

覆沙坡面径流冲刷试验研究

任宗萍¹, 苏远逸¹, 李鹏¹, 李占斌^{1,2}, 汤珊珊¹, 郑淋峰¹, 靳涛³

(1. 西安理工大学, 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 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. 城固县水土保持工作站, 陕西 汉中 723200)

摘要: 通过室内模拟冷冻和放水冲刷试验, 采用 2 个放水流量(1, 2 L/min)、2 个土壤处理(未冻坡面, 冻结坡面)和 4 个覆沙厚度(0, 1, 2, 3 cm)研究不同处理对覆沙黄土坡面产流产沙的影响。结果表明:(1)相同流量条件下, 覆沙坡面初始产流时间延长, 随着覆沙厚度的增加, 延长效果越明显, 而冻融作用使坡面初始产流时间缩短; 不同处理坡面的产流产沙峰值均增大, 并且产流量与产沙量的峰现时间具有不同步性。(2)不同流量条件下, 不同处理坡面总产流量是对照坡面的 1.02~1.28 倍, 冻结坡面和冻结-覆沙坡面的总产流量与对照坡面有显著差异($p < 0.05$), 坡面总产沙量是对照坡面的 1.97~10.94 倍, 冻结坡面、对照-覆沙坡面和冻结-覆沙坡面的总产沙量与对照坡面有显著差异($p < 0.05$)。 (3)不同流量条件下, 相同处理坡面产流强度随产流时间变化趋势大致相同, 裸坡坡面产沙强度随着产流时间的变化趋势较为平稳, 而覆沙坡面产沙强度波动程度较大, 覆沙是影响坡面产沙过程的主要因素; 相同流量条件下, 不同处理坡面产流强度大致分为“快速上升-相对稳定”和“相对稳定”两种变化趋势。(4)相同流量条件下, 裸坡坡面的产流强度受冻融作用的影响较大, 冻融和覆沙处理对产沙强度的影响均较大, 冻融作用在裸坡条件下对产沙过程的影响大于覆沙坡面, 覆沙坡面在土壤未冻结的情况下对产沙过程的影响大于在土壤冻结的情况。

关键词: 放水冲刷; 冻融作用; 覆沙坡面; 产流产沙

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)03-0029-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.03.005

Runoff Scouring Experiment on Sand-covered Slope

REN Zongping¹, SU Yuanyi¹, LI Peng¹, LI Zhanbin^{1,2},

TANG Shanshan¹, ZHENG Linfeng¹, JIN Tao³

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100; 3. Soil and Water Conservation Station of Chenggu County, Hanzhong, Shaanxi 723200)

Abstract: Through the simulations of freezing and water scouring test, two water discharges (1, 2 L/min), two soil treatments (unfrozen slope, frozen slope) and four sand coverings (0, 1, 2, 3 cm) were compared to study the effects of the different treatments on runoff and sediment yield on the Loess slope. The results showed that: (1) Under the same flow conditions, the initial runoff time of the sand-covered slope was prolonged, and the extension effect was more obvious as the sand cover thickness increased, however, the initial runoff time was shortened by freeze-thaw action. When the peak value increased, the peak current time of output flow and sediment yield were asynchronous. (2) Under different flow conditions, the total output of different slopes was 1.02~1.28 times of that of the control slopes, then the total outputs of freezing slopes and freezing-covered slopes were significantly different from the control slopes ($p < 0.05$). The total sediment yield of the slope was 1.97~10.94 times of that of the control slope. The total sediment yield of the frozen slope, the control-covered slope and the frozen-covered slope were significantly different from the

收稿日期: 2018-01-13

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402404); 国家自然科学基金项目(41601291, 41330858); 陕西省水利科技项目(2017slkj-22); 西安理工大学博士创新基金项目(310-252071505)

第一作者: 任宗萍(1982—), 女, 山东潍坊人, 讲师, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: renzongping@163.com

通信作者: 李鹏(1974—), 男, 山东烟台人, 教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: lipeng74@163.com

control slope ($p < 0.05$). (3) Under the different flow conditions, the trend of runoff intensity of the same treated slope is roughly the same with runoff time. The trend of the runoff intensity of bare slope is steady with the runoff time; however, the runoff intensity's fluctuating degree is larger. Sand cover is the main factor affecting the sediment yield of slope. Under the same flow rate, the runoff intensities of different treatment slopes were roughly divided into two kinds, "rapid rise-relatively stable" and "relatively stable". (4) Under the same flow conditions, the runoff intensity on the bare slope was greatly influenced by the freeze-thaw action. The effects of freeze-thaw and the overburden slope on the sediment yield were large, and the effect of freeze-thaw on sediment yield was greater to bare slope than that to sand-covered slope. The effect of sand cover on the sediment yield was greater than that of the soil under unfrozen soil condition.

Keywords: runoff scour; freeze-thaw; sand-covered slope; runoff and sediment yield

黄土高原风水侵蚀交错带地处温带中纬度地区,多年平均降水量在 300~600 mm,每年低于 0℃的天数约占全年的 1/3^[1],并且冬春季多风沙,夏季多暴雨^[2-4],该区域受水力侵蚀、风力侵蚀和冻融侵蚀等多种侵蚀力的复合作用^[5-6],多种侵蚀力在时空上交错重叠,土壤侵蚀程度也较为强烈,因此该地区也是黄土高原土壤侵蚀最剧烈的地区之一^[7]。

片沙覆盖地貌在黄土高原风水侵蚀交错带的分布较广,由于其典型的沙土二元结构^[8],该地貌类型的土壤侵蚀特点较为特殊。李秋艳等^[9]、海春兴等^[10]详细阐述了风水复合侵蚀的概念、类型和影响因素;张丽萍等^[11]通过野外降雨试验得出覆沙坡面的产流产沙过程明显不同于黄土坡面,在小雨强下,覆沙坡面在产流前贮存降雨,产流后径流中含沙量很大;惠振江^[12]通过野外调查对覆沙坡面的沙土界面流进行了定性的描述;汤珊珊等^[13-15]、谢林好等^[8]、Xu 等^[16]、Zhang 等^[17]通过室内模拟降雨试验研究了覆沙坡面的水沙关系、侵蚀过程以及沙层粒径组成对产流产沙过程的影响。

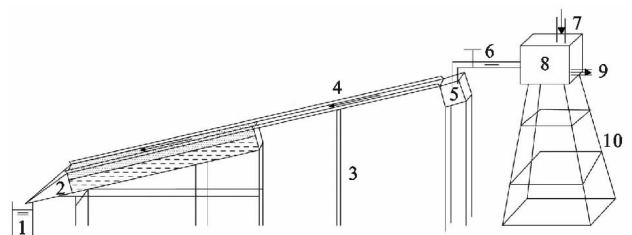
黄土丘陵沟壑区第 I 副区受冻融作用的影响显著,融雪径流侵蚀是解冻期冻融侵蚀的一种主要表现形式,春季冰雪融化,表层土壤解冻而下层冻土形成不透水层,坡面产生径流造成水土流失^[18],该地区冻融侵蚀的产沙量约占沟道产沙总量的 50%^[19]。与此同时,受冻融侵蚀的部分区域与片沙覆盖区重叠,这部分重叠区域虽然范围不大,但是广泛分布。由于重叠区域“水蚀—风蚀—冻融”几种侵蚀类型叠加,这种叠加效应导致土壤侵蚀非常严重,这也是该区域成为黄河下游河床粗泥沙主要来源的主要原因之一。目前国内外学者对于黄土高原风水交错区的单一作用力侵蚀和风水复合侵蚀已经做了大量的研究,而对于上述区域多种侵蚀类型叠加造成的水土流失问题研究甚少,因此本文以该重区域作为研究对象,通过室内模拟冷冻和放水冲刷试验,分析未冻坡面和

冻结坡面在不同覆沙厚度下的土壤侵蚀特征,对该区域土壤侵蚀机理深入研究,推动坡面土壤侵蚀理论的进一步发展。

1 材料与方 法

1.1 试验装置与材料

冲刷试验于 2017 年 4—5 月进行,试验场地位于西安理工大学雨洪侵蚀大厅。试验装置主要由冻融试验系统和冲刷装置 2 部分组成。冻土装置采用西安理工大学定制的冻融试验系统,试验土槽采用长 2 m、宽 0.2 m、深 0.2 m 的木质土槽,并且土槽顶端放置长 2 m 的径流坡面,保证水流在进入坡面具有一定的初速度。放水冲刷试验装置的结构示意图 1。



注:1 为塑料桶;2 为集流槽;3 为支架;4 为径流坡面;5 为稳流水槽;6 为水流控制阀;7 为进水口;8 为定水压供水箱;9 为溢流管;10 为水箱支架。

图 1 放水冲刷试验装置示意

本试验土壤取自中国陕西省榆林市绥德县王茂沟小流域,黄绵土表层覆盖沙物质,采用激光粒度仪 Malvern 2000 测量泥沙粒径的体积百分比,根据美国农业部(USDA)土壤分级标准得出试验用土的土壤颗粒分级特征(表 1)。

表 1 试验用土颗粒组成 单位:%

试验土壤	颗粒组成		
	黏粒 (≤ 0.002 mm)	粉粒 ($0.02 \sim 0.002$ mm)	砂粒 (≥ 0.02 mm)
黄绵土	1.22	72.01	26.77
风沙土	0.02	4.22	95.76

1.2 试验设计与方法

试验设计坡度为 12°,土壤前期含水量为 15%,产流历时 15 min,土槽前放置的径流坡面长 2 m。试

验选用流量、土壤处理、覆沙厚度 3 个影响因子,设计 2 个(1,2 L/min)流量,2 个(未冻坡面,冻结坡面)土壤处理,4 个(0,1,2,3 cm)覆沙厚度,进行组合试验。结合流量、土壤情况、覆沙厚度 3 种影响因素,经组合设计出 16 组试验,每组试验重复 3 次,最后采用 3 次试验的平均值。具体试验设计见表 2。

表 2 放水冲刷试验设计表

试验编号	坡面类型	土壤处理	流量/ (L·min ⁻¹)	覆沙 厚度/cm
U10	对照坡面	未冻	1	0
U20		未冻	2	0
F10	冻结坡面	冻结	1	0
F20		冻结	2	0
U11	对照—覆沙坡面	未冻	1	1
U12		未冻	1	2
U13		未冻	1	3
U21		未冻	2	1
U22		未冻	2	2
U23		未冻	2	3
F11		冻结	1	1
F12		冻结	1	2
F13		冻结	1	3
F21		冻结	2	1
F22	冻结—覆沙坡面	冻结	2	2
F23		冻结	2	3

在试验之前先将试验土壤样品风干,过 10 mm×10 mm 的筛,剔除植物根系等杂物。测定风干土壤含水率,计算要配置成含水率为 15% 的含水量,用喷壶均匀的喷到土壤表面,用塑料薄膜覆盖后静置 24 h,使土样含水率再分布均匀。将配置好的土壤分层(每层 5 cm)装入铺有纱布的土槽内,保证土质均匀,土壤容重控制在 1.25 g/cm³,装填完后根据试验设计要求覆上不同厚度的风沙土,并在风沙土表面撒适量的水,使风沙土中的含水量接近自然状态。按照试验设计进行试验,并将需要冻结的土槽放入 -20 ℃ 的冻土装置中进行冻结,冷冻 24 h 后取出,将土槽放置到冲刷装置支架上进行试验。在试验过程中,由于室温比冻融试验系统温度高,并且冲刷试验用水温度不易控制,因此,冲刷试验过程也是一个解冻的过程,文中后续称为冻融作用。在率定好流量后开始进行试验,当集流槽处开始产流后记录初始产流时间并观察试验过程,每场冲刷试验在开始产流后持续 15 min。试验过程中 1 min 收集 1 次径流泥沙样品,先用广口瓶收集部分样品,再用塑料桶收集其余浑水。试验结束后烘干样品并称重,用广口瓶内浑水总体积减去烘干后泥沙体积得到广口瓶内的产流量,并根据置换法计算得出产流量与产沙量。

1.3 数据处理与分析方法

使用 Excel 2016 对试验数据进行统计,并用 Or-

igin 8.5 制作图表。分析试验数据采用 SPSS 21.0。

2 结果与分析

2.1 不同处理产流产沙特征

由表 3 可知,对于相同处理坡面而言,流量为 2 L/min 的初始产流时间较 1 L/min 的初始产流时间缩短,并且其产流峰值和产沙峰值较大,产沙峰值出现时间明显提前,而产流峰值出现时间无明显差别。

以流量 1 L/min 为例,分析(以 U10 为基准)不同处理坡面初始产流时间的变化幅度,结果表明,F10 的初始产流时间较 U10 提前了 37.9%;U11、U12 和 U13 的初始产流时间较 U10 大幅延长,不同覆沙厚度条件下坡面的初始产流时间分别延长了 3.5(U11),4.73(U12),6.36(U13)倍;F11、F12 和 F13 的初始产流时间较 U10 变化不大,但是与对照—覆沙坡面相比,初始产流时间大幅提前。由此可知,覆沙坡面具有延长初始产流时间的作用,并且随着覆沙厚度的增大,延长效果越明显。分别对比裸坡面(U10 和 F10)和覆沙坡面(U11、U12、U13 和 F11、F12、F13)的初始产流时间,经过冻融作用,坡面的初始产流时间均明显减小。对于产流量峰值而言,不同处理坡面较 U10 峰值均有不同程度的增大,F11 产流量峰值最大,是 U10 的 1.41 倍;与 U10 产沙量峰值相比,不同处理坡面产沙量峰值的变化幅度更为剧烈,F10 是 U10 的 61 倍,U11、U12 和 U13 分别是 U10 的 56,81,81 倍,F11、F12 和 F13 分别是 U10 的 69,91,110 倍,这是由于坡面覆沙后,初始产流时间增大,沙层中贮存的水量更多。因此坡面在开始产流后水流可以挟带更多的泥沙,导致产流量和产沙量的峰值增大。就产流量与产沙量峰值出现的时间而言,其他坡面峰现时间较 U10 均有不同程度的提前,并且产流量与产沙量的峰现时间存在不同步性,产流峰现时间依次为 U10>F11>F10=U13>U11>F13>U12>F12;产沙峰现时间依次为 U10>F10>U11>F13>F11>U12=U13>F12。

2.2 不同处理对总产流量和总产沙量的影响

由图 2 可知,对于相同处理坡面而言,流量为 2 L/min 的总产流量和总产沙量均明显大于 1 L/min 的总产流量和总产沙量。分别选取 U10 和 U20 的总产流量和总产沙量为基准,计算不同处理坡面总产流量和总产沙量的变化幅度。就坡面总产流量而言,相同流量条件下,冻结坡面和冻结—覆沙坡面的总产流量与对照坡面有显著差异($p < 0.05$),而冻结坡面与冻结—覆沙坡面、对照—覆沙坡面与对照坡面之间均无显著差异,说明冻融作用对总产流量的影响

较大,而覆沙坡面对总产流量影响较小。在流量为 1 L/min 条件下,不同处理坡面总产流量大小依次为 $U_{10} < U_{13} < U_{11} < U_{12} < F_{13} < F_{12} < F_{10} < F_{11}$,不同处理坡面的总产流量是 U_{10} 的 1.11~1.50 倍。在流量为 2 L/min 条件下,不同处理坡面总产流量大小依次为 $U_{20} < U_{22} < U_{21} < U_{23} < F_{21} < F_{22} < F_{23} < F_{20}$,不同处理坡面的总产流量是 U_{20} 的 1.02~1.28 倍。就坡面总产沙量而言,不同流量条件下,冻结坡面、对照—覆沙坡面和冻结—覆沙坡面的总产流量与对照坡面均有显著差异 ($p < 0.05$),说明不同处理对总产沙量有显著影响。在流量为 1 L/min 条件下,不同处理坡面总产沙量大小依次为 $U_{10} < U_{11} < U_{13} < U_{12} < F_{10} < F_{11} < F_{12} < F_{13}$,不同处理坡面的总产沙量是 U_{10} 的 4.76~10.94 倍, U_{11} 、 U_{12} 、 U_{13} 间无显著差异,而 F_{11} 与 F_{12} 和 F_{13} 间有显著差异 ($p < 0.05$),说明在坡面未冻情况下覆沙厚度对总产沙量没有影响,而在坡面冻结情况下覆沙厚度对总产沙量有影响。在流量为 2 L/min 条件下,不同处理坡面总产沙量大小依次为 $U_{20} < U_{21} < U_{22} < F_{21} < U_{23} < F_{20} < F_{22} < F_{23}$,不同处理坡面的总产沙量是 U_{20} 的 1.97~9.06 倍, U_{23} 与

U_{21} 和 U_{22} 之间、 F_{21} 与 F_{22} 和 F_{23} 之间均有显著差异 ($p < 0.05$),说明在流量为 2 L/min 条件下覆沙厚度对总产沙量有影响。

表 3 不同处理的产流产沙特征值

试验 编号	初始产流 时间/s	峰值		峰值出现时间/min	
		产流峰值/L	产沙峰值/kg	产流	产沙
U10	39.38	0.75	0.01	15	15
F10	24.45	0.96	0.61	12	14
U11	138.01	1.04	0.56	11	10
U12	186.36	0.86	0.81	9	7
U13	250.58	0.89	0.81	12	7
F11	31.91	1.06	0.69	13	8
F12	34.02	1.05	0.96	7	6
F13	32.41	0.93	1.10	10	10
U20	10.14	1.71	0.22	14	9
F20	14.28	2.04	1.09	12	7
U21	74.59	1.91	0.64	15	1
U22	81.14	1.74	1.04	13	5
U23	98.25	1.87	1.55	14	7
F21	22.26	1.86	1.44	13	1
F22	26.82	2.01	1.96	6	5
F23	15.25	2.11	2.16	10	1

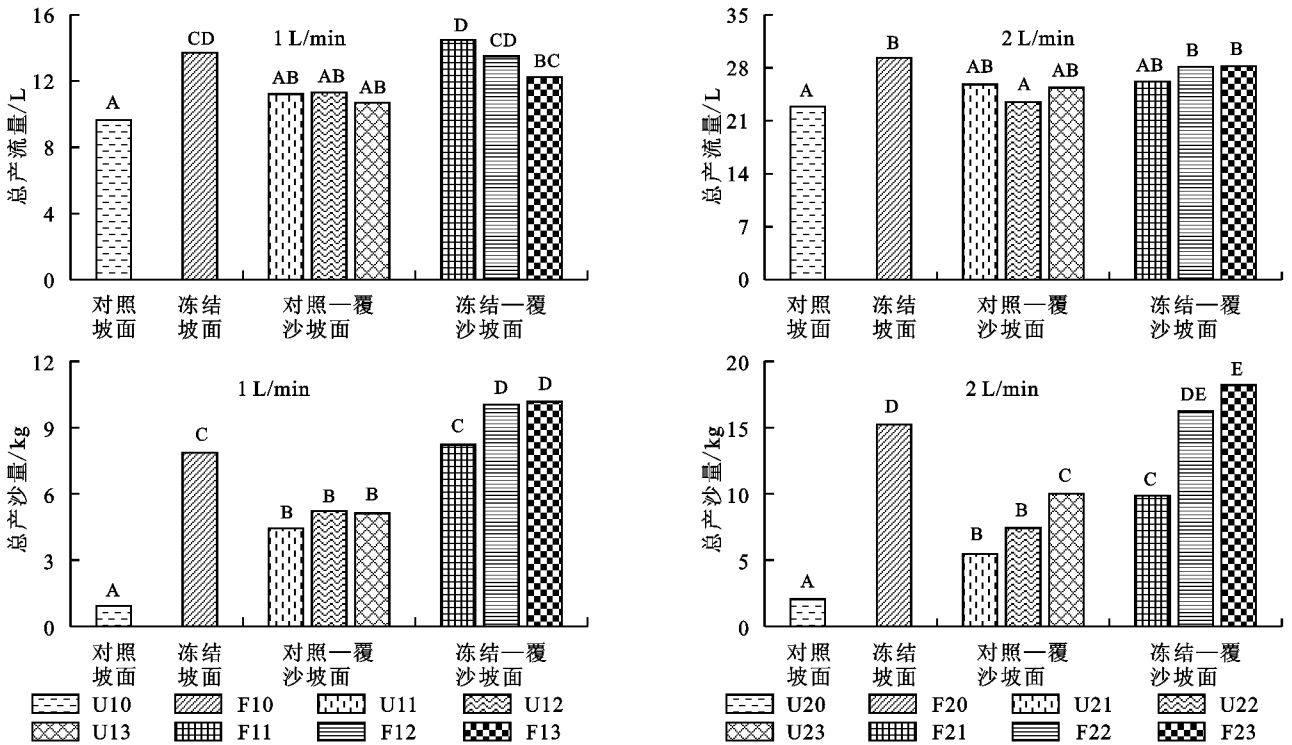


图 2 不同处理坡面总产流量与总产沙量

2.3 不同处理坡面产流产沙过程

2.3.1 不同处理的产流过程 由图 3 可知,当放水流速为 1 L/min 时, U_{10} 的产流强度呈“快速上升—相对稳定”的变化趋势,在前 6 min 迅速增长,6 min 后趋于稳定直至试验结束, F_{10} 的产流强度从坡面开始产流后就处于相对稳定状态,一直持续到试验结

束, U_{11} 、 U_{12} 和 U_{13} 产流强度的变化趋势与 U_{10} 大致相同, F_{11} 和 F_{13} 产流强度从坡面开始产流后呈波动小幅增长的变化趋势,而 F_{12} 的变化趋势呈“快速上升—缓慢下降—相对稳定”的变化趋势。当放水流速为 2 L/min 时,裸坡坡面 (U_{20} 、 F_{20}) 和对照—覆沙坡面 (U_{21} 、 U_{22} 和 U_{23}) 产流强度随产流时间的变化

趋势分别与放水流量为 1 L/min 时的裸坡坡面 (U10、F10) 和对照—覆沙坡面 (U11、U12 和 U13) 相

同,而 F21、F22 和 F23 产流强度呈“快速上升—相对稳定”的变化趋势。

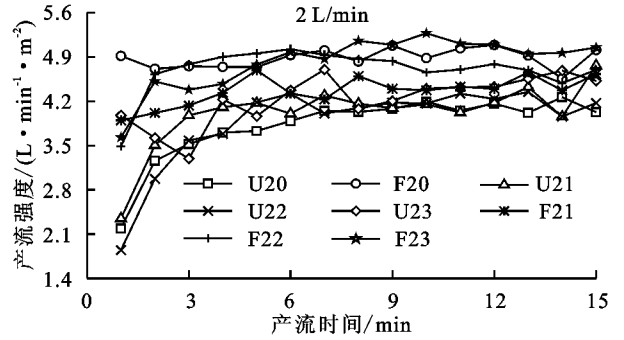
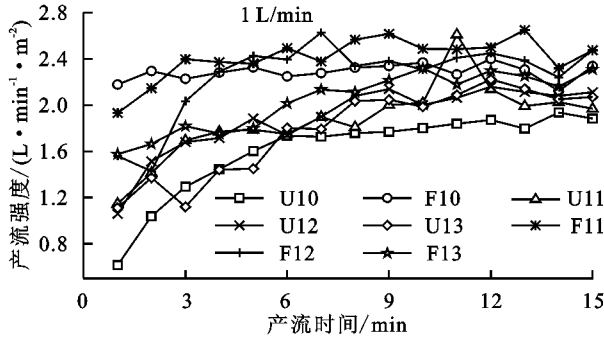


图 3 不同处理对坡面产流强度的影响

由表 4 可知,相同流量条件下,冻结—覆沙坡面产流强度的均值是对照—覆沙坡面的 1.15~1.29, 1.09~1.21 倍,冻结坡面产流强度的均值是对照坡面的 1.42,1.28 倍,由此可以看出冻融作用对坡面产流强度具有一定的影响;冻结—覆沙坡面产流强度的均值是冻结坡面的 0.89~1.05,0.89~0.99 倍,对照—覆沙坡面产流强度的均值是对照坡面的 1.11~1.17,1.02~1.11 倍,由此可以看出覆沙坡面对坡面产流强度的影响不大,并且在覆沙坡面中,产流强度随着覆沙厚度的增加变化不明显。不同处理坡面产流过程中产流强度的变异系数(CV)为 3.16%~22.92%,产流强度的波动范围较小,说明覆沙坡面和冻融作用对坡面产流过程的影响较小;不同流量条件下,冻结坡面 CV 与对照坡面的差异均较大,而对照—覆沙坡面的 CV 相比于对照坡面的差异较小,说明冻融作用对产流强度的影响作用大于覆沙坡面。

面产沙强度随着产流时间的延长,其变化趋势较为平稳,冻结坡面产沙强度明显高于对照坡面。从整体上看,相同流量条件下,覆沙坡面产沙强度随着产流时间的变化趋势较为复杂,覆沙坡面产沙强度波动程度较大。对照—覆沙坡面产沙强度总体上表现为先快速增长后快速下降并逐步趋于相对稳定状态,而冻融—覆沙坡面产沙强度从产流开始就处于较高的水平,随后不断波动并逐渐减小。相同流量条件下,随着覆沙厚度的增加,覆沙坡面的产沙强度变化趋势大致相同,并且通过比较裸坡坡面和覆沙坡面产沙强度的变化规律,可以得出坡面覆沙是影响产沙过程的主要因素。

表 4 不同处理坡面产流强度变化特征

编号	范围/ (L·min ⁻¹ ·m ⁻²)	平均值/ (L·min ⁻¹ ·m ⁻²)	CV/%
U10	0.61~1.94	1.61	22.92
F10	2.12~2.40	2.29	3.16
U11	1.15~2.61	1.87	17.56
U12	1.06~2.16	1.88	16.05
U13	1.11~2.22	1.78	21.39
F11	1.93~2.65	2.41	7.58
F12	1.43~2.63	2.25	14.84
F13	1.58~2.32	2.04	12.35
U20	2.19~4.27	3.81	13.74
F20	4.56~5.09	4.88	3.17
U21	2.35~4.77	4.01	13.28
U22	1.85~4.35	3.87	17.24
U23	3.29~4.70	4.23	9.27
F21	3.90~4.69	4.37	5.26
F22	3.49~5.02	4.70	7.74
F23	3.63~5.28	4.82	8.76

由表 5 可知,相同流量条件下,不同处理坡面的产沙强度均值差异较大,受冻融作用的影响,冻结—覆沙坡面产沙强度的均值是对照—覆沙坡面的 1.86~1.99,1.86~2.44 倍,冻结坡面产沙强度的均值是对照坡面的 8.48,7.44 倍,说明坡面产沙强度受冻融作用的影响较大,并且在裸坡条件下冻融作用对产沙强度的影响大于在覆沙坡面的条件下冻融作用对产沙强度的影响。坡面受覆沙条件的影响,冻结—覆沙坡面产沙强度的均值是冻结坡面的 1.05~1.29,0.65~1.22 倍,对照—覆沙坡面产沙强度的均值是对照坡面的 4.78~5.64,1.97~4.88 倍,说明坡面产沙强度同样受覆沙的影响,并且在土壤未冻结的条件下覆沙对产沙强度的影响大于在土壤冻结的情况下覆沙对产沙强度的影响。不同处理坡面产沙过程中产沙强度的 CV 为 5.16%~123.77%,产沙强度的波动范围较大。不同流量条件下,对照—覆沙坡面的 CV 较对照坡面明显增大,并且冻结—覆沙坡面的 CV 较冻结坡面同样明显增大,说明覆沙坡面是影响产沙过程的主要因素;冻结坡面的 CV 较对照坡面减小,冻结—覆沙坡面的 CV 较对照—覆沙坡面同样减小,说明冻融作用使坡面产沙过程相对平稳,并且冻融作用使坡面的侵蚀加剧。

2.3.2 不同处理的产沙过程 由图 4 可知,裸坡坡

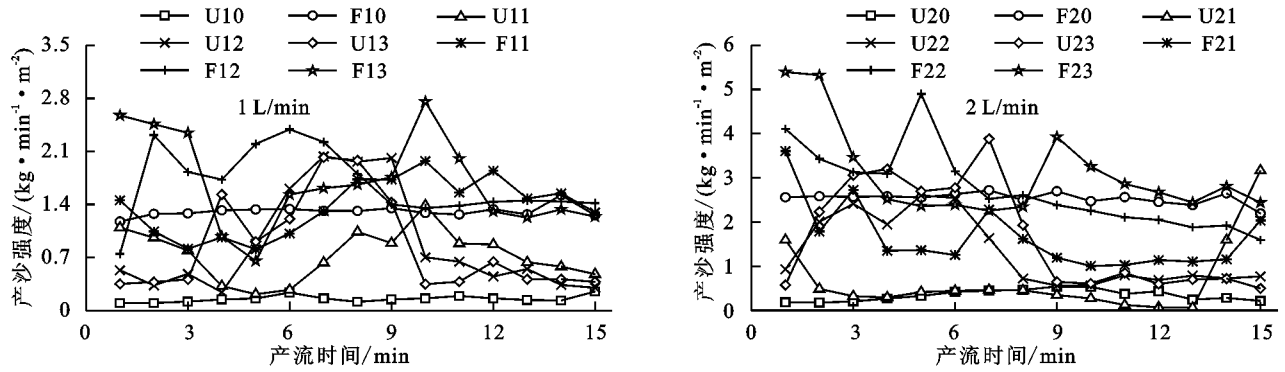


图 4 不同处理对坡面产沙强度的影响

表 5 不同处理坡面产沙强度变化特征

编号	范围/ ($\text{kg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)	平均值/ ($\text{kg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)	CV/%
U10	0.10~0.25	0.15	28.77
F10	1.18~1.52	1.31	5.62
U11	0.22~1.39	0.74	44.78
U12	0.24~2.03	0.87	77.12
U13	0.35~2.02	0.85	72.60
F11	0.81~1.97	1.37	27.27
F12	0.75~2.39	1.67	27.15
F13	0.65~2.75	1.70	36.45
U20	0.18~0.54	0.34	37.10
F20	2.19~2.72	2.54	5.16
U21	0.06~3.17	0.67	123.77
U22	0.56~2.60	1.31	59.61
U23	0.50~3.88	1.66	72.26
F21	1.01~3.60	1.64	45.10
F22	1.59~4.90	2.74	33.00
F23	2.25~5.39	3.10	33.31

3 讨论

在冬春交季的解冻期,黄土高原风水侵蚀交错带的土壤侵蚀通常是水力、风力和冻融侵蚀作用的结果,然而复合作用产生土壤侵蚀的问题远超过单一作用力侵蚀本身的危害^[20]。在本研究中,坡面覆沙后其初始产流时间增长,覆沙厚度越大初始产流时间延长效果越明显,这与汤珊珊等^[13]、张洋等^[2]研究结果一致,这是由于在放水冲刷条件下,径流经过覆沙坡面后大量入渗,风沙土孔隙度较大,具有储水作用,因此导致坡面达到饱和和含水量的时间增大,并且覆沙厚度越大,储水作用越明显,最终导致初始产流时间大大延长。试验结果表明,土壤冻结后坡面初始产流时间明显减小,在裸坡条件下主要是因为土壤冻结过程中,土壤表层存在的水分和土壤孔隙中的水分凝结,阻碍径流下渗,径流沿坡面向下运动迅速形成产流,因此初始产流时间大大减小;而在覆沙条件下沙层中的水分在土壤冻结过程中凝结形成一层“冰盖”,在试验初期“冰盖”阻碍径流入渗,导致初始产流时间均明显减小。

坡面总产流产沙量可以直观的表示在土壤侵蚀过程中坡面的侵蚀程度^[21],在本研究中,不同流量条件下,不同处理坡面总产流量是对照坡面的 1.02~1.28 倍,而坡面总产沙量是对照坡面的 1.97~10.94 倍,说明不同处理对坡面产沙的影响大于对产流的影响。不同流量条件下,通过不同处理坡面总产沙量大小排序可以发现,冻结一覆沙坡面的侵蚀产沙量最多,其次是冻结坡面 and 对照一覆沙坡面,对照坡面的侵蚀产沙量最少。原因主要有:(1)当温度降低到 0℃ 以下,沙层中贮藏的水分和土壤孔隙中的水分冻结成冰,体积膨胀,使土体稳定性变差,并且由于冻融作用具有时空不一致性^[22],未解冻的底层形成不透水层,径流沿接触面流动,水流与坡面的摩擦力减小,水流不断下切,迅速形成细沟,使得侵蚀量增大,最终导致土壤侵蚀加剧;(2)土壤冻结使初始产流时间和细沟出现时间大大缩短,坡面更容易产生径流,同时也更容易产生细沟,导致侵蚀量增大;(3)覆沙坡面表层的沙层可以延长初始产流时间,贮存更多的水量,当坡面开始产流后,贮存的水伴随着径流下泄,并携带更多的泥沙,导致产沙量增大。

在土壤侵蚀过程中,坡面径流是坡面侵蚀的主要作用力之一^[23],坡面产沙量能够直观地反映各时段内的侵蚀强度^[13],并且坡面产沙过程是研究地表形态发育的基础,坡面产沙过程同样受坡面产流过程的影响。不同处理坡面在产流过程中产流强度的变化趋势大致分为两种,一种是对照坡面和覆沙坡面的“快速上升—相对稳定”趋势,另一种是冻结坡面从坡面开始产流就处于相对稳定的变化趋势。对照坡面和覆沙坡面出现这种情况的主要原因是产流初期,坡面入渗量较大,随着试验的继续,坡面入渗率逐渐减小并趋于稳定,并且由于覆沙坡面的沙层在坡面开始产流之前储蓄了较多的水分,因此覆沙坡面的初始产流强度大于对照坡面。对于冻结坡面而言,由于温度降到 0℃ 以下,土壤表层和土壤孔隙中的水分凝结成冰阻碍径流下渗,因此在坡面开始产流后,坡面入渗量较小,并且土壤中的冰融化成水与径流一起沿坡

面流出,使冻结坡面的产流强度从坡面开始产流后就处于相对稳定的趋势,一直持续到试验结束。随着产流历时的增加,坡面产沙过程与坡面产流过程的变化趋势明显不同。裸坡坡面产沙强度随产流时间的变化趋势较为平稳,而冻结坡面产沙强度明显大于对照坡面,这是由于冻结坡面土壤中的水分凝结成冰,导致土壤孔隙度减小,坡面入渗能力降低,坡面径流量较大,侵蚀力较强,并且冻结坡面在产流过程中,冻结的土壤不断融化提供了较多的可蚀性物质,导致冻结坡面的产沙强度明显高于对照坡面。对照一覆沙坡面产沙强度随产流时间的变化波动程度较大,这是因为对照一覆沙坡面在形成产流之前,沙层中储存了大量水分,在这过程中积蓄了能量,当坡面开始产流后,沙层中的能量达到临界值,坡面径流挟带着大量沙土流出坡面,导致产沙强度急剧增大,随着坡面沙量的急剧减少,产沙强度也急剧减小,最后与黄土坡面的产沙过程相似,因此产沙强度最终趋于相对稳定状态。对于冻融一覆沙坡面而言,一方面由于土壤冻结使坡面的产流量较大,与此同时冻结土体不断融化导致侵蚀物质较多,水流下切迅速形成细沟,在此期间径流挟带大量侵蚀物质沿坡面向下运动,因此在产流初期产沙强度较大;另一方面由于沙层的孔隙度较大,沙层与黄土相比稳定性较差,沙层的侵蚀更加剧烈,随着产流的继续,覆沙不断减少直到沙层消失,最终也与黄土坡面相似,产沙强度逐渐减小。

4 结论

(1)相同流量条件下,覆沙坡面初始产流时间延长,并且随着覆沙厚度的增大,延长效果越明显,而冻融作用使坡面初始产流时间缩短;不同处理坡面的产流产沙峰值较对照坡面均有不同程度的增大,产沙峰值的变化程度大于产流峰值;峰值出现时间较U10均有不同程度的提前,产流量与产沙量的峰值出现时间存在不同步性。

(2)不同流量条件下,不同处理坡面总产流量是对照坡面的1.02~1.28倍,而坡面总产沙量是对照坡面的1.97~10.94倍,因此不同处理对坡面产沙的影响大于对产流的影响。冻结坡面和冻结一覆沙坡面的总产流量与对照坡面均有显著差异($p < 0.05$),冻结坡面与冻结一覆沙坡面、对照一覆沙坡面与对照坡面之间均无显著差异,冻结坡面、对照一覆沙坡面和冻结一覆沙坡面的总产沙量与对照坡面均有显著差异($p < 0.05$),说明冻融作用对总产流量的影响较大,而覆沙坡面对总产流量影响较小,并且不同处理对总产沙量均有不同程度的影响。

(3)不同流量条件下,相同处理坡面产流强度随产流时间变化趋势大致相同。相同流量条件下,不同

处理坡面在产流过程中产流强度分为“快速上升一相对稳定”(对照坡面和覆沙坡面)和一直处于相对稳定(冻结坡面)两种变化趋势。不同流量条件下,裸坡坡面的产沙强度随着产流时间的变化趋势较为平稳,冻结坡面产沙强度的水平明显高于对照坡面,而覆沙坡面产沙强度随着产流时间的变化趋势较为复杂,其产沙强度波动程度较大,因此坡面覆沙是影响产沙过程的主要因素。

(4)相同流量条件下,裸坡坡面的产流强度受冻融作用的影响较大,而坡面覆沙对坡面产流强度的影响效果不明显,并且在覆沙坡面中,产流强度随着覆沙厚度的增加变化不明显;冻融作用和覆沙坡面对坡面产沙强度的影响均较大,冻融作用在裸坡条件下对产沙过程的影响大于覆沙坡面,坡面覆沙在土壤未冻结的情况下对产沙过程的影响大于在土壤冻结的情况。

参考文献:

- [1] 张辉,李鹏,鲁克新,等.冻融作用对坡面侵蚀及泥沙颗粒分选的影响[J].土壤学报,2017,54(4):836-843.
- [2] 张洋,李占斌,牛雯,等.模拟径流条件下覆沙黄土坡面产流产沙过程[J].水土保持学报,2017,31(4):6-10.
- [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] 唐克丽,侯庆春,王斌科,等.黄土高原水蚀风蚀交错带和神木试区的环境背景及整治方向[J].水土保持研究,1993(2):2-15.
- [6] 唐克丽.黄土高原生态环境建设关键性问题的研讨[J].水土保持通报,1998,18(1):1-7.
- [7] 康宏亮,王文龙,薛智德,等.冲刷条件下黄土丘陵区浅沟侵蚀形态及产流产沙特征[J].农业工程学报,2016,32(20):161-170.
- [8] 谢林好,白玉洁,张风宝,等.沙层厚度和粒径组成对覆沙黄土坡面产流产沙的影响[J].土壤学报,2017,54(1):60-72.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 张丽萍,唐克丽,张平仓.片沙覆盖的黄土丘陵区土壤水蚀过程研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(1):40-45.
- [12] 惠振江.陕北毛乌素沙地与黄土区过渡地带荒漠化研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2001.
- [13] 汤珊珊,李占斌,任宗萍,等.覆沙坡面产流产沙过程试验研究[J].水土保持学报,2015,29(5):25-28.

- 面水氮素动态变化及径流损失研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1561-1566.
- [7] 郑小龙, 吴家森, 陈裴裴, 等. 不同施肥与生物质炭配施对水稻田面水氮磷流失及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 39-43, 48.
- [8] 王静, 郭熙盛, 王允青, 等. 保护性耕作与平衡施肥对巢湖流域稻田氮素径流损失及水稻产量的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6): 1164-1171.
- [9] 李旭, 谢桂先, 刘强, 等. 控释尿素减量施用对稻田氮素径流和渗漏损失的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 70-74.
- [10] 韩新忠, 朱利群, 杨敏芳, 等. 不同小麦秸秆还田量对水稻生长、土壤微生物生物量及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2192-2199.
- [11] 刘秋霞, 戴志刚, 鲁剑巍, 等. 湖北省不同稻作区域秸秆还田替代钾肥效果[J]. 中国农业科学, 2015, 48(8): 1548-1557.
- [12] 马力, 杨林章, 肖和艾, 等. 施肥和秸秆还田对红壤水稻土有机碳分布变异及其矿化特性的影响[J]. 土壤, 2011, 43(6): 883-890.
- [13] 裴鹏刚, 张均华, 朱练峰, 等. 秸秆还田对水稻固碳特性及产量形成的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2885-2891.
- [14] 李录久, 王家嘉, 吴萍萍, 等. 秸秆还田下氮肥运筹对白土田水稻产量和氮吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 254-262.
- [15] Giltrap D L, Li C S, Saggat S. DNDC: A process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2010, 136(3/4): 292-300.
- [16] Gilhespy S L, Anthony S, Cardenas L, et al. First 20 years of DNDC (De Nitrification De Composition): Model evolution [J]. *Ecological Modelling*, 2014, 292: 51-62.
- [17] Uzoma KC, Smith W, Grant B, et al. Assessing the effects of agricultural management on nitrous oxide emissions using flux measurements and the DNDC model [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2015, 206: 71-83.
- [18] Lugato E, Zuliani M, Alberti G, et al. Application of DNDC biogeochemistry model to estimate greenhouse gas emissions from Italian agricultural areas at high spatial resolution [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 139(4): 546-556.
- [19] Zhao Z, Zhang H L, Li C S, et al. Quantifying nitrogen loading from a paddy field in Shanghai, China with modified DNDC model [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2014, 197: 212-221.
- [20] Qiao J, Yang L Z, Yan T M, et al. Nitrogen fertilizer reduction in rice production for two consecutive years in the Taihu Lake area [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2012, 146(1): 103-112.
- [21] 王虎, 王旭东, 田霄鸿. 秸秆还田对土壤有机碳不同活性组分储量及分配的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3491-3498.
- [22] 刘禹池, 曾祥忠, 冯文强, 等. 稻-油轮作下长期秸秆还田与施肥对作物产量和土壤理化性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1450-1459.
- [23] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 526-535.
- [24] 赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 等. 耕作方式与秸秆还田对土壤呼吸的影响及机理[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19): 155-165.
- (上接第35页)
- [14] 汤珊珊, 高海东, 李占斌, 等. 坡面覆沙后侵蚀泥沙颗粒分选特性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 125-130.
- [15] 汤珊珊, 李占斌, 李聪, 等. 模拟降雨条件下覆沙坡面产流产沙过程研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 139-146.
- [16] Xu G C, Tang S S, Lu K X, et al. Runoff and sediment yield under simulated rainfall on sand-covered slopes in a region subject to wind-water erosion [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(3): 2523-2530.
- [17] Zhang F B, Bai Y J, Xie L Y, et al. Runoff and soil loss characteristics on loess slopes covered with aeolian sand layers of different thicknesses under simulated rainfall [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 549: 244-251.
- [18] 景国臣. 冻融侵蚀及其形式探讨[J]. 黑龙江水利科技, 2003, 30(4): 111-112.
- [19] 王随继. 黄河中游冻融侵蚀的表现方式及其产沙能力评估[J]. 水土保持通报, 2004, 24(6): 1-5.
- [20] 王飞, 范昊明, 郭成久, 等. 我国两大冻融侵蚀区气候变化对比分析[J]. 生态环境, 2008, 17(1): 173-177.
- [21] 苏远逸, 李鹏, 李占斌, 等. 坡面植被格局对坡沟系统能量调控及水沙响应关系的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 32-39.
- [22] 李占斌, 李社新, 任宗萍, 等. 冻融作用对坡面侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 56-60.
- [23] 李聪. 植被格局对坡沟系统侵蚀输沙过程调控作用试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2015.