

不同地表粗糙度红壤坡面流水动力学特性

陈峰庭¹, 谭青芳¹, 黄钰涵¹, 赵明全¹, 常志勇², 吴嫡¹, 黄子轩¹, 韦娟¹

(1.广西大学 林学院 广西森林生态与保育重点实验室,

广西南宁 530004; 2.广西水利电力职业技术学院, 广西南宁 530023)

摘要: [目的] 探究不同地表粗糙度、坡度和流量下的红壤坡面流水动力学特性, 为理解和预测红壤坡面片蚀过程提供科学依据。[方法] 通过5个团聚体粒径(0.25~1, 1~3, 3~5, 5~7, 7~10 mm)模拟构建不同地表粗糙度的红壤坡面, 试验设计4个流量(2, 4, 8, 16 L/min)和4个坡度(5°, 10°, 15°, 20°), 基于运动恢复结构的摄影测量法和电解质示踪法测定坡面地表粗糙度和流速, 计算出每个工况下的地表粗糙度和水动力学参数。[结果] 在试验设计条件下, 坡面流平均流速介于0.022~0.531 m/s, 雷诺数在63~1155, 弗劳德数范围为0.1~4.1, 阻力系数区间为0.13~68.86。地表粗糙度与阻力系数呈正相关($p < 0.01$), 与雷诺数($p < 0.05$)、弗劳德数和流速($p < 0.01$)的呈负相关。坡度与坡面流平均流速和弗劳德数呈正相关($p < 0.01$)。单宽流量与雷诺数、弗劳德数和平均流速呈正相关($p < 0.01$), 与阻力系数呈负相关($p < 0.01$)。[结论] 地表粗糙度增加导致坡面流阻力增大, 水流惯性力减小, 是决定平均流速、弗劳德数和阻力系数的关键因素。单宽流量通过改变坡面流水深和水流惯性力主导雷诺数的变化。相较于地表粗糙度和单宽流量, 坡度对平均流速、雷诺数、弗劳德数和阻力系数的影响最小。平均流速、弗劳德数与地表粗糙度、单宽流量及坡度间呈良好的幂函数关系。雷诺数、阻力系数则与单宽流量和地表粗糙度呈良好的幂函数关系。

关键词: 流速; 坡面流; 地表粗糙度; 红壤; 片蚀

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)01-0030-10

中图分类号: S157.1

文献参数: 陈峰庭, 谭青芳, 黄钰涵, 等. 不同地表粗糙度红壤坡面流水动力学特性[J]. 水土保持通报, 2025, 45(1): 30-39. Chen Fengting, Tan Qingfang, Huang Yuhan, et al. Hydrodynamic characteristics of overland flow under different surface roughness of red soil slope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1): 30-39. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.004; CSTR:32312.14.stbctb.2025.01.004.

Hydrodynamic characteristics of overland flow under different surface roughness of red soil slope

Chen Fengting¹, Tan Qingfang¹, Huang Yuhan¹,

Zhao Mingquan¹, Chang Zhiyong², Wu Di¹, Huang Zixuan¹, Wei Juan¹

(1. Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation,

College of Forestry, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;

2. Guangxi Vocational College of Water Resources and Electric Power, Nanning, Guangxi 530023, China)

Abstract: [Objective] The hydrodynamic properties of red soil slopes under varying surface roughness, slope, and flow rate were analyzed in order to provide scientific basis for a better understanding and prediction of sheet erosion on red soil slopes. [Methods] A study was conducted to simulate red soil slopes with varying surface roughness by using different particle sizes (0.25—1, 1—3, 3—5, 5—7, and 7—10 mm). The experiments involved four flow rates (2, 4, 8, and 16 L/min) and four slopes (5°, 10°, 15°, and 20°). Photogrammetry based on the structure from the motion technique and the electrolyte tracing method were used to determine the surface roughness and flow velocity on the slope. The collected data were

收稿日期: 2024-06-05

修回日期: 2024-11-04

采用日期: 2024-11-06

资助项目: 国家自然科学基金项目“不同前期含水量下地表糙度对红壤坡面流水动力特性的影响机制”(42207389); 广西研究生教育创新计划资助项目(YCSW2024063)

第一作者: 陈峰庭(1998—), 男(汉族), 湖北省荆州市人, 硕士研究生, 研究方向为恢复生态学。Email: 2209301003@st.gxu.edu.cn.

通信作者: 黄钰涵(1992—), 女(汉族), 贵州省毕节市人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀机理、土壤水文与水土保持方面的研究。Email: huangyuhan0710@foxmail.com.

used to calculate the surface roughness and hydrodynamic parameters under each condition. [Results] The mean flow velocity varied from 0.022 to 0.531 m/s under the experimental design conditions. The Reynolds numbers ranged from 63 to 1 155, Froude numbers ranged from 0.1 to 4.1, and the resistance coefficients were within the range of 0.13 to 68.86. The surface roughness was positively correlated with the resistance coefficient ($p < 0.01$) and negatively correlated with the Reynolds number ($p < 0.05$), Froude number, and flow velocity ($p < 0.01$). The slope was positively correlated with the unit-width discharge of overland flow and the Froude number ($p < 0.01$). The width discharge was positively correlated with the Reynolds number, Froude number, and average flow velocity ($p < 0.01$) and negatively correlated with the resistance coefficient ($p < 0.01$). [Conclusion] Increased surface roughness augments the resistance to overland flow and reduces the influence of flow inertia, serving as a crucial factor in determining the mean flow velocity, Froude number, and resistance coefficient. The unit-width discharge primarily influences the Reynolds number by altering the water depth and flow inertia of the overland flow. Compared with the surface roughness and unit-width discharge, the slope had the least impact on the mean flow velocity, Reynolds number, Froude number, and resistance coefficient. The relationship of the mean flow velocity and Froude number with the surface roughness, unit-width discharge, and slope can be described well by the power function. Similarly, the Reynolds number and resistance coefficient exhibited a strong power function relationship with the unit width discharge and surface roughness.

Keywords: velocity; overland flow; surface roughness; red soil; sheet erosion

中国是世界上水土流失最严重的国家之一,2023年中国共有水土流失面积 $2.63 \times 10^6 \text{ km}^2$,水力侵蚀面积 $1.07 \times 10^6 \text{ km}^2$ [1]。坡面流是土壤侵蚀的动力和泥沙迁移的载体 [2],其水动力学特性是研究坡面流水力侵蚀的基础 [3]。坡面流水深浅,在自然条件下由于受到入渗、下垫面变化和降雨等因素的影响,沿程不断有质量源和动量源汇入,导致坡面流流速变化大,造成了坡面流研究难度较大的现状 [4]。坡面流所经地表往往表现出不同的地表微地形,其粗糙程度各异,这一特点直接决定了坡面流的不同特性 [5]。表征水动力学特性的参数主要包括流速、雷诺数、弗劳德数和阻力系数等 [6],其主要受到坡度、流量、下垫面粗糙度、等因素的影响 [6-7]。因此,对不同地表粗糙度下坡面流水动力学特征参数的影响因素进行研究,可以丰富坡面流侵蚀理论。目前,已有学者针对坡面流水动力学特征参数的影响因素展开研究,取得了诸多成果。根据试验土槽下垫面的不同可以分为动床和定床两种试验方法。在动床条件下,梁志权等 [8] 在不同坡度和雨强下试验发现流速和单宽流量、坡度正相关,雨强、平均水深与单宽流量正相关。Giménez 等 [9] 通过冲刷试验得出细沟流速是由沟道流量与床层粗糙度之间的反馈机制控制的,流速和流量存在指数关系。郑良勇等 [10] 在陡坡条件下进行冲刷试验得出:同流量下雷诺数和阻力系数随坡度呈先增后减的抛物线变化,随流量变化规律复杂。在定床条件下,施明新等 [11] 通过构建不同地表粗糙度坡面进行冲刷

试验,得出相比于流量和坡度,地表粗糙度对流速的影响最大,地表粗糙度与雷诺数和弗劳德数均呈负相关。刘洋等 [12] 通过模拟不同植被覆盖度和不同地表粗糙度坡面进行冲刷试验,得到坡度相较于流量、地表粗糙度、地表覆盖率而言对流速的贡献率最大。Abrahams 等 [13] 通过人工模拟地表覆盖及糙率试验认为流量对流速的影响最显著。可见,无论是动床还是定床条件下,不同坡度,流量和地表粗糙度会导致水动力学参数的变化规律不同。动床试验虽然更加贴近实际条件,但由于其下垫面剧烈变化,水动力学参数变化规律复杂,导致难以用于研究坡面片蚀阶段的水动力学参数变化规律。在定床条件下的水动力学特性研究由于构建不同地表粗糙度坡面的土壤或砂粒的粒径范围和连续性不同,地表粗糙度的表示方法存在差异,下垫面条件、坡度和流量等其他试验设置不同,流速的测量方法不同,导致研究结论各异。综上所述,坡面流水动力学特性的研究仍然面临许多挑战和复杂性,需要进一步深入研究和探索,更好地理解 and 预测坡面流变化规律。

红壤是中国重要的耕作土壤之一,红壤坡耕地受高强度耕作和土壤水蚀影响,土壤质量逐渐下降,制约区域农业经济发展 [14]。红壤区与中国其他土壤侵蚀严重区域有所不同,它主要由山地和丘陵构成,受亚热带和热带气候影响,降雨充沛且多集中于短时间内,暴雨频发且强度大,以水蚀为主要形式的土壤侵蚀问题尤为突出 [15]。片蚀是土壤侵蚀的重要阶段,

是土壤坡面水蚀过程中分布面积最大且最为复杂和独特的侵蚀类型^[16]。片蚀作为土壤侵蚀的初始阶段,主要发生在土壤砂粒比重大的坡耕地和裸露荒地^[17],在发生片蚀的土壤表面,其地表粗糙度仍然受到土壤颗粒粒径的影响^[16]。降雨时,坡面地表粗糙度持续发生复杂变化,由于试验方法限制,无法定量解析片蚀阶段地表粗糙度对坡面流水动力学特性的影响。因此,本研究通过构建不同地表粗糙度的红壤坡面,开展不同坡度与流量条件下的放水试验,测定坡面流速,计算水深、雷诺数、弗劳德数、阻力系数等水动力学特征参数,旨在探究红壤坡面在片蚀阶段下不同地表粗糙度、坡度、流量的水动力学参数的变化

特征,分析地表粗糙度、坡度、流量对水动力学参数的影响,进而建立地表粗糙度、坡度、流量与流速、雷诺数、弗劳德数和阻力系数之间的函数关系式,研究结果可为深化红壤坡面侵蚀机理提供重要的科学基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为甘蔗耕层土壤(0—20 cm),由第四纪红色黏土发育,采样地点为广西壮族自治区崇左市扶绥县渠黎镇广西亚热带农科新城(107°78'E,22°51'N),采样时间为2023年6月。土壤理化性质详见表1,按照美国制土壤质地分类标准,供试土壤为黏土。

表 1 供试土壤样品理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil samples for testing

土壤质地	初始含水率/%	有机质含量/(g·kg ⁻¹)	机械组成/%		
			<0.002 mm	0.002~0.05mm	0.05~2 mm
黏土	9.13	43.43	75.74	14.43	9.83

1.2 试验设计

试验装置由试验水槽、稳流槽、蠕动泵、电解质薄层水流流速测量系统组成(图1)。水槽长6 m宽0.3 m,深0.2 m,可调节坡度范围为0°~30°。试验于2023年12月在广西水力电力职业技术学院人工模拟降雨大厅内进行。在降雨时,土壤团聚体大小引起的地表粗糙度的改变会影响土壤侵蚀,探究坡面地表粗糙度对土壤侵蚀过程的影响对建立基于过程的土壤侵蚀模型有重要意义,选用不同粒径范围的土壤团聚体可模拟不同地表粗糙度的土壤条件。土壤质地和颗粒级配为南方典型土壤水力特性差异的主要影响因素,红壤团聚体干筛粒径集中分布于0~10 mm。前人研究中选择红壤粒径范围多为0~5 mm^[18],少数达到5~10 mm^[19]。因此,本研究综合前人研究中设置的粒径范围和实际情况,设置0~10 mm的粒径范围。为了模拟自然条件下不同的地表粗糙度红壤坡面,因此设置了具有一定连续性的粒径范围(0.25~1 mm,1~3 mm,3~5 mm,5~7 mm,7~10 mm)。室内将野外采集的红壤坡耕地耕层土壤风干,将土壤筛分成5种土壤颗粒粒径范围(0.25~1 mm,1~3 mm,3~5 mm,5~7 mm,7~10 mm),在冲刷槽床面均匀涂一层清漆,用不同粒径的土壤颗粒粘贴在床面形成一定地表粗糙度,待清漆凝固后,在土壤颗粒表面用电动喷枪喷洒一层清漆包裹土壤颗粒,避免冲刷过程中破坏。试验前,坡面仅覆盖一层特定粒径区间的土壤颗粒。试验期间,若观测到水流持续覆盖整个坡面,即可判定为坡面发生片蚀^[20]。

红壤区土壤侵蚀集中分布于5°~15°坡面^[21],结合研究区域实际情况,试验设置5°,10°,15°,20°共4个典型坡度。根据研究区域的降雨和径流情况设置2,4,8和16 L/min共4个典型流量,每个设计工况进行3次重复试验。

1.3 测定方法

1.3.1 地表粗糙度的测定 试验使用基于运动恢复结构(structure from motion, SfM)的摄影测量法测定坡面随机粗糙度。试验中使用的相机型号为Nikon digital camera D3400。在距离土槽1.5 m的距离进行拍摄,每张照片至少包含4个控制点。对于相邻的两幅图片,重复面积范围为50%~60%。将照片导入Agisoft Metashape Professional 1.8.5中,生成三维密集点云和DEM。使用ArcGIS将DEM切割至测量区域,计算试验区的随机粗糙度。文中的地表粗糙度即为公式(1)计算出的随机粗糙度。

$$R_R = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Z(x_i) - \bar{Z}]^2} \quad (1)$$

式中: R_R 为随机粗糙度(mm); N 为生成的DEM中的网格数; $Z(x_i)$ 为网格 x_i (mm)的高程; \bar{Z} 为DEM的平均高程(mm)。

1.3.2 流速的测定 研究使用坡面薄层水流流速测量系统测量坡面流速。在距离土槽进水口0.2 m处设置一个电解质发生装置,装入电解质示踪剂(过饱和的KCL溶液)并连接至数据采集器;以试验土槽起始处每间隔1 m布设一个电解质传感器,分别连接至数据采集器;将数据采集器连接至计算机,基于电解

质示踪为测量原理,通过数据采集器收集原始数据,由计算机导出并通过质心法^[22]计算各采集样点的电解质示踪水流流速数据。每次试验前后各测量一次水温,两次测量结果的平均值作为本次试验的水温。江忠善等^[23]通过对国内外坡面流流速公式进行总

结,得出流速是坡度和流量的幂函数:

$$V = Kq^n s^m \quad (2)$$

式中: K 为表征坡面地表特征的常数; q 表示单宽流量 $[\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})]$; s 表示坡度 $(^\circ)$; V 表示平均流速 (m/s) 。



a 测定地表粗糙度



b 电解质传感器



c 稳流槽和电解质发生器

图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

1.4 水动力学参数计算

由于水流流量为已知设计工况,过水断面近似为矩形,水流宽度即为设计土槽宽度,平均水深可通过流量与流速的关系得出。根据试验中测得的流速、水温等参数可求得雷诺数(Re)、达西阻力系数(f)、弗劳德数(Fr)。在坡面水动力学研究中,雷诺数和弗劳德数用来表征坡面流的流态和流型。一般而言, $Re < 500$ 为层流; $500 < Re < 2\,000$ 为过渡流; $Re > 2\,000$ 为紊流。弗劳德数主要用于判别坡面流为急流或缓流($Fr > 1$ 时,水流为急流; $Fr = 1$ 为临界流; $Fr < 1$ 时,水流为缓流)。计算公式为:

$$h = \frac{Q}{Vd} \quad (3)$$

式中: h 为平均水深 (m) ; Q 为水流流量 (m^3/s) ; V 为水流流速 (m/s) ; d 为水流宽度 (m) 。

$$\nu = \frac{0.017\,75 \times 10^{-4}}{1 + 0.033\,7t + 0.000\,221t^2} \quad (4)$$

式中: ν 为运动黏滞系数 (m^2/s) ; t 为水温 $(^\circ\text{C})$ 。

$$Re = \frac{VR}{\nu} \quad (5)$$

式中: R 为水力半径 (m) 。

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (6)$$

式中: g 为重力加速度 (m/s^2) ,取 $g = 9.8 \text{ m}/\text{s}^2$ 。

$$f = \frac{8gRJ}{V^2} \quad (7)$$

式中: J 为水力能坡,采用试验坡度的正切值。

2 结果与分析

2.1 地表粗糙度测定结果

根据公式(1)计算出每个不同粒径范围土壤颗粒铺设土槽的地表粗糙度。计算结果详见表 2。由表 2 可知,粒径范围从小到大依次为 $0.25 \sim 1 \text{ mm}$, $1 \sim 3 \text{ mm}$, $3 \sim 5 \text{ mm}$, $5 \sim 7 \text{ mm}$, $7 \sim 10 \text{ mm}$,对应的地表粗糙度分别为 $0.073, 0.107, 0.239, 0.273, 0.349 \text{ mm}$ 。

表 2 不同粒径范围土壤颗粒铺设土槽的地表粗糙度
Table 2 Surface roughness of soil particles within different particle size ranges laying soil trench

粒径范围/mm	地表粗糙度/mm
0.25~1	0.073
1~3	0.107
3~5	0.239
5~7	0.273
7~10	0.349

2.2 坡面流流速变化规律

图 2 显示了在不同坡度下流速随地表粗糙度和流量的变化趋势。由图 2 可以看出,在不同单宽流量

和坡度条件下,随着地表粗糙度的增加,流速的变化范围逐渐减小,其变化范围依次为 0.133~0.531 m/s,0.129~0.409 m/s,0.058~0.365 m/s, 0.037~0.271 m/s,0.022~0.231 m/s。在不同地表粗糙度条件下,随着单宽流量的增大,坡面流平均流速逐渐增大,其变化幅度依次为 26%~57%,30%~46%,39%~61%,52%~67%,47%~100%。在不同地表粗糙度条件下,随着坡度的增大,坡面流平均流速逐渐增大,其变化幅度依次为 10%~15%,7%~19%,8%~23%,15%~29%,14%~18%。

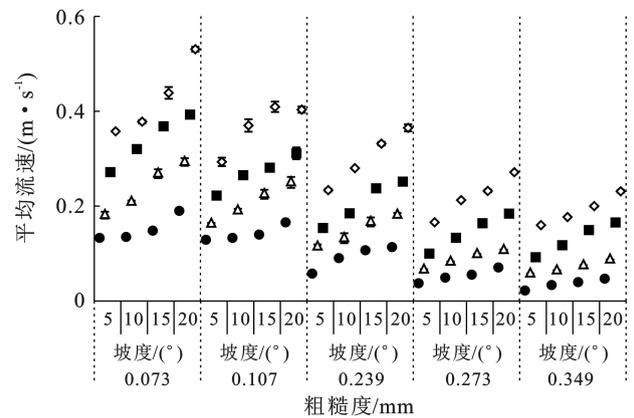


图 2 不同地表粗糙度下坡面流平均流速变化

Fig.2 Changes of mean flow velocity of overland flow under different surface roughness

2.3 坡面流流态变化规律

在不同单宽流量和坡度条件下,随着地表粗糙度的增加,雷诺数的变化范围逐渐缩小,其变化依次为 126~1 069,63~1 155,128~1 089,95~762,92~740。坡面流流态表现为层流和过渡流。当单宽流量小于 $4.44 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m})$ 时所有坡度和地表粗糙度条件下均表现为层流。在不同地表粗糙度条件下,随着单宽流量的增大,坡面流雷诺数逐渐增大,其变化幅度依次为 97%~101%,98%~103%,99%~101%,99%~99%,99%~100%。在不同地表粗糙度条件下,随着坡度的增大,坡面流雷诺数的变化无明显规律(图 3)。

2.4 坡面流流型变化规律

在不同单宽流量和坡度条件下,5 个地表粗糙度分别对应的弗劳德数范围分别为 1.5~4.1,1.4~2.8,0.8~2.4,0.2~1.5,0.1~1.2。随着地表粗糙度的增加,弗劳德数的变化范围逐渐缩小,坡面流流型逐渐从急流向缓流发展。在地表粗糙度小于 0.107 mm 时的坡面流流型均为急流。当地表粗糙度大于 0.107 mm 时的坡面流流型仅在较大单宽流量和坡度

条件下呈现为急流。在不同地表粗糙度条件下,随着单宽流量的增加,坡面流弗劳德数逐渐增大,其变化幅度依次为 0%~40%,5%~25%,16%~44%,31%~51%,24%~96%。在不同地表粗糙度条件下,随着坡度增大,坡面流弗劳德数逐渐增大,其变化幅度依次为 16%~28%,13%~27%,12%~38%,24%~47%,22%~29%(图 4)。

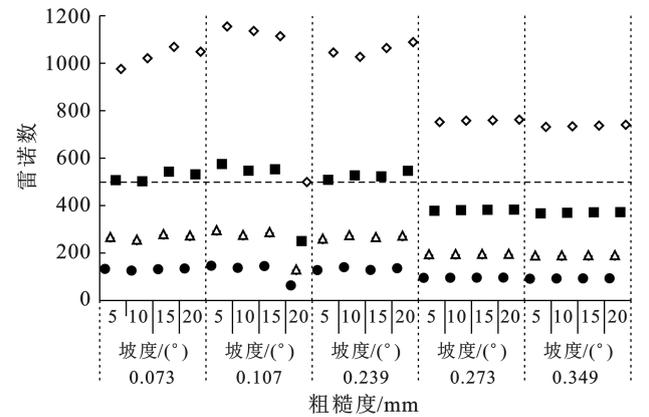


图 3 不同地表粗糙度下坡面流雷诺数变化

Fig.3 Changes of Reynolds number of overland flow under different surface roughness

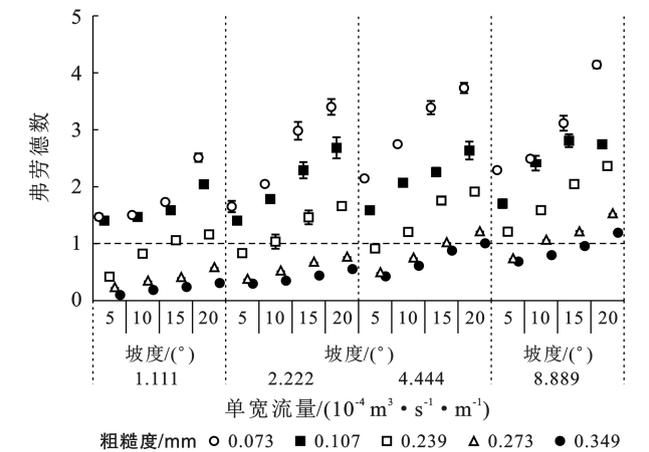


图 4 不同地表粗糙度下坡面流弗劳德数变化

Fig.4 Changes of Froude number of overland flow under different surface roughness

2.5 坡面流阻力系数变化规律

Darcy-Weisbach 阻力系数 f 反映出坡面流受到下垫面阻力的大小。由图 5 可以看出,在不同单宽流量和坡度条件下,随着地表粗糙度的增大,阻力系数的变化范围逐渐增大,阻力系数的变化范围依次为 0.13~0.69,0.24~0.82,0.46~3.94,1.17~14.30,1.43~68.86。在不同地表粗糙度条件下,随着单宽流量的增大,坡面流阻力系数逐渐减小,其变化幅度依次为 -48%~2%, -36%~-11%, -28%~-55%,

-59%~-46%, -78%~-40%。单宽流量越小,地表粗糙度的增大导致的阻力系数的上升趋势更明显。在不同地表粗糙度条件下,随着坡度的增大,坡面流阻力系数整体上呈下降趋势,其变化幅度依次为-22%~57%, -5%~35%, -25%~6%, -24%~-9%, -32%~-16%。

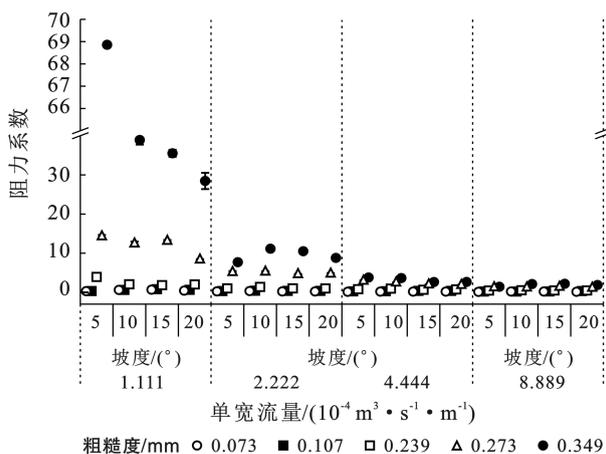


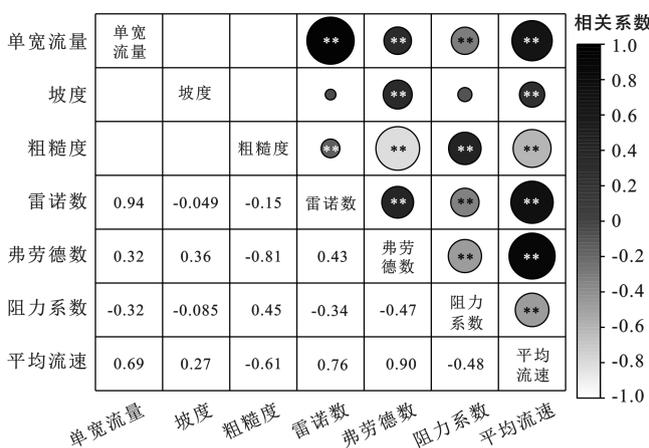
图 5 不同粗糙度下坡面流阻力系数变化
Fig.5 Changes of resistance coefficient of overland flow under different surface roughness

3 讨论

3.1 坡面流水动力学参数的影响因素

由图 6 相关性分析结果可知,坡面流平均流速与单宽流量和坡度均呈极显著正相关($p < 0.01$)。在不同地表粗糙度下,随着单宽流量的增大,坡面流平均流速的变化幅度为 26%~100%,平均流速随着坡度增大的幅度为 7%~29%。原因分别是单宽流量的增加导致单位宽度上水流的质量或能量增大,推动流速加快^[24];坡度的增加则使水流重力沿坡面分量增大^[25],促进流速增加。同时,坡面流平均流速与地表粗糙度呈极显著负相关($p < 0.01$),因为地表粗糙度的增加导致水流与地表的摩擦阻力增大,从而减缓流速,这与张旖璇等^[5]得出的结论一致。单宽流量的增加极显著促进了雷诺数增大,在不同地表粗糙度条件下,随着单宽流量的增大,雷诺数的变化幅度为 97%~103%。因为雷诺数反映了水流惯性力与黏性力的比值^[26],单宽流量的增加意味着水流惯性力的增大,导致雷诺数增加。地表粗糙度的增大提高了水流的阻力,使得水流趋于层流,导致雷诺数显著($p < 0.05$)降低,敬向锋等^[19]得出了相似结论。坡度与雷诺数无显著相关性($r = -0.049$),这与翟艳宾等^[27]得出的结论相似。随着地表粗糙度的增加,弗劳德数的变化范围逐渐缩小(1.5~4.1, 1.4~2.8, 0.8~2.4, 0.2~1.5, 0.1~1.2)。单宽流量和坡度的增加及地表粗糙

度的减少极显著促进弗劳德数增加,在不同地表粗糙度条件下,随着单宽流量的增加,坡面流弗劳德数的变化幅度为 0%~96%,随着坡度的增大,坡面流弗劳德数的变化幅度为 12%~47%。这是因为弗劳德数反映了水流的惯性力与重力之比,单宽流量和坡度的增加会增大水流的惯性力,而地表粗糙度的降低减小水流阻力,易于形成急流,使弗劳德数增大,这与施明新等^[11]的研究结果相符。单宽流量减少和地表粗糙度增加导致阻力系数的极显著增大,随着地表粗糙度的增大,阻力系数的变化范围逐渐增大(0.13~0.69, 0.24~0.82, 0.46~3.94, 1.17~14.30, 1.43~68.86)。在不同地表粗糙度条件下,随着单宽流量的增大,坡面流阻力系数的变化幅度为-78%~2%。随着坡度的增大,坡面流阻力系数的变化幅度为-32%~35%。因为阻力系数反映水流与地表之间的摩擦阻力大小^[18]。单宽流量减少意味着水流对地表冲刷力减小,而地表粗糙度的增加导致水流与地表的接触面积和摩擦阻力增大,阻力系数随之增加。坡度与阻力系数无显著相关性($r = -0.085$),这与敬向锋等^[19]得出的结论相似。因此,地表粗糙度的增大显著增加坡面流阻力系数,抑制雷诺数、弗劳德数和平均流速的增大。坡度增大使坡面流重力沿坡面的分量增加,导致弗劳德数和平均流速极显著增大,但与雷诺数和阻力系数的关系不显著。单宽流量增大导致水流惯性力增加,极显著促进雷诺数、弗劳德数和平均流速增大并降低阻力系数。



注: * 表示 $p \leq 0.05$; ** 表示 $p \leq 0.01$ 。

图 6 坡度、单宽流量、地表粗糙度与水动力学参数的相关性分析

Fig.6 Correlation analysis between slope, unit-width discharge, surface roughness and hydrodynamic parameters

3.2 坡面流平均流速的回归分析

基于公式(2),对 5 种不同地表粗糙度坡面的 240 组试验数据进行分析,拟合出 5 个回归方程(表 4)。

由表 4 可知, 决定系数的值在 0.97~0.99, 说明方程能够很好地表达流速、坡度、单宽流量之间的关系。K 值的范围在 3.13~8.28, 总体上随着坡面地表粗糙度的增加呈上升趋势, n 值在 0.39~0.65, m 值在 0.25~0.37, 其平均值与江忠善得出的 $n=0.50$, $m=0.35$ 相接近。随着地表粗糙度的增大, n 值表现出逐渐增大的趋势, 说明随着床面地表粗糙度的增加, 单宽流量对于流速的影响越大。在所有方程中 n 值均大于 m 值, 表明单宽流量对流速的影响相对于坡度来说更大。坡面地表粗糙度越大, 坡面流流速受坡度的影响更大, 这与张光辉等^[18]得出的结果一致。结合图 6 的相关性分析结果可知, 坡面流流速主要受单宽流量、坡度和地表粗糙度的影响。为进一步分析这些因素的影响程度, 将平均流速 (m/s) 与地表粗糙度 (m)、单宽流量 [$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$]、坡度 ($^\circ$) 进行多元回归分析, 结果详见表 5。

表 4 不同地表粗糙度下坡面流流速 (V) 与单宽流量 (q) 和坡度 (s) 的回归方程

Table 4 Regression equations between overland flow velocity (V), unit-width flow rate (q) and slope (s) under different surface roughness

地表粗糙度/mm	回归方程	决定系数 R^2	显著性 p
0.073	$V=4.02q^{0.42}s^{0.30}$	0.98	<0.01
0.107	$V=3.13q^{0.39}s^{0.25}$	0.98	<0.01
0.239	$V=4.38q^{0.50}s^{0.35}$	0.99	<0.01
0.273	$V=6.20q^{0.60}s^{0.37}$	0.99	<0.01
0.349	$V=8.28q^{0.65}s^{0.33}$	0.97	<0.01

表 5 坡面流流速与单宽流量 (q)、坡度 (s) 和地表粗糙度 (r) 的回归方程

Table 5 Regression equation of overland flow velocity (V) with unit-width flow rate (q), slope (s), and surface roughness (r)

回归方程	决定系数 R^2	显著性 p
$V=4.60 \times 10^{-2} q^{0.46} s^{0.30} r^{-0.50}$	0.92	<0.01
$V=9.50 \times 10^{-2} q^{0.46} r^{-0.50}$	0.85	<0.01
$V=9.00 \times 10^{-4} s^{0.31} r^{-0.53}$	0.44	<0.01
$V=5.40q^{0.52}s^{-0.31}$	0.57	<0.01
$V=0.20 \times 10^{-2} r^{-0.50}$	0.35	<0.01
$V=8.93q^{-0.481}$	0.48	<0.01
$V=0.09s^{-0.315}$	0.07	<0.05

由表 5 可知, 单宽流量对流速的影响最大, 其解释方差占 48.00%, 其次是地表粗糙度, 解释方差占 35.00%, 坡度对流速的影响最小, 其解释方差只有 7.00%。因此, 单宽流量是影响坡面流平均流速的主要因素, 其对于平均流速的影响大于地表粗糙度和坡

度的总和。这是因为流量的增大导致水深增大^[29], 地表粗糙度的增大造成的阻力的增加对坡面流平均流速的影响降低。因此, 相比于地表粗糙度, 单宽流量对平均流速的影响更大。而施明新等^[11]在较小流量范围内进行定床试验, 得出地表粗糙度为影响流速的主要因素, 流量次之, 坡度的影响极小的结论。这是因为在小流量和高坡度下的坡面流水深小^[29], 此时坡面流面临的阻力相对较大。张光辉等^[18]研究认为随着流量的增加, 坡度对平均流速的影响越大, 但整体而言, 坡面流平均流速主要由流量控制, 坡度的影响较小, 这与本文得出的结论相吻合。平均流速与地表粗糙度、坡度、单宽流量呈现出良好的幂函数关系, 回归方程的决定系数达到了 0.92, 说明单宽流量、坡度和地表粗糙度可以很好的表达流速, 这与张旖璇等^[5]通过室内定床冲刷试验得出的平均流速和流量、地表粗糙度、坡度的幂函数关系式相似。综上所述, 单宽流量的增大和坡度的减小通过增大坡面流水深和影响水流惯性力从而减弱了地表粗糙度的影响, 而坡度的影响小于单宽流量。因此, 单宽流量是坡面流平均流速的主要因素, 其次是地表粗糙度, 坡度的影响最小。平均流速可以被地表粗糙度、单宽流量和坡度 3 者以幂函数的形式良好地表达。

3.3 坡面流流态的回归分析

根据上文分析可知, 雷诺数主要受单宽流量和地表粗糙度影响。将雷诺数与单宽流量、地表粗糙度进行拟合, 可以得出:

$$Re = 1.79 \times 10^5 q^{0.99} r^{-0.20} \quad (R^2 = 0.96, p < 0.01) \quad (8)$$

公式(8)的决定系数较高, 说明方程可以很好地表达雷诺数与单宽流量、地表粗糙度之间的关系。将单宽流量和地表粗糙度分别与雷诺数进行回归分析, 得出其回归方程为:

$$Re = 1.01 \times 10^6 q^{0.99} \quad (R^2 = 0.92, p < 0.01) \quad (9)$$

$$Re = 77.40r^{-0.20} \quad (R^2 = 0.04, p > 0.05) \quad (10)$$

由公式(9)~(10)可知, 相比于地表粗糙度, 单宽流量对雷诺数的影响最大, 仅使用单宽流量也可以很好地表达雷诺数。这是因为雷诺数是水流流体惯性力和黏滞力的比, 流量的增加导致惯性力加大^[30], 且足以克服黏滞力对水流的抑制作用。地表粗糙度的加大会导致阻力系数的增加进而导致惯性力的减小^[30], 但地表粗糙度对雷诺数的影响并不明显, 这可能是流量增加的惯性力占主导地位。翟艳宾等^[27]得出流量和地表粗糙度对雷诺数的影响大于坡度。施明新等^[11]在进行定床试验后也得出类似结论, 即相比于地表粗糙度和坡度, 单宽流量为雷诺数的主要影响因素。综上所述, 单宽流量通过增加坡面流的惯性

力成为影响雷诺数的主要影响因素,单宽流量和雷诺数之间呈现出良好的幂函数关系。

3.4 坡面流流型的回归分析

由上文分析可知,弗劳德数受到单宽流量、坡度和地表粗糙度的极显著影响。将弗劳德数与单宽流量、坡度、地表粗糙度进行拟合得到关系式为:

$$Fr = 3.00 \times 10^{-3} q^{0.23} s^{0.46} r^{-0.78}, \quad (11)$$

$$(R^2 = 0.91, p < 0.01)$$

公式(11)的决定系数较高,可以很好地表达单宽流量、坡度、地表粗糙度与弗劳德数之间的关系。分别剔除单宽流量、坡度、地表粗糙度后发现决定系数相对于公式(11)分别下降了 14.09%, 17.07% 和 72.80%, 说明地表粗糙度对弗劳德数的变化起着主要作用,单宽流量和坡度对弗劳德数的影响较小,且坡度对弗劳德数影响大于单宽流量。这是因为弗劳德数反映了水流的惯性力和重力之比,地表粗糙度的减小和单宽流量的增大会增加水流的惯性力^[5],坡度的增加会提高水流沿坡面的重力分量^[25]。本试验中的结果显示地表粗糙度的影响大于单宽流量和坡度,这可能是因为地表粗糙度对水流惯性力的影响占主导地位,这与施明新等^[28]的结论相一致。余冰等^[30]通过定床试验得出,相比于单宽流量,坡度对弗劳德数的影响更大,在等流量和等坡度情况下,随着坡面糙度的增加,坡面流弗劳德数在不断减小,这与本文得出的结论一致。综上所述,地表粗糙度通过增大坡面流阻力减小了水流惯性力,这种减弱作用大于单宽流量和坡度的增加对水流惯性力的增强。因此地表粗糙度成为影响弗劳德数的主要因素,而单宽流量和坡度的影响相对较小,且坡度对弗劳德数的影响略大于单宽流量。单宽流量、坡度和地表粗糙度可以以幂函数的形式很好地表达弗劳德数。

3.5 坡面流阻力系数的回归分析

根据上文分析可知,阻力系数受地表粗糙度和单宽流量的极显著影响。将阻力系数与单宽流量、地表粗糙度进行拟合得出:

$$f = -4.424q^{-1.80}r^{-1.19 \times 10^{-3}}, \quad (12)$$

$$(R^2 = 0.541, p < 0.01)$$

分别将单宽流量和地表粗糙度项剔除后,方程的决定系数相较于公式(12)下降了 65.1% 和 48.4%。说明地表粗糙度对阻力系数的影响最大,其次是单宽流量,坡度对阻力系数的影响极小。这是因为阻力系数反映了下垫面对流动水体的阻力大小,阻力系数越大,水流克服阻力所消耗的能量越多^[18]。而坡面地表粗糙度和糙率系数是反映下垫面状况的常用指标^[19]。因此地表粗糙度的变化对阻力系数有显著影

响。流速与阻力系数的平方成反比,而流速的变化主要受流量控制,因此流量的变化必然导致阻力系数的变化^[27]。施明新^[28]发现,在试验流量和坡度均对阻力系数的影响较小,这是由于试验设置的流量处于较小范围且间隔紧密,导致阻力系数随流量变化的趋势不明显。杨锦^[29]和张光辉等^[18]研究指出,相较于坡度,阻力系数主要受流量控制,这与本文研究一致。因此,地表粗糙度的增加通过增强坡面流阻力,增大了水流克服阻力所需能量,成为决定阻力系数的主要因素。单宽流量通过改变坡面流流速间接影响阻力系数,但单宽流量增加对流速的提升作用小于地表粗糙度的增加对流速的抑制作用,故地表粗糙度对阻力系数的影响大于单宽流量。阻力系数与单宽流量和地表粗糙度间可建立良好的幂函数关系。

4 结论

通过模拟不同地表粗糙度红壤坡面进行冲刷试验,探究了红壤坡面在片蚀阶段坡度、单宽流量、地表粗糙度与坡面流平均流速、雷诺数、弗劳德数及阻力系数之间的关系。在本试验条件下,所有处理组合坡面的水流流态为层流和过渡流,流型以急流为主。在不同地表粗糙度下,坡面流平均流速、雷诺数、弗劳德数和阻力系数的变化范围依次为 0.022~0.531 m/s, 63~1 155, 0.1~4.1, 0.13~68.86。根据试验结果,可以得到如下结论。

(1) 地表粗糙度的减小和坡度及单宽流量的增加极显著促进了平均流速的增大。地表粗糙度的增加会增强单宽流量和坡度对平均流速的影响。单宽流量的增大和坡度的减小通过增大坡面流水深和影响水流惯性力从而减弱地表粗糙度的影响,单宽流量对平均流速的影响大于地表粗糙度,坡度的影响较小。不同地表粗糙度下的坡面流平均流速可以与坡度、单宽流量、地表粗糙度建立良好的幂函数关系式。

(2) 地表粗糙度的减小和单宽流量的增加显著促进了雷诺数的增加。单宽流量通过作用水流惯性力成为影响雷诺数的主要因素,坡度与雷诺数的关系不显著。雷诺数可以被单宽流量和地表粗糙度以幂函数的形式表达。

(3) 地表粗糙度的减少和单宽流量及坡度的增大极显著促进了弗劳德数的增加。地表粗糙度增大坡面流阻力,减小水流惯性力影响,对弗劳德数起主要作用。坡度和单宽流量的影响较小。弗劳德数可以用地表粗糙度、坡度和单宽流量以幂函数的形式良好地表达。

(4) 地表粗糙度的增大和单宽流量的减少极显

著促进了阻力系数的增加。地表粗糙度对阻力系数的影响大于单宽流量,坡度对阻力系数的影响不显著。阻力系数可以很好地用地表粗糙度和单宽流量以幂函数形式进行表达。

参考文献 (References)

- [1] 王祥,陈炜,黄国鲜,等.长江上游典型丘陵山区坡耕地径流及氮磷碳流失特征[J].环境工程技术学报,2024,14(5):1589-1598.
Wang Xiang, Chen Wei, Huang Guoxian, et al. Characteristics of runoff and nitrogen, phosphorus, and carbon loss in sloping cultivated lands in the typical hilly mountainous region of the Upper Yangtze River basin [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024,14(5):1589-1598.
- [2] 卢富运,余方潜,陈杨,等.盐热联合示踪表征薄层水流剖面流速分布[J].农业工程学报,2023,39(23):85-93.
Lu Fuyun, Yu Fangqian, Chen Yang, et al. Combined tracing of salt and heat to characterize velocity profile of sheet flow [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023,39(23):85-93.
- [3] 谷方正,张会兰,王铃涵,等.基于 PIV 的渐变地表粗糙度对坡面流水动力特性的影响[J].水土保持学报,2023,37(6):18-24.
Gu Fangzheng, Zhang Huilan, Wang Linghan, et al. The influence of gradient surface roughness on the hydrodynamic characteristics of overland flow based on PIV [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(6):18-24.
- [4] 王静雯.坡面流水动力学特性及增阻机制[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2020.
Wang Jingwen. Hydrodynamic Characteristics of overland flow and its increasing resistance mechanisms [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2020.
- [5] 张漪璇,马岚,薛梦华,等.不同地表粗糙度坡面流体力学特性试验研究[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2023,51(6):1-10.
Zhang Yixuan, Ma Lan, Xue Menghua, et al. Experimental study on hydraulic characteristics of overland flow under different surface roughness [J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2023,51(6):1-10.
- [6] 张宝琦,王兵,许欢欢,等.黄土高原不同降雨强度下生物土壤结皮对坡面流水动力参数的影响[J].水土保持研究,2024,31(3):128-134.
Zhang Baoqi, Wang Bing, Xu Huanhuan, et al. Effects of biological soil crust on dynamic parameters of slope flow under different rainfall intensities in the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(3):128-134.
- [7] 王伟,余方潜,卢富运,等.基于热传递过程的薄层水流流速测量方法及装置[J].水土保持学报,2023,37(6):97-103.
Wang Wei, Yu Fangqian, Lu Fuyun, et al. A method and instrument for measurement of sheet flow velocity based on the heat transport processes [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(6):97-103.
- [8] 梁志权,卓慕宁,郭太龙,等.不同雨强及坡度下坡面流的水动力特性[J].生态环境学报,2015,24(4):638-642.
Liang Zhiquan, Zhuo Muning, Guo Tailong, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on hydrodynamic characteristics of overland flow [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015,24(4):638-642.
- [9] Giménez R, Govers G. Interaction between bed roughness and flow hydraulics in eroding rills [J]. Water Resources Research, 2001,37(3):791-799.
- [10] 郑良勇,李占斌,李鹏.黄土区陡坡径流水动力学特性试验研究[J].水利学报,2004,35(5):46-51.
Zheng Liangyong, Li Zhanbin, Li Peng. Experimental study on hydraulic characteristics of runoff on steep slope in loess area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004,35(5):46-51.
- [11] 施明新.地表粗糙度对坡面流水力特性的影响研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.
Shi Mingxin. Influence of surface roughness on hydraulic characteristics of overland flow [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2015.
- [12] 刘洋,孙保平,杨坪坪,等.模拟植被地表覆盖率与地表粗糙度对坡面流流速的影响[J].浙江农业学报,2017,29(3):498-505.
Liu Yang, Sun Baoping, Yang Pingping, et al. Effect of simulated vegetation coverage and surface roughness on overland flow velocity [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2017,29(3):498-505.
- [13] Abrahams A D, Li Gang, Parsons A J. Rill hydraulics on a semiarid hillslope, southern Arizona [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1996,21(1):35-47.
- [14] 梁音,杨轩,潘贤章,等.南方红壤丘陵区水土流失特点及防治对策[J].中国水土保持,2008(12):50-53.
Liang Yin, Yang Xuan, Pan Xianzhang, et al. Characteristics of soil and water loss and countermeasures for prevention and control of hilly red soil region in south [J]. Soil and Water Conservation in China, 2008(12):50-53.
- [15] 王玉朝.红壤侵蚀特征与环境因子的关系[J].云南地理环境研究,2013,25(1):30-35.
Wang Yuchao. Relationship between the environmental factors and erosion characteristics of red soil [J].

- Yunnan Geographic Environment Research, 2013, 25 (1):30-35.
- [16] 李芦頔, 吴冰, 李鑫璐, 等. 土壤侵蚀中的片蚀研究综述 [J]. 地球科学进展, 2021, 36(7):712-726.
Li Ludi, Wu Bing, Li Xinlu, et al. Sheet erosion study in soil erosion: A review [J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(7):712-726.
- [17] 范贤超. 绥江中低产田地资源评价 [J]. 农村实用技术, 2020(2):77-79.
Fan Xianchao. Evaluation of low and medium yield farmland resources in Suijiang [J]. Rural Practical Technology, 2020(2):77-79.
- [18] 张光辉. 坡面薄层流水动力学特性的实验研究 [J]. 水科学进展, 2002, 13(2):159-165.
Zhang Guanghui. Study on hydraulic properties of shallow flow [J]. Advances in Water Science, 2002, 13(2):159-165.
- [19] 敬向锋, 吕宏兴, 张宽地, 等. 不同糙率坡面水力学特征的试验研究 [J]. 水土保持通报, 2007, 27(2):33-38.
Jing Xiangfeng, Lu Hongxing, Zhang Kuandi, et al. Experimental study of overland flow hydromechanics under different degrees of roughness [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(2):33-38.
- [20] 胡世雄, 靳长兴. 坡面流与坡面侵蚀动力过程研究的最新进展 [J]. 地理研究, 1998, 17(3):103-110.
Hu Shixiong, Jin Changxing. The recent development of the study on overland flow and hillslope processes [J]. Geographical Research, 1998, 17(3):103-110.
- [21] 查轩, 黄少燕, 陈世发. 退化红壤地土壤侵蚀与坡度坡向的关系: 基于 GIS 的研究 [J]. 自然灾害学报, 2010, 19(2):32-39.
Zha Xuan, Huang Shaoyan, Chen Shifa. Relationship between erosion of degenerated red soil and terrain slope/aspect: A GIS-based research [J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19(2):32-39.
- [22] Zhuang Xiaohui, Wang Wei, Ma Yuying, et al. Spatial distribution of sheet flow velocity along slope under simulated rainfall conditions [J]. Geoderma, 2018, 321:1-7.
- [23] 江忠善, 宋文经. 坡面流速的试验研究 [J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1988(1):46-52.
Jiang Zhongshan, Song Wenjing. An experimental study on the velocity of slope flow [J]. Memoir of Northwestern Institute of Soil and Water Conservation Academia Sinica, 1988(1):46-52.
- [24] 曾荣昌, 张玉启, 何丙辉, 等. 喀斯特槽谷区不同岩石与坡面夹角下集中流侵蚀水动力学特征 [J]. 土壤学报, 2023, 60(3):762-775.
Zeng Rongchang, Zhang Yuqi, He Binghui, et al. Hydrodynamic characteristics of concentrated flow under different angles between rock and slope in the karst trough valley area [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(3):762-775.
- [25] 龚正威. 坡面薄层水沙两相流水力特性研究 [D]. 甘肃兰州: 兰州交通大学, 2022.
Gong Zhengwei. Study on the flow characteristics of the two phases of overland flow [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou Jiaotong University, 2022.
- [26] Polyakov V O, Nearing M A. Sediment transport in rill flow under deposition and detachment conditions [J]. Catena, 2003, 51(1):33-43.
- [27] 翟艳宾, 吴发启, 王健, 等. 不同人工糙率床面水力学特性的试验研究 [J]. 水土保持通报, 2012, 32(6):38-42.
Zhai Yanbin, Wu Faqi, Wang Jian, et al. Hydraulic characteristics of artificial surfaces with different roughness [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(6):38-42.
- [28] 施明新, 吴发启, 田国成, 等. 地表粗糙度对坡面流水动力学参数的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(7):83-87.
Shi Mingxin, Wu Faqi, Tian Guocheng, et al. Influence of surface roughness on hydrodynamic parameter of overland flow [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(7):83-87.
- [29] 杨锦, 吕宏兴, 上官周平. 薄层水流水力特性试验研究 [J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(4):58-60.
Yang Jin, Lv Hongxing, Shangguan Zhouping. Experiment study on hydraulic properties of overland flow [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(4):58-60.
- [30] 余冰, 王军光, 蔡崇法, 等. 不同模拟糙率定床坡面集中水流水力学特性研究 [J]. 水土保持学报, 2015, 29(2):50-54.
Yu Bing, Wang Junguang, Cai Chongfa, et al. Study on hydraulic properties of concentrated flow under different artificial surface roughness [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(2):50-54.