

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.03.011

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):

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):

柔性植被倒伏对地表径流水力特性及侵蚀的影响

蔡泽康, 王 健, 陈俞池, 王晨洋, 封瑞坤

(西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: [目的]为探讨柔性植被倒伏后形成的近地表覆盖减少径流和侵蚀产量以及调节地表径流水力特性的影响。[方法]以流体力学和水力学基本理论为依据,通过 5 个覆盖度、5 个坡度和 3 个流量组合的条件下进行室内放水试验,系统研究柔性植被倒伏下的侵蚀规律以及水动力学特征。[结果](1)侵蚀量分布随坡度增加呈先上升后下降趋势,流量在高坡度下对侵蚀过程的影响更为显著;(2)随着柔性植被覆盖度增加,以 50%覆盖度为分界线,侵蚀量基本呈先降低后增加趋势;(3)平均流速 v 随覆盖度增加而减小,下降趋势随覆盖度增加由急变缓, Fr 变化趋势与平均流速相似;阻力系数 f 与覆盖度呈线性正相关,随坡度升高,阻力系数值逐渐降低;而雷诺数 Re 对土壤侵蚀的影响比 Fr 、 v 和 f 更敏感。(4)随植被覆盖度增加,形态剪切力增大(颗粒剪切力减小),形态剪切力在总剪应力的变化中起决定性作用,总剪切力与植被覆盖度呈正相关。[结论]柔性植被倒伏后形成的近地表覆盖可减少土壤侵蚀,研究可为坡面流植被侵蚀规律奠定一定的理论基础,促进明渠水力学理论在坡面水流方面的扩展。

关键词: 坡面流; 柔性植被; 侵蚀机理; 剪切力

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

The Impact of Flexible Vegetation Lodging on the Hydraulic Characteristics of Surface Runoff and Erosion

CAI Zekang, WANG Jian, CHEN Yuchi, WANG Chenfeng, FENG Ruikun

(Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Shaanxi, Yangling, 712100, China)

Abstract: [Objective] This study was aimed at exploring the influence of nearsurface coverage formed by the collapse of flexible vegetation in reducing runoff and erosion yield, and in modulating the hydraulic properties of surface runoff. [Methods] Based on fundamental principles of fluid mechanics and hydraulics, the erosion patterns and hydrodynamic characteristics under lodged flexible vegetation were systemically investigated through indoor hydrodynamic experiments across five levels of coverage, five slope gradients, and three flow rates. [Results] (1) The distribution of erosion volume demonstrated an initial increase followed by a decrease with the increment of slope angle, with the influence of flow rate on the erosion process being more pronounced at steeper slopes. (2) Corresponding to an increase in the coverage of flexible vegetation, and taking 50% coverage as a threshold, the erosion volume generally exhibited a trend of initial reduction followed by an increase. (3) The average flow velocity (v) decreased with increasing vegetative coverage, with the rate of decline becoming gradual as coverage intensified. The variation in Froude number (Fr) mirrored the trend in average flow velocity. The friction coefficient (f) was positively linear correlated with coverage and decreased with an increase in slope gradient; the Reynolds number (Re) demonstrated a higher sensitivity to soil erosion compared to Fr , v , and f . (4) With the increase in vegetation coverage, morphological shear stress intensified (while particle shear stress diminished), playing a pivotal role in the changes in total shear stress, which was positively correlated with vegetation coverage. [Conclusion] The

收稿日期:2023-10-09

修回日期:2023-11-30

录用日期:2023-12-27

资助项目:国家自然科学基金项目(42377332)

第一作者:蔡泽康(2000—),男,陕西咸阳人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:1833465527@qq.com

通信作者:王健(1963—),男,陕西商州人,教授,博士,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:wangjian@nwsuaf.edu.cn.

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

study establishes a solid theoretical foundation for the erosion patterns of slope flow vegetation and facilitates the expansion of open channel hydraulic theories in the realm of slope flows.

Keywords: slope flow; flexible vegetation; erosion mechanisms; shear stress

Received: 2023-10-09

Revised: 2023-11-30

Accepted: 2023-12-27

土壤侵蚀过程涉及土壤颗粒的分离、搬运及沉积,受气候、土壤、植被、地形、土地管理措施等因素的影响,严重的侵蚀诱发一系列生态环境问题。近 20 年,中国北方的黄土高原侵蚀环境发生剧烈变化,黄土高原的主色调由“黄”变“绿”,植被覆盖度从 2000 年前的不足 20% 增加到现在的 60% 以上^[1]。大量研究^[2]表明,植被是控制黄土高原地区水土流失的最有效措施,而径流是诱发山坡地区水土流失的主要因素之一。因此,揭示植被覆盖对土壤侵蚀的影响机制,对黄土高原地区生态环境健康的可持续发展具有重要意义。

植被可有效防止土壤侵蚀,植被覆盖度与侵蚀量呈负相关^[3-4]。与裸地相比,LIANG 等^[5]研究发现,在安塞县方塔流域植被恢复后径流量和土壤侵蚀量可分别减少 68.0%~97.4% 和 98.0%~99.9%;张春霞等^[6]研究显示,板栗花生间作可降低接近 80% 的土壤侵蚀量。此外,不同坡度和流量条件下植被的减流减沙效应也不相同。冯志倩等^[7]研究发现,坡面产沙率和产沙量随坡度升高分别增加 0.96~3.32, 0.94~7.54 倍;也有研究^[8]发现,坡面流的沉积泥沙量和沉积效率随植被覆盖度增加而增加,植被覆盖有助于土壤侵蚀严重地区河流泥沙的控制。

另外,植被改变坡面流流态流型、增大坡面流阻力可减缓水流冲刷和提高地表粗糙度,是植被覆盖调控土壤侵蚀过程的主要方式。随着植被密度增加阻力系数逐步增加,说明植被对坡面流有阻滞作用^[9],当阻力系数在低于临界覆盖度时与流量呈负相关,反之亦然。孙一等^[10]研究发现,贴地植物的阻流效果受覆盖度大小影响,佛汝德数随植被覆盖度的增加逐渐 <1 ,具有向缓流区延伸的趋势。除此之外,不同植被类型也是研究的重点,其中,大量研究^[11]使用 PVC 管模拟刚性植被,仿真禾本科植物(簇针状草株)来模拟柔性植被。刚性植被区的湍流明显大于非植被区,并随着植被区斑块密度增大而增大^[12]。不同配置模式下的刚性植被对坡面流速的缓流效果不同(品字状 $>$ 下部密集型)^[13]。另外,完整植被是由地上部分与地下部分共同组成,地上部分一般由植被叶片、茎秆以及地表枯落物构成,而地下部分主要是根系。其不同成分对地表径流及土壤侵蚀过程的贡献并不相同,且有研究^[14]表明,植被不同层次和形态结构在调

控坡面径流侵蚀方面的作用差别较大。因此,将植被的近地表叶片部分和茎干部分进行分离量化研究,揭示植被覆盖下调控坡面土壤侵蚀机理是更为合理的。

目前,关于植被抑制坡面径流和侵蚀的机理已有大量研究,多集中在模拟植物茎秆以及仿真禾本科植物上。且大多柔性植被的模拟主要是完整植株,很少针对近地表植被覆盖。而柔性植被近地表覆盖形成对土壤的保护,其叶片在水中的运动轨迹也影响下垫面,侵蚀机理机理与其他仿真植被并不相同。基于此,拟分析不同坡度流量条件下侵蚀量分布规律、柔性植被覆盖与侵蚀量大小的关系、柔性植被覆盖下的水动力特性、柔性植被覆盖下的土壤临界剪切力;并建立基于植被覆盖度的侵蚀量预测模型和土壤临界剪切力模型。研究可拓展水土保持措施的理论基础,为相关坡面流研究提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

研究采用放水试验模拟坡面径流,试验在有机玻璃板制成的变坡度矩形水槽(长 $\times$ 宽 $\times$ 高为 135 cm $\times$ 5 cm $\times$ 8 cm)中进行,试验装置配有变坡支架、供水装置、流量控制装置、稳流板及水流循环利用装置(图 1)。试验段全长 100 cm,在坡面最上端预留 20 cm,每 20 cm 布设仿真叶片,总共布设 5 段。土样冲刷部分使用方形环刀(长 $\times$ 宽 $\times$ 高为 20 cm $\times$ 30 cm $\times$ 4 cm),环刀放置在水槽末端。

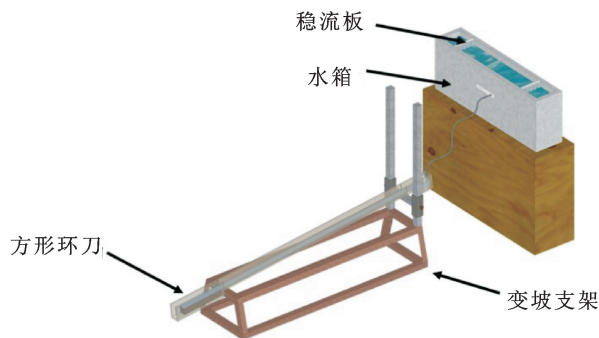


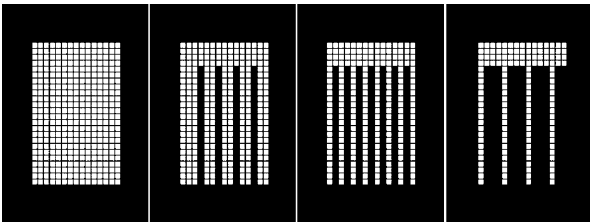
图 1 试验装置

Fig. 1 Diagram of test device

试验用土采自杨凌周边农田 0—20 cm 耕层土壤,以壤土为主。将试验土壤风干后过 1 cm 筛,挑出石块及杂草落叶。为消除田间土壤分异性,采用人工装填土壤,土壤容重控制在 1.25 g/cm³,每层控制在 1 cm,分 3 层填入环刀,边填土边压实。环刀下放置

1片吸水纱布,在托盘中静置12 h,待土壤达到饱和含水量(土壤表层泛起一层水膜)。为保证土样表层与坡面紧密贴合,冲刷时使用凡士林涂抹于环刀与水槽的缝隙中以减少水流损耗。

为还原柔性植被倒伏后的真实情况,试验采用塑料条带模拟叶片(单片尺寸长×宽为2 mm×200 mm)。塑料条带柔软、轻盈的特性可让模拟叶片在坡面流中自然贴合于土壤表面运动。同时,其摆动幅度也随自身长度的增加而减弱。由图2可知,模拟柔性植被叶片近地表覆盖度分别为0,25%,50%,75%,100%(计算方法是模拟叶片投影表面积除以方形环刀表面积)。



注:模拟叶片从左至右依次为100%,75%,50%,25%。

图2 模拟叶片

Fig. 2 Simulated blade

试验坡度分别设置为2°,4°,8°,12°,16°,放水流量分别设置为0.5,1.0,1.5 L/min。流量用阀门控制,采用玻璃转子流量计测定放水流量。试验中表面流速测定使用高锰酸钾示踪法,在试验段取3个断面分别测量5次后取平均值。试验中当水流到达环刀时开始计时,每隔1 min用水桶接住产流量和产沙量,共10次。待水桶内泥沙全部澄清后,倾倒掉上层清液,将下部泥沙转移至带有编号的铝盒内,放入烘箱烘干称重。

1.2 模拟精度的判别方法

1.2.1 纳什效率系数 纳什效率系数NSE衡量一个水文模型的优劣。NSE为 $(-\infty, 1]$,NSE越接近1,表示模型质量好,模型可信度高;NSE接近0,表示模拟结果接近观测值的平均值水平,即总体结果可信,但过程模拟误差大;NSE远远 <0 ,则模型是不可信的。其计算公式为:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (1)$$

式中: X_i 是公式模拟值; P_i 是试验实测值; $\bar{X}$ 是实测值平均值; n 是样本容量。

1.2.2 决定系数 决定系数可判断回归拟合的优劣。该值越接近1,表明拟合效果越好。其计算公式为:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (2)$$

式中: $SSR = \sum (\bar{P}_i - \bar{X}_i)^2$ 是回归平方和; $SST = \sum (X_i - \bar{X}_i)^2$ 是残差平方和。

1.2.3 相对均方根误差 RRMSE是均方根误差与观测值的均值比值,较小的RRMSE表示预测模型的精度较高,可很好地评估模型的预测效果,其计算公式为:

$$RRMSE = \frac{\sqrt{(1/n) \sum_{i=1}^n (X_i - P_i)^2}}{\bar{X}} \quad (3)$$

1.2.4 相关性检验 使用Pearson相关系数 r 、Kendal相关系数 K 、Spearman相关系数 ρ 来评估侵蚀量对流量、坡度以及水力参数的响应程度。Pearson相关系数的取值范围为 $-1 \sim 1$,其中, -1 表示完全的负相关, 1 表示完全的正相关, 0 表示没有线性关系;Kendal相关系数的取值范围为 $-1 \sim 1$,其中, -1 表示完全的逆序关系, 1 表示完全的顺序关系, 0 表示没有等级关系。对于Spearman相关系数,当自变量增加,因变量趋于增加,则 ρ 为正,反之 ρ 为负。通过3个参数的检验可判断侵蚀量对不同参数的响应程度,为水土保持以及土壤侵蚀预报提供数据支持。

1.3 各部分剪切力计算

根据阻力叠加原理,可从总阻力中减去颗粒阻力来计算形态阻力。剪切力计算公式为:

$$\tau_i = \tau_n + \tau_o = \frac{\rho f_i v^2}{8} + \frac{\rho f_o v^2}{8} \quad (4)$$

式中: τ_i 是总剪切力(Pa); τ_n 是形态剪切力(Pa); τ_o 是颗粒剪切力(Pa); ρ 是水流密度(kg/m^3); v 为平均流速(m/s); f_i 是植被覆盖下的阻力系数, f_o 是裸坡下的阻力系数。随柔性植被覆盖度的增加,剪切力的趋势与阻力系数的变化趋势一致。

2 结果与分析

2.1 不同坡度和流量下柔性植被覆盖度对坡面侵蚀的影响

2.1.1 侵蚀速率随坡度和流量的变化 坡度和流量因素影响土壤侵蚀,由图3可知,不同植被覆盖下坡面侵蚀速率随坡度的变化情况。侵蚀速率随坡度增加呈先增大后减小趋势,坡度为8°时,坡面侵蚀速率最大。例如,流量为1.0 L/min时,随着坡度增加,侵蚀速率分别为0.0003~0.002,0.02~0.076,0.066~0.142,0.015~0.106,0.006~0.040 [$\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$]。具体而言,当坡度较小时,侵蚀速率相对较低且变化范围较小;而随着坡度增大,侵蚀速率逐渐增加,其变化范围也在增大。在相同坡度条件下,当流量从0.5 L/min变化到1.5 L/min时,侵蚀速率明显增加。坡度为4°时,不同流量下的单位面积侵蚀量

分别为0.0002~0.0012,0.020~0.075,0.031~0.020 [g/(cm²·min)],坡度为 8°时,侵蚀量分布范围分别

为 0.0002~0.015,0.066~0.142,0.123~0.155 [g/(cm²·min)]。

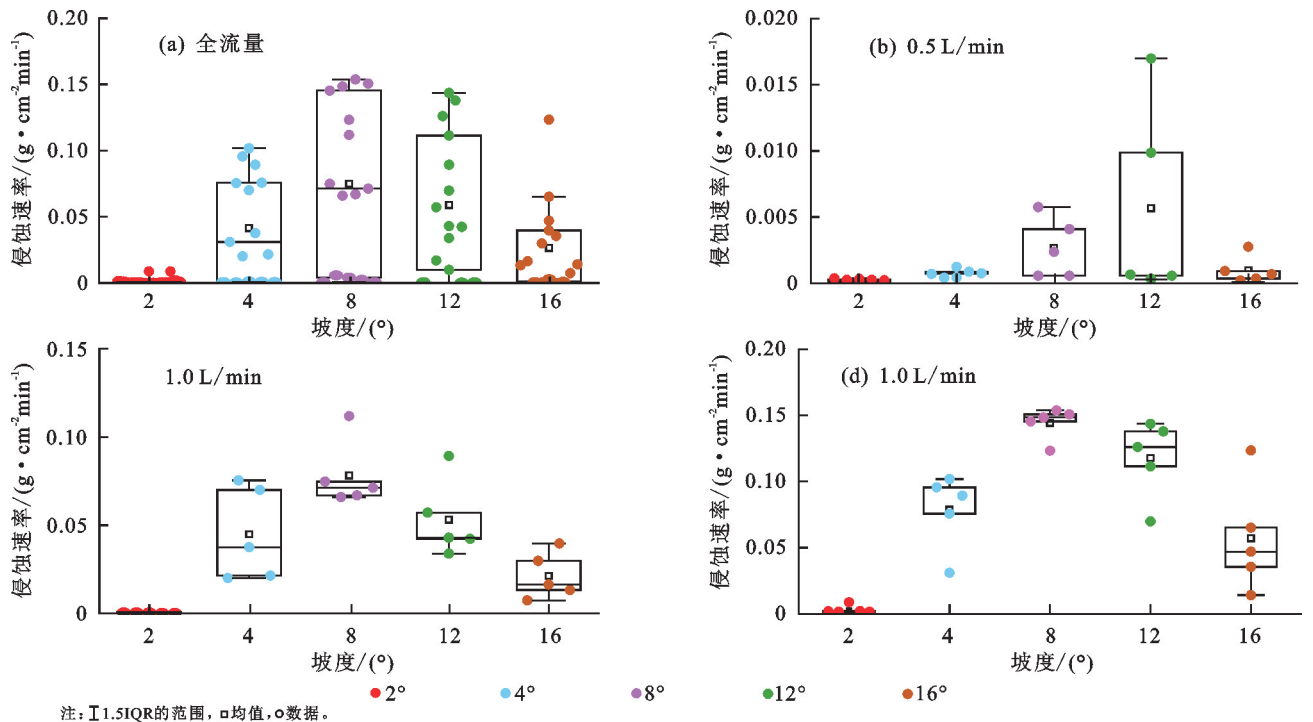


图 3 侵蚀速率随坡度变化情况

Fig. 3 Variation of erosion rate with slope

由表 1 可知,不同条件下流量和坡度对侵蚀速率的影响程度及相关性。当坡度由 2°增加至 16°,Pearson 相关系数分别为 0.528,0.845,0.979,0.918,0.709,呈先增大后减小趋势,流量对侵蚀速率的影响在 8°时最剧烈,Kendall 系数和 Spearman 系数在 8°

时也达到最大值。分析得出,随着坡度增加,流量与侵蚀速率间相关性呈先增大后减小趋势。在坡度为 2°和 4°时,相关系数较高。当坡度增加到 8°,12°,16°时,流量与侵蚀速率间相关性更为明显和强烈,相关系数高且 p 远<0.01。

表 1 坡度影响下的流量—侵蚀量相关性

Table 1 Correlation analysis of flow—soil erosion under the influence of slope

分析类型	坡度/(°)	Pearson			Kendall			Spearman		
		r	Sig	n	τ	Sig	n	ρ	Sig	n
流量—侵蚀 速率	2	0.528	0.043	15	0.804	0	15	0.908	0	15
	4	0.845	0	15	0.778	0	15	0.888	0	15
	8	0.979	0	15	0.845	0	15	0.945	0	15
	12	0.918	0	15	0.823	0	15	0.926	0	15
	16	0.709	0.003	15	0.755	0	15	0.869	0	15

2.1.2 侵蚀量随柔性植被覆盖度的变化 植被覆盖影响土壤侵蚀,近地表覆盖可通过拦截雨滴减少击溅能量和减少表层土壤分离^[15];植物茎秆可增大水力糙度而降低坡面流速^[16];植物根系可保持土壤水分,改善土壤孔隙^[17]。图 4 为不同坡度条件下柔性植被覆盖与侵蚀量的关系。

由图 4 可知,柔性植被覆盖减少土壤侵蚀,在低流量下侵蚀量较低,植被覆盖产生的减沙效应也较低。中高流量下,水深增加使得柔性叶片在水流中的形态阻力增大,进而增强减沙效应。例如,坡度和流量分别为 4°和 1.0 L/min 时,75%覆盖条件下侵蚀量低于裸坡下 30g,减沙率达到 71.34%;坡度和流量为

12°和 1.5 L/min 时,100%覆盖条件下侵蚀量低于裸坡下 44.26g,减沙率达到 51.4%。值得注意的是,随着覆盖度增加,侵蚀量基本呈先降低后增加趋势,50%覆盖度为分界线。

通过不同流量、坡度及覆盖条件下的侵蚀量关系,建立侵蚀量预测模型。侵蚀量随坡度升高呈先增大后下降趋势,覆盖度变化下的侵蚀量变化并不呈单调趋势,简单的线性模型($R^2=0.451$)、指数模型($R^2=0.434$)和幂函数模型($R^2=0.406$)并不能准确预测侵蚀量。多项式模型下精度较高,具体公式为:

$$SE = -0.74S^2 + 14.21S + 3.2Q^2 + 41.85Q - 12.99$$
$$(1 - Cr^2) + 24.71(1 - Cr) - 75.62 \quad (5)$$

式中: SE 为侵蚀量(g), S 为坡度($^{\circ}$), Q 为流量($/min$), Cr 为覆盖度($\%$)。比较模型预测值与实测值(图 5), 决定系数($R^2=0.703$)、纳什系数($NSE=$

0.701)和相对均方根误差($RRMSE=0.653$)显示模型可准确预测侵蚀量, 但 $1:1$ 线显示在较低侵蚀量附近预测值离散较大, 个体误差偏大。

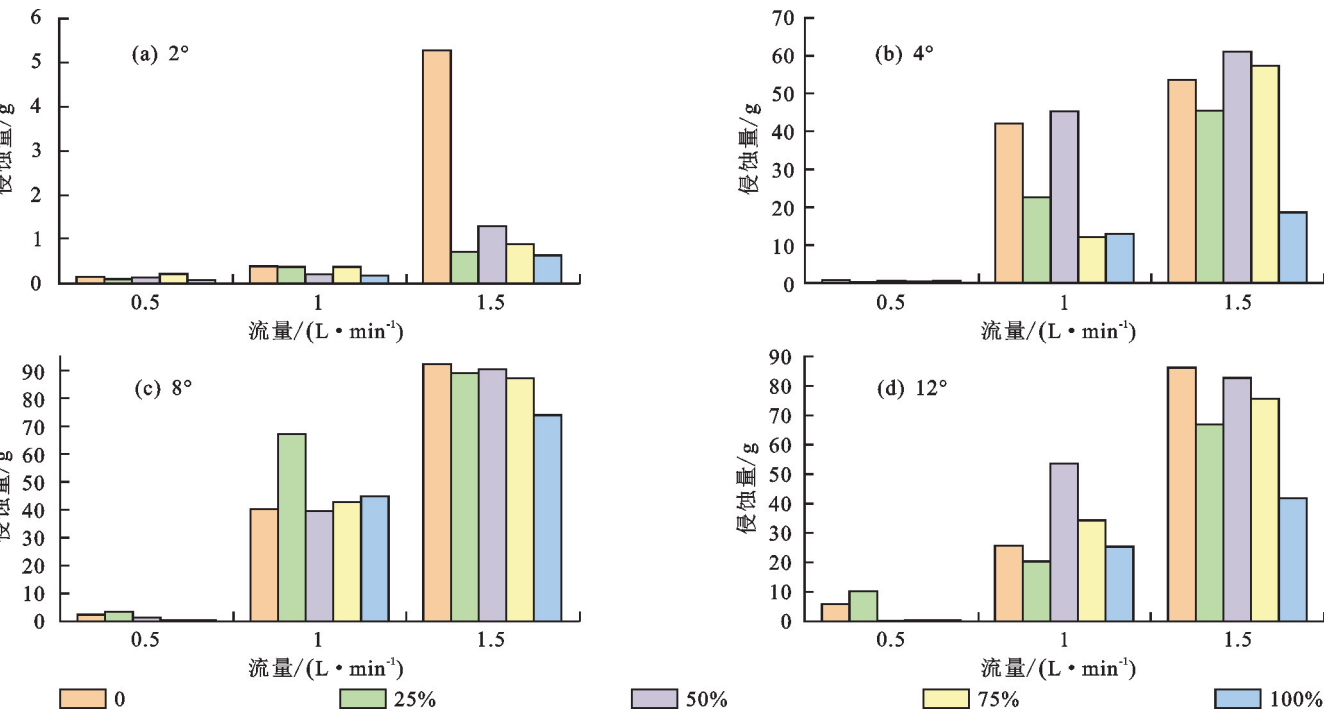


图 4 侵蚀量与覆盖度的关系

Fig. 4 Relationship between soil erosion and coverage

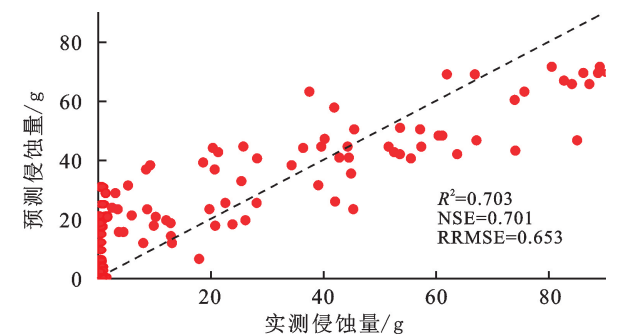


图 5 侵蚀量预测值与实测值对比

Fig. 5 Comparison between the predicted and simulated soil erosion

2.2 柔性植被近地表覆盖对水力学参数的影响

坡面侵蚀与径流形态密切相关^[18], 柔性植被覆盖影响坡面流水动力特性。分析比较柔性植被覆盖下径流速度(v)、雷诺数(Re)、佛汝德数(Fr)和阻力系数(f)4 个水力参数随覆盖度增大的变化情况(图 6)。

地表覆盖改变过流的运动边界和坡面下垫面条件, 平均流速 v 随近地表覆盖度增加而减小(图 6a), 与裸坡相比, 植被覆盖下流速降低约 20.3%~48.2%, 且流速下降趋势随覆盖度和坡度的增加逐渐平缓。柔性植被近地表覆盖显著影响阻力系数 f (图 6b), 植被覆盖下的阻力系数高于裸坡部分。 f 与覆盖度呈线性正相关, 具体方程形式为 $f=a\times Cr+b$, 且覆盖度显著影响阻力系数。

当坡面流速变化时, Fr 具有相似的变化规律(图 6c)。 Fr 随柔性植被覆盖度的增加呈下降趋势, 与裸坡相比, 植被覆盖下的 Fr 降低可达 28.8%~70.7%。然而, 不同覆盖度变化引起的 Re 差异不大, 0.5 L/min 条件下的 Re 为 212.07~233.49, 1.0 L/min 条件下 Re 为 394.88~459.72, 1.5 L/min 条件下 Re 为 545.737~680.050。 Re 主要随流量增加而增加, 对于相同条件, 覆盖度增大 Re 略微降低, 4° 流量为 1.0 L/min 时, 覆盖度由 0 增加到 100%, Re 降低 31.9, 下降率仅为 7.2%。 f 和 Fr 间的关系均可用幂函数 $f=a\cdot Fr^b$ (图 6c)。表明对于较小流量, f 对 Fr 较大流量更敏感, 故高流速下阻力系数变化逐渐平缓。

侵蚀过程是侵蚀动力学和底层表面摩擦力间相互作用的结果, 进一步分析不同水力参数变化对侵蚀量的影响程度。通过计算上述 4 个径流水力特征的相关系数、Kendall 和 Spearman 系数(表 2), Re 和 Fr 与侵蚀量呈正相关, 而 f 与侵蚀量呈负相关。其顺序为 $Re>v>Fr>f$, 结果表明, Re 对土壤侵蚀的影响比 Fr 、 v 和 f 更敏感, 是因为流量大小显著改变流速, 而流速决定水流输送泥沙的速率, 更高的植被覆盖度降低流速、平摊水流, 并进一步降低径侵蚀能力。因此, 与裸土边坡相比, 柔性植被近地表覆盖改变坡面径流水力特性, 是侵蚀量减少的主要原因。

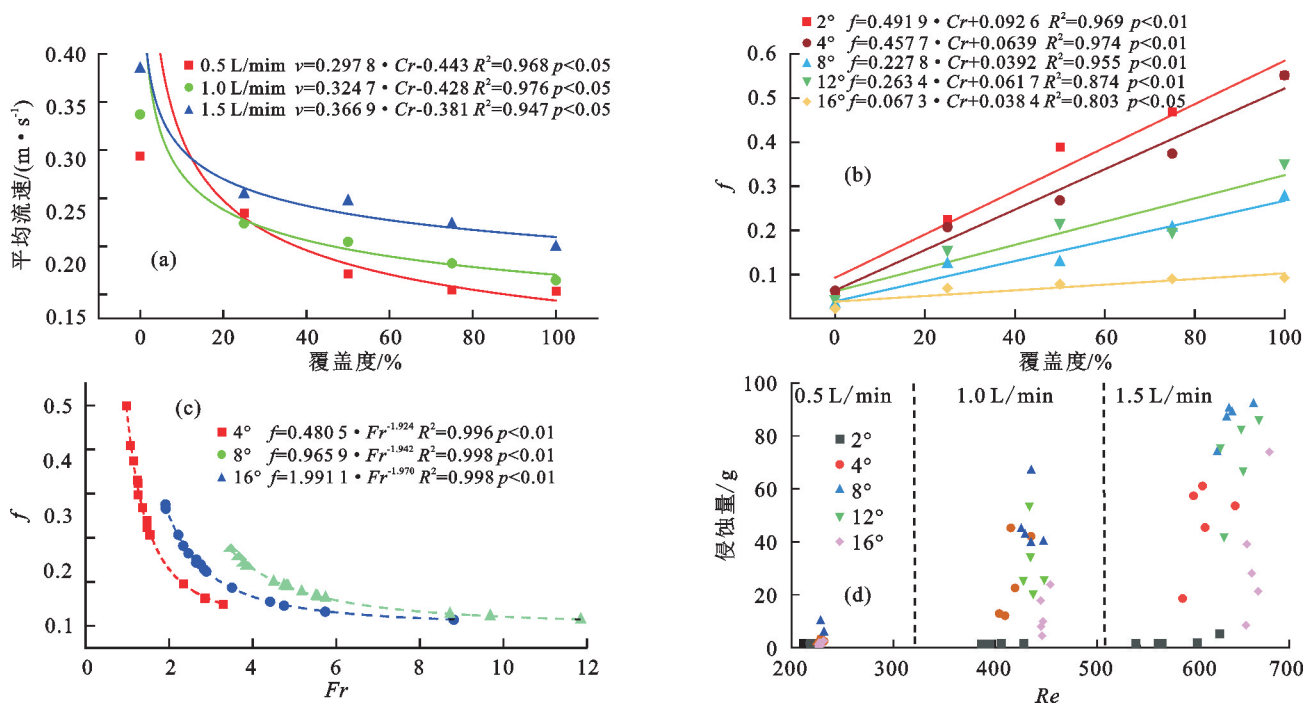


图 6 水力参数变化规律

Fig. 6 Variations in hydraulic parameters

表 2 不同水力参数和侵蚀量相关性分析

Table 2 Correlation analysis of different hydraulic parameters and soil erosion

相关系数	Fr	f	Re	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
Kendal	0.169*	0.065ns	0.584***	0.344***
Spearma	0.248*	0.065ns	0.784***	0.494***
Pearson	0.065ns	0.065ns	0.704***	0.333***

注:表中 ns 表示 $p > 0.05$; *, **, *** 分别表示 $p < 0.05$, $p < 0.01$, $p < 0.001$ 。

2.3 柔性植被近地表覆盖对剪切力影响

已有研究^[19]表明,通过植被覆盖的水流主要受颗粒阻力和形态阻力影响。颗粒阻力是通过克服边界处的无滑移条件而耗散的动能,植被覆盖引起的形态阻力阻碍水流,导致水流横截面的空间变异。颗粒剪切力和形态剪切力与总剪切力的比值与其对应的阻力分量相同。因此,形态剪切力在总剪切力的变化中起着决定性作用,导致总剪切力和植被覆盖度间呈正相关。由图 7 可知,总剪切力、形态剪切力与侵蚀量呈正相关,颗粒剪切力与侵蚀量呈负相关。在本研究中,柔性植被近地表覆盖下的颗粒剪切力高于裸坡下颗粒剪切力。此外,土壤侵蚀主要由颗粒剪切力控制,而形态剪切力主要作用于较大的粗糙度单元,并在降低颗粒剪切力中发挥重要作用^[20]。

柔性植被覆盖于土壤表面,在不同流量、坡度下对土壤的保护作用并不相同。分别对不同覆盖度下的剪切力与土壤分离速率拟合得到土壤分离时的剪

切力。由图 8a 分析得出,在 1.0 和 1.5 L/min 流量下,随着覆盖度增大,土壤剪切力呈增大趋势,而在 0.5 L/min 流量下却相反。通过建立土壤剪切力与覆盖度的关系模型(图 8b),并比较实测值与模拟值来检验模型精度。其中 1.0 和 1.5 L/min 流量下的模型精度较高,决定系数 R^2 均 > 0.9 ,而 0.5 L/min 流量下的模型决定系数 R^2 只有 0.24。

3 讨论

3.1 不同坡度和流量下柔性植被覆盖度对坡面侵蚀的影响

坡度与流量作为影响坡面流的重要因素,共同作用影响坡面侵蚀。对于本研究,在较低流量条件下,坡度对侵蚀速率的影响较小且不显著,而在较高流量条件下,坡度对侵蚀速率的影响更为显著。此外,随着坡度增加,流量与侵蚀速率间相关性呈先增大后减小趋势,表明流量对侵蚀过程的影响在较大的坡度下更为显著。

究其原因,低流量下水流对土壤的冲刷和搬运作用有限,随着流量增加,水流对底部土壤的剪切力增加,导致侵蚀量增加。由于受水流能量、土壤颗粒稳定性、土壤抗剪强度等因素共同影响,侵蚀速率随坡度和流量的变化呈先增大后减小趋势。在较小坡度下,土壤抗冲性较大。随着坡度增加,水流流速以及冲刷力也增强,土壤表面的颗粒被迅速冲走,侵蚀速率增大。然而,随着坡度的进一步增加,坡面流速

可能出现降低现象,使得土壤颗粒无法被搬运,侵蚀速率反而减小。同样,在较小坡度下,水流路径相对稳定,水流对土壤表面的冲刷作用较为均匀。随着坡度增加,水流路径更加集中,导致部分区域受到更强的冲刷作用,而其他区域受到相对较少的冲刷,侵蚀集中在环刀中部区域,两侧侵蚀减小。POLYAKOV 等^[21]认为,在径流侵蚀过程中,坡度越大,土壤

坡面粗糙度越大,增加的阻力抵消坡度对流速的贡献,进而和流速相互制约。本试验中,在水力侵蚀的初始阶段,坡度增加导致流速增加,使得土壤表面演变成陡峭的斜坡区,并产生更大的水力粗糙度来抑制流速的增加。换言之,最初具有高流速的陡坡倾向于形成更粗糙的表面,降低流速并间接减少坡度对流速的贡献,从而使侵蚀减小。

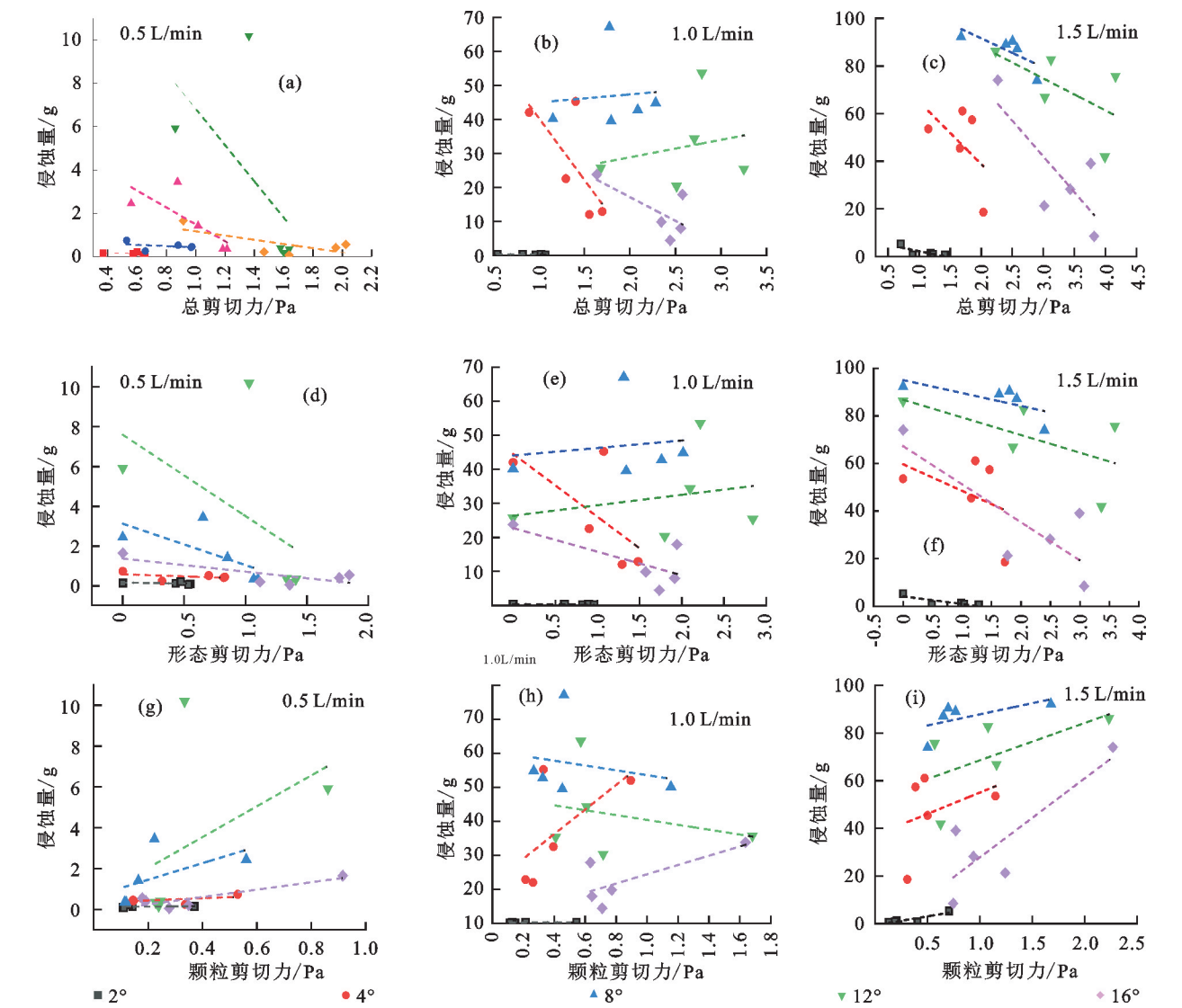


图 7 剪切力与侵蚀量关系

Fig. 7 Relationship between shear stress and soil erosion

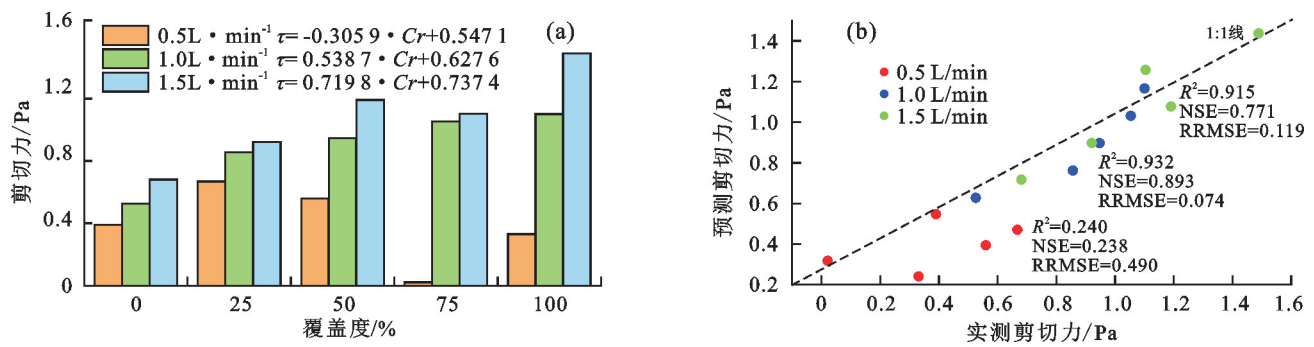


图 8 剪切力预测模型及精度检验

Fig. 8 Shear force prediction model and accuracy test

柔性植被近地表覆盖减少土壤侵蚀,然而,侵蚀量随植被覆盖度的增加并非呈单调降低趋势,侵蚀量基本呈先降低后增加趋势,50%覆盖度为分界线。究其原因,可能是随覆盖面积增大,水流更多在叶片上经过,减少与土壤颗粒接触。当流速降低水深增大,此时表面流速与底层流速差提供的压力差,使得原本附着土层表面的叶片与土壤分离,侵蚀量增大。当覆盖度超过 50%,更多叶片覆盖增加形态阻力,总阻力增大,侵蚀量再一次下降。同时,由于覆盖度增大也增加叶片对土壤的扰动,50%覆盖度的植被造成的扰动效果强于阻流效果。当覆盖度继续增大,阻流效果逐渐强于扰动效果。因此,侵蚀量出现增加后又降低的情况。

使用坡度 S 、流量 Q 以及覆盖度 Cr 作为因变量构建的侵蚀预测模型精度较为准确,但是模型结构复杂,寻找更简单准确的预测模型将是以后研究的重点。

3.2 柔性植被近地表覆盖对水力学参数的影响

柔性植被覆盖可改变坡面流水动力特性,进而影响坡面侵蚀。试验中平均流速随植被覆盖度增大而减小,下降趋势随坡度升高变平缓,与孙佳美等^[22]研究结果相似,坡度在 $8^{\circ}\sim 16^{\circ}$ 范围内,坡面水深相对低坡度较浅,变化幅度小,坡度对水深的影响小,故坡度对流速影响小,坡度在 $2^{\circ}\sim 4^{\circ}$ 时,水层变厚,坡面流水深变化范围增加,随坡度增加,水流变浅,流速增大。同时,叶片在水流作用下摆动平摊水流,与水流摩擦消能,进而减小流速。随着坡度增加,坡面流流速加快,而覆盖度增加又降低流速,表明植被和坡度对流速互相制约,植被覆盖可减小流速、抑制土壤侵蚀。

图 6b 可知,随着覆盖度的增大,阻力系数呈线性增加。有学者^[23]研究发现,草场上的水力学特性与农田细沟的水力学特性有显著差异。草场上的水力学特性在很大程度上受覆盖度或裸露土壤以及山坡角度的控制。相较于其他研究^[24],本试验中测得的阻力系数值较小,主要是因为本研究选用的柔性植被贴近地表,在垂直坡面方向厚度很小,叶片产生的阻力主要是水流与植被摩擦以及叶片摆动消耗能量。也有研究^[11]使用 PVC 短管模拟茎干或者仿真禾本科植被,刚性植被产生更大的拖拽阻力,相较于柔性植被阻流效果更好,因此,测得的阻力系数值范围更大。

已有研究^[25]测得的 Fr 小于本试验,且 Re 远高于本试验,此差异主要因为试验水槽宽度以及放水流量相差大。 Fr 作为表征单位动能与势能的比,在高流速低水深下普遍处于急流状态。本研究的模拟植

被具有柔软的特点, Re 下降说明柔性植被可平摊水流而降低紊动。不同的试验处理刚性植被模拟结果却相反,主要是因为刚性植被压缩水流过水断面空间,生成涡流从而增大水流扰动。在 3 种流量条件下,仅 1.5 L/min 条件下 $Re > 580$,仅有 2° 下 $Fr < 1$ 。据明渠流量标准,本试验中径流主要为缓层流、急层流以及缓过渡流。由于试验流量仅有 3 个且相差并不大, f 和 Re 间关系并不明显。

3.3 柔性植被近地表覆盖对剪切力影响

植被覆盖下总剪切力、形态剪切力与侵蚀量呈正相关,颗粒剪切力与侵蚀量呈负相关。与闫帅旗等^[26]研究结果相似,主要原因是由于增加的植被覆盖度降低水流流速且增大水深,植被形态阻力增大导致形态剪切力增大,且形态阻力在总阻力中占比高于颗粒阻力,故总剪切力增大。剪切力增大的同时,植被覆盖增大减少土壤侵蚀。根据植被覆盖度 Cr 来构建剪切力的预测模型,然而低流量下的剪切力呈先降低后增加趋势。究其原因,主要是在低流量下水深较浅,叶片紧贴土壤表面随水流摆动。随着覆盖度逐渐增大,水流不能完全淹没叶片,流速较低的流量更易在叶片空隙中导流汇集,加剧对汇流区域的侵蚀。当流量增大,水流动能及水深增大,柔性植被在水流作用下紧贴土壤从而减小侵蚀。综上所述,柔性植被近地表覆盖对土壤的保护机理比较复杂,坡度、流量增大加剧侵蚀,植被覆盖则减小侵蚀,三者相互制约共同影响坡面泥沙输移特性。

4 结论

(1)坡度因素对侵蚀速率具有显著影响,侵蚀速率随坡度增加呈先上升后下降趋势;坡度增加,流量与侵蚀速率间相关性先增大后减小,表明流量对侵蚀过程的影响在高坡度下更为显著。

(2)柔性植被覆盖可减小土壤侵蚀,随着植被覆盖度增加,侵蚀量呈先降低后增加趋势;基于不同流量、坡度和覆盖条件建立的侵蚀模型可准确预测侵蚀量。

(3)平均流速 v 随覆盖度增加而减小,下降趋势随覆盖度增加由急变缓;阻力系数 f 与覆盖度呈线性正相关,随着坡度升高,阻力系数逐渐降低; Fr 随柔性植被覆盖度增加而降低,不同覆盖度间 Re 差异并不大, Re 对土壤侵蚀的影响比 Fr 、 v 和 f 更敏感。

(4)随着覆盖度增加,颗粒剪切力减小,形态剪切力增大。形态剪应力在总剪应力的变化中起决定性作用,总剪切力与植被覆盖度呈正相关;在中高流量

下,土壤剪切力随覆盖度增加呈增大趋势,而在低流量下却相反;建立的土壤剪切力与覆盖度的模型,可较为准确预测临界剪切力。

参考文献:

- [1] WANG J J, LIU Z P, GAO J L, et al. The Grain for Green Project eliminated the effect of soil erosion on organic carbon on China's Loess Plateau between 1980 and 2008[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021,322:e107636.
- [2] SUN W X, NIU X Y, WANG Y P, et al. Effects of forest age on soil erosion and nutrient loss in Dianchi watershed, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023,195(2):e340.
- [3] 赵清贺,冀晓玉,徐珊珊,等.河岸植被对坡面径流侵蚀产沙的阻控效果[J].*农业工程学报*, 2018,34(13):170-178.
ZHAO Q H, JI X Y, XU S S, et al. Inhibiting effect of riparian vegetation on erosion and sediment yield of slope runoff[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018,34(13):170-178.
- [4] WU S F, WU P T, FENG H, et al. Effects of alfalfa coverage on runoff, erosion and hydraulic characteristics of overland flow on loess slope plots[J]. *Frontiers of Environmental Science and Engineering in China*, 2011,5(1):76-83.
- [5] LIANG Y, JIAO J Y, TANG B Z, et al. Response of runoff and soil erosion to erosive rainstorm events and vegetation restoration on abandoned slope farmland in the Loess Plateau region, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2020,584:e124694.
- [6] 张春霞,董智,高波,等.侵蚀性雨型分类及不同植被类型对棕壤坡面土壤侵蚀的影响[J].*水土保持研究*, 2023,30(2):36-41,49.
ZHANG C X, DONG Z, GAO B, et al. Effects of erosive rainfall patterns and different vegetation types on soil erosion in slope with brown soil[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(2):36-41,49.
- [7] 冯志倩,娄永才,齐星圆,等.汇流强度、坡度及侵蚀泥沙颗粒分形对工程堆积体坡面侵蚀的影响[J].*水土保持学报*, 2021,35(3):127-134.
FENG Z Q, LOU Y C, QI X Y, et al. Influence of flow intensity, slope and soil particle fractal dimension on slope erosion of engineering accumulation body[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021,35(3):127-134.
- [8] 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.
- [9] 戴矜君,程金花,张洪江,等.植被覆盖下坡面流阻力变化规律[J].*水土保持学报*, 2016,30(2):44-49.
DAI J J, CHENG J H, ZHANG H J, et al. The changing law of overland flow resistance under vegetation covers[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016,30(2):44-49.
- [10] 孙一,田勇,刘晓燕,等.坡面水流流速对贴地植被的响应特性试验研究[J].*工程科学与技术*, 2019,51(2):85-89.
SUN Y, TIAN Y, LIU X Y, et al. Experimental study on the response characteristics of the velocity of overland flow to the ground vegetation[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019,51(2):85-89.
- [11] ZHANG S T, ZHANG J Z, LIU Y, et al. The resistance effect of vegetation stem diameter on overland runoff under different slope gradients[J]. *Water Science and Technology: a Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2018,78(11):2383-2391.
- [12] 钟强,雷孝章,任海若,等.柔性植被与刚性植被覆盖下坡面流阻力特性研究[J].*中国农村水利水电*, 2012(9):51-54.
ZHONG Q, LEI X Z, REN H R, et al. Research on resistance characteristics of overland flow under cover of flexible and rigid vegetation[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2012(9):51-54.
- [13] 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.
- [14] 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.
XU X L, MA K M, FU B J, et al. Research review of the relationship between vegetation and soil loss[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006,26(9):3137-3143.
- [15] 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:e125594.
- [16] 陈诗婷,查轩,黄少燕,等.暴雨条件下典型红壤区生物结皮坡面水土流失过程研究[J].*水土保持学报*, 2022,36(6):95-100,109.
CHEN S T, ZHA X, HUANG S Y, et al. Soil erosion process on slope with biological soil crusts under rainstorm in typical red soil region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022,36(6):95-100,109.

- [17] 李树慧,张银华,蔡怀森.河岸刚性植被缓冲带对水流阻力的影响[J].水电能源科学,2020,38(9):32-35.
LI S H, ZHANG Y H, CAI H S. Influence of rigid vegetation buffer zone on flow resistance [J]. Water Resources and Power, 2020, 38(9): 32-35.
- [18] 杨秀超,方乾,尹晓爱,等.模拟降雨条件下林木裸露根系分布方式对坡面土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报, 2022, 36(4): 7-12.
YANG X C, FANG Q, YIN X A, et al. Effects of distribution patterns of tree bare roots on slope soil erosion under simulated rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 7-12.
- [19] ZHAO C H, GAO J E, HUANG Y F, et al. Effects of vegetation stems on hydraulics of overland flow under varying water discharges [J]. Land Degradation and Development, 2016, 27(3): 748-757.
- [20] LÉONARD J, RICHARD G. Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength [J]. Catena, 2004, 57(3): 233-249.
- [21] POLYAKOV V, NEARING M A, STONE J. Velocities of shallow overland flow on semiarid hillslopes [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2018, 43(12): 2578-2583.
- [22] 孙佳美,侯沛轩,逢育波,等.植被覆盖坡面土壤侵蚀的水动力学机理[J].水土保持通报,2022,42(2):1-7.
SUN J M, HOU P X, PANG Y B, et al. Hydrodynamic mechanism of soil erosion on vegetation covered slopes [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 1-7.
- [23] 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): 04017021.
- [24] ALHAMDAN O Z, PIERSON F B, NEARING M A, et al. Characteristics of concentrated flow hydraulics for rangeland ecosystems: implications for hydrologic modeling [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2012, 37: 157-168.
- [25] 杨帆,张宽地,杨明义,等.植物茎秆影响坡面径流水动力学特性研究[J].泥沙研究,2016(4):22-27.
YANG F, ZHANG K D, YANG M Y, et al. Experimental study on hydraulic characteristics of flow under vegetation stem [J]. Journal of Sediment Research, 2016 (4): 22-27.
- [26] 闫帅旗,朱冰冰,边焄.不同覆盖位置下草地坡面水流路径长度变化特征[J].农业工程学报,2021,37(3):116-123.
YAN S Q, ZHU B B, BIAN H. Variation characteristics of flow length of grass slope under different grass strip positions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(3): 116-123.