

模拟径流条件下覆沙黄土坡面产流产沙过程

张洋¹, 李占斌^{1,2}, 牛雯³, 段金晓³

(1. 西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 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;

3. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 西安 710075)

摘要: 基于可调控的放水冲刷试验, 模拟风水复合侵蚀区典型覆沙黄土坡面, 研究不同径流条件下覆沙黄土坡面产流产沙过程。通过室内放水冲刷试验, 采用3个放水流量(5, 10, 15 L/min)和5个覆沙厚度(0, 5, 15, 25, 35 mm)研究覆沙黄土坡面产流产沙过程。结果表明: 覆沙坡面能够延长产流时间, 且随覆沙厚度的增大而延长, 不同放水流量条件下5, 15, 25, 35 mm覆沙坡面的产流时间较黄土坡面分别延迟了1.29~1.46倍, 1.66~2.5倍, 2.32~3.76倍和3.64~4.72倍; 覆沙坡面相对黄土坡面其产沙贡献率大于产流贡献率, 在相同放水流量条件下, 覆沙坡面的径流总量是黄土坡面的1.05~1.8倍, 而产沙总量是黄土坡面的1.6~7.5倍; 覆沙坡面在不同放水流量条件下, 产流0~5 min内, 覆沙坡面产流率增长速率明显高于黄土坡面, 而在后25 min覆沙坡面与黄土坡面的产流率增长速率基本一致; 在整个产流阶段, 覆沙坡面的产流率波动程度显著高于黄土坡面。随着放水流量的增大, 覆沙坡面的初始产沙强度显著增加; 但在同一放水流量前提下, 随着覆沙厚度的增大初始产沙强度增强不显著。不同放水流量和不同覆沙厚度条件下坡面产沙强度总体上表现为先剧烈增大后降低然后逐步达到平稳状态, 且覆沙坡面产沙强度的波动性明显活跃于黄土坡面。覆沙坡面能够破坏水流的稳定性, 在一定程度上加剧了土壤侵蚀。

关键词: 风水复合侵蚀; 冲刷试验; 覆沙黄土坡面; 侵蚀产沙

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)04-0006-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.04.002

Runoff and Sediment Yield Process on the Sand-covered Loess Slopes Under Simulated Runoff Conditions

ZHANG Yang¹, LI Zhanbin^{1,2}, NIU Wen³, DUAN Jinxiao³

(1. Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of Ministry of Education, Xi'an

University of Technology, Xi'an 710048; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry

of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 3. CCCC First Highway Consultants Co., LTD, Xi'an 710075)

Abstract: Runoff and sediment yield process on sand-covered loess slopes under simulated runoff conditions were studied through simulating wind-water complex erosion based on the controlled scouring experiments. This study set up three water flow rates (5, 10, and 15 L/min) and five sand-covered thicknesses (0, 5, 15, 25 and 35 mm). The results showed that the runoff yield time on the sand-covered slope was extended, and it extended with the increasing of sand-covered thickness. Under different water flow rate, the runoff yield time on sand-covered slopes (5, 15, 25, 35 mm) were 1.29~1.46 times, 1.66~2.5 times, 2.5~3.76 times and 3.76~4.72 times, respectively, than those on the loss slope. Compared to the loess slope, sediment yield contribution rate was greater than runoff contribution rate on the sand-covered slope. Under the same water flow rate, the total amount of runoff on sand-covered slope was 1.05~1.8 times of that on the loess slope, and the total amount of sediment yield was 1.6~7.5 times. Under different water flow rates, the increase-rate of runoff rate on the sand-covered slope was significantly higher than that on the loess slope within 0~5 min, and in the later 25 min of runoff, increase-rates of runoff rate on both two kinds of slopes were basically coincident. In the whole runoff, the fluctuation of runoff rate on sand-covered slope was significantly higher than that on loess slope. With the increasing of water flow rate, the initial sediment yield strength on sand-covered slope significantly increased. However, in the same water flow rate, the initial

收稿日期: 2017-03-18

资助项目: 国家自然科学基金重点项目(41330858); 国家自然科学基金项目((41471226))

第一作者: 张洋(1986—), 男, 陕西陇县人, 在读博士, 主要从事水文与雨洪侵蚀研究。E-mail: peace-eternity@163.com

通信作者: 李占斌(1962—), 男, 河南镇坪人, 教授, 博导, 博士, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zhanbinli@126.com

sediment yield strength did not increased significantly with the increasing of sand-covered thickness. Under different water flow rates and different sand-covered thicknesses, the sediment yield strength firstly increased dramatically, then decreased, and then gradually reached a steady state, and the fluctuation of sediment yield strength on the sand-covered slope was significantly higher than that on the loess slope. The results indicated that the sand-covered slope destroyed the stability of the water flow, and aggravated soil erosion at a certain extent.

Keywords: wind-water complex erosion; scouring experiment; sand-covered loess slopes; erosion and sediment yield

我国风水复合侵蚀区面积已达 26 万 km^2 , 诸多研究表明该区是黄土高原水土流失最严重的区域, 也是黄河中下游河床粗泥沙的主要来源区^[1-4]。风水复合侵蚀是我国干旱、半干旱区一种常见的土壤侵蚀类型, 春季以风蚀为主, 夏秋季以水蚀为主, 土壤侵蚀在空间上重叠、时间上交错^[5]; 独特的多动力综合侵蚀条件形成了特殊的侵蚀地貌类型, 其中以片沙覆盖黄土丘陵地貌最为特殊, 侵蚀产沙也最为强烈^[6]。

在风水复合侵蚀研究过程中, 李秋艳等^[7]、海春兴等^[8]详细阐述了风水复合侵蚀的概念、类型及影响因素; 杨岩岩等^[9]在分析沙漠—黄土过渡带风水复合侵蚀营力特征的过程中, 对风水复合侵蚀机理做了一定研究; 而王涛等^[10]、邹亚荣等^[11]、汤珊珊等^[12]分别就风水复合侵蚀的特征、可蚀性、侵蚀能量、侵蚀产沙过程等进行系统的研究。风水复合侵蚀可划分为风水交替侵蚀和风水共同侵蚀, 通过风蚀与水蚀作用的耦合, 以下垫面为媒介或以可蚀物为媒介的耦合在时间上交替发生称之为风水交替侵蚀; 而在空间上异地、在时间上同时发生风蚀和水蚀作用定义为风水共同侵蚀^[13]。风水复合侵蚀在风蚀和水蚀共同或交替作用下, 其侵蚀能力相互增强或者削弱^[14]。在研究风水复合侵蚀机理和耦合作用时, 通常先研究风蚀和水蚀的互馈作用关系。在研究水蚀对风蚀过程作用方面, 张庆印等^[15]通过先模拟降雨后风洞试验研究了降雨形成的水蚀沟宽度、深度、密度等对风蚀的影响; 在研究风蚀对水蚀过程作用方面, 脱登峰等^[16]利用先风洞试验后模拟降雨的方法, 研究了风水两相侵蚀条件下的产流产沙特征。

近年来国内外学者对风水复合侵蚀的概念、类型、影响因素、侵蚀过程及侵蚀机理等方面取得了较大的突破, 其方法主要在分析模拟大量野外监测数据的基础条件下, 得到大尺度的定性和定量研究, 而室内模拟风水复合侵蚀过程涉及较少。据此, 本研究从坡面尺度上, 模拟风水复合侵蚀典型区域的覆沙黄土坡面, 利用模拟径流冲刷试验, 分析不同放水流量条件下覆沙坡面产流产沙过程, 以期揭示风蚀作用后的片沙覆盖对水蚀过程的作用机理提供科学依据。

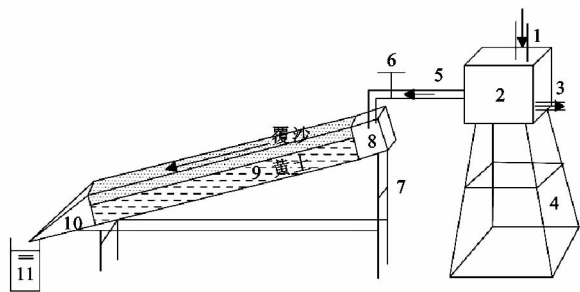
1 材料与设计

1.1 研究区概况

研究区选择黄河上游内蒙古河段南岸十大孔兑之一的东柳沟流域。东柳沟流域在空间上风蚀和水蚀地貌特征明显, 在时间上风蚀和水蚀时段显著并交替进行, 具有典型性和代表性。流域位于内蒙古达拉特旗东部, 地理坐标为 $110^{\circ}19'45''$ — $110^{\circ}36'54''$ E、北纬 $39^{\circ}55'20''$ — $40^{\circ}21'60''$ N 之间, 流域面积 667.72 km^2 , 主沟长 47.73 km, 流域水土流失面积达 518.19 km^2 , 占流域总面积的 77.5%。流域境内多年降水量为 240~360 mm, 且主要集中在 7—9 月, 年蒸发量为 2 200 mm; 每年 3—5 月常有大风天气, 且年均大风日数 24 d, 最大风速达 28 m/s^[17]。流域内土壤以风沙土和栗钙土为主, 质地多为沙壤, 有机质微量元素较缺乏。土地利用类型以草地、耕地和沙地为主, 其中草地占整个流域面积的 48.39%。

1.2 试验装置与材料

模拟径流冲刷试验于 2016 年 7—10 月在西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地雨洪侵蚀大厅内进行。试验采用长 4 m、宽 1 m、深 0.5 m 钢制可调坡度移动式土槽, 试验前将 1 m 宽土槽用 PVC 板均分为两个小土槽, 定义为土槽左和土槽右, 每个土槽宽 0.5 m 且其顶端各有一个钢制稳流槽, 两土槽主要用于对比重复试验。其装置见图 1。



注: 1 为进水管; 2 为定水头供水箱; 3 为溢流管; 4 为支架; 5 为连接管; 6 为水表、阀门; 7 为支架; 8 为稳流槽; 9 为试验土槽; 10 为出水口; 11 为接样桶。

图 1 覆沙坡面放水冲刷试验装置

试验坡面填土和覆沙土样分别取自西安郊区黄土和内蒙古东柳沟的沙土, 通过 Malvern 2000 泥沙颗粒分析仪分析测算, 依据美国农业部(USDA)的土壤分级标

准得出两种试验用土的土壤颗粒分级特征(表 1)。

表 1 试验用土的颗粒特征 单位: %

试验土样	黏粒	粉粒	砂粒
	(≤0.002 mm)	(0.02~0.002 mm)	(≥0.02 mm)
黄土	14.01	80.20	5.79
风沙土	0.61	19.22	80.17

1.3 试验设计与步骤

试验土槽设计坡度依据东柳沟流域片沙覆盖坡面的平均坡度选择 12°;模拟径流冲刷流量根据达拉特旗合同沟观测站暴雨发生频率标准径流小区上产生的单宽流量进行了换算,设计了 5,10,15 L/min 三个流量;坡面覆沙厚度通过抽样测量东柳沟片沙覆盖坡面的平均厚度,分为 5 个梯度分别为 0,5,15,25,35 mm。具体试验步骤为:

(1)试验前,将黄土土样风干后过 10 mm 的筛,天然沙土过 8 mm 的筛,除去石块、植物根茬等杂质。试验装土时采用分层装土法,为了保持土层的透水状况接近天然坡面土槽下部铺填 5 cm 厚的天然沙,然后在其上部分层填入 25 cm 厚的黄土,分层刮平打毛并压实。覆土完成后在黄土表面覆沙,控制土壤容重在 1.3 g/cm³ 左右,土壤前期相对含水量为 15% 左右,要与研究区覆沙坡面土壤特性基本一致。

(2)在每场次试验开始之前对放水冲刷流量进行率定。

(3)每场次试验开始后,记录产流时间,录制并观察坡面细沟形成的过程,并记录微地形“突变点”的时间。自坡面产流开始后,每隔 1 min 取一次土槽出口处径流泥沙样,等到试验结束后,量测径流样的体积,同时烘干泥沙样并称重。

(4)对试验数据进行检验分析,并计算单位时间内径流泥沙样中径流的体积(L/min)即产流率,单位时间内径流泥沙样中的干泥沙重(g/min)即产沙强度。

2 结果与分析

2.1 覆沙坡面对径流产生时间的影响

各覆沙厚度条件下,径流产生时间随放水流量的变化规律见表 2。由表 2 可以看出,黄土坡面及不同覆沙厚度条件下,随放水流量的增加,其产流时间递减,表现为 5 L/min>10 L/min>15 L/min,且随覆沙厚度增加其递减速率增大。分析在相同放水流量条件下,坡面产流时间表现为 35 mm>25 mm>15 mm>5 mm>0 mm,综合计算不同放水流量条件下 5,15,25,35 mm 覆沙坡面较黄土坡面产流时间分别推迟了 1.29~1.46 倍、1.66~2.5 倍、2.32~3.76 倍和 3.64~4.72 倍。据以上分析,发现覆沙坡面具有延长产流时间的作用,且随覆沙厚度的增加而增大。分析原因主要是在覆沙坡面模拟径流条件下,径流首

先被表层覆沙吸收至饱和和后下渗到黄土层,直到覆沙坡面达到饱和含水量蓄满产流时才会逐渐产流,因此坡面覆沙能够延长初始产流时间。综上所述,产流时间随放水流量的增大而减小,相同放水流量条件下产流时间随覆沙厚度的增加而增大。

表 2 不同覆沙厚度下各放水流量的产流时间

单位: s

放水流量/ (L·min ⁻¹)	覆沙厚度/mm				
	0	5	15	25	35
5	196	252	326	455	863
10	46	66	107	173	217
15	28	41	70	89	102

2.2 覆沙坡面对径流总量和产沙总量的影响

为研究风水复合侵蚀区覆沙坡面的侵蚀产沙过程,分别计算了不同放水流量和不同覆沙厚度条件下的径流总量和产沙总量。由表 3 可知,不同放水流量条件下覆沙厚度不同的黄土坡面径流总量和产沙总量存在明显差异。总体上,随放水流量的增加,无论是黄土坡面还是覆沙坡面,其坡面径流总量和产沙总量均明显增大,且覆沙坡面的产沙总量总是高于黄土坡面。研究选取 5,10,15 L/min 条件下的黄土坡面径流总量和产沙总量作为基准值,计算分析可知,在 5,10,15 L/min 放水流量条件下,覆沙坡面(5~35 mm)径流总量分别是黄土坡面的 1.2~1.8 倍,1.1~1.3 倍和 1.05~1.2 倍;而产沙总量分别是黄土坡面的 2.6~7.5 倍,3.2~6.1 倍和 1.6~2.7 倍。此外,选取不同放水流量条件下黄土坡面和覆沙坡面产流总量和产沙总量的均值,计算得出覆沙坡面产流总量和产沙总量是黄土坡面的 1.1~1.4 倍和 2.4~3.5 倍。综上所述,相同放水流量条件下,覆沙坡面的径流总量是黄土坡面径流总量 1.05~1.8 倍,而覆沙坡面的产沙总量是黄土坡面产沙总量 1.6~7.5 倍,因此覆沙坡面相对于黄土坡面其产沙贡献率大于产流贡献率。

表 3 不同放水流量和覆沙厚度下的径流总量和产沙总量

放水流量/ (L·min ⁻¹)	覆沙 厚度/mm	径流 总量/L	产沙 总量/kg
	0	67.20	5.60
5	5	82.29	14.79
	15	117.03	20.19
	25	124.28	41.93
	35	114.87	37.32
	0	189.89	11.91
10	5	227.73	54.91
	15	216.03	47.66
	25	206.03	38.48
	35	238.29	73.18
	0	328.41	41.88
15	5	345.56	113.31
	15	493.93	73.46
	25	318.49	65.26
	35	378.31	97.29
	0	328.41	41.88

2.3 覆沙坡面对产流产沙过程的影响

2.3.1 覆沙坡面对产流过程的影响 在研究覆沙坡面对产流过程的影响时,选择产流率来衡量其产流过程。从图2可以看出,在坡面放水冲刷过程中,坡面产流率呈现波动,表现为先剧烈增长而后缓慢增长最后达到稳定状态的发展趋势,而产流率波动的剧烈、缓慢和稳定能够反映其侵蚀能力的大小。因此需要研究在产流过程中不同时间段黄土坡面和覆沙坡面的产流率变化。在本研究过程中,定义不同覆沙条件下产流率的临界值分别为5,10,15 L/min。

首先分析不同覆沙厚度条件下产流过程中不同时间段产流率变化,经比较3种放水流量产流过程选取10 L/min放水流量作为研究。在产流的不同时段内,坡面覆沙(5~35 mm)条件下的产流率均值均高于黄土坡面(0 mm),但坡面覆沙厚度不同,其产流率均值变化不大。

其次分析不同放水流量下产流过程中不同时间段黄土坡面和覆沙坡面的产流率变化,当放水流量为5 L/min,覆沙坡面在前5 min最大产流率是黄土坡面的2.8倍;在产流5~15 min内覆沙坡面的最大产流率是黄土坡面的1.9倍且接近临界值;在产流15~30 min黄土坡面的最大产流率仅达到3.59 L/min,而覆沙坡面已经达到了5.68 L/min且超过了临界值。当放水流量为10 L/min,覆沙坡面的最大产流率在产流0~5 min为9.26 L/min接近临界值,而黄土坡面产流率为4.48 L/min;而在后25 min,黄土坡面最大产流率达到了7.14 L/min,而覆沙坡面维持在临界值左右。当放水流量为15 L/min,黄土坡面在0~5 min内最大产流率为10.42 L/min,而覆沙坡面已经达到了14.34 L/min,在后25 min黄土坡面的最大产流率稳定在11 L/min左右,而覆沙坡面最已经达到了17.35 L/min。因此,从整体上分析0(黄土坡面)~35 mm覆沙坡面在不同放水流量的稳定产流率为在产流0~5 min内,黄土坡面增长速率明显高于黄土坡面,而在后25 min覆沙坡面与黄土坡面的产流率增长速率基本一致。

综上所述,在整个产流阶段,黄土坡面和覆沙坡面的产流过程都分成涌水阶段、平稳阶段和消退阶段,且覆沙坡面各阶段的产流率波动程度明显高于黄土坡面,说明覆沙在一定程度上破坏了径流率的稳定性;随着放水流量的增大,黄土坡面最大产流率稳定且接近临界值的时间提前且总小于相应放水流量的临界值;而在相同条件下,覆沙坡面的最大产流率接近临界值的时间总提前于黄土坡面,且最大产流率总大于黄土坡面,同时有最大产流率大于临界值的现象,这主要是因为是在放水冲刷过程中覆沙坡面在形成

细沟过程中沟道容易坍塌并积蓄能量,当能量积聚到一定程度时,覆沙阻隔会被细沟流水冲开形成高于临界值的产流率。

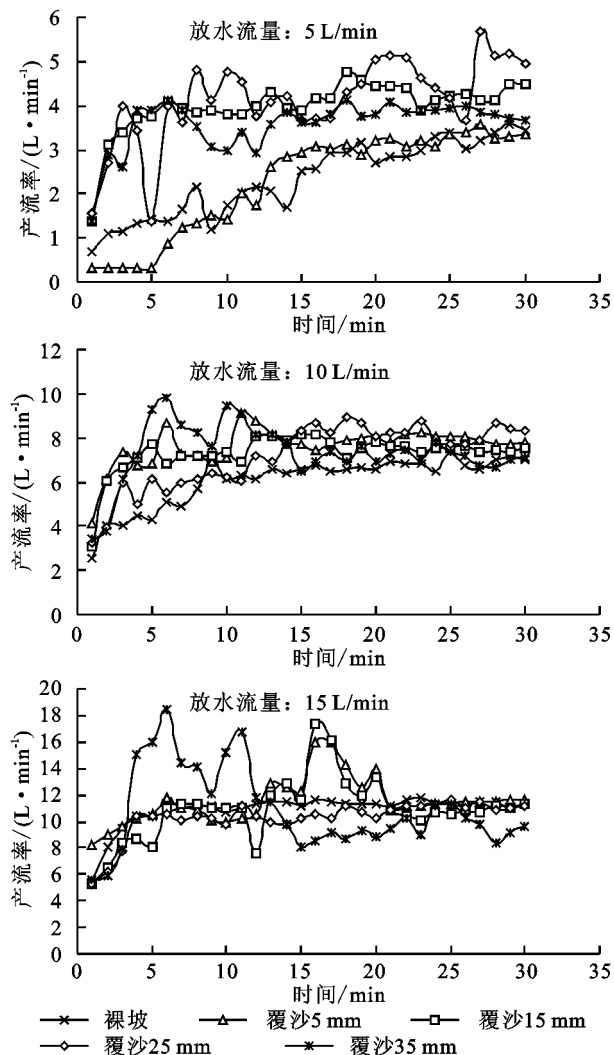


图2 不同放水流量和覆沙厚度对产流率的影响

2.3.2 覆沙坡面对产沙过程的影响 图3为不同放水流量和不同覆沙厚度条件下覆沙坡面对产沙强度的影响。从整体上看,不同放水流量和不同覆沙厚度条件下坡面产沙强度总体上表现为先剧烈增大后降低并逐步达到平稳状态,且随冲刷流量的增大其产沙强度增大。覆沙坡面的初始产沙强度随放水流量增大而显著增加,以黄土坡面为例在产沙过程的前1 min,不同放水流量下产沙强度为0.04 kg/min(5 L/min)<0.66 kg/min(10 L/min)<5.06 kg/min(15 L/min);但在同一放水流量条件下,随着覆沙厚度的增加初始产沙强度增加不显著。

对比分析不同放水流量在产沙过程中产沙强度平均值最大值的出现的时间段,可知当放水流量为5 L/min时,产沙强度的平均值在产流5~15 min内达到最大值;当放水流量为10 L/min和为15 L/min时,产沙强度的平均值都在产流5 min内达到最大;同时随着覆沙厚度的增加产沙强度平均最大值也增

大,覆沙厚度最大 35 mm 坡面在放水流量为 5, 10, 15 L/min 时产沙强度的平均值均最大分别为 2.48, 3.97, 9.13 kg/min。同时,发现在不同放水流量条件下产沙过程中,覆沙坡面产沙强度的波动性明显活跃于黄土坡面且呈现波动性减缓到逐步稳定,而黄土坡面的产沙强度基本在前 15 min 达到稳定状态;覆沙坡面在放水冲刷过程中产沙强度有急剧增长和急剧下降现象,比如当放水流量为 15 L/min,覆沙 15 mm 坡面产沙强度在 11 min 到 12 min 中内增长 8.04 kg,覆沙 35 mm 坡面产沙强度在 2 min 到 3 min 中内增长 10.94 kg/min,说明覆沙是影响坡面产沙过程的主要因素,在坡面径流产沙过程中,覆沙坡面在形成细沟过程微地形变化明显大于黄土坡面,且沙土更容易被剥离、搬运并在水流作用下坍塌到细沟中阻塞径流积蓄能量,在这一过程中,覆沙坡面的径流量和产沙量急剧减小甚至消失;而当积蓄能量达到一定临界值时,坍塌到细沟的沙土被径流冲散,此时覆沙坡面的径流量和产沙量急剧增大,故而覆沙坡面在产沙过程中有能量的积蓄和突然释放。

3 结论

从坡面尺度上利用模拟径流冲刷试验,研究风水复合侵蚀区覆沙黄土坡面的侵蚀产沙过程,分析研究了不同放水冲刷流量、不同覆沙厚度条件下的产流产沙过程,主要结论为:

(1)覆沙坡面具有延长产流时间的作用,且随覆沙厚度的增加而增大,不同放水流量条件下覆沙坡面(5~35 mm)较黄土坡面产流时间分别推迟了 1.29~1.46 倍, 1.66~2.5 倍, 2.32~3.76 倍和 3.64~4.72 倍;相同放水流量条件下,覆沙坡面的径流总量是黄土坡面径流总量 1.05~1.8 倍,而产沙总量是黄土坡面产沙总量 1.6~7.5 倍,因此覆沙坡面相对于黄土坡面其产沙贡献率大于产流贡献率。

(2)覆沙坡面在不同放水流量条件下,产流 0~5 min 内,覆沙坡面产流速率增长速率明显高于黄土坡面,而在后 25 min 覆沙坡面与黄土坡面的产流率增长速率基本一致;在整个产流阶段,覆沙坡面的产流率波动程度明显高于黄土坡面坡面。

(3)随着放水流量的增大,覆沙坡面的初始产沙强度显著增加;但在同一放水流量条件下,随着覆沙厚度的增加初始产沙强度增加不显著。当放水流量增大时,覆沙坡面在产沙过程中产沙强度平均值的最大值出现的时间越提前,且随覆沙厚度的增加而增大,覆沙厚度最大 35 mm 坡面在放水流量为 5, 10, 15 L/min 时产沙强度的平均值均最大分别为 2.48, 3.97, 9.13 kg/min。

(4)不同放水流量和不同覆沙厚度条件下坡面产沙强度总体上表现为先剧烈增大后降低然后逐步达到平稳状态,且覆沙坡面产沙强度的波动性明显活跃于黄土坡面;在产沙过程中,覆沙坡面的产沙强度有急增和急减现象。

参考文献:

- [1] 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.
- [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] 张翔,李鹏,张洋,等.东柳沟沉积泥沙粒径空间分布与特征[J].水土保持学报,2015,29(1):75-79.
- [4] 孙宝洋,李占斌,张洋,等.黄河内蒙古支流“十大孔兑”区风蚀强度时空变化特征[J].农业工程学报,2016,32(17):112-119.
- [5] 齐雁冰,常庆瑞,刘梦云.风蚀水蚀交错区黄土粘土矿物特征及环境意义[J].水土保持学报,2015,29(1):159-162.
- [6] 廖义善,蔡强国,秦奋,等.基于 DEM 的黄土丘陵沟壑区流域地貌特征及侵蚀产沙尺度研究[J].水土保持学报,2008,22(1):1-6.

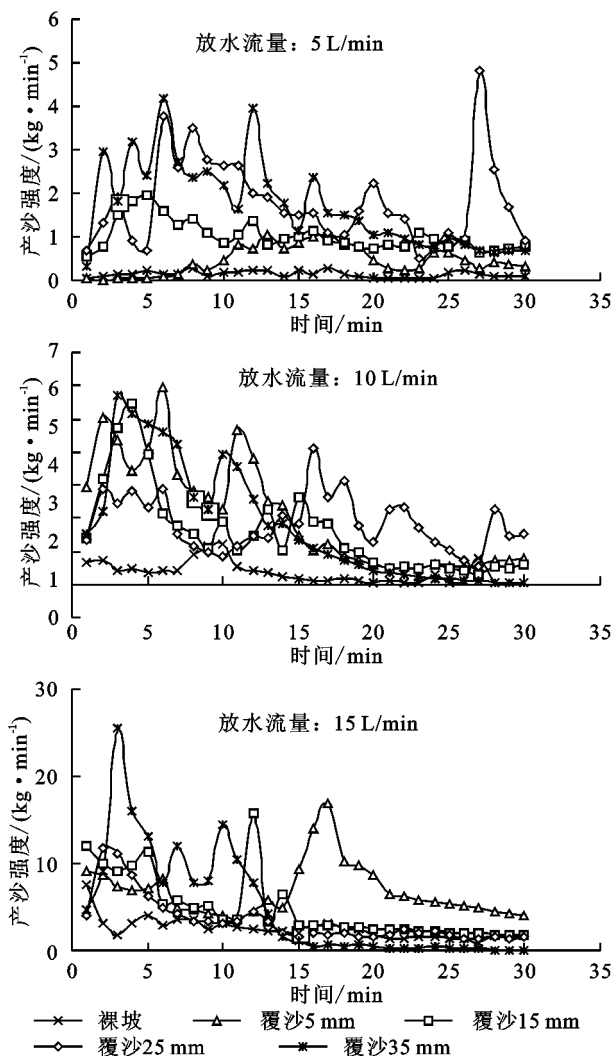


图 3 不同放水流量和覆沙厚度对坡面产沙强度的影响