

黄土高原风蚀水蚀交错区侵蚀产沙过程及机理*

脱登峰^{1,2} 许明祥^{2,3,**} 郑世清³ 李强³

(¹西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100; ²西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; ³中国科学院水利部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)

摘要 黄土高原风蚀水蚀交错区由于风蚀、水蚀的耦合作用, 侵蚀程度剧烈、过程复杂。采用风洞与模拟降雨相结合的方法, 研究了风水交错侵蚀条件下坡面产沙变化过程及侵蚀作用机理, 定量分析了风蚀对水蚀的影响程度及其与水蚀的关系。结果表明: 风蚀与水蚀之间存在明显的正交互效应。风蚀促进了侵蚀形态的发展, 改变了降雨产沙随雨强变化的量化关系。雨强 60、80 mm·h⁻¹ 时, 未风蚀处理下, 坡面产沙量随降雨历时呈下降趋势, 并趋于稳定; 但风蚀处理后, 产沙量降低至一定谷值时, 又呈波动增加趋势。60、80、100 mm·h⁻¹ 雨强下, 风蚀处理的坡面产沙量增幅为 7.3% ~ 27.9% (风速 11 m·s⁻¹)、23.2% ~ 39.0% (风速 14 m·s⁻¹); 雨强 120、150 mm·h⁻¹ 时, 降雨 15 min 内, 各处理的坡面产沙量均呈下降趋势, 但随着降雨历时的延长, 风蚀处理的坡面产沙量较未风蚀处理呈先低后高的变化趋势。风水交错侵蚀作用机理复杂, 在时空分布特征、能量供给、侵蚀力作用方式等方面相互联系、互相促进。

关键词 风水交错侵蚀 产沙过程 侵蚀机理 模拟试验

文章编号 1001-9332(2012)12-3281-07 中图分类号 S157.1 文献标识码 A

Sediment-yielding process and its mechanisms of slope erosion in wind-water erosion criss-cross region of Loess Plateau, Northwest China. TUO Deng-feng^{1,2}, XU Ming-xiang^{2,3}, ZHENG Shi-qing³, LI Qiang³ (¹College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ³State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.* 2012 23(12): 3281-3287.

Abstract: Due to the coupling effects of wind and water erosions in the wind-water erosion criss-cross region of Loess Plateau, the slope erosion in the region was quite serious, and the erosion process was quite complicated. By using wind tunnel combined with simulated rainfall, this paper studied the sediment-yielding process and its mechanisms of slope erosion under the effects of wind-water alternate erosion, and quantitatively analyzed the effects of wind erosion on water erosion and the relationships between wind and water erosions. There was an obvious positive interaction between wind and water erosions. Wind erosion promoted the development of microtopography, and altered the quantitative relationship between the sediment-yielding under water erosion and the variation of rainfall intensity. At the rainfall intensity of 60 and 80 mm·h⁻¹, the sediment-yielding without wind erosion decreased with the duration of rainfall and tended to be stable, but the sediment-yielding with wind erosion decreased to a certain valley value first, and then showed an increasing trend. At the rainfall intensity of 60, 80, and 100 mm·h⁻¹, the sediment-yielding with the wind erosion at speeds of 11 and 14 m·s⁻¹ increased by 7.3% - 27.9% and 23.2% - 39.0%, respectively, as compared with the sediment-yielding without wind erosion. At the rainfall intensity of 120 and 150 mm·h⁻¹ and in the rainfall duration of 15 minutes, the sediment-yielding with and

* 国家自然科学基金项目(41171422 40971174)、中国科学院战略性先导专项(XDA05050504)和中国科学院“西部之光”人才培养计划项目资助。

** 通讯作者. E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn

2012-04-08 收稿, 2012-09-25 接受。

without wind erosion presented a decreasing trend, but, with the increase of rainfall duration, the sediment-yielding with wind erosion showed a trend of decreasing first and increasing then, as compared with the sediment-yielding without wind erosion. The mechanisms of wind-water alternate erosion were complicated, reflecting in the mutual relation and mutual promotion of wind erosion and water erosion in the aspects of temporal-spatial distribution, energy supply, and action mode of erosion forces.

Key words: wind-water alternate erosion; sediment-yielding process; erosion mechanism; simulation experiment.

黄土高原风蚀水蚀交错区处于干旱半干旱的过渡地带,其范围大致自风蚀地区的长城沿线以南到水蚀地区北部的灵武、绥德、吴旗、固原、定西一线以北^[1],面积约 $42.77 \times 10^4 \text{ km}^2$,年降水量 $300 \sim 450 \text{ mm}$ ^[2].该区土壤侵蚀模数为 $6715.94 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$,为全国平均水平的 1.36 倍^[3],是黄土高原多沙粗沙的主要产区^[4]以及黄河下游泥沙的主要来源区之一.近年来,由于人类活动、化石燃料燃烧、环境变化等问题,导致该区的位置发生移动,水土流失十分严峻^[2].

风蚀水蚀交错区全年风蚀、水蚀交替进行,冬春季多大风沙尘暴、以风蚀为主,夏秋季多暴雨、以水蚀为主.如陕北神木六道沟小流域风蚀集中于 4—5 月,水蚀集中于 7—8 月,全年总风蚀量 21906.2 t ,占总水蚀量的 21.3%^[5].2 种侵蚀过程在时空上的交替复合作用,延长了侵蚀时间、加剧了侵蚀强度,其危害程度大于单一的水蚀区或风蚀区,成为该类地区环境脆弱的根本原因.因此,开展风水交错侵蚀相关研究对黄土高原水土流失防治及黄河水沙治理具有重要的现实意义.

风水交错侵蚀的复合作用方式受到众多影响因子的制约^[6-7],它的作用过程和机制相对复杂,与水力侵蚀和风力侵蚀不尽相同^[8],目前还不能定量风蚀对水蚀的影响程度及其与水蚀的关系^[9].因此,本研究通过室内风洞与人工模拟降雨试验,分析了风水交错侵蚀条件下坡面产沙过程及其作用机理,量化了风蚀、水蚀交互作用,以期对定量评价风水交错侵蚀的影响及制定区域水土流失防治措施提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验设计

本研究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进行.采用风速、雨强自动控制的直流吹气式风洞和侧喷式降雨设备进行试验.风洞全长 24 m、高 1.2 m、宽 1 m,分为风机段、调节段、整流段、实验段、集沙段和导流段.风机段长

3.55 m,风机通过配套变频器($0 \sim 50 \text{ Hz}$)调节风速,风速在 $0 \sim 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内连续可调.整流段长 10 m,可降低气流的湍流度,保证试验段风速、风向的稳定性.整流段后端距离试验段 0.2 m 处,设置有叶轮式风速仪,其距风洞地面高 0.2 m,试验前进行速率率定,达到设计风速($\pm 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).试验段长 1.28 m.集沙段长 2.02 m,由集沙仪收集段和集沙槽收集段组成,可收集 $0 \sim 40 \text{ cm}$ 不同地表高度的风蚀物.导流段可将气流导出实验室^[10].

侧喷式降雨系统的降雨高度为 16 m,落到地面的雨滴均已达到终点速度,雨滴直径在 $0.36 \sim 3.11 \text{ mm}$ ^[11],降雨强度在 $40 \sim 260 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,降雨均匀度大于 80%,最大持续时间 12 h^[12],试验时将土槽置于降雨均匀度最高的雨区范围内,并进行雨强率定,达到设计雨强($\pm 3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$).所用土槽为自制移动式变坡的风蚀、水蚀两用型钢槽,长 1.1 m、宽 0.7 m、高 0.35 m,装土深度 0.3 m.槽底充分开孔,使土壤水分可以自由向底部入渗.供试土壤采自风蚀水蚀交错区内的陕西省吴起县,0~20 cm 表层土 20~40 cm 下层砂黄土,土地利用类型为荒坡地.采集过程中,将表层土壤装入编织袋,防止与下层混淆,其颗粒组成分别为:粘粒占 12.7%,粉粒占 19.1%,砂粒占 68.2%.

土样采回后,拣去植物根系,过 5 mm 筛孔后自然风干,备用.填土之前先铺设 5 cm 细沙,用透水纱布覆盖,以保证土壤水分均匀下渗,分 6 层(每 5 cm 为 1 层,下 2 层填装 20~40 cm 下层土,上 4 层填装 0~20 cm 表层土)填装,边装边均匀压实,试验中将土壤容重控制在 $1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.每次在装下一层土之前将表土打毛,以消除两层土壤之间的垂直层理,填装结束后的土槽表面见图 1(未风蚀).

风蚀、水蚀组合试验:依据单次风蚀模数、风蚀厚度和我国土壤侵蚀分类分级标准,选取 2 个风速($11, 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),分别代表轻度风蚀和中度风蚀;参照黄土高原侵蚀性降雨特征,雨强分布于 $30 \sim 150$

$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1[13]}$, 且考虑试验结果分析的可行性, 最终

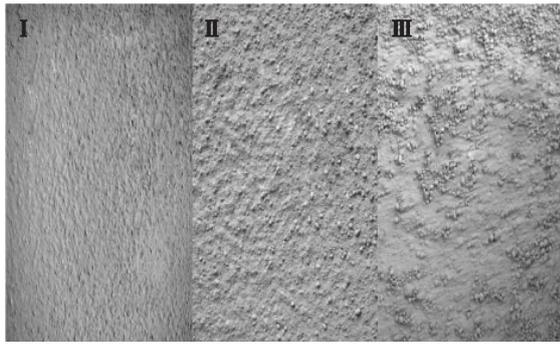


图 1 不同风速下的坡面形态

Fig. 1 Slope shape under different wind speeds.

I: $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (未风蚀 No wind erosion); II: $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; III: $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 下同 The same below.

选取 5 个雨强, 分别为 60、80、100、120、150 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 降雨坡度为 15° . 试验先风蚀、后水蚀, 以模拟自然条件下冬春季节的风蚀与夏秋季节的水蚀交替, 每个处理进行 2 次独立重复, 共 20 场次. 水蚀对照试验: 雨强、坡度同上, 每个处理进行 3 次独立重复, 共 15 场次. 以上各处理均需填装新土 (土壤自然风干, 质量含水量约 1.28%).

1.2 试验过程

土槽填装结束后放入风洞, 保持表层土壤与风洞底部在同一水平, 风蚀历时 20 min, 结束后收集集沙仪、集沙槽中风蚀物, 并测定表层 1 cm 土壤颗粒组成 (MS2000 激光粒度仪-马尔文法). 同时安装截流槽, 并将土槽放入降雨区立即进行降雨 (径流沿风流方向). 降雨开始后, 记录产流时间, 产流后开始计时, 历时 60 min, 并每隔 3 min 用编号采样桶收集过程样. 试验结束后, 将采样桶静置数小时, 然后倒掉上层清液, 剩余泥水样转移至铁盒内, 置于烘箱内烘干称量, 测定各降雨时刻产沙量.

2 结果与分析

2.1 风水交错侵蚀下的坡面形态变化

本试验条件下, 风蚀过程中, 由于风的动力压作用, 风挟带土壤颗粒贴地面运动时形成风沙流, 对地表物质进行冲击、摩擦. 这种磨蚀作用可使土壤质地逐渐粗化^[14-15] (图 1). 由表 1 可以看出, 中度风蚀 (风速 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 处理后, 表层 1 cm 土壤粘粒、粉粒和砂粒与未风蚀处理间差异显著, 粘粒、粉粒分别降低 9.1%、18.1%, 砂粒增加 6.6%. 另外, 风力剪切作用可使土壤结构相对疏松、坡面形成一定程度的沟壑条纹. 这种影响改变了降雨与产流时间的量化

关系. 风蚀处理后产流时间较未风蚀延长 8.2% ~ 表 1 不同风速下土壤颗粒组成

Table 1 Particle sizes of soils under different wind speeds (% , mean \pm SD)

风速 Wind speed ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	粘粒 Clay ($<0.002 \text{ mm}$)	粉粒 Silt ($0.002 \sim 0.02 \text{ mm}$)	砂粒 Sand ($0.02 \sim 2 \text{ mm}$)
0	12.7 \pm 0.4a	19.1 \pm 0.3a	68.2 \pm 0.5a
11	11.7 \pm 0.2b	15.7 \pm 0.3b	72.6 \pm 0.4b
14	11.5 \pm 0.1b	15.7 \pm 0.1b	72.8 \pm 0.1b

同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level.

14.3% (风速 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、0.4% ~ 5.6% (风速 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 轻度风蚀对其影响较小 (图 2).

坡面水蚀主要分为雨滴溅蚀、面蚀和沟蚀 3 个阶段. 降雨过程中, 雨滴对土壤颗粒的冲击力很大, 使之破碎和移动, 很快堵塞了表层土壤大孔隙, 加之雨量短时间内超过降雨入渗, 易形成地表径流. 随着汇水面积的不断增大, 侵蚀形态由溅蚀发展为面蚀, 并在产流后期, 逐步过渡为细沟侵蚀, 而沟间又出现分叉、合并和连通现象, 最终形成了完整的沟蚀体系^[16].

整个降雨过程中, 风蚀处理后面蚀、沟蚀较未风蚀处理提前出现. 雨强为 $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 中度风蚀处理下, 坡面产流 6 min 后, 由溅蚀向面蚀发展; 产流 15 min 后, 逐步形成沟蚀, 整个过程较未风蚀处理提前 3 min 左右 (图 3). 可见, 风力侵蚀通过对土壤物理性状的改变, 一定程度上加速了侵蚀阶段的发育, 促进了坡面形态的变化.

2.2 风水交错侵蚀产沙量的变化过程

本试验条件下, 风蚀处理后坡面径流携沙能力增强 (图 4). 但在不同风速、雨强下, 坡面产沙过程存在一定差异. 雨强 60、80、100 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 随着降雨历时的持续, 风蚀处理后的坡面产沙量较未风蚀处理增大. 相对于未风蚀处理, 风蚀处理对坡面产沙

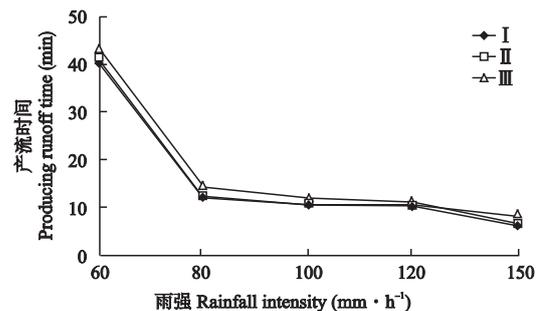


图 2 不同风速处理下坡面产流时间

Fig. 2 Producing runoff time under different wind speed treatments.

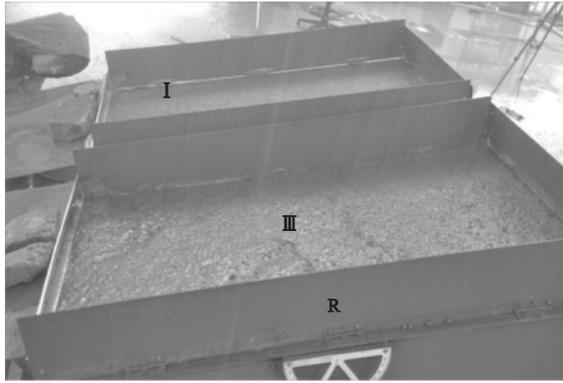


图3 不同风速处理下的降雨坡面形态
Fig.3 Rainfall slope shape under different wind speed treatments.

R: 雨强 Rainfall intensity was $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$.

量的增幅分别为 7.3% ~ 27.9% (风速 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和 23.2% ~ 39.0% (风速 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) ,中度风蚀(风速 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 较轻度风蚀(风速 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 对其影响更大.

在雨强 $120, 150 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 条件下,坡面产沙过程与雨强 $60, 80, 100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时不同.产流前期,未风蚀处理下产沙量大于风蚀处理,前者产沙量的增速较后者更快;产流 45 min 以后,增加趋势有所减缓,未风蚀处理下的产沙量最终小于风蚀处理.

2.3 风水交错侵蚀产沙的因素分析

2.3.1 风速对产沙的影响 土壤风蚀是气流与地表的一种动力作用过程,包括风将地表物质吹起及搬运的吹蚀和地表物质受到风沙流冲击及摩擦的磨蚀等两种作用^[17].土壤颗粒的运动主要包括蠕移、跃移、悬移 3 种形式,而跃移是风沙运动中最重要的一种形式,占总风蚀量的 50% 以上^[18],粒径范围为 $60 \sim 180 \mu\text{m}$ ^[19].

由表 2 可以看出,距地面 $0 \sim 7 \text{ cm}$ 高处的含沙量占总风蚀量的 71.1% (风速 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、59.6% (风速 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).风蚀物随气流的漂浮和搬运并非均匀分布,而是随地面高度的升高呈指数递减^[20],其关系式如下:

$$Y = 265.57e^{-0.78x} \quad R^2 = 0.9366 \quad (\text{风速 } 11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$$

$$Y = 1589.6e^{-0.96x} \quad R^2 = 0.9837 \quad (\text{风速 } 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$$

表 2 不同地面高度含沙量 (g) 及其占总沙量的比例

Table 2 Sediment yield (g) under different ground heights and the ratio to total sediment productions

风速 Wind speed ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	高度 Height (cm)						
	0~7	7~9	13~15	19~21	25~27	31~33	37~39
11	739.1(71.1%)	206.1(19.8%)	64.6(6.2%)	15.7(1.5%)	6.9(0.7%)	3.7(0.4%)	3(0.3%)
14	1714(59.6%)	778.4(27.1%)	274.6(9.6%)	64.5(2.2%)	26.2(0.9%)	10.2(0.4%)	6.7(0.2%)

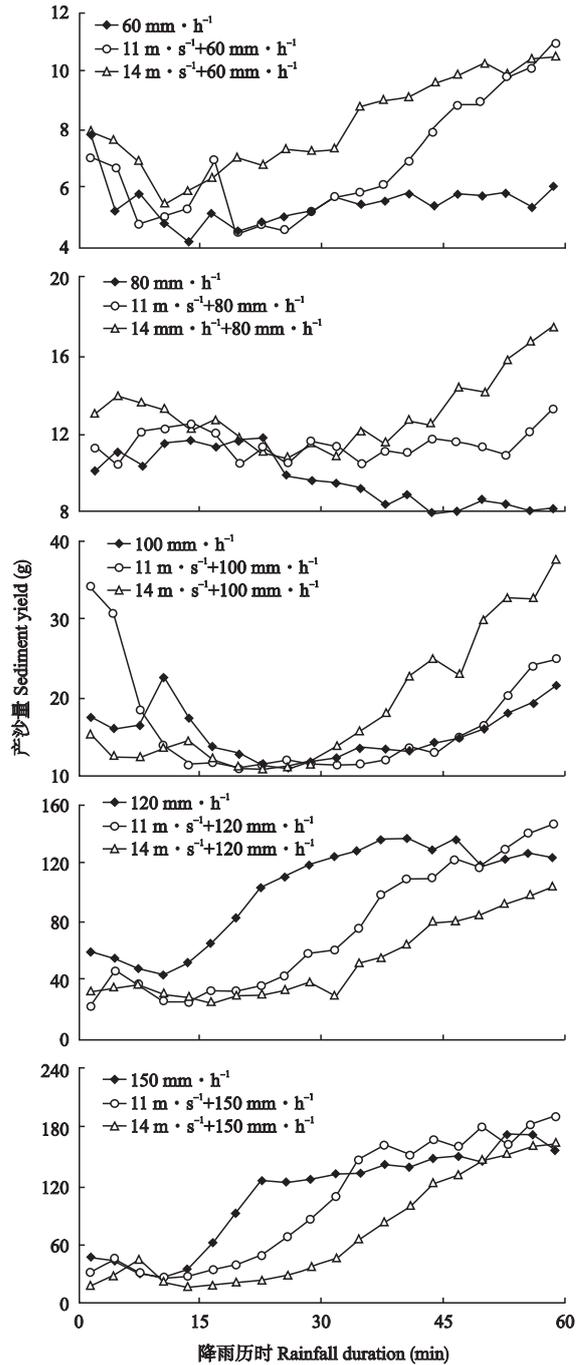


图 4 不同风速处理下雨强与产沙量的关系
Fig.4 Relationship between rainfall intensity and sediment yield under different wind speed treatments.

式中: Y 为风蚀量 (g); x 为地面高度 (cm). 风速为 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的系数 (0.96) 大于风速 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的

系数(0.78),说明前者对坡面产沙的影响较大,相同条件下,前者较后者对坡面结构的破坏性更强。

2.3.2 降雨对产沙的影响 本试验条件下,坡面产沙量随雨强的增大而增加,但不同雨强下,坡面产沙规律有很大差异。小雨强($60、80\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$)条件下,坡面产沙量随降雨历时的延长逐渐降低,产流中后期达到谷值后,便趋于稳定;在大雨强($100、120、150\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$)条件下,产沙量下降至一定水平后便呈波状增加趋势(图5)。

产流前期,坡面径流不断冲刷表层分散状态的土壤细颗粒,加之雨滴击溅,导致粗颗粒破碎。这一过程使土壤表面形成较致密的物理结皮层,一定程度上增强了土壤抗蚀性,导致坡面产沙量下降。产流中后期,雨强为 $60、80\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,侵蚀产沙主要是薄层水流对土壤表面的层状剥蚀,侵蚀方式以面蚀为主,产沙量变化趋于稳定;雨强为 $100、120、150\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,降雨动能和降雨量的增幅较大,径流携沙能力加剧,侵蚀形态从面蚀发展为沟蚀,产沙量迅速增大。可见,大雨强对坡面产沙量影响巨大,在侵蚀区环境治理过程中,应予以重视。

2.4 风水交错侵蚀机理

风水交错侵蚀指风力、水力对同一侵蚀对象(区域)的交替作用,涉及到气、液、固3种介质,与单相侵蚀的作用机制不尽相同^[8,21]。

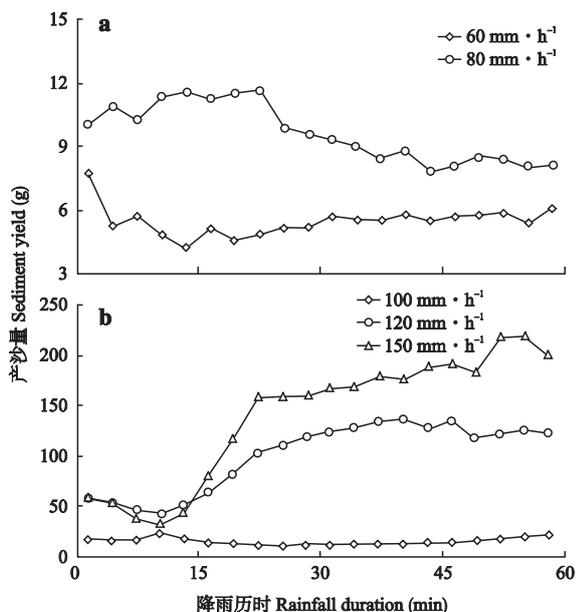


图5 不同雨强下坡面产沙量的变化

Fig. 5 Change of sediment yield under different rainfall intensities.

a) 小雨强 Light rainfall intensity ($60, 80\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$); b) 大雨强 Heavy rainfall intensity ($100, 120, 150\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$).

侵蚀时间方面,风蚀水蚀交错区冬春季多大风沙尘暴,以风力侵蚀为主;夏秋季多暴雨,以水力侵蚀为主。两种侵蚀过程在时间上交替、在空间上叠加,延长了侵蚀时间,加剧了侵蚀程度,成为该区侵蚀强烈的主要原因。能量供应方面,在地形额外附加较高侵蚀能的基础上,降雨侵蚀能与风力侵蚀能交互出现,有效侵蚀能显著增大,为土壤侵蚀提供了动力条件^[9]。神木县六道沟流域2—5月、11—12月有效风能最高,6—10月有效水蚀能最高,使之成为黄土高原高侵蚀能量环境区^[21]。物质供应方面,两者互为因果,互相促进:风蚀对地表物质搬运并贮存在坡面、沟道和河道中,为水蚀发生提供了物质基础,而水蚀对地表物质的冲刷、沉积又为风蚀提供了物质来源^[22]。地貌特征方面,两种侵蚀营力共同作用形成风水地貌:水力作用改变地貌形态,而泥沙颗粒又经风蚀堆积作用发生再塑造,形成新的地貌景观(如沙丘)^[23]。侵蚀营力方面,风力侵蚀导致土壤质地粗化,结构稳定性下降,一定程度上促进了水力侵蚀,形成了富含细颗粒的暴雨径流,而后者又进一步加剧了对坡面粗颗粒的搬运。两者在侵蚀过程中互相促进、相互影响。

3 讨论

3.1 风水交错侵蚀对坡面产沙的影响

风水交错侵蚀是干旱半干旱地区主要的侵蚀类型。两种侵蚀相互作用,可用 Δf 表示其增加的强度, Δf 可能为正值、也可能为负值^[24]。研究表明,风水交错侵蚀存在明显的正交互效应, Δf 值的大小又与风蚀和水蚀强度相关。

雨强为 $60、80、100\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,相对于未风蚀处理,风蚀处理的坡面产沙量增大,且中度风蚀(风速 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)处理的影响大于轻度风蚀(风速 $11\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)处理。有研究认为,风力剪切作用使土粒相对疏松,破坏了土壤结构,抗冲性降低^[25],而降雨径流在沿坡面运动过程中产生径流冲刷力,冲刷表层土壤^[26],前者加剧了后者的径流携沙能力。随着降雨历时的持续,产流中后期(产时 $>15\text{ min}$),风蚀处理坡面侵蚀形态从溅蚀发展为面蚀,并逐步形成沟蚀,产沙量呈波状趋势上升。但未风蚀处理下,坡面降雨入渗达到稳渗阶段后,侵蚀形态主要以面蚀为主,尤其雨强为 $60、80\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,很难出现沟蚀,产沙量趋于稳定。这在一定程度上体现了风蚀对坡面物理性状的改变,进而影响整个降雨历时中产沙量的变化。

雨强为 120、150 mm · h⁻¹ 时,随着降雨历时的延长,风蚀处理的坡面产沙量较未风蚀处理呈先低后高的变化趋势,产沙过程与 60、80、100 mm · h⁻¹ 不同。产流前期,尽管风蚀作用使表层土壤粗化,但此时的降雨动能和流速充分满足了粗颗粒物搬运的动力条件,使坡面径流携带富含细颗粒、粗颗粒的泥沙一起搬运,从而导致未风蚀处理的坡面产沙量明显大于坡面缺少细颗粒的风蚀处理。但随着降雨历时的延长,产流 45 min 以后,前期风力剪切作用使坡面形成一定程度的沟壑条纹,径流流过时就会由缓流迅速变为局部急流,导致径流下切侵蚀力增强,并不断挖蚀坡面发生溯源侵蚀,加速了沟蚀的发育,使产沙量增加速度明显增大^[16]。可见,风蚀改变了降雨产沙随雨强变化的量化关系,两者存在明显的交互效应。

120、150 mm · h⁻¹ 雨强下,不同降雨时段内中度风蚀与轻度风蚀处理间坡面产沙量增速有一定差异。产时 < 15 min 时,两者无明显差别;产时 > 15 min 时,后者产沙量增速较大。这可能与土壤性质、水流剪切力、侵蚀因子等因素有关,有待于进一步研究。

3.2 风水交错侵蚀对泥沙运动的影响

在风蚀水蚀交错区,两种侵蚀过程在时空分布特征、侵蚀能量供给、侵蚀力作用方式等方面相互联系、互相促进,为高含沙水流的形成提供了物质基础^[27],严重影响了流经该区的各大水系^[28]。高含沙水流是一种特殊的两相紊流。其中,液相是由水和细颗粒泥沙组成的近于均质的浆液,固相是悬浮在这一均质浆液中的粗颗粒泥沙。由于浆液中絮凝结构的形成,粗颗粒的沉降速度降低,使之大量进入悬浮状态而向下运移,水流携沙的能力大为提高^[29]。风水交错侵蚀作用通过对泥沙供应条件的调节,来控制悬移质泥沙中粗细颗粒的搭配关系,液相能达到最大的浓度,固相(粒径 > 0.05 mm)供应也较充分,占泥沙总量的 23.1%^[30],从而实现最优组合^[31]。

近年来,黄土高原大规模退耕还林工程的实施,使风蚀水蚀交错区的水土流失态势呈现逐步好转的趋势。但是,局部的水土流失问题依然严峻,开展风水交错侵蚀研究对黄土高原水土流失和黄河泥沙问题的解决至关重要,在区域环境治理过程中,应给予充分关注。

参考文献

[1] Li M (李勉), Li Z-B (李占斌), Liu P-L (刘普灵), *et al.* Characteristics of different aspect of soil ero-

sion in wind-water erosion crisscross region on Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2004, **18**(1): 63-66 (in Chinese)

- [2] Yao Z-Y (姚正毅), Qu J-J (屈建军), Zheng X-M (郑新民), *et al.* Present status, characteristic of distribution and development tendency of soil and water loss of wind-water erosion of agriculture-animal husbandry intercrossed area in north. *Soil and Water Conservation in China* (中国水土保持), 2008(12): 63-66 (in Chinese)
- [3] Zou Y-R (邹亚荣), Zhang Z-X (张增祥), Wang C-Y (王长有), *et al.* Analysis on the distribution characteristics of the interleaving zones of water/wind erosion in China. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 2003, **3**(1): 67-70 (in Chinese)
- [4] Cha X (查轩), Tang K-L (唐克丽). Study on comprehensive control mode of small watershed eco-environment in water and wind crisscrossed erosion zone. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2000, **15**(1): 97-100 (in Chinese)
- [5] Zhang P-C (张平仓). Spatial and temporal variability of erosion by water and wind in water-wind erosion crisscross region. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation* (土壤侵蚀与水土保持学报), 1999, **5**(3): 93-96 (in Chinese)
- [6] Bullard JE, Livingstone I. Interactions between aeolian and fluvial systems in dryland environments. *Area*, 2002, **34**: 8-16
- [7] Song Y (宋阳), Yan P (严平), Liu L-Y (刘连友), *et al.* Simulated experiment of erosion by wind and rainfall on sandy Loess in Weiliantan gully. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2007, **27**(5): 814-819 (in Chinese)
- [8] Visser SM, Sterk G, Ribolzi O. Techniques for simultaneous quantification of wind and water erosion in semi-arid regions. *Journal of Arid Environments*, 2004, **59**: 699-717
- [9] Li Q-Y (李秋艳), Cai Q-G (蔡强国), Fang H-Y (方海燕). Advances in complex erosion of wind and water and ecological restoration. *Progress in Geography* (地理科学进展), 2010, **29**(1): 65-72 (in Chinese)
- [10] Liu Z-D (刘振东), Wang F (王飞), Li G-L (李光录). Impact of conical spoilers on air current uniformity and stability of inner wind erosion tunnel. *Journal of Northwest A & F University* (Natural Science) (西北农林科技大学学报·自然科学版), 2011, **39**(11): 133-140 (in Chinese)
- [11] Wang Z-L (王占礼), Sun Q-M (孙全敏), Zheng F-L (郑粉莉), *et al.* Physically-based model of rainfall flow kinetic energy. *Journal of Hydraulic Engineering* (水利学报), 2005, **36**(11): 1280-1285 (in Chinese)

- [12] Zheng F-L (郑粉莉), Zhao J (赵军). Brief introduction of the artificial rainfall simulation laboratory and rainfall simulation device. *Research of Soil and Water Conservation (水土保持研究)*, 2004, **11**(4): 177-178 (in Chinese)
- [13] Qu L-Q (屈丽琴), Lei T-W (雷廷武), Zhao J (赵军), et al. Laboratory experiments of runoff processes in small watershed under simulated rainfall. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (农业工程学报)*, 2008, **24**(12): 25-30 (in Chinese)
- [14] Zheng Y-C (郑永春), Wang S-J (王世杰). Geological cause of calcareous soil erosion and land rocky desertification in karst area, Guizhou Province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin (长江流域资源与环境)*, 2002, **11**(5): 462-465 (in Chinese)
- [15] Song Y, Liu LY. A review of soil erodibility in water and wind erosion research. *Journal of Geographical Science*, 2005, **15**: 167-176
- [16] Guo C-J (郭成久), An X-Q (安晓奇), Wu M (武敏), et al. Simulation experiment of erosion and sediment yield of spoil ground. *Soil and Water Conservation in China (中国水土保持)*, 2010(3): 29-31 (in Chinese)
- [17] Shang R-Y (尚润阳). Study on Mechanism and Effect between Earth Mulching and Soil Wind Erosion. Master Thesis. Beijing: Beijing Forestry University, 2007 (in Chinese)
- [18] Zang Y (藏英), Gao H-W (高焕文). Research on occurrence mechanism and control technology of wind erosion in agricultural lands. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (农业工程学报)*, 2002, **18**(3): 198-198 (in Chinese)
- [19] Cao Z (曹振), Hu K (胡克), Zhang Y-G (张永光), et al. Grain size distribution and wind erosion possibilities of surface sediments in Horqin Sandland. *Journal of Desert Research (中国沙漠)*, 2005, **25**(1): 15-19 (in Chinese)
- [20] Zhao P-Y (赵沛义), Tuo D-B (妥德宝), Li H-C (李焕春), et al. Wind tunnel test on effect of strip width and crop stubble height on wind erosion modulus. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (农业工程学报)*, 2011, **27**(11): 206-210 (in Chinese)
- [21] Song Y (宋阳), Liu L-Y (刘连友), Yan P (严平). A review on complex erosion by wind and water research. *Acta Geographica Sinica (地理学报)*, 2006, **61**(1): 77-88 (in Chinese)
- [22] Zhang P-C (张平仓), Tang K-L (唐克丽). Study on the effective water and wind erosion energy and its characteristics in Liudaogou small watershed. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation (土壤侵蚀与水土保持学报)*, 1997, **3**(2): 32-40 (in Chinese)
- [23] Farouk EB, Monique M, Cordula R. Fluvio-aeolian dynamics in the north-eastern Sahara: The relationship between fluvial/aeolian systems and ground-water concentration. *Journal of Arid Environments*, 2000, **44**: 173-183
- [24] Hai C-X (海春兴), Shi P-J (史培军), Liu B-Y (刘宝元), et al. Research status of wind and water double erosion and its main study content in future. *Journal of Soil and Water Conservation (水土保持学报)*, 2002, **6**(2): 50-53 (in Chinese)
- [25] Breshears DD, Whicher JJ, Johansen MP, et al. Wind and water erosion and transport in semi-arid shrubland, grassland and forest ecosystems: Quantifying domination of horizontal wind-driven transport. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, **28**: 1189-1209
- [26] Pan C-Z (潘成忠), Shanguan Z-P (上官周平). Generation mechanism of woodland runoff and sediment on Loess Plateau under hypo-rainfall: A case study of artificial *P. tabulaeformis* and secondary natural *P. dadi-diana*. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2005, **16**(9): 1597-1602 (in Chinese)
- [27] Xu JX. The wind-water two-phase erosion and sediment-producing process in the middle Yellow River basin, China. *Science in China Series D*, 2000, **43**: 176-186
- [28] Montgomery JA, Busacca AJ, Frazier BE, et al. Evaluating soil movement using cesium-137 and revised universal soil loss equation. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, **61**: 571-579
- [29] Qian N (钱宁). Hyperconcentrated Flow. Beijing: Tsinghua University Press, 1989 (in Chinese)
- [30] Wang Y-F (汪亚峰), Fu B-J (傅伯杰), Chen L-D (陈利顶), et al. Profile distribution of sediment particle sizes at a check dam in a small watershed of Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2009, **20**(10): 2461-2467 (in Chinese)
- [31] Xu JX. Hyperconcentrated flows as influenced by coupled wind-water processes. *Science in China Series D*, 2005, **48**: 1990-2000

作者简介 脱登峰,男,1987年生,硕士研究生.主要从事土壤侵蚀的环境效应研究. E-mail: tdfeng2006@163.com

责任编辑 杨弘