

黄土高原水蚀风蚀交错带风蚀对砂质壤土 迎风坡水蚀特征的影响

白茹茹¹, 张加琼^{1,2}, 邓鑫欣¹, 李志凤³, 南琼³

(1.西北农林科技大学水土保持研究所,黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100;
2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;3.西北农林科技大学资源与环境学院,陕西 杨凌 712100)

摘要:为明确风水交错侵蚀中风力和水力侵蚀的相互影响,针对风向和径流方向相反(迎风坡)的交错侵蚀,采用人工模拟降雨与风洞试验研究前期风蚀对后继水蚀的影响。结果表明:(1)受前期风蚀影响,后继水蚀产流时间均较仅水蚀提前,径流强度较仅水蚀增大。(2)前期风蚀加剧后继水蚀却未改变其变化趋势。无论是否有前期风蚀影响,后继水蚀速率随降雨历时增加均逐渐增大而后趋于平稳;但当前期风蚀的风速较大时(12,15 m/s),后继水蚀速率较仅水蚀增大最显著,其侵蚀速率高达仅水蚀速率的 4.6 倍。(3)受前期风蚀影响,水蚀对风水交错总侵蚀的贡献高于仅水蚀在仅水蚀与仅风蚀侵蚀量之和的比例。前期风蚀对后继水蚀起明显的促进作用。但随风蚀风速增大,水蚀对交错侵蚀的贡献从 93% 逐渐减小到 0.5%。未来的研究中应考虑多次营力叠加和地形(迎风坡—背风坡)对交错侵蚀过程的影响,从而为理清风蚀和水蚀间复杂的交互作用奠定基础。

关键词:迎风坡;水蚀速率;风—水交错侵蚀;产沙过程;促进作用

中图分类号:S154.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)03-0030-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.03.005

Influence of Wind Erosion on Water Erosion Characteristics of Sandy Loam on Windward Loess Slopes in the Wind-Water Erosion Crisscross Region of Loess Plateau

BAI Ruru¹, ZHANG Jiaqiong^{1,2}, DENG Xinxin¹, LI Zhifeng³, NAN Qiong³

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 3. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: This study focused on wind-water erosion that wind direction and runoff direction were opposite (i.e., windward slope) for understanding the interactions between wind and water erosion in the wind-water erosion processes using artificial simulated rainfall and wind tunnel experiments. Results showed that: (1) The prophase wind erosion resulted in the advanced runoff and increased intensity in water erosion compared with the single water erosion without wind erosion. (2) Water erosion rates were increased by the prophase wind erosion, yet rather than its changing tendency. Water erosion rates increased gradually and then tended to be stable over time during rainfall experiments regardless of whether the prophase wind erosion occurred or not. Particularly at relatively large wind velocities (12 and 15 m/s), an increase occurred in the water erosion rates, which could reach up to 4.6 times of the water erosion only. (3) The proportion of water erosion in wind-water erosion was always larger than that of water erosion in the sum of water erosion only and wind erosion only. This indicated that the prophase wind erosion obviously intensified water erosion. However, the contribution of water erosion to wind-water erosion decreased significantly (from 93% to 0.5%) with the increase of wind speed. Future research should consider the impacts of multiple occurrence of

收稿日期:2021-09-28

资助项目:国家自然科学基金项目(42077068,41671281)

第一作者:白茹茹(1995—),女,在读硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:brr1995@nwfufu.edu.cn

通信作者:张加琼(1984—),女,博士,副研究员,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:jqzhang@nwsuaf.edu.cn

wind and water, and typical windward-leeward slope topography on crisscross erosion, to further explore the complicated interactions between wind and water erosions.

Keywords: windward slope; water erosion rate; wind-water erosion; sediment yield process; acceleration effect.

土壤交错/复合侵蚀是在水力、风力、重力、冻融等多种营力共同或交错作用下,土壤被破坏、剥离和搬运的复杂过程;交错/复合侵蚀过程有着显著的叠加放大作用,以时间交错、空间叠加为典型特征的风水交错侵蚀是最为典型的类型之一^[1-2]。风水交错侵蚀主要发生在生态环境较脆弱的干旱与半干旱地区,该区域的土壤侵蚀程度较单一风蚀或水蚀影响区域更严重^[3-4]。因此,加强风水交错侵蚀的特征、过程、机理等研究,有益于干旱与半干旱区域水土保持的科学开展。

前人^[5-6]通过野外观测(小区法)、室内模拟试验(风洞和降雨模拟试验)、元素示踪等方法对不同过程的风水交错侵蚀(风蚀后水蚀,水蚀后风蚀)的速率、风蚀和水蚀对总侵蚀的贡献、风力与水力的相互关系等开展了大量研究,并取得了重要成果。对先水蚀后风蚀的交错侵蚀(水—风交错侵蚀)研究^[7-9]发现,前期水蚀能抑制后继风蚀,径流冲刷通过选择性搬运较细颗粒、地表形成物理结皮、改变微地貌等方式,减小后继风蚀。对风蚀后水蚀的交错侵蚀(风—水交错侵蚀)研究^[10-13]发现,前期风蚀对后继水蚀主要为促进作用,风蚀一方面带走坡面土壤细颗粒,造成土壤粗化和土壤抗侵蚀能力减小;另一方面,土壤颗粒的剥离和搬运造成微地貌变化,尤其是较大风速下,形成风蚀凹痕,从而促进水蚀。前人^[14-16]的研究基本在径流方向与风向相同的条件下开展,而缺乏对风向与径流方向相反(风水反向)条件下风水交错侵蚀的研究。尤其是风—水交错侵蚀研究,尚未见风水反向条件下的研究报道。事实上,发生在迎风坡面径流方向与风向相反的风水交错侵蚀与径流方向与风向相同的交错侵蚀过程一样具有代表性。因此,在径流方向与风向相反的条件下研究风水交错侵蚀过程与机理对系统的理解风水交错侵蚀机制具有重要意义。

黄土高原风蚀水蚀交错带是受风水交错侵蚀影响的典型区域,本研究选择该区域的典型土壤,采用人工模拟降雨与风洞试验相结合的方法,研究风向与径流方向相反条件下的风—水交错侵蚀特征,通过与仅水蚀下的侵蚀特征对比,分析前期风蚀对后继水蚀侵蚀的影响,量化风蚀和水蚀对交错侵蚀的贡献,为明确风水交错侵蚀中风蚀与水蚀的相互影响研究奠定基础。

1 材料与方法

本研究采用人工模拟降雨和风洞试验相结合的方法,以黄土高原水蚀风蚀交错带典型的砂质壤土(砂黄土)为例,开展风—水交错侵蚀研究。砂质壤土采自神木六道沟流域,质地均一,砂粒、粉粒和黏粒含量分别为 53.0%,42.1%和 4.9%,平均粒径 34.8 μm ,分选系数 1.84 Φ (34.8 μm)。砂质壤土在去除草根、砾石等杂物并过 1 cm 筛后,分层填装于钢制土槽(1.2 m $\times$ 1.0 m $\times$ 0.1 m)。土槽填装时,首先在底部铺设 1 层孔径较小的透水纱布,再均匀平铺 1 层细沙(1 cm 厚),风干的砂质壤土(含水量约为 1.5%)按照容重 1.35 g/cm³按 3 cm 分层(每层 3 cm)填装,每层填装完成后打毛表面以消除填装土层间的分层。

人工模拟降雨和风洞试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工降雨大厅与风洞实验室开展。降雨试验使用侧喷式降雨装置,降雨高度为 16 m,降雨强度在 40~260 mm/h 连续可调,降雨均匀度 $>80\%$,最大持续降雨时间 12 h。风洞设备为室内直流吹气式风洞(图 1),横截面积为 1.0 m $\times$ 1.2 m,由动力段、调节段、整流段、试验段和集沙段组成,风速在 2~15 m/s 范围内连续可调。吹风前进行风速率定,达到设计风速(± 0.2 m/s)。

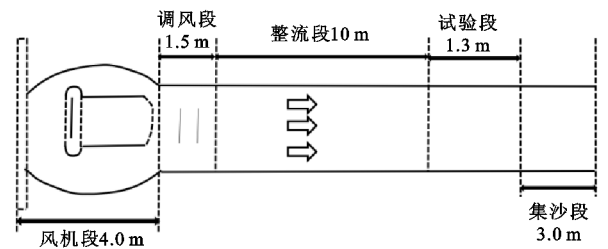


图 1 风洞结构示意图

试验时,先进行风洞试验后再进行人工模拟降雨试验。风洞试验在 9,12,15 m/s 风速下分别持续吹蚀 15 min,吹蚀前后均使用地秤(精度为 1.0 g,量程 200 kg)称量土槽的总重,用于土壤风蚀量计算。对不同风速下完成吹蚀试验的土槽,在不同雨强(60,90 mm/h)和坡度(5°,10°和 15°)条件下开展人工模拟降雨试验。所有试验从产流开始计时,试验时长为 60 min。产流过程中,按 2 min 间隔收集径流泥沙过程样品。降雨结束后称量径流泥沙样品,并在 105 $^{\circ}\text{C}$ 恒重并称量(精度 0.01 g)泥沙样品,计算降雨过程的侵蚀产沙量。同时,以只进行降雨而无前期吹蚀的试验作为对照。每组试验重复 2 次,当 2 次重复结果存在

明显差异的试验,进行第 3 次重复。

依据径流量,第 t min 的径流强度 Q_t ($\text{g}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$) 和整场降雨平均径流强度 Q (g/m^2) 计算公式^[17] 分别为:

$$Q_t = \frac{R_t}{tA} \tag{1}$$

$$Q = \frac{\sum_{t=1}^n R_t}{tA} \tag{2}$$

式中: R_t 为第 t min 降雨收集到的径流量(g); t 为径流收集时间(min),本研究中取值为 2,4,6,⋯,30; A 为降雨坡面(土槽)面积(m^2)。

依据泥沙量,第 t min 的水蚀速率 E_t ($\text{g}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$) 和整场降雨平均水蚀速率 E (g/m^2) 计算公式^[18] 分别为:

$$E_t = \frac{S_t}{tA} \tag{3}$$

$$E = \frac{\sum_{t=1}^n E_t}{tA} \tag{4}$$

式中: S_t 为第 t min 降雨收集到的泥沙量(g)。

为量化前期风蚀对后继水蚀速率的影响,将受前期风蚀影响的水蚀速率或径流强度相对仅水蚀试验条件下的变化率定义为风蚀对水蚀速率/径流强度的影响率(v),即:

$$v = \frac{E_w}{E_0} \text{ 或 } v = \frac{Q_w}{Q_0} \tag{5}$$

式中: E_w 、 Q_w 分别为受前期风蚀影响的水蚀速率和径流强度($\text{g}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$); E_0 、 Q_0 分别为仅水蚀条件下的水蚀速率和径流强度($\text{g}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$)。

2 结果与分析

2.1 前期风蚀对后继水蚀径流过程的影响

前期风蚀改变了后继水蚀的径流强度,但未明显改变径流过程的总体变化趋势。无论是否受前期风蚀的影响,后继径流强度均呈现随降雨历时增加逐渐增大而后逐渐趋于稳定的变化特征。经前期不同风速吹蚀后,后继水蚀的产流时间较仅水蚀提前了 7~15 min(表 1)。前期风蚀导致后继水蚀径流强度增大,尤其是 12,15 m/s 风速吹蚀后,后继水蚀径流强度在 60 mm/h 雨强下较仅水蚀分别增大 191.1~340.1,280.0~695.9 $\text{g}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$,在 90 mm/h 雨强下较仅水蚀分别增大 161.5~672.6,323.4~942.3 $\text{g}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ (图 2)。此外,前期风蚀对后继水蚀径流强度的影响在小雨强下表现更明显。60 mm/h 雨强下风蚀对水蚀径流强度的影响率较 90 mm/h 雨强下均略增大。在相同风速吹蚀后,坡度从 5°增大到 15°时,60

mm/h 雨强下风蚀对水蚀径流强度的影响率较 90 mm/h 雨强分别增大了 0~0.2,0.1~0.2,0.2~0.5 倍。

表 1 受前期风蚀影响的后继降雨产流时间

风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	产流时间/ min					
	60 mm/h			90 mm/h		
	5°	10°	15°	5°	10°	15°
0(仅水蚀)	29.5	23.6	23.3	25.5	23.6	23.3
9	18.4	16.8	15.1	16.0	14.6	12.4
12	14.3	16.4	13.8	15.2	12.2	14.2
15	15.6	16.6	12.4	14.2	12.6	11.4

2.2 前期风蚀对后继水蚀速率变化的影响

总体上,前期风蚀导致后继水蚀速率大多较仅水蚀显著增大($p<0.05$),且其增加程度随风速的增大而增大。在 9,12,15 m/s 风速下,前期风蚀导致后继水蚀速率较相同条件的仅水蚀试验分别增大了 0~1.8,0.6~3.0,1.0~4.6 倍。此外,较小雨强(60 mm/h)下,前期风蚀对后继水蚀速率的影响表现得更明显(图 3)。60 mm/h 雨强下风蚀对水蚀速率的影响率较 90 mm/h 雨强下均增大。当坡度从 5°增大到 15°时,在 9,12,15 m/s 风速吹蚀后,60 mm/h 雨强下风蚀对水蚀速率的影响率较 90 mm/h 雨强分别增大了 0.2~1.8,1.1~1.9,0.1~0.2 倍。可见,在不同条件的风—水交错侵蚀过程中,水蚀和风蚀的交互效应受试验条件的影响,可能存在交互效应发生改变的临界条件。

若以产沙时刻起,将水蚀过程分为前期(20 min)、中期(20~40 min)和后期(40~60 min)3 个阶段,随着前期风蚀风速增大,后继水蚀速率从前期到中期都呈现增大趋势,中期到后期的变化相对复杂。从中期到后期,60 mm/h 雨强下水蚀速率均呈增长趋势;90 mm/h 雨强下,水蚀速率在小坡度(5°)时均呈增长趋势,而在较大坡度,前期风速较大时,后期水蚀速率较中期减小。与大雨强下,尤其是坡度较大时,坡面在降雨过程中易形成跌坎,导致产沙前期水蚀速率凸增有关(图 4)。对比前期到中期与中期到后期水蚀速率的变化速度发现,除 12 m/s 风速吹蚀后在 60 mm/h 雨强,5°条件下降雨的试验外,无论是否受前期风蚀的影响,当坡度从 5°增加到 10°和 15°时,水蚀速率的变化速度在不同雨强下均表现出先增长后减小的趋势。

2.3 水蚀对风—水交错侵蚀的贡献

整体上,水蚀对总侵蚀的贡献随试验条件的变化而明显改变。60 mm/h 雨强下风蚀贡献占主导。90 mm/h 雨强下大坡度(10°和 15°)以水蚀为主,小坡度(5°)以风蚀为主。此外,交错侵蚀中,随前期风蚀风速增大,水蚀对交错侵蚀的贡献明显减小。90 mm/h 雨强下,当前期风蚀风速从 9 m/s 增大到 15 m/s 时,

水蚀对交错侵蚀的贡献减小,比例最高达到 21%, 27%和 28%;在 60 mm/h 雨强下,水蚀对交错侵蚀

的贡献减小,比例最高达到 4%,12%和 43%(图 5)。证明了水蚀和风蚀的交互效应与试验条件的相关性。

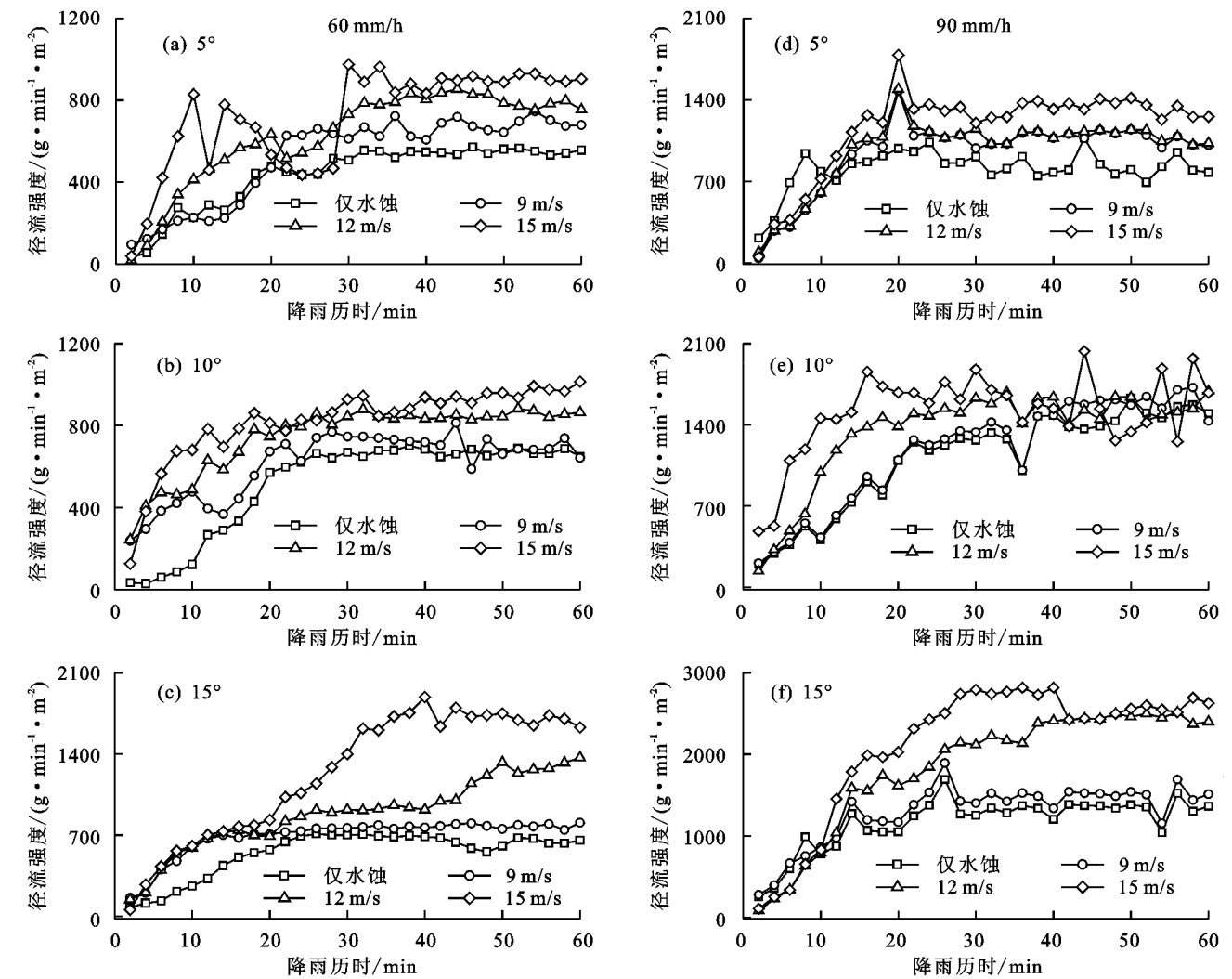
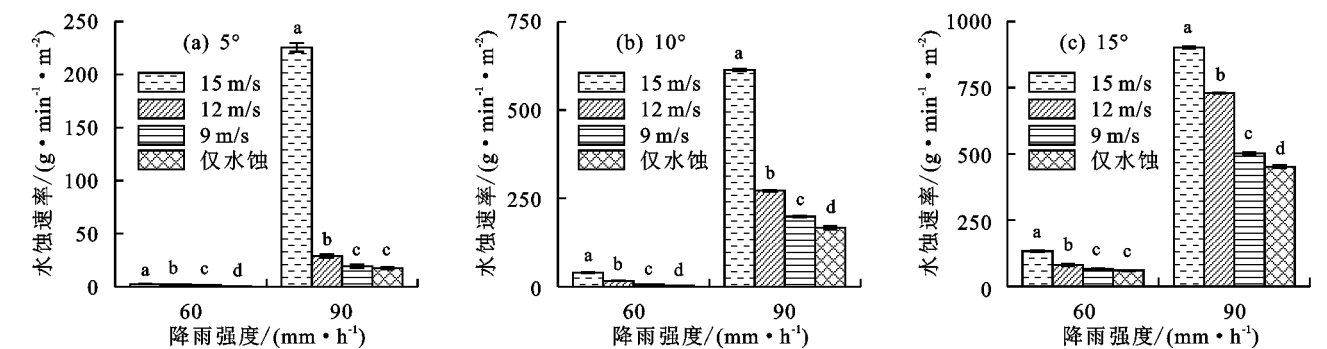


图 2 前期风蚀对后继水蚀径流过程的影响



注:图柱上方不同小写字母表示相同降雨强度下不同风速处理间差异显著($P<0.05$)。

图 3 前期风蚀对后继水蚀速率的影响

水蚀在交错侵蚀的比例均高于仅水蚀在仅风蚀与仅水蚀的侵蚀量之和中的比例(即:水蚀/风水交错总侵蚀>仅水蚀/仅水蚀+仅风蚀)。与仅水蚀在仅水蚀与仅风蚀侵蚀量之和的比例相比,在 9,12,15 m/s 吹蚀后,60 mm/h 雨强下,水蚀贡献率较单一风蚀和水蚀过程总和中的水蚀比例分别增大了 3%~8%,1%~11%,0%~11%,90 mm/h 雨强下,水蚀贡献率较单一风蚀和水蚀过程总和中的水蚀比例分

别增大了 1%~2%,6%~12%,9%~30%。可见,风速较大时(12,15 m/s),前期风蚀对地表的改变对后期水蚀速率增大有明显影响。

3 讨论

风—水交错侵蚀中,受前期风蚀影响,后继水蚀的径流强度增大、水蚀加剧,这与人^[18-20]在风水同向条件下的研究结果一致。已有研究^[18-20]发现,受风蚀影响

的水蚀过程中产流时间却相对仅水蚀试验不同程度地滞后,本研究发现,前期风蚀影响导致产流时间相对仅水蚀试验提前,可能与风蚀对微地貌改变程度、地表粗糙度和受试土壤性质的差异有关。首先,前期风蚀改变了地表微形态,在较大风速(12,15 m/s)下,前期风蚀后地表产生有固定走向的明显风蚀凹痕,为径流汇集提供了有利的地形条件,这是导致后继径流强度增大、水蚀加剧的重要原因(图 6)。前人^[18-20]研究中,风蚀后地表并未出现有固定走向的明显风蚀凹痕,仅有少量零星的凹痕和条纹,未连通的微起伏对径流的形成有一定的阻碍作用,延缓了径流的形成。其次,风蚀导致地表粗化,增大土壤可蚀性,导致径流强度增大、水蚀加剧。地表粗化对径流的影响有两面性,一方面可能因地表粗糙度

增大而延滞径流形成的时间^[21-22];另一方面,风蚀过程中部分较细颗粒阻塞粗颗粒之间的空隙,影响水分入渗,导致产流时间提前。本研究的砂质壤土土质疏松、持水性差、入渗快,在降雨过程中初始产流时间较长^[23],而经吹蚀后,表层(0—1 cm)土壤细颗粒(黏粒和粉粒)含量减少,砂粒含量增多,风蚀导致表层土壤明显粗化(表 2)。在水蚀过程中产流时间提前,表明较细颗粒阻塞粗颗粒之间的空隙对水分入渗有明显影响,经前期风蚀作用后,后继水蚀的入渗率减小(表 3)。考虑到不同的土壤在颗粒组成、团聚体结构、水分入渗等方面均有差异,风蚀过程中坡面微地形、土壤颗粒、水分入渗等对吹蚀的响应不同,因此,要量化上述因素的影响程度,还需进一步研究。

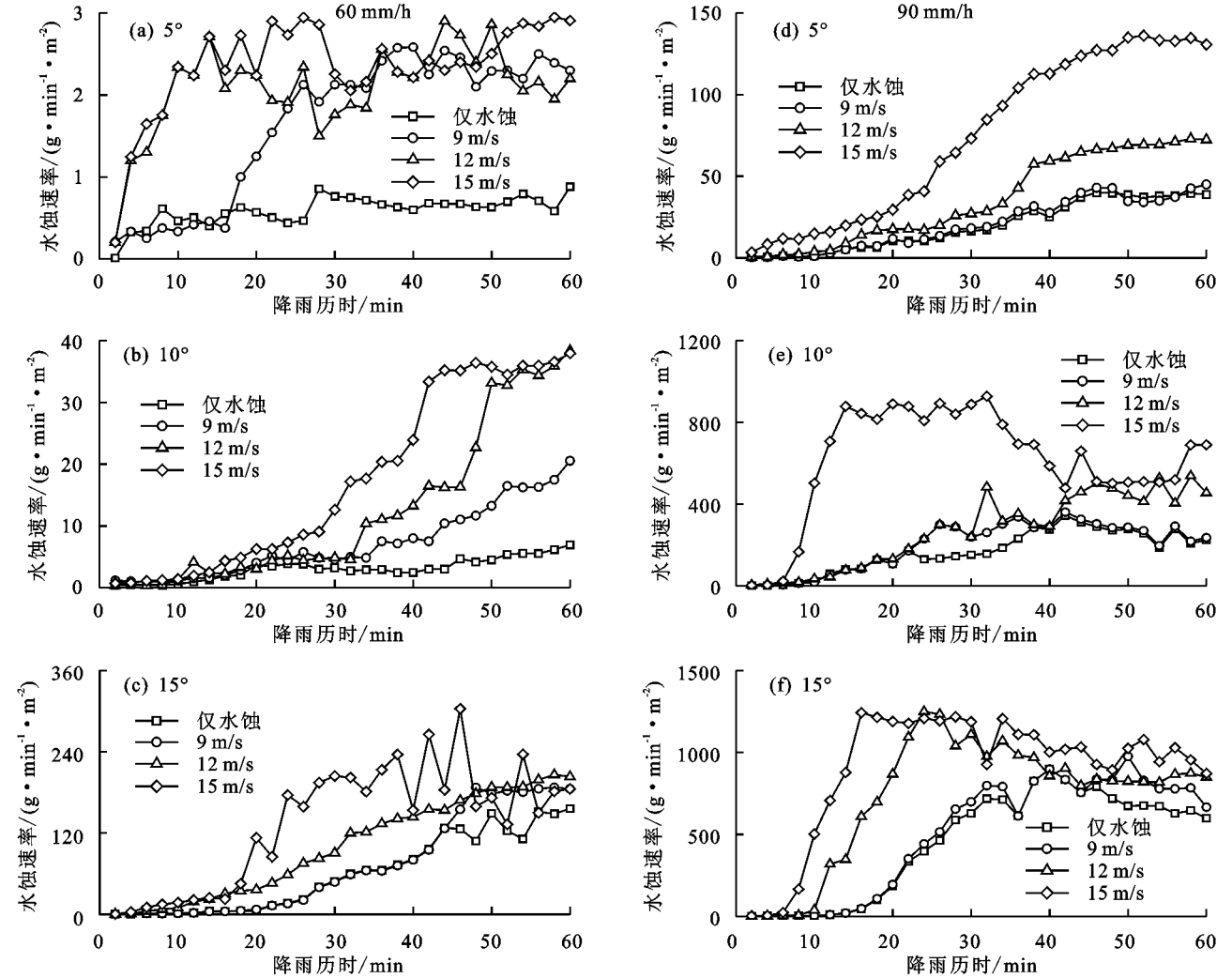


图 4 前期风蚀对后继水蚀过程的影响

Zhang 等^[5]基于 Cs-137 示踪技术对结果显示,神木六道沟流域粉质砂壤土迎风坡和背风坡面的风水交错侵蚀(包含风—水和水—风侵蚀)以水蚀为主,径流方向与风向相反的迎风坡(N 坡和 NW 坡),平均水蚀速率约为 0.03 $\text{g}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$,占迎风坡总侵蚀量的 81.4%;而本试验迎风坡的平均水蚀速率达

到 189.4 $\text{g}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$,远大于自然坡面多年平均侵蚀速率。此外,在径流方向与风向相同的背风坡面(SE 坡和 S 坡),Zhang 等^[5]观测到风积(平均沉积速率 $<0.01 \text{ g}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$),而本研究结果均为侵蚀,这与研究开展的环境、手段、尺度等直接相关。室内交错侵蚀模拟的试验土槽一般尺寸较小(如本研究中的

1.2 m×1.0 m×0.1 m),侵蚀难以达到沉积发生的坡长条件,在野外环境下,坡面较长且上风向坡面对下风向坡面的侵蚀或沉积造成影响。

此外,野外条件下坡面地形、植被覆盖、土地利

用等因素也会影响风水交错侵蚀结果。在未来的研究中可以通过考虑坡形、植被等因素,研究风水交错侵蚀中的侵蚀和沉积特征,从而充分认识风水交错过程。

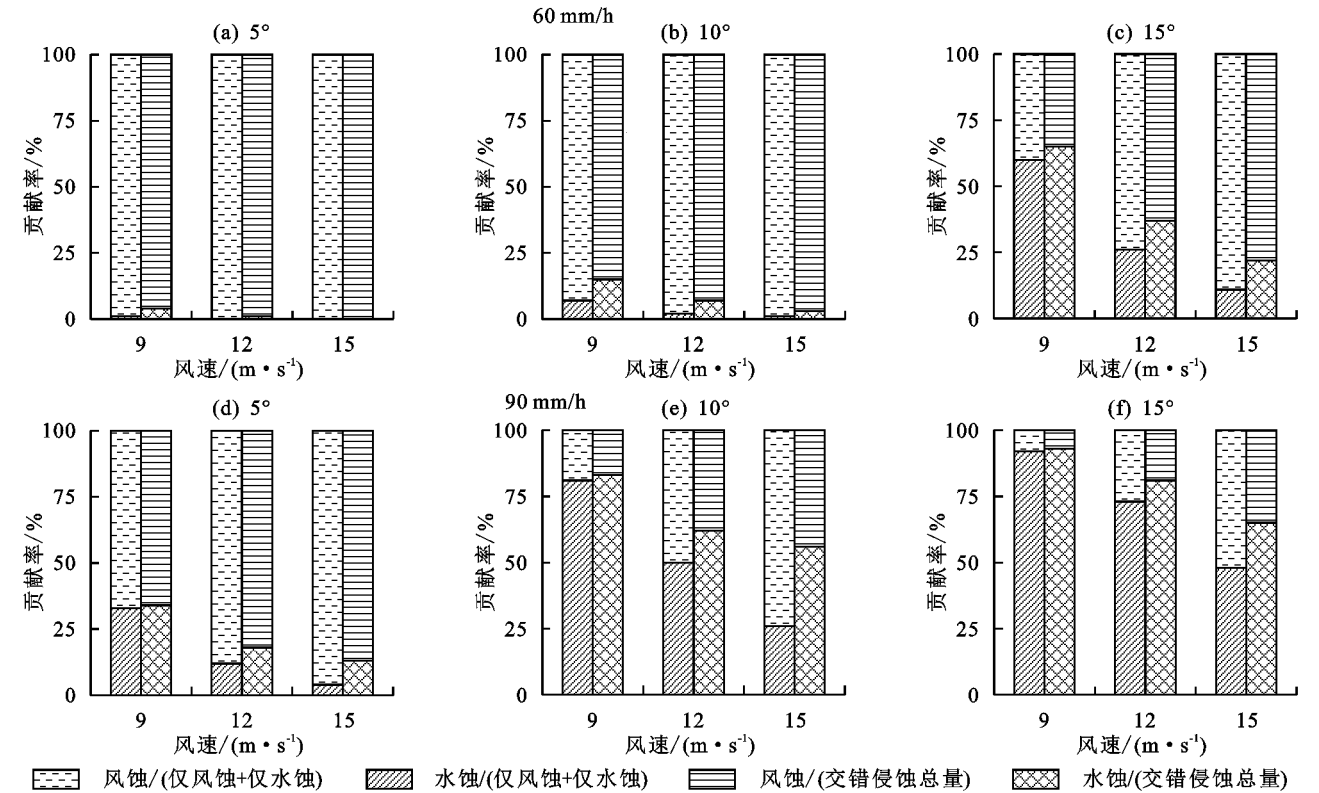


图 5 交错侵蚀中水蚀对总侵蚀的贡献

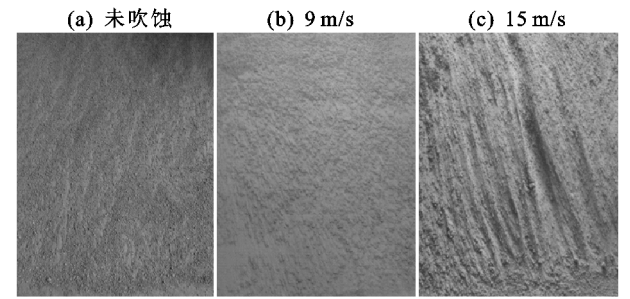


图 6 风蚀试验后的地表形态相对于风蚀前的变化

表 2 风蚀前后表层(0—1 cm)砂质壤土机械组成			
风速/ (m·s ⁻¹)	机械组成/%		
	黏粒	粉粒	砂粒
	<0.002 mm	0.002~0.05 mm	0.05~1 mm
0(无风蚀)	4.9	42.1	53.0
9	4.8	34.6	60.7
12	4.8	31.8	63.3
15	4.3	29.2	66.5

表 3 风蚀前后降雨入渗率变化						
风速/ (m·s ⁻¹)	入渗率/(mm·min ⁻¹)					
	60 mm/h			90 mm/h		
	5°	10°	15°	5°	10°	15°
0(无风蚀)	0.6	0.5	0.4	0.2	-0.1	-0.2
9	0.5	0.4	0.3	0.1	-0.2	-0.3
12	0.4	0.2	0.1	0.03	-0.4	-0.9
15	0.3	0.2	-0.3	-0.14	-0.5	-1.2

邓鑫欣等^[16]在风向与径流方向相反条件下,采用相同的土壤类型在相同试验条件(风速、降雨强度和坡度)开展的水—风交错侵蚀得出,前期水蚀对后继风蚀有明显的抑制作用,本研究的风—水交错侵蚀中,前期风蚀对后继水蚀有明显的促进作用。在相同风速下,水蚀在风—水交错总侵蚀中的贡献随雨强的增大逐渐增大,而水—风交错总侵蚀一直以水蚀为主(约 78%的试验组中水蚀的贡献>50%)。相同试验下,风—水侵蚀的总侵蚀量均较水—风侵蚀总侵蚀量大,在 9,12 和 15 m/s 风速下,风—水交错侵蚀速率比水—风交错侵蚀速率分别增大了 129.4~146.4, 640.4~834.4, 1 884.3~2 239.6 g/(min·m²)(图 7)。可见,风力与水力叠加过程不同的交错侵蚀中,风蚀和水蚀的相互作用(促进或抑制)、风蚀和水蚀在总侵蚀中的贡献、总侵蚀量均存在差异。

在未来的研究中,要明确风蚀交错侵蚀过程,揭示风蚀和水蚀的相互影响,首先,必须系统开展不同过程(风—水、水—风)的风水交错侵蚀,甚至应该考虑多次叠加过程的交错侵蚀过程(如风—水—风—水、水—风—水—风),为揭示风蚀和水蚀的互作奠定基础;其次,本研究发现,不同试验条件下,风蚀和水蚀的交互效应不同,加之不同的试验中变量类别及各变量的梯度较

多,且不同变量的数值、单位等均存在差异,直接采用变量进行交互效应分析存在巨大的难度。因此,未来的研

究中应考虑采用统一的变量表达方式(如侵蚀力、侵蚀力的能量)量化复合侵蚀过程中的交互效应。

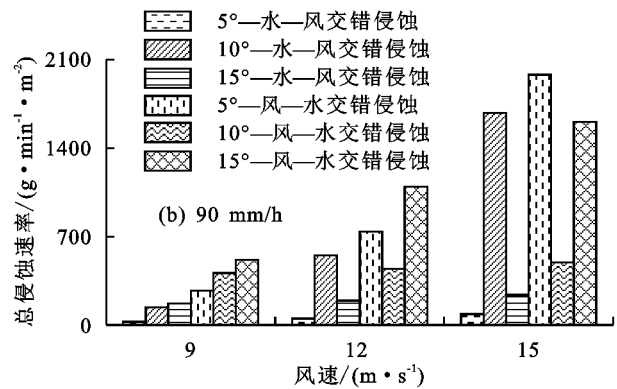
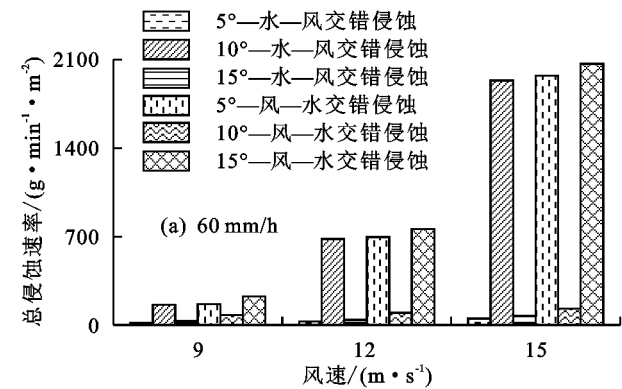


图 7 风和水风交错侵蚀的总侵蚀速率

4 结论

通过室内风洞和模拟降雨试验,研究了砂质壤土坡面在风向和径流方向相反条件下的风—水交错侵蚀特征,结果显示,与仅水蚀试验相比,前期风蚀导致后继水蚀的产流时间提前、径流强度增大、产沙速率增大,水蚀在交错侵蚀中的贡献较水蚀在仅风蚀与仅水蚀侵蚀量之和的比例增大。前期风蚀对后继水蚀存在明显的促进作用,前期风蚀导致后继水蚀增大0~4.6倍。不同试验条件下,前期风蚀对后继水蚀速率变化的影响程度随试验条件的改变发生差异变化,表明水蚀和风蚀的交互效应受试验条件的影响。风向与径流方向相反条件下,前期风蚀明显促进后继水蚀,而前期水蚀明显抑制后继风蚀。与水—风交错侵蚀相比,风—水交错侵蚀的总侵蚀量更大,水蚀在总侵蚀中的比例变化更复杂。未来研究中应系统研究不同交错侵蚀过程、多次交错过程叠加、地形影响的交错侵蚀,在此基础上,考虑采用统一的变量表达方式量化风蚀和水蚀的交互效应,为揭示风蚀和水蚀的互作机理奠定基础。

参考文献:

[1] 张攀,姚文艺,刘国彬,等.土壤复合侵蚀研究进展与展望[J].农业工程学报,2019,35(24):154-161.

[2] 杨会民,王静爱,邹学勇,等.风水复合侵蚀研究进展与展望[J].中国沙漠,2016,36(4):962-971.

[3] 张攀,姚文艺,肖培青,等.黄河流域砒砂岩区多动力侵蚀交互叠加效应研究[J].水利学报,2021,11(3):1-8.

[4] Field J P, Breshears D D, Whicker J J. Toward a more holistic perspective of soil erosion: Why aeolian research needs to explicitly consider fluvial processes and interactions [J]. Aeolian Research, 2009, 1(1/2): 9-17.

[5] Zhang J Q, Yang M Y, Sun X J, et al. Estimation of wind and water erosion based on slope aspects in the crisscross region of the Chinese Loess Plateau [J]. Jour-

nal of Soils and Sediments, 2018, 18(4): 1620-1631.

[6] 宋阳,严平,刘连友,等.威连滩冲沟砂黄土的风蚀与降雨侵蚀模拟实验[J].中国沙漠,2007,27(5):814-819.

[7] 张庆印,樊军,张晓萍.水蚀对风蚀影响的室内模拟试验[J].水土保持学报,2012,26(2):75-79.

[8] 左小锋,郑粉莉,张加琼,等.典型薄层黑土区前期坡面水蚀对土壤风蚀的影响[J].农业工程学报,2021, 37(12):45-53.

[9] 杨会民.半固定风沙土坡面风水复合侵蚀实验研究[D].北京:北京师范大学,2017.

[10] 李秋艳,蔡强国,方海燕.黄土高原风水蚀交错带风力作用对流域产沙贡献的空间特征研究[J].水资源与水工程学报,2011,22(4):39-45,49.

[11] Yang H M, Zou X U, Wang J A, et al. An experimental study on the influences of water erosion on wind erosion in arid and semi-arid regions [J]. Journal of Arid Land, 2019, 11(2): 208-216.

[12] Zhang Q Y, Fan J, Zhang X P. Effects of simulated wind followed by rain on runoff and sediment yield from a sandy loessial soil with rills [J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 9: 2306-2315.

[13] Tuo D F, Xu M X, Zhao Y G, et al. Interactions between wind and water erosion change sediment yield and particle distribution under simulated conditions [J]. Journal of Arid Land, 2015, 7(5): 590-598.

[14] Yang H M, Gao Y, Lin D G, et al. An experimental study on the influences of wind erosion on water erosion [J]. Journal of Arid Land, 2017, 9(4): 580-590.

[15] Ta W Q, Wang H B, Jia X P. The contribution of aeolian processes to fluvial sediment yield from a desert watershed in the Ordos Plateau, China [J]. Hydrological Processes, 2015, 29(1): 80-89.

[16] 邓鑫欣.黄土高原水蚀风蚀交错带坡面风水交错侵蚀特征研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2019.

参考文献:

[1] 刘超,聂锐华,刘兴年,等.山区暴雨山洪水沙灾害预报预警关键技术研究构想与成果展望[J].工程科学与技术,2020,52(6):1-8.

[2] Miyata S, Kosugi K, Gomi T, et al. Effects of forest floor coverage on overland flow and soil erosion on hillslopes in Japanese cypress plantation forests [J]. Water Resources Research, 2009, 45(6): e149.

[3] 杨帆,张宽地,杨婕,等.不同覆盖度下坡面流植被阻力特性研究[J].农业机械学报,2016,47(11):157-162.

[4] 张宽地,王光谦,孙晓敏,等.模拟植被覆盖条件下坡面流水动力学特性[J].水科学进展,2014,25(6):825-834.

[5] 戴矜君,程金花,张洪江,等.植被覆盖下坡面流阻力变化规律[J].水土保持学报,2016,30(2):44-49.

[6] 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.

[7] Wang X K, Yan X F, Zhou S F, et al. Longitudinal variations of hydraulic characteristics of overland flow with different roughness [J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 26(1): 66-74.

[8] 杨坪坪,张会兰,王云琦,等.植被覆盖度与空间格局对坡面流水动力学特性的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):26-33.

[9] 刘文剑,张会兰,王玉杰,等.模拟植被地表覆盖率和粗糙度对坡面流水动力特性的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):1-7.

[10] 潘成忠,上官周平.降雨和坡度对坡面流水动力学参数的影响[J].应用基础与工程科学学报,2009,17(6):843-851.

[11] 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.

[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.

[13] Ghani U, Anjum N, Pasha G A, et al. Investigating the turbulent flow characteristics in an open channel with staggered vegetation patches [J]. River Research and Applications, 2019, 35(7): 966-978.

[14] Xia X L, Liang Q H, Ming X D, et al. An efficient and stable hydrodynamic model with novel source term discretization schemes for overland flow and flood simulations [J]. Water Resources Research, 2017, 53(5): 3730-3759.

[15] Ersoy M, Lakkis O, Townsend P. A Saint-venant model for overland flows with precipitation and recharge [J]. Mathematical and Computational Applications, 2021, 26(1): 1-27.

[16] Biglari B S T W. Numerical modeling of flow around bridge abutments in compound channel [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 124(2): 156-164.

[17] 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, 2015, 27(3): 748-757.

[18] 中国科学院成都分院土壤研究室.中国紫色土上篇[M].北京:科学出版社,1991.

[19] 杨博.四川省植被覆盖度变化及驱动力分析[D].成都:四川农业大学,2018.

[20] 吕甚悟,李君莲.降雨及土壤湿度对水土流失的影响[J].土壤学报,1992,29(1):94-103.

[21] 姚文艺.坡面流阻力规律试验研究[J].泥沙研究,1996(1):74-82.

[22] 唐科明,张光辉,曹颖.动床条件下植被盖度对坡面流水动力特性的影响[J].西北农林科技大学学报,2020,48(2):148-154.

(上接第 36 页)

[17] 严友进,戴全厚,伏文兵,等.喀斯特裸坡产流产沙过程试验研究[J].生态学报,2017,37(6):2067-2079.

[18] 脱登峰.黄土高原风水交错侵蚀对坡面产流产沙及土壤质量的影响研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2013.

[19] 桑琦明,郑粉莉,王一菲,等.东北黑土区冻融、风力、水力交互作用对坡面侵蚀的影响[J].水土保持学报,2021,35(2):87-95.

[20] 左小锋,郑粉莉,张加琮,等.典型薄层黑土区前期地表风蚀作用影响坡面水蚀的研究[J].土壤学报,2021,58(5):1145-1156.

[21] Tuo D F, Xu M X, Gao L Q, et al. Changed surface roughness by wind erosion accelerates water erosion [J]. Journal of Soil and Sediments, 2016, 16(1): 105-114.

[22] 脱登峰,许明祥,郑世清,等.黄土高原风蚀水蚀交错区侵蚀产沙过程及机理[J].应用生态学报,2012,23(12):3281-3287.

[23] 脱登峰,许明祥,马昕昕,等.风水交错侵蚀条件下侵蚀泥沙颗粒变化特征[J].应用生态学报,2014,25(2):381-386.