

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.004; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.004.

李朋飞, 曹凯, 胡晋飞, 等. 黄土丘陵沟壑区不同雨强下坡面侵蚀空间异质性及其机理[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 1-12.

Li Pengfei, Cao Kai, Hu Jinfei, et al. The spatial heterogeneity and mechanisms of hillslope erosion under different rainfall intensities in hilly and gully Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 1-12.

黄土丘陵沟壑区不同雨强下坡面 侵蚀空间异质性及其机理

李朋飞¹, 曹凯¹, 胡晋飞¹, 高健键², 郝铭揆¹, 党恬敏³, 高晨迪¹

(1. 西安科技大学 测绘科学与技术学院, 西安 710054; 2. 黄河水利委员会绥德水土保持科学试验站,

陕西 榆林 719000; 3. 黄河流域水土保持生态环境监测中心, 西安 710021)

摘要: [目的]明晰野外坡面侵蚀沉积精细时空分布特征及水动力学参数间的联系,以深入坡面侵蚀产沙过程的认识。[方法]以黄土丘陵沟壑区辛店沟流域自然坡面的 3 个径流小区(5 m×1.5 m)为研究对象,分别在 90, 120, 150 mm/h 雨强下进行连续 10 场降雨试验,同时结合地基三维激光扫描技术,研究坡面侵蚀沉积时空特征,探讨不同坡段水力学参数变化特征及其与坡面侵蚀率、产沙率的关系。[结果](1) 随着雨强的增大,坡面侵蚀加重,以 D, E 坡段较为严重,沉积减小且分散,以 E 坡段最为明显;侵蚀面积而言:90, 150 mm/h 下, B 坡段最大, C 坡段次之, D 坡段最小; 120 mm/h 雨强下, B 坡段最大, D 坡段次之, C 坡段最小。(2) 连续降雨作用下,水力学参数影响坡面粗糙度变化,坡面粗糙度又反作用于水力学参数,致使水动力学参数出现波动变化,当土体逐渐饱和达到稳定的入渗,水动力学参数逐渐趋于稳定;同一雨强下,距离坡顶长度与雷诺数、弗劳德数、单位径流功率成正比,与径流剪切力、Darcy-Weisbach 阻力系数成反比。(3) 90, 120 mm/h 雨强下,径流功率是侵蚀过程中重要的水动力学参数, Darcy-Weisbach 阻力系数和单位径流功率认为是坡面产沙过程重要的水动力学参数,皆为线性函数关系; 150 mm/h 雨强下,水动力学与侵蚀率、产沙率无关。[结论]在不同雨强下,坡面侵蚀与水动力学参数之间的关系存在差异,其中径流功率、Darcy-Weisbach 阻力系数和单位径流功率是自然坡面产沙过程的重要参数,且二者呈线性关系。

关键词: 侵蚀; 沉积; 水动力学; 模拟降雨; 三维激光扫描仪; 黄土丘陵沟壑区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0001-12

The spatial heterogeneity and mechanisms of hillslope erosion under different rainfall intensities in hilly and gully Loess Plateau

Li Pengfei¹, Cao Kai¹, Hu Jinfei¹, Gao Jianjian²,

Hao Mingkui¹, Dang Tianmin³, Gao Chendi¹

(1. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Suide Test Station of Soil and Water Conservation, Yellow River Conservancy Committee of Ministry of Water Resources, Yulin, Shaanxi 719000, China; 3. Yellow River Basin Monitoring Center of Water-Soil Conservation and Eco-Environment, Xi'an 710021, China)

Abstract: [Objective] Clarifying the detailed spatiotemporal distribution characteristics of erosion and deposition on filed slopes, as well as the relationship with hydrodynamic parameters, is essential for deepening the understanding of the processes of sediment production in slope erosion. [Methods] Three runoff plots (5 m×1.5 m) on natural slopes were set in the Xindianguou watershed of the hilly and gully region of the Loess Plateau. Then continuous rainfall experiments were conducted under rainfall intensities of 90, 120, and 150 mm/h for 10 consecutive rainfall events. Based on ground-based terrestrial laser scanning

收稿日期: 2023-12-05

修回日期: 2024-03-11

资助项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项项目(2022YFE0119200); 国家自然科学基金项目(41977059; U2243211; 42207407); 中国水利部重大科技项目(SKS-2022092); 陕西省自然科学基金项目(2022JQ-259); 陕西省教育厅基金(22JK0463)

第一作者: 李朋飞(1986—), 男, 陕西渭南人, 博士, 教授, 研究方向为地貌遥感与水土保持。E-mail: pengfeili@xust.edu.cn

通信作者: 胡晋飞(1992—), 男, 山西运城人, 博士, 副教授, 研究方向为地貌遥感与水土保持。E-mail: jinfeih@xust.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

(TLS), the spatiotemporal characteristics of soil erosion and deposition were studied. The variations of hydraulic parameters in different slope segments and their relationships with corresponding soil erosion rate and sediment yield were explored. [Results] (1) Soil erosion increased with the increase of rainfall intensity. The most severe erosion occurred in the D and E slope segments with the reduced and dispersed sedimentation, especially for the E slope segment. In terms of erosion area, under rain intensities of 90 and 150 mm/h, the B slope segment was the largest, followed by the C slope segment, and the D slope segment was the smallest; under the rain intensity of 120 mm/h, the B slope segment was the largest, and the C slope segment was the smallest. (2) There is a reciprocal feed effect between hydraulic parameters and the slope roughness, resulting in the fluctuating changes of hydraulic parameters. When the soil gradually becomes saturated and reaches a stable infiltration state, the hydraulic parameters gradually tend to stabilize. Under the same rainfall intensity, the distance from the slope top was proportional to the Reynolds number, Froude number and unit runoff power, while it was inversely proportional to the runoff shear force and Darcy-Weisbach resistance coefficient. (3) Under rain intensities of 90 and 120 mm/h, runoff power was an important hydraulic parameter of the erosion process, and the Darcy-Weisbach resistance coefficient and unit runoff power were considered important hydraulic parameters in the deposition process. Under a rain intensity of 150 mm/h, the hydraulic characteristics were not related to the erosion rate and sediment yield. [Conclusion] The relationship between slope erosion and hydrodynamic parameters varies under different rain intensities, with runoff power, Darcy-Weisbach resistance coefficient, and unit runoff power being important parameters in the sediment production process of natural slopes, and these parameters exhibit a linear relationship.

Keywords: erosion; deposition; hydrodynamics; simulated rainfall; terrestrial Laser scanning; hilly and gully Loess Plateau

土壤侵蚀是造成黄土高原地区土地退化、泥沙淤积、耕地质量下降、区域贫困等生态问题与社会经济问题的主要原因之一,其过程主要包括土壤分离、泥沙输移和沉积^[1-2]。在坡面土壤侵蚀中,降雨和坡面流是土壤分离和泥沙输移的主要动力,分离的泥沙主要通过水流向下输移,当输沙量超过径流输沙能力时,则会出现沉积^[3-4]。黄土丘陵沟壑区为黄土高原甚至世界范围内土壤侵蚀最为严重的区域之一,而坡面作为黄土丘陵沟壑区产沙量主要贡献区域之一,其不同空间水力学特征对坡面泥沙输移过程和预测坡面侵蚀产沙能力具有重要影响^[5-7]。因此,明晰坡面水动力学特征以及侵蚀沉积的空间异质性对认识坡面侵蚀过程和机理的理解具有重要意义。

国内外针对坡面土壤侵蚀产沙进行了大量研究,在侵蚀产沙空间特征^[8-9]和侵蚀过程水动力学机理等^[10-12]方面取得了较多研究成果。以往研究多为室内模拟试验,其土壤结构和自然环境差异明显,不能完全表示野外坡面土壤侵蚀发育真实过程^[11];侵蚀沉积监测方法多为示踪法、侵蚀针法等传统方法,其存在操作过程复杂、精度低、成本高、耗时长等缺点^[13]。在野外坡面开展细沟发育研究能够有效地反映坡面侵蚀产沙真实过程和内在机理^[4]。目前研究表明地基三维激光扫描(Terrestrial Laser Scanning, TLS)技术能够快速构建三维地形,直观准确地表达

坡面不同空间位置侵蚀沉积情况^[14]。同时已有学者探究了坡面侵蚀产沙率和水力学特征参数的关系,发现水动力学参数可以预测坡面侵蚀产沙过程^[1,6,15]。然而,雷诺数、弗劳德数、Darcy-Weisbach 阻力系数、径流剪切力、径流功率、单位径流功率和过水断面单位能量等水力学参数与流速密切相关,而流速沿着下坡方向增大,但增大幅度有所差异,导致水力学参数随坡长表现出一定的空间变异性^[16]。以往对坡面侵蚀过程机理研究多利用整个坡面水动力学特征进行分析,不能很好地区分坡面不同空间位置的侵蚀、产沙过程^[17],且对野外坡面不同断面水动力学特征和侵蚀沉积的空间变异研究较少,特别是在黄土丘陵沟壑区鲜有野外试验量化二者之间的对应关系。

鉴于此,本研究以黄土丘陵沟壑区辛店沟流域自然坡面的 3 个径流小区(5 m×1.5 m)为研究对象,设置 5 个坡段,开展不同雨强梯度(90, 120, 150 mm/h)下的模拟降雨试验。获取各坡段流速、流宽、流深,计算其水动力学参数(雷诺数、弗劳德数、Darcy-Weisbach 阻力系数等),同时,利用 TLS 扫描降雨前后径流小区,获取坡面地形变化,分析不同断面侵蚀沉积时空异质性、水动力学特征变化、侵蚀产沙率与水动力学参数的关系,揭示不同断面侵蚀产沙机理,以期为黄土丘陵沟壑区坡面水蚀过程及其机理研究提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省榆林市绥德县辛店沟(37°29′—37°31′N, 110°16′—110°20′E)位于无定河中游左岸的支沟小流域,流域内梁峁起伏,沟壑纵横,土地贫瘠,地形破碎,属黄土丘陵沟壑区第一副区,总面积 1.44 km²。流域海拔 840~1 140 m,地势西北部最高,东南部最低,整体由西北部向东南部逐步降低。该流域属温带大陆性半干旱季风气候,年平均气温 9.7℃,年均降水量 475.1 mm,降水主要集中在 6—9 月份,且以短历时暴雨为主^[18]。流域内黄土层深厚,土质疏松,以黄棉土为主,植被类型属于温暖温带森林草原植被,以甘草、狗尾草和白草等天然植被为主。地貌系统以沟缘线为界分为两部分,沟缘线以上部分包括梁峁顶、梁峁坡等单元,沟缘线以下部分包括沟坡、沟床等单元。流域沟壑密度 7.26 km/km²,多年平均侵蚀模数高达 1.8 万 t/km²。目前辛店沟流域治理度达 80%以上,林草植被覆盖率达到 75%以上,但由于该区暴雨集中,土壤易受侵蚀,植被稀疏地区,水土流失仍极为严重^[19]。

1.2 试验设计及过程

于辛店沟流域选取同一坡向(阳坡)典型自然植被坡面,植被覆盖种类以甘草、狗尾草和白草等典型植被为主,植被均匀分布在坡面且覆盖度介于 25%~40%。坡面土壤类型为黄棉土,主要由 0.25 mm 以下的颗粒组成,细砂粒($0.05 \leq d < 0.25$ mm, d 为粒径)和粉粒($0.005 \leq d < 0.05$ mm)占总量的 60%,黏粒(< 0.002 mm)只占 12%~14%。土壤表层有植物根系,枯枝落叶残留层,植被根系密度 6.03~78.35 条/100 cm²。设置 3 个试验小区,试验小区长度设计为 5 m,宽度为 1.5 m。沿坡顶至坡脚将坡面划分为 A, B, C, D 和 E 共 5 个 1.5 m×1 m 坡段。试验小区中上部较陡,坡度 16°,下部趋缓,坡度 5°。小区周围用钢板进行围挡,且埋入深度 0.2 m 以保证小区边界条件一致性。在小区上方及两侧布设水泥桩,用于放置标靶球,确保每次地形扫描可获取 3 个以上标靶球的点云数据,以便后续点云配准与拼接,标靶球位置见图 1。在小区的正上方搭建下喷式野外模拟降雨器,共有五组喷嘴组成,每组喷嘴由 3 个喷头组成,每组喷嘴间距为 1.2 m,沿小区横向安装 2 排,纵向安装 3 排,降雨的有效面积>12 m²,降雨强度变化范围为 15~240 mm/h,有效降雨均匀度超过 80%,同时在小区周围搭建挡风棚。修建 40 m³蓄水池用于降雨器供水。试验后,使用 100 cm³环刀分别在每个坡面的梁峁坡取 3 个样本,在 105℃下烘干 24 h,测定土壤容重。最终梁峁坡平

均土壤容重分别为 1.287, 1.307, 1.371 g/cm³。

鉴于黄土高原地区最大峰值雨强为 144 mm/h^[20],并结合试验目的,最终设计 3 个雨强梯度,分别为 90, 120, 150 mm/h,降雨历时为 60 min。每个雨强分别进行 10 场连续降雨,前后 2 场降雨间隔 24 h,共计 30 场降雨试验。每场降雨试验前,先去除 3 个径流小区内植被地上部分,保留自然坡面的原始地形,以保证能清楚地观察到径流侵蚀过程。坡面首次正式降雨前用 20 mm/h 雨强进行预降雨,至坡面产流为止,晾晒 24 h,开始第一场试验,后续场次试验间均间隔 24 h 再进行下一场试验。

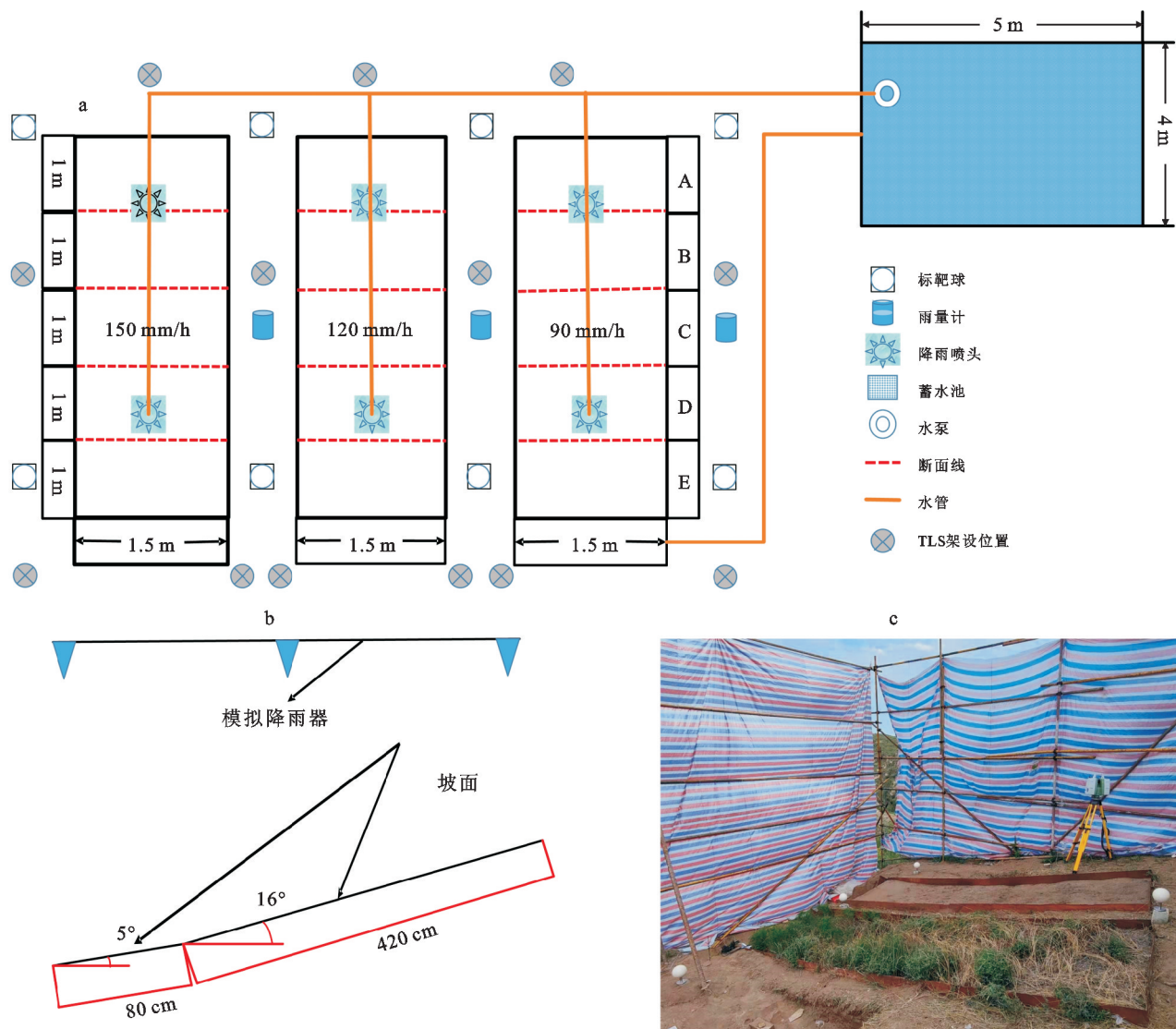
每次试验前后均利用 TLS 进行地形扫描,获取坡面侵蚀发育形态。试验开始前对降雨强度进行多次率定,确保率定雨强与设计雨强的差值<5%。降雨过程中,从坡面产流时开始计时,使用量筒(2 000 ml,精度为 10 ml)在坡脚处处收集径流样,前 10 min 每间隔 1 min,后 10~60 min 每间隔 2 min。每个小区设置 3 个测量断面,分别为距坡顶 1, 2, 3 m 处,每隔 5 min 采用高锰酸钾示踪法自下而上测定各坡段流速,求其平均值,并乘以修正系数 0.67 作为水流断面平均流速 V (m/s);采用直尺(精度 1 mm)测量法测量各断面的径流宽,求其平均值,作为径流流宽 W (m);径流深 h 采用径流量 q (ml)与平均流速 V 、平均流宽 W 、试验时长 t (s)之间的关系($h = q / (V \cdot W \cdot t \cdot 1000)$)计算得到。试验前后记录置入蓄水池中温度计的读数,确定试验水温。试验结束后,使用 TLS 对每个径流小区进行单独扫描,每次扫描架设 6~8 站(图 1),以尽可能完整地获取梁峁坡侵蚀后地形信息;径流样静置 8~10 h,倒掉上清液,所得的泥沙样放入烘干箱,在 105℃下烘干 24 h;烘干后对样本再次称重确定泥沙量。由于本文研究坡面侵蚀过程,所以只采用梁峁坡所采集的数据。

1.3 数据处理与分析

1.3.1 激光雷达点云的获取 模拟降雨试验前后使用 TLS 对径流小区进行扫描,获取点云数据。Leica Scanstation C10 参数分别为波长 532 nm,单次测量点位精度 6 mm,单次测量距离精度 4 mm,角度精度(水平/垂直)60 μ rad/60 μ rad(12"/12")。仪器水平、垂直扫描角度分别为 360°, 270°,试验后对每个径流小区进行单独扫描,每次扫描架设 6~8 站,以尽可能完整地获取坡面侵蚀后地形信息。具体的视场范围根据每次架站位置自定义选取,架站高度为 1.3~2.0 m。由于坡面周围复杂的地形和所用 TLS 仪器限制,具体架站高度视架站位置决定,以保证每个架站位置的扫描范围能覆盖全部试验小区,减小点云空洞。

1.3.2 点云数据处理 点云数据获取后,在 Leica Cyclone 9.2 软件中基于 3 个标靶球将同场次同坡面不同架站位置的扫描点云拼接为完整的点云数据集,利用 Cloud Compare v2.11 软件基于标靶球中心坐标将同坡面不同场次的点云数据集进行配准、裁剪,随后在

Terrasolid 2016 软件中通过自动滤波结合手动滤波提取地面点,将生成的 las 文件导入 ArcGIS 10.2 中,创建不规则三角网(Triangle Irregular Network, TIN),然后通过 TIN 转栅格生成 5 mm×5 mm 栅格大小的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)。



注:a 为小区布局图,其中 A、B、C、D 和 E 指将小区从坡顶到坡脚划分为 5 个坡段;150 mm/h、120 mm/h、90 mm/h 指降雨强度;b 为试验小区尺寸图;c 为试验小区照片。

图 1 试验小区设计

Fig. 1 Experimental plot design

1.3.3 侵蚀量和沉积量的计算 沉积量和侵蚀量由以下两个步骤计算:基于在不同时间的点云数据集检测地形变化;基于地形变化点云来推导体积变化,从而推导出侵蚀量和沉积量。

地形变化检测:使用 CloudCompare v2.11 软件中的 Multiscale Model to Model Cloud Comparison (M3C2) 算法,其通过基于两对点云数据集直接比较出其变化,为复杂地形中的变化检测提供了强有力手段^[21]。在本研究中,使用 M3C2 算法计算梁崩坡的地形变化时,法线和投影阈值分别为 2.5 cm 和 1.5 cm。通过 4 个混

凝土平台的点云来计算配准误差,法线和投影阈值分别为 2 cm 和 1.2 cm。

侵蚀量和沉积量(M):每场试验结束后与原始坡面(第 0 场)点云相减,负值的地方表示侵蚀,正值的地方表示沉积,将 M3C2 算法计算结果转为 5 mm 分辨率栅格计算体积变化量(侵蚀体积和沉积体积),最后与实测土壤容重相乘得出土壤侵蚀量和沉积量。

$$M = \sum_{i=1}^n A_{Pi} D_{iM3C2} \rho_s \quad (1)$$

式中: M 是梁崩坡的侵蚀或沉积质量(kg); i 是每个

点的数量; n 是点云中的点的数量; A_{Pi} 是点云中第 i 个点所表示的面积; D_{iM3C2} 是第 i 个点的变化,其分别等于沉积或侵蚀区域中的 M3C2 距离或 M3C2 距离的绝对值; ρ_s 是所选坡面的平均土壤容重。

1.3.4 水动力学参数计算 为准确描述不同降雨强度下各坡段坡面流过程中水动力学特征及其对坡面侵蚀沉积率的影响,选取弗劳德数、雷诺数、Darcy-Weisbach 阻力系数、径流剪切力、径流功率、单位径流功率、过水断面单位能量 7 个水动力参数指标进行定量化研究。根据河流水力学的理论与方法,水动力参数具体计算公式为:

(1) 雷诺数(Re)是水流惯性力与黏滞力之比,用以判断水流流态, $Re \geq 500$,为絮流, $Re < 500$,为层流^[4]。

$$Re = \frac{Vh}{\nu} \quad (2)$$

式中: V 为平均流速(m/s); h 为平均径流深(m); ν 是在试验温度 T (°C) 下通过 $\nu = 0.01775 / (1 + 0.0337 T + 0.000221 T^2)$ 测定的运动粘度(m^2/s)。

(2) 弗劳德数(Fr)是水流惯性和重力的之比,用以判断水流急缓, $Fr > 1$,为急流, $Fr < 1$,为缓流, $Fr = 1$,为临界流^[4]。

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (3)$$

式中: g 为重力加速度, g 取 9.8 m/s^2 。

(3) Darcy—Weisbach 阻力系数(f)是径流沿坡面向下过程中受到的阻滞水流运动的力的大小^[14]。

$$B = \frac{Wh}{W + 2h}, \quad f = \frac{8gBJ}{V^2} \quad (4)$$

式中: B 为水力半径(m); f 为 Darcy-Weisbach 阻力系数; W 为平均流宽(m); J 为水力坡度,可用坡度正切值代替^[4],坡度通过地形计算中的方法获取。

(4) 径流剪切力(τ)是表示地表径流对坡面土壤剥蚀力大小^[6]。

$$\tau = \gamma_m BJ \quad (5)$$

式中: τ 为径流剪切力(N/m^2); γ_m 为浑水密度(kg/m^3)。

(5) 径流功率(ω)是表征作用于单位面积水流所消耗功率,反映剥蚀一定量土壤所需功率^[14]。

$$\omega = \tau V \quad (6)$$

式中: ω 为径流功率($N/(m \cdot s)$)。

(6) 单位径流功率(P)是作用于泥沙床面的单位质量水体所消耗的功率^[15]。

$$P = VJ \quad (7)$$

式中: P 为单位水流功率(m/s)。

(7) 过水断面单位能量(E)是以过水断面最低点作基准面的单位水重的动能及势能之和^[11]。

$$E = \frac{\alpha V^2}{2g} + h \quad (8)$$

式中: E 为过水断面单位能量(m); α 为校正系数,取为 1。

2 结果与分析

2.1 侵蚀沉积时空分布特征

对比分析连续 10 场降雨试验的坡面侵蚀沉积空间分布可知(图 2),90 mm/h 雨强下,侵蚀主要分布在 A, B, C 和 D 坡段,沉积大量集中于 E 坡段。120 mm/h 雨强相比于 90 mm/h 雨强,侵蚀主要分布在 A, B, D 和 E 坡段,其沉积并无集中分布区,主要分散于 C, D 和 E 坡段。150 mm/h 雨强相比于其余两个雨强,各坡段均以侵蚀为主,沉积区域零散出现于 B 和 C 坡段。

对比分析侵蚀沉积占比可知(图 3),90 mm/h 雨强下,总侵蚀、沉积面积占比均呈增大趋势,增长幅度分别为 24.5% 和 14.4%;各坡段侵蚀、沉积面积占比均呈增大趋势。120 mm/h 雨强下,总侵蚀、沉积面积占比均呈递增趋势,第四场至第六场总沉积占比较大,增长幅度分别为 15.3% 和 2.1%;各坡段侵蚀面积占比增大,沉积面积占比波动较大,呈先增后减的趋势。150 mm/h 雨强下,总侵蚀面积占比呈增大趋势,增长幅度为 28.4%,总体上沉积面积占比呈平稳趋势,除第三场外;B, C 和 D 坡段侵蚀、沉积面积占比变化与坡面总体变化趋势相同。90, 150 mm/h 雨强下,侵蚀面积占比 B 坡段最大, C 坡段次之, D 坡段最小; 120 mm/h 雨强下, B 坡段最大, D 坡段次之, C 坡段最小。

2.2 水力学参数变化特征

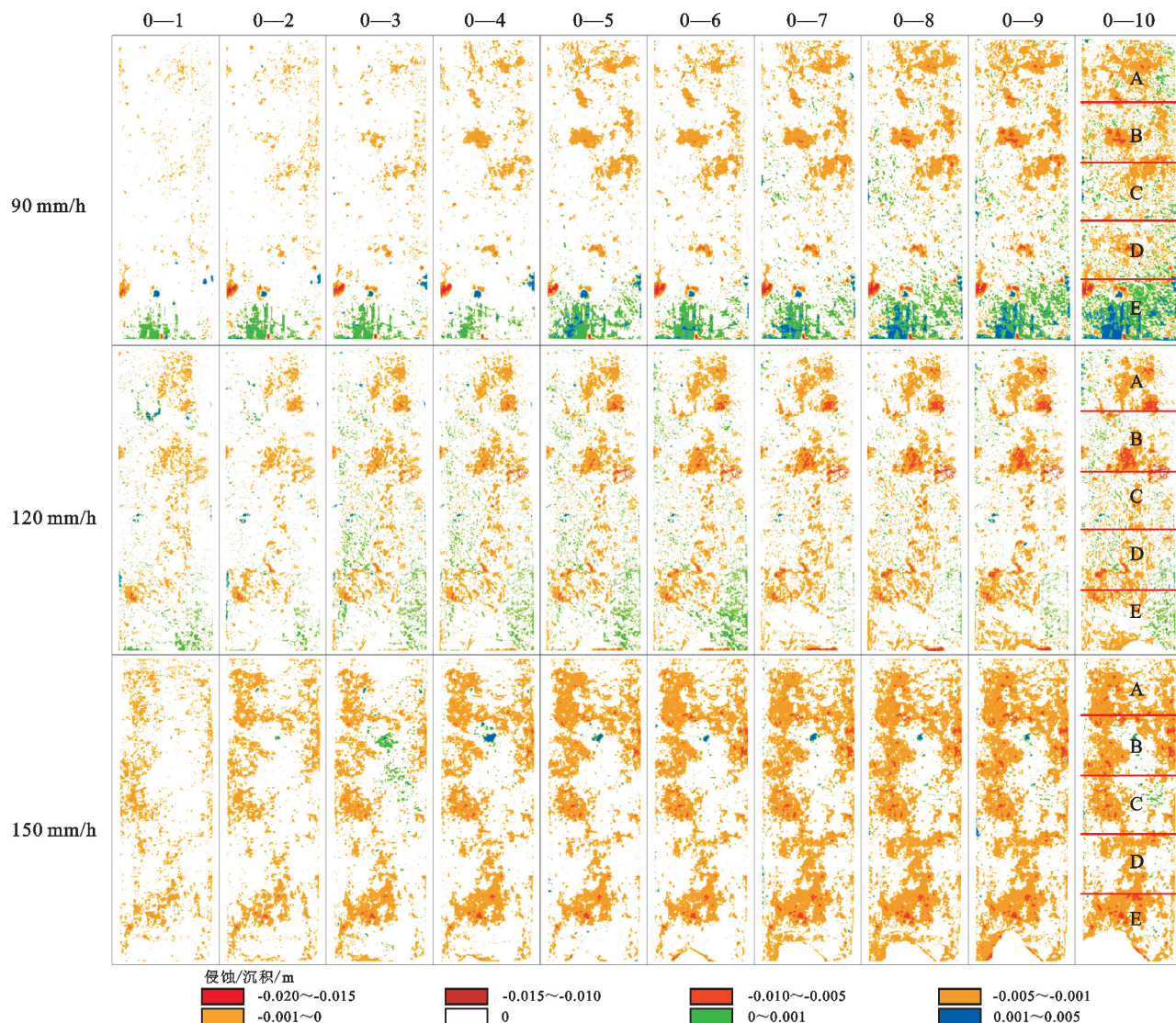
2.2.1 坡面径流流型流态 对比分析连续 10 场降雨试验的雷诺数可知(图 4A),不同雨强下,各坡段雷诺数随试验场次的变化规律基本一致,呈先增加后减小最终逐渐趋于稳定的趋势。同一雨强下, D 坡段的雷诺数最大, C 坡段次之, B 坡段最小。在 90, 120 mm/h 雨强下, B, C 和 D 坡段的雷诺数在前两场波动最大; 150 mm/h 雨强, 第三场的雷诺数达到最大。在整个试验期间, 雷诺数均小于 500, 坡面径流为层流状态。

对比分析连续 10 场降雨试验的弗劳德数可知(图 4B),不同雨强下,各坡段弗劳德数随试验场次增加总体上呈先减小后缓慢上升最终趋于稳定的趋势; B 和 C 坡段弗劳德数值多小于 1, 处于缓流状态, D 坡段弗劳德数值多大于 1, 处于急流状态。同一雨强下, D 坡段的弗劳德数最大, C 坡段次之, B 坡段最小。在 90, 120 mm/h 雨强下, B, C 和 D 坡段弗劳德数在第三场发生转折; 而 150 mm/h 雨强下, 在第五场发生转折。

2.2.2 坡面径流阻力系数 对比分析连续 10 场降

雨试验的 Darcy-Weisbach 阻力系数可知(图 5)。不同雨强下,各坡段阻力系数随试验场次增加总体呈先增加后减小最终逐渐趋于稳定的趋势,其中 B 坡段波动最大,C 坡段次之,D 坡段最小。同一雨强下,B

坡段阻力系数最大,C 坡段次之,D 坡段最小。在 90 mm/h 雨强下,B, C 和 D 坡段的阻力系数在第四场达到最大值;120 mm/h 雨强,第三场达到最大值;150 mm/h 雨强,第五场达到最大值。



注:0-1,0-2,...,0-10 为累计试验后结果。

图 2 坡面侵蚀沉积空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of erosion and deposition on slope

2.2.3 坡面径流水动力参数 对比分析连续 10 场降雨试验的水动力学参数可知(图 6),不同雨强下,径流剪切力、过水断面单位能量随试验场次的变化规律与 Darcy-Weisbach 阻力系数相同,但相比于 Darcy-Weisbach 阻力系数,各坡段的径流剪切力、过水断面单位能量波动减小。同一雨强下,径流剪切力在 B 坡段最大,C 坡段次之,D 坡段最小;过水断面单位能量在 B, C 和 D 坡段值较为接近。在 90 mm/h 雨强下,B, C 和 D 坡段的径流剪切力在第四场达到最大值;120 mm/h 雨强,第三场达到最大值;150 mm/h 雨强,第五场达到最大值。

对比分析连续 10 场降雨试验的径流功率可知,不同雨强下,各坡段径流功率随试验场次的变化规律

与雷诺数相同,同一雨强下,径流功率在 B, C 和 D 坡段随坡长延长无明显规律。在 90,120 mm/h 雨强下,B, C 和 D 坡段的径流功率在前两场波动最大;150 mm/h 雨强,第三场的径流功率达到最大。

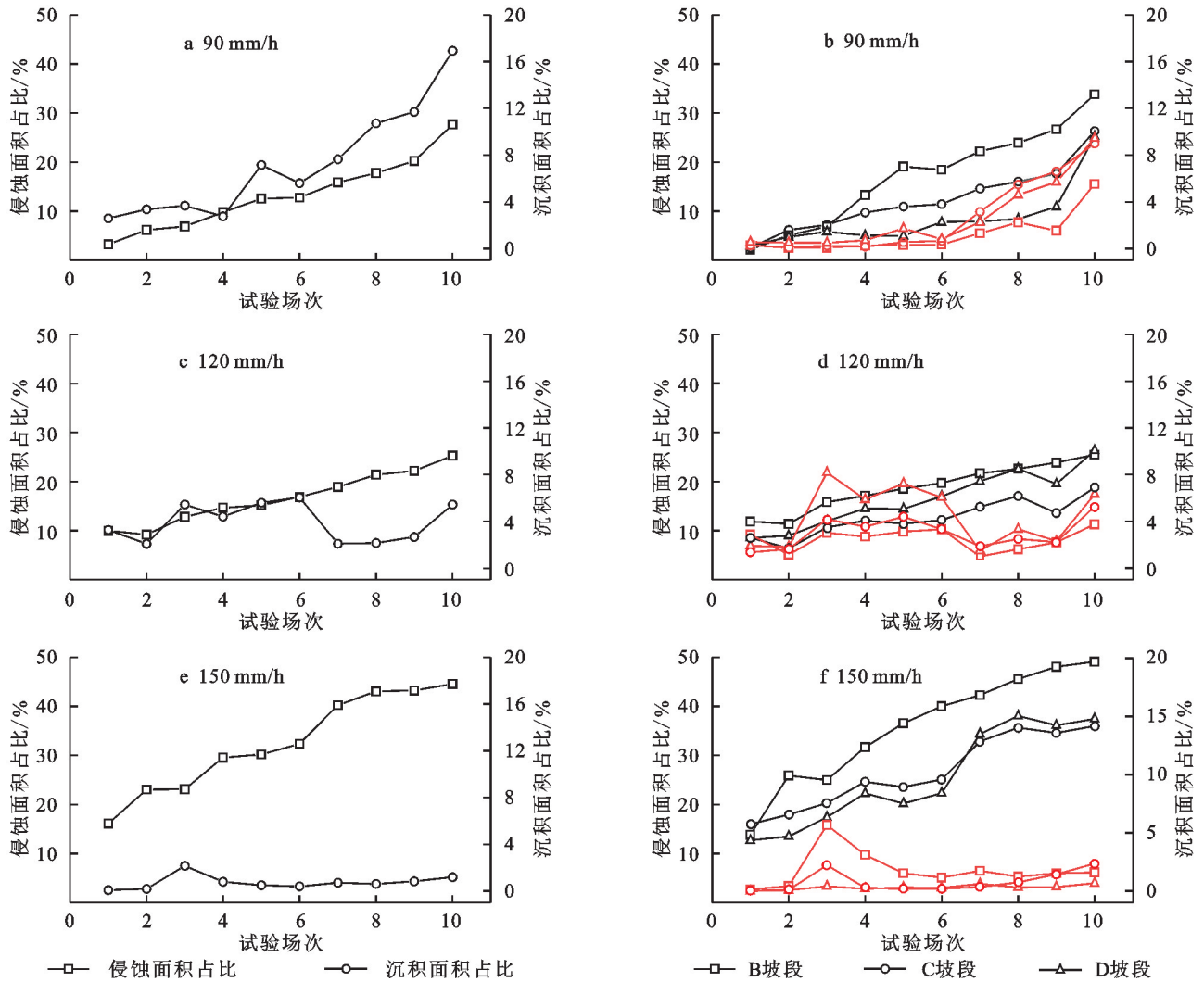
对比分析连续 10 场降雨试验的单位径流功率可知,不同雨强下,各坡段单位径流功率随试验场次的变化规律与弗劳德数相同。D 坡段的单位径流功率最大,C 坡段次之,B 坡段最小。在 90,120 mm/h 雨强下,B, C 和 D 坡段单位径流功率在第三场达到最小值;而 150 mm/h 雨强下,在第五场达到最小值。

2.3 侵蚀产沙与水力学参数的相关性

相关分析(表 1)表明,在 90 mm/h 雨强下,B, C

坡段侵蚀速率、产沙速率与各水动力学参数均无关; D 坡段侵蚀率与雷诺数、径流功率、径流剪切力、过水断面单位能量均呈负相关关系 ($p < 0.05$), 与弗劳德数呈正相关关系 ($p < 0.05$), 与 Darcy-Weisbach 阻力系数和单位径流功率无关, 而产沙率与弗劳德数、径流剪切力均呈正相关关系 ($p < 0.05$), 与其他水力学参数无关。在 120 mm/h 雨强下, B 坡段产沙率与弗劳德数、单位径流功率过水断面单位能量呈正相关关系 ($p < 0.05$), 与 Darcy-Weisbach 阻力系数呈径流剪

切力呈负相关关系 ($p < 0.05$), 与雷诺数、径流功率无关, 而产沙率均与各水动力学参数无关; C 坡段侵蚀率、产沙率均与各水动力学参数无关; D 坡段侵蚀率与雷诺数、径流剪切力、径流功率、过水断面单位能量均呈负相关关系 ($p < 0.01$), 与弗劳德数呈正相关关系 ($p < 0.01$), 与 Darcy-Weisbach 阻力系数和单位径流功率无关, 而产沙率与各水动力学参数无关。在 150 mm/h 雨强下, B, C 和 D 坡段的侵蚀率、产沙率均与各水动力学参数无关。



注: a, c, e 为坡面侵蚀、沉积面积占总面积比重; b, d, f 为 B, C, D 坡段侵蚀、沉积面积占其坡段总面积比重, 黑色为侵蚀面积占比, 红色为沉积面积占比。

图 3 侵蚀、沉积面积占比随试验场次变化

Fig. 3 The proportion of erosion and deposition area varies with the test times

对比分析侵蚀率和水力学参数相关性强弱可知: 径流功率与侵蚀率的关系最优, R^2 达到 0.67, 雷诺数、径流剪切力、过水断面单位能量关系次之, 弗劳德数关系最弱, 故径流功率是影响坡面侵蚀过程的重要水动力学参数。对比分析产沙率和水力学参数的相关性强弱可知: Darcy-Weisbach 阻力系数、单位径流功率与产沙率的关系最优, R^2 达到 0.74, 弗劳德数、

径流剪切力关系次之, 过水断面单位能量关系最弱, 故 Darcy-Weisbach 阻力系数和单位径流功率是影响坡面产沙过程的重要水动力学参数。

3 讨论

3.1 不同雨强梯度下坡面侵蚀沉积时空异质性

研究基于野外自然坡面径流小区进行模拟降雨

试验,结合 TLS 技术获取高精度地形数据进行侵蚀沉积时空分布特征研究。研究表明:在 90 mm/h 雨强下,侵蚀主要发生在 A, B, C 和 D 坡段,而沉积主要发生在 E 坡段,可能原因是 90 mm/h 雨强下,径流到达 E 坡段时,携沙量增大,超过径流携沙能力,部分泥沙发生沉积^[8]。当雨强达到 120, 150 mm/h 时,坡面主要以侵蚀为主,其中 D, E 遭受侵蚀较重,沉积减小且比较分散,主要原因是降雨历时短、强度大,径流携沙能力增强,径流下切力增大所致^[9]。随着雨强的增加, B, C 和 D 坡段的侵蚀面积增长幅

度增大,而沉积面积增长幅度减小,说明降雨强度对侵蚀沉积面积影响较大^[15]。90, 150 mm/h 下, B 坡段侵蚀面积最大, C 坡段次之, D 坡段最小,主要是因为降雨试验中,侵蚀方式以溅蚀和面蚀为主, B 坡段受到溅蚀作用较大;当坡面径流到达 C 坡段和 D 坡段会在坡面上形成薄层保护流,减弱雨滴溅蚀作用^[22]。120 mm/h 雨强下,各坡段侵蚀面积大小与其他两个雨强有所不同, B 坡段最大, D 坡段次之, C 坡段最小,可能原因是野外自然坡面在 C 坡段坡度差异导致结果不同^[23]。

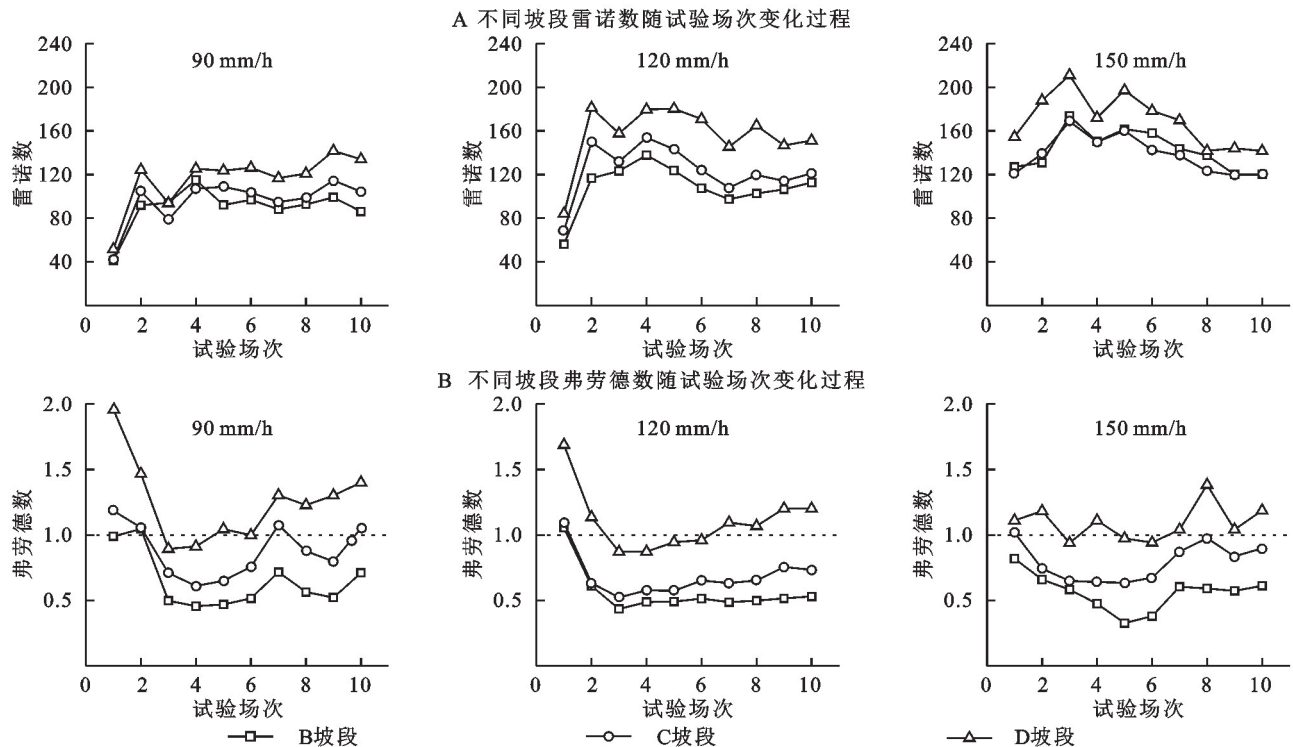


图 4 不同雨强下各坡段流型流态随试验场次变化

Fig. 4 Flow parameters of each slope section varies with the test times under different rainfall intensities

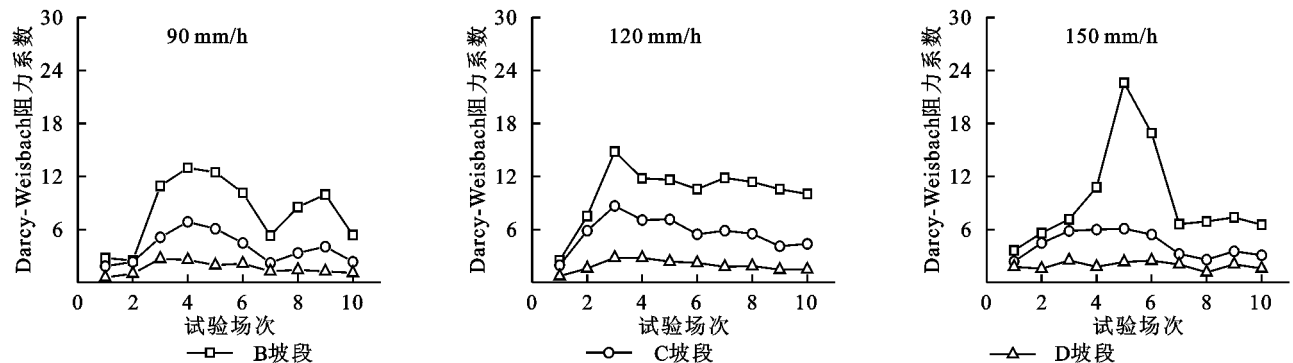


图 5 不同雨强下各坡段 Darcy-Weisbach 阻力系数随试验场次变化

Fig. 5 Darcy-Weisbach coefficient of each slope section varies with the test times under different rainfall intensities

3.2 不同断面侵蚀产沙机理

降雨及径流侵蚀过程会对坡面流的水动力特性产生重要影响。不同雨强下, B, C 和 D 坡段各水动力学参数随试验场次的增加呈现前期波动变化, 后期趋于稳定的趋势, 主要原因是径流量和地表粗糙度变

化所致^[15]。前五场试验过程中, 坡面侵蚀范围处于增加阶段, 径流量和地表粗糙度变化波动较大, 主要表现为在第一场至第二场时, 可能是因为由于第一场降雨作用, 雨滴的击溅作用会把表层输送的土壤压实, 导致地表粗糙度降低, 坡面流速增大, 且流深增大, 故雷

雷诺数、Darcy-Weisbach 阻力系数、径流剪切力、径流功率和过水断面单位能量增大,弗劳德数和单位径流功率减小^[24];第二场至第三场时,可能是因为第三场试验初期,坡面流速大,下切力大,导致坡面出现侵蚀加重,地表起伏变化大,地表粗糙度增大、流速减小,流深加深,故雷诺数、弗劳德数、单位径流功率、径流功率、过水断面单位能量减小,Darcy-Weisbach 阻力系数、径流剪切力增大^[25];第四场时,可能是因为由于径流量增大,地表大颗粒团聚体随径流输移,地表相对光

滑,导致坡面阻力变小,流速增大,故雷诺数、Darcy-Weisbach 阻力系数、径流剪切力、径流功率、单位径流功率和过水断面单位能量增大^[26];在第五场时,随着土体逐渐饱和而达到稳定入渗率,径流量和径流流宽变化波动变小,且流深随之稳定,而流速缓慢增大,导致各水动力学参数逐渐趋于稳定状态^[27]。随着雨强的增大,水流水深不断变化而不稳定,水面宽度则有所增加,故各水动力学参数随试验场次的变化有所差异,但整体变化趋势相同^[25]。

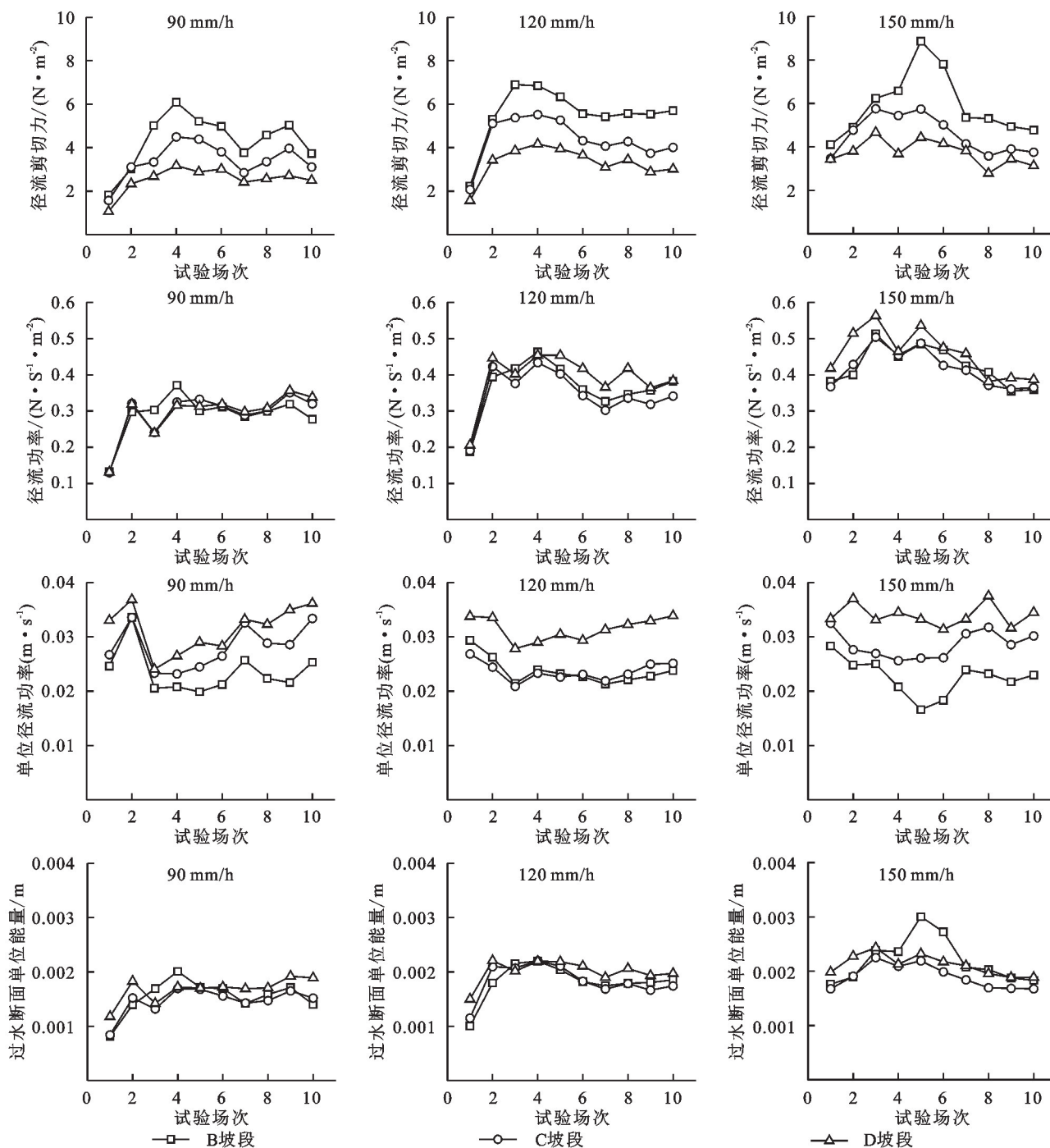


图 6 不同雨强下各坡段水动力学参数随试验场次变化

Fig. 6 Hydrodynamic parameters of each slope section varies with the test times under different rainfall intensities

同一雨强下,距坡顶距离长度与雷诺数、弗劳德数、单位径流功率成正比,与径流剪切力、Darcy-Weisbach 阻

力系数成反比,主要因为水动力学参数随流速、流深和流宽计算而来,平均流速与流深均与坡长的延长成正比,导致水力学参数随之变化^[28],张锐波等^[6]也认为坡长与弗劳德数和阻力系数呈正相关,与径流剪切力无关,可能其结论基于室内降雨试验得出,与野外降雨试验有差异。试验过程中,各坡段的雷诺数雨强增大不断增大,但均小于 500,参考明渠水流划分标准认为降雨所产生的坡面径流属于层流,该结果与吕春娟等^[11]对黄土

高原坡面过程中径流流态研究结果一致,说明黏滞力对流场的影响大于惯性力,流场中流速的扰动会因黏滞力而衰减,流体流动稳定,坡面流流型为层流。试验期间,B 和 C 坡段总体上处于缓流状态,与肖培青等^[29]利用室内模拟降雨试验得出坡面不同断面径流流态从缓流演变为急流状态结果不一致,可能是因为原状土和回填土的物理性质不同,在场次尺度上,野外坡面可能需要更长时间才能从缓流演变为急流^[30]。

表 1 不同雨强下各坡段水力学参数与侵蚀率、产沙率的线性相关性分析

Table 1 Correlation analysis of hydraulic parameters with erosion and sediment rate in differernt slope section under different Rainfall intensity

指标	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	坡段	雷诺数 (Re)	弗劳德数 (Fr)	Darcy-Weisbach 阻力系数(f)	径流 剪切力(τ)	径流功率 (ω)	单位径流 功率(P)	过水断面 单位能量(E)
侵蚀率/(g·min ⁻¹)	90	B	0.17	-0.12	0.08	0.16	0.17	-0.05	0.15
		C	-0.01	0.11	-0.04	-0.04	0.01	0.06	-0.01
		D	-0.59**	0.42*	-0.14	-0.55*	-0.61**	<0.01	-0.48*
	120	B	-0.28	0.36	-0.31	-0.33	0.27	0.30	-0.32
		C	-0.29	0.24	-0.08	-0.20	0.27	0.08	-0.23
		D	-0.65**	0.60**	-0.40	-0.62**	-0.67**	0.16	-0.62**
	150	B	<0.01	0.01	0.08	0.05	<0.01	-0.02	0.05
		C	0.01	0.04	-0.02	<0.01	0.01	0.08	<0.01
		D	0.01	0.08	-0.07	-0.01	0.01	0.15	0.02
产沙率/(g·min ⁻¹)	90	B	0.22	-0.14	0.11	0.20	0.23	-0.04	0.20
		C	-0.06	0.13	-0.09	-0.11	-0.06	0.04	-0.08
		D	-0.37	0.45*	0.27	0.54*	-0.38	0.07	-0.26
	120	B	-0.34	0.69**	-0.74**	-0.57*	-0.34	0.74**	0.50*
		C	-0.17	0.14	<0.01	-0.07	-0.16	<0.01	-0.09
		D	0.07	0.10	-0.08	-0.10	-0.08	0.03	0.06
	150	B	<0.01	0.01	0.03	0.01	<0.01	<0.01	0.01
		C	0.02	0.03	<0.01	<0.01	0.01	0.06	0.02
		D	-0.04	0.01	<0.01	-0.03	0.05	<0.01	-0.03

注:**表示在 0.01 的水平上显著;*表示在 0.05 的水平上显著。

降雨及径流是坡面侵蚀产沙的来源,侵蚀产沙是径流对土壤分离和泥沙搬运作用过程的体现^[15]。田培等^[27]通过研究坡面侵蚀产沙的水动力学机制发现,侵蚀产沙率与径流剪切力、径流功率、单位径流功率、雷诺数、弗劳德数呈正相关关系,与 Darcy-Weisbach 阻力系数呈负相关关系,与本研究结果不一致,主要原因可能是由于野外坡面与室内坡面土壤物理性质不一致,且野外坡面受到植被根系、温度和风力等因素的影响。通过各水力学参数与侵蚀率、产沙率的线性回归分析可知,本试验条件下,径流功率是坡面侵蚀过程重要的水动力学参数,Darcy-Weisbach 阻力系数和单位径流功率是坡面产沙过程的水动力学参数。

本研究利用 TLS 技术监测不同降雨梯度下野外自然坡面侵蚀产沙空间时空分布特征,对不同坡段的水力学参数与侵蚀率、产沙率进行量化分析。目

前,大多数学者通过室内模拟降雨试验和传统的监测方法,关注整个坡面整体侵蚀产沙过程^[15,25,27]。但本研究亦有不足,如未考虑到地形变化、单场次试验水动力学参数过程变化、多因素预测土壤侵蚀产沙的定量关系等。基于水动力学参数,融合地形指标、土壤性质指标预测土壤侵蚀率将进一步增加预测的科学性,也是本研究下一步需要考虑的问题。

4 结论

(1) 在 90 mm/h 雨强下,侵蚀主要发生在 A, B, C 和 D 坡段,侵蚀主要发生在 E 坡段;120,150 mm/h 时,坡面主要以侵蚀为主,其中 D, E 遭受侵蚀较重,沉积减小且比较分散。其中侵蚀面积占比在 90,150 mm/h 下,B 坡段最大,C 坡段次之,D 坡段最小;120 mm/h 雨强下,B 坡段最大,D 坡段次之,C 坡段最小。

(2) 连续降雨作用下,水动力学参数影响坡面粗糙度变化,坡面粗糙度又反作用于水动力学参数,致使水动力学参数波动变化。当土体逐渐饱和达到稳定的入渗,水动力学参数逐渐趋于稳定。各坡段雷诺数、Darcy-weisbach 阻力系数、径流剪切力、径流功率和过水断面单位能量等水动力学参数均呈先迅速增长至最高值后缓慢下降最终趋于稳定的趋势,弗劳德数和单位径流功率均呈先迅速下降至最低值后缓慢上升最终趋于稳定的趋势。同一雨强下,距坡顶距离长度与雷诺数、弗劳德数、单位径流功率成正比,与径流剪切力、Darcy-Weisbach 阻力系数成反比。

(3) 90,120 mm/h 雨强下,B 和 C 坡段侵蚀率与水动力学参数无关,D 坡段侵蚀率与径流功率、雷诺数极显著相关。90 mm/h 雨强下,D 坡段产沙率与弗劳德数和径流剪切力显著相关。120 mm/h 雨强下,B 坡段产沙率与 Darcy-Weisbach 阻力系数、单位径流功率、弗劳德数极显著相关。150 mm/h 雨强下,各坡段与水力学参数均无关。对比 R^2 大小,认为径流功率是野外自然坡面侵蚀过程重要的水动力学参数,Darcy-Weisbach 阻力系数和单位径流功率是野外自然坡面产沙过程重要的水动力学参数,二者之间皆为线性函数关系。

参考文献(References):

- [1] Yao C, Zhang Q W, Wang C F, et al. Response of sediment transport capacity to soil properties and hydraulic parameters in the typical agricultural regions of the Loess Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2023,879:163090.
- [2] 王飞,山仑,戈文艳,等.黄土高原水土保持高质量发展研究重点[J].*中国水土保持*,2022(9):61-64.
Wang F, Shan L, Ge W Y, et al. Research focus on high-quality development of soil and water conservation in the Loess Plateau[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2022(9):61-64.
- [3] Guo M M, Wang W L, Li J M, et al. Runoff characteristics and soil erosion dynamic processes on four typical engineered landforms of coalfields: An in-situ simulated rainfall experimental study[J]. *Geomorphology*, 2020, 349:106896.
- [4] Sun L Q, Zhang B, Yin Z M, et al. Assessing the performance of conservation measures for controlling slope runoff and erosion using field scouring experiments[J]. *Agricultural Water Management*, 2022,259:107212.
- [5] Zhao G J, Gao P, Tian P, et al. Assessing sediment connectivity and soil erosion by water in a representative catchment on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2020,185:104284.
- [6] 张锐波,张丽萍,付兴涛.坡面侵蚀产沙与水力学特征参数关系模拟[J].*水土保持学报*,2017,31(5):81-86.
Zhang R B, Zhang L P, Fu X T. Research on relationships between sediment yield and hydraulics parameters on slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017,31(5):81-86.
- [7] 田培,潘成忠,许新宜,等.坡面流速及侵蚀产沙空间变异性试验[J].*水科学进展*,2015,26(2):178-186.
Tian P, Pan C Z, Xu X Y, et al. Field experiment investigation into the spatial variability of overland flow velocity and soil erosion[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(2):178-186.
- [8] 徐振剑,权鑫,史红伟,等.黄土坡面侵蚀过程与侵蚀-沉积空间分布特征[J].*陕西师范大学学报:自然科学版*, 2021,49(6):98-105.
Xu Z J, Quan X, Shi H W, et al. Erosion process and spatial distribution characteristics of erosion-deposition on the loess slope[J]. *Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition*, 2021,49(6):98-105.
- [9] 王全辉,胡国庆,董元杰,等.磁性示踪条件下坡面土壤侵蚀产流、产沙及侵蚀空间分异特征[J].*水土保持学报*,2012,26(2):21-23,28.
Wang Q H, Hu G Q, Dong Y J, et al. Runoff and sediment yield and spatial variation of soil erosion slope under magnetic tracing condition[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012,26(2):21-23,28.
- [10] Jafarpoor A, Sadeghi S H, Darki B Z, et al. Changes in morphologic, hydraulic, and hydrodynamic properties of rill erosion due to surface inoculation of endemic soil cyanobacteria[J]. *Catena*, 2022,208:105782.
- [11] Xu X M, Zheng F L, Wilson G V. Flow hydraulics in an ephemeral gully system under different slope gradients, rainfall intensities and inflow conditions[J]. *Catena*, 2021,203:105359.
- [12] 吕春娟,张徐,毕如田,等.间歇降雨对铁尾砂重构坡面侵蚀水动力学特性的影响[J].*农业工程学报*,2020,36(11):74-85.
Lyu C J, Zhang X, Bi R T, et al. Effects of intermittent rainfall on hydrodynamics characteristics of erosion on reconstructed slopes of iron tailings[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020,36(11):74-85.
- [13] 丁文峰,张平仓,王爱娟,等.几种坡面土壤侵蚀测量方法的比较研究[J].*长江科学院院报*,2015,32(11):14-18.
Ding W F, Zhang P C, Wang A J, et al. Comparative study of several measuring methods for soil erosion on slope[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015,32(11):14-18.
- [14] van der Wal D, van Dalen J, Willemsen P W J M, et al.

- Gradual versus episodic lateral saltmarsh cliff erosion; evidence from terrestrial laser scans(TLS) and surface elevation dynamics(SED) sensors[J]. *Geomorphology*, 2023,426:108590.
- [15] 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):14-20,30.
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):14-20,30.
- [16] Tian P, Pan C Z, Xu X Y, et al. A field investigation on rill development and flow hydrodynamics under different upslope inflow and slope gradient conditions [J]. *Hydrology Research*, 2020,51(5):1201-1220.
- [17] Lou Y C, Gao Z L, Sun G F, et al. Runoff scouring experimental study of rill erosion of spoil tips[J]. *Catena*, 2022,214:106249.
- [18] 高健健,艾绍周,党维勤,等.辛店沟水土保持示范园建设成效[J].*中国水土保持*,2022(2):30-33.
Gao J J, Ai S Z, Dang W Q, et al. Construction effect of soil and water conservation pilot zone in Xindian gully[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2022(2):30-33.
- [19] 杨帆,潘成忠.黄土丘陵沟壑区多年生草地的保水固土效益[J].*水土保持通报*,2016,36(2):300-306.
Yang F, Pan C Z. Effects of perennial grassland on soil and water conservation in hilly region of Loess Plateau [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016,36(2):300-306.
- [20] 张宽地,王光谦,吕宏兴,等.坡面浅层明流流态界定方法之商榷[J].*实验流体力学*,2011,25(4):67-73.
Zhang K D, Wang G Q, Lu H X, et al. Discussion on flow pattern determination method of shallow flow on slope surface [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2011,25(4):67-73.
- [21] Li L, Nearing M A, Nichols M H, et al. Using terrestrial LiDAR to measure water erosion on stony plots under simulated rainfall[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2020,45(2):484-495.
- [22] 杨春霞,李莉,王佳欣,等.坡沟系统侵蚀时空分布特征试验研究[J].*人民黄河*,2017,39(1):95-97.
Yang C X, Li L, Wang J X, et al. Experimental study on spatial and temporal distribution characteristics of erosion in the slope-gully system[J]. *Yellow River*, 2017,39(1):95-97.
- [23] 郭军权,王文龙.坡度对浅沟侵蚀产沙的野外放水冲刷试验影响[J].*水土保持学报*,2019,33(4):87-92,212.
Guo J Q, Wang W L. Experimental study on the effects of field scouring slope on ephemeral gully erosion and sediment yield[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019,33(4):87-92,212.
- [24] 梁心蓝,赵龙山,吴佳,等.地表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.
- [25] 郭慧莉,孙立全,吴淑芳,等.黄土高原地区鱼鳞坑坡面侵蚀演化过程及水力学特征[J].*土壤学报*,2017,54(5):1125-1135.
Guo H L, Sun L Q, Wu S F, et al. Erosion evolution processes and hydraulic characteristics analysis of fish-scale pit slop on Loess Plateau Region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017,54(5):1125-1135.
- [26] 吴秋菊,吴发启,王林华.土壤结皮坡面流水动力学特征[J].*农业工程学报*,2014,30(1):73-80.
Wu Q J, Wu F Q, Wang L H. Hydrodynamic characteristics of overland flow under soil crusts condition [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014,30(1):73-80.
- [27] 田培,仇浩然,冯宇,等.雨强和坡度对红壤坡面产流产沙及侵蚀动力过程影响[J].*水土保持研究*,2020,27(6):1-8.
Tian P, Qiu H R, Feng Y, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment production and erosion dynamic process on red soil slope[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020,27(6):1-8.
- [28] 赵小娥,魏琳,曹叔尤,等.强降雨条件下坡面流的水动力学特性研究[J].*水土保持学报*,2009,23(6):45-47,107.
Zhao X E, Wei L, Cao S Y, et al. Study on characteristics of overland flow with higher rain intensity[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009,23(6):45-47,107.
- [29] 肖培青,郑粉莉,姚文艺.坡沟系统坡面径流流态及水力学参数特征研究[J].*水科学进展*,2009,20(2):236-240.
Xiao P Q, Zheng F L, Yao W Y. Flow pattern and hydraulic parameter characteristics in hillslope-gullys-lope system[J]. *Advances in Water Science*, 2009,20(2):236-240.
- [30] 聂良佐.原状土结构损伤重塑后强度、变形和渗透性变化机理研究[J].*岩土工程界*,2008(7):23-25.
Nie L Z. Study on the change mechanism of strength, deformation and permeability of undisturbed soil structure after damage and remodeling [J]. *Geotechnical Engineering World*, 2008(7):23-25.