

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2025.06.027 CSTR:32310.14.stbcbx.2025.06.027

资如毅,方发永,陈廷生,等.水力条件对不同地表粗糙度土壤分离能力的影响[J].水土保持学报,2025,39(6):214-223.

ZI Ruyi, FANG Fayong, CHEN Tingsheng, et al. Impact of hydraulic conditions on soil detachment capacity under different surface roughness[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6):214-223.

水力条件对不同地表粗糙度土壤分离能力的影响

资如毅¹, 方发永¹, 陈廷生¹, 毛天旭¹, 韩珍¹, 赵龙山^{1,2}

(1. 贵州大学林学院, 贵阳 550025; 2. 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室(贵州大学), 贵阳 550025)

摘要: [目的] 水力条件是影响土壤侵蚀的关键因素。然而, 较少有研究关注水力条件对不同地表粗糙度土壤分离能力的影响。分析不同水力条件下地表粗糙度对土壤分离能力的影响, 可为土壤侵蚀过程模型的构建提供理论依据。[方法] 采用近景摄影测量法量化地表粗糙度, 结合冲刷试验, 量化分析9个水力剪切力(1.61~7.04 Pa)条件下粗糙处理与对照处理的土壤分离能力, 并建立基于水力参数的土壤分离能力预测模型。[结果] 1) 粗糙和对照处理的径流含沙总量均随水力剪切力的增大而增加, 当水力剪切力较小时(1.64~4.69 Pa), 对照处理的径流含沙总量显著大于粗糙处理($p < 0.05$), 当水力剪切力 ≥ 4.69 Pa时, 对照处理的径流含沙总量显著小于粗糙处理($p < 0.05$), 表明较大的地表粗糙度在水力参数较小条件下具有减小土壤侵蚀的作用, 而在较大水力条件下反而增加土壤侵蚀的风险; 2) 对照和粗糙处理的土壤分离能力分别为0.003 91~0.043 29、0.003 07~0.139 97 kg/(s·m²); 当水力剪切力 < 4.69 Pa时, 粗糙处理土壤分离能力较对照处理减少42.08%~112.31%; 当水力剪切力 ≥ 4.69 Pa时, 粗糙处理土壤分离能力较对照处理增加29.38%~63.72%; 3) 2种处理的土壤分离能力均随平均流速、径流剪切力、径流功率和单位径流功率的增大呈指数型上升趋势, 可通过平均流速很好地预测土壤分离能力。基于平均流速的对照和粗糙处理的土壤分离能力预测模型分别为 $Dc = 0.003e^{2.752v}$ ($R^2 = 0.916$, $NSE = 0.908$)和 $Dc = 0.000 3e^{6.132v}$ ($R^2 = 0.929$, $NSE = 0.924$)。[结论] 在评估和预测不同粗糙度土壤侵蚀时, 应充分考虑水力条件的影响。

关键词: 地表粗糙度; 土壤侵蚀; 土壤分离能力; 水力条件; 冲刷试验

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2025)06-0214-10

Impact of Hydraulic Conditions on Soil Detachment Capacity under Different Surface Roughness

ZI Ruyi¹, FANG Fayong¹, CHEN Tingsheng¹, MAO Tianxu¹, HAN Zhen¹, ZHAO Longshan^{1,2}

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Key Laboratory of Karst Georesources and Environment of Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: [Objective] The hydraulic conditions are key factors influencing soil erosion. However, few studies have focused on the impact of hydraulic conditions on the soil detachment capacity under different surface roughness levels. Analyzing the impact of surface roughness on soil detachment capacity under different hydraulic conditions can provide a theoretical basis for the construction of soil erosion process models. [Methods] The close-range photogrammetry method was used to quantify surface roughness. Combined with scouring experiments, the soil detachment capacity under roughened and control treatments was quantified and analyzed under nine hydraulic shear stress conditions (1.61~7.04 Pa). Additionally, a prediction model for soil detachment capacity based on hydraulic parameters was established. [Results] 1) The total sediment load in runoff under both roughened and control treatments increased with increasing hydraulic shear stress. When the hydraulic shear stress was relatively low (1.64~4.69 Pa), the control treatment exhibited a significantly higher total sediment load than the roughened

收稿日期: 2025-05-27 修回日期: 2025-06-25 录用日期: 2025-07-02 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-09-23

资助项目: 国家自然科学基金项目(42367045); 贵州省高层次人才计划“百”层次人才项目(黔科合平台人才-GCC[2023]015); 贵州省科技支撑项目(黔科合支撑[2022]一般202)

第一作者: 资如毅(1994—), 男, 博士研究生, 主要从事喀斯特土壤侵蚀研究。E-mail: ruyizi0909@163.com

通信作者: 赵龙山(1985—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: longshanzh@163.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

treatment ($p < 0.05$). When the hydraulic shear stress was ≥ 4.69 Pa, the control treatment showed a significantly lower total sediment load than the roughened treatment ($p < 0.05$). This indicated that larger surface roughness reduced soil erosion under low hydraulic parameters, while it increased the risk of soil erosion under high hydraulic conditions. 2) The soil detachment capacities under the control and roughened treatments ranged from 0.003 91 to 0.043 29 kg/(s·m²) and 0.003 07 to 0.139 97 kg/(s·m²), respectively. When the hydraulic shear stress was < 4.69 Pa, the soil detachment capacity of roughened treated soil was reduced by 42.08% to 112.31% compared to the control treatment. When the hydraulic shear stress was ≥ 4.69 Pa, the soil detachment capacity under roughened treatment increased by 29.38% to 63.72% compared to the control treatment. 3) The soil detachment capacity for both treatments exhibited an exponential increase with increasing average flow velocity, runoff shear stress, runoff power, and unit runoff power. The soil detachment capacity could be well predicted by average flow velocity, and the soil detachment capacity prediction models based on average flow velocity under control and roughened treatments were $D_c = 0.003e^{2.752v}$ ($R^2 = 0.916$, NSE = 0.908) and $D_c = 0.0003e^{6.132v}$ ($R^2 = 0.929$, NSE = 0.924), respectively. [Conclusion] When assessing and predicting soil erosion under different roughness conditions, the influence of hydraulic conditions should be fully considered.

Keywords: surface roughness; soil erosion; soil detachment capacity; hydraulic conditions; scouring experiment

Received: 2025-05-27

Revised: 2025-06-25

Accepted: 2025-07-02

Online (www.cnki.net): 2025-09-23

土壤侵蚀是全球最严重的生态环境问题之一,持续的土壤侵蚀将导致土地退化,严重制约着全球社会、经济和环境的可持续发展^[1]。土壤侵蚀包括土壤分离、泥沙运移和沉积3个阶段。土壤分离是土壤侵蚀的初始阶段,被定义为在雨滴击溅和径流冲刷的作用下土壤颗粒从土壤表面分离及运移的过程^[2]。土壤分离能力(D_c)是土壤侵蚀预测模型的关键参数,如水蚀预测模型(WEPP)、欧洲土壤侵蚀模型(EUROSEM)等^[3-4]。因此,准确估算土壤分离能力对土壤侵蚀模拟具有重要意义。

地表径流是土壤分离的外部驱动力。对于特定的土壤,土壤分离能力主要由水力参数决定。以往的研究^[5]通常使用流速、径流剪切力、径流功率和单位径流功率等水力参数预测土壤分离能力。一般地,土壤分离能力随流速、径流剪切力、径流功率和单位径流功率的增大而增强,它们的关系可通过线性、指数或幂函数较好地拟合^[5-7]。有研究^[5]指出,流速是预测土壤分离能力的最优参数;也有学者^[6-7]认为,径流功率和单位径流功率可以很好地预测土壤分离能力;LI等^[8]在西南砂质黏壤土侵蚀的研究中得出剪切力比流速和单位径流功率更能模拟土壤分离能力;而NEARING^[9]的早期研究表明,剪切力和径流功率都不是连接径流特性和土壤分离的通用水力参数。总体而言,这些在模拟土壤分离能力的最佳水力参数的评估中存在明显的不一致。因此,需要进一步地研究来更好地理解土壤分离能力和水力变量之间的关系。

地表粗糙度可通过改变水动力特性,如流速、水流剪切力等直接或间接影响产流过程,进而影响坡面土壤分离能力^[10-11]。因此,探究土壤侵蚀过程中地表粗糙度的影响是研究侵蚀机理的重要内容。然而,由于地表粗糙度的高动态性和土壤侵蚀过程的随机性,目前针对地表粗糙度对土壤分离能力影响的研究结果存在2种相悖的观点。一种观点认为,地表粗糙度可有效抑制土壤分离。有研究^[12]表明,粗糙地表有效增加雨水的地表储存能力,降低流速,从而减弱径流分离土壤的能力;MOMBIN等^[13]的研究也指出,地表粗糙度的逐渐增加显著降低土壤分离能力,延缓沉积物到达坡口的时间。另外一种观点则认为,地表粗糙度的增加会增加潜在冲刷,加剧土壤分离。RÖMKENS等^[14]对比分析了光滑和粗糙2种地表土壤侵蚀状况表明,光滑表面土壤流失量明显小于粗糙表面。可见,较大的地表粗糙度既有削弱土壤侵蚀的作用,又有增加土壤侵蚀发生的可能。对此,本研究认为,可能与坡面的坡度和径流量等因素引起的水力特性的变化有关。在较小的坡度和径流量条件下,水动力较小,粗糙度较大的地表能够抵抗径流对土壤的分离和搬运,有效降低土壤分离能力。随着坡度和径流量增加,地表径流流速、剪切力、径流功率增大,粗糙地表抵抗径流冲刷的能力可能随之降低,最终导致土壤分离能力增大。

基于此,本文以撂荒地土壤为研究对象,设置不同坡度和冲刷流量进行室内原状土冲刷试验,并结

合近景摄影测量法,量化土样地表粗糙度,对比分析水蚀过程中2种不同地表粗糙度处理对土壤分离能力的影响特征;阐明水力特性与不同处理土壤分离能力的关系,并建立土壤分离能力预测模型,以期为区域土壤侵蚀预测与水土流失防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

研究区位于贵州省贵阳市花溪区(26°24′21″~26°30′36″N, 106°32′16″~106°33′53″E),地处云贵高原,长江水系清水江和珠江水系蒙江的分水岭地带。该区以亚热带季风湿润气候为主,海拔1100~1300 m,年平均气温14.9℃。研究区降雨充沛,多年平均降水量1129.5 mm,且该区域大雨、暴雨事件频发,导致严重的土壤侵蚀。研究区地貌以丘陵和山地为主,其中丘陵占49%,山地占24%,坡度主要集中在5°~25°。研究区主要有林地、天然草地、撂荒地和农地几种土地利用类型,其中林地包括针叶林、常绿阔叶林和落叶阔叶林。试验土样采集于1a撂荒地0~5 cm表层土壤,为第四纪黄黏土发育而来的黄壤,质地为黏壤土,土壤体积质量为1.14 g/cm³。撂荒地内主要植物有藜(*Chenopodium album*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)、苋(*Amaranthus tricolor*)和鬼针草(*Bidens pilosa*)。

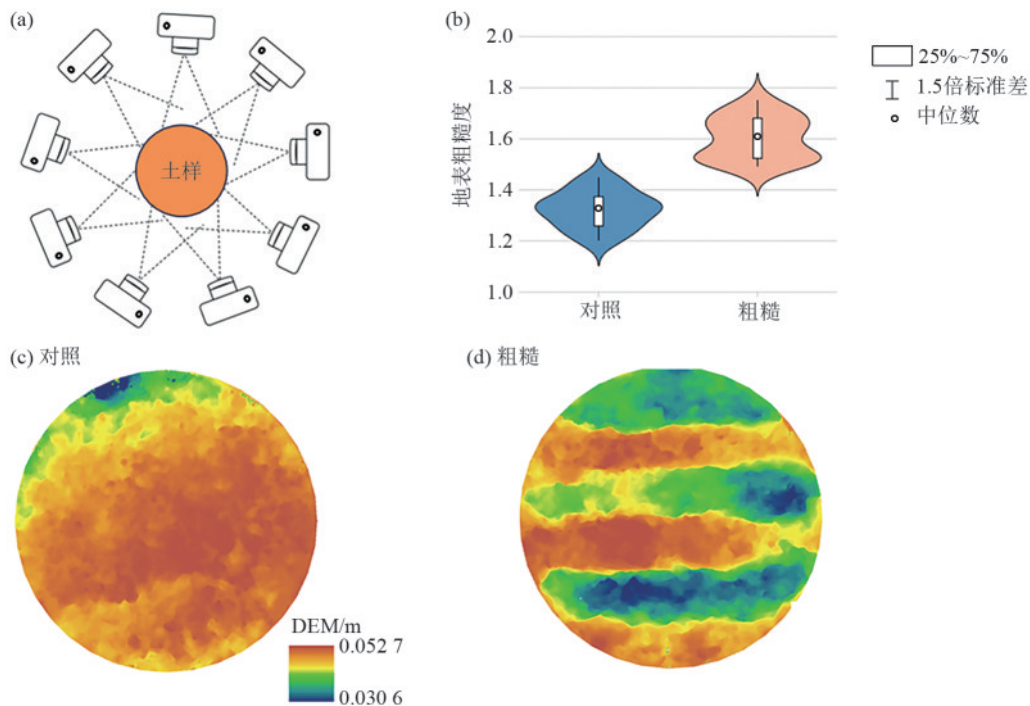
在研究区1a撂荒地内随机选取5个样地,在选

定的样地内随机布设5个采样样方(1 m×1 m),各样方间距≥4 m以确保空间独立性。在各样方内按梅花取样法设置采样点,用200 cm³不锈钢环刀进行原状土样采集。采样前先清理样方内地表生物碎屑及岩屑杂质,然后将环刀垂直打入土壤至环刀上沿与土壤表面齐平,挖出环刀并套上上下盖。累计采集土壤样品90个,所有样品带回实验室待测。

为模拟粗糙地表,采回的土样需进行粗糙处理。根据样地地表微地形特征,将其中45个土样用园艺小锄在土样表面耙出3条宽和深分别为1 cm左右的沟槽,每条沟槽间隔1 cm,形成沟垄相间的起伏表面,剩余的土样则保持原状,作为对照。

1.2 地表粗糙度的测定

本研究基于运动恢复结构摄影测量技术(SFM)实现土样地表粗糙度的量化。数据采集阶段采用固定焦距影像捕获模式(图1a),使用Canon 80D数码相机(有效像素2420万)对环刀土样进行全方位图像采集,每个土样拍摄60张高清图像(图像重叠率>90%)。使用商业软件Agisoft PhotoScan对来自SFM摄影法获取的土样图像进行处理以获取土样高分辨率DEM。其操作流程包括:1)初始影像配准→三维几何重构;2)空间坐标校准(输入控制点坐标 x, y, z)→点云优化(稀疏→密集);3)高精度DEM生成→数据导出^[18]。通过该流程获取的DEM(图1c、图1d)用于量化2种处理土壤的粗地表粗糙度。



注:图a为摄影测量;图b为2种处理土样的地表粗糙度分布;图c和图d分别为对照和粗糙处理土样的DEM。

图1 试验土样地表粗糙度量化

Fig. 1 Quantification of surface roughness of experimental soil samples

在地形地貌学中,一般将地表粗糙度的大小定义为地表一定面积范围内曲面面积与其投影面积之比^[15]。采用 ArcGIS 10.2 软件对来自 Agisoft PhotoScan 的高分辨率土样 DEM 进行处理,计算出每个土样的表面积及投影面积,然后计算出土样的地表粗糙度,计算公式为:

$$SR = \frac{S_{表}}{S_{投}} \quad (1)$$

式中:SR 为土样的地表粗糙度; $S_{表}$ 为土样上表面的表面积; $S_{投}$ 为土样上表面的投影面积。

对照土样的地表粗糙度为 1.2~1.45,平均值为 1.34;粗糙土样的地表粗糙度为 1.49~1.81,平均值为 1.61,粗糙土样的地表粗糙度显著大于对照土样(图 1b)。

1.3 土壤分离能力测定

采用可调坡度的冲刷水槽测定土壤分离能力(图 2)。水槽由长 1.2 m、宽 0.08 m 的有机玻璃制成,水槽坡度可在 0~30°自由调节。试验装置包括基座、冲刷水槽、装样室、稳流槽、径流收集口、流量计和水箱(200 L)。冲刷试验过程中,持续向水箱中注水以保持水压力恒定。样品室位于径流收集口上方 0.2 m 处(直径 7.2 cm,深度 5 cm)。

为确保土样初始含水率一致,试验前需进行土样预处理:将带环刀的原状土样置于平底容器内,然后向容器内加水至水面与环刀上平面齐平,经 6 h 饱和吸水后取出静置 24 h 以排干重力水。预处理结束后立即组织冲刷试验。根据研究区地貌特征及降雨情况,本试验设置 5°、15°和 25° 3 个坡度;冲刷流量分别设置为 3.2、4.8、6.4 L/min,换算为试验水槽的单宽流量分别为 2 400、3 600、4 800 L/(h·m)。冲刷试验开始后,在水槽径流收集口以 1 min 间隔收集全部径流泥沙样品,每个土样的冲刷时间不超过 5 min。为防止取样环刀的边界效应,当土样冲刷深度达到 2 cm 时,立即停止冲刷试验。每个坡度和冲刷流量条件下分别进行 5 个

土壤样品冲刷试验。试验结束后,先对每个径流样品称重,并记录样品重量。将称重后的样品在室内静置 30 min 左右,再用定性滤纸($\Phi=30 \mu\text{m}$)过滤样品,析出泥沙,并将其烘干称重(85 °C, 3 h)。

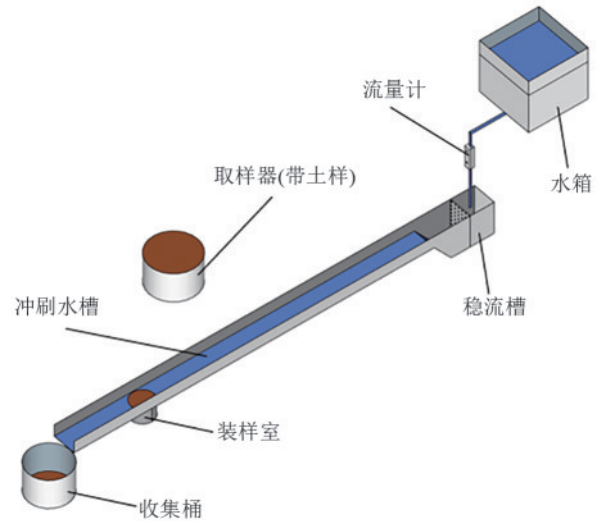


图 2 试验装置示意

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

1.4 指标计算

利用高锰酸钾(KMnO_4)测试径流流速,分别在每个坡度和流量条件下测量 5 次流速并计算平均值以获取平均流速。基于横流宽度均匀性假设,利用公式(2)计算径流深度(h, m)、径流剪切力(τ, Pa)、径流功率($w, \text{kg}/\text{m}^3$)和单位径流功率($P, \text{m}/\text{s}$),计算方法为:

$$h = \frac{Q}{vB} \quad (2)$$

$$\tau = \rho g h s \quad (3)$$

$$w = \tau v \quad (4)$$

$$P = S w \quad (5)$$

式中: Q 为流量, m^3/s ; v 为平均流速, m/s ; B 为试验水槽宽, 0.08 m; g 为重力加速度, m/s^2 ; S 为坡度的正弦, m/m 。本研究中各水力参数值见表 1。

表 1 不同坡度和流量条件下的水力参数值

Table 1 Hydraulic parameter values under different slope gradients and flow conditions

坡度 (S)/($^\circ$)	流量 (Q)/($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	径流深 (h)/(mm)	平均流速 (v)/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	径流剪切力 (τ)/ Pa	径流功率 (w)/($\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$)	单位径流功率 (P)/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
5	3.2	1.920	0.408	1.641	0.669	0.036
	4.8	2.100	0.545	1.795	0.978	0.048
	6.4	2.830	0.643	2.418	1.555	0.056
15	3.2	1.570	0.525	3.982	2.090	0.136
	4.8	1.720	0.692	4.362	3.019	0.179
	6.4	1.820	0.880	4.616	4.062	0.228
25	3.2	1.380	0.624	5.715	3.566	0.264
	4.8	1.617	0.813	6.695	5.443	0.344
	6.4	1.700	0.958	7.041	6.745	0.405

土壤分离能力 $[D_c, \text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)]$ 计算公式为:

$$D_c = \frac{M}{At} \quad (6)$$

式中: M 为每次试验泥沙的干质量,kg; A 为土样面积, 0.004 m^2 ; t 为冲刷时间,s。

1.5 统计分析

使用回归分析评估土壤分离能力与各水力参数之间的关系。通过方差分析和事后 LSD 比较来评估不同处理间径流含沙总量的差异($p < 0.05$)。所有统计分析均使用 SPSS 26.0 软件进行。所有图形均使用 Origin Pro 2021 软件绘制。采用相对误差(RE)、相对均方根误差(RRMSE)、决定系数(R^2)和 Nash-Sutcliffe 效率指数(NSE)评价所建立模型预测土壤分离能力的精度,计算公式为:

$$\text{RE} = \frac{(O_i - P_i)}{O_i} \times 100\% \quad (7)$$

$$\text{RRMSE} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum (O_i - P_i)^2}}{\bar{O}} \quad (8)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})]^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2} \quad (9)$$

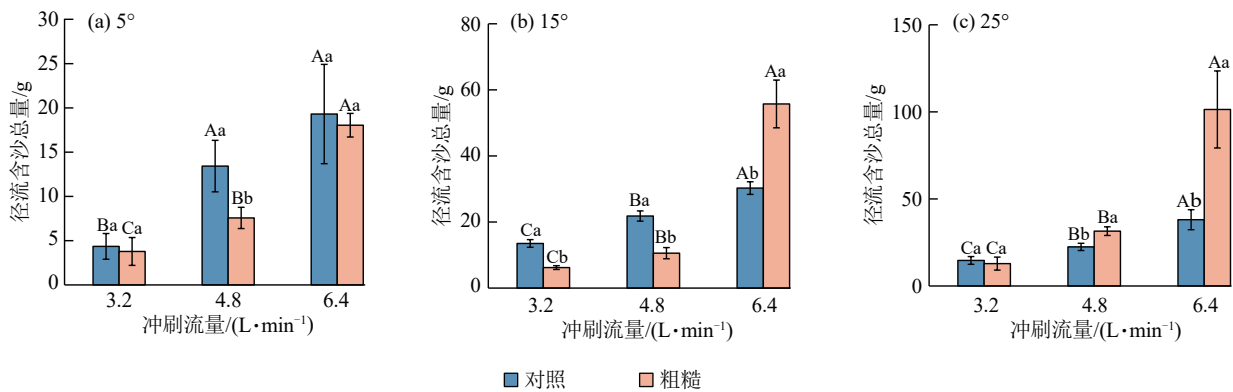
$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum (O_i - P_i)^2}{\sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (10)$$

式中: O_i 为观测值; P_i 为预测值; \bar{O} 为平均测量值; \bar{P} 为预测值的平均值。

2 结果与分析

2.1 不同粗糙度处理对径流含沙量的影响

由图 3 可知,对比分析 2 种处理在不同坡度和冲刷流量下的径流含沙总量。结果显示,当坡度恒定时,对照处理和粗糙处理的径流含沙总量均与冲刷流量呈正相关。在 5° 坡面条件下,对照组在 4.8、6.4 L/min 流量下的径流含沙总量较 3.2 L/min 显著增加($p < 0.05$),但 4.8、6.4 L/min 间无显著差异($p > 0.05$);与之形成对比的是,粗糙处理在 3 个流量梯度间均表现出显著差异($p < 0.05$)。随着坡度增至 15° 和 25° , 2 种处理在各流量水平下的输沙量均呈显著差异($p < 0.05$)。在 5° 缓坡条件下,对照组的径流含沙总量在所有流量水平均较粗糙处理提高 7.01%~77.38%,其中在 4.8 L/min 时差异达到显著水平($p < 0.05$)。在 15° 坡度条件下,3.2、4.8 L/min 流量下对照组的径流含沙总量分别比粗糙处理提高 117.58% 和 106.40%,但在 6.4 L/min 时粗糙处理的径流含沙总量反而比对照处理提高 45.70% ($p < 0.05$)。在 25° 陡坡条件下,除 3.2 L/min 流量外,粗糙处理在 4.8、6.4 L/min 时的输沙量均显著分别比对照处理提高 28.76%~62.45% ($p < 0.05$)。表明粗糙地表在坡度和流量较小时具有减小土壤侵蚀的效果,而在较大坡度和冲刷流量下反而增加土壤侵蚀的风险。



注:图柱上方不同大写字母表示相同处理在不同冲刷流量条件下的径流含沙量差异显著($p < 0.05$);不同小写字母表示不同处理在相同冲刷流量条件下的径流含沙量差异显著($p < 0.05$)。

图 3 不同坡度及冲刷流量条件下的径流含沙总量

Fig. 3 Total sediment load in runoff under different slope gradients and scouring flow conditions

2.2 不同粗糙度处理下的土壤分离能力

由图 4 可知,总体而言,粗糙处理的土壤分离能力略高于对照处理,其平均值分别为 0.021 30、0.029 12 $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 。对照处理的土壤分离能力为 0.003 91~0.043 29 $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$,粗糙处理的土壤分离能力为 0.003 07~0.139 97 $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 。由粗糙处理与对照处理在不同水动力条件下的土壤分离能

力(图 5)显示,粗糙处理与对照处理的土壤分离能力随平均流速、径流剪切力、径流功率和单位径流功率的增大而增大。当平均流速、径流剪切力、径流功率和单位径流功率较小时,对照处理的土壤分离能力较粗糙处理提高 42.08%~112.31% ($p < 0.05$);当平均流速、径流剪切力、径流功率和单位径流功率分别达到 0.69 m/s、4.62 Pa、3.57 kg/s^3 和 0.23 m/s

时,对照处理土壤分离能力较粗糙处理降低 29.38%~63.72% ($p < 0.05$)。粗糙地表在坡度和流量较小时能够显著降低土壤分离能力,而在较大坡度和流量下粗糙表面难以抵抗较强的径流动能,表面凸起部分土壤被从土体分离,导致土壤分离能力显著增大。

2.3 水力参数对土壤分离能力的影响

不同水力参数与土壤分离能力的关系见图 6~图 9。回归分析结果显示,2 种处理的土壤分离能力均随平均流速、径流剪切力、径流功率和单位径流功率的升高而增大,其关系可用指数函数较好地表达 ($R^2=0.463\sim 0.929, p < 0.01$)。相比而言,平均流速与土壤分离能力的拟合程度显著优于其他水力参数 ($R^2 > 0.91$)。通过拟合函数对不同处理土壤分离能力进行预测表明,平均流速是所有水力参数中预测

效果最佳的因子。说明平均流速具有较好预测土壤分离能力的潜力。

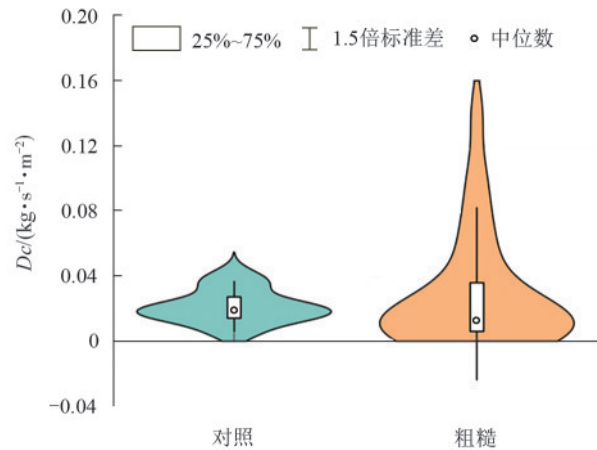
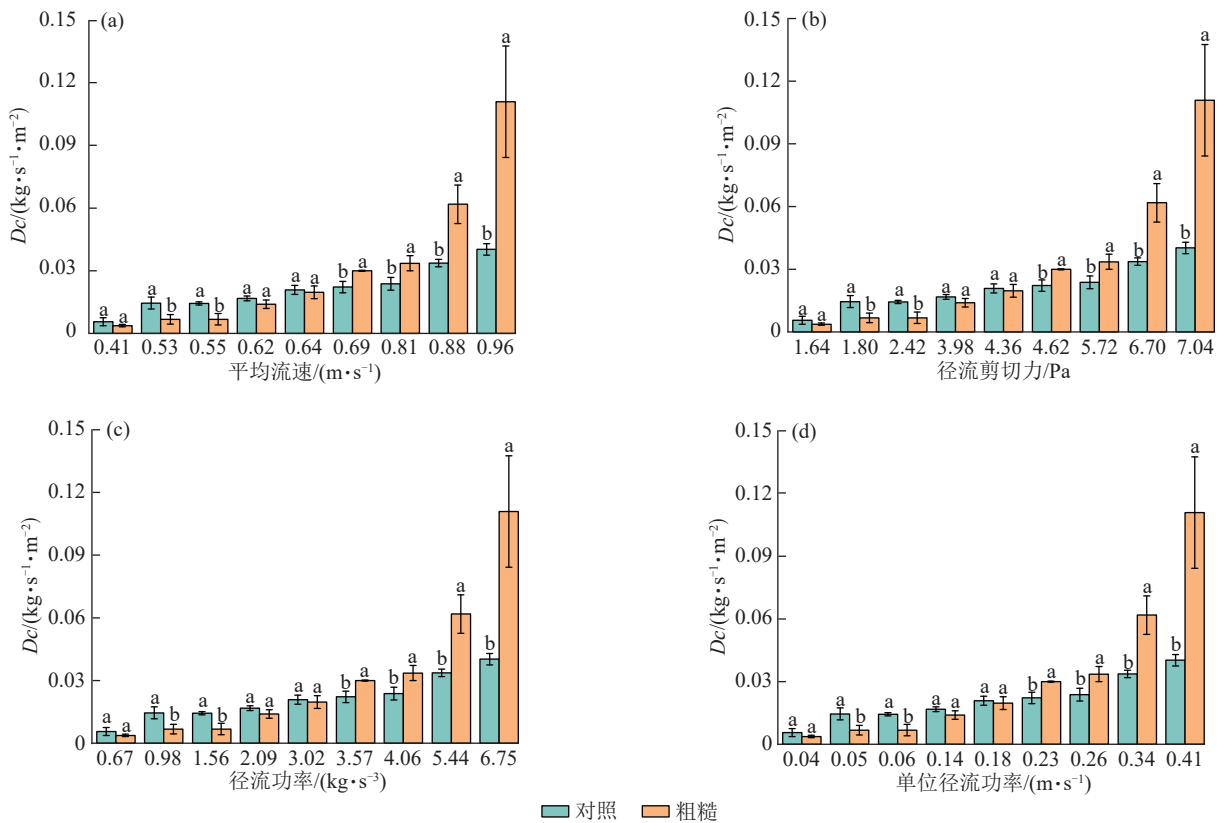


图 4 不同处理下的土壤分离能力

Fig. 4 Soil detachment capacity under different treatments



注:图柱上方不同小写字母表示不同处理在相同水力条件下的土壤分离能力差异显著 ($p < 0.05$)。

图 5 粗糙处理与对照处理在不同水动力条件下的土壤分离能力

Fig. 5 Soil detachment capacity under different hydraulic conditions for roughened treatment and control treatment

为进一步评价各水力参数对不同处理土壤分离能力的预测精度,对预测模型的相对误差、相对均方根误差、决定系数和 Nash-Sutcliffe 效率指数进行统计(表 2)。由表 2 可知,不同水力参数的相对误差、相对均方根误差、决定系数和 Nash-Sutcliffe 效率指数分别为 $-194.61\% \sim 73.78\%$ 、 $0.14 \sim 0.73$ 、 $0.463 \sim 0.929$ 和 $0.443 \sim 0.924$ 。其中,平均流速对应的预测

模型的相对误差和相对均方根误差最低,决定系数和 Nash-Sutcliffe 效率指数最高。表明平均流速是预测不同处理土壤分离能力的最佳水力因子,对照和粗糙处理的预测模型分别为 $Dc=0.003e^{2.752v}$ 和 $Dc=0.0003e^{6.132v}$ 。从相对误差、决定系数和 Nash-Sutcliffe 效率指数值来看,平均流速对粗糙处理土壤分离能力的预测精度比对照处理更高。

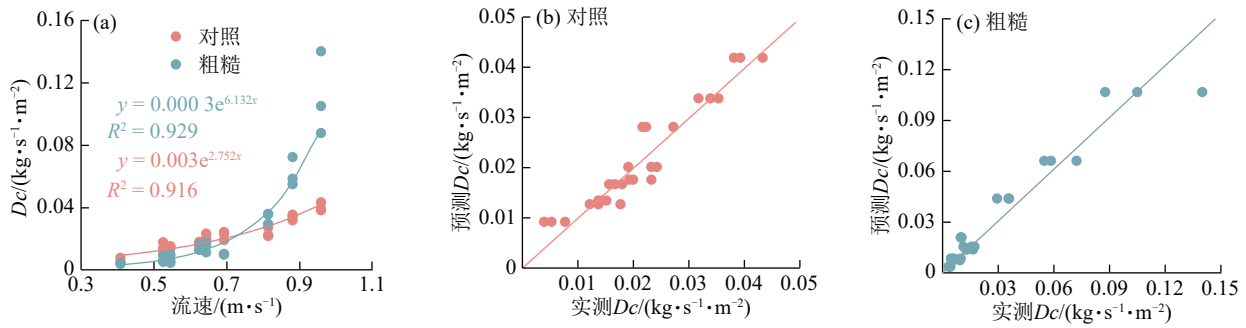


图 6 不同处理土壤分离能力与平均流速的指数函数关系及其预测效果

Fig. 6 Exponential relationship between soil detachment capacity and average flow velocity under different treatments and their prediction performance

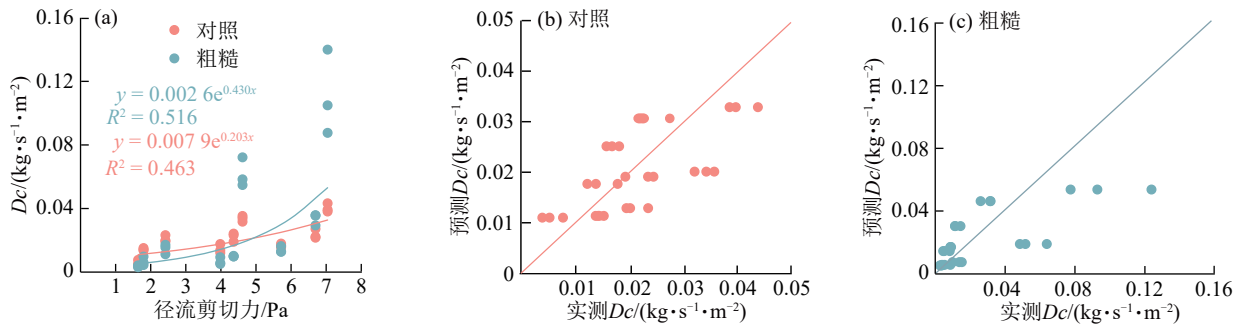


图 7 不同处理土壤分离能力与径流剪切力的指数函数关系及其预测效果

Fig. 7 Exponential relationship between soil detachment capacity and runoff shear stress under different treatments and their prediction performance

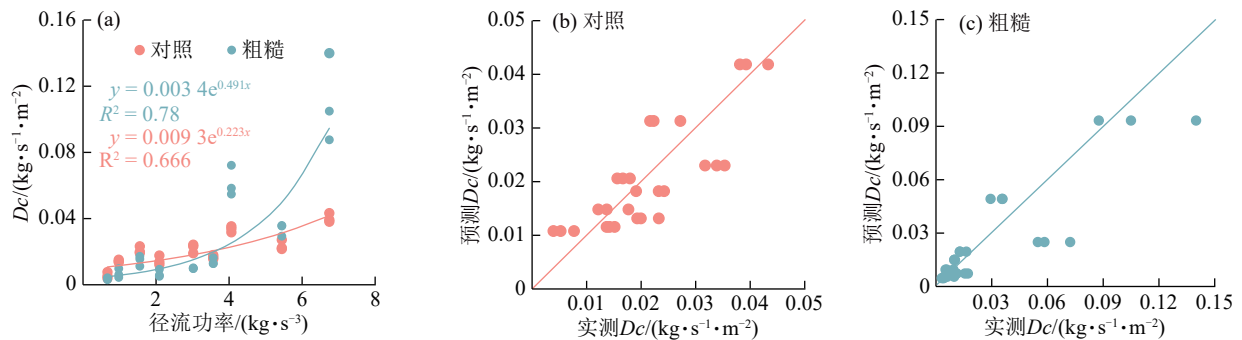


图 8 不同处理土壤分离能力与径流功率的指数函数关系及其预测效果

Fig. 8 Exponential relationship between soil detachment capacity and runoff power under different treatments and their prediction performance

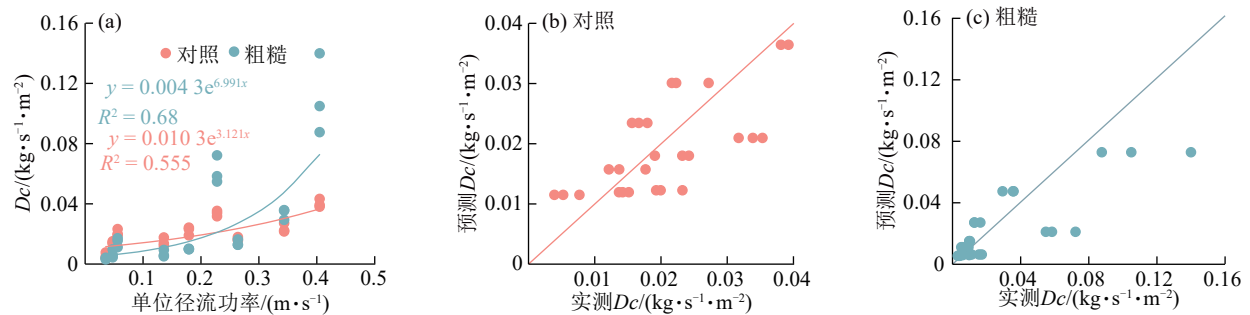


图 9 不同处理土壤分离能力与单位径流功率的指数函数关系及其预测效果

Fig. 9 Exponential relationship between soil detachment capacity and unit runoff power under different treatments and their prediction performance

表2 土壤分离能力与水力参数相关性
Table 2 Correlation between soil detachment capacity and hydraulic parameters

处理	预测因子	预测模型	RE/%	RRMSE	R ²	NSE
对照	平均流速(v)	$D_c=0.003\ 0e^{2.752v}$	-136.04~27.97	0.14	0.916	0.908
	径流剪切力(τ)	$D_c=0.007\ 9e^{0.203\tau}$	-181.91~44.52	0.35	0.463	0.443
	径流功率(w)	$D_c=0.009\ 3e^{0.223w}$	-176.38~43.39	0.28	0.666	0.640
	单位径流功率(P)	$D_c=0.010\ 3e^{3.121P}$	-194.61~47.20	0.32	0.555	0.534
粗糙	平均流速(v)	$D_c=0.000\ 3e^{6.132v}$	-125.5~23.77	0.33	0.929	0.924
	径流剪切力(τ)	$D_c=0.002\ 6e^{0.430\tau}$	-181.23~73.78	0.72	0.516	0.420
	径流功率(w)	$D_c=0.003\ 4e^{0.491w}$	-85.17~65.40	0.58	0.780	0.760
	单位径流功率(P)	$D_c=0.004\ 3e^{6.991P}$	-116.91~70.74	0.73	0.683	0.616

3 讨论

3.1 地表粗糙度对侵蚀产沙及土壤分离能力的影响

径流含沙量和土壤分离能力是衡量土壤侵蚀的重要指标。本研究分析了对照、粗糙处理的径流泥沙总量和土壤分离能力随坡度和冲刷流量的变化特征,结果表明,与对照相比,粗糙地表在坡度和流量较小时具有降低径流含沙量的效果,而在较大坡度和冲刷流量下反而增加冲刷的径流含沙量。可见,粗糙地表仅在坡度和冲刷流量较小时可有效减少土壤侵蚀,而在坡度和冲刷流量增加到一定程度后,粗糙凸起处会被径流破坏、搬运,地表冲刷和侵蚀作用反而加剧。该结果印证了郑子成等^[16]和林艺等^[17]的研究结论,随着坡度和降雨量的增加,粗糙地表产沙量呈先减小后增大的变化趋势。究其原因,可能是由于水流在流动过程中与粗糙土壤凸起部分产生碰撞和摩擦,增加径流流动的阻力,减小径流流速和携带泥沙的能力,从而减弱土壤分离能力^[18]。施明新等^[19]在地表粗糙度对坡面流水动力学参数影响的研究中也得出类似结论,坡面水流阻力系数随着粗糙度的增大而增大。是因为坡面水流在粗糙表面凸起阻碍下克服阻力做功消耗大量能量,从而导致水流用于侵蚀过程中土壤分离和搬运的能量大大减小。然而,当坡度和冲刷流量增大到一定程度时,径流流速、剪切力和径流功率等水力参数大幅度提高,此时径流剥蚀能力大于土壤抗剪切能力,土体被剥离和搬运,导致土壤分离能力随着坡度和流量的增大而升高^[20-22]。因此,在评价地表粗糙度对土壤侵蚀的影响时,不可忽视坡度和径流量主导的水力条件的变化。

3.2 水力条件对土壤分离能力的影响

土壤分离能力受流速、剪切力、径流功率和单位径流功率等水力条件的强烈影响^[8-9,23]。流速是表征浅层坡面流动力特性的基本参数,是地形、地表条件、流量和坡度等因素共同作用的结果。在本研究

中,测得的2种处理土壤分离能力均随平均流速呈指数增长,是因为随着流速的增大,坡面水流的动能增大,水流剥离土壤的能量增大,相应的土壤分离能力也随之增大。以往研究^[6,8]也支持这一结论。然而,也有研究^[8]指出,土壤分离能力与流速呈幂函数或线性函数的关系。这一差异可能归因于土壤条件的不同。类似地,在本研究中,土壤分离能力是径流功率的指数函数,其潜在原因是水流功率受到坡度、流量、流速等因素的影响^[8]。随着流速的增大,坡面单位面积水流势能随时间减小的速度较快,分离土壤颗粒的能量增大,导致土壤分离能力大大增强。这一结果也印证了WANG等^[24]的研究结论。但在WANG等^[24]的研究中,土壤分离能力是径流功率的线性函数。

先前的研究^[8-9,24]也使用径流剪切力和单位径流功率来预测土壤分离能力。然而,在本研究中,虽然剪切力和单位流功率与土壤分离能力呈指数关系,但它们的拟合效果并不理想。是因为剪切应力代表地表水流对土壤表面的阻力,当坡面流冲刷或侵蚀表土时,不同土壤区域的土壤表面形状和坡面流的水力参数都会发生变化^[6,25],这种变化在地形极度破碎的喀斯特地区更为明显^[5]。显然,在计算水流剪切力时没有考虑这种变异性,可能导致额外的误差。此外,根据定义,单位径流功率与坡度和流速成正比,而与径流深缺乏比例关系可能是其在预测土壤分离能力时表现不佳的原因,因为径流深似乎对土壤分离能力有很强的影响^[26]。

综上,平均流速是预测对照和粗糙处理的土壤分离能力最佳因子。平均流速对粗糙处理的预测效果优于对照处理,是因为在粗糙度较大的土壤表面,流速的变化相对较大。因此,在考虑不同粗糙度土壤分离能力预测因子的选取时,平均流速可能是最佳水力因子。

3.3 不足与展望

本研究对比分析 2 种粗糙度处理在不同水力条件下的土壤分离能力,结果可为区域土壤侵蚀的预测和水土保持工作提供理论参考。然而,本研究仅涉及 2 个粗糙度梯度,未考虑不同梯度地表粗糙度对土壤侵蚀影响。有研究^[27]指出,不同地表粗糙度对土壤侵蚀的影响可能存在一定差异,减少土壤侵蚀的地表粗糙度可能存在一个临界值,当粗糙度超过该临界值时,地表粗糙度反而会增加径流的湍流度和产沙量,进而加剧水土流失,因此,有待进一步研究确定。此外,本研究尚未将除水力因子外的其他因素纳入土壤分离能力的预测,未来的研究有必要综合考虑多因素对不同粗糙度土壤分离能力的影响,建立更精确的土壤分离能力预测模型。

4 结论

1) 地表粗糙度对土壤分离能力的影响受坡度和冲刷流量主导的水力条件的制约,与对照相比,粗糙地表在平均流速、剪切力、径流功率、单位径流功率较小时具有降低土壤分离能力的效果,在较大的平均流速、剪切力、径流功率、单位径流功率条件下反而增大土壤侵蚀的风险。因此,在评价地表粗糙度对土壤分离能力的影响时,应将水力条件纳入考虑。

2) 不同粗糙度条件下土壤分离能力随平均流速、剪切力、径流功率、单位径流功率等水力参数的增加呈指数型上升趋势,其中平均流速的拟合效果最佳。

3) 可通过平均流速很好地预测不同粗糙度土壤分离能力,且平均流速对土壤分离能力的预测效果在较大粗糙度条件下表现更好。对照和粗糙处理的土壤分离能力预测模型分别为 $D_c=0.003e^{2.752v}$ ($R^2=0.916$, $NSE=0.908$) 和 $D_c=0.0003e^{6.132v}$ ($R^2=0.929$, $NSE=0.924$)。

参考文献:

- [1] 效存德,史培军,李小雁,等.地表过程与可持续发展研究进展与展望[J].北京师范大学学报(自然科学版),2022,58(3):476-490.
XIAO C D, SHI P J, LI X Y, et al. Earth surface process and regional sustainable development[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2022, 58(3):476-490.
- [2] LI Z W, ZHANG G H, GENG R, et al. Land use impacts on soil detachment capacity by overland flow in the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2015, 124:9-17.
- [3] TU A, ZHENG H J, MO M H, et al. Effect of hillslope profile shape on runoff and soil erosion in red soil hilly areas of China using the WEPP model[J]. Journal of Hydrology, 2025, 655:e132914.
- [4] MATTHEWS F, PANAGOS P, FENDRICH A, et al. Testing a low-complexity spatially distributed model to simulate the intra-annual dynamics of soil erosion and sediment delivery[J]. Catena, 2025, 257:e109054.
- [5] ZI R Y, ZHAO L S, FANG Q, et al. Path analysis of the effects of hydraulic conditions, soil properties and plant roots on the soil detachment capacity of karst hillslopes[J]. Catena, 2023, 228:e107177.
- [6] 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:e114021.
- [7] YANG D M, GAO P L, ZHAO Y D, et al. Modeling sediment concentration of rill flow[J]. Journal of Hydrology, 2018, 561:286-294.
- [8] LI T Y, LI S Y, LIANG C, et al. Erosion vulnerability of sandy clay loam soil in southwest China: Modeling soil detachment capacity by flume simulation[J]. Catena, 2019, 178:90-99.
- [9] NEARING M A, BRADFORD J M, PARKER S C. Soil detachment by shallow flow at low slopes[J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55(2):339-344.
- [10] 张娜娜,王兵,张宝琦,等.地表粗糙度测定方法研究[J].水土保持学报,2020,34(1):135-140.
ZHANG N N, WANG B, ZHANG B Q, et al. Study on determination method of surface roughness[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1):135-140.
- [11] 张建文,李鹏,高海东,等.覆沙坡面微地形变化与侵蚀产沙的响应关系[J].干旱区研究,2020,37(3):757-764.
ZHANG J W, LI P, GAO H D, et al. Response relationship between micro-relief variation and slope erosion under sand-covered conditions[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3):757-764.
- [12] 谭青芳,陈峰庭,黄钰涵,等.饱和黄绵土坡面细沟侵蚀微地形变化及其对水力学特征参数的响应[J].土壤学报,2025,64(4):946-957.
TAN Q F, CHEN F T, HUANG Y H, et al. Change of rill erosion microtopography on saturated loess slope and its response to hydraulic parameters[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 64(4):946-957.
- [13] MOMBINI A, AMANIAN N, TALEBI A, et al. Surface roughness effects on soil loss rate in complex hillslopes under laboratory conditions[J]. Catena, 2021, 206:e105503.

- [14] RÖMKENS M J M, HELMING K, PRASAD S N. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes[J]. *Catena*, 2002, 46(2/3):103-123.
- [15] 汤国安,刘学军,闫国年.数字高程模型及地学分析的原理与方法[M].北京:科学出版社,2005.
TANG G A, LIU X J, LÜ G N. Principles and methods of digital elevation model and geoscience analysis[M]. Beijing:Science Press,2005.
- [16] 郑子成,秦凤,李廷轩.不同坡度下紫色土地表微地形变化及其对土壤侵蚀的影响[J].*农业工程学报*,2015,31(8):168-175.
ZHENG Z C, QIN F, LI T X. Changes in soil surface microrelief of purple soil under different slope gradients and its effects on soil erosion[J].*Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(8): 168-175.
- [17] 林艺,秦凤,郑子成,等.不同降雨条件下垄作坡面地表微地形及土壤侵蚀变化特征[J].*中国水土保持科学*, 2015,13(3):32-38.
LIN Y, QIN F, ZHENG Z C, et al. Characteristics of variations in soil surface micro-topography and soil erosion on the cross ridge slope under different rainfall conditions[J].*Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(3):32-38.
- [18] 梁心蓝,赵龙山,吴佳,等.地表粗糙度与径流水力学参数响应规律模拟[J].*农业工程学报*,2014,30(19):123-131.
LIANG X L, ZHAO L S, WU J, et al. Simulation of response law for soil surface roughness and hydraulics parameters of runoff[J].*Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014,30(19):123-131.
- [19] 施明新,李陶陶,吴秉校,等.地表粗糙度对坡面流水动力学参数的影响[J].*泥沙研究*,2015(4):59-65.
SHI M X, LI T T, WU B X, et al. Influences of surface roughness on overland flow hydraulic characteristics[J].*Journal of Sediment Research*, 2015(4):59-65.
- [20] 王添,任宗萍,李鹏,等.模拟降雨条件下坡度与地表粗糙度对径流产沙的影响[J].*水土保持学报*,2016,30(6):1-6.
WANG T, REN Z P, LI P, et al. Effect of slope gradient and surface roughness on runoff and sediment yield under simulated rainfall[J].*Journal of Soil and Water Conservation*, 2016,30(6):1-6.
- [21] 魏霞,李勋贵,李占斌.黄土凸型复合坡面径流能量变化特征试验研究[J].*水土保持学报*,2014,28(6):71-76.
WEI X, LI X G, LI Z B. Experimental study on variable characteristics of runoff energy in convex composite slopes of loessial soil[J].*Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(6):71-76.
- [22] 资如毅.黔中高原山地土壤抗冲性特征及其影响因素研究[D].贵阳:贵州大学,2022.
ZI R Y. Study on the characteristics of soil anti-scourability its influencing factors in the mountainous area of Guizhong Plateau[D].Guiyang:Guizhou University,2022.
- [23] 陈红,付兴涛.连续降雨条件下晋西黄绵土坡面径流路径及微地形变化[J].*水土保持学报*,2025,39(3):78-87.
CHEN H, FU X T. Changes in runoff paths and micro-topography on loessial soil slope in western Shanxi Province under continuous rainfall conditions[J].*Journal of Soil and Water Conservation*, 2025,39(3):78-87.
- [24] WANG D D, WANG Z L, SHEN N, et al. Modeling soil detachment capacity by rill flow using hydraulic parameters[J].*Journal of Hydrology*, 2016, 535:473-479.
- [25] GUO P, XIAO H, GAO F, et al. The vertical heterogeneity of soil detachment by overland flow on the water level fluctuation zone slope in the Three Gorges Reservoir, China[J].*Hydrological Processes*, 2021, 35(7): e14282.
- [26] XIAO H, LIU G, LIU P L, et al. Response of soil detachment rate to the hydraulic parameters of concentrated flow on steep loessial slopes in on the Loess Plateau of China[J].*Hydrological Processes*, 2017, 31:2613-2621.
- [27] LUO J, ZHENG Z C, LI T X, et al. Temporal variations in runoff and sediment yield associated with soil surface roughness under different rainfall patterns[J].*Geomorphology*, 2020, 349:e106915.