

干旱河谷区草坡防火工程对坡面径流侵蚀的影响

张泽洪^{1,2}, 贾立志³, 余建平⁴, 陈小南⁴

(1.西华师范大学地理科学学院,四川 南充 637000;

2.四川省干旱河谷土壤侵蚀监测与控制工程实验室,四川 南充 637000;3. 中国科学院地理科学与资源研究所,生态系统网络观测与模拟重点实验室,拉萨高原生态系统研究站,北京 100101;4.钱江源国家公园管理局,浙江 开化 324300)

摘要:为探究干旱河谷区草坡防火工程对坡面径流侵蚀的影响,以四川省凉山州的 3 个 27.5°的草地坡面为研究对象,进行流量分别为 6,9,12 L/min 的模拟冲刷试验。3 个坡面的处理为:(1)移除植被地上地下部分,平整坡面代表草坡防火通道;(2)移除植被地上部分代表草坡防火隔离带;(3)未进行处理作为对照。通过收集坡面出口的产流量和产沙量,研究不同的防火工程在不同的放水冲刷流量下分别对坡面径流侵蚀的影响。结果表明:(1)草坡由于修建防火通道导致坡面土质松散,水分入渗量增加,初始产流时间表现为草坡防火通道(20.33 min)>对照坡面(7.62 min)>草坡防火隔离带(5.22 min);(2)3 个流量下的累计产流量和累计产沙量均表现为草坡防火通道>草坡防火隔离带>对照坡面,并且随着放水流量的增加 3 个坡面之间的差异显著增加,表明草坡防火工程的修建加剧陡坡水蚀;(3)对照坡面的产流量和产沙量之间呈线性关系,而草坡防火通道坡面的产流量与产沙量之间的关系呈指数、对数或线性关系,草坡防火隔离带坡面的产流量和产沙量之间呈对数或线性关系,表明草坡防火工程的修建改变水沙之间原有的线性关系。因此,草坡防火工程建设后要特别重视坡面的水土流失问题,研究结果可为干旱河谷区草坡防火工程对水土流失影响及防治措施的实施提供科学参考。

关键词: 干旱河谷区; 防火工程; 产流; 产沙; 草坡

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2023)01-0037-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.01.006

Effects of Grassy Slope Fire Prevention Project on Runoff and Sediment Yield in Arid Valleys Area

ZHANG Zehong^{1,2}, JIA Lizhi³, YU Jianping⁴, CHEN Xiaonan⁴

(1.School of Geographical Science, China West Normal University, Nanchong,

Sichuan 637000; 2.Sichuan Engineering Laboratory of Monitoring and Control for Soil

Erosion in Dry Valleys, Nanchong, Sichuan 637000; 3.Lhasa Plateau Ecosystem Research Station, Key

Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural

Resources Research, CAS, Beijing 100101; 4.Qianjiangyuan National Park Administration, Kaihua, Zhejiang 324300)

Abstract: To explore the impact of grassy slope fire prevention project on runoff and sediment yield on grassy slope in arid valleys area, a series of sourcing experiments were conducted in three steep slopes of 27.5° in Liangshan Prefecture of Sichuan Province. The flow rates of sourcing experiments were 6, 9 and 12 L/min, respectively. The three slopes were treated as follows: (1) Remove vegetation and level the slope to represent the grassy slope fire passage; (2) Remove the aboveground part of the vegetation to represent the grassy slope fire isolation zone; (3) No treatment as a control. The effects of different grassy slope fire prevention project on water erosion under different scouring flow rates were studied by collecting the runoff and sediment at the slope outlet, respectively. The results showed that: (1) Due to the loose soil on the slope and the increase of water infiltration during the construction of the grassy slope fire prevention project, the initial runoff time of the grassy slope fire passage (20.33 min) was larger than that of the control slope (7.62 min) and the grassy slope fire isolation zone (5.22 min). (2) The order of the cumulative runoff and cumulative sediment yield under the three flow rates were as follow: grassy slope fire passage > grassy slope fire

收稿日期:2022-05-24

资助项目:西华师范大学博士科研启动项目(2017E043);国家自然科学基金项目(41807075)

第一作者:张泽洪(1978—),男,博士,副教授,主要从事农业生态与土壤质量研究。E-mail:zhangzehong2001@126.com

通信作者:贾立志(1988—),男,博士,助理研究员,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:jializhi@igsnr.ac.cn

isolation zone > control slope. Moreover, the difference between the three slopes increased significantly with the increase of the flow rates. The construction of grassy slope fire prevention project had aggravated the water erosion on the steep slope. (3) There were linear relationships between the runoff and sediment yield on the control slope, while the relationships between the runoff and sediment yield were exponential, logarithmic, or linear for the grassy slope fire passage. The relationships between the runoff and sediment yield for the grassy slope fire isolation zone were logarithmic or linear. The construction of the grass slope fire prevention project has changed the original linear relationships between runoff and sediment yield. Therefore, more attention should be paid on soil erosion after the construction of grassy slope fire prevention project on steep slopes. This research can provide scientific reference for the impact of grassy slope fire prevention project on soil erosion in arid valleys and the implementation of preventive measures on steep slopes.

Keywords: arid valleys area; fire prevention project; runoff yield; sediment yield; grassy slope

土壤是人类赖以生存的物质基础,可以为人类提供生活所必需的食物、纤维、燃料等^[1-3]。一直以来,土壤侵蚀被认为是全世界土地资源最严重的威胁之一。已有研究^[4]证实,严重的水土流失不仅导致土壤生产力下降、土地退化、水资源污染和河流淤积,还对农业生态系统的生产能力和可持续性造成严重威胁。根据水利部公布的水土流失动态监测数据^[5]显示,2021 年度全国水土流失面积 267.42 万 km²,约占国土面积的 27.96%。虽然与 20 世纪 80 年代相比较,水土流失面积减少 99.61 万 km²,但是水土流失问题依然是我国重要的环境问题,并且已经严重威胁到区域生态安全以及社会经济的可持续发展。

西南干旱河谷区冬春季节气候干旱、降雨稀少,风大,森林覆盖率高达 45.5%,主要树种为云南松,油脂含量高,极易引发森林火灾且难以扑灭^[6]。自新中国成立以来,凉山州发生森林火灾 5 000 余次,2019 年凉山州木里发生森林大火,31 人遇难,2020 年 3 月西昌市森林火灾致 19 人遇难^[7]。为了遏制森林火灾造成的生命财产损失和生态环境恶化影响,建设防火工程(防火通道和防火隔离带)成为有效控制火灾蔓延和发生最有效的手段之一。目前四川凉山州已建成防火隔离带 3 846 km,防火通道 2 419 km,为凉山州森林防火作出重要贡献。防火通道是在坡面上修建的可供人、车辆通行的道路,是森林防火的基础设施之一,在防火中发挥着至关重要的作用。修建防火通道不仅能够提高森林火灾扑救能力,还能够有效改善林区的交通状况。防火隔离带是为了火灾扩大和蔓延,在森林或者草地之间设置的空旷地带,主要是将植被的地上部分移除,从而形成隔离带。防火隔离带的宽度根据不同的植被类型有所差异,乔灌木林地一般设置为 60 m,而草坡一般设置为 10 m。

修建防火工程的建设规模大,工期长,对原有土壤表层及植被群落造成破坏^[8]。防火通道在修建好之后边坡土壤贫瘠、土层松散,富含土石碎屑,无植被覆盖,

一次降雨过程极易出现片蚀、细沟侵蚀到冲沟侵蚀不断加剧的水土流失过程。尤其是在陡坡情况下,严重的水土流失还会引发滑坡、泥石流等地质灾害^[9]。防火隔离带修建好之后,由于缺少地上植被部分的保护,降雨会直接打击地表,造成雨滴击溅侵蚀,从而加剧坡面的水土流失^[10]。目前,关于西南干旱河谷区修建的草坡防火通道与防火隔离带对坡面水蚀的研究还较少。基于此,本研究重点针对在草坡上修建的防火工程(草坡防火通道和防火隔离带)进行不同流量冲刷试验,研究其对坡面产流以及产沙的影响,可为防火工程建设的植被防护措施采取提供技术支撑。

1 试验与方法

1.1 试验区概况

研究区位于四川省凉山州喜德县李子乡(28°02′05″N, 102°12′35″E),属于深切河谷低山丘陵地貌,平均海拔 1 723 m。该区域地处低纬度高海拔中亚热带季风气候,年平均气温 17 ℃,最高气温 36.5 ℃,最低气温 -3.8 ℃,日温差大,无明显四季差别。多年平均降水量 1 006 mm,年均蒸发量 1 945 mm,蒸发量远大于降水量,降雨主要集中在 5—10 月,约占全年总降水量的 90%以上。研究区位于金沙江下游,安宁河谷以东地区,境内地形以中高山地为主,河谷平坝仅占全境面积的 3.82%。研究区内的植被类型以稀疏灌木草丛带、常绿阔叶林带、针阔混交林带为主、试验区主要是稀疏灌木草丛,高大乔木林少见。

1.2 试验设计

试验于 2019 年 8 月在凉山州喜德县李子乡洛乃格村进行,选择相邻的 3 个典型草地陡坡坡面,进行模拟冲刷试验,坡度均为 27.5°。植被以菊科秋英属大波斯菊(*Cosmos bipinnata* Cav.)、狗牙根(*Cynodon dactylon* (L.) Pers.)和狼尾草(*Pennisetum alopecuroides* (L.) Spreng.)为主,植被盖度超过 90%。3 个坡面的土壤类型都为黄棕壤,土层厚度较薄,土壤肥力较低,土壤机械组成、容重和水分含量差异较小(表 1)。3 个坡面的处理为:(1)

草坡防火通道;(2)草坡防火隔离带;(3)对照。其中 1 号坡面选择将草坡植被的地上和地下部分都移除,并且经过简单平整调整后形成所需要的坡度,没有采取任何的防护措施,坡面松散,极易造成水土流失。2 号坡面运用

剪刀剪除植被地上部分,保留地下部分,代表为了防火而剪除植被地上部分而形成的草坡防火隔离带。由于大多数草坡防火工程主要分布在山脚位置,因此 3 号坡面为无任何处理的草坡作为对照(表 2)。

表 1 不同处理坡面的基本信息

坡面 编号	坡度/ (°)	海拔/m	容重/ (kg·m ⁻³)	土壤 含水量/%	土壤机械组成/%		
					砂粒 (2~0.02 mm)	粉粒 (0.02~0.002 mm)	黏粒 (< 0.002 mm)
1	27.5	1700	1.43	21.03	21.67	48.18	30.15
2	27.5	1700	1.45	22.37	25.36	47.71	26.93
3	27.5	1700	1.47	22.85	24.11	47.05	28.84

表 2 不同坡面处理方式

坡面 编号	防火工程类型	处理方式
1	草坡防火通道	移除植被地上和地下部分,并平整坡面
2	草坡防火隔离带	沿地面剪除植物地上部分,保留地下部分
3	对照	山脚位置选择草坡,无任何处理

注:试验期间坡面未发现枯枝落叶层。

试验坡面长 6 m、宽 2 m,坡度为 27.5°,在试验坡面顶部附近建立储水池,储水池连接供水软管放水,在软管末端安装定水头以控制流量。在坡面顶部设置水平溢流槽,采用 PVC 工程塑料制成,防止水流下渗。溢流槽出水口铺设长 2.0 m、宽 10 cm 塑料薄膜以缓冲水流,并使水流均匀溢出,以保证上方冲刷水流均匀、平稳,并以薄层水流形式进入坡面,以模拟自然坡面上方汇水对坡面侵蚀产沙过程的影响。坡底设置倒三角形集水槽,用以收集坡面产流产沙(图 1)。

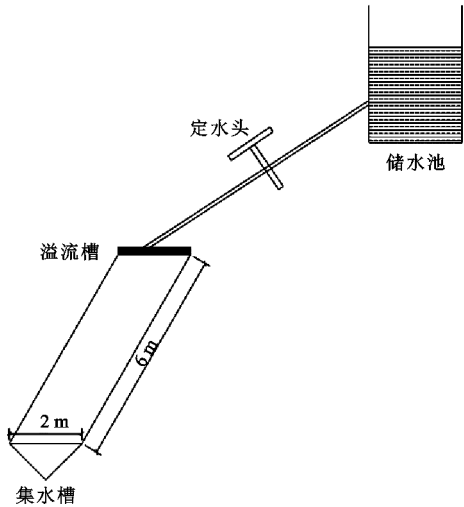


图 1 边坡冲刷试验坡面示意

试验设计流量为 6,9,12 L/min,每次冲刷试验前多次测定出水端流量,直到出水流量稳定并到达所需流量,误差不超过 5%。不同流量的冲刷试验间隔数天,以保持坡面含水量基本一致。试验开始前使用 TRIME—HD 手持式 TDR 土壤水分测量仪测定土壤含水量,保证土壤含水量在 20%~25%。每次冲刷试验开始后,记录坡面集水口产流时间,之后每间隔 2 min 收集

1 次水沙样。水沙样沉淀分离后,泥沙样品经 105 ℃ 恒温烘箱中烘干后称重,采样时间持续 25 min。

1.3 数据分析

利用 SPSS 10.1 软件中的相关分析、方差分析、回归分析、配对样本 T 检验等模块检验不同类型坡面产流率、产沙率差异显著性,利用 Sigmaplot 14.0 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 初始产流时间

受坡面表层土壤的蓄水能力、坡面粗糙度等因素影响,3 种不同的处理方式在 3 种流量下的产流时间存在明显差异(表 3)。按产流时间平均值排序为草坡防火通道(20.33 min)>对照坡面(7.62 min)>草坡防火隔离带(5.22 min),草坡防火通道坡面平均开始产流时间分别为对照坡面和草坡防火隔离带坡面的 2.67,3.90 倍,对照坡面略大于草坡防火隔离带,表明边坡植被覆盖对径流流速的减缓作用明显。对草坡防火通道而言,随着流量从 6 L/min 增大到 12 L/min,其开始产流时间从 35.00 min 减小到 8.40 min,表明草坡防火通道坡面随上方来水量增加,产流时间降低显著。而对照坡面在 3 个流量下平均开始产流时间是草坡防火隔离带的 1.5 倍。随流量增大,草坡防火隔离带和对照坡面产流时间差异较小,表明植被地上部分剔除对坡面产流时间有一定影响,上方来水增大对产流时间影响不大。

表 3 不同处理坡面的产流时间 单位:min

防火工程 类型	6 L/min	9 L/min	12 L/min	平均 时间
草坡防火通道	35.00	17.60	8.40	20.33
草坡防火隔离带	4.40	6.25	5.00	5.22
对照	8.00	7.68	7.17	7.62

2.2 产流过程

由坡面不同处理与对照坡面的产流随冲刷历时的变化情况分析,草坡防火通道、草坡防火隔离带和对照坡面的产流速率随时间变化过程基本相似。在

3 个流量下,均随冲刷时间延长先急速上升,后趋于平稳或缓慢增加,后期阶段随时间呈缓慢增加趋势,并未达到饱和产流的稳定状态。在流量为 6 L/min 时(图 2a),对照坡面产流基本呈现缓慢平稳增大趋势,草坡防火隔离带产流在 0~10 min 时段,基本呈现平稳增加变化趋势,11 min 后呈急剧增大趋势加剧,试验后期基本稳定,草坡防火通道整个产流过程基本呈现快速增大趋势,但增大幅度比对照坡面更大。

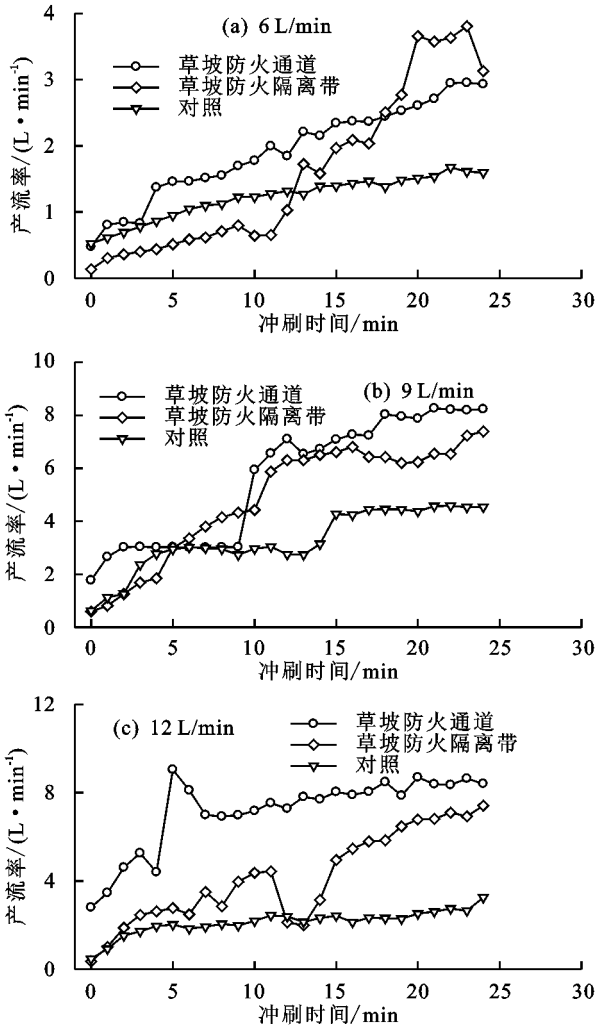


图 2 不同坡面处理在 3 种流量下的产流率随冲刷时间的变化

当流量为 9 L/min 时(图 2b),草坡防火通道坡面在 0~4 min 内急剧增大,4~9 min 产流基本稳定,9~10 min 急剧增大,10 min 之后表现缓慢增大的趋势。草坡防火隔离带产流率在 0~10 min 时段呈现急剧增大趋势,11 min 后突然增大到更大值,随后径流基本呈现缓慢增大趋势。而对照坡面产流在 0~5 min 时急剧增大,5~14 min 基本比较平稳,15 min 后增大到更大值,随后时间产流趋于稳定。

在流量为 12 L/min 时(图 2c),草坡防火通道坡面产流率 0~5 min 急剧增加,在第 5 min 达到峰值,5~7 min 急剧减小,7 min 之后呈现缓慢增加趋势。草坡防火隔离带地产流率整体上呈急剧增大趋势,仅

在 11~14 min 时段出现 1 个相对低的产流率。对照坡面产流率在 0~11 min 时段均急剧增大,11 min 后的产流基本呈现缓慢增加趋势。就产流过程变化来看,在所有流量下,草坡防火隔离带相比于对照坡面其产流率起伏变化均较大,随流量增加,草坡防火隔离带的产流率增加趋势更加剧烈。对草坡防火通道而言产流率变化剧烈,随流量增大,其增加幅度更加明显。表明随流量增大,草坡防火通道坡面产流过程变化更加剧烈,产流量增加幅度较大。

2.3 产沙过程

由不同坡面处理下的 3 种流量坡面产沙率随冲刷历时变化情况(图 3)可知,所有处理的产沙速率随冲刷历时的增加大致呈先增大后减小的趋势。

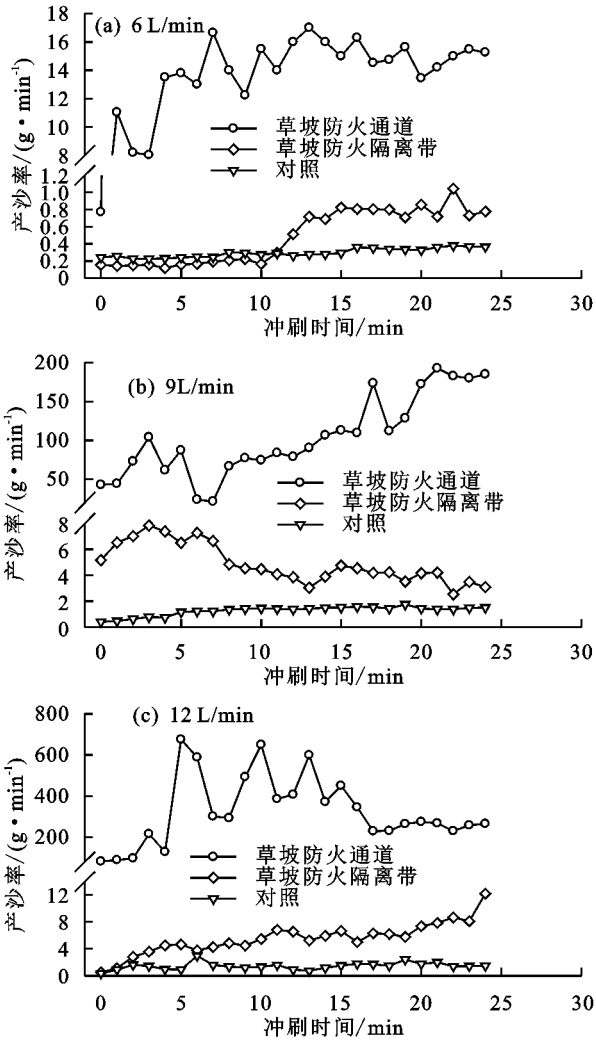


图 3 不同坡面处理在 3 种流量下的产沙率随冲刷时间的变化

草坡防火通道坡面在流量为 6 L/min 时(图 3a),产沙率开始时振荡增大,后期变化幅度较小。草坡防火隔离带产沙率在 0~10 min 时段产沙率较小,10~15 min 急剧增大,15 min 后基本趋于稳定。对照坡面在整个产流阶段均较稳定,无明显起伏变化。在流量为 9 L/min 时(图 3b),草坡防火通道坡面产沙率在 0~8 min 内呈现振荡变化趋势,且变化幅度较大。在第 7 min

到达 1 个低值,第 8 min 后基本呈现快速增大趋势,并在 21 min 达到峰值,随后趋于稳定。草坡防火隔离带坡面产沙率 0~4 min 急剧增大,4 min 后产沙率缓慢减小,并在 10 min 后趋于稳定趋势。对照坡面产沙率在 0~5 min 缓慢增大,随后基本趋于稳定。

当流量为 12 L/min 时(图 3c),草坡防火通道坡面产沙率在 0~4 min 缓慢增大趋势,第 4~5 min 产沙率急剧增大,并达峰值。在 5~15 min 出现剧烈振荡,起伏变化明显,15 min 后减小,17 min 后基本呈现稳定趋势,变化较小。草坡防火隔离带坡面产沙率整体呈缓慢增大趋势,而对照坡面产沙率则在整个产流过程中基本趋于稳定,增大幅度较小。从整个产沙过程来看,在流量低时,3 种处理坡面的产沙速率起伏变化较小,基本呈现缓慢增加趋势。随着流量增大,草坡防火通道的产沙速率变化幅度也增大,起伏变化最大,草坡防火隔离带次之,对照坡面变化幅度最小。

2.4 不同处理坡面产流产沙特征

2.4.1 产流特征 在相同流量下,不同处理坡面的累计产流量呈现草坡防火通道>草坡防火隔离带>对照坡面的特征(表 4)。同时 3 个坡面在 3 个流量下的累计产流量随流量变化保持一致,均随流量的增加而增大,累计流量最大为 12 L/min,6 L/min 的累计产流量

最小。具体而言,流量为 6 L/min,草坡防火通道累计产流量分别比草坡防火隔离带和对照坡面增加 8,17 L。而当流量增大到 9 L/min 时,草坡防火通道累计产流量分别比草坡防火隔离带和对照坡面增加 58,87 L。当流量增大到 12 L/min 时,草坡防火通道累计产流量分别比草坡防火隔离带和对照坡面增加 75,59 L。表明流量增大扩大不同处理坡面之间累计产流量的差异。3 种坡面处理的平均产流率也表现较大差异(表 5),3 个流量下,草坡防火通道平均产流率明显大于草坡防火隔离带和对照坡面($p<0.05$)。在 6 L/min 流量的草坡防火隔离带略大于对照坡面,但二者没有明显差异($p>0.05$)。流量为 9 L/min 时,草坡防火隔离带的产流率明显大于对照坡面($p<0.05$)。而当流量增大到 12 L/min 时,草坡防火隔离带的平均产流率略小于对照坡面,但二者没有明显差异($p>0.05$)。不同流量下不同处理的坡面呈现较大差异,3 种处理坡面平均产流率均随流量的增大而增大。除草坡防火隔离带在 6,9 L/min 时流量间不存在明显差异外,草坡防火通道、草坡防火隔离带、对照坡面的平均产流率在其他流量间均存在明显差异($p>0.05$)。3 种处理坡面,平均产流率整体为草坡防火通道最大,草坡防火隔离带次之,对照坡面最小,且随流量的增大而增大。

表 4 坡面不同处理累计产流产沙特征

放水流量/ (L·min ⁻¹)	累计产流量/L			累计产沙量/g		
	草坡防火通道	草坡防火隔离带	对照	草坡防火通道	草坡防火隔离带	对照
12	179	104	120	8184	139	42
9	140	82	53	2588	122	32
6	48	40	31	378	12	7

表 5 坡面不同处理侵蚀参数差异情况

放水流量/ (L·min ⁻¹)	产流率/(L·min ⁻¹)			产沙率/(g·min ⁻¹)		
	草坡防火通道	草坡防火隔离带	对照	草坡防火通道	草坡防火隔离带	对照
12	7.16±1.70Aa	4.14±2.10Ab	4.83±2.20Ab	354.18±149.45Aa	5.55±2.41Ab	1.44±0.53Ab
9	5.60±2.10Ba	3.27±1.160Bb	2.13±0.56Bc	103.52±51.91Ba	4.87±1.51Ab	1.26±0.36Ab
6	1.93±0.72Ca	1.59±1.24Bb	1.23±0.33Cb	13.57±3.50Ca	0.49±0.32Bb	0.30±0.06Bb

注:表中数据为平均±标准差;显著性检验采用 LSD 方法进行检验, $p<0.05$ 水平条件;同行不同小写字母表示相同流量下不同坡面处理间产流产沙率存在显著差异($p<0.05$);同列不同大写字母表示不同流量间的产流产沙率存在显著差异($p<0.05$)。

2.4.2 产沙特征 不同处理坡面累计产沙量表现出一定差异(表 4),草坡防火通道、草坡防火隔离带和对照坡面的累计产沙量均随流量从 6 L/min 增大到 12 L/min 时相应增大。流量为 6 L/min 时,草坡防火通道累计产沙量分别是草坡防火隔离带和对照坡面的 32,54 倍。当流量增大到 9 L/min 时,草坡防火通道累计产沙量分别是草坡防火隔离带和对照坡面的 21,81 倍。当流量增大到 12 L/min 时,草坡防火通道累计产沙量分别是草坡防火隔离带和对照坡面的 59,195 倍。在所有流量下,不同处理坡面的累计产沙量呈现草坡防火通道>草坡防火隔离带>对

照坡面的特征。同时,流量增大扩大不同处理坡面之间累计产沙量的差异。从 3 种处理坡面下不同流量的平均产沙率(表 5)看,草坡防火通道坡面 3 种流量下平均产沙率存在明显差异($p<0.05$),流量越大,产沙率越大。而草坡防火隔离带和对照坡面在 9,12 L/min 的平均产沙率明显大于 6,12 L/min 流量的平均产沙率,略大于 9 L/min,但二者没有明显差异($p>0.05$)。草坡防火通道在 3 种流量下的平均产沙率差异明显,而草坡防火隔离带和对照坡面随流量增大,流量间的平均产沙率差异缩小。相同流量下,草坡防火通道坡面的平均产沙率明显大于草坡防火隔

离带和对照坡面($p>0.05$),草坡防火隔离带略大于对照坡面,二者之间没有明显差异($p>0.05$)。草坡防火通道平均产沙率均明显大于草坡防火隔离带和对照坡面($p<0.05$)。草坡防火通道和草坡防火隔离带平均产沙率略大于对照坡面,但二者没有明显差异($p>0.05$)。因此,3 种处理坡面,平均产沙率表现为草坡防火通道明显大于草坡防火隔离带,草坡防火隔离带略大于对照坡面。

2.4.3 水沙关系 对照坡面的水沙关系,在 3 个流量下均可用线性关系进行表达,即初始产流阶段产沙较小,随产流增加产沙率呈线性增加,同时随着流量的增加,水沙关系之间的线性回归逐渐降低,表明在对照坡面流量的增加减弱水沙关系(图 4)。草坡防火通道坡面在 6 L/min 流量下的水沙关系可用对数函数进行拟合,表明产流初始阶段,产沙随产流增加而快速增大,随后

随产流增大产沙基本趋于稳定。当流量增大到 9 L/min 时,水沙关系可用指数函数来表达,表明初始阶段产流,产沙相对集中稳定,变化较小,随产流增大,产沙急剧增大。而流量增大到 12 L/min 时,水沙关系可用线性函数关系来表达,产沙率随着产流率的增加而呈线性增加趋势。表明草坡防火通道坡面产流增大,其产沙增大幅度明显。对草坡防火隔离带而言,当流量为 6 L/min 时,坡面水沙关系可以用对数函数来表示,表明产沙量是随着产流量逐渐增加并趋于稳定的状态。在流量为 9 L/min 时,两者关系不能用函数进行很好拟合,整体上产流稳定情况下产沙相对集中,产流量和产沙量之间关系趋于紊乱。在流量为 12 L/min 时,产流量和产沙量之间的关系可用线性关系来描述,表明草坡防火隔离带产沙随产流增加而呈线性增加,流量增大使得产沙增加幅度明显。

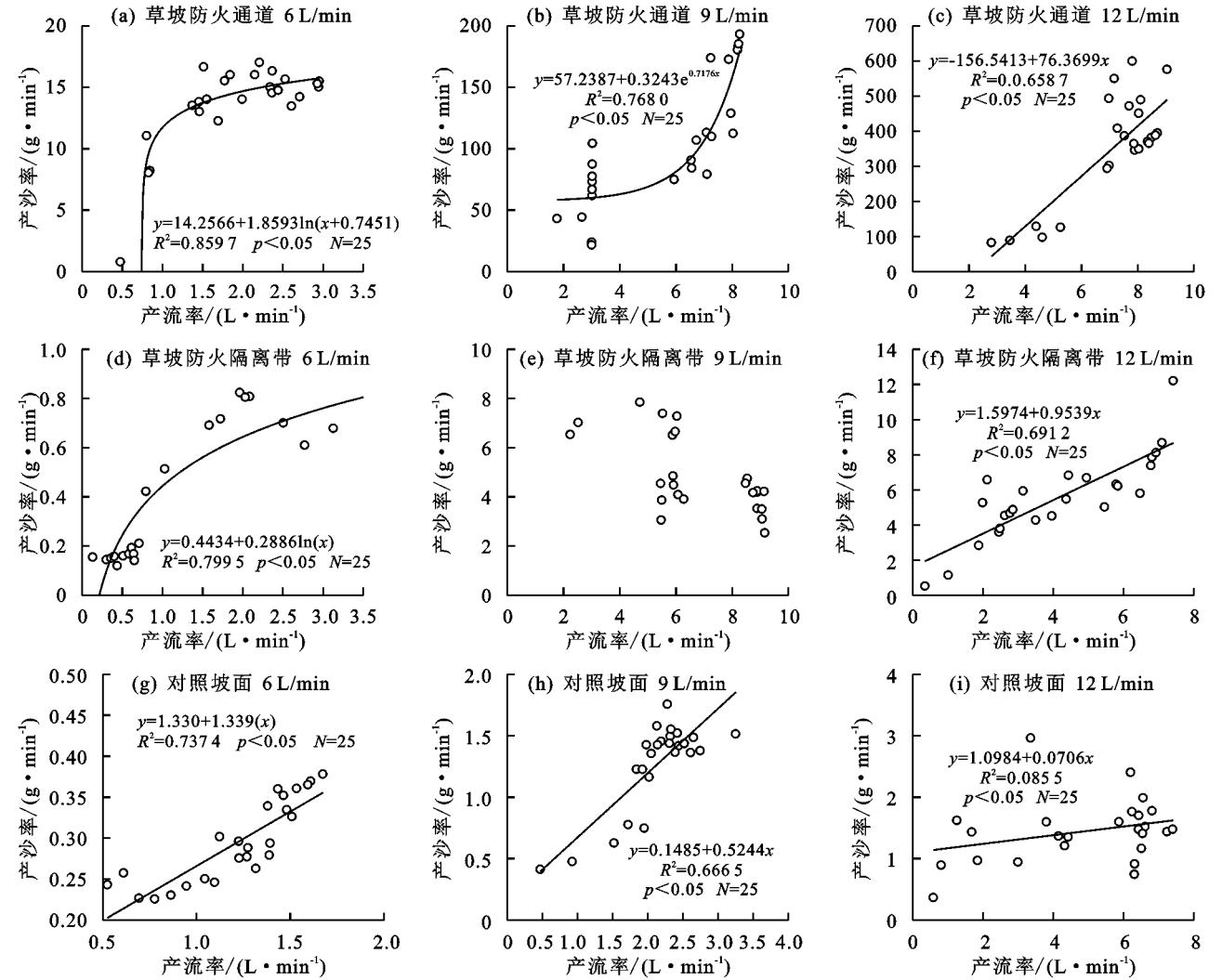


图 4 不同坡面处理不同流量的水沙关系

3 讨论

3.1 产流时间

草坡防火通道坡面开始产流时间比草坡防火隔离带和对照坡面分别延长 2.67,3.9 倍,其草坡防火隔离带

和对照坡面在各个流量下的产流时间差异较小。该结果与已有关于植被覆盖度与产流时间研究不同,已有研究^[11-14]表明,植被覆盖度越高,其开始产流时间越长。本研究得出这种结果的主要原因是开挖道路形成的坡

面土质松散,并富含砾石,坡面松散土壤各种孔隙大量存在使得坡面具有很好的水分入渗能力,坡面上方来水能很好地进行入渗,并随漫流区域扩大增加入渗,对坡面流速减缓作用明显,增加入渗量和入渗时间^[15-16]。这表明,草坡防火通道路面相比于草坡防火隔离带和对照坡面,对坡面径流流速具有显著的减缓作用。防火隔离带的产流时间比对照坡面略小,但并没有明显差异,在坡面上方来水过程中,决定其入渗能力主要在于其坡面土壤前期含水量及土壤孔隙度等物理性质^[17]。构建草坡防火隔离带通过移除植被地上部分,并带走地上枯落物,而枯落物具有增加地表糙度,改变径流路径,减缓径流流速,延长径流历时和增加土壤入渗作用^[18-19]。本研究中枯落物减少使得坡面径流停留时间缩短,进而缩短入渗时间和入渗量,因此,草坡防火隔离带的产流时间略小于对照坡面。尽管地表植被和枯落物的移除过程对地表土壤物理性质产生影响,但是两者近地表中土壤植被主要根系仍然大量保留,土质仍然紧实,其土壤理化特征并未产生根本改变^[20]。因此,坡面产流时间无较大差异,即构建防火隔离带对坡面产流时间影响较小。

3.2 产流效应

径流是坡面产沙的直接驱动力,坡面土壤侵蚀程度大小与坡面径流特征密切相关。3种不同处理坡面之间的累计产流量和平均产流速率关系相同,均呈现出草坡防火通道>草坡防火隔离带>对照坡面,并随流量的增大,差异增加。此结果也与已有研究^[21-22]结论一致,即植被覆盖增加增大其保水能力。主要原因是基于防火道路建设的工程开挖坡面形成砾石和土壤混杂,土体松散,孔隙度较大,利于坡面水分入渗,而一旦开始产流后,由于坡面上方来水很快形成超渗产流,产流过程中携带的泥沙颗粒很快堵塞土壤孔隙,不利于后续入渗。因此一旦坡面产流开始,其入渗明显减少,从而坡面产流量显著增加。另外,因试验坡面较陡,在模拟流量下,径流稳定时间较短,且在土壤表层水分饱和后水分几乎不会沿垂直土层方向扩散,且漫流区域变化不显著。陡坡径流迅速从漫流发展成稳定径流沟,水流从坡顶到坡底几乎没有损耗。由于植物茎和枯枝落叶对径流具有减缓作用,草坡防火隔离带构建对植被地上部分和枯落物的清除,使得坡面上方来水在坡面停留时间缩短,不利于坡面径流入渗^[23-24]。在坡面流过程中,超渗流持续扩展面积,漫流区扩展,其主要是剔除植被地上部分和枯落物后,土壤大面积裸露,阻挡物大量减少,致漫流区域扩大。植物根系对提高土壤入渗具有重要作用,土壤中植被根系保留并且剔除过程中引起根系松动,一定程度上增加入渗,减少坡面产流,但总体而言,坡面植被地上部分和枯

落物的剔除,在一定程度上降低其水土保持作用^[25-26]。

3.3 产沙效应

从累计产沙量和平均输沙率看,各流量下草坡防火通道坡面产沙量均明显大于草坡防火隔离带和对照坡面,此结论与已有不同植被覆盖度的试验研究^[20,27]一致,植被覆盖度增加减小土壤侵蚀量。试验中发现,草坡防火通道坡面上部径流汇集后迅速向下运动,产生侵蚀沟,由于径流沟形成较快,其对土壤表层的下切应力较强,溯源侵蚀和冲沟侵蚀强烈,相应地产沙量显著高于其他处理坡面,且随着土层的崩塌数值大小呈现出上下剧烈波动的态势,在试验时间内未能达到稳定。草坡防火通道的累计产沙量(378~8 184 g)远大于草坡防火隔离带(2~139 g)和对照坡面(7~42 g)的累计产沙量,而草坡防火隔离带的累计产沙量仅是对照坡面的1.7~3.8倍。这表明,草坡防火通道的开挖与草坡防火隔离带的修建都显著增加坡面产沙,而草坡防火通道对坡面产沙量的影响大于草坡防火隔离带。

3.4 水沙关系

草坡防火通道坡面产沙随产流增大而增加幅度剧烈,草坡防火隔离带坡面产沙随产流基本呈线性增加趋势,草坡防火通道和草坡防火隔离带的产沙随放水量增大而变化幅度增大。而对照坡面增加产沙随产流增加平缓而稳定,产沙随流量增大变化不明显。显然,开挖防火道路形成的松散边坡因植被地上部分和根系完全移除,而根系多少与产沙率存在密切关联,土壤松散,产流产沙显著,坡面流量越大,其产生的土壤侵蚀越严重^[25]。而草坡防火隔离带构建的坡面输沙率与植被完好坡面差异不显著,主要是由于草坡防火隔离带构建使得植被地上部分被剔除,根系得以保留,土壤仍然紧实,植被根系对土壤有加筋/锚固效应^[28],能够有效增强土壤的抗侵蚀能力^[29],减少土壤流失,具有显著的固土减沙作用。因此,草坡防火通道建设形成的松散边坡产流产沙是草坡防火工程产生土壤侵蚀的主要原因,而草坡防火隔离带对坡面产沙贡献不明显。

4 结论

(1)草坡防火通道建设导致的松散土质增加径流入渗,延缓坡面产流时间,而草坡防火隔离带剔除植被地上部分,缩短坡面产流时间。

(2)草坡防火通道与防火隔离带的坡面累计产流量和累计产沙量都显著高于对照坡面,同时放水流量的增加加剧这种差异,表明草坡防火工程的建设加剧坡面径流侵蚀。

(3)草坡防火工程改变原有坡面的线性水沙关系,使坡面的水沙关系变为指数关系或者对数关系,表明草坡防火工程使得坡面水沙关系趋于紊乱。

综上,在干旱河谷区修建草坡防火工程需注意坡

面产生的水土流失问题,尤其是草坡防火通道,由于没有植被的保护作用,土壤松散,是坡面侵蚀产沙的主要来源,也是草坡防火工程水土流失预防的重点区域。因此,在森林防火通道建设工程开展后应及时对形成的松散坡面采取一些水土保持工程措施,比如道路硬化措施,在防火通道下缘修建拦水沟埂、稳定斜坡下部的挡土墙以及修建排水蓄水措施等。

参考文献:

- [1] Montanarella L. Agricultural policy: Govern our soils[J]. *Nature*, 2015, 528(7580): 32-33.
- [2] 史志华,刘前进,张含玉,等.近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2020, 57(5): 1117-1127.
- [3] Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): e2013.
- [4] Quijano L, Van Oost K, Nadeu E, et al. Modelling the effect of land management changes on soil organic carbon stocks in a Mediterranean cultivated field[J]. *Land Degradation and Development*, 2017, 28(2): 515-523.
- [5] 中华人民共和国水利部. 2021 年全国水土流失动态监测显示我国水土流失状况持续向好 生态文明建设成效斐然 [EB/OL]. (2022-06-27) [2022-03-30]. http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202206/t20220627_1581897.html.
- [6] 杨兆平,常禹.我国西南主要干旱河谷生态及其研究进展[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(4): 90-93, 99.
- [7] 白夜,王博,武英达,等.凉山州森林火灾形成的火环境研究[J]. *林业资源管理*, 2020(5): 116-112, 130.
- [8] 孙科辉,肖金香,冯敏玉,等.江西森林火灾与火险天气分析及综合预防技术措施[J]. *江西农业大学学报*, 2004, 26(3): 394-398.
- [9] Sidle R C, Ziegler A D. The dilemma of mountain roads [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(7): 437-438.
- [10] Fernández-Raga M, Palencia C, Keesstra S, et al. Splash erosion: A review with unanswered questions[J]. *Earth-Science Review*, 2017, 171: 463-477.
- [11] 常松涛,黄少燕,查轩,等.雨强和植被覆盖度对红壤坡面产流产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(3): 58-63.
- [12] Neris M, Tejedor M, Rodríguez J. Effect of forest floor characteristics on water repellency, infiltration, runoff, and soil loss in Andisols of Tenerife (Canary Islands, Spain)[J]. *Catena*, 2013, 108: 50-57.
- [13] Zhang G H, Tang K M, Ren Z P, et al. Impact of grass root mass density on soil detachment capacity by concentrated flow on steep slopes[J]. *Transactions of the ASAE*, 2013, 56(3): 927-934.
- [14] Gu C J, Mu X M, Gao P, et al. Distinguishing the effects of vegetation restoration on runoff and sediment generation on simulated rainfall on the hillslopes of the loess plateau of China[J]. *Plant and Soil*, 2020, 447(4): 1-20.
- [15] 郭梅,姜仁安.边坡防护室内水力冲刷模拟试验及降雨入渗分析[J]. *辽宁省交通高等专科学校学报*, 2008, 10(1): 16-18.
- [16] 闫斌,郭成久,果海威.关于边坡防护形式对降雨入渗影响的试验研究[J]. *水土保持科技情报*, 2004(3): 17-18.
- [17] 淡晨希,张琼,刘畅,等.生物结皮与草本植物共生坡面的产流—入渗过程特征[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(7): 1853-1860.
- [18] 李学斌,陈林,张硕新,等.围封条件下荒漠草原 4 种典型植物群落枯落物枯落量及其蓄积动态[J]. *生态学报*, 2012, 32(20): 6575-6583.
- [19] 杨寒月,张光辉,张宝军.黄土丘陵区沟坡典型植物群落枯落物蓄积量及其持水性能[J]. *中国水土保持科学*, 2019, 17(3): 83-90.
- [20] Zhou Z C, Gan Z T, Shanguan Z P, et al. Effects of grazing on soil physical properties and soil erodibility in semiarid grassland of the Northern Loess Plateau (China)[J]. *Catena*, 2010, 82(2): 87-91.
- [21] Zhao X N, Chen X L, Huang J, et al. Effects of vegetation cover of natural grassland on runoff and sediment yield in loess hilly region of China[J]. *Journal of Food and Agriculture*, 2014, 94: 497-503.
- [22] Pan C Z, Shanguan Z P, Lei T W. Influences of grass and moss on runoff and sediment yield on sloped loess surfaces under simulated rainfall [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 20(18): 3815-3824.
- [23] Li X, Niu J Z, Xie B Y. The effect of leaf litter cover on surface runoff and soil erosion in Northern China [J]. *PLoS One*, 2014, 9(9): 1-15.
- [24] 张祯尧,孙佳美,余新晓,等.栓皮栎林下枯落物减流减沙效应研究[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 55-58.
- [25] Wang B, Zhang G H, Yang Y F, et al. Response of soil detachment capacity to plant root and soil properties in typical grasslands on the Loess Plateau[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 266: 68-75.
- [26] Nagase A, Dunnett N. Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plant species, diversity and plant structure[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 104: 356-363.
- [27] Tang C J, Liu Y, Li Z W, et al. Effectiveness of vegetation cover pattern on regulating soil erosion and runoff generation in red soil environment, southern China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 1-9.
- [28] 陆桂红,杨顺,王钧,等.植物根系固土力学机理的研究进展[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(2): 152-156.
- [29] Wang J F, Yang Y F, Wang B, et al. Soil detachment caused by flowing water erosion in six typical herbaceous plant root systems on the Loess Plateau, China [J]. *Biosystems Engineering*, 2022, 217: 56-67.