.2 数据测定

由于刚性植被会改变水流路径,表面示踪法测量流速误差较大,因此采用平均水深推导平均流速。在刚性植被覆盖区 (2.0 m) 沿水槽纵向设置 3 处测量断面 (0.5、1.0、1.5 m),用于收集水深数据。水深 h 由水位测针 (SCM60 型,精度 $\pm 0.01\text{ mm}$) 测量,每个断面测量 4 次,3 个断面共测 12 次取平均值。若结果标准差大于 5%,则需重测。

1.3 水力参数计算

径流分离能力 (RDC) 计算公式为

$$RDC = \frac{M_b - M_a}{t_0 a} \tag{1}$$

式中 RDC ——径流分离能力, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

M_b ——冲刷前土样干质量, kg

M_a ——试验后土样干质量, kg

t_0 ——冲刷时间, s

a ——环刀面积, m^2

在不同坡度和覆盖度组合下,每组重复测量 3 次,取平均值作为径流分离能力进行分析。

径流分离能力绝对值 (ϕRDC) 为相同水力条件下垂直于坡面时径流分离能力 RDC_{BS} 与垂直于水平面时径流分离能力 RDC_{BH} 的差值。同理, ϕv 、 ϕf 、 ϕRe 、 ϕFr 、 $\phi \tau$ 和 $\phi \omega$ 分别表示平均流速绝对值、阻力系数绝对值、雷诺数绝对值、佛汝德数绝对值、剪切力绝对值和水流功率绝对值。

径流分离能力相对变化率 (ψRDC) 可以衡量相同水力条件下,径流分离能力相对变化量,计算公式为

$$\psi RDC = \frac{RDC_{BS} - RDC_{BH}}{RDC_{BH}} \times 100\% \tag{2}$$

2 结果与分析

2.1 坡度对径流分离能力的影响

图 2 (图中不同小写字母表示处理间差异显著

($p < 0.05$),下同)为不同坡度下径流分离能力分布及预测模型对比,ANOVA 结果显示坡度对径流分离能力 (RDC) 的分布范围具有显著影响 ($p < 0.05$)。在坡度为 5° 、 10° 、 15° 、 20° 时,BS 条件下 RDC 分布范围分别为 $0.036\ 0 \sim 0.081\ 5\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $0.057\ 3 \sim 0.156\ 0\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $0.121\ 0 \sim 0.272\ 5\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $0.125\ 0 \sim 0.382\ 9\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;BH 条件下分别为 $0.015\ 9 \sim 0.057\ 7\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $0.057\ 3 \sim 0.142\ 0\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $0.121\ 0 \sim 0.228\ 2\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $0.125\ 0 \sim 0.270\ 3\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。随着坡度增加,BS 和 BH 条件下 RDC 分布范围均增大,表明坡度增大可能增强径流分离作用。

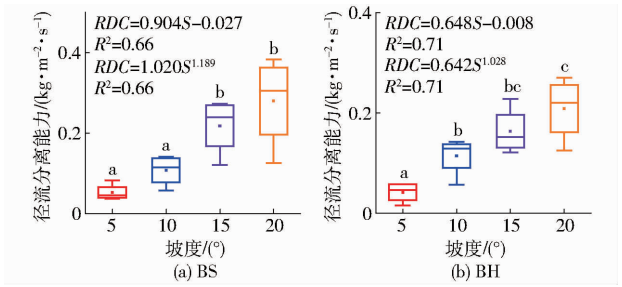


图 2 不同坡度下径流分离能力分布及预测模型对比

Fig. 2 Distribution of runoff detachment capacity under different slopes and comparison of prediction models

此外,BH 条件下 F 值 (10.16) 高于 BS 条件下 F 值 (7.79),表明坡度对 RDC 的影响在 BH 条件下更显著。以坡度为自变量预测 RDC 时,BS 条件下模型指数为 1.189,略偏离线性关系;BH 条件下指数接近 1,呈近线性关系。尽管幂函数和线性函数决定系数 R^2 相同,但 BH 条件下 R^2 (0.71) 略高于 BS 条件下 (0.66)。

2.2 刚性植被覆盖对径流分离能力的影响

由表 1 可知,BS 条件下刚性植被覆盖度因坡度变化而不同,因此用植被数量表示覆盖程度。图 3 (图中 * 表示显著 ($0.01 \leq p < 0.05$), ** 表示较显著 ($p < 0.01$), *** 表示极显著 ($p < 0.001$), ns 表示不显著)表明,随着植被覆盖度增加,RDC 整体呈上升趋势。以坡度 10° 为例,BS 条件下 $N = 95$ 、 $N = 187$ 和 $N = 286$ 时的 RDC 分别为裸坡的 2.33、2.44、2.72 倍 (图 3b)。在低坡度 (图 3a) 下,BS 和 BH 条件下 RDC 随覆盖度增加呈先升后降趋势,这种变化趋势可能与植被对水深的影响有关。植被增加可改变水流断面面积,加速水流通过非覆盖区域,局部流速和剪切力增大,从而增大径流分离能力。但高覆盖度时,水流路径受阻,动能耗散,分离能力下降。尤其在 BH 条件下,水流绕过植被更顺畅,阻力较小,水深变化较小,RDC 变化更平缓,高覆盖度下呈

下降趋势。在高坡度(图 3b ~ 3d)下,BS 条件下 RDC 随覆盖度增加持续上升,因植被阻挡作用显著,局部湍流和剪切力增强,提升 RDC。

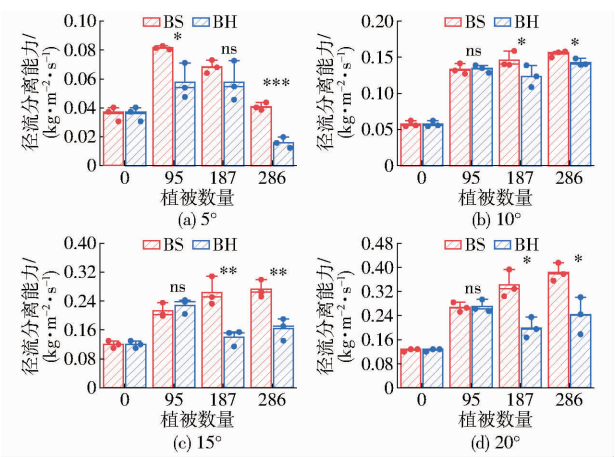


图 3 不同坡度条件下植被覆盖类型与植被覆盖度对径流分离能力的影响

Fig. 3 Effects of vegetation coverage types and coverage levels on runoff detachment capacity under different slope conditions

图 3 分析表明,在低覆盖度 ($N = 95$) 下,BS 条件下 RDC 显著高于 BH 条件 ($p < 0.05$),但随坡度增大,两者差异减小 ($p > 0.05$),这可能是因为高坡度下水流动能较大,削弱植被对水深的影响。在中覆盖度 ($N = 187$) 下,除坡度 5° 外,其余坡度 BS 条件下 RDC 显著高于 BH 条件 ($p < 0.05$),且随坡度升高增大(为 0.010 、 0.016 、 0.124 、 $0.143 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。在高覆盖度 ($N = 286$) 下,各坡度 BS 条件下 RDC 均显著高于 BH 条件 ($p < 0.05$)。

2.3 径流分离能力与不同水力学参数间关系

图 4 为 BS 条件下不同水力参数与径流分离能力间的关系。图 4 表明,剪切力 τ 和水流功率 ω 与

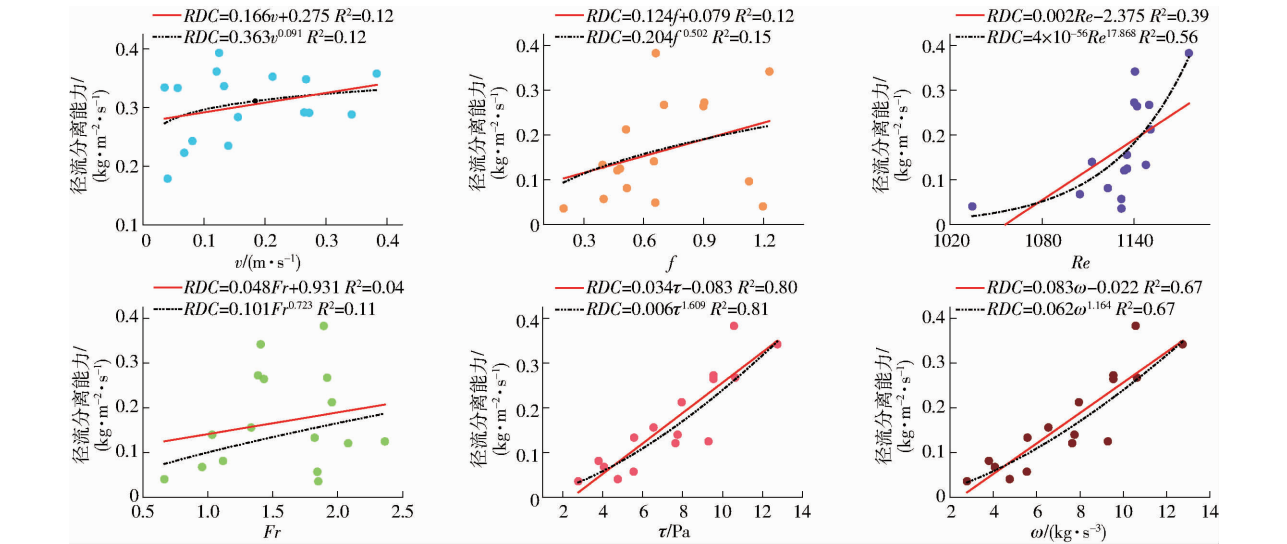


图 4 BS 条件下不同水力参数与径流分离能力关系

Fig. 4 Relationships between different hydraulic parameters and runoff detachment capacity under BS conditions

RDC 呈显著正相关关系, τ 与 RDC 的 $R^2 = 0.81$, ω 与 RDC 的 $R^2 = 0.67$ 。高剪切力和水流功率可能增强了水流对土壤的扰动,从而提高了分离能力。雷诺数 Re 与 RDC 的 $R^2 = 0.56$,表明 RDC 随着 Re 的变化具有增大的趋势,说明流体的湍流状态可能对径流分离能力产生影响。相比之下,流速 v 、阻力系数 f 和佛汝德数 Fr 与 RDC 的相关性较弱, R^2 分别为 0.12 、 0.15 、 0.11 ,尽管功率计算与流速相关,但其对土壤颗粒的直接侵蚀作用并不明显。

如图 5 所示,与垂直于坡面的植被覆盖 (BS) 相比,垂直于水平面的植被覆盖 (BH) 下,水力参数与 RDC 的关系发生变化。剪切力 τ 对 RDC 的影响减弱 ($R^2 = 0.64$),而流速 v 的影响显著增强 ($R^2 = 0.40$),表明 BH 条件下流速对径流分离作用更为重要。相比之下,阻力系数 f 对 RDC 的影响进一步减弱 ($R^2 = 0.01$, 相关系数为 -0.11),表明阻力系数增加减缓水流速度,削弱对土壤的侵蚀作用。然而,在 BS 条件下,植被排列可能增强局部剪切力,尽管水流减慢,仍能提升径流分离能力;而在 BH 条件下,阻力系数的增加仅减缓水流,未能产生类似的局部扰动,导致分离能力下降。

然而,随着试验变量改变(例如覆盖度增大),水力参数与 RDC 的关系并非严格正相关或者负相关。如图 6 所示,BH 条件下随着植被覆盖度增大,剪切力和水流功率与 RDC 的相关系数呈先增大后减小趋势,然而 p 值则呈现相反趋势,在 $N = 286$ 条件下下并不显著 ($p > 0.05$)。相反,雷诺数和佛汝德数与 RDC 的 p 值呈现先减小后增大的趋势,在裸坡条件下不显著 ($p > 0.05$)。阻力系数与 RDC 的相关性则随覆盖度的变化表现出动态特征。例如,阻力系数在低覆盖度条件下与 RDC 呈

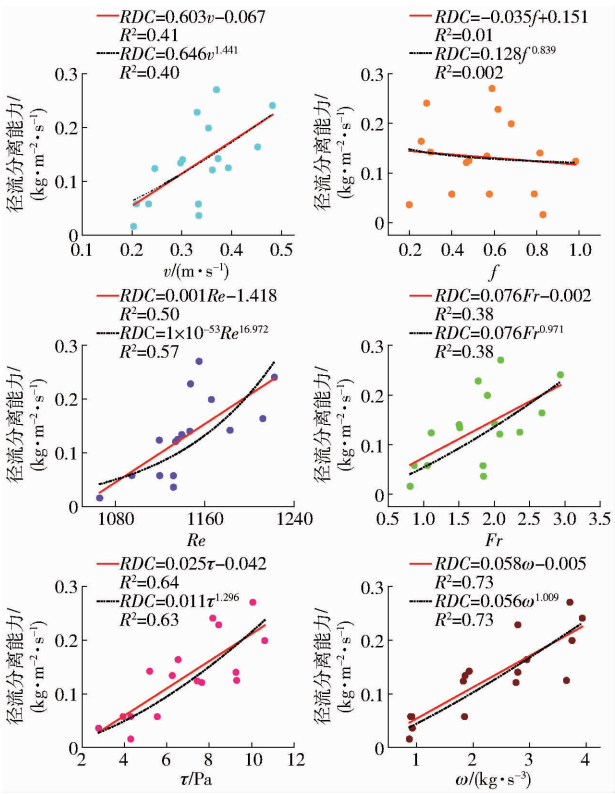


图5 BH条件下不同水力参数与径流分离能力关系

Fig.5 Relationships between different hydraulic parameters and runoff detachment capacity under BH conditions

正相关,而在高覆盖度条件下转为负相关,表明覆盖度的增加可能通过改变水动力学特性对RDC产生复杂影响。

2.4 径流分离能力绝对值与不同水力学参数绝对值间关系

如图7所示,φRDC与φv呈中等负相关(r为-0.65),表明较高流速绝对值减少了不同植被方向下的RDC差异。φRDC与φf相关性较强(r为0.66),说明阻力系数绝对值的增加显著影响植被方向对流动阻力的作用,进而改变土壤侵蚀动力学。φRe、φFr与φRDC呈负相关(r为-0.54和-0.66),表明湍流和流态差异较大会降低侵蚀过程的变异性。φτ和φω与φRDC相关性较强(r为0.75和-0.70),剪切力绝对值增加增强了垂直于坡面条件下的土壤分离,而较高水流功率绝对值减少了两种条件下的侵蚀差异。

ψRDC反映BS与BH条件下RDC差异的百分比。本试验中,ψRDC<0仅在N=95时出现,变化范围为-6.87%~-0.51%;在N=187和N=286时,变化范围分别为17.95%~88.49%和66.44%~156.57%。SPSS检验显示,ψRDC与坡度呈负相关(r为-0.108,p>0.05),与覆盖度呈正相关(r为0.571,p<0.05)。

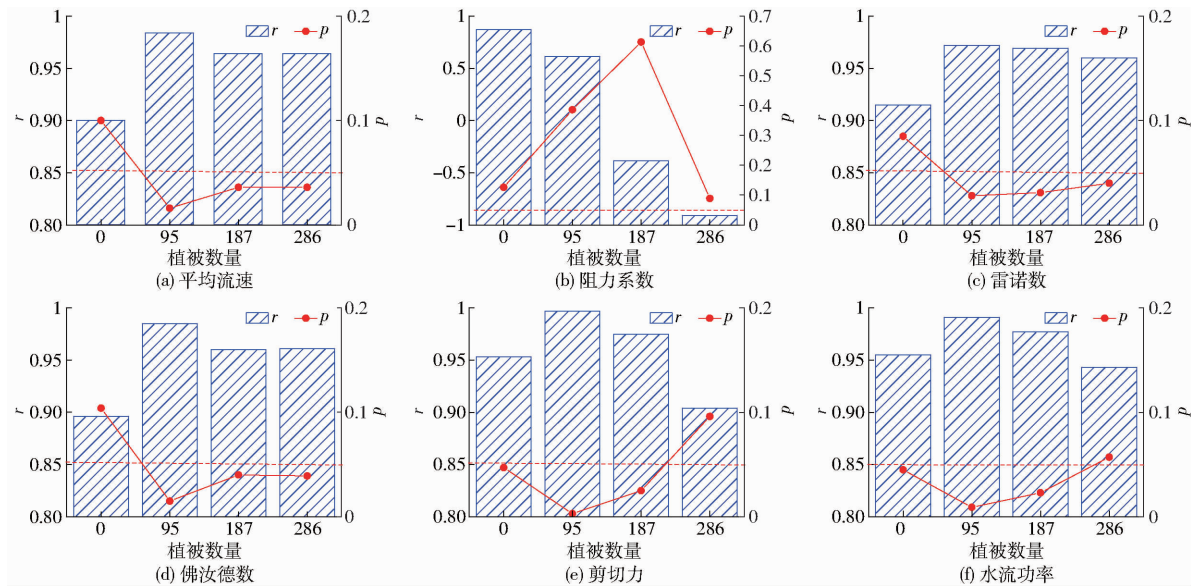


图6 BH条件下不同水力参数与径流分离能力的皮尔逊相关系数及显著性分析

Fig.6 Pearson correlation coefficient and significance analysis of different hydraulic parameters and runoff detachment capacity under BH conditions

2.5 径流分离能力预测模型

为定量研究径流分离能力、坡度、覆盖度与水力参数间的关系,使用SPSS进行多元非线性回归分析。鉴于剪切力τ和水流功率ω与RDC相关性最强且拟合度最佳,将其作为因变量纳入回归模型。

不同植被条件下函数关系见表2。

由Cr=0预测模型可知,裸坡条件下径流分离能力可用坡度、剪切力和水流功率的二元幂函数表征,其中剪切力(R²=0.91)略优于水流功率(R²=0.90)。RDC受坡面流水动力学特征控制,而植被

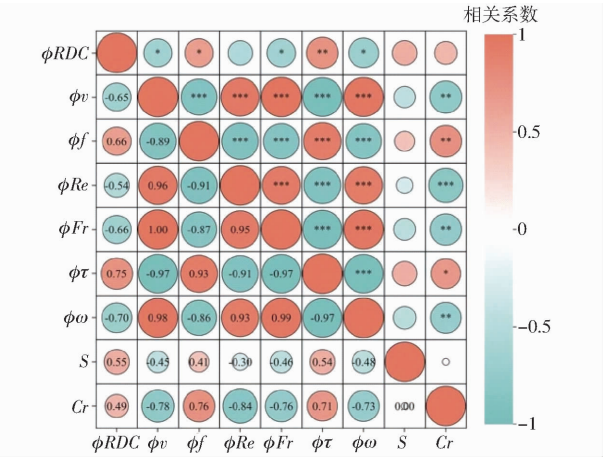


图7 径流分离能力绝对值与水力参数绝对值的相关性矩阵

Fig.7 Correlation matrix between absolute value of runoff separation capacity and absolute value of hydraulic parameters

表2 不同覆盖条件下径流分离能力预测模型

Tab.2 Predictive models for runoff detachment capacity under different coverage conditions

类型	预测模型	R^2	纳什效率系数 (NSE)
$Cr = 0$	$RDC = 0.004S^{-0.19}\tau^{1.43}$	0.91	0.91
	$RDC = 8.555S^{2.29}\omega^{-1.316}$	0.90	0.90
BS ($Cr \neq 0$)	$RDC = 3.253S^{1.30}Cr^{0.26}\tau^{-0.11}$	0.98	0.98
	$RDC = 0.005S^{-1.39}Cr^{0.24}\omega^{2.5}$	0.98	0.98
BH ($Cr \neq 0$)	$RDC = 5.822S^{1.68}Cr^{-0.35}\tau^{-0.98}$	0.95	0.95
	$RDC = 4.4 \times 10^{-8}S^{-5.58}Cr^{-0.44}\omega^{6.35}$	0.98	0.98

是改变流态和流速的关键因素,因此将覆盖度 Cr 纳入预测模型。BS ($Cr \neq 0$) 条件下 R^2 和 NSE 均为 0.98,剪切力与水流功率拟合效果相似;但在 BH ($Cr \neq 0$) 条件下,水流功率 ($R^2 = 0.98$) 优于剪切力 ($R^2 = 0.95$)。如图 8 所示,实测 RDC 与预测 RDC 均匀分布在 1:1 线附近,表明模型具有较高的准确性和可靠性。

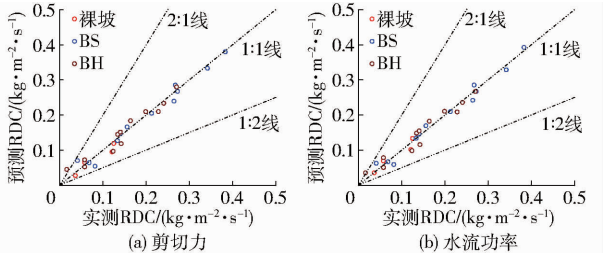


图8 实测径流分离能力与模拟径流分离能力关系

Fig.8 Relationships between measured and simulated runoff detachment capacity

为更好地了解不同预测模型适用性,将本文模型与文献[18-21]研究结果进行比较。在本试验选定的流量和坡度下,分别使用各研究模型计算径流分离能力。文献[18]基于杨凌地区表层耕地的

黄土(过筛土),文献[19]基于北京密云盆地的湿润性淡铝土(过筛土),文献[20]基于三峡库区坡耕地的紫土(原状土),而文献[21]基于四川南充坡耕地的紫土(过筛土)。不同预测模型下实测径流分离能力与模拟径流分离能力关系如图 9 所示。

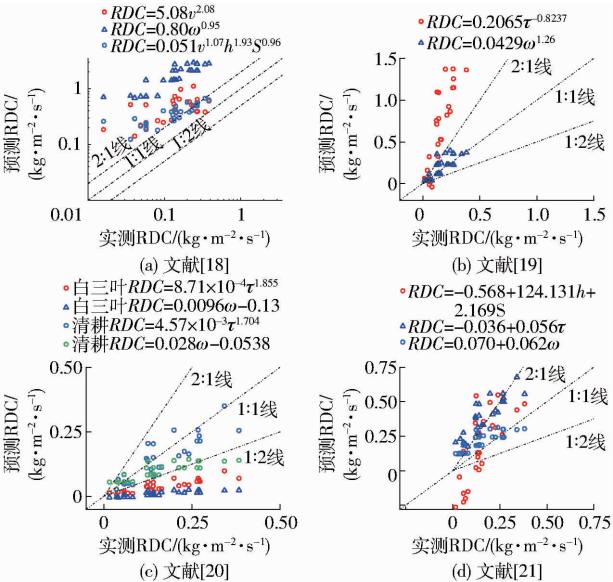


图9 不同模型下实测径流分离能力与模拟径流分离能力关系

Fig.9 Relationships between measured runoff separation capacity and simulated runoff separation capacity by different models

3 讨论

许多研究表明,径流分离能力是坡度的函数,RDC 随坡度增大而增大^[22],因为坡度影响流速,而流速决定了作用在土壤表面的动量。然而,也有研究发现坡度对土壤分离能力的影响并不显著,这可能与试验中采用的下垫面条件有关^[23]。在较长坡面上,流速范围更大,降低了坡度对流速的贡献。本试验在定床条件下进行,下垫面保持恒定。但对于侵蚀性边坡,坡面形态和粗糙度受流量和坡度影响。GIMÉNEZ 等^[24]研究发现,坡面粗糙度与坡度呈正相关,粗糙下垫面会抵消重力势能转化的动能,减少坡度对侵蚀的贡献。

植被能降低水流侵蚀动力,从而减少坡面土壤侵蚀^[25]。然而,本试验中刚性植被覆盖下的 RDC 高于裸坡条件,与 LIU 等^[26]和 WANG 等^[27]的研究结果不同。这是因为文献[26-27]研究对象是完整植被,包括根系和地上部分,而本试验仅关注植被地上部分的影响。大部分研究未分离量化植被地上部分对 RDC 的影响,结果包含根系对土壤侵蚀的作用。已有研究表明,根系通过加固土壤结构、减少颗粒流失和提高渗透性,可显著降低地表径流和侵蚀

风险^[28-29]。WANG 等^[30]发现,植被根系对土壤侵蚀的影响占近地表因子总数的 50% ~ 66.7%,其中 72.6% 以上归因于根系的物理结合效应。在本试验中,刚性植被作为坡面流的粗糙元改变水流路径,缩小过水断面面积。一方面,水流加速通过非植被区域,植被起到引导作用,可能增大局部侵蚀^[31]。王婧等^[32]研究发现,均匀分布的植被间形成多股流道,加剧侵蚀。另一方面,植被显著改变坡面流的流动结构和湍流能力^[33]。MCBRIDE 等^[34]研究表明,植被可提高湍流水平,导致局部高侵蚀潜力区域的形成。

如图 3 所示,在相同坡度和植被覆盖度下,BS 条件下 RDC 普遍高于 BH。这可能与植被排列方式对水流动力学特性的影响有关。在 BS 条件下,植被与坡面垂直,水流受到更大阻力,导致局部湍流和剪切力增加,从而增强对土壤颗粒的扰动^[9]。而在 BH 条件下,水流较为顺畅地绕过植被,阻力较小,湍流减少,RDC 较低。从数据来看,BS 条件下平均水深比 BH 条件下高 1.90% ~ 19.75%,剪切力高 0.72% ~ 17.81%。随着坡度增加(图 3c、3d),BS 条件下 RDC 进一步提升。这是因为陡坡条件下水流速度和动能显著增加,植被对水流的阻碍作用更明显,高动能水流与植被的相互作用增强了局部剪切力,从而提升土壤颗粒分离能力。

根据图 4 ~ 7 分析,不同植被覆盖条件下水动力学参数对 RDC 的影响存在显著差异。在 BS 条件下,剪切力 τ 和水流功率 ω 与 RDC 呈强正相关($R^2 = 0.81$ 和 $R^2 = 0.67$),表明较高剪切力和水流功率增强了流体对土壤的剪切和冲击作用,使土壤颗粒更易脱离^[13]。而在 BH 条件下,流速 v 对 RDC 的影响显著增强($R^2 = 0.40$),剪切力作用减弱,可能是流速通过直接冲击力成为主要影响因素。此外, Re 与 RDC 在 BS 和 BH 条件下均呈正相关($R^2 = 0.56$ 和 $R^2 = 0.57$, $p < 0.05$),表明 Re 增大会导致水流紊乱,增强携沙与剥蚀能力,这与张峰玮等^[20]的研究结果一致。阻力系数 f 与 RDC 相关性较低且不显著($p > 0.05$),与蔡泽康等^[31]的研究结果一致,但部分研究认为植被阻力在侵蚀中具有重要作用^[35],这可能因为植被通过根系与地上部分共同调控坡面侵蚀,而根系和茎秆对坡面流的增阻效益远小于冠层^[36]。植被的垂直结构和植被特征影响植被对土壤侵蚀的效果^[37],而刚性植被主要通过茎秆调控坡面流水动力学特性,进而影响径流分离能力。本研究表明,RDC 与水力参数的关系复杂且非单调线性,受植被覆盖度、坡度等多因素影响。剪切力和水流功率的相关性随覆盖度变化呈非线性趋

势,而阻力系数的作用表现出动态特征。这表明植被通过改变水动力特性对 RDC 产生多重调控,为理解坡面水动力过程及优化水土保持措施提供了重要参考。

为验证径流分离能力预测模型的普适性,比较文献[18 - 21]的研究结果。如图 9a 所示,文献[18]模型预测的 RDC 高于实测值,尤其使用水流功率预测时,RDC 多分布在 1:2 线之上。引入水深和坡度后,模型 R^2 由 0.20 增至 0.79,但 NSE 仍小于 0。这是由于其试验坡度范围(1.7% ~ 57.7%)远大于本试验,且无植被覆盖,导致预测流速和 RDC 偏高。图 9b 显示,文献[19]模型预测的 RDC 同样高于实测值,尤其使用水流功率预测时, $R^2 = 0.72$,但 NSE 远小于 0。这与土壤性质有关,文献[19]土样砂粒含量较高(16.77%),黏粒含量较低(23.64%),而本试验土样砂粒和黏粒含量分别为 10.20% 和 28.20%。砂粒含量高的土壤抗侵蚀能力较低,导致预测 RDC 偏高。如图 9c 所示,文献[20]模型在清耕和白三叶覆盖条件下预测 RDC 差异明显。清耕条件下预测值接近 1:1 线,白三叶覆盖条件下则偏低。使用剪切力预测时, R^2 和 NSE 均高于 0.73。这是因为文献[20]土样为原状土,保留了根系,增加了有机质含量(白三叶覆盖为 34.72 g/kg,清耕为 21.29 g/kg),并提高了粉粒和黏粒比例(白三叶覆盖为 83.89%)。文献[21]模型使用紫土作为土样,其粉粒和黏粒占比为 87.45%,但有机质含量仅为 4.17 g/kg,为本试验的 19.6%。使用剪切力和水流功率预测时,RDC 偏高,可能因土壤性质差异及试验水流量远大于本试验。使用水深预测时 $R^2 = 0.61$,主要因植被覆盖下坡面流水深与裸坡差异较大。

本研究揭示了植被地上部分在径流分离中的重要作用,但仅研究了刚性植被,未考虑柔性植被、植物组合及耕作^[38]对土壤性质和径流分离能力的影响。此外,试验在实验室进行,未能反映自然环境的复杂性。未来应进一步研究更多植被类型、耕作方式及降雨条件下的动态效应,并通过田间试验验证模型,以提升其实际应用能力,为水土保持提供更加全面的理论依据。

4 结束语

将刚性植被茎秆覆盖度与生长方向纳入对径流分离能力的研究,填补了现有关于植被生长方向对 RDC 影响的研究空白。刚性植被茎秆在一定程度上会增大 RDC,BS 条件下 RDC 随覆盖度增加而提升,均值为裸坡的 2.05 ~ 2.51 倍,而 BH 条件下则

为 1.53 ~ 2.03 倍。 $\psi RDC < 0$ 仅在低覆盖度 ($N = 95$) 下出现,且变化范围为 $-6.87\% \sim -0.51\%$;在较高覆盖度 ($N = 187$ 和 $N = 286$) 下, ψRDC 均呈正值,表明 BS 条件在高覆盖度时优势更明显。进一步分析发现,剪切力和水流功率为影响 RDC 的关键

参数,尤其是在 BS 条件下,与 RDC 相关性最强(相关系数为 0.89 和 0.82)。而在 BH 条件下,流速对 RDC 影响增强,阻力系数对 RDC 的影响减弱。使用剪切力和水流功率预测 RDC,模型精度较高 ($R^2 = 0.98$,纳什效率系数为 0.98)。

参 考 文 献

[1] 张艳,史飞航,张悦,等. 基于不同模型的黄河中游降雨侵蚀力时空变化分析[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 1-12.
ZHANG Yan, SHI Feihang, ZHANG Yue, et al. Temporal and spatial changes and driving factors of soil erosion in the middle reaches of the Yellow River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 1-12. (in Chinese)

[2] LIU J J, ZHANG K D, LU C, et al. Response of dimensionless soil detachment capacity to flow intensity parameters in seasonal freeze-thaw region[J]. Journal of Hydrology, 2024, 635:131172.

[3] LIU J J, ZHANG K D, SHI W B, et al. Effects of freeze-thaw on soil detachment capacity in the black soil region of Northeastern China[J]. Soil & Tillage Research, 2024, 236:105946.

[4] 董敬兵,时鹏,李占斌,等. 植被和梯田措施对坡沟系统细沟侵蚀调控作用[J]. 农业工程学报, 2022, 38(20): 96-104.
DONG Jingbing, SHI Peng, LI Zhanbin, et al. Effects of the role of vegetation and terraced measures on the rill erosion in slope-gully system[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(20): 96-104. (in Chinese)

[5] 王力,赵思妍,陈元鹏,等. 基于 GEE 云平台的黄土高原生态修复区植被变化与归因[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 210-223.
WANG Li, ZHAO Siyan, CHEN Yuanpeng, et al. Vegetation change and attribution in ecological restoration area of Loess Plateau based on GEE cloud platform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 210-223. (in Chinese)

[6] 于雯霏,王佩佩,刘俊娥,等. 黄土高原典型植被根系对土壤团聚体及其有机碳组分的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(6): 246-54.
YU Wenfei, WANG Peipei, LIU Jun'e, et al. Effects of typical vegetation roots on soil aggregates and their organic carbon fractions on the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(6): 246-254. (in Chinese)

[7] CHEN G J, MENG T F, WU W J, et al. Responses of root water uptake to soil water dynamics for three revegetation species on the Loess Plateau of China[J]. Land Degradation & Development, 2023, 34(8): 2228-2240.

[8] 杨婕,张宽地,杨帆. 柔性植被和刚性植被水流动力学特性研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(8): 85-89.
YANG Jie, ZHANG Kuandi, YANG Fan. Experimental study on hydraulic characteristics of overland flow under rigid and flexible vegetation coverage[J]. Yellow River, 2017, 39(12): 85-89. (in Chinese)

[9] CAI Z K, XIE J B, CHEN Y C, et al. Rigid vegetation affects slope flow velocity[J]. Water, 2024, 16(16):2240.

[10] CEN Y D, ZHANG K D, PENG Y, et al. Quantification of the effects on the flow velocity caused by gramineous plants in the Loess Plateau in North-Western China[J]. Geoderma, 2023, 429:116264.

[11] 闫旭峰,周苏芬,黄尔,等. 植被条件下坡面薄层水流动力学特性试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(2): 26-30.
YAN Xufeng, ZHOU Sufen, HUANG Er, et al. Experimental study on the effects of vegetation on hydraulic characteristics of overland flow[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(2): 26-30. (in Chinese)

[12] 尚海鑫. 草被空间配置对坡面水流动力学特性的影响及水沙阻控机制[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2021.
SHANG Haixin. Effect of grass distribution on hydrodynamic characteristics of overland flow and runoff and sediment yield [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021. (in Chinese)

[13] 孙佳美,余新晓,樊登星,等. 模拟降雨下植被盖度对坡面水流动力学特性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(8): 2574-2580.
SUN Jiamei, YU Xinxiao, FAN Dengxing, et al. Impact of vegetation cover on surface runoff hydraulic characteristics with simulated rainfall[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(8): 2574-2580. (in Chinese)

[14] DING W F, LI M A. Effects of grass coverage and distribution patterns on erosion and overland flow hydraulic characteristics [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(6):477.

[15] 赵瑜琪,彭清娥,史学伟,等. 非淹没刚性挺水植被对弯道水流特性的影响[J]. 水利水运工程学报, 2021(6): 80-88.
ZHAO Yuqi, PENG Qing'e, SHI Xuwei, et al. Influence of non-submerged rigid vegetation on the flow characteristics of bend [J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(6): 80-88. (in Chinese)

[16] 赵芳, MAVROMMATIS A, STAMOU A, 等. 刚性淹没球冠状植被水流特性试验研究[J]. 水利学报, 2018, 49(3): 353-361.
ZHAO Fang, MAVROMMATIS A, STAMOU A, et al. Experiments on characteristics of open-channel flow through submerged rigid vegetation with ball-like canopy[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(3): 353-361. (in Chinese)

[17] ZHANG J Z, ZHANG S T, WANG C T, et al. Influence of combined stem vegetation distribution and discretization on the hydraulic characteristics of overland flow[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 376:134188.

[18] ZHANG K R, WANG C F, WANG J, et al. Response of soil detachment capacity to hydrodynamic characteristics under different slope gradients[J]. Water, 2025, 17(1): 28.

[19] ZHANG G H, LIU B Y, NEARING M A, et al. Soil detachment by shallow flow[J]. Transactions of the ASAE, 2002,

45(2) : 351 – 357.

[20] 张峰玮, 王小燕, 陈展鹏, 等. 柑橘园地土壤分离能力对集中流水力学参数的响应[J]. 水土保持学报, 2024, 38(3) : 111 – 120.
ZHANG Fengwei, WANG Xiaoyan, CHEN Zhanpeng, et al. Response of soil detachment capacity to concentrated hydrodynamic parameters in citrus orchards[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3) : 111 – 120. (in Chinese)

[21] ZHU X L, FU S H, WU Q Y, et al. Soil detachment capacity of shallow overland flow in Earth – Rocky Mountain Area of Southwest China[J]. Geoderma, 2020, 361 :114021.

[22] 王馨月, 王彬, 王云琦, 等. 黄壤坡面土壤分离能力的坡度效应[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2023, 21(3) : 9 – 16.
WANG Xinyue, WANG Bin, WANG Yunqi, et al. Slope effect of soil detachment capacity on yellow-soil hillslope[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023, 21(3) : 9 – 16. (in Chinese)

[23] LI D D, CHEN X Y, GU X J. Detachment rates of purple soil rills affected by subsurface water flow depth[J]. CATENA, 2022, 211 :105985.

[24] GIMÉNEZ R, PLANCHON O, SILVERA N, et al. Longitudinal velocity patterns and bed morphology interaction in a rill[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2004, 29(1) : 105 – 114.

[25] 张蒙, 胡桂清, 张文太, 等. 长期植被覆盖对紫色土坡面减流减沙能力的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5) : 164 – 172.
ZHANG Meng, HU Guiqing, ZHANG Wentai, et al. Effect of long-term vegetation coverage on runoff and sediment reducing ability of purple soil slope[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5) : 164 – 172. (in Chinese)

[26] LIU L J, ZHANG K D, WANG P F, et al. Effects of root traits on soil detachment capacity driven by farmland abandonment [J]. CATENA, 2024, 239 :107951.

[27] WANG B, ZHANG G H. Quantifying the binding and bonding effects of plant roots on soil detachment by overland flow in 10 typical grasslands on the Loess Plateau[J]. Soil Science Society of America Journal, 2017, 81(6) : 1567 – 1576.

[28] 田愉琴, 王兵, 汪建芳, 等. 黄土丘陵区典型草本根系特征对土壤抗剪特性的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3) : 153 – 159.
TIAN Yuqin, WANG Bing, WANG Jianfang, et al. Influence of typical herbaceous root characteristics on soil shear properties in loess hilly regions[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3) : 153 – 159. (in Chinese)

[29] 杨浩, 王文龙, 娄义宝, 等. 黄土塬沟壑区典型植被沟头土壤渗透性和抗剪强度特征[J]. 应用生态学报, 2023, 34(7) : 1862 – 1870.
YANG Hao, WANG Wenlong, LOU Yibao, et al. Infiltration and shear strength characteristics of gully heads soil of typical vegetation on the gullied Loess Plateau, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(7) : 1862 – 1870. (in Chinese)

[30] WANG B, ZHANG G H, SHI Y Y, et al. Effects of near soil surface characteristics on the soil detachment process in a chronological series of vegetation restoration[J]. Soil Science Society of America Journal, 2015, 79(4) : 1213 – 1222.

[31] 蔡泽康, 王健, 陈俞池, 等. 柔性植被倒伏对地表径流水力特性及侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(3) : 19 – 28.
CAI Zekang, WANG Jian, CHEN Yuchi, et al. The impact of flexible vegetation lodging on the hydraulic characteristics of surface runoff and erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3) : 19 – 28. (in Chinese)

[32] 王婧, 李龙, 张鹏, 等. 植被格局对砒砂岩坡地降雨侵蚀的影响[J]. 生态学报, 2024, 44(9) : 3934 – 3947.
WANG Jing, LI Long, ZHANG Peng, et al. Effects of vegetation pattern on rainfall erosion on Pisha sandstone slope land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(9) : 3934 – 3947. (in Chinese)

[33] 张宽地, 王光谦, 孙晓敏, 等. 模拟植被覆盖条件下坡面流水动力学特性[J]. 水科学进展, 2014, 25(6) : 825 – 834.
ZHANG Kuandi, WANG Guangqian, SUN Xiaomin, et al. Hydraulic characteristic of overland flow under different vegetation coverage[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(6) : 825 – 834. (in Chinese)

[34] MCBRIDE M, HESSION W C, RIZZO D M, et al. The influence of riparian vegetation on near-bank turbulence: a flume experiment[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2007, 32(13) : 2019 – 2037.

[35] SHANG H X, ZHANG K D, WANG Z Z, et al. Effect of varying wheatgrass density on resistance to overland flow[J]. Journal of Hydrology, 2020, 591 :125594.

[36] 陈浩, 王豆豆, 崔凯钦, 等. 草地植被冠层与根系对黄土坡面侵蚀过程的影响[J]. 生态学报, 2024, 44(15) : 6841 – 6853.
CHEN Hao, WANG Doudou, CUI Qinkai, et al. Effects of canopy and root of grassland vegetation on erosion processes of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(15) : 6841 – 6853. (in Chinese)

[37] 张龙齐, 贾国栋, 吕相融, 等. 黄土高原典型地区不同植被覆盖下坡面土壤侵蚀阈值研究[J]. 水土保持学报, 2023, 37(2) : 187 – 198.
ZHANG Longqi, JIA Guodong, LÜ Xiangrong, et al. Research on soil erosion thresholds on the lower slopes of different vegetation types in typical areas of Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(2) : 187 – 198. (in Chinese)

[38] 张忠学, 尹致皓, 余佩哲, 等. 黑土区坡耕地水土保持耕作措施对土壤理化性状的影响[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1) : 282 – 293.
ZHANG Zhongxue, YIN Zhihao, YU Peizhe, et al. Effects of soil and water conservation measures on soil physical and chemical properties in slope farmland in black soil region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1) : 282 – 293. (in Chinese)