

连续降雨条件下晋西黄绵土坡面径流路径及微地形变化

陈红,付兴涛

(太原理工大学水利科学与工程学院,太原 030024)

摘要: [目的] 为阐明连续降雨条件下坡面径流路径与微地形变化特征及其对侵蚀产沙的影响。[方法] 以具有典型代表性的晋西黄绵土坡面为研究对象,开展室内人工模拟降雨试验,降雨强度为 30、60、90 mm/h,坡长 3 m,宽 1 m,坡度 15°。[结果] 坡面产流速率随着雨强的增大由 144.84 mL/(min·m²)增至 978.02 mL/(min·m²),并且随降雨场次的增加增速加快,达到稳定的时间由 24 min 减小到 15 min。产沙方面,不同降雨强度下产沙速率的变化趋势呈显著差异,30 mm/h 的雨强下,场降雨平均产沙速率由最初的 0.08 g/(min·m²)随产流历时延长逐渐增加后趋于稳定为 0.13~0.42 g/(min·m²);而在 60、90 mm/h 雨强下,场降雨平均产沙速率随产流历时分别由 2.02、2.76 g/(min·m²)逐渐减少,后分别稳定在 0.55~0.99、0.50~0.83 g/(min·m²)。30 mm/h 条件下,坡面径流路径分布相对随机,而在 90 mm/h 条件下的第 4 场降雨后,形成 1 条长 4.45 m 的主要流路,并贯穿整个坡面,径流连通程度增加,流路稳定发展。地表粗糙度、切割度的值由坡面上部至下部依次增大,并且随着降雨强度的增加,高值区面积占比由 33.09%、18.74% 增至 53.63%、30.80%。[结论] 研究结果为连续降雨条件下晋西黄绵土坡面径流连通过程及微地形变化的深入理解及水土流失治理提供科学依据。

关键词: 黄绵土坡面; 连续降雨; 径流路径; 地表微地形; 土壤侵蚀

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)03-0078-10

Changes in Runoff Paths and Micro-topography on Loessial Soil Slope in Western Shanxi Province under Continuous Rainfall Conditions

CHEN Hong, FU Xingtao

(College of Water Resource Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to elucidate the characteristics of slope runoff paths and micro-topography changes under continuous rainfall conditions, as well as their impact on erosion and sediment yield. [Methods] Indoor artificial simulated rainfall experiments were conducted on typical loessial soil slopes in western Shanxi Province, with rainfall intensities of 30, 60 and 90 mm/h, a slope length of 3 m, width of 1 m, and gradient of 15°. [Results] The runoff generation rate increased from 144.84 mL/(min·m²) to 978.02 mL/(min·m²) with the increase of rainfall intensity, and the time to reach stability decreased from 24 min to 15 min as rainfall events increased. In terms of sediment yield, there were significant differences in the variation trend of sediment yield rate under different rainfall intensities. Under the rainfall intensity of 30 mm/h, the average sediment yield rate increased gradually from the initial 0.08 g/(min·m²) with the extension of runoff duration and then tended to be stable (0.13—0.42 g/(min·m²)). In contrast, under the rainfall intensity of 60 and 90 mm/h, the average sediment yield rate decreased gradually from 2.02 g/(min·m²) to 2.76 g/(min·m²), and then stabilized at 0.55—0.99 g/(min·m²) and 0.50—0.83 g/(min·m²). Under 30 mm/h rainfall, the distribution of runoff paths on the slope was relatively random. After the fourth rainfall event at 90 mm/h, a main flow path with a length of 4.45 m formed and extended through the entire slope. The

收稿日期: 2024-11-18

修回日期: 2025-02-19

录用日期: 2025-03-01

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-04-18

资助项目: 国家自然科学基金项目(51309173)

第一作者: 陈红(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文与水资源研究。E-mail: chen hong0526@link.tyut.edu.cn

通信作者: 付兴涛(1982—), 女, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持、水资源利用与保护研究。E-mail: fuxingtao@tyut.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

degree of runoff connectivity increased, and the flow paths developed steadily. The values of surface roughness and cutting degree increased from the upper to the lower part of the slope, and the proportion of high-value areas increased from 33.09% and 18.74% to 53.63% and 30.80%, respectively, as rainfall intensity increased. [Conclusion] The results provide a scientific basis for a deeper understanding of the runoff connectivity process and micro-topography changes on loessial soil slope surface in western Shanxi Province under continuous rainfall conditions, as well as for soil erosion control.

Keywords: loessial soil slope surface; continuous rainfall; runoff paths; surface microtopography; soil erosion

Received: 2024-11-18

Revised: 2025-02-19

Accepted: 2025-03-01

Online(www.cnki.net): 2024-04-18

坡面侵蚀是自然界中普遍存在的现象,受植被、降雨、土壤、坡面形态、人类活动等多个因素的影响,是一个高度非线性动态过程^[1]。降雨是影响土壤侵蚀量的重要因子^[2],在连续降雨的条件下,地表微地形不断变化,其侵蚀产沙过程变得尤为复杂,研究者们^[3-5]通过高精度的地形测量技术,如三维激光扫描,对降雨前后的地表微地形进行详细的对比分析,结果显示,连续降雨导致地表土壤含水量的显著增加,进而改变土壤的抗蚀性和渗透性^[6],直接影响径流的生成和流动路径,使得原本稳定的水流变得更为动荡,径流路径也因此发生偏移或扩展^[7]。有学者^[8]证明径流路径与细沟侵蚀的相似性,在降雨作用下,径流路径的密度与频率逐渐增加。降雨加速地表微地形的演化,一方面,雨滴击溅导致表层土粒分散^[9];另一方面,径流带走大量表面土粒,部分泥沙在流动过程中沉积于坡面,导致地表微地形不断变化,又进一步影响径流的流动模式和速度,进而影响产流产沙量^[10]。地表微地形的变化过程与产流产沙过程相互作用,互为因果并不断发展变化^[3]。

综上可知,地表微地形对地表径流的产生、土壤渗透性、径流路径连通性和土壤侵蚀过程具有重要影响^[11-14]。不同土壤类型水蚀引起的表面微地形变化模式不同,坡面径流路径网络随着地表径流的冲刷不断发育^[15]。而关于晋西黄绵土坡面的研究^[16-17]多关注于坡面径流及输沙特征及降雨对径流量、输沙率等宏观指标的影响,而对径流路径和地表微地形的研究相对较少,尤其是连续降雨条件下径流路径的动态变化过程。因此,本研究以具有典型代表性的吕梁市离石区王家沟流域的野外黄绵土坡面为研究对象,分析连续降雨条件下产流产沙速率变化过程,阐明坡面径流路径及连通演变特征,并揭示其对地表微地形变化的影响,以期研究区土壤侵蚀预防治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

王家沟流域(图1)是黄河一级支流三川河左岸的1条支沟,位于山西省吕梁市离石区(37°33'N, 110°09'E),属于典型的暖温带大陆性季风气候区,年平均气温约8.9℃,年平均降水量约490.3 mm,年内降水分配不均,大多集中在7—9月,多短持续时间、大强度的雨水,极易形成水土流失,实测多年平均输沙模数为7 651 t/(a·km²)。研究区土壤为典型的离石黄土母质上发育的黄绵土,在耕作条件下,因侵蚀较强,耕作土层比较薄,在15 cm左右,土壤松散、软绵,无层理,颜色浅淡,富含碳酸钙,剖面发育不明显,易受土壤侵蚀,陡坡地侵蚀更为强烈,透水性和可耕性良好,抗冲刷性弱,尤其是裸坡地,易受水蚀和风蚀。

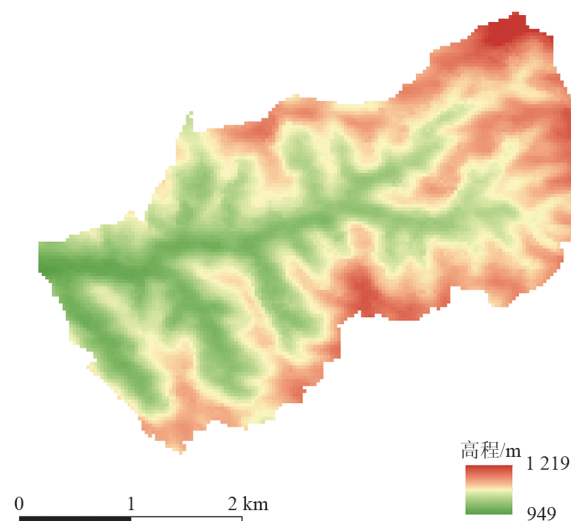


图1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

1.2 试验设计

1.2.1 径流槽装填 本试验以晋西黄绵土为供试土壤,采集于山西省吕梁市离石区王家沟流域野外坡面。按照原状土壤顺序从上至下每隔10 cm取1层土,共计取5层,装袋运回,风干后过筛,去除植物根系等

杂质。试验土槽为液压变坡式钢槽,规格为 $3.0\text{ m} \times 1.0\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 。为保证试验土槽近似模拟天然状态下的排水性,土槽底部均匀铺设 5 cm 厚的细沙,并铺上透水纱布。为保证装填土壤的均匀性,按照原状土的顺序分为 5 层装填,每层厚 9 cm 。装填步骤为:在开始装填前,使用钢尺在径流槽槽壁测量分层高度并用记号笔画出分层标记,确保每层土壤的厚度达到预定的 9 cm ;用铲子将土壤均匀铺展在每层标记内,避免局部过厚或过薄,然后对其进行夯实,直至土层厚度达到标注线;每铺完一层土壤后,检查其厚度是否均匀,及时调整不符合要求的区域,并把松土面,使上下层土壤充分接触防止滑动。土槽装填完毕后静置并定期洒水,使土壤沉降,直至槽中表层土壤的体积质量(1.27 g/cm^3)与野外表层土壤的体积质量(1.30 g/cm^3)近似一致。

1.2.2 试验过程 人工模拟降雨试验于太原理工大学人工模拟降雨厅进行,降雨监测系统选择由西安清远测控技术有限公司研制的 QYJY-501(502)便携式全自动不锈钢模拟降雨器,降雨之前对降雨强度进行标定^[17],标定方法为:测量桶口直径及 15 min 内小桶内的实测雨量,根据公式计算实测平均降雨强度及降雨均匀度,将其与通过控制器设置的雨强进行比较以标定雨强,直至降雨的均匀系数在 85% 以上,从而使降雨均匀度和雨滴分布均能满足试验要求。平均降雨强度及降雨均匀度的计算公式为:

$$\overline{\text{RI}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{A \times T} \quad (1)$$

$$\text{CU} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \overline{\text{RI}})}{n \overline{\text{RI}}} \quad (2)$$

式中: $\overline{\text{RI}}$ 为平均降雨强度, mm/h ; P_i 为第 i 个实测雨量, mL ; A 为桶口面积, cm^2 ; T 为降雨时间, min ; CU 为降雨均匀度, $\%$; R_i 为第 i 个降雨强度, mm/h 。

根据王家沟流域野外坡地特点及长序列降雨径流监测数据,研究区降雨强度主要集中在 $60 \sim 90\text{ mm/h}$,最大降雨强度为 90.30 mm/h ,因此,试验设计坡度为 15° ,降雨强度为 30 、 60 、 90 mm/h 。每个降雨强度连续降雨 7 场次,从 $30 \sim 90\text{ mm/h}$ 雨强依次完成有效降雨 21 场次。

为控制土壤前期水分体积分数相似,在每场模拟降雨开展前,在各坡面不同位置处用铝盒取土样,上、中、下各坡段均取 2 个土样,测定前期土壤水分体积分数。开始降雨后,记录坡面产流开始时间,随后,在汇流出口处每隔 3 min 收集 1 组水样,降雨在产流开始后持续 60 min 。黄绵土坡面的降雨隔 24 h 进行 1 次,每次降雨后,测每个桶中浑水的体积,即每 3

min 的产流量,其和为该场降雨的坡面产流量。静置水样,直至浑水中的泥沙全部沉淀,倒去上层清液,将泥沙移到铝盒,放入烘箱内烘干后称其质量,即产流后每 3 min 的坡面产沙量,其和为该场降雨的坡面产沙量。

第 1 场降雨前拍摄照片,之后每场降雨结束后,至径流槽内不再有径流流出时,用尼康 D5100 型单反相机在固定点位拍摄坡面照片,共计进行 21 场降雨,拍摄 22 张照片,最后采用摄影测量技术获取地表高程初始数据。该设备具有多种拍摄模式及高分辨率传感器,可以保证图形的清晰度及细节,满足试验需求。

1.3 地表微地形表征

地表粗糙度(R)是反映地表起伏和侵蚀程度的指标,从水力侵蚀的角度来看,由于地形的高低起伏,水流沿运动方向受到的阻力增大,使得速度减小,从而影响土壤侵蚀的程度^[15]。采用 ArcGIS 中栅格计算器进行计算^[18],计算公式为:

$$R = 1 / \cos(S \times \pi / 180) \quad (3)$$

式中: R 为地表粗糙度,无量纲; S 为所提取坡度, $(^\circ)$ 。

地表切割深度(SI)指坡面一定区域中平均高程值与最小高程值的差,可以衡量地面受到侵蚀和破坏的程度,对于揭示地面侵蚀的演变过程具有关键的评估价值,可采用 ArcGIS 中邻域分析工具进行提取^[18]。

$$\text{SI} = H_{\text{mean}} - H_{\text{min}} \quad (4)$$

式中: SI 为地表切割深度, mm ; H_{mean} 为单位面积内平均高程, mm ; H_{min} 为单位面积内最小高程, mm 。

1.4 数据分析

将每场降雨中流出试验土槽的流量作为地表产流量,径流中挟带的泥沙作为产沙量,对其进行描述性统计分析,绘制产流产沙速率随产流历时的变化曲线。将拍摄的照片导入 ArcMap 10.8 软件,进行校正生成点云数据,将点云转换为不规则三角网(TIN)模型,最后转换为栅格 DEM,在此基础上绘制坡面径流路径图,粗糙度、切割度的坡面分布图,导出高程数据,用 Origin 2021b 软件绘制粗糙度、切割度的小提琴统计图。

2 结果与分析

2.1 连续降雨条件下坡面初始产流时间变化过程

初始产流时间反映坡面产流前土壤的物理状况^[19]。较短的产流时间意味着土壤吸收能力有限,更容易发生径流和土壤侵蚀。由表 1 可知,整体而言,初始产流时间随降雨强度的增加呈减小趋势,随降雨场次的增加呈减小趋势。从降雨强度来看,在

30 mm/h的降雨强度下,初始产流时间相对较长,从100~119 s不等。在60 mm/h的降雨强度下,初始产流时间明显缩短,为52~58 s。在上述雨强条件下,雨滴动能主要消耗于土壤孔隙填充与表层浸润,坡面产流时间相对延迟^[20]。雨强增至90 mm/h,初始产流时间缩短为38~55 s。降雨强度增加,导致雨滴打击力度增强,土壤表层结构逐渐紧实,入渗速率下降,坡面产流时间提前。从连续降雨场次来看,随着降雨场次增加,微地形经侵蚀发生改变,坡面径流路径的连通性增加,初始产流时间逐渐提前,为土壤侵蚀创造更有利的水动力条件,加速土壤颗粒剥离搬运,不断重塑坡面微地形与侵蚀格局。

表1 连续降雨条件下初始产流时间变化趋势

Table 1 Trend of initial runoff generation time under continuous rainfall conditions

降雨场次	初始产流时间/s		
	30 mm/h	60 mm/h	90 mm/h
1	119	63	53
2	113	52	44
3	115	58	40
4	107	52	47
5	112	56	55
6	105	52	47
7	100	52	38

2.2 连续降雨条件下坡面产流产沙率变化过程

图2为连续降雨情况下雨强由30 mm/h增大到90 mm/h产流速率随时间的变化(R1~R7为连续降

雨7场)。为保证每场降雨前土壤前期水分体积分数一致,在首场降雨开始前24 h进行预降雨,之后间隔相同时间进行下一场降雨,并且在每场降雨开始之前在坡面取样,通过烘干法测量水分体积分数,每2场降雨后坡面水分体积分数的差值均在1%以内,故不对结果产生影响。结果显示,整体而言,连续降雨条件下,产流速率随着降雨强度的增加而增大,30、60、90 mm/h雨强下平均次降雨产流速率分别为144.84、493.69、978.02 mL/(min·m²)。其中,雨强为30 mm/h时(图2a),产流速率随着降雨场次的增多而增大,且曲线的斜率增大,说明降雨形成径流的时间在缩短。产流后24 min内,平均产流速率为357.57 mL/min,产流速率增加较快,增速为3.17 mL/(min²·m²);产流第24~48 min,产流速率增速变缓,平均增速0.86 mL/(min·m²),产流第48~60 min,产流速率呈稳定趋势。当降雨强度增大到60 mm/h时(图2b),产流后18 min内,平均产流速率为1 344.93 mL/min,产流速率增加较快,增速为6.10 mL/(min²·m²),之后R1~R7的产流速率稳定在480~540 mL/(min·m²)。降雨强度增大到90 mm/h时(图2c),产流后15 min内,平均产流速率为2 770.29 mL/min,产流速率增加较快,增速为10.90 mL/(min²·m²),15 min后,R1~R7的产流速率稳定在950~1 040 mL/(min·m²)。综上,各雨强条件下,产流速率随着产流历时的增加呈快速上升然后稳定在一定范围内的变化趋势,且随着雨强的增加,产流速率稳定的时间提前。

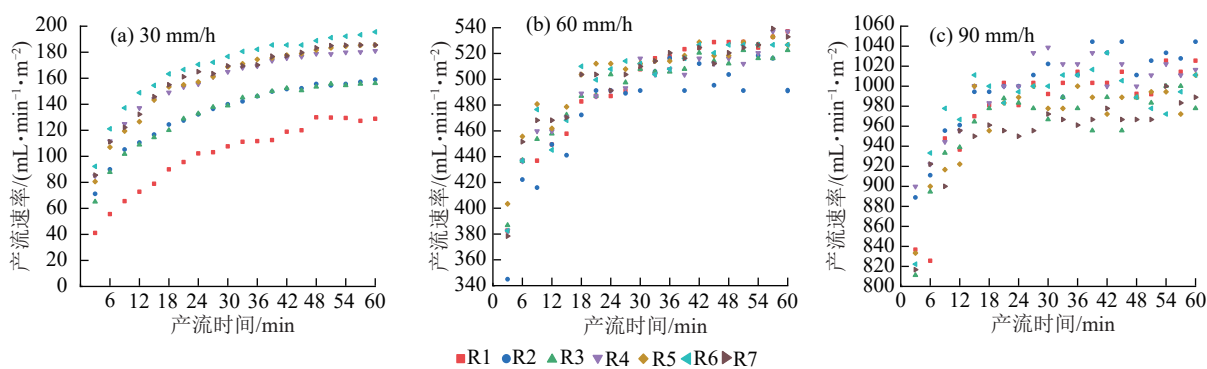


图2 坡面产流特征

Fig. 2 Characteristics of runoff production on slope surface

图3为连续降雨情况下雨强由30 mm/h增大到90 mm/h产沙速率随时间的变化特征,结果显示,雨强由30 mm/h增加至60 mm/h时,产沙速率明显增加,由60 mm/h增加至90 mm/h时,产沙速率整体变化不大,平均次降雨产沙速率分别为0.221、0.994、0.916 g/(min·m²)。雨强为30 mm/h时(图3a),产沙速率随产流历时呈逐步增大然后趋于波

动稳定趋势,随着降雨场次的连续,产沙速率逐渐减小,整体稳定在0.13~0.42 g/(min·m²)。R1场次降雨的产沙速率在产流15 min达到最高值0.42 g/(min·m²),之后波动稳定在0.39 g/(min·m²);R3场次降雨的产沙速率在0~24 min逐渐增大,24~33 min呈短暂减小趋势,之后增加,稳定在0.24 g/(min·m²);其他场次降雨在第9 min达到最

高值,之后略有减小,18 min后趋于稳定。降雨强度增加到 60、90 mm/h 时,产沙速率随产流历时逐渐减小然后趋于稳定。雨强为 60 mm/h 时(图 3b),产流后 12 min 内,平均产沙速率为 $1.48 \text{ g}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$,产沙速率减少较快,减速为 $-0.12 \text{ g}/(\text{min}^2 \cdot \text{m}^2)$,之

后的产沙速率稳定在 $0.55 \sim 1.20 \text{ g}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$;雨强为 90 mm/h 时(图 3c),产流后 15 min 内,平均产沙速率为 $1.61 \text{ g}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$,产沙速率减少较快,减速为 $-0.13 \text{ g}/(\text{min}^2 \cdot \text{m}^2)$,之后的产沙速率稳定在 $0.5 \sim 0.80 \text{ g}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 。

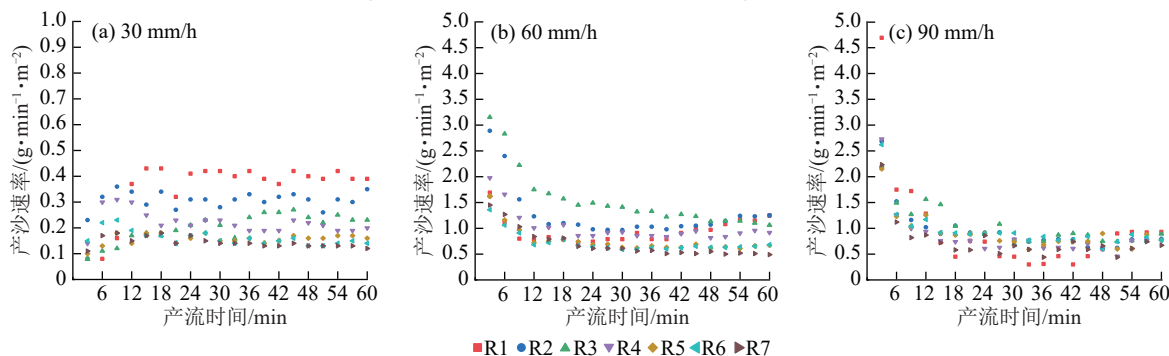


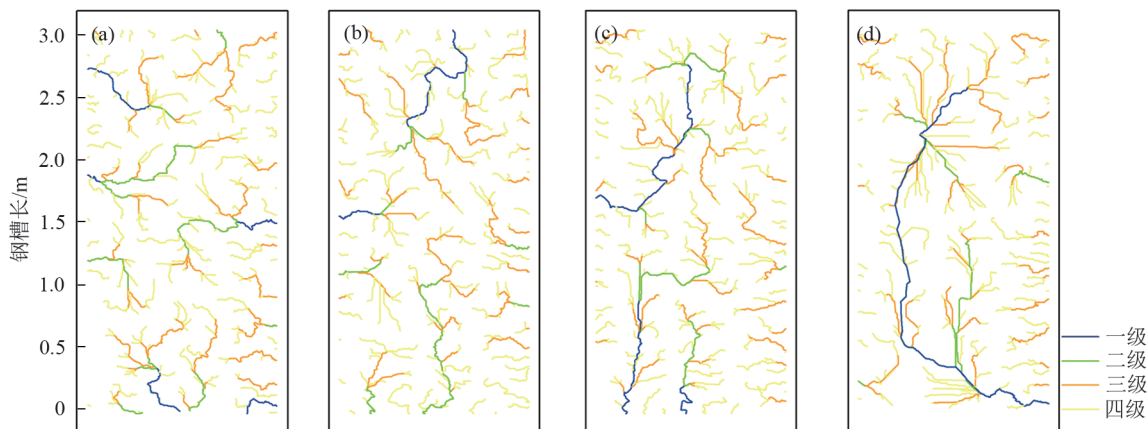
图 3 坡面径流侵蚀产沙特征

Fig. 3 Characteristics of runoff erosion and sediment yield on slope surface

2.3 坡面径流路径演变

将 21 场降雨划分为降雨前、连续 7 场 30 mm/h 降雨后、连续 7 场 60 mm/h 降雨后、连续 7 场 90 mm/h 降雨后 4 个阶段,图 4 为 4 个阶段的坡面径流路径分布,将坡面从底部开始划分为下部 0~1 m、中部 1~2 m、上部 2~3 m。结果显示,与降雨前相比,不同雨强连续降雨形成的坡面径流路径分布存在明显差异,随着降雨的进行,径流路径逐渐由随机分布演变为在坡面形成 1 条主要的路径,坡面的径流侵蚀逐渐增强,雨滴溅蚀逐渐减弱。降雨前坡面细沟纹路的

空间分布是随机的,连续 7 场 30 mm/h 降雨后(图 4b),坡面上部形成 1 条长 1.45 m 的一级径流路径,另外在坡面下部的中间与左侧分别形成 1 条长 1.88、0.40 m 的二级流路,坡面左右两侧的流路变少变短。连续 7 场 60 mm/h 降雨后(图 4c),坡面上部的一级径流路径向下延长至 2.15 m,坡面下部左侧的二级流路发展为一级流路向上延长至 1.17 m,中间的 1 条则缩短至 1.27 m,而坡面左侧几乎不存在三级及以上的流路。连续 7 场 90 mm/h 降雨后(图 4d),原坡面上部的一级径流路径与坡面下部左侧的流路汇为 1 条长 4.23 m 的主径流路径,原坡面下部中间的流路汇为一条长 1.29 m 的二级支流路径。



注:图 a~d 分别为第 1~4 阶段的坡面径流路径。

图 4 连续降雨后坡面径流路径变化

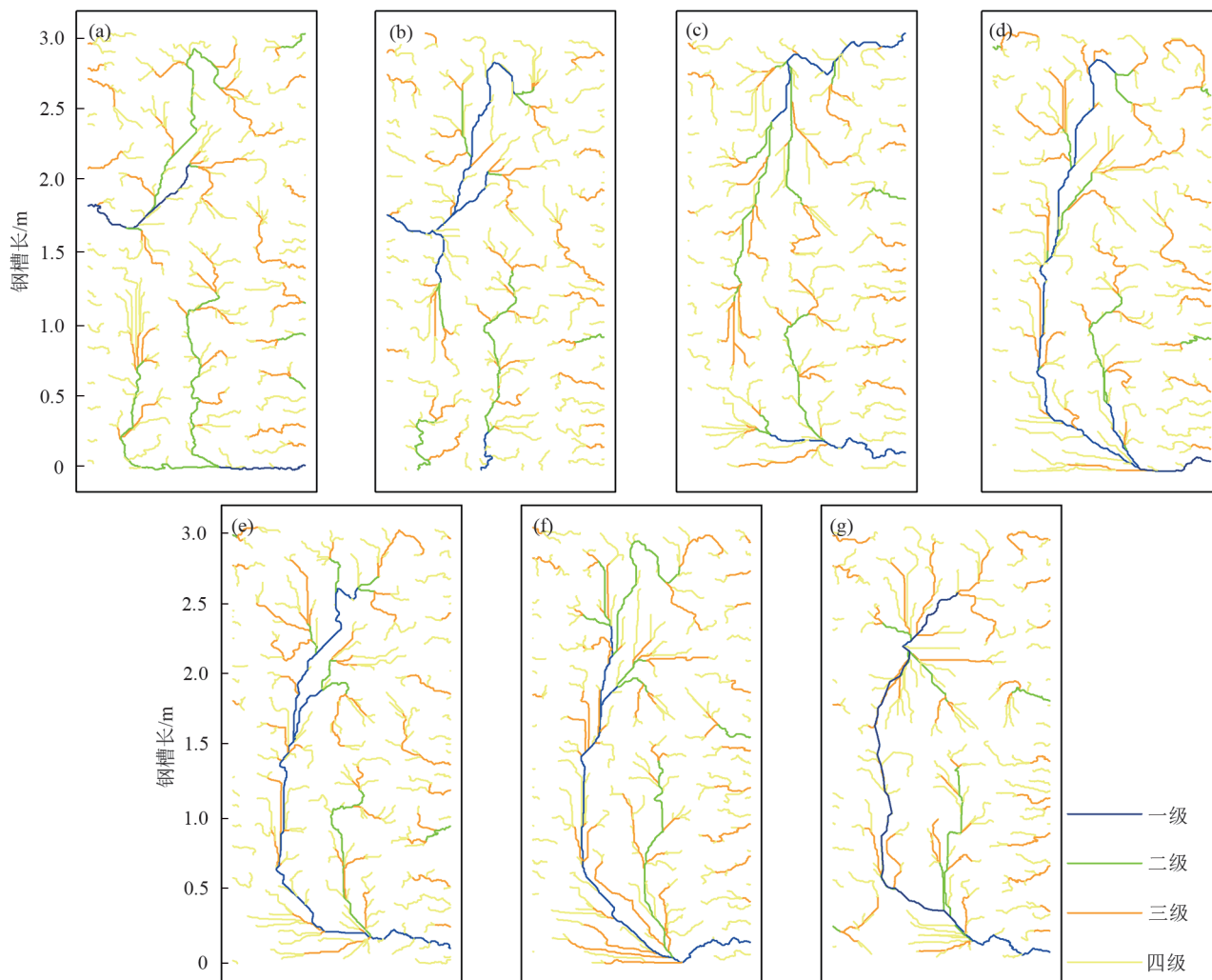
Fig. 4 Changes of runoff paths on slope surface after continuous rainfall

图 5 为连续 7 场雨强为 90 mm/h 的降雨后坡面径流路径分布。整体上而言,坡面逐渐形成 1 条主要的径流路径。第 1 场降雨后,坡面上部形成 1 条长 1.92 m 的二级径流路径,在自坡底向上 1.8 m 的位置处汇入 1 条长 1.18 m 的一级流路,坡面下部左侧和中

间分别形成 1 条长 1.69、1.91 m 的二级流路,并在坡底交汇。第 2 场降雨后。坡面上部的流路发展为 1 条长 2.35 m 的一级流路,坡面下部左侧的流路缩至 0.53 m,中间的二级流路则发展为 1 条长 1.54 m 的二级流路和 1 条长 0.43 m 的一级流路,二者在距离坡底

0.4 m 的位置处交汇。第3场降雨后,坡面上部的一级流路缩至1.75 m,并发展出2条分别长1.50、0.87 m的二级流路,坡面下部左侧的二级流路消失,右侧发展出1条长1.29 m的一级流路。第4~7场降雨后,坡

面径流路径稳定发展,形成1条贯穿整个坡面的主要径流路径,长度为4.20 m左右,坡面中下部形成1条长度为1.30 m左右的二级流路汇入主流路,坡面径流网络已达到动态平衡。



注:图a~g分别为第1~7场90 mm/h雨强降雨后坡面径流路径分布。

图5 90 mm/h雨强下坡面径流路径

Fig. 5 Slope runoff paths under 90 mm/h rainfall intensity

2.4 连续降雨条件下坡面微地形变化

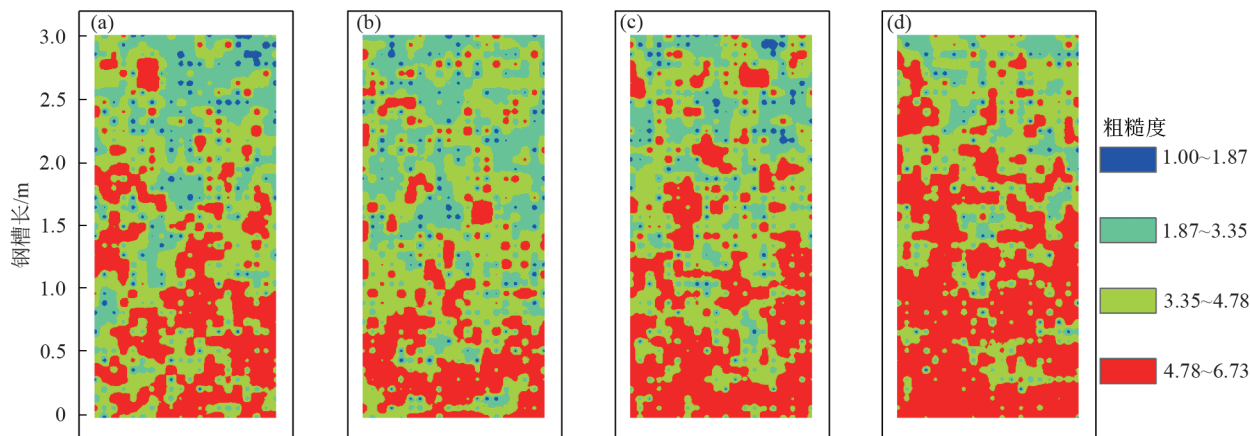
选取地表粗糙度和切割度作为表征微地形变化的因子。将坡面地表粗糙度和切割度划分为低值区(1.00~1.87、2.00~6.00 mm)、中低值区(1.87~3.35、6.00~10.00 mm)、中高值区(3.35~4.78、10.00~20.00 mm)和高值区(4.78~6.73、20.00~35.00 mm)。由图6、图7可知,连续21场降雨后坡面地表粗糙度、切割度呈增大趋势。从分布位置来看,粗糙度的低值区呈点状零散分布在坡面上部和中部,切割度的低值区呈点状分布在坡面上部;2个地形因子的中低值区的位置在第1、2阶段呈片状集中分布于坡面上部及中部,第3、4阶段零散分布于坡面的上半部分;2个地形因子的中高值区的位置在第1、2阶段主要集

中于坡面中部及下部,随着降雨的进行逐渐向上蔓延,在第4阶段,粗糙度呈斑状分布于坡面中上部,切割度呈片状分布于坡面上部及中部;4个阶段中粗糙度的高值区的位置主要集中在由坡底至向上1.2、0.9、1.4、2.0 m范围内,由零散的斑状逐渐变连续的片状分布,切割度的高值区的位置在第1阶段零散分布于坡面中下部,第2阶段则缩至坡面下部,在第3、4阶段向上蔓延,第4阶段在坡面中下部相对呈片状分布,在坡面中上部呈斑状零散分布。

从面积占比来看,粗糙度和切割度的低值区的面积占比最小,粗糙度在前3个阶段分别占1.36%、1.22%、1.37%,第4阶段降至0.40%,切割度随着降雨的进行呈下降趋势,第4阶段仅占0.07%;粗糙度、

切割度的中低值区面积占比在第2阶段增至最大值,分别为29.12%、26.54%,第4阶段降至最小值,分别为10.76%、3.30%;粗糙度和切割度的中高值区面积占比最大,粗糙度在前3个阶段均在40%以上,在第4阶段降至最小35.21%,切割度均在60.00%以上,第3阶段达最大值73.52%;粗糙度和切割度的高值

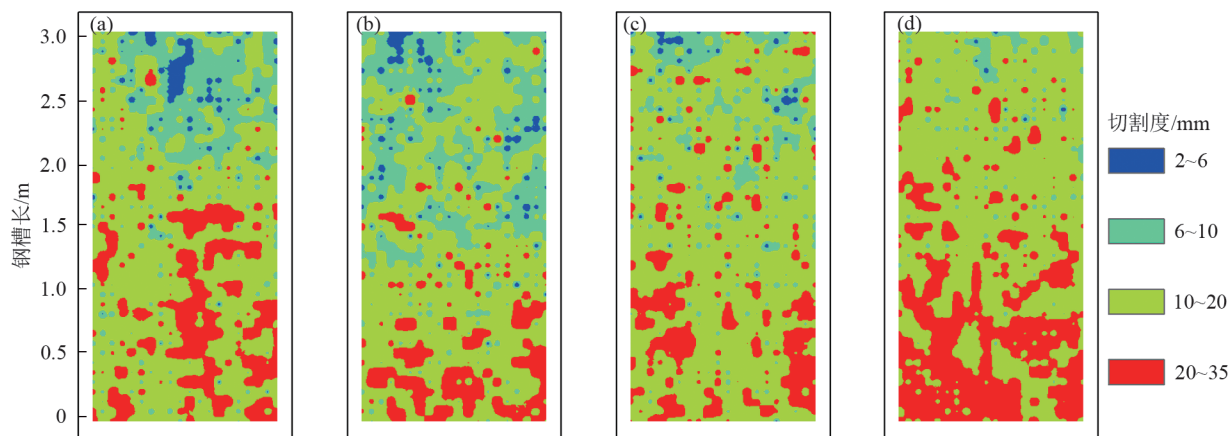
区面积占比在第2阶段降至最小值,分别为24.84%、13.08%,第4阶段增至最大值,分别为53.63%、30.80%。整体而言,随着降雨的进行,高值区的面积逐渐增大,低值区的面积逐渐减小,整个坡面的粗糙度、切割度值呈增大趋势,坡面受到的侵蚀逐渐加剧。



注:图a~d分别为第1~4阶段的地表粗糙度。

图6 降雨前后地表粗糙度分布

Fig. 6 Distribution of surface roughness before and after rainfall



注:图a~d分别为第1~4阶段的地表切割度。

图7 降雨前后地表切割度分布

Fig. 7 Distribution of surface cutting degree before and after rainfall

构建降雨前与连续21场降雨后不同坡位地形因子的小提琴图(图8)。由图8可知,蓝色图例是指四分位数范围,指数据从小到大排列位于25%~75%的数值,反映数据中间50%的分散程度,其值越大,数据分布越分散;反之,数据越集中。由 $Q_3 \sim Q_1$ 计算得出,其中, Q_1 为该样本中所有数值由小到大排列后第25%的数字, Q_3 为该样本中所有数值由小到大排列后第75%的数字。结果显示,连续21场降雨之后,坡面上部、中部、下部粗糙度和切割度的平均值、中位数及数据的四分位数范围(25%~75%)均增大,且呈坡面由上至下依次增大趋势,表面坡面的侵蚀程度由上至下逐渐加剧。小提琴图的“琴身”部分展示数据的密度分

布,琴身越宽,表示在该数值附近数据点的密度越高。由图8a可知,降雨前,坡面上部、中部、下部粗糙度值在3.0附近的密度最高,坡面上部集中于1.5~3.5,坡面中部分布比较均匀,1.5~3.5较多,2.5~6.0较少,坡面下部则集中于2.5~6.0。降雨后,坡面上部粗糙度值在3.0附近的密度依旧最高,0.5~2.0的点减少,4.5~6.5的点增多;坡面中部出现2个密度最高的数值,分别为3.0、5.5,0.5~2.5的点减少,5.0~6.5的点增多;坡面下部密度最高的数值为5.7,2.0~4.0的点减少,5.0~6.5的点增多。由图8b可知,坡面的切割度上部、中部、下部的小提琴形状在降雨前后差别不大,降雨后,其数值整体增大。

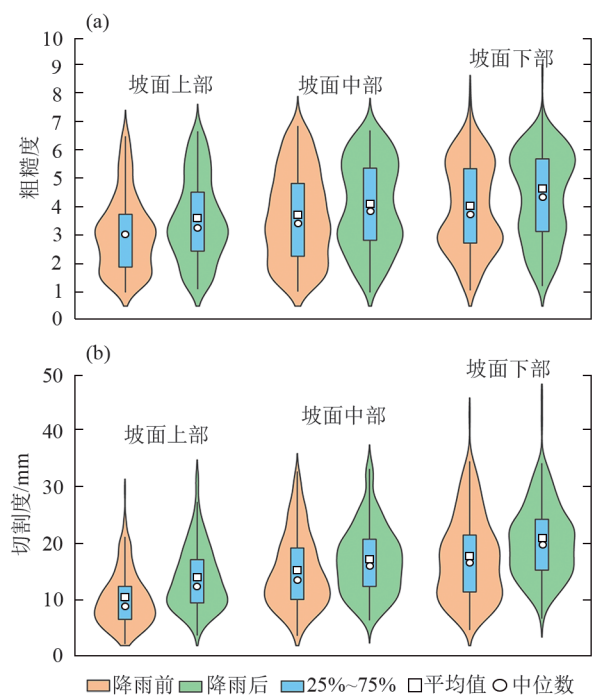


图8 降雨前后地表微地形变化

Fig. 8 Changes of surface micro-topography before and after rainfall

3 讨论

3.1 坡面径流与产沙对连续降雨的响应

连续降雨作用下,随着降雨场次的增加,产流速率增速加快,达到稳定的时间减小,并且随着降雨强度的增加而增大。分析其原因,随着降雨场次的连续进行,一方面,土壤逐渐接近或达到饱和状态,土壤入渗能力逐渐减弱,更多的雨水转化为地表径流,导致产流速率增速加快;另一方面,连续降雨可能改变土壤的物理结构,如土壤结皮的形成和土壤孔隙度的减少,进一步限制雨水的入渗,促进地表径流的产生^[21],特别地,降雨过程中观察到,土壤表层形成结皮后,雨水难以入渗,直接在地表形成径流,加速产流速率的增加。降雨强度是影响产流速率的另一个关键因素^[22-23]。首先,降雨强度增大意味着雨滴的打击力增强,加剧表层土壤的侵蚀和结皮现象;其次,降雨强度增大时,地表径流的动能随之增大,有助于径流更快地沿坡面流动,从而提高产流速率;同时,高强度降雨加速径流汇聚过程,坡面上逐渐形成主要径流路径,径流连通程度增加,进一步加速径流的产生和流动,使得径流达到稳定的时间缩短^[24]。

从产沙速率的变化来看,连续降雨作用下,30 mm/h雨强产沙速率随产流历时逐渐增加至稳定,而60、90 mm/h雨强下,产沙速率随产流历时逐渐减小并趋于稳定。袁和第等^[25]分别进行60、90 mm/h的室内连续降雨试验发现,径流含沙量随降雨历时

呈减小趋势,与本试验结论一致。可能是由于30 mm/h雨强下,雨滴对地表的冲击力相对较弱,土壤颗粒的剥蚀速率较为缓慢^[20]。在产流过程中,初期,随着雨水的渗透,土壤逐渐饱和,地表径流开始形成,携带走松散的土壤颗粒,导致产沙速率逐渐增加,随着产流历时的延长,易剥蚀的土壤颗粒被逐渐搬运完毕,剩余土壤颗粒间的结合力增强,难以被进一步剥蚀,使得产沙速率最终达到相对稳定的状态。产沙速率在不同降雨场次中有所波动,前3场降雨中,地表微地形未发生显著变化,径流更容易在土壤表面形成不稳定流动,故产沙速率并不稳定,尤其在第1场降雨过程中,土壤表面未经侵蚀,相对松散,雨滴溅蚀作用更为显著,产沙速率相对较大。在经历7场30 mm/h雨强降雨的溅蚀与径流冲刷后,当雨强增大到60、90 mm/h时,降雨初期短时间内形成较大地表径流,且雨滴溅蚀能力较强,直接导致土壤结构的破坏和颗粒的剧烈分散,并被径流携带流出出口断面,形成大的产沙速率^[26]。但随着降雨的持续,高强度降雨使地表径流产生的时间提前,雨滴击溅能力减弱,可侵蚀的土壤颗粒减少,在一定程度上限制泥沙的搬运能力,产沙速率逐渐减少至稳定状态。径流路径的演变是产流产沙变化在空间上的直接反映^[27],随着地表径流的持续,坡面径流网络逐渐稳定,部分细小颗粒被搬运至下游,而较粗的颗粒则逐渐沉积在地表,形成一层保护性的覆盖层,减缓进一步的侵蚀过程^[28],从而使产沙速率降低。

3.2 连续降雨对坡面微地形变化的影响

基于上述研究及径流路径的演变,可以深入探讨微地形变化的内在机制。坡面地表粗糙度和切割度经过连续7场雨强为30 mm/h的降雨后均呈明显下降趋势。主要是由于降雨的冲刷作用,使得地表土壤颗粒被剥离并随水流运移,导致地表形态变得相对平滑^[10]。具体来说,粗糙度反映地表微小起伏的程度,随着降雨的进行,这些微小起伏被逐渐磨平,使得粗糙度值下降。而切割度则反映地表被水流切割的程度,随着降雨的冲刷,地表沟壑被逐渐填平,切割度也相应降低。然而,随着降雨强度的增大,径流的流速增大,使坡面径流路径的演变进程加快,地表土壤的剥离和运移速度加快,地表形态不断发生变化,在地表形成新的沟壑和洼地,粗糙度和切割度的值呈增大趋势。当雨强增加至90 mm/h时,坡面径流路径在第4场降雨后逐渐稳定,稳定的流路在连续降雨作用下逐渐加深加宽,从而增加地表的粗糙度和切割度。

进一步观察发现,坡面由上部至下部,粗糙度

和切割度的值依次增大。与钱秋颖等^[29]对裸露砂岩坡面微地形空间变化结果一致。是因为连续降雨引发的土壤侵蚀导致坡面地形因子的变化,在坡面上部,水流速度较慢,冲刷作用相对较弱,因此地形因子的变化较小,而随着水流沿坡面向下流动,速度逐渐加快,冲刷作用也愈发强烈,侵蚀和沉积的交替作用导致地形因子的值逐渐增大。此现象在降雨强度较大时尤为明显^[30]。本研究还发现,粗糙度和切割度高值区的面积占比在降雨后发生显著变化。在降雨前,粗糙度和切割度高值区的面积占比分别为 33.09%、18.74%,而降雨后则分别增至 53.63%、30.80%。主要是由于降雨过程中,水流对地表的冲刷作用使得原本平坦的区域变得凹凸不平,从而增加高值区的面积,随着降雨强度的增大,高值区的面积占比也呈增大趋势。

4 结 论

1)连续降雨作用下,随着降雨场次的增加,产流速率增速加快,达到稳定的时间由 24 min 减小到 15 min,降雨形成径流的时间缩短;平均次降雨产流速率随着降雨强度的增加由 144.84 mL/(min·m²)增至 978.02 mL/(min·m²)。说明降雨强度仍是主要影响黄绵土坡面侵蚀的主要因子,做好雨强的预测及建设合理的水保措施极为重要。

2)连续降雨过程中,在 30 mm/h 雨强下,场降雨平均产沙速率由最初的 0.08 g/(min·m²)随产流历时延长逐渐增加后稳定在 0.13~0.42 g/(min·m²);而在 60、90 mm/h 雨强下,场降雨平均产沙速率随产流历时分别由 2.02、2.76 g/(min·m²)逐渐减少,后稳定在 0.55~0.99、0.50~0.83 g/(min·m²)。表明要注重 30 mm/h 及以下的雨强条件下的长历时降雨,当雨强 >60 mm/h 时,要注意雨滴击溅作用引起的土壤侵蚀。

3)降雨前,坡面细沟纹路的空间分布是随机的,降雨强度增至 90 mm/h,经过该雨强条件下的第 4 场降雨后,坡面形成 1 条贯穿整个坡面的主要径流路径,长度为 4.45 m,径流连通程度增加,之后坡面径流路径稳定发展,变化不大。

4)坡面地表粗糙度、切割度的值由上部至下部依次增大,低值区主要出现于坡面上部,高值区主要出现于坡面下部,连续 21 场降雨后,低值区面积占比降至 1% 以下,高值区面积占比分别由 33.09%、18.74% 增至 53.63%、30.80%。因此,需要重点关注坡面下部的土壤侵蚀情况并做好水土保持措施,如种植柠条、紫花苜蓿等植被,或布设水平沟、鱼鳞坑等工程措施以减少坡面侵蚀和土壤流失。

参考文献:

- [1] 黄俊,赵西宁,吴普特.基于通径分析和灰色关联理论的坡面产流产沙影响因子分析[J].四川大学学报(工程科学版),2012,44(5):64-70.
HUANG J, ZHAO X N, WU P T. Factors analysis of slope runoff and sediment based on path analysis and grey relational analysis [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(5): 64-70.
- [2] 霍云梅,毕华兴,朱永杰,等.模拟降雨条件下南方典型粘土坡面土壤侵蚀过程及其影响因素[J].水土保持学报,2015,29(4):23-26.
HUO Y M, BI H X, ZHU Y J, et al. Erosion process and its affecting factors of southern typical clay slope under simulated rainfall condition [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(4): 23-26.
- [3] 张思琪,马芊红,朱彤,等.基于三维激光扫描技术的喀斯特地表微地形特征及其侵蚀响应[J].水土保持研究,2021,28(4):8-14.
ZHANG S Q, MA Q H, ZHU T, et al. Micro topography characteristic of karst slope and its response to soil erosion based on 3D laser scanning technique [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(4): 8-14.
- [4] 李龙,秦富仓,钱秋颖,等.砂岩区水力侵蚀下坡面微地貌变化特征及过程研究[J].土壤,2022,54(1):198-205.
LI L, QIN F C, QIAN Q Y, et al. Micro-geomorphic change characteristics and process of slope under water erosion in pisha sandstone area [J]. Soils, 2022, 54(1): 198-205.
- [5] 金鑫,刘浩楠,周程风,等.降雨过程中黄土坡面微地形因子与侵蚀关系研究[J].人民长江,2023,54(3):216-223.
JIN X, LIU H N, ZHOU C F, et al. Relationship between micro-topography factors of loess slope and erosion under intermittent rainfall [J]. Yangtze River, 2023, 54(3): 216-223.
- [6] 吕佼容,张文博,胡锦昇,等.连续降雨下不同砾石含量工程堆积体土壤侵蚀[J].水科学进展,2019,30(2):210-219.
LYU J R, ZHANG W B, HU J S, et al. Effects of rock fragment content on erosion characteristics of spoil heaps under multiple rainfall events [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(2): 210-219.
- [7] LIU H, LEI T W, ZHAO J, et al. Effects of rainfall intensity and antecedent soil water content on soil infiltrability under rainfall conditions using the run off-on-out method [J]. Journal of Hydrology, 2011, 396(1/2): 24-32.
- [8] WILSON B N. Small-scale link characteristics and applications to erosion modeling [J]. Transactions of the ASAE, 1993, 36(6): 1671-1770.

- [9] 徐震,高建恩,赵春红,等.雨滴击溅对坡面径流输沙的影响[J].水土保持学报,2010,24(6):20-23.
XU Z, GAO J, ZHAO C H, et al. Effects of raindrop impact on runoff and sediment transport of the slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(6): 20-23.
- [10] 李清溪,丁文峰,朱秀迪,等.雨强和地表糙度对坡面微地形及侵蚀的影响[J].长江科学院院报,2019,36(1):41-47.
LI Q X, DING W F, ZHU X D, et al. Effects of rainfall intensity and land surface roughness on microtopography and runoff and sediment yield of slope[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(1): 41-47.
- [11] KIRKBY M. Modelling the interactions between soil surface properties and water erosion[J]. Catena, 2002, 46(2):89-102.
- [12] 司梦可,曹建生,阳辉.微地形变化对地表水文过程影响的研究进展[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(10):1587-1595.
SI M K, CAO J S, YANG H. Advances in research on the effects of micro-topography changes on surface hydrological processes[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(10):1587-1595.
- [13] MORBIDELLI R, SALTALIPPI C, FLAMMINI A, et al. Infiltration on sloping surfaces: Laboratory experimental evidence and implications for infiltration modeling[J]. Journal of Hydrology, 2015, 523:79-85.
- [14] HE S Q, QIN F, ZHENG Z C, et al. Changes of soil microrelief and its effect on soil erosion under different rainfall patterns in a laboratory experiment[J]. Catena, 2018, 162:203-215.
- [15] VERMANG J, NORTON L D, HUANG C, et al. Characterization of soil surface roughness effects on runoff and soil erosion rates under simulated rainfall[J]. Soil Science Society of America Journal, 2015, 79(3):903-916.
- [16] 王奇花,高玉凤,田沉,等. EUROSEM模型对晋西黄绵土坡面侵蚀过程的模拟应用[J].水利学报,2021,52(1):120-127.
WANG Q H, GAO Y F, TIAN C, et al. Simulation of erosion process on loessal slope in western Shanxi by using EUROSEM[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(1):120-127.
- [17] 付兴涛.晋西黄绵土坡面径流流态与输沙特征试验研究[J].水利学报,2017,48(6):738-747.
FU X T. Characteristics of flow pattern and sediment transport processes on loessal soil slope in western Shanxi Province[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(6):738-747.
- [18] 唐辉,李占斌,李鹏,等.模拟降雨下坡面微地形量化及其与产流产沙的关系[J].农业工程学报,2015,31(24):127-133.
TANG H, LI Z B, LI P, et al. Surface micro topography quantification and its relationship with runoff and sediment under simulated rainfall[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(24): 127-133.
- [19] 王辉,王全九,邵明安.前期土壤含水量对坡面产流产沙特性影响的模拟试验[J].农业工程学报,2008,24(5):65-68.
WANG H, WANG Q J, SHAO M. Simulation experiment of effect of antecedent soil moisture content on characteristics of runoff and sediment from two soil sloping lands[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(5):65-68.
- [20] 张晓茹,刘志强,焦钊棚,等.雨滴击溅下表土孔隙变化及其对入渗能力的影响[J].土壤,2024,56(3):601-609.
ZHANG X R, LIU Z Q, JIAO F X, et al. Topsoil pore change under raindrop splashing and its effect on soil infiltration[J]. Soils, 2024, 56(3):601-609.
- [21] 樊春华,赵龙山,方乾,等.多场次降雨条件下不同土岩镶嵌坡面土壤侵蚀特征[J].土壤学报,2022,59(5):1270-1278.
FAN C H, ZHAO L S, FANG Q, et al. Soil erosion characteristics of different soil and rock mosaic slopes under the condition of successive rainfalls[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(5):1270-1278.
- [22] 屈丽琴,雷廷武,赵军,等.室内小流域降雨产流过程试验[J].农业工程学报,2008,24(12):25-30.
QU L Q, LEI T W, ZHAO J, et al. Laboratory experiments of runoff processes in small watershed under simulated rainfall[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(12):25-30.
- [23] DUAN J, ZHENG H J, WANG L Y, et al. Rainfall intensity profile induced changes in surface-subsurface flow and soil loss as influenced by surface cover type: A long-term *in situ* field study[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2025, 13(1):27-42.
- [24] LIU J B, LIANG Y, GAO G Y, et al. Quantifying the effects of rainfall intensity fluctuation on runoff and soil loss: From indicators to models[J]. Journal of Hydrology, 2022, 607:e127494.
- [25] 袁和第,信忠保,蒋秋玲,等.连续降雨作用下褐土坡面侵蚀及其水动力学特征[J].水土保持学报,2020,34(4):14-20.
YUAN H D, XIN Z B, JIANG Q L, et al. Slope erosion and its hydrodynamic characteristic of cinnamon soil under continuous rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4):14-20.

(下转第96页)

- tural Engineering, 1944, 25: 131-136.
- [25] SOMCHAI D, CHAIYUTH C. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the application of vetiver grass mulch in soil and water conservation [J]. International Journal of Sediment Research, 2012, 27(2): 168-177.
- [26] SHI Z H, FANG N F, WU F Z, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes [J]. Journal of Hydrology, 2012, 454: 123-130.
- [27] ASSOULINE S, BEN-HUR M. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing [J]. Catena, 2006, 66 (3): 211-220.
- [28] RAN Q H, SU D Y, LI P, et al. Experimental study of the impact of rainfall characteristics on runoff generation and soil erosion [J]. Journal of Hydrology, 2012, 424: 99-111.
- [29] 范荣生, 王高英, 李占斌. 陡坡侵蚀产沙特点及含沙量过程计算模型研究[J]. 水土保持通报, 1993, 13(4): 6-14.
- FAN R S, WANG G Y, LI Z B. Calculative model of sediment content and features of sediment-producing by erosion in steep slope land [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1993, 13(4): 6-14.
- [30] 潘菊梅. 降雨强度和坡度对裸露黄土坡面侵蚀的影响分析[J]. 水利科学与寒区工程, 2024, 7(11): 97-100.
- PAN J M. Analysis on the influence of rainfall intensity and slope on slope erosion exposed loess [J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2024, 7(11): 97-100.
- [31] 陈法扬. 不同坡度对土壤冲刷量影响试验[J]. 中国水土保持, 1985(2): 20-21.
- CHEN F Y. Experimental study on the influence of different slopes on soil erosion [J]. Soil and Water Conservation in China, 1985(2): 20-21.
- [32] 陈晓安, 蔡强国, 张利超, 等. 黄土丘陵沟壑区坡面土壤侵蚀的临界坡度[J]. 山地学报, 2010, 28(4): 415-421.
- CHEN X A, CAI Q G, ZHANG L C, et al. Research on critical slope of soil erosion in a hilly loess region on the Loess Plateau [J]. Journal of Mountain Science, 2010, 28(4): 415-421.
- (上接第 87 页)
- [26] 童晓霞, 崔远来, 邵东国, 等. 递增式连续降雨条件下典型山区坡面径流产沙水动力学特征[J]. 农业工程学报, 2024, 40(9): 88-97.
- TONG X X, CUI Y L, SHAO D G, et al. Hydrodynamic characteristics of runoff and sediment yield on the slopes in typical mountainous areas under incremental and continuous rainfall conditions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(9): 88-97.
- [27] HUANG X, WANG K R, ZOU Y W, et al. Development of global soil erosion research at the watershed scale: A bibliometric analysis of the past decade [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(10): 12232-12244.
- [28] ANDUALEM T G, HEWA G A, MYERS B R, et al. Erosion and sediment transport modeling: A systematic review [J]. Land, 2023, 12(7): e1396.
- [29] 钱秋颖, 秦富仓, 李龙, 等. 自然降雨条件下坡面侵蚀地表粗糙度的空间异质性[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 46-52.
- QIAN Q Y, QIN F C, LI L, et al. Spatial heterogeneity of surface roughness of slope erosion under natural rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3): 46-52.
- [30] 张若曦, 秦富仓, 李龙, 等. 砭砂岩区坡面微地貌变化与侵蚀产沙的响应关系[J]. 水土保持研究, 2022, 29(6): 21-27.
- ZHANG R X, QIN F C, LI L, et al. Responses of slope micro-geomorphology to erosion and sediment yield in arsenic sandstone area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(6): 21-27.