

林火前后坡面覆盖类型对产流产沙影响的模拟试验

王冠, 吴文清, 刘明明, 黄柔

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 通过室内模拟降雨试验, 设置3种降雨强度(30, 60, 90 mm/h)和3种地表覆盖类型(裸土坡面、1 cm 马尾松枯落物覆盖、1 cm 马尾松灰烬覆盖), 研究林火发生前后不同地表覆盖下的坡面产流产沙过程, 明确枯落物和植物灰烬覆盖的减流减沙效益。结果表明: (1) 相比裸坡, 枯落物和灰烬覆盖下的坡面初始产流时间分别延长33%~80%和51%~200%, 灰烬覆盖对延缓产流的效果更为明显; (2) 相比裸坡, 枯落物覆盖的减流效果稳定在12%~36%, 而灰烬覆盖在中小雨强的减流效果高于70%, 在90 mm/h雨强时减流效果降低至7%; (3) 裸土坡面产流呈现先快速升高后稳定的趋势, 而枯落物和灰烬覆盖坡面产流效果呈现“阶梯”形上升趋势; (4) 枯落物覆盖能够减小径流携沙量和总产沙量, 在3种雨强下减沙效益均高于85%, 且高于同雨强下灰烬覆盖的减沙效益。枯落物覆盖的减流减沙效果在不同雨强下表现较为稳定, 而灰烬覆盖的减流减沙效果受降雨强度的影响显著, 且枯落物覆盖的减沙效益在3种雨强下均优于灰烬覆盖, 说明在林火发生后地表覆盖改变是引起土壤侵蚀增加的重要因素之一。

关键词: 林火; 植物灰烬; 枯落物; 水土流失; 减流减沙效益

中图分类号: S157.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)06-0082-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.06.011

Simulation Experiment on the Influence of Slope Cover Types on Runoff and Sediment Yield Before and After Forest Fire

WANG Guan, WU Wenqing, LIU Mingming, HUANG Rou

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: Through indoor simulated rainfall experiment, three kinds of rainy intensity (30, 60 and 90 mm/h) and three types of slope cover (bare slope, 1 cm Masson's pine litter cover, and 1 cm Masson's pine ash cover) were set up to study the process of runoff and sediment yield of slope under different ground cover before and after forest fire, and to clarify the benefits of runoff and sediment reduction under pre-fire litter cover and post-fire ash cover. The results showed that: (1) Compared with the bare slope, the initial runoff yield time was extended by 33%~80% and 51%~200% on litter-covered slope and ash-covered slope, respectively, and the ash cover had a more obvious ability in delaying runoff generation. (2) Compared with the bare slope, the runoff reduction benefit of litter cover was stable at 12%~36% under three rain intensities, while the runoff reduction benefit of ash cover was larger than 70% under 30 mm/h and 60 mm/h rain intensities, and reduced to 7% when the rain intensity was 90 mm/h. (3) The runoff yield on the bare slope showed a trend of rapid increase at first and then stable, while on the slope covered by litter and ash exhibited "stepwise" upward trend. (4) Litter cover could reduce runoff sediment carrying capacity and total sediment yield, and the sediment reduction benefits were all over 85% under the three rain intensities, and higher than that of the ash-covered slope under the same rainfall intensity. The runoff and sediment reduction benefits of the litter cover were relatively stable under different rainfall intensities, and the runoff and sediment reduction benefit of the ash cover was significantly affected by rainfall intensity. Moreover, the sediment reduction benefits of the litter cover was superior to the ash cover under three rain intensities, indicating that the change of land cover after forest fire was one of the critical factors causing the increase of soil erosion.

Keywords: forest fire; vegetation ash; litter; water and soil loss; benefit of runoff and sediment reduction

收稿日期: 2022-06-28

资助项目: 中央高校基本科研业务费项目(2021ZY52)

第一作者: 王冠(1990—), 女, 博士, 讲师, 主要从事林火生态、水土保持生态修复研究。E-mail: wangbjfu@bjfu.edu.cn

通信作者: 王冠(1990—), 女, 博士, 讲师, 主要从事林火生态、水土保持生态修复研究。E-mail: wangbjfu@bjfu.edu.cn

近年来,全球林火发生频率大幅提高,影响范围和过火面积成倍增加,林火及其对生态系统的影响已成为气候变化背景下备受关注的议题,同时也对水土保持和生态恢复带来新的挑战^[1-2]。林火的发生能够显著改变地表覆盖特征,引发地区水文过程的潜在响应^[3-4]。在火烧前,地表主要被枯落物覆盖,枯落物层能够避免降雨直接击打地表,消耗水滴或水流动能,并提高土壤持水性,具有良好的蓄水保土效益^[5-6]。林火发生后,植物灰烬作为林火的主要产物呈层状覆盖在燃烧区及周边区域,显著改变地表理化性质、粗糙度和可蚀性。同时,降雨过程中,灰烬颗粒可能在雨滴击打作用下与土壤颗粒发生反应,堵塞和胶结土壤孔隙,进一步改变土壤入渗性能,从而影响坡面产流产沙过程,导致土壤侵蚀程度改变^[7-8]。在土壤斥水性较强的区域,如英国南威尔士地区的冬青栎林^[9],灰烬覆盖延缓产流,提高土壤保水能力,而在美国蒙大拿州花旗松林^[10-11]等地区则可能堵塞土壤孔隙,降低入渗性能,诱发山洪灾害,危害下游群众的生命安全^[12]。

然而,现有研究^[13-14]对林火发生前后地表覆盖变化引起的水文响应关注较少,且结论存在分歧。一方面是由于灰烬自身的特性,如低密度、高流动性、易与水反应、易迁移的影响,使得灰烬对坡面水文过程的影响随覆盖时间发生改变;另一方面,受研究方法的局限,现存研究多基于野外监测,受多种因素及其相互作用的综合影响,如取样时间、气候、地形、土壤类型、植物类型及火烧程度等,导致研究结论难以系统对比,无法量化火烧前后由枯落物覆盖转为灰烬覆盖这一地表状况改变对坡面产流产沙过程的影响^[14]。鉴于此,本研究转换研究思路,采用条件可控的灰烬制备方法和人工模拟降雨试验对不同覆盖类型的坡面产流产沙过程进行刻画。

我国每年发生森林火灾2 000~3 000起,影响面积约为 1.4×10^4 hm²,其中位于西南的云南省是林火风险等级最高的地区之一^[14]。云南省大部地区主要优势树种是针叶林,其中马尾松(*Pinus massoniana*)和云南松(*Pinus yunnanensis*)约占全省森林面积的70%^[15]。因此,本研究选取我国西南林火高发区典型造林树种马尾松作为试验树种,以马尾松枯落物覆盖、马尾松灰烬覆盖的红壤坡面为研究对象,裸土坡面为对照,并控制枯落物覆盖和灰烬覆盖厚度相同,通过3种降雨强度下的人工模拟降雨试验,探讨林火发生前后坡面覆盖类型改变对坡面产流产沙过程的影响,为明确火烧迹地水土流失过程,指导灾后水土保持提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

研究区位于云南省建水县,隶属云南省红河哈尼族彝族自治州,海拔约1 000~1 340 m,平均气温19.5℃,年平均降水量685 mm,全年无霜期307天。县内混交林少,纯林面积大,其中以针叶林为优势树种,这些针叶纯林中易燃树种约占74%。由于易燃树种占优势的林分面积大、范围广,加之该区蒸发量大、地表温度高、干旱频发,导致全县森林火灾发生频繁,火灾损失严重。国务院已将建水县列为云南省境内的Ⅰ级森林火险县。

2021年8月15—25日,在云南建水荒漠生态系统国家定位研究站,选取生长良好、立地条件相同的马尾松纯林进行枯落物采集,采集的枯落物分为2份:一份自然晾晒24 h后装袋保存;另一份进行马尾松灰烬制备。将枯落物用水洗净表面泥沙,晒干后分批置于铁盆中并在自然状态下充分燃烧至灰白色(温度约600℃),燃烧过程中人为翻动使其燃烧程度更为均一,待彻底熄灭后将灰烬取出,在室温下放置24 h进行降温并装袋保存。试验土壤取自云南建水,为第四纪红黏土母质发育而成的典型红壤,运回实验室后过10 mm的土样筛以去除砾石、植物根系和残渣等杂质,干密度为1.20 g/cm³。

1.2 试验装置

模拟降雨试验于2021年9月10日至10月8日在北京林业大学人工模拟降雨大厅进行,模拟降雨系统包括4个独立的降雨区域,有效降雨面积256 m²,降雨高度12 m。人工模拟降雨系统由蓄水池、水泵、喷头和计算机控制系统4部分组成,通过计算机控制可以模拟自然条件下不同情景的降雨强度(小雨—特大暴雨)。采用旋转下喷式的不同喷头类型以及压力来调节30~90 mm/h降雨强度。试验区域降雨均匀度>90%。模拟降雨的雨滴直径分布和雨滴能量接近自然降雨特性。

试验采用小型变坡钢槽2 m(长)×1 m(宽)×0.4 m(高),除接水口外的3边均有10 cm高的挡板,防止土壤颗粒溅出造成泥沙量的损失。钢槽尾部设置“V”形收集口,用来收集径流和泥沙。钢槽底部打有均匀的透水孔,利于土壤水的自由下渗,钢槽坡度设置为15°(图1)。

1.3 试验设计

本试验设置30,60,90 mm/h降雨强度,根据野外调查结果,设置坡度为15°。试验以裸土坡面为对

照,马尾松枯落物厚度和马尾松灰烬厚度均设置为 1 cm,30 mm/h 降雨时长设定为 2 h,60,90 mm/h 降雨时长设定为 1.5 h。为减少降雨装置操作带来的误差,同一雨强条件下 3 个覆盖类型的土槽相隔 1 m 并排放置,同时进行降雨试验,并安排 3 组人员进行记录,每组试验均重复 3 次,结果采用 3 次试验结果的平均值。试验设计见表 1。

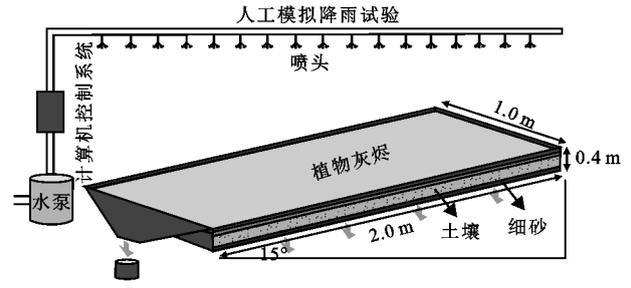


图 1 试验设计示意

表 1 人工模拟降雨试验设计

降雨强度/ (mm · h ⁻¹)	坡度/ (°)	坡面覆盖类型			降雨 历时/h
		类型 1	类型 2	类型 3	
30	15	裸土坡面	马尾松枯落物(1 cm)	马尾松灰烬(1 cm)	2.0
60	15	裸土坡面	马尾松枯落物(1 cm)	马尾松灰烬(1 cm)	1.5
90	15	裸土坡面	马尾松枯落物(1 cm)	马尾松灰烬(1 cm)	1.5

1.4 试验步骤

为保证试验土槽内的透水性,填土前在土槽底部平铺 5 cm 厚的细砂。采用分层装土法,以 10 cm 为 1 层进行填装,通过称量,将土壤容重控制在 1.20 g/cm³,适当压实,每次在装下一层土前将表土打毛,制造一定的粗糙度,防止土层间的相互滑动,并保证相邻土层的接触面均匀一致。对坡面进行均匀洒水并静置 24 h,使水分自由下渗以接近自然状态下的土壤水分分布状况,测定土壤水分含量达到 15%^[16],以保证每次灰烬覆盖之前土壤含水量基本一致。按照设计厚度将马尾松枯落物或马尾松灰烬均匀撒铺在坡面上,随机选取 10 个点用钢尺对枯落物或灰烬层的初始厚度进行测量,保证灰烬层厚度准确。

每场试验前进行降雨强度率定,测试降雨均匀度在 85% 以上开始降雨试验,以保证降雨均匀度和降雨强度达到试验要求。各次试验中,记录初始产流时间。由于前期产流不稳定,因此前 30 min,每隔 1 min 取 1 次径流和泥沙样品,30 min 之后每隔 2 min 取 1 次样品,60 min 后每隔 3 min 取 1 次样品,取样时间统一为 1 min。初始产流时间采用秒表测定,径流量采用体积法测定,泥沙量采用烘干称重法测定。使用 R 3.3.2 软件进行数据处理和分析,ggplot2 package 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同覆盖类型坡面产流过程

在 30,60,90 mm/h 的降雨强度下,灰烬覆盖坡面的初始产流时间均大于枯落物覆盖坡面,裸土坡面初始产流时间最短(图 2)。在 30 mm/h 降雨时灰烬覆盖的延缓产流效果最为明显,初始产流时间为 59.5 min,较枯落物覆盖坡面初始产流时间(50 min)延长 19%,较裸土坡面的初始产流时间(33 min)延长 80%。3 种覆盖类型的初始产流时间均随雨强的增大而缩短,在雨强为 90 mm/h 时,灰烬覆盖坡面初始产流时间(4.5 min)和枯

落物覆盖坡面(2 min)分别为裸土坡面(1.5 min)初始产流时间的 300% 和 133%,反映出植物灰烬覆盖和枯落物覆盖均具有延长初始产流时间的作用。

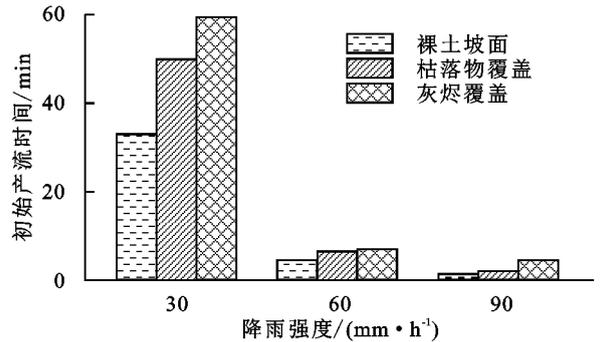


图 2 3 种雨强下不同坡面覆盖类型的初始产流时间

在 3 种降雨强度下,不同类型坡面的产流速率变化规律差异明显(图 3)。裸土坡面的产流速率在产流开始后快速增长,并在产流 10~20 min 后趋于稳定,并一直持续到降雨结束,且稳定在某一产流速率值上下浮动。枯落物覆盖和灰烬覆盖坡面的产流速率则呈现明显的“阶梯式”上升,在初始产流后产流速率快速升高,并在 5~10 min 后到达第 1 阶梯,而后产流速率稳定或缓慢上升,并在约 2~10 min 后产流速率变为快速升高,直到稳定在某一产流速率值上下浮动至降雨结束。对于 3 种坡面类型,随着雨强增加产流速率均显著升高,这是由于随雨强增大,到达蓄满产流的时间缩短,同时雨滴击溅作用使得细颗粒充填和堵塞土壤孔隙,降低入渗,导致产流速率增大。在雨强为 30,60 mm/h 时,产流速率表现为裸土坡面 > 枯落物覆盖坡面 > 灰烬覆盖坡面,而当雨强为 90 mm/h 时,产流速率表现为裸土坡面 > 灰烬覆盖坡面 > 枯落物覆盖坡面(图 3),表明在降雨强度大时,灰烬层对产流速率的减缓作用低于枯落物层。

表 2 为模拟降雨试验中 3 种雨强条件下裸土坡面、枯落物覆盖、灰烬覆盖时的径流量和减流效益。

从表 2 可以看出,与裸土坡面相比,枯落物和灰烬覆盖均能有效减少径流量。雨强为 30,60 mm/h 时,灰烬覆盖的减流效果最好,减流效益分别为 74%和 81%,明显高于枯落物覆盖的减流效益 36%和 12%。雨强为 90 mm/h 时,枯落物覆盖的减流效益为 25%,优于灰烬覆盖的减流效益 7%。

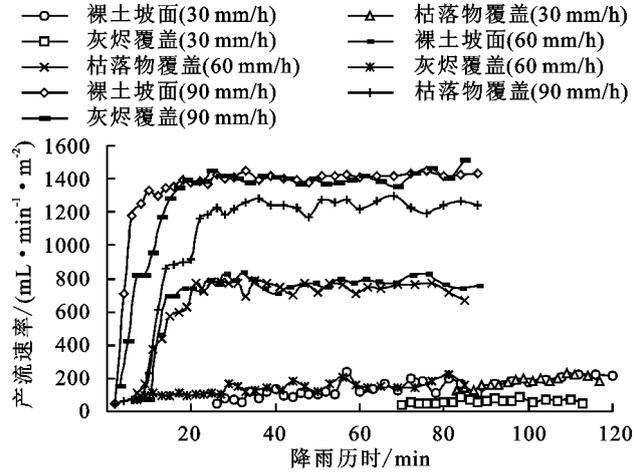


图 3 3 种雨强下不同坡面覆盖类型的产流速率

表 2 3 种雨强下不同覆盖类型坡面的径流量及减流效益

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	降雨 历时/h	径流量/mL			减流效益/%	
		裸土坡面	枯落物覆盖	灰烬覆盖	枯落物覆盖	灰烬覆盖
30	2.0	4779.41	3055.91	1231.20	36	74
60	1.5	21378.05	18889.12	4069.06	12	81
90	1.5	42388.10	31798.13	39266.92	25	7

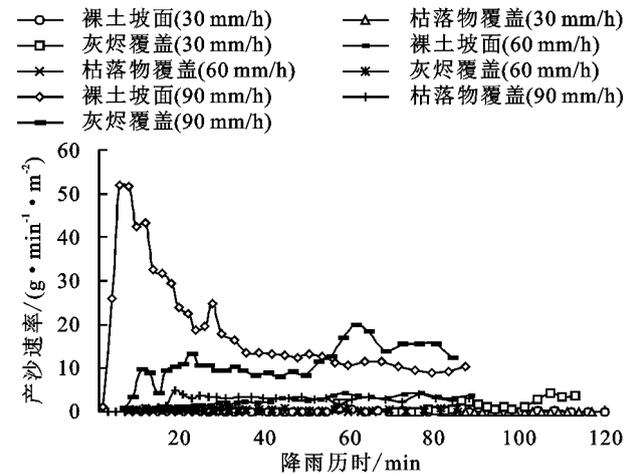


图 4 3 种雨强下不同坡面覆盖类型的产沙速率

从表 3 可以看出,与裸土坡面相比,雨强为 60, 90 mm/h 时灰烬覆盖均能有效减少产沙量,减沙效

表 3 3 种雨强下不同覆盖类型坡面的产沙量及减沙效益

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	降雨 历时/h	产沙量/g			减沙效益/%	
		裸土坡面	枯落物覆盖	灰烬覆盖	枯落物覆盖	灰烬覆盖
30	2.0	4.23	0.10	27.90	98	-559
60	1.5	70.27	2.49	16.44	96	76
90	1.5	639.80	80.94	327.89	87	49

由表 4 可知,裸土坡面和枯落物覆盖坡面的径流含沙量均随降雨强度的增大而增大,且在同等雨强下

2.2 不同覆盖类型坡面产沙过程

裸土坡面的产沙速率随降雨历时变化基本表现为“单峰”形,产沙速率随降雨历时呈先快速增加后逐步降低的特征,而枯落物和灰烬覆盖条件下,产沙曲线主要呈现出先快速增加到某一产沙速率,而后保持平稳在该速率上下浮动的特征(图 4)。3 种坡面覆盖类型均表现出产沙速率随降雨强度的增加而增大的趋势,这主要是由于降雨强度大时流速快,水流流经整个坡面的时间较短,水流剪切力大,增加土壤侵蚀。雨强为 30 mm/h 时,坡面的产沙速率表现为灰烬覆盖>裸土坡面>枯落物覆盖,这可能是由于降雨强度低时雨滴击溅较弱,土壤表面颗粒不易分离,而灰烬层本身松散且密度低,容易被冲刷到集流桶中,在烘干称重时被作为侵蚀土壤处理,导致产沙速率较高。雨强为 60,90 mm/h 时,坡面的产沙速率表现为裸土坡面>灰烬覆盖坡面>枯落物覆盖坡面(图 4),表明枯落物覆盖和灰烬覆盖均具有拦截泥沙的能力,且枯落物坡面的结构稳定不易产生位移,拦截泥沙的能力更强。

益分别为 76%和 49%,而雨强为 30 mm/h 时灰烬覆盖具有增沙效益,导致产沙量为裸土坡面的 5 倍以上。枯落物覆盖在 3 种雨强下均具有显著的减沙效益(>85%),且这一效益随雨强的增大而减小,说明枯落物覆盖的拦截泥沙效果明显优于灰烬覆盖。

2.3 不同覆盖类型坡面水沙关系

灰烬覆盖坡面在 30 mm/h 降雨时的径流含沙量显著高于裸土坡面和枯落物覆盖坡面。枯落物覆盖下的径流含沙量低于裸土坡面和灰烬覆盖坡面,表明其对径流流经坡面时所携带泥沙的拦截作用最为明显。裸土坡面的径流含沙率在开始产流时快速升高,呈现“单峰”形,而后逐步减小;而灰烬覆盖坡面的径流含沙率在产流初始阶段较低,而后逐步增加,峰值出现的时刻较晚(图 5)。

枯落物覆盖坡面的径流含沙量低约 1 个数量级。灰烬覆盖坡面在 30 mm/h 降雨时径流含沙量最大,且

随雨强增大径流含沙量减小。

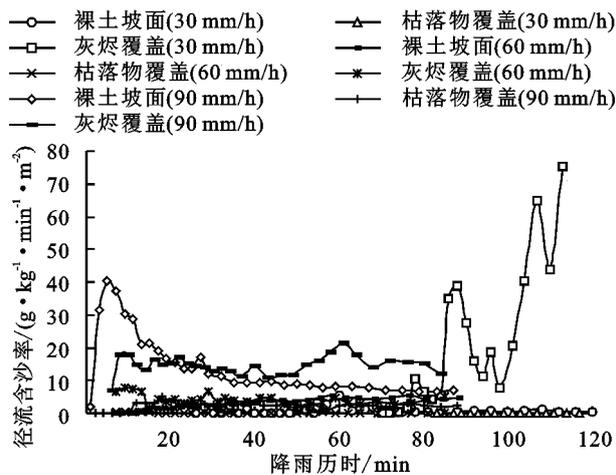


图 5 3 种雨强下不同坡面覆盖类型的径流含沙率

表 4 3 种雨强下不同覆盖类型坡面的径流含沙量

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	降雨 历时/h	径流含沙量/(g·mL ⁻¹)		
		裸土坡面	枯落物覆盖	灰烬覆盖
30	2.0	8.85×10^{-4}	3.27×10^{-5}	2.27×10^{-2}
60	1.5	3.29×10^{-3}	1.24×10^{-4}	4.04×10^{-3}
90	1.5	1.51×10^{-2}	2.55×10^{-3}	8.35×10^{-3}

3 讨论

在 3 种降雨强度下,枯落物覆盖和植物灰烬覆盖均能够延缓初始产流时间 33%~80% 和 51%~200%,且同一雨强下,灰烬覆盖对产流的延缓作用比枯落物覆盖更为明显。这可能与枯落物和灰烬层疏松多孔、具有一定的吸水性有关。在降雨初始阶段,坡面主要进行假蓄满产流,大部分降雨入渗进入土壤,而枯落物和灰烬层具有一定的孔隙度和持水性,其渗透性高于土壤渗透性,能够延缓降雨入渗速度,使得初始产流出现的时间推后,故对于裸土坡面,具有明显延缓初始产流时间的作用^[13]。与同等厚度的枯落物层相比,灰烬层延缓产流的能力更为显著,说明主要为无机成分的灰烬层可能比有机成分的枯落物层持水性更强。同时,由于马尾松为针叶树种,当枯落物覆盖时,其针状叶片之间相互搭建,形成水流沿枯落物流动的优先路径,而火烧导致针叶形态被破坏,形成的灰烬由木炭、炭黑及矿物质灰组成,呈颗粒状^[16-17],无法形成水流快速通路,使得灰烬覆盖下坡面的初始产流时间较枯落物覆盖更为延迟。

当产流开始后,枯落物覆盖和灰烬覆盖坡面的产流速率呈现“阶梯式”上升现象,这可能与枯落物和灰烬覆盖时,覆盖层与土壤层组合形成的“二元结构”有关^[7,18],其作用类似于海绵,当雨强大于土壤入渗速率,且覆盖层渗透性优于下覆土层时,产流初期在覆盖层与土壤界面产生超渗产流,而当下覆土层饱和之后,覆盖层持水量上升,使得产流速率出现平台期,当覆盖层和土层均饱和时,这一体系开始形成蓄满产流,产流速率出现第 2 次快速增长。枯落物覆盖和灰

烬覆盖均具有减流效益,但随降雨强度的变化趋势不同。枯落物覆盖下减流效益约为 12%~36%,且随降雨强度的增加呈现先下降再升高的趋势,而灰烬覆盖坡面当降雨强度为 30,60 mm/h 时减流效益大于 70%,而当雨强增大到 90 mm/h 时,灰烬覆盖的减流效益大幅度减少至 7%,其原因可能与灰烬层的高流动性、低密度特征相关^[19-20]。暴雨导致灰烬层的完整性受到破坏,在 90 mm/h 降雨下约 20 min 后坡面部分灰烬覆盖区域逐渐裸露,导致盖层不完整,灰烬颗粒随水流损失,难以持续起到拦截径流的功效。

枯落物覆盖的减沙效益明显优于灰烬覆盖,且随降雨强度的增大缓慢下降,在 90 mm/h 降雨时可以保持 85% 以上的减沙效益,说明枯落物覆盖具有良好的水土保持效益。而灰烬覆盖在 30 mm/h 时产沙量远超裸土坡面,这可能是由于灰烬本身结构松散密度低,能够漂浮在坡面径流表面,与剥蚀土壤混合成为产沙的一部分,导致产沙量大幅增加。相比裸土坡面,在 60,90 mm/h 雨强时,灰烬覆盖能够分别减少 76% 和 49% 的产沙量。前人^[21-22]在野外观测指出,灰烬颗粒在强烈的雨滴击打作用下嵌入土壤,与雨水发生水化反应,形成结皮状结构^[23-24],导致土壤颗粒与灰烬颗粒相互胶结,引起“地表封闭”效应,大幅降低地表入渗率和可蚀性,使得产流增加产沙减少^[24-25],在一定程度上可以解释灰烬覆盖在大雨和暴雨下减沙效益比小雨时更为明显这一现象。

总之,枯落物和灰烬覆盖条件下坡面的产流产沙过程均较裸土坡面有较大差异。覆盖层具有减小雨滴动能、降低土壤颗粒分离速率的作用,导致产沙过程出现明显的先上升后平稳的趋势,而裸土坡面的产沙过程呈现显著“单峰”形,在雨滴击溅导致细颗粒物被快速侵蚀之后,侵蚀速率逐步下降。然而,枯落物覆盖下的坡面二元结构更为稳定,枯落物层本身结构稳定,不易破坏,难以随着水流被侵蚀和压缩,也不易嵌入土壤表层,使得枯落物层的减流减沙效果在不同雨强下均表现良好;而灰烬覆盖在降雨初期与土壤界限分明,形成上灰烬、下土壤的二元结构,但其结构松散,密度低,颗粒细小,容易随着水流被冲刷运移造成灰烬层损失,且在雨滴动能大时易向下迁移进入土壤剖面,发生水化反应堵塞土壤孔隙,增大表层土壤颗粒剥蚀的难度,导致降雨后期产流速率显著增大,产沙速率逐步降低。

本研究对林火发生前后产流产沙差异的研究建立在室内试验基础上,重点关注地表覆被变化对坡面水文过程的影响。在野外林火发生后,影响坡面产流产沙过程的因素更为复杂。植被和枯落物燃烧导致地表覆盖大幅降低^[3,20],直接减少植被对降雨的拦截作用^[25],火烧还可能破坏土壤大团聚体,导致土壤结构发生变化^[26],同时有机物燃烧使得脂肪酸附着在地表,进一步改变地表的斥水性^[27]。这些因素与地

表覆盖变化同时影响雨滴击溅、降雨入渗和径流形成等一系列过程。因此, 后续研究需要对上述因子及其协同效应进行更为深入的探讨。

4 结论

(1) 枯落物覆盖和灰烬覆盖能够分别延缓初始产流时间 33%~80% 和 51%~200%, 且灰烬覆盖对产流的延缓作用更为明显。

(2) 相比裸土坡面, 枯落物覆盖和灰烬覆盖均具有显著的减流效果, 但枯落物覆盖的减流效果稳定在 12%~36%, 而灰烬覆盖在 30, 60 mm/h 雨强下减流效果高于 70%, 在 90 mm/h 雨强下减流效果迅速下降至 7%。

(3) 枯落物覆盖的减流效果显著优于灰烬覆盖, 在 3 种雨强下均高于 85%, 说明枯落物具有良好的减缓径流效果。

(4) 枯落物覆盖在 3 种雨强下均具有显著的减沙效益, 且减沙效果优于灰烬覆盖, 灰烬覆盖在 30 mm/h 雨强时产生增沙效益, 在 60, 90 mm/h 雨强下具有减沙效益。

(5) 枯落物覆盖坡面的径流含沙量明显小于同等雨强下裸土坡面和灰烬覆盖坡面的径流含沙量, 表明枯落物覆盖对携沙水流的拦截能力强, 保土效果优于灰烬覆盖。

参考文献:

[1] 岳超, 罗彩访, 舒立福, 等. 全球变化背景下野火研究进展[J]. 生态学报, 2020, 40(2): 385-401.

[2] Moritz M A, Batllori E, Bradstock R A, et al. Learning to coexist with wildfire[J]. Nature, 2014, 515: 58-66.

[3] Balfour V N, Doerr S H, Robichaud P R. The temporal evolution of wildfire ash and implications for post-fire infiltration[J]. International Journal of Wildland Fire, 2014, 23: 733-745.

[4] 刘发林, 杨继敏. 火干扰对径流及土壤侵蚀的模拟研究[J]. 土壤通报, 2015, 46(4): 858-865.

[5] 何玉广, 信忠保, 余新晓, 等. 模拟降雨条件下侧柏林地枯落物对坡面产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 27-32.

[6] 林立文, 邓羽松, 李佩琦, 等. 桂北地区不同密度杉木林枯落物与土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 200-207.

[7] Bodí M B, Martín D A, Balfour V N, et al. Wildland fire ash: Production, composition and eco-hydro-geomorphic effects[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 130: 103-127.

[8] Bodí M B, Doerr S H, Cerdà A, et al. Hydrological effects of a layer of vegetation ash on underlying wettable and water repellent soil[J]. Geoderma, 2012, 191: 14-23.

[9] Balfour V N, Doerr S H, Robichaud P R. The temporal evolution of wildfire ash and implications for post-fire infiltration[J]. International Journal of Wildland Fire, 2014, 23(5): 733-745.

[10] Wall S A, Roering J J, Rengers F K. Runoff-initiated post-fire debris flow Western Cascades, Oregon[J]. Landslides, 2020, 17: 1649-1661.

[11] Thomaz E L. Ash physical characteristics affects differently soil hydrology and erosion subprocesses[J]. Land Degradation and Development, 2017, 29(3): 690-700.

[12] León J, Bodí M B, Cerdà A, et al. The contrasted response of ash to wetting: The effects of ash type, thickness and rainfall events[J]. Geoderma, 2013, 209/210: 143-152.

[13] Moody J A, Shakesby R A, Robichaud P R, et al. Current research issues related to post-wildfire runoff and erosion processes[J]. Earth-Science Reviews, 2013, 122: 10-37.

[14] 苏立娟, 何友均, 陈绍志. 1950—2010 年中国森林火灾时空特征及风险分析[J]. 林业科学, 2015, 51(1): 88-96.

[15] 舒筱武, 郑晔, 蔡雨新, 等. 马尾松在云南的引种成效[J]. 西部林业科学, 2004, 33(2): 1-9.

[16] 翟雅男, 陈奇伯, 黎建强, 等. 云南松林计划烧除对坡面产流产沙的影响[J]. 中国水土保持科学, 2022, 20(2): 72-79.

[17] Balfour V N. Determining wildfire ash saturated hydraulic conductivity and sorptivity with laboratory and field methods[J]. Catena, 2014, 135: 358-368.

[18] Jiménez-Pinilla P, Lozano E, Mataix-Solera J, et al. Temporal changes in soil water repellency after a forest fire in a Mediterranean calcareous soil: Influence of ash and different vegetation type[J]. Science of the Total Environment, 2016, 572: 1252-1260.

[19] Balfour V N, Woods S W. The hydrological properties and the effects of hydration on vegetative ash from the Northern Rockies, USA[J]. Catena, 2013, 111: 9-24.

[20] Shakesby R A, Doerr S H. Wildfire as a hydrological and geomorphological agent [J]. Earth-Science Reviews, 2006, 74: 269-307.

[21] Brook A, Wittenberg L, Kopel D, et al. Structural heterogeneity of vegetation fire ash[J]. Land Degradation and Development, 2018, 29: 2208-2221.

[22] Jordán A, Zavala L M, Granged A J P, et al. Wettability of ash conditions splash erosion and runoff rates in the post-fire[J]. Science of the Total Environment, 2016, 572: 1261-1268.

[23] Stoof C R, Gevaert A I, Baver C, et al. Can pore-clogging by ash explain post-fire runoff? [J]. International Journal of Wildland Fire, 2016, 25: 294-305.

[24] Prats S A, Abrantes J R C B, Coelho C D O A, et al. Comparing topsoil charcoal, ash, and stone cover effects on the postfire hydrologic and erosive response under laboratory conditions[J]. Land Degradation and Development, 2018, 29: 2102-2111.

[25] 徐军. 林冠和枯落物结构对水分截留和溅蚀的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.

[26] Brook A, Wittenberg L, Kopel D, et al. Structural heterogeneity of vegetation fire ash[J]. Land Degradation and Development, 2018, 29: 2208-2221.

[27] Verma S, Jayakumar S. Impact of forest fire on physical, chemical and biological properties of soil: A review[J]. Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences, 2012, 2(3): e168.