

连续径流冲刷条件下工程堆积体土壤侵蚀特征

赵 菀¹, 高照良^{1,2}, 李永红^{1,2}, 孙贯芳¹, 娄永才¹, 杨树云¹, 吴彤²

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 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)

摘 要: [目的] 探究连续径流冲刷条件下工程堆积体的坡面侵蚀响应, 为进一步认识工程堆积体在连续冲刷过程中的侵蚀规律并为水土流失模型精准预测提供基础数据和科学参考。[方法] 设置 3 个放水梯度 (8, 12, 16 L/min), 在 3 个坡度 (28, 32, 36°) 条件下, 进行野外连续 3 场径流冲刷试验 (每场间隔 24 h)。[结果] ①各场次产流特征为: 第 3 场 > 第 2 场 > 第 1 场, 其中, 第 3 场径流量增量大于第 2 场, 对比第 1 场增速分别为 40.5% 和 33.4%。②各场次产沙量为: 第 1 场 > 第 2 场 > 第 3 场, 产沙量占比分别为 31.74% ~ 53.46%, 29.03% ~ 43.71%, 17.42% ~ 29.04%。③在任意流量段, 连续径流冲刷下平均流速与沟宽的变化无关, 沿径流方向流速与沟深变化一致。[结论] 上方来水条件下工程堆积体坡面产流随冲刷场次的增加逐场增大, 产沙随场次增加逐场减少。冲刷场次对平均产流率具有显著影响。

关键词: 连续冲刷; 产流产沙; 工程堆积体; 侵蚀形态

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)06-0061-07

中图分类号: S157.1

文献参数: 赵菀, 高照良, 李永红, 等. 连续径流冲刷条件下工程堆积体土壤侵蚀特征[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 61-67. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.06.008; Zhao Chun, Gao Zhaoliang, Li Yonghong, et al. Soil erosion characteristics of engineering deposits under continuous runoff scouring [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 61-67.

Soil Erosion Characteristics of Engineering Deposits Under Continuous Runoff Scouring

Zhao Chun¹, Gao Zhaoliang^{1,2}, Li Yonghong^{1,2},

Sun Guanfang¹, Lou Yongcai¹, Yang Shuyun¹, Wu Tong²

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation,

Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The slope erosion response of engineering deposits occurring under continuous runoff scouring was determined in order to further understand the laws governing erosion of engineering deposits during continuous scouring, and to provide basic data as a reference for accurate predictions by soil erosion models. [Methods] We set up three drainage gradients (8, 12, 16 L/min) on three slopes (28, 32, 36°) and carried out three consecutive event runoff scouring tests (24 h between each event). [Results] ① The runoff characteristics of each event followed the order of event 3 > event 2 > event 1, and the increase in runoff in event 3 was greater than in event 2. The growth rates in event 1 were 40.5% and 33.4%, respectively. ② The sediment yield followed the order of event 1 > event 2 > event 3, and the proportion of sand production was 31.74% ~ 53.46%, 29.03% ~ 43.71%, and 17.42% ~ 29.04%, respectively. ③ In any flow section, the average flow velocity under continuous runoff erosion had nothing to do with the change of the channel width, and the flow velocity along the runoff direction was consistent with the change of the channel depth. [Conclusion] As water flows from above, runoff on the slope surface of engineering deposits

收稿日期: 2022-04-18

修回日期: 2022-05-02

资助项目: “十三五”国家重点研发计划项目“高塬沟壑区固沟保塬生态防护与苹果产业提质增效技术及示范”(2016YFC0501706-02); 国家自然科学基金项目(41671283)

第一作者: 赵菀(1997—), 女(汉族), 陕西省渭南市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持工程。Email: 575863172@qq.com。

通讯作者: 高照良(1969—), 男(汉族), 河南省灵宝市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业水土工程和荒漠化防治方面的研究。Email: gzl@ms.iswc.ac.cn。

increases with increasing scouring time, and sediment yield decreases with increasing time and the scouring site has a significant impact on the average runoff rate.

Keywords: continuous scouring; runoff scouring; runoff and sediment production; engineering accumulation; erosion morphology

近年来,中国基础设施建设依然处于中高速增长态势,工程建设产生的弃土弃渣形成的大量工程堆积体,在连续降雨和径流冲刷累积下极易发生水土流失灾害^[1-3]。工程堆积体由平台和陡坡两部分组成,降雨条件下平台汇集的径流会对坡面造成严重的冲刷。目前,在上方来水对坡面土壤水分再分布的影响、降雨及上方来水条件下坡面的水文特性及径流和侵蚀响应等研究方面取得重要进展^[4-5],促进了对堆积体坡面水文及侵蚀规律的认识。然而,目前相关研究多在一次上方来水条件的背景下展开,连续降雨和冲刷的相关坡面的侵蚀研究鲜有报道^[6-7]。实际上,在野外气候环境条件下降雨特性复杂,高强度多频次降雨和冲刷使野外堆积体土壤侵蚀具有反复性和连续性,原始坡面在经历一次上方来水汇流冲刷后面临多次的汇流冲刷和剥蚀事件,即前期来水不仅填充堆积体土壤孔隙,使土体水分不断饱,而且重塑堆积体下垫面侵蚀形态,打通坡面产流和汇流路径,还分散和搬运了坡面土壤颗粒物质,改变了坡体土壤粒径分布特征,奠定了后期冲刷触发滑坡和泥石流灾害的下垫面基础。相关研究忽略了野外堆积体坡面侵蚀的连续和反复性,影响了堆积体侵蚀模型的预测精度,制约了上方来水条件下堆积体坡面侵蚀时空规律的认识。因此,本文通过开展野外连续径流冲刷试验,模拟多次来水条件下工程堆积体侵蚀过程,探究工程

堆积体在连续上方来水剥蚀事件下的坡面侵蚀响应,促进堆积体侵蚀时空变化规律的认识,完善堆积体侵蚀机理,优化工程扰动区域水土保持各项防护措施配置,为上方来水条件下工程建设区土壤侵蚀产沙模型的修正和水土流失量的精准预测提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于2021年9—10月在中国科学院水利部水土保持研究所杨凌水土保持野外科学试验站(107°59′36.10″E,34°19′24.83″N)进行。该试验站位于陕西省杨凌农业高新技术产业示范区五泉镇小韦河右岸黄土塬面上,地处渭河第三级阶地,海拔在516~540 m,该区气候类型属于温带半湿润大陆性季风气候,年均降雨量635.1 mm,平均气温12.9℃,无霜期211 d,地带性土壤为壤土。

1.2 试验设计与观测

小区覆土采自陕西杨凌的弃土堆积体,土石比超过9:1,粒径多<1 mm,土样经自然风干后过10 mm筛去除杂草、砂砾等大颗粒物质,通过分层碾压的方式填入试验小区。小区长20 m,宽5 m,通过铝塑板分隔为长×宽为8 m×1 m的试验小区,铝塑板高50 cm,埋入土内35 cm。试验材料的机械组成详见表1。

表1 试验土壤机械组成

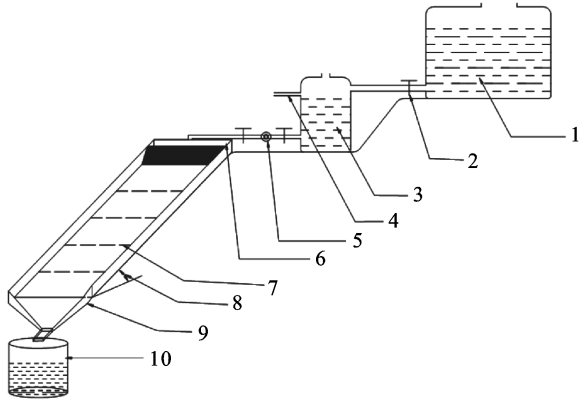
粒径范围/mm	<0.002	0.002~0.02	0.02~0.05	0.05~0.1	0.1~2.0
百分含量/%	0.813	25.183	26.322	22.556	25.126

根据黄土高原气象资料^[8]单场最大降雨强度为1.6 mm/min,其中侵蚀降雨标准为12 mm,设计对应于8 m坡长时的单宽流量依次为8,12,16 L/min。每个相同放水流量下均开展3场连续径流冲刷,每场间隔24 h。本试验设计坡度为典型堆积体高陡边坡28°,32°和36°,相同流量第1场冲刷结束后,用塑料薄膜将坡面覆盖,24 h后打开塑料薄膜测定土壤含水量并进行下一场冲刷,重复以上步骤,直至完成3场冲刷。由于坡面细沟发育的随机性,不便于连续观测,所以在坡面整理时,使坡面整体呈现微凹型,确保坡面发育一条细沟。试验前测定土壤容重和土壤初始含水量,分别选取3个观测断面0—20 cm土壤容重

和含水率,土壤容重介于1.24~1.42 g/cm³,均值1.34 g/cm³,变异系数5.02%。

试验放水装置由蓄水桶、恒压桶、稳流槽、阀门、流量计等组成,为了保证出水量均匀,试验采用恒压放水。每场试验时长为30 min,主要观测指标有径流量、流速、沟宽、沟深和产沙量,小区下方急流槽出流后开始计算产流时间,产流后前3 min内每隔1 min测定1次,3 min后每隔3 min测定1次,含沙量用1 000 ml的泥样瓶收集泥沙样品,用烘干法计算。对于流速和细沟发育指标沟宽和沟深的观测,在8 m长坡面距坡顶0.25~7.75 m处从上至下设置3个1.5 m长的观测坡段,每个观测坡段间隔1.5 m(距坡顶

0.25, 3.25, 6.25 m 处), 分别表示坡上、坡中、坡下径流流速和细沟形态特征, 采用精度为 1 mm 的钢尺测量细沟形态指标, 流速乘以 0.75 作为断面平均流速。



注: 1 蓄水桶; 2 水阀; 3 恒压桶; 4 溢流管; 5 流量计; 6 溢流槽; 7 观测断面; 8 铝塑板; 9 试验小区; 10 集流桶。

图 1 试验小区示意图及放水装置

1.3 数据及处理

土壤剥蚀率 D_r 为坡面在水流冲刷下单位时间、单位面积上的产沙量, 计算公式为:

$$D_r = \frac{M}{bLT} \quad (1)$$

式中: D_r 为土壤剥蚀率 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; M 为 T 时段内的产沙量 (kg); b 为过水断面宽度 (m); L 为试验小区坡长 (m)。

本文运用 SPSS 16.0 和 Excel 2013 进行数据分析和作图。

2 结果及分析

2.1 连续上方来水条件下堆积体坡面产流历时

产流历时指从坡顶平台出水至坡面形成汇流并从小区出口流出的时间, 是下垫面差异性的综合反映, 对于相同坡度堆积体边坡, 径流量和土壤含水量是造成产流历时差异的因素。表 2 为不同流量和冲刷场次下 32° 坡面产流历时 T_0 和土壤初始含水率 W 变化。从表 2 可以看出, 同一径流量下第 1 场冲刷 T_0 明显大于后两场, 而第 2 场 T_0 稍大于第 3 场, 将第 2, 3 场冲刷的产流历时与第 1 场冲刷相对比, 8, 12 和 16 L/min 放水流量下的产流历时分别减少了 38.10.12%~47.37%, 24.8%~32.18% 和 26.96%~36.45%。第 1 场放水初期, W 较小, 为 13.7%~14.6%, 初期雨滴浸润土壤, 入渗率较大, 产流历时延长; 第 2 场冲刷 W 为 19.1%~21.1%, 含水量显著增大, 导致土壤入渗能力降低, 坡面产流历时明显缩短。第 3 场冲刷 W 为 21.6%~22.8%, 初始含水量略大于

第 2 场, 接近土壤饱和含水量, 坡面产流历时稍有缩短。将 12 和 16 L/min 放水流量与 8 L/min 相对比, 随场次的增加产流历时分别增大了 35.35%~55.77%, 21.45%~47.81% 和 16.69%~46.59%。对于第 1 场冲刷来说, 土壤含水量越低, 导致入渗速率越慢, 越不容易产生超渗产流。反之, 土壤含水量越高, 入渗速率加快, 产流历时不断下降。

表 2 不同流量连续径流冲刷下坡面产流时间及初始土壤含水率

放水流量/ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	冲刷 场次	产流历时 T_0	土壤初始含 水率 $W/\%$
8	1	123'75"	13.7
	2	76'59"	19.1
	3	65'12"	21.6
12	1	80'	14.6
	2	60'16"	21.1
	3	54'25"	22.8
16	1	54'73"	14.1
	2	39'97"	20.5
	3	34'78"	21.9

2.2 连续上方来水条件下堆积体坡面产流特征

不同场次产流特征: 连续上方来水试验各个阶段的产流规律基本相似, 在每一阶段表现为先迅速增大随后稳定的变化过程。随着冲刷场次的增加, 产流率波动性增大, 在不同流量和坡度条件下, 各场次坡面产流率均值范围在 2.72~22.32 L/min 之间, 且均表现为: 第 3 场 > 第 2 场 > 第 1 场。由图 2 可知, 在不同冲刷流量下, 平均产流率随场次的增加而增加; 随坡度的增加略有上升, 双因素方差分析结果显示, 冲刷场次对平均产流率有显著影响 ($p < 0.05$)。

由图 3 可知, 各个场次下径流量随冲刷强度的增加而增大, 增速依次为: 冲刷强度 12 L/min > 冲刷强度 16 L/min > 冲刷强度 8 L/min。当流量为 8 L/min 时, 各个场次间增速较小, 在 0.4%~54.7% 之间。平均值增速为 24.5%; 当流量为 12 L/min 时, 范围在 14.9%~86.5% 之间, 平均增速为 54.8%; 当流量为 16 L/min 时, 增幅在 7.1%~57.3% 之间, 平均增速为 31.5%。各场次下径流量随坡度的增加而增大, 增速依次为: 坡度 $36^\circ >$ 坡度 $32^\circ >$ 坡度 28° 时, 当坡度为 28° 时, 各场次间径流量增速较小, 范围在 0.4%~57.3% 之间, 平均增速为 33.43%; 当坡度为 32° 时, 增幅在 10.5%~86.5% 之间, 平均增速为 34.3%; 当坡度为 36° 时, 增幅在 14.2%~78.1% 之间, 平均增速为 43.2%。总之, 在不同坡度和冲刷强度条件下,

径流量随场次的增加而增大,其总体特征为:第 3 场径流量 > 第 2 场径流量 > 第 1 场径流量。其中,第 3 场径流量增速大于第 2 场,平均增速分别为 40.5% 和 33.4%。

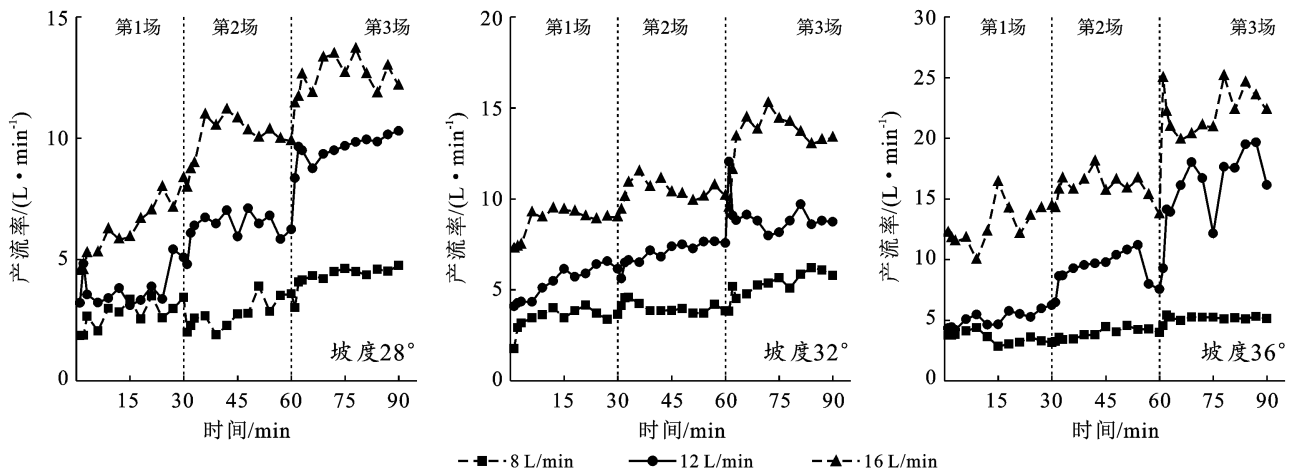


图 2 不同放水流量和坡度下各场次产流率随放水历时的变化

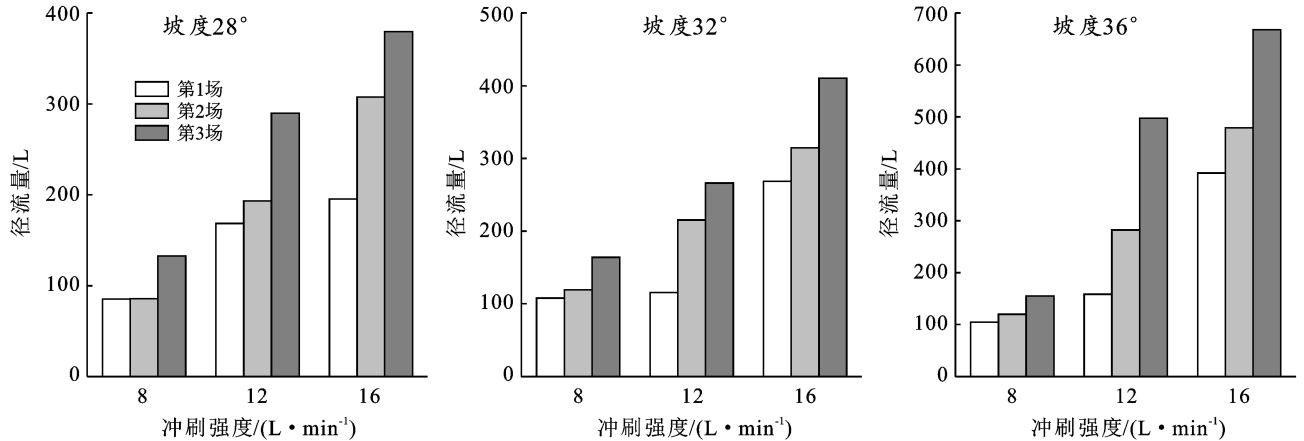


图 3 不同放水流量和坡度下各冲刷场次的累积产流量

2.3 连续上方来水条件下堆积体坡面产沙特征

将各个坡度和流量的连续 3 场冲刷条件下坡面土壤剥蚀率变化过程点绘于图 4。

从图 4 可知,不同流量和坡度条件下土壤剥蚀率随时间的变化规律基本一致,第 1 场堆积体土壤剥蚀率呈“突变—波动减少—稳定”的变化过程。第 1 场冲刷期间,坡面表层松散物质丰富,为径流冲刷提供了丰富的泥沙源,土壤剥蚀率增长快且波动性强,并在产流 9~15 min 后趋于稳定。8~16 L/min 流量下,第 1 场平均剥蚀率为:2.53~7.65 g/(m²·s),变异系数为:34.3%~41.2%,对于第 2 场和第 3 场,土壤剥蚀率呈现“缓慢增加—波动上升—稳定”的变化趋势,产流后剥蚀率在每场场初始时刻会出现低谷,并在随后缓慢增加,在产流 6 min 后趋于稳定。第 2 场平均土壤剥蚀为:1.76~5.42 g/(m²·s),变异系数为:23.2%~31.3%第 3 场平均土壤剥蚀率为:1.17~

3.84 g/(m²·s),变异系数为:18.0%~26.1%。第 2, 3 场冲刷下土壤剥蚀率属于中等变异,第 1 场冲刷可达高度变异,最大波幅在 1.44~6.07 g/(m²·s),波动大且持续时间长于第 2,3 场。第 1 场冲刷土壤剥蚀率大于第 2,3 场,剥蚀率最大可达第 2,3 场的 1.49 和 2.16 倍。总体来说,随着流量的增大,峰谷出现的次数增加,波动性增强,剥蚀率增加。随着冲刷场次的增加,峰谷出现的次数减少,波动性降低,平均剥蚀率减少。

由图 5 可知,第 1 场上方来水阶段,8~16 L/min 冲刷流量下产沙量为 13.79~138.4 kg。其中,28°坡面第 1 场冲刷产沙量为 25.41~57.07 kg,32°坡面第 1 场产沙量为 42.33~129.91 kg,36°坡面产沙量 39.9~138.39 kg,第 1 场平均产沙量占比达 42.9%。增大流量,坡面侵蚀产沙量呈增加趋势,16 L/min 流量下产沙量是 8 L/min 流量的 3.04 倍。第 2,3 场上方来水

阶段产沙量分别为 23.13~93.60 kg 和 15.31~63.43 kg, 各阶段产沙量为:第 1 场>第 2 场>第 3 场,产沙量比例分别为 31.74%~53.46%, 29.03%~43.71%, 17.42%~29.04%。总体上,3 个流量下,第 1 场总产

沙量为 25.4~138.4 kg,第 2 场总产沙量较第 1 场减少 37.7%~45.5%,第 3 场减少 21.9%~67.4%。各场次总产沙量随放水流量增大而增加,增幅分别为 20.58%~204.88%,12.5%~154.53%。

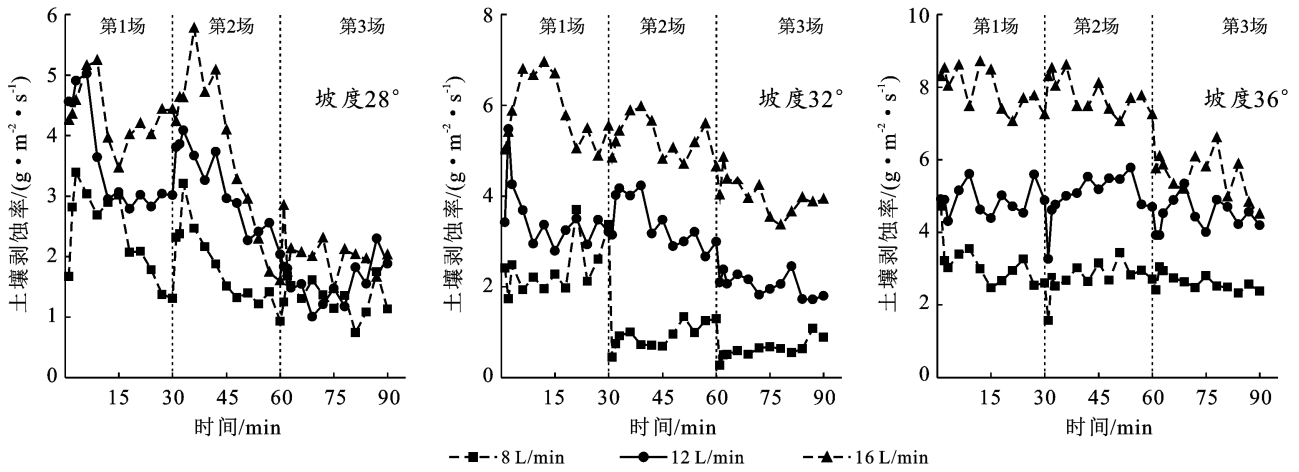


图 4 不同放水流量和坡度下各场次土壤剥蚀率随放水历时的变化

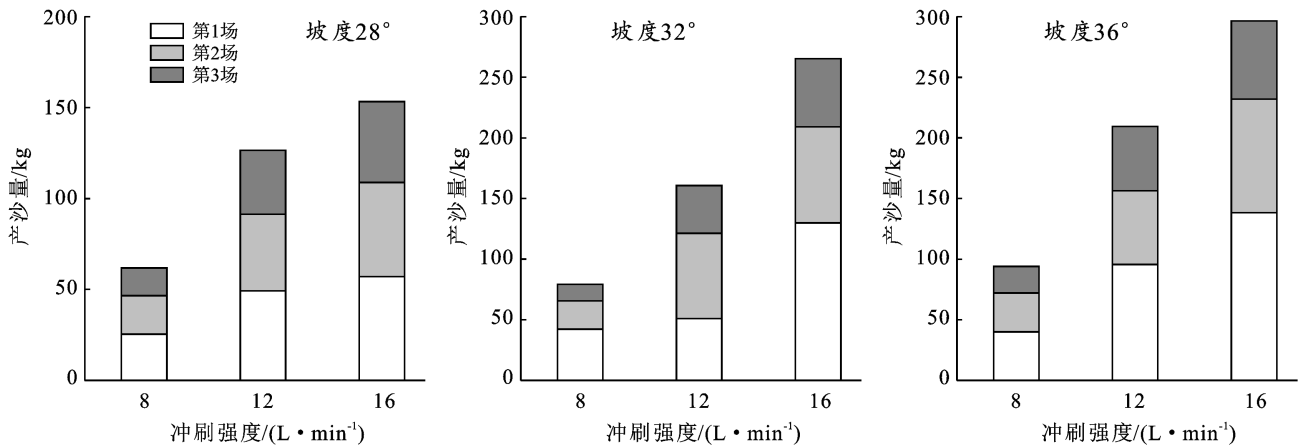


图 5 不同放水流量和坡度下各场次累积产沙量的变化

2.4 连续上方来水条件下坡面流速和侵蚀形态空间变化特征

本研究选取平均沟深、最大沟深、平均沟宽、宽深比作为描述试验结束后侵蚀沟形态空间特征的参数详见表 3。8~16 L/min 流量时,随冲刷场次平均沟深分别为 0.61~3.99 cm,2.48~8.04 cm,4.71~12.90 cm。第 2,3 场冲刷的平均沟深分别增大了 2.01~3.96 倍和 1.60~1.69 倍。当冲刷流量为 8 和 12 L/min 时,平均沟深、最大沟深沿边坡从上至下呈现先减小后增大的趋势,上坡段是侵蚀沟深最大的位置。当冲刷流量为 16 L/min 时,不同坡段沟深在不同场次发展态势不同,表现为沿边坡从上至下逐步减少发展为先增大后减小。中坡段是侵蚀沟深最大的位置。随冲刷场次平均沟宽分别为 9.33~19.42,

10.85~23.04,11.21~23.83 cm,平均沟宽沿径流方向逐渐减小,在边坡下部最小;随冲刷场次的增加,中坡段和下坡段平均沟宽差异缩小。总体上,沟宽随冲刷场次的增加而增加,流量变化对边坡沟宽的影响无明显规律。随着流量和冲刷场次的增加,宽深比不断减小,各场次平均宽深比分别为 5.49~20.18,1.90~4.61,1.23~3.45。在本研究中,流量为 8 L/min 的第一场冲刷时,宽深比最大,平均值为 11.33。当流量为 16 L/min 的第 3 场冲刷时,宽深比最小,平均值为 1.71。整体来说,随着流量和冲刷场次的增大,细沟宽深比朝着趋于稳定的方向发展。在任意流量段,平均流速与沟宽的变化无明显规律,随沟深的变化流速有响应。当流量为 8 和 12 L/min 时,沿径流方向流速与沟深变化一致,均表现为:坡上>坡下>坡中。

当流量为 16 L/min 时,沿径流方向流速与沟深变化仍一致,表现为:坡中>坡下>坡上。这说明流速与坡段上沟深的沿程发展变化有关,而与具体坡段无关。

表 3 各放水流量下不同场次坡面流速和侵蚀形态空间特征

放水流量	场次	坡段	平均沟深/cm	最大沟深/cm	平均沟宽/cm	平均宽深比	平均流速/ $(m \cdot s^{-1})$
8 L/min	1	坡上	1.85	4.00	15.41	8.33	0.26
		坡中	0.61	1.80	12.30	20.18	0.51
		坡下	1.70	3.50	9.33	5.49	0.43
	2	坡上	4.22	5.52	16.33	3.87	0.30
		坡中	2.48	3.40	11.43	4.61	0.46
		坡下	4.06	5.20	11.13	2.74	0.38
	3	坡上	5.42	7.50	18.67	3.45	0.34
		坡中	4.71	6.40	11.42	2.42	0.44
		坡下	5.01	6.80	11.55	2.30	0.32
12 L/min	1	坡上	3.99	11.50	16.91	4.24	0.37
		坡中	1.78	3.20	14.66	8.24	0.44
		坡下	3.14	5.50	12.91	4.11	0.40
	2	坡上	6.59	18.00	17.06	2.59	0.42
		坡中	3.88	4.20	14.28	3.68	0.45
		坡下	5.17	8.50	13.97	2.70	0.39
	3	坡上	8.20	21.00	23.83	2.91	0.37
		坡中	5.80	9.70	15.67	2.70	0.47
		坡下	7.70	9.80	14.46	1.88	0.40
16 L/min	1	坡上	2.76	7.20	19.42	7.04	0.53
		坡中	2.47	5.80	14.33	5.80	0.58
		坡下	1.14	3.40	15.33	13.45	0.65
	2	坡上	7.35	11.40	19.67	2.68	0.51
		坡中	8.04	11.10	15.28	1.90	0.54
		坡下	6.05	10.70	14.71	2.43	0.59
	3	坡上	8.48	11.60	21.47	2.53	0.57
		坡中	12.90	15.30	15.87	1.23	0.40
		坡下	11.26	17.20	15.63	1.39	0.41

3 讨论

相同放水流量下,产流时间是坡面综合效应的反映,主要取决于土壤初始含水率^[9]。连续径流冲刷一方面由于冲刷间隔使表层土壤形成结皮阻碍入渗^[10];另一方面,前期来水增加了坡面土壤初始含水量,重塑了第 2,3 场坡面入渗环境进而影响产流历时。本研究表明第 1 场冲刷 T_1 显著大于后两场,后两场冲刷 T_2 间差异较小,这与吕佼容^[11]在连续降雨研究的产流时间得出的结论一致。与从坡面产流机制来看,产流主要取决于土壤本身的入渗条件^[12],入渗过程主要受土壤初始含水率和土壤容重的影响^[13]。一方面,前期冲刷增大了土壤深层含水量,从

而限缩了径流可入渗空间。另一方面,前期塑造了坡面侵蚀形态,使第 2,3 场冲刷径流按照原先的沟壑继续进行下切侵蚀,部分坡段下切至犁底层,容重增大孔隙度降低,也使得入渗空间减少,加强了第 2,3 场冲刷径流作用,加上间歇期形成的物理结皮可阻碍水分入渗,促进坡面产流,从而使得产流率在后期冲刷时呈现小幅增大后波动增大的趋势。

本研究发现,平均径流率与坡度之间无显著差异,这与康宏亮等^[14]人研究冲刷条件下黄土丘陵区浅沟形态中的产流结果一致。而平均产流率与冲刷场次显著相关,产流率随冲刷场次的增加而增加,这与吕佼容^[11]研究降雨条件下不同砾石含量平均产流率的结果不同,这可能是由于径流冲刷与降雨的产流特征不同引起的。初期产流率快速增加导致剥蚀率的快速上升。第 1 场径流冲刷平均剥蚀率较第 2 场、第 3 场大。第 2 场和第 3 场冲刷土壤剥蚀率相对减小,这是因为第 1 场冲刷期间,坡面表层松散物质丰富,为径流冲刷提供了丰富的泥沙源,所以土壤剥蚀率在第 1 场较大,而 2,3 场坡面松散物质基本在第 1 场被冲走,径流开始剥蚀相对密实的土壤^[15],本研究表明:连续径流冲刷条件下随场次的增加剥蚀率波动性减小。这与连续降雨条件下坡面产沙规律^[16]大有不同,这是由于前期上方来水冲刷坡面,带走表层大量松散物质,塑造了下垫面形态特征,使得后期上方来水径流流路顺延原先的沟壑继续进行下切侵蚀,径流下切深度增大,在部分坡段下切至犁底层,其土壤容重增大,孔隙率减小,从而导致下切速率降低,而引起产沙不断减少。而如果后期冲刷时径流剧烈紊动发生股流改道合并,形成了新的流路,没有按照原先的细沟流发育,削弱了第 1 场冲刷塑造地形的影响,便在 2,3 场出现产沙量的急剧增加和波动。

流速沿坡面向下方向并非呈直线关系增大或减小,而是表现出明显波动性,这与夏卫生等^[17]和田培等^[18]分别在放水冲刷和模拟降雨条件下观测到流速沿坡面向下表现出的变化规律相同。就同一坡段而言,径流流速随流量增加变化较为复杂,规律性不明显,这与速欢^[19]的研究一致。总体来说,随着冲刷场次的增加,坡面流速发展规律趋于复杂,这可能是由于前期冲刷重塑了堆积体坡面特征,使得伴随流量和冲刷场次的增加,前期侵蚀造成的坡面下垫面特征分异显著。同时,水流速度越大,对土壤的剥蚀能力越强,产沙率增高的同时消耗了径流泥沙动能,抑制了坡面流速。流量越大,坡段越向下,流速特征越复杂,这是由于在坡面上部仅存在冲刷作用,而随着流量和坡段向下,每一坡段的流速受到不同程度上方淤积作

用的叠加影响,存在不同程度的淤积作用阻碍流速增加。总体来说,流速随冲刷流量的增大而增加,波动性也增强。这与大多学者^[15,20-21]对堆积体坡面侵蚀的研究结论相同。本研究表明,相同流量下,第2,3场冲刷坡面不同坡段的流速规律受前期侵蚀形态的影响,连续冲刷条件下不同场次间各坡段流速变化趋势于具有一致性。这说明坡面前期来水所塑造的沿程侵蚀形态特征对坡面流速有直接影响。

4 结论

(1) 各阶段产流特征为:第3场>第2场>第1场,其中,第3场径流量增速大于第2场,对比第1场平均增速分别为40.5%和33.4%。冲刷场次对平均产流率有显著影响($p < 0.05$)。

(2) 第1场冲刷土壤剥蚀率大于第2,3场,剥蚀率最大可达第2,3场的1.49,2.16倍。产沙量随冲刷流量的增加而增加,从8 L/min至12 L/min到16 L/min增幅分别为20.58%~204.88%,12.5%~154.53%。随冲刷场次的增加而减少,各阶段产沙量为:第1场>第2场>第3场,各场次产沙量所占比例分别为31.74%~53.46%,29.03%~43.71%、17.42%~29.04%。第2场、第3场分别减少—37.7%~45.5%和21.9%~67.4%。

(3) 在任意流量段,平均流速与沟宽的变化无明显规律,沿径流方向流速与沟深变化一致,当冲刷流量为8和12 L/min时,沿径流方向流速与沟深变化一致,均表现为:坡上>坡下>坡中。当流量为16 L/min时,沿径流方向流速与沟深变化仍一致,表现为:坡中>坡下>坡上。这说明流速与坡段上沟深的沿程发展变化有关,而与具体坡段无关。

[参 考 文 献]

- [1] 赵满,王文龙,郭明明,等.不同砾石含量壤土堆积体坡面侵蚀特征研究[J].土壤学报,2020,57(5):1166-1176.
- [2] 牛耀彬,高照良,李永红,等.工程堆积体坡面细沟形态发育及其与产流产沙量的关系[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(19):154-161.
- [3] 戎玉博,骆汉,谢永生,等.雨强对工程堆积体侵蚀规律和细沟发育的影响[J].泥沙研究,2016(6):12-18.
- [4] Zhang Letao, Gao Zhaoliang, Yang Shiwei, et al. Dynamic processes of soil erosion by runoff on engineered landforms derived from expressway construction: A case study of typical steep spoil heap [J]. Catena, 2015, 128:108-121.
- [5] Nearing M A, Polyakov V O, Nichols M H, et al. Slope-velocity equilibrium and evolution of surface roughness on a stony hillslope [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(6):3221-3229.
- [6] Lü Jiaorong, Xie Yongsheng, Luo Han. Erosion process and temporal variations in the soil surface roughness of spoil heaps under multi-day rainfall simulation [J]. Remote Sensing, 2020, 12(14):2192.
- [7] Lou Yongcai, Gao Zhaoliang, Sun Guanfang, et al. Runoff scouring experimental study of rill erosion of spoil tips[J]. CATENA, 2022, 214:106249.
- [8] 陈杰,刘文兆,王文龙,等.长武黄土高原沟壑区降水及侵蚀性降雨特征[J].中国水土保持科学,2009,7(1):27-31.
- [9] 毛天旭,朱元骏,邵明安,等.模拟降雨条件下含砾石土壤的坡面产流和入渗特征[J].土壤通报,2011,42(5):1214-1218.
- [10] 程琴娟,蔡强国,李家永.表土结皮发育过程及其侵蚀响应研究进展[J].地理科学进展,2005,24(4):114-122.
- [11] 吕佼容,张文博,胡锦昇,等.连续降雨下不同砾石含量工程堆积体土壤侵蚀[J].水科学进展,2019,30(2):210-219.
- [12] 和继军,宫辉力,李小娟,等.细沟形成对坡面产流产沙过程的影响[J].水科学进展,2014,25(1):90-97.
- [13] 余魏兢.坡面降雨入渗产流模拟模型及影响因素分析[D].湖北武汉:长江科学院,2020.
- [14] 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.
- [15] 牛耀彬.黄土工程堆积体坡面细沟发育过程与侵蚀产沙[D].北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2016.
- [16] 何育聪,郑浩杰,韩剑桥.间歇性与连续性降雨对黄土坡面细沟侵蚀影响的比较[J].水土保持学报,2020, 34(6):8-13.
- [17] 夏卫生,雷廷武,张晴雯,等.冲刷条件下坡面水流速度与产沙关系研究[J].土壤学报,2004,41(6):876-880.
- [18] 田培,潘成忠,许新宜,等.坡面流速及侵蚀产沙空间变异性试验[J].水科学进展,2015,26(2):178-186.
- [19] 速欢,王文龙,康宏亮,等.露天矿排土场平台一边坡系统侵蚀形态及径流产沙特征[J].应用生态学报,2020, 31(9):3194-3206.
- [20] 赵满,王文龙,郭明明,等.含砾石风沙土堆积体坡面径流产沙特征[J].土壤学报,2019,56(4):847-859.
- [21] 史倩华,王文龙,郭明明,等.模拟降雨条件下含砾石红壤工程堆积体产流产沙过程[J].应用生态学报,2015, 26(9):2673-2680.