

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.03.014

张文博, 韩玉国, 邱业, 等. 降雨条件下风速对迎风坡坡面细沟侵蚀特征的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(3): 12-18, 28.

ZHANG Wenbo, HAN Yuguo, QU Ye, et al. Effect of wind speed on the characteristics of rill erosion on windward slope under rainfall conditions [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3): 12-18, 28.

降雨条件下风速对迎风坡坡面细沟侵蚀特征的影响

张文博¹, 韩玉国^{1,2}, 邱业¹, 曲芝旭¹, 吴梦雨¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083)

摘要: [目的] 为明确风力作用下迎风坡坡面细沟侵蚀特征。[方法] 采用人工模拟风驱雨试验, 研究在不同风速条件(0, 3, 5, 7 m/s)下迎风坡坡面水沙过程变化规律及细沟形态特征。[结果] 与无风坡面相比, 迎风坡面产流时间和跌坎出现时间分别增加 20.59%~47.06% 和 33.10%~137.78%, 坡面平均流速减小 12.86%~22.53%; 产流率和产沙率随风速的增加而显著减少 ($p < 0.05$), 不同风速条件下, 迎风坡面产流率变化趋势相近, 随着降雨进行产流率逐渐增加, 一段时间后保持稳定, 不同风速下的阶段性无明显差异。产沙率随降雨历时的延长整体呈先迅速增加后缓慢下降并趋于稳定趋势, 产沙率发生变化的节点与跌坎出现时间基本一致。细沟宽度、深度及其波动程度随风速的增加而减小; 细沟宽度、深度及其波动程度随着风速增加而减小; 细沟宽深比和细沟倾斜度分别为 1.40~1.69 和 13.47°~14.76°, 均随着风速的增加而增大; 不同风速条件下, 细沟体积、细沟割裂度和细沟密度分别为 $4.39 \times 10^3 \sim 10.27 \times 10^3 \text{ cm}^3$, 0.024~0.042, 2.03~2.92 m/m², 三者均随风速的增加而减小。[结论] 细沟体积、细沟密度和割裂度与坡面侵蚀量均呈极显著正相关关系, 是表征迎风坡坡面细沟形态的优选指标。

关键词: 细沟侵蚀; 风速; 迎风坡; 细沟形态

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)03-0012-07

Effects of Wind Speed on the Characteristics of Rill Erosion on Windward Slope Under Rainfall Conditions

ZHANG Wenbo¹, HAN Yuguo^{1,2}, QIU Ye¹, QU Zhixu¹, WU Mengyu¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] This study was aimed to elucidate wind-induced rill erosion characteristics on the windward slope. [Methods] Artificial simulated wind-driven rain experiments were conducted. The study investigated changes in water and sediment processes as well as rill morphology under different wind speed conditions (0, 3, 5, and 7 m/s). [Results] Compared to slopes without wind, the windward slope exhibited a 20.59%~47.06% increase in flow generation time and a 33.10%~137.78% increase in the occurrence of falling ridges. The average slope flow velocity decreased by 12.86%~22.53%. Runoff and sediment production rates notably decreased with increasing wind speed ($p < 0.05$). The runoff production rate on windward slopes followed a similar trend under different wind speeds, gradually increasing with rainfall before stabilizing over time, with no significant differences observed among stages at different wind speeds. Sediment yield rates increased rapidly with prolonged rainfall duration, followed by a gradual decrease and stabilization. Nodes of sediment yield rate changes aligned closely with the occurrence of falling ridges. Rill dimensions (width, depth, fluctuation degree) decreased with rising wind speed. The width-depth ratio and rill inclination ranged from 1.40 to 1.69 and 13.47 to 14.76 degrees, respectively, increasing with higher wind speeds. Under various wind speed conditions, rill volume, splitting degree, and density ranged from 4.39 to

收稿日期: 2023-09-12

修回日期: 2023-10-23

录用日期: 2023-12-23

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-05-07

资助项目: 国家自然科学基金项目 (51879005)

第一作者: 张文博 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: wbzhang0528@163.com

通信作者: 韩玉国 (1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与养分流失研究。E-mail: yghan@bjfu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

10.27 cm³, 0.024 to 0.042, and 2.03 to 2.92 m/m², respectively, all decreasing with increasing wind speed. [Conclusion] The volume, density and degree of fragmentation of rills are all significantly positively correlated with the amount of slope erosion, making them the preferred indicators for characterizing the morphology of rills on windward slopes.

Keywords: rill erosion; wind speed; windward slope; rill morphology

Received: 2023-09-12

Revised: 2023-10-23

Accepted: 2023-12-23

Online(www.cnki.net): 2024-05-07

细沟侵蚀是坡耕地土壤侵蚀最广泛存在的侵蚀形式之一,细沟侵蚀量占坡耕地总侵蚀量的70%以上,是导致土地退化、面源污染等环境问题的重要原因^[1-2]。影响细沟侵蚀的最直接因素是降雨径流侵蚀力和土壤抗侵蚀性能,其他因素则是通过削弱或者加强两类因素而对细沟侵蚀产生影响^[3]。

降雨是产生细沟侵蚀的必要前提和动力来源,其引发的地表径流为土壤颗粒及土壤养分的流失提供良好的物质载体和驱动力^[4]。在自然界中,无风天气里发生较大降水量的概率较低,而暴雨的发生伴随着风的因素^[5]。目前,已有学者开展风驱雨对坡面侵蚀的影响研究,如 ISERLOH 等^[6]和 MARZEN 等^[7-8]重点研究不同雨强及风速对溅蚀过程的影响表明,风速的增加显著增加雨滴对土壤颗粒的击溅侵蚀量; AN 等^[9]研究表明,风驱雨强度一定时,风向对坡面产流产沙及氮素流失的影响具有不确定性,不同风向通过改变雨滴运动方向与坡面流向间的夹角改变坡面入渗、水文特征及土壤结皮过程,是造成土壤侵蚀及养分流失差异主要原因之一。但目前细沟侵蚀的相关研究及土壤侵蚀模型等却忽略或低估风对细沟侵蚀过程的影响^[10]。

“风驱雨”是在大气中受到风场作用而具有水平速度分量的倾斜下落雨滴^[11-12],是自然界降雨存在的主要形式,尤其在迎风坡。暴雨形成需要有充足的水汽供应及有利的动力抬升条件^[13],迎风坡可迫使低空急流或气旋上升凝结并产生降雨。ZHANG 等^[14]研究指出,北京“7.21”极端降雨是偏东风在华北西部太行山局地迎风坡触发对流,西南低空急流在北京北部迎风坡和喇叭口地形处辐合和抬升,造成局地特大暴雨。大量研究^[6,15-16]表明,迎风坡降雨量往往高于平地、背风坡等地形,导致形成更多的地表径流,细沟发展使地表径流通过细沟网不断汇集,输沙能力增强,从而加速坡面细沟的发展过程,促进坡面径流侵蚀,加剧水土流失。因此,探究迎风坡坡面细沟侵蚀的影响有重要的现实意义。

鉴于此,通过风驱雨模拟试验(人工降雨器与轴

流风机结合),研究风力作用下迎风坡坡面细沟侵蚀特征,总结不同风速下细沟的发生、发育过程与形态演化特征,以期深化细沟侵蚀过程的机理研究,并为坡耕地细沟侵蚀治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤为北京市海淀区苏家坨镇农田 0—25 cm 土层土壤,该区域长期平均年降水量和平均风速分别为 644 mm, 1.8~3.0 m/s,具有高度季节性变化。试验土壤类型为褐土,属砂质壤土,其中,黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.02 mm)、砂粒(0.02~2.0 mm)的含量分别为 2.64%, 32.96%, 64.40%。

1.2 试验装置

试验于 2019 年 8 月在国家林业局首都圈森林生态系统国家定位研究站人工模拟降雨大厅进行,通过室内人工降雨系统与风力输出装置仿真模拟自然降雨情况。试验装置由人工模拟降雨系统、轴流风机及试验土槽组成,模拟降雨系统采用旋转下喷式模拟降雨系统,有效降雨高度为 12 m,降雨面积为 256 m²,均匀度可达 85%以上^[17]。风源动力装置由 4 台德国科瑞特风机(DXF-I)组合而成,每台风机的直径为 1 m,风口尺寸为 2 m×2 m,风量为 28 490 m³/h,全压为 700 Pa,最大转速为 960 r/min,最大功率 11 kW,电压 380 V。通过调节每台风机的功率进而控制风速的大小,并在轴流风机机罩上安装四边形的蜂窝网,以导直气流、提高稳定段内的气流流动均匀性,风机同一截面风速均匀度可达 80%以上。试验所用土槽规格为 3 m×0.5 m×0.4 m(长×宽×高),土槽底部打孔用以渗水,试验槽下部设置“V”形集流口,以便收集坡面产流产沙,土槽填土模拟天然裸坡。

1.3 试验设计

根据 1991—2020 年北京市气象资料的调查和分析,北京市平均风速和最大风速分别为 2~3, 7~8 m/s,因此,设计风机功率为 0, 20, 30, 40 H_z,控制对应实测风速为 0, 3, 5, 7 m/s 的 4 个处理,每个处理包

含 3 个重复,试验均在图 1 的试验区域内进行。根据北京地区侵蚀性强降雨特征^[18],选择历时为 90 min 的 60 mm/h 降雨强度侵蚀性降雨。由于细沟侵蚀在 10°~30°的裸露坡耕地上表现最明显^[19],而 25°是坡耕地研究的上限,因此,设计试验坡度为 15°。

1.4 试验方法

为保证水分能够渗出,土槽底部每隔 10 cm 间距打孔,孔径为 2.5 mm,并在底部平置 1 层纱布,然后铺 5 cm 厚的河道粗砂。之后,在粗砂表层再平铺 1 层纱布,纱布上以 1.31 g/cm³ 的土壤容重填装 30 cm 厚的试验用土。为准确控制土壤容重,按照每 5 cm 1 层的厚度进行分层填装,每层均匀填装完成后进行打毛处理以防止土层间相互滑动,同时,注意将土槽四周压实以防止边壁效应。为保证试验前期土壤条件的一致性,每场试验开始前 1 天,采用 15 mm/h 降雨强度进行预降雨至坡面产流为止,使土壤处于饱和状态;然后放置 12 h 以上,使得坡面水分充分扩散,以达到前期含水量的一致。正式试验前,为保证降雨强度的和

风速的均匀性和稳定性,试验前对雨强和风速进行同时率定。先用遮雨布盖住土槽,在土槽四周布设 10 个雨量桶和风速仪,测定 5 min 降雨量和平均风速,保证其标准误差均匀度>90%,实测结果与设计雨强及风速<5%正式开始降雨,试验场次安排见表 1。

坡面产流后,记录初始产流时间,接取径流泥沙样,产流后前 5 min 每 1 min 取 1 次径流泥沙样,之后根据降雨时间取整数每 5 min 取 1 次样品。采用染色剂示踪法按降雨时间每隔 10 min 对径流流速进行测定,由于该流速为坡面最大流速,故将实测流速乘以修正系数 0.75 作为径流平均流速。观察并记录细沟侵蚀过程、产流时间、跌坑产生时间关键时刻等信息,降雨结束后将样品静置 8~10 h,采用烘干法计算得出含沙量,再根据径流桶水深和泥沙样累计值,计算出总径流量。采用卷尺和直尺测量次降雨后坡面细沟基本形态,具体方法是沿着细沟沟槽每隔 5 cm 或 10 cm 详细测量细沟的位置坐标(x, y)及细沟的宽度和深度,在特殊沟槽位置也进行加密测量^[20]。

表 1 降雨试验设计

Table 1 Rainfall test design

设定风机 频率/H _z	设定雨强/ (mm·h ⁻¹)	风向	实际平均风速/ (m·s ⁻¹)	风速均匀度/%	土壤含水量/%	土壤容重/ (g·cm ⁻³)
0	60	无风	—	—	28.31	1.31
20	60	迎风	3.06	88.21	28.54	1.30
30	60	迎风	4.96	88.15	28.38	1.31
40	60	迎风	7.03	87.96	28.47	1.29

1.5 数据处理

采用细沟长度、宽度和深度作为细沟形态的基本几何指标,进而计算得到细沟体积、细沟密度、细沟割裂度等指标,表征不同风速下细沟形态特征。并用 Excel 2019 软件进行保存和初步分析;试验结果使用 SPSS 26 软件进行显著性分析,并用 Origin 2021 软件进行绘图。

(1)细沟体积(V)是某条细沟宽度、深度与测段长度乘积的加和,计算公式为:

$$V = \sum_{i=1}^n W_i \times D_i \times L_i \quad (1)$$

式中: V 为细沟的体积(cm³); W_i 、 D_i 、 L_i 分别为第 i 个监测点处细沟宽度、深度和长度(cm); n 为坡面上的监测点总数。

(2)细沟倾斜度^[21]是斜坡上所有监测点处细沟走向与斜坡中轴线夹角的平均值,反映细沟水平方向延展性的指标,计算公式为:

$$\delta = \sum_{i=1}^n \theta_i / n \quad (2)$$

式中: δ 为细沟倾斜度(°); θ_i 为第 i 个监测点处细沟走向与所在斜坡中轴线的夹角(°)。

(3)细沟密度指单位研究区域内所有细沟的总长度,细沟密度能够反映坡面的破碎程度,计算公式为:

$$\rho = \sum_{j=1}^m L_j / A_0 \quad (3)$$

式中: ρ 为细沟密度(m/m²); A_0 为研究坡面的表面积(m²); L_j 为坡面上第 j 条细沟及其分叉的总长度(m)。

(4)细沟割裂度^[20]指坡面上形成的细沟面积与小区面积比值,反映坡面破碎程度和细沟侵蚀强度,计算公式为:

$$c = \sum_{j=1}^m A_j / A_0 \quad (4)$$

式中: c 为细沟割裂度; A_j 为第 j 条细沟的细沟面积(m²)。

(5)细沟宽深比指细沟宽度与对应深度的比值,该参数为无量纲参数;细沟宽深比可客观反映细沟沟槽形状的变化,计算公式为:

$$R_{WD} = \sum_{i=1}^n W_i / \sum_{i=1}^n D_i \quad (5)$$

式中: R_{WD} 为细沟宽深比; W_i 为第 i 个监测点处的细沟宽度(cm); D_i 为第 i 个监测点处的细沟深度(cm)。

2 结果与分析

2.1 坡面侵蚀过程变化特征

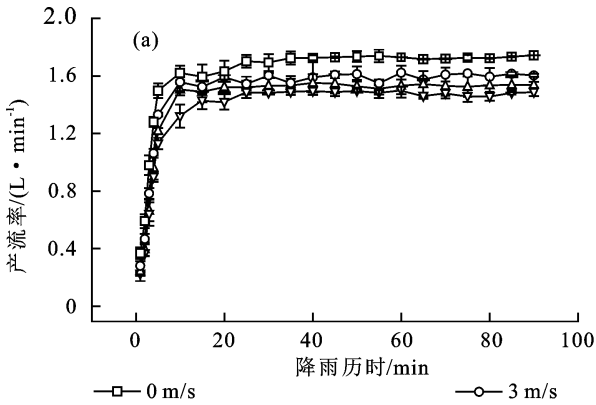
无风情况下,迎风坡面产流时间为 0.34 min,与无风处理相比,3,5,7 m/s 风速下,迎风坡面初始产流时间分别增加 20.59%,35.29%,47.06%,产流时间随着风速的增加而延长,0,3,5 m/s 风速试验处理间差异显著($p<0.05$),5~7 m/s 风速变化趋势不明显,但总体产流时间均在 0.5 min 以内(表 2)。与产流时间相比,风速对跌坎出现时间的影响更加显著($p<0.05$)。当风速为 0,3,5,7 m/s 时,迎风坡跌坎出现时间分别为 5.77,7.68,11.43,13.72 min,与无风处理相比,3,5 和 7 m/s 风速下,跌坎出现时间分别增加 33.10%,98.09%,137.78%。当风速为 0,3,5,7 m/s 风速时,坡面平均流速分别为 12.29,10.71,9.52,8.53 cm/s,与无风处理相比,3,5,7 m/s 风速下,坡面平均流速分别减少12.86%,22.53%,30.59%。随着风速的增加,坡面平均流速均呈减小趋势。

表 2 降雨过程中坡面侵蚀发育过程的差异

Table 2 Differences in the development process of slope erosion during rainfall

风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	产流时间/ min	跌坎出现 时间/min	坡面平均流速/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
0	$0.34 \pm 0.01\text{c}$	$5.77 \pm 0.80\text{d}$	$12.29 \pm 0.84\text{a}$
3	$0.41 \pm 0.01\text{b}$	$7.68 \pm 0.65\text{c}$	$10.71 \pm 0.35\text{b}$
5	$0.46 \pm 0.03\text{a}$	$11.43 \pm 1.23\text{b}$	$9.52 \pm 0.63\text{bc}$
7	$0.50 \pm 0.01\text{a}$	$13.72 \pm 1.17\text{a}$	$8.53 \pm 0.61\text{c}$

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同风速间差异显著($p<0.05$)。下同。



2.2 坡面产流产沙特征

由坡面产流率随降雨历时变化曲线(图 1a)可知,不同风速下坡面产流率大小存在差异,但趋势相似。可分为 3 个阶段:迅速增长阶段、缓慢增加阶段和稳定阶段。其中,迅速增长阶段一般在产流第 5 min 之前,缓慢增加阶段在产流后 5~20 min 左右,之后进入到稳定阶段,不同风速下的阶段性无明显差异。然而,不同风速产流率从大到小依次为 0 m/s ($1.09 \pm 0.02 \text{ L/min}$)>3 m/s($1.01 \pm 0.02 \text{ L/min}$)>5 m/s($0.98 \pm 0.04 \text{ L/min}$)>7 m/s($0.94 \pm 0.02 \text{ L/min}$)。与无风处理相比,3,5,7 m/s 风速下产流率分别减少 7.34%,10.09%,13.76%。产流率随着风速增加显著减小($p<0.05$)。

由坡面产沙率随降雨历时变化曲线(图 1b)可知,不同风速下坡面产沙率大小存在差异,但趋势相似。表现为随着降雨进行产沙率迅速增加,然后缓慢下降并趋于稳定。结合跌坎出现时间(表 2)发现,产沙率发生变化的节点与跌坎出现时间基本一致。不同风速产沙率从大到小依次为 0 m/s($269.89 \pm 8.08 \text{ g/min}$)>3 m/s($245.29 \pm 7.64 \text{ g/min}$)>5 m/s($225.23 \pm 6.19 \text{ g/min}$)>7 m/s($198.44 \pm 3.75 \text{ g/min}$)。与无风处理相比,3,5,7 m/s 风速下,产沙率分别减少 9.11%,16.55%,26.67%。产沙率随着风速增加显著减小($p<0.05$)。

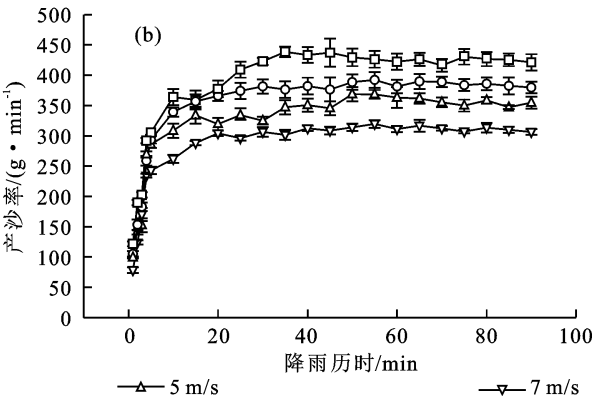


图 1 坡面产流产沙特征

Fig. 1 Characteristics of runoff and sediment production

2.3 坡面细沟形态发育特征

由图 2a 可知,无风情况下,细沟宽度最大最小差值、平均值、四分位数差值分别为 6.4,5.7,2.9 cm。随着风速从 0 增加到 3,5,7 m/s,最大最小差值分别减小 10.94%,18.75%,37.5%,细沟平均宽度分别减少 8.8%,16.49%,18.07%,四分位数差值分别减小 12.06%,27.59%,31.03%,说明细沟宽度及其波程

度随着风速增加而减小。细沟深度相对于细沟宽度的变化更为明显(图 2b)。其中,在无风情况下,细沟深度最大最小差值、平均值、四分位数差值分别为 6.3,4.1,2.9 cm。随着风速从 0 增加到 3,5,7 m/s 时,最大最小差值分别减小 26.98%,44.44%,46.03%,细沟平均深度分别减少 12.04%,23.83%,27.76%,四分位数差值分别减

小 27.59%,51.72%,58.62%,说明细沟深度及其波动程度随风速增加而减小。

由表 3 可知,不同风速下的坡面细沟形态特征,细沟宽深比为 1.4~1.69,与无风处理相比,3,5,7 m/s 风速下,细沟宽深比分别增加 3.57%,9.29%,20.71%,细沟宽深比随着风速增加而增大。说明迎风坡面随着风速的增加,细沟下切侵蚀和沟壁坍塌侵蚀均减小,同时,细沟下切侵蚀减小幅度更大,风速对沟深的作用更加明显。随着风速的增加,细沟密度从 2.92 下降到 2.03;细沟割裂度从 0.042 下降到 0.024。与无风处理相比,3,5,7 m/s 风速下,细沟密度分别下降 12.33%,23.97%,30.48%;细沟割裂度分别下降 21.43%,38.1%,42.86%。细沟体积随着风速增加而减小,0,3,5 m/s 风速下,细沟密度、细沟割裂度

和细沟体积有显著性差异($p<0.05$),当风速增 6 加到 7 m/s 条件下,与 5 m/s 相比无显著差异。细沟倾斜度可反映细沟水平方向的延展性,随着风速的增加,细沟倾斜度呈缓慢增加趋势,但未表现出显著性差异。

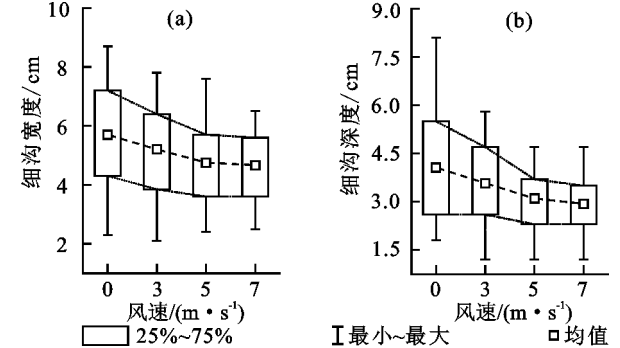


图 2 不同风速下细沟宽度、深度分布

Fig. 2 Distribution of rill width and depth under different wind speeds

表 3 不同风速下细沟形态特征指标统计

Table 3 Statistics of rill morphology characteristic indicators under different wind speeds

风速/(m·s ⁻¹)	细沟宽深比	细沟密度/(m·m ⁻²)	细沟割裂度	细沟倾斜度/(°)	细沟体积/(×10 ³ cm ³)
0	1.40±0.05c	2.92±0.15a	0.042±0.002a	13.47±0.87a	10.27±0.84a
3	1.45±0.03bc	2.56±0.11b	0.033±0.001b	13.69±0.27a	7.45±0.80b
5	1.53±0.04b	2.22±0.06c	0.026±0.001c	14.02±0.25a	5.07±0.65c
7	1.69±0.13a	2.03±0.11c	0.024±0.001c	14.76±1.09a	4.39±0.39c

2.4 风力作用下坡面侵蚀与形态特征之间的关系

为定量研究迎风坡面侵蚀量与细沟形态间的关系,对坡面侵蚀量和形态参数进行相关性分析。由表 4 可知,坡面侵蚀量与细沟体积、细沟密度和割裂度均呈极显著正相关($p<0.01$),侵蚀量相关性从大到小依次为细沟体积>细沟密度>细沟割裂度,相关系数分别为0.963,0.940,0.939,表明坡面侵蚀量与 3 个指标间信息重叠较多,相互解释度较高,因此,细沟体积、细沟密度和细沟割裂度可反映坡面侵蚀量大小。坡面侵蚀量与细沟宽深比呈极显著负相关,相关系数为-0.845,表明细沟宽深比越大的坡面对径流泥沙贡献越小。坡面侵蚀量与细沟倾斜度无显著相关($p>0.05$)。同时,对各形态特征指标相关分析可知,细沟体积、细沟割裂度和细沟密度与多数指标的相关性较高,分别从坡面细沟的体积、面积及长度在坡面所占比例的角度描述细沟发育特征,细沟倾斜度仅与细沟宽深比呈极显著正相关。综上可见,细沟体积、细沟密度和细沟割裂度是评价迎风坡降雨下细沟形态的优选指标。

3 讨论

3.1 风速对迎风坡坡面侵蚀过程的影响

在本研究中,产流时间、跌坎出现时间均随着风

速增加显著增加。原因是风对于坡面的影响主要体现在对雨滴运动和坡面流的影响。坡面集中水流的出现导致径流侵蚀力增加,进而使坡面形成小跌水,因此,跌坎出现的时间能够间接反映由坡面流到集中水流的时间长度,即反映坡面流能量的汇集时间^[22]。迎风条件与无风相比,雨滴的运动方向与坡面间的夹角增大,雨滴击溅作用力打击坡面增加降雨入渗量,从而导致产流时间和坡面流到坡面集中水流的汇集时间延长。随着风速的增大,径流受坡面阻力影响增加,迎风坡坡面平均流速逐渐减缓。结果印证王龙生等^[23]在人工模拟降雨下所展开的黄土坡面细沟形态与流速之间的关系研究。

表 4 坡面侵蚀量和细沟形态特征的相关分析

Table 4 Correlation analysis of slope erosion amount and rill morphology characteristics

细沟形态特征	侵蚀量	细沟体积	密度	割裂度	宽深比
细沟体积	0.963 **				
密度	0.940 **	0.944 **			
割裂度	0.939 **	0.960 **	0.993 **		
宽深比	-0.845 **	-0.747 **	-0.827 **	-0.814 **	
倾斜度	-0.484	-0.397	-0.541	-0.551	0.735 **

注: * 表示 $p<0.05$; ** 表示 $p<0.01$ 。

3.2 风速对迎风坡坡面产流产沙特征的影响

不同风速下迎风坡坡面产流率随着时间的推移呈先急剧增加后缓慢增加并趋于平稳的趋势。与和继军等^[24]在人工模拟降雨下所展开的缓坡面细沟形态与水沙关系研究结果一致。与此同时,坡面产沙率随着风驱雨时间的持续呈先增加后缓慢下降并趋于稳定趋势,达到稳定时间基本与径流一致,分析第2阶段产沙率缓慢下降的原因可能是降雨初期,坡面产流量较低,径流作用较弱,侵蚀能力较低。随着降雨的进行,径流作用增强,加之降雨前期坡面松散土壤还比较多,在雨滴击溅作用和径流冲刷作用下,被快速运移出坡面。到降雨后期,随着径流作用逐渐趋于稳定,坡面易搬运物质减少,以及坡面结皮的形成,夯实坡面表层土壤,增强土壤的抗蚀性,土壤颗粒不易被剥离输移,导致产沙率逐渐降低并趋于稳定。

此外,迎风坡产流率和产沙率随着风速增加而减小,与已有研究^[6]结果不同。ISERLOH等^[6]利用人工模拟风驱雨研究风驱雨对土壤侵蚀的影响得出,风增加砂土坡面的侵蚀量,是因为没有考虑地形对土壤侵蚀过程的影响。在迎风坡面下,雨滴运动方向与坡面呈钝角,降雨侵蚀力方向与坡面径流向相反,削弱径流的剥蚀作用,使产沙量减小,所以出现相反结果。SCHMIDT等^[16]在EROSION 3D模型中将风因素和地形因素考虑在内,模拟土壤侵蚀表明,风对降雨的影响取决于倾斜地块朝向风向的方向。同时,在迎风的坡面下,风驱雨作用的降雨量比无风条件下降雨量大,从而使土壤侵蚀量增加。原因可能是在EROSION 3D模型模拟中,只考虑迎风坡增大坡面的承雨面积,忽视风对迎风坡径流影响,以及风力作用下雨滴对径流的阻力增大同时稳定入渗率增加,导致模拟迎风坡坡面侵蚀量的结果偏大。因此,迎风坡风对坡面的影响可以理解为两方面,一方面,随着风速的增加,雨滴的运动方向与坡面间的夹角增大,导致坡面的承雨面积增大,从而径流量增加;另一方面,随着风速增加,降雨侵蚀作用合力的大小增加,分解成沿坡面向上的切应力以及坡面垂直压应力也增加,导致坡面入渗量增大,并同时增加径流在坡面的滞留时间。从试验结果来看,虽然承雨面积增加导致径流量增大,但坡面产流率和产沙率随着风速的增加而减小,因此,迎风坡风速对坡面水流的影响是导致产流率和产沙率减少的主要原因。

3.3 风速对迎风坡坡面细沟形态特征的影响

细沟形态的变化对坡面细沟发育过程有重要的

影响,是牵动坡面产流与细沟侵蚀量的主要因素^[25]。本研究中,细沟宽度、深度、细沟体积、细沟割裂度和细沟密度随着风速增加而减小。由于细沟宽度的增加主要是由于沟壁坍塌的作用而形成的,而沟壁坍塌主要受重力作用影响^[26],迎风坡面雨滴倾斜角度与坡面的夹角为钝角,随着风速增加,降雨侵蚀作用合力以及分解成沿坡面向上的切应力也增加,从而抵消部分重力的作用,导致细沟宽度的减小;细沟深度增加是溯源侵蚀和下切侵蚀的作用导致的,而径流侵蚀能力是决定溯源侵蚀和下切侵蚀强度的主要原因^[27]。迎风坡面风速的增加导致水流受坡面阻力影响增加,流速逐渐减缓,径流侵蚀能力减小,使径流对沟壁和沟底的侵蚀冲刷减弱,导致深度、细沟体积、细沟割裂度和细沟密度的减小。此外,由于试验风向为迎风条件,在水平方向上,风速未对雨滴产生水平方向的作用力,但由于风速的增大,径流受坡面阻力影响增加,使坡面径流对细沟的冲刷修饰时间延长,导致细沟在水平方向延展性增强,进而导致细沟宽深比和细沟倾斜度均增大。

4 结论

(1)风速对迎风坡产流时间、跌坎出现时间和坡面平均流速均有显著性影响($p < 0.05$)。随着风速增加,产流时间和跌坎出现时间明显延长,断面流速减缓。

(2)产流率和产沙率随风速增加而显著减少。不同风速条件下迎风坡面产流率随降雨历时的延长均整体呈产流率先急剧增加后缓慢增加并趋于平稳趋势,不同风速下的阶段性无明显差异。产沙率随降雨历时的延长整体呈先迅速增加后缓慢下降并趋于稳定趋势,产沙率发生变化的节点与跌坎出现时间基本一致。

(3)细沟宽度、深度及其波动程度随着风速增加而减小,细沟宽深比和细沟倾斜度均随着风速增加而增大,细沟体积、细沟割裂度和细沟密度,三者都随风速增加而减小。

(4)细沟体积、细沟密度和割裂度与坡面侵蚀量均呈极显著正相关,是表征迎风坡坡面细沟形态的优选指标,且能够很好地反映坡面土壤侵蚀程度。

参考文献:

- [1] WIRTZ S, SEEGER M, RIES J B. Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes[J]. Catena, 2012, 91: 21-34.
- [2] 郑粉莉,唐克丽,周佩华.坡耕地细沟侵蚀的发生、发展和防治途径的探讨[J].水土保持学报, 1987, 1(1): 36-48.

- ZHENG F L, TANG K L, ZHOU P H. Approach to the genesis and development of rill erosion on slope land and the way to control[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1987, 1(1): 36-48.
- [3] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素[J]. *水土保持通报*, 1982, 2(1): 25-30.
- ZHU X M. Main types of water erosion in Loess Plateau and its related factors[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1982, 2(3): 40-44.
- [4] HAN Y G, FENG G, OUYANG Y. Effects of soil and water conservation practices on runoff, sediment and nutrient losses[J]. *Water*, 2018, 10(10): e1333.
- [5] DE LIMA J L M P, SINGH V P, DE LIMA M I P. The influence of storm movement on water erosion: Storm direction and velocity effects[J]. *Catena*, 2003, 52(1): 39-56.
- [6] ISERLOH T, FISTER W, MARZEN M, et al. The role of wind-driven rain for soil erosion: An experimental approach[J]. *Zeitschrift Für Geomorphologie, Supplementary Issues*, 2013, 57(1): 193-201.
- [7] MARZEN M, ISERLOH T, DE LIMA J L M P, et al. Impact of severe rain storms on soil erosion: Experimental evaluation of wind-driven rain and its implications for natural hazard management[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 590/591: 502-513.
- [8] MARZEN M, ISERLOH T, DE LIMA J L M P, et al. The effect of rain, wind-driven rain and wind on particle transport under controlled laboratory conditions[J]. *Catena*, 2016, 145: 47-55.
- [9] AN M Y, HAN Y G, ZHAO C Y, et al. Effects of different wind directions on soil erosion and nitrogen loss processes under simulated wind-driven rain[J]. *Catena*, 2022, 217: e106423.
- [10] MARZEN M, ISERLOH T, CASPER M C, et al. Quantification of particle detachment by rain splash and wind-driven rain splash[J]. *Catena*, 2015, 127: 135-141.
- [11] BLOCKEN B, CARMELIET J. A review of wind-driven rain research in building science[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2004, 92(13): 1079-1130.
- [12] 杨俊涛, 楼文娟. 风驱雨 CFD 模拟及平均雨荷载计算方法研究[J]. *空气动力学学报*, 2011, 29(5): 600-606.
- YANG J T, LOU W J. Research on wind-driven rain CFD simulation and method calculating mean rain load[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2011, 29(5): 600-606.
- [13] DOSWELL C A, BROOKS H E, MADDOX R A. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology[J]. *Weather and Forecasting*, 1996, 11(4): 560-581.
- [14] ZHANG D L, LIN Y H, ZHAO P, et al. The Beijing extreme rainfall of 21 July 2012: "Right results" but for wrong reasons[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(7): 1426-1431.
- [15] MIN Y F, HUANG W L, MA M J, et al. Simulations in the topography effects of Tianshan mountains on an extreme precipitation event in the Ili River valley, China[J]. *Atmosphere*, 2021, 12(6): e750.
- [16] SCHMIDT J, WERNER M V, SCHINDEWOLF M. Wind effects on soil erosion by water—a sensitivity analysis using model simulations on catchment scale[J]. *Catena*, 2017, 148: 168-175.
- [17] 霍云梅, 毕华兴, 朱永杰, 等. QYJY-503C 人工模拟降雨装置降雨特性试验[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(2): 31-36.
- HUO Y M, BI H X, ZHU Y J, et al. Characteristics of artificial rainfall produced by QYJY-503C simulation system[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(2): 31-36.
- [18] 孙继松, 雷蕾, 于波, 等. 近 10 年北京地区极端暴雨事件的基本特征[J]. *气象学报*, 2015, 73(4): 609-623.
- SUN J S, LEI L, YU B, et al. The fundamental features of the extreme severe rain events in the recent 10 years in the Beijing area[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2015, 73(4): 609-623.
- [19] 白清俊, 马树升. 细沟侵蚀过程中水流跌坑的发生机理探讨[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(增刊 2): 62-65.
- BAI Q J, MA S S. Discussion on the occurrence mechanism of water flow pit in rill erosion process[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(S2): 62-65.
- [20] 沈海鸥, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 降雨强度和坡度对细沟形态特征的综合影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(7): 162-170.
- SHEN H O, ZHENG F L, WEN L L, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on rill morphological characteristics[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(7): 162-170.
- [21] 王磊. 元谋干热河谷陡坡细沟的形态特征和控制因素[D]. 四川 南充: 西华师范大学, 2016.
- WANG L. The morphology and controlling factors of rills on steep slopes in the Yuanmou Dry-Hot valley [D]. Nanchong, Sichuan: West China Normal University, 2016.

(下转第 28 页)

- 系分布方式对坡面土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报, 2022,36(4):7-12.
- YANG X C, FANG Q, YIN X A, et al. Effects of distribution patterns of tree bare roots on slope soil erosion under simulated rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 7-12.
- [19] ZHAO C H, GAO J E, HUANG Y F, et al. Effects of vegetation stems on hydraulics of overland flow under varying water discharges[J]. Land Degradation and Development, 2016, 27(3): 748-757.
- [20] LÉONARD J, RICHARD G. Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength[J]. Catena, 2004, 57(3): 233-249.
- [21] POLYAKOV V, NEARING M A, STONE J. Velocities of shallow overland flow on semiarid hillslopes[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2018, 43(12): 2578-2583.
- [22] 孙佳美, 侯沛轩, 逢育波, 等. 植被覆盖坡面土壤侵蚀的水动力学机理[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 1-7.
- SUN J M, HOU P X, PANG Y B, et al. Hydrodynamic mechanism of soil erosion on vegetation covered slopes[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 1-7.
- [23] ZHANG K D, WANG Z G, WANG G Q, et al. Overland flow resistance characteristics of nonsubmerged vegetation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2017, 143(8): e04017021.
- [24] ALHAMDAN O Z, PIERSON F B, NEARING M A, et al. Characteristics of concentrated flow hydraulics for rangeland ecosystems: Implications for hydrologic modeling[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2012, 37: 157-168.
- [25] 杨帆, 张宽地, 杨明义, 等. 植物茎秆影响坡面径流水动力学特性研究[J]. 泥沙研究, 2016(4): 22-27.
- YANG F, ZHANG K D, YANG M Y, et al. Experimental study on hydraulic characteristics of flow under vegetation stem[J]. Journal of Sediment Research, 2016(4): 22-27.
- [26] 闫帅旗, 朱冰冰, 边焄. 不同覆盖位置下草地坡面水流路径长度变化特征[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 116-123.
- YAN S Q, ZHU B B, BIAN H. Variation characteristics of flow length of grass slope under different grass strip positions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(3): 116-123.
- (上接第 18 页)
- [22] 沈海鸥, 黄土坡面细沟发育与形态特征研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- SHEN H O. Rill development and its morphological characteristics at Loessial Hillslope [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2015.
- [23] 王龙生, 蔡强国, 蔡崇法, 等. 黄土坡面细沟形态变化及其与流速之间的关系[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 110-117.
- WANG L S, CAI Q G, CAI C F, et al. Morphological changes of rill on loess slope and its relationship with flow velocity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(11): 110-117.
- [24] 和继军, 孙莉英, 李君兰, 等. 缓坡面细沟发育过程及水沙关系的室内试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 138-144.
- HE J J, SUN L Y, LI J L, et al. Experimental study on rill evolution process and runoff-sediment relationship for gentle slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(10): 138-144.
- [25] 李龙, 张尚轩, 高鑫宇, 等. 次降雨下砒砂岩坡面细沟形态发育及其对侵蚀产沙的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 1-9.
- LI L, ZHANG S X, GAO X Y, et al. Development of rill morphology on sandstone slopes under individual rainfall event and its effect on erosion and sediment production[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 1-9.
- [26] 陈俊杰, 孙莉英, 蔡崇法, 等. 不同土壤坡面细沟侵蚀差异与其影响因素[J]. 土壤学报, 2013, 50(2): 281-288.
- CHEN J J, SUN L Y, CAI C F, et al. Rill erosion on different soil slopes and their affecting factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(2): 281-288.
- [27] 韩鹏, 倪晋仁, 李天宏. 细沟发育过程中的溯源侵蚀与沟壁崩塌[J]. 应用基础与工程科学学报, 2002, 10(2): 115-125.
- HAN P, NI J R, LI T H. Headcut and bank landslip in rill evolution[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2002, 10(2): 115-125.