

网络出版时间:2016-04-07 09:00

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2016.05.019

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20160407.0900.038.html

模拟降雨条件下覆沙坡面产流产沙过程研究

汤珊珊¹,李占斌^{1,2},李 聪²,赵宾华²

(1 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室,陕西 西安 710048;

2 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] **【目的】**分析不同覆沙条件下坡面降雨的产流产沙过程,为揭示黄土高原水蚀风蚀交错区风水复合侵蚀机制奠定基础。**【方法】**采用3个雨强(0.5,1.0,1.5 mm/min)和3种覆沙方式(全坡、半坡、无覆沙)在室内进行模拟降雨试验,分析不同雨强和覆沙条件下坡面的产流产沙特征。**【结果】**坡面覆沙与无沙坡面(裸坡)相比延长了降雨初始产流时间1~30 min;坡面覆沙后使得坡面的产流产沙过程复杂化,出现多峰多谷现象;坡面的累计径流量和累计产沙量均与降雨历时呈显著线性相关,相关系数在0.9以上;累计径流量与累计产沙量之间呈函数相关性,相关系数在0.90以上。**【结论】**坡面覆沙在一定程度上加剧了侵蚀的发生。

[关键词] 覆沙坡面;模拟降雨;风水复合侵蚀;侵蚀产沙

[中图分类号] S157.1

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2016)05-0139-08

Runoff and sediment yield process on sand covered slope under simulated rainfall

TANG Shan-shan¹, LI Zhan-bin^{1,2}, LI Cong², ZHAO Bin-hua²

(1 Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】** The runoff and sediment processes on sand covered slope were studied to provide basis for revealing aeolian-fluvial interaction in wind and water erosion crisscross region. **【Method】** Rainfall was simulated indoor with 3 rain intensities (0.5, 1.0 and 1.5 mm/min) and 3 topdressing ways (sand slope, half of sand slope and bare slope) to analyze the runoff and sediment characteristics. **【Result】** Compared to bare slope, sand slope delayed the initial runoff by 1—30 min. The sand covered slope made the process of runoff and sediment more complex and the phenomenon of multimodal multi-valley appeared. The cumulative runoff and sediment yield were significantly linearly related to rainfall duration with correlation coefficient of above 0.9. The cumulative runoff and cumulative sediment yield also related with correlation coefficient of above 0.90. **【Conclusion】** The sieved sand slope aggravate erosion occurs in a certain extent.

Key words: sand covered slope; simulated rainfall; complex erosion of wind and water; erosion and sedi-

[收稿日期] 2014-09-19

[基金项目] 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB403302);国家自然科学基金项目(41071182);西安理工大学博士创新基金项目(310-252071505)

[作者简介] 汤珊珊(1988—),女,宁夏灵武人,在读博士,主要从事土壤侵蚀动力学研究。E-mail:military1205@163.com

[通信作者] 李占斌(1962—),男,河南南阳人,研究员,博士,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。

E-mail:zhanbinli@126.com

ment yield

风蚀水蚀交错区是黄土高原土壤侵蚀最为严重的地区^[1-3],也是黄河粗泥沙的主要来源区^[3]。在风水复合侵蚀机理方面,李秋艳等^[4]、邹亚荣等^[5]、海春兴等^[6]、王涛等^[7]分别就侵蚀特点、土壤特性、侵蚀产沙、侵蚀能量等进行了研究。李秋艳等^[1]还以窟野河为例分析了风蚀对流域侵蚀产沙贡献的时间尺度特征。风水复合侵蚀是风力与水力共同或交替作用、相互增强或者削弱的复杂过程,二者之间互为因果,相互促进,在时间、空间上相互交替、交错分布^[8],是造成风水复合侵蚀区土壤侵蚀加剧的主要原因^[9]。张庆印等^[8]的室内模拟试验结果表明,水蚀沟的宽度、深度、密度等对风蚀具有重要影响。查轩等^[10]研究表明,黄土高原侵蚀最严重的地区是降雨量在 400 mm 左右的风蚀水蚀交错区。Bullard 等^[11-12]将风水交互作用划分为 3 种形式,即风蚀主导型、水蚀主导型和风水交互型。宋阳等^[13]提出风水复合侵蚀的概念,即风力与水力共同或交替作用、相互增强或者相互削弱的过程。Visser 等^[14]指出,风水复合侵蚀的作用过程和机制与水力侵蚀、风力侵蚀不尽相同,相对较为复杂。李秋艳等^[4]指出,目前还无法就风蚀对水蚀的影响程度及其与水蚀的关

系进行定量描述。脱登峰等^[15-17]通过室内风洞和人工模拟降雨试验对风水交错侵蚀条件下坡面产沙过程及其作用机理进行了分析,并量化了风蚀、水蚀的交互作用。

目前,国内外学者虽然在风水复合侵蚀的研究上取得了较大进展,但由于其野外监测复杂,致使研究多停留在定性描述阶段,而在室内模拟方面很少涉及。为此,本研究从坡面尺度上,利用模拟降雨试验,分析不同雨强下覆沙坡面产流产沙过程的变化,以期揭示风蚀沉积对水蚀过程的作用机理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验在西安理工大学的雨洪侵蚀大厅进行,降雨装置采用下喷式模拟降雨器,生成的雨滴有效降落高度为 6 m,降雨强度为 0.25~3 mm/min,为了保证模拟降雨的均匀度,配套安装稳压器提高电源的稳定性,模拟降雨均匀度在 85% 以上。试验采用宽 1 m、高 0.7 m、长 13 m 的钢制土槽,试验坡度设计为 12°,试验装置如图 1 所示。

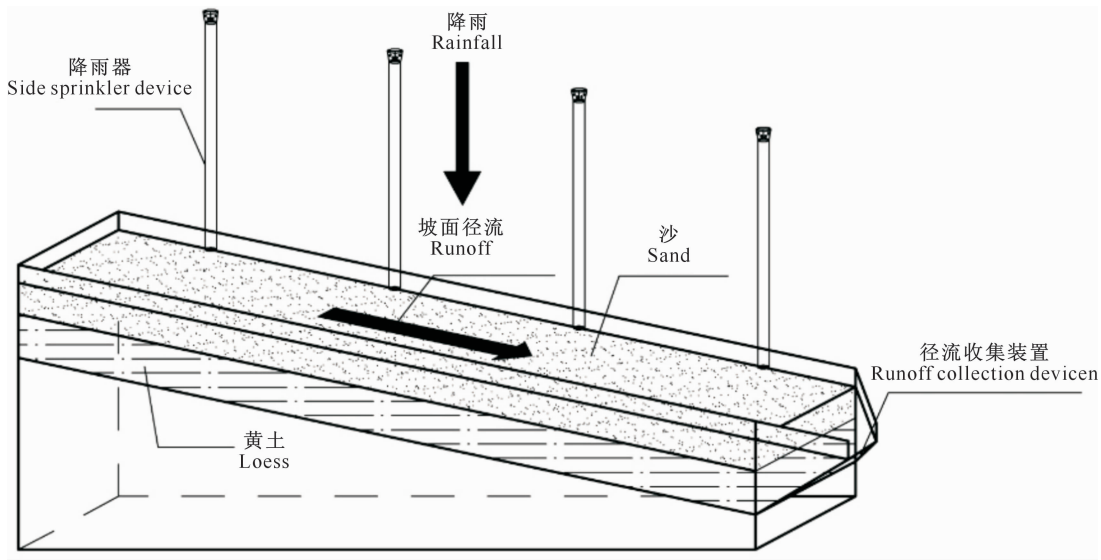


图 1 模拟降雨试验装置
Fig. 1 Experiment device of simulated rainfall

模拟降雨试验的设计雨强分别为 0.5、1.0 和 1.5 mm/min。试验土样为取自西安周边的黄土及内蒙古达拉特旗东柳沟流域的风沙土,土壤颗粒特征见表 1。试验装土时采用分层装土法,每次填土 5

cm,分 5 次进行填装,适当压实,覆土完成后在黄土表面覆沙 10 mm,控制土壤体积质量在 1.3 g/cm³左右,土壤前期相对含水量为 23% 左右,各场试验的降雨历时均为 30 min(产流开始后计时)。

表 1 模拟降雨试验用土的颗粒组成特征

Table 1 Characteristics of tested soil particles in rainfall simulation

%

土样 Sample	黏粒(≤ 0.002 mm) Clay	粉粒($0.002\sim 0.02$ mm) Powder	砂粒(≥ 0.02 mm) Sand
黄土 Loess	12.93	82.55	4.52
风沙土 Sandification	0.72	14.38	84.90

为了对比分析覆沙坡面对侵蚀产沙的影响,采用全覆沙坡面(即全沙波面)、半坡覆沙坡面(即半沙坡面)以及无覆沙坡面(即无沙坡面或裸坡)3种方

式开展试验,其中覆沙厚度均为 10 mm。具体如图 2 所示。

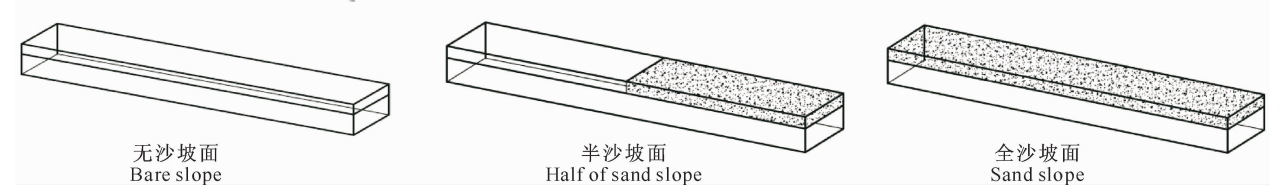


图 2 覆沙坡面模拟试验的 3 种覆沙方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sand sediment scheme for simulating sand-covered slope

1.2 试验方法

每场试验之前进行降雨强度的率定,以保证降雨均匀度和降雨强度达到试验要求。各次试验中,详细观测产流全过程,降雨产流开始时计时,记录开始产流时间、产流结束时间和细沟出现时间,同时观察坡面形态变化过程。坡面开始产流后,每隔 1 min 采集土槽出流口处的含沙水样,用烘干法测量径流含沙量,同时接取全部径流泥沙样,计算总径流量和侵蚀量。

2 结果与分析

2.1 雨强和覆沙方式对初始产流时间的影响

由表 2 可以看出,3 种雨强下,坡面初始产流所

用时间均表现为全沙坡面>半沙坡面>无沙坡面;不同雨强相同坡面条件下,全沙坡面和半沙坡面的初始产流时间均随着雨强的增大而缩短,而无沙坡面(裸坡)由于 1.0 mm/min 雨强下坡面的初始相对含水量略小于 0.5 mm/min 雨强下,所以其初始产流时间以 1.0 mm/min 下最长,0.5 mm/min 次之,1.5 mm/min 的最短。综上所述可以得出,坡面覆沙具有延长初始产流时间的作用,其原因主要与沙物质本身的特性有关,在降雨初始阶段,覆沙坡面主要进行的是蓄满产流,在这一阶段,大部分降雨首先用来入渗,由于沙物质的孔隙度较大且具有一定的阻水作用,致使坡面达到饱和含水量的时间明显延长。

表 2 覆沙坡面初始产流时间与雨强的关系

Table 2 Relationship of runoff initial time and rainfall intensity for sand-covered slope

雨强/(mm·min ⁻¹) Rainfall intensity	全沙坡面 Sand slope	半沙坡面 Half of sand slope	无沙坡面(裸坡) Bare slope
0.5	44.45	15.63	7.00
1.0	37.03	11.62	10.01
1.5	20.57	11.42	0.83

2.2 不同雨强和覆沙条件下产流含沙量的变化

图 3 绘制了不同雨强 3 种坡面(全沙坡面、半沙坡面、无沙坡面)条件下产流含沙量随时间的变化过程曲线。从图 3 可以看出,不同雨强 3 种坡面的产流含沙量随时间的变化规律大体一致,均经历“急剧上升期-稳定变化期-缓慢下降期”。出现此种现象的原因主要是,在降雨初期,由于坡面表层存在大量浮土颗粒,径流中的泥沙量增大;而随着降雨的持

续,到达降雨中期,由于坡面细沟开始大量出现,致使径流含沙量出现波动;到达降雨后期,坡面细沟发展逐渐趋于稳定,含沙量开始逐渐降低。同时,从图 3 可以看出,0.5 mm/min 雨强条件下,含沙量的大小变化表现为全沙坡面>半沙坡面>无沙坡面,1.0 mm/min 雨强下则为半沙坡面>无沙坡面>全沙坡面;1.5 mm/min 雨强下又表现为无沙坡面>半沙坡面>全沙坡面。

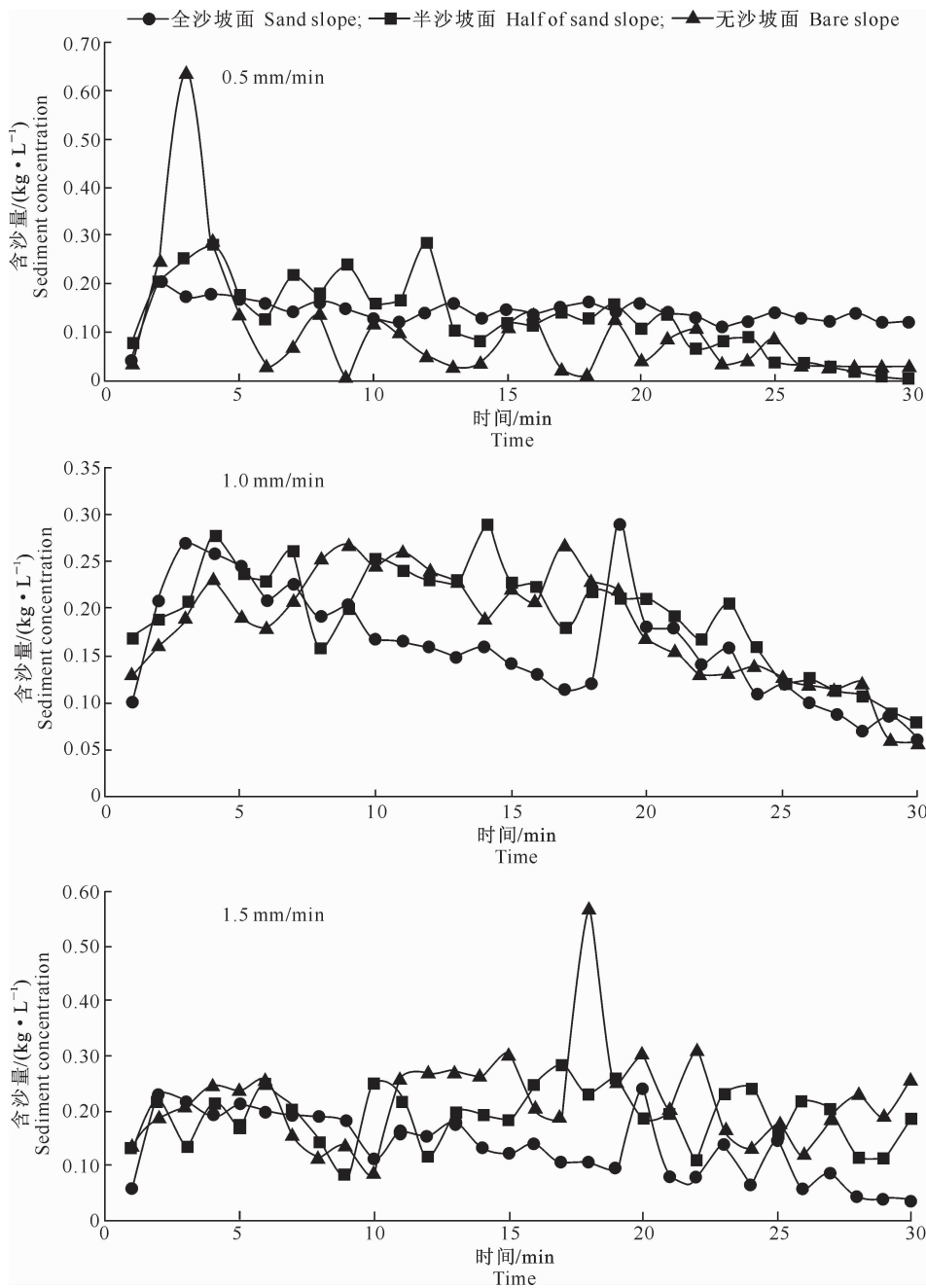


图 3 3 种覆沙坡面在不同雨强条件下的产流含沙量变化

Fig. 3 Change of flow sediment yield under different rainfall intensities for different sand-covered slopes

2.3 不同雨强和覆沙条件下径流量和产沙量的变化

为了探讨不同覆沙条件对坡面产流的影响,分析了不同雨强 3 种覆沙条件下径流的变化规律,结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,3 种雨强不同覆沙条件下径流量的变化趋势基本一致,径流均在产流开始 5~10 min 稳定变化;同时还可以看出,雨强为 0.5 mm/min 时,全沙坡面的径流量最小,半沙坡面和无沙坡面的径流量均大于全沙坡面,3 种覆沙条件下径流量的大小顺序为半沙坡面>无沙坡面>

全沙坡面。在整个降雨过程中,0.5 mm/min 雨强条件下半沙坡面的径流过程波动较为明显,径流量始终在波动;全沙坡面基本处于稳定状态,没有太大起伏,维持在 2.91~9.36 L/min,且在降雨产流 10 min 后始终最小;无沙坡面径流量处于稳定而缓慢上升状态,当试验进行到 26 min 左右时,达到最大值 8.20 L/min。当雨强为 1.0 mm/min 时,径流量大小顺序为无沙坡面>半沙坡面>全沙坡面,但半沙坡面的波动幅度更大一些,全沙坡面的径流量依然最小。雨强为 1.5 mm/min 时,径流量大小顺序

发生改变,全沙坡面的波动最大,半沙坡面基本维持 在一个稳定的水平,全沙坡面的径流量反而最大。

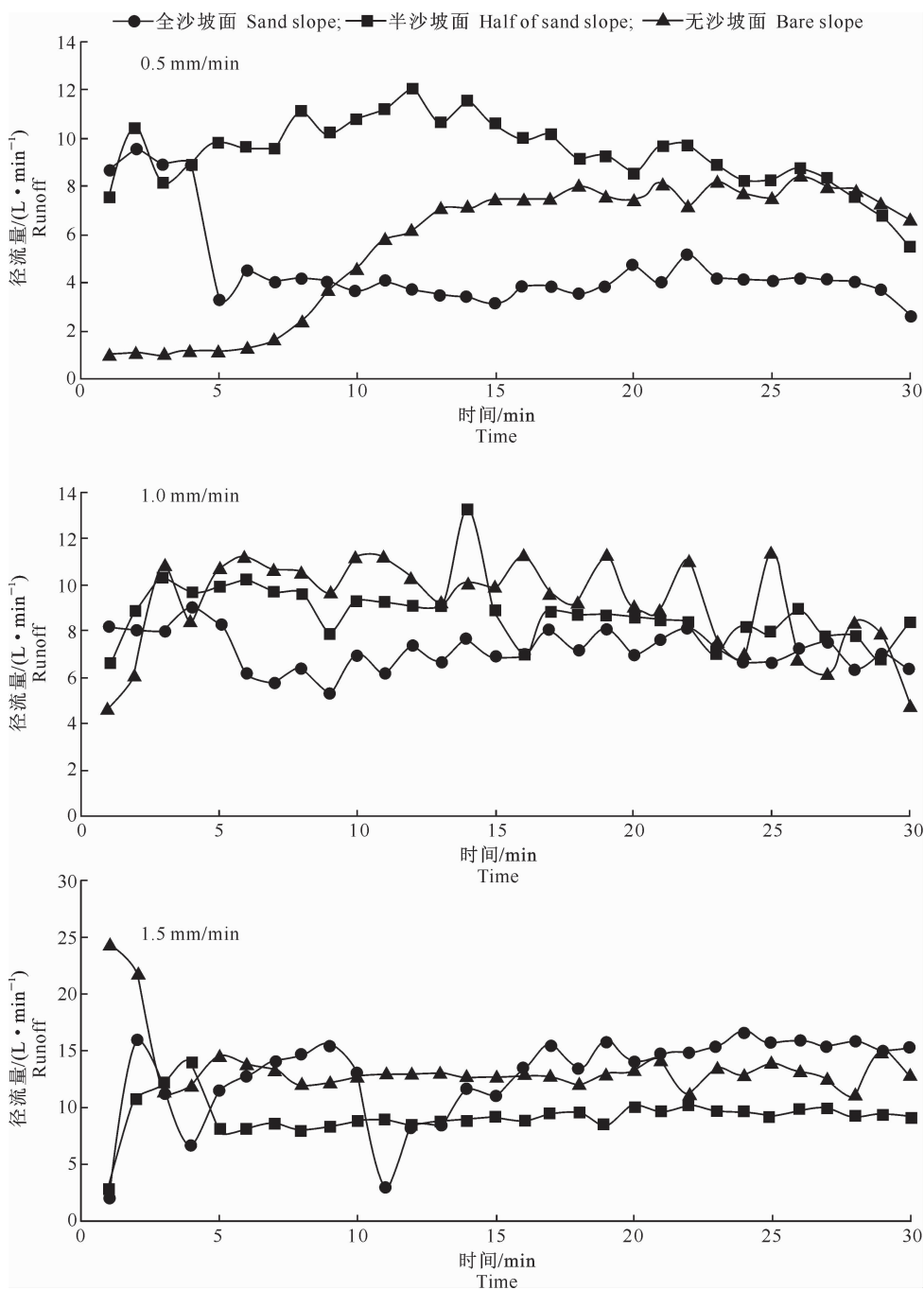


图 4 3 种覆沙坡面在不同雨强条件下的径流量变化
Fig. 4 Change of runoff under different rainfall intensities for different sand-covered slopes

进一步分析侵蚀产沙量在不同条件下的变化情况,可知雨强为 0.5,1.0 和 1.5 mm/min 时 3 种覆沙条件下的产沙规律如图 5 所示。从图 5 可以看出,3 种雨强下的产沙过程同径流过程一样,均存在波动情况,且产沙过程变化尤为复杂,由于发生细沟侵蚀,出现坍塌现象,所以侵蚀过程发生波动,以致径流产沙过程出现多峰多谷现象。雨强为 0.5 和 1.0 mm/min 时,半沙坡面的产沙量明显高于全沙

坡面和无沙坡面,而且无沙坡面的波动最小,基本维持在 0.1~1.2 kg/min。同时可以看到,1.5 mm/min 雨强下全沙坡面的产沙量低于无沙坡面和半沙坡面,这是因为坡面覆沙以后,使得坡面土壤的孔隙度增大,且坡面表土比较松散,易受雨滴击溅和径流冲刷的影响,降雨初期的降雨大部分用来入渗,但随着降雨的进行,坡面表层土粒随之减少,坡面出现细沟,土壤入渗率逐渐趋于稳定,坡面侵蚀强度逐

渐减小,产沙量也随之减小。与无沙坡面进行对比,小雨强(0.5,1.0 mm/min)下全沙坡面产沙量分别增加了 0.56 和 0.05 倍,半沙坡面增加了 2.32 和

1.61 倍;而在 1.5 mm/min 雨强下,全沙坡面和半沙坡面分别减小了 43% 和 40%。

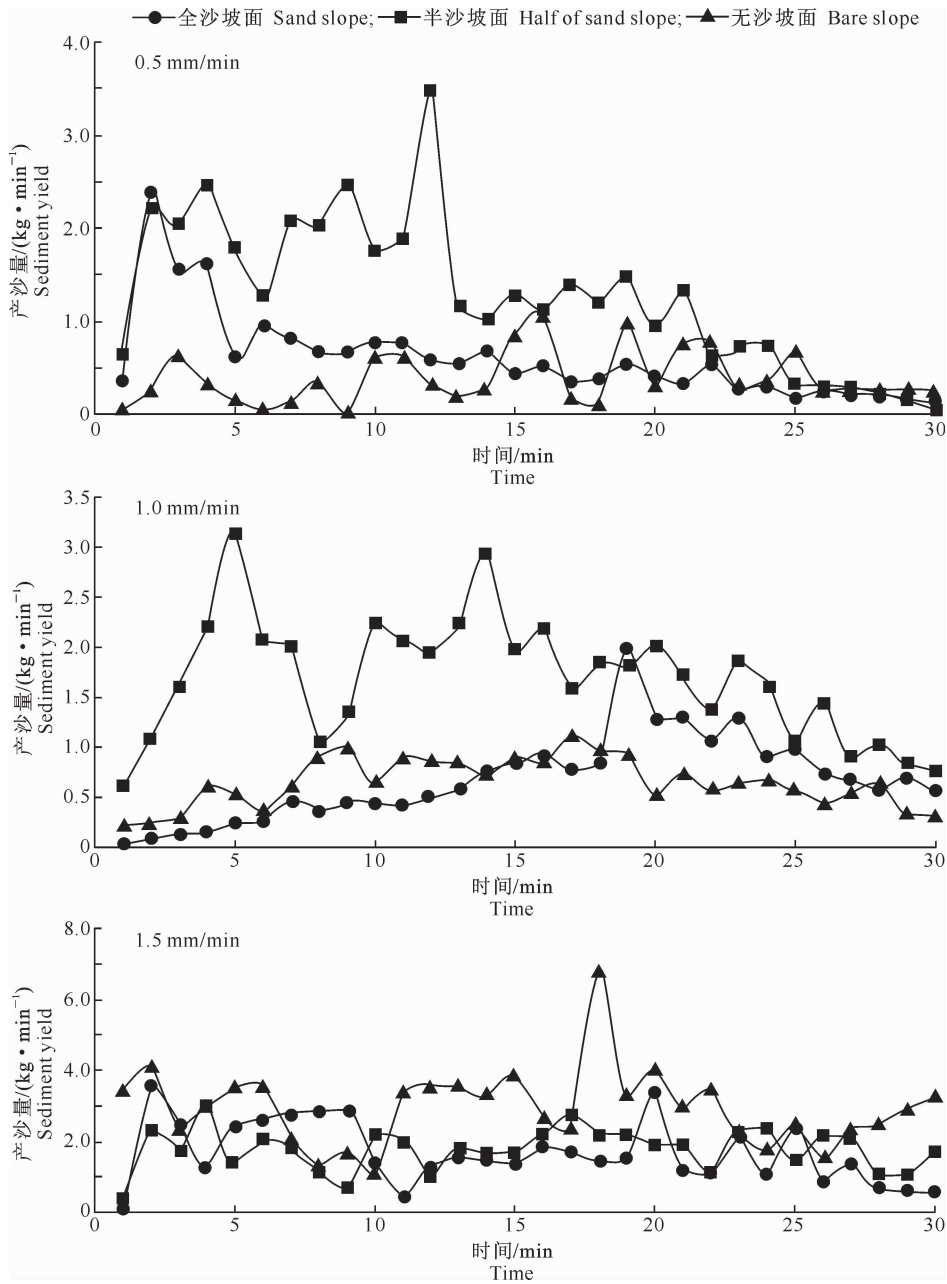


图 5 3 种覆沙坡面在不同雨强条件下的产沙量变化
Fig. 5 Change of sediment yield under different rainfall intensities for different sand-covered slopes

2.4 不同雨强和覆沙条件下累计径流量和累计产沙量随时间的变化特征

不同覆沙条件下,坡面累计径流量和累计产沙量与降雨历时有明显的线性函数关系,相关系数均在 0.90 以上,计算结果如表 3 和表 4 所示。由表 3、表 4 可以看出,累计径流量、累计产沙量都与降雨历时呈显著线性相关。从斜率变化来看,在同一雨强下,斜率表示单位时间累计径流量和累计产沙量的

递增速率,斜率越大,累计径流量和累计产沙量的递增速率就越大,即单位时间内的径流量、产沙量越大;在同一覆沙条件下,斜率越小,累计径流量和累计产沙量的递增速率也越小。

2.5 不同雨强和覆沙条件下累计径流量与累计产沙量之间的关系

对降雨试验中各个场次的累计产沙量与累计径流量的相互关系进行函数拟合和对比,发现累计径

流量与累计产沙量的函数关系均满足幂函数 $y = ax^b$ (式中 y 为累计产沙量, x 为累计径流量), 所有方程相关系数均在 0.90 以上, 可见径流量与产沙量有很好的相关性, 不同覆沙条件下累计径流量与累计产沙量之间的关系方程见表 5。结合数学概念和实际径流产沙的物理意义, 对比所有降雨场次的函数关系, 发现系数 a 、 b 存在一定的变化规律, 并最终

定义系数 a 为产沙基数系数, 其完全取决于雨强和覆沙条件。相同雨强不同覆沙条件下, a 值越小则产沙越多; 而相同覆沙不同雨强条件下, a 值越大则产沙越多。定义系数 b 为产沙速率系数, 系数 b 的大小取决于入渗率, 入渗率越小则 b 值越小, 产沙量越大。

表 3 不同雨强及覆沙条件下累计径流量(Y)与降雨历时(t)的关系

雨强/(mm·min ⁻¹) Rainfall intensity	全沙坡面 Sand slope		半沙坡面 Half of sand slope		无沙坡面 Bare slope	
	方程 Equation	R ²	方程 Equation	R ²	方程 Equation	R ²
0.5	Y=5.940t-2.726	0.957	Y=0.993t-2.481	0.998	Y=4.132t+15.870	0.991
1.0	Y=7.067t+2.645	1.000	Y=8.745t+4.218	0.997	Y=9.474t-1.339	0.995
1.5	Y=13.180t-21.332	0.995	Y=9.269t-2.860	1.000	Y=12.929t+18.748	1.000

表 4 不同雨强及覆沙条件下累计产沙量(Y)与降雨历时(t)的关系

雨强/(mm·min ⁻¹) Rainfall intensity	全沙坡面 Sand slope		半沙坡面 Half of sand slope		无沙坡面 Bare slope	
	方程 Equation	R ²	方程 Equation	R ²	方程 Equation	R ²
0.5	Y=0.591t+3.467	0.940	Y=1.493t+2.618	0.964	Y=0.436t-1.186	0.976
1.0	Y=0.786t-3.942	0.962	Y=1.765t+0.265	0.986	Y=0.723t-1.254	0.989
1.5	Y=1.581t+3.941	0.975	Y=1.776t-0.495	0.995	Y=2.963t+0.412	0.995

表 5 不同雨强及覆沙条件下累计径流量(y)与累计产沙量(x)的关系

雨强/(mm·min ⁻¹) Rainfall intensity	全沙坡面 Sand slope		半沙坡面 Half of sand slope		无沙坡面 Bare slope	
	方程 Equation	R ²	方程 Equation	R ²	方程 Equation	R ²
0.5	y=0.068x ^{1.188}	0.910	y=0.001x ^{2.010}	0.997	y=0.147x ^{1.025}	0.961
1.0	y=0.156x ^{1.017}	0.962	y=0.076x ^{1.190}	0.994	y=0.143x ^{1.061}	0.998
1.5	y=0.210x ^{0.807}	0.907	y=0.032x ^{1.131}	0.973	y=0.094x ^{1.146}	0.996

3 结 论

通过室内模拟降雨试验, 研究不同覆沙条件下坡面侵蚀产流产沙的变化规律, 得出以下结论:

1) 同一雨强条件下, 坡面初始产流时间随着坡面覆沙方式由全沙—半沙—无沙的变化而缩短; 同一覆沙方式下, 坡面初始产流时间的变化趋势大体是随着雨强的增大而缩短。因此可以说明坡面覆沙可有效延长坡面的初始产流时间, 延长了 1~30 min。

2) 无沙坡面、半沙坡面的产流产沙过程曲线均较全沙坡面表现出强烈的波动状态, 呈现出多峰多谷的现象, 产沙过程的波动现象较产流过程更为剧烈, 各雨强的降雨产沙过程与其产流过程没有很好的相关性。全沙坡面有很强的水沙调控作用, 受雨强的影响作用较小, 而无沙坡面和半沙坡面则正好相反。

3) 不同覆沙条件下累计产流量和累计产沙量与降雨历时均呈现出明显的相关性, 相关系数达到 0.90 以上; 不同雨强 3 种覆沙条件下的累计产流量趋势大致相同, 雨强越大产流越快, 产流量也越大。

4) 累计产沙量随累计径流量的增加呈幂函数增加, 满足 $y = ax^b$ 关系, 系数 a 与覆沙条件和雨强有关。

[参考文献]

[1] 李秋艳, 蔡强, 方海燕. 风蚀对窟野河流域产沙贡献的时间尺度特征 [J]. 自然资源学报, 2011, 26(4): 677-681.
Li Q Y, Cai Q G, Fang H Y. Contribution characteristics of wind erosion to the sediment yield in the Kuyehe River watershed at time scales [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(4): 677-681. (in Chinese)
[2] Li M, Li Z B, Liu P L, et al. Using Cesium-137 technique to study the characteristics of different aspect of soil erosion in the wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau

of China [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2005 (62): 109-113.

[3] 许炯心. 黄河中游多沙粗沙区的风水两相侵蚀产沙过程 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2000, 30(5): 540-548.

Xu J X. The wind-water two-phase erosion and sediment-producing processes in the middle Yellow River basin China [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2000, 30(5): 540-548. (in Chinese)

[4] 李秋艳, 蔡强国, 方海燕. 风水复合侵蚀与生态恢复研究进展 [J]. 地理科学进展, 2010, 29(1): 65-72.

Li Q Y, Cai Q G, Fang H Y. Advances in complex erosion of wind and water and ecological restoration [J]. Progress in Geography, 2010, 29(1): 65-72. (in Chinese)

[5] 邹亚荣, 张增祥, 王长有, 等. 中国风水侵蚀交错区分布特征分析 [J]. 干旱区研究, 2003, 20(1): 67-70.

Zou Y R, Zhang Z X, Wang C Y, et al. Analysis on the distribution characteristics of the interleaving zones of water/wind erosion in China [J]. Arid Zone Research, 2003, 20(1): 67-70. (in Chinese)

[6] 海春兴, 史培军, 刘宝元, 等. 风水两相侵蚀研究现状及我国今后风水蚀的主要研究内容 [J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 50-52, 56.

Hai C X, Shi P J, Liu B Y, et al. Research status of wind and water double erosion and its main study content in future [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(2): 50-52, 56. (in Chinese)

[7] 王 涛, 屈建军, 姚正毅, 等. 北方农牧交错带风水蚀复合区水土流失现状与综合治理对策 [J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 28-36.

Wang T, Qu J J, Yao Z Y, et al. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for wind-water complex erosion region in the northern agro-pasture zigzag zone of China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(1): 28-36. (in Chinese)

[8] 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.

Zhang Q Y, Fan J, Zhang X P. Effects of water erosion on wind erosion in wind tunnel [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(2): 75-79. (in Chinese)

[9] 唐克丽. 黄土高原水蚀风蚀交错区治理的重要性与紧迫性 [J]. 中国水土保持, 2000(11): 11-12, 17.

Tang K L. Importance and urgency of haenessing the interlocked area with both water and wind erosion in the Loess Plateau [J]. Soil and Water Conservation in China, 2000(11): 11-12, 17. (in Chinese)

[10] 查 轩, 唐克丽. 风蚀水蚀交错带小流域生态环境综合治理模式研究 [J]. 自然资源学报, 2000, 15(1): 97-100.

Zha X, Tang K L. Study on comprehensive control model of small watershed eco-environment in water and wind crisscrossed erosion zone [J]. Journal of Natural Resources, 2000, 15(1): 97-100. (in Chinese)

[11] Bullard J E, McTainsh G H. Aeolian-fluvial interactions in dryland environments: Examples, concepts and Australia case study [J]. Progress in Physical Geography, 2003 (27): 471-501.

[12] Bullard J E, Livingstone I. Interactions between aeolian and fluvial systems in dryland environments [J]. Area, 2002(34): 8-16.

[13] 宋 阳, 刘连友, 严 平. 风水复合侵蚀研究述评 [J]. 地理学报, 2006, 61(1): 77-88.

Song Y, Liu L Y, Yan P. A review on complex erosion by wind and water research [J]. Acta Geographic Sinica, 2006, 61(1): 77-88. (in Chinese)

[14] Visser S M, Sterk G, Ribolzi O. Techniques for simultaneous quantification of wind and water erosion in semiarid regions [J]. Journal of Arid Environments, 2004, 59: 699-711.

[15] 脱登峰, 许明祥, 郑世清, 等. 风水两相侵蚀对坡面产流产沙特性的影响 [J]. 农业工程学报, 2012(18): 142-148.

Tuo D F, Xu M X, Zheng S Q, et al. Effects of wind and water double erosion on characteristics of runoff and sediment from slope lands [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012(18): 142-148. (in Chinese)

[16] 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(12): 3281-3287.

Tuo D F, Xu M X, Zheng S Q, et al. Sediment-yielding process and its mechanisms of slope erosion in wind-water erosion crisscross region of Loess Plateau Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012(12): 3281-3287. (in Chinese)

[17] 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(2): 381-386.

Tuo D F, Xu M X, Ma X X, et al. Impact of wind-water alternate erosion on the characteristics of sediment particles [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014(2): 381-386. (in Chinese)