

# 多年连续计划烧除对云南松林坡面水土流失的影响

龚顺清<sup>1</sup>, 陈奇伯<sup>1,2</sup>, 黄新会<sup>1,2</sup>, 杨建光<sup>3</sup>, 黎建强<sup>1,2</sup>, 钱靖<sup>4</sup>

(1.西南林业大学 生态与环境学院, 昆明 650224; 2.西南林业大学 石漠化研究院, 昆明 650224; 3.新平县林业和草原局, 云南 新平 653499; 4.新平县气象局, 云南 新平 653499)

**摘要:**为探讨多年连续计划烧除对云南松林坡面水土流失的影响,科学评价云南松林计划烧除后森林生态系统的服务功能,2019 年在滇中新平县照壁山云南松林设置计划烧除区域和未烧除区域的径流小区,对降雨及产流产沙变化进行了定位观测,建立了降雨、径流和泥沙的数值关系,结果表明:(1) 2019 年研究区降雨量为 568.6 mm,仅为多年平均降雨量 939.79 mm 的 60.5%,降雨主要集中在雨季 5—10 月,雨季降雨量占年降雨总量的 73.8%。雨季降雨 51 场次,其中产流降雨 28 场,占雨季降雨总量的 93.7%。(2) 多年连续计划烧除增强了降雨转化为林地坡面径流的能力,且小雨量级最能凸显计划烧除促进林地坡面径流泥沙的产生。(3) 计划烧除小区和未烧除小区的径流主要与降雨量显著相关,计划烧除小区的径流与降雨呈幂函数关系,未烧除小区的径流与降雨呈多项式关系。(4) 计划烧除小区和未烧除小区的泥沙均与降雨量、径流量显著相关,且泥沙与降雨、径流的关系均呈幂函数形式。表明多年连续计划烧除改变林地水文特征,提高了降雨转化为林地坡面径流的能力,提高了径流挟带泥沙的能力,才使计划烧除林地的径流泥沙比未烧除林地多。

**关键词:**计划烧除; 云南松林; 径流; 泥沙

**中图分类号:**157.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2022)03-0018-07

## Prescribed Burning Effects on Slope Runoff and Soil Loss in a *Pinus yunnanensis* Forest of Yunnan

GONG Shunqing<sup>1</sup>, CHEN Qibo<sup>1,2</sup>, HUANG Xinhui<sup>1,2</sup>, YANG Jianguang<sup>3</sup>, LI Jianqiang<sup>1,2</sup>, QIAN Jing<sup>4</sup>

(1.School of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, 650224 Kunming, China; 2.Research Institute of Rocky Desertification, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 3.Xinping Forestry and Grassland Bureau, Xinping, Yunnan 653499, China; 4.Xinping Meteorological Bureau, Xinping, Yunnan 653499, China)

**Abstract:** In order to explore effects of prescribed burning on runoff and soil loss on slopes of *Pinus yunnanensis* forests, burned and unburned runoff plots were set up to observe runoff and sediment yield of *Pinus yunnanensis* forests on Zhaobi Mountain of Xinping County, Yunnan Province in 2019. Relationships among rainfall, runoff and sediment were analyzed. The results showed that: (1) rainfall in 2019 was 568.6 mm, which was only 60.5% of the average annual rainfall of 939.79 mm; rainfall mainly occurred in rainy seasons from May to October, accounting for 73.8% of the total annual rainfall; there were 51 rainfall events in this season, of which 28 were runoff producing, accounting for 93.7% of the total rainy-season rainfalls; (2) continuous prescribed burning for more than 20 years enhanced converting rainfall into slope runoff, and under light rains burning produced the most amount of soil loss; (3) runoff of burned and unburned plots was significantly correlated with rainfall by power function on burned plots and polynomial function on unburned plots, respectively; (4) sediment on both burned and unburned plots was significantly related to rainfall and runoff by power function. These results showed that many years of burning had changed the hydrological characteristics of forestland, improved the transforming ability from rainfall to slope runoff, and increased the sediment carrying capacity of runoff, so that the prescribed burning land had more runoff and sediment than unburned land.

收稿日期:2021-04-19

修回日期:2021-05-19

资助项目:国家自然科学基金项目“云南松林枯落物计划烧除对坡面产流产沙的影响机理研究”(31860212)

第一作者:龚顺清(1995—),男,云南省泸西县人,硕士研究生,主要研究方向:水土保持研究。E-mail:2253481268@qq.com

通信作者:陈奇伯(1965—),男,甘肃省通渭县人,博士,教授,主要研究方向:从事土壤侵蚀和恢复生态学研究。E-mail:chengqb@swfu.edu.cn

**Keywords:**prescribed burning; *Pinus yunnanensis* forests; runoff; sediment yield

森林火灾是破坏森林生态系统最严重的生态因子之一,火源难以控制并且具有发生面广、突发性强、破坏性大的特点<sup>[1]</sup>。计划烧除与其不同,计划烧除是受人为控制的、有目的的对林区进行火烧的行为<sup>[2]</sup>,计划烧除主要以灌木丛和地面覆盖的地表火为主,一般不会引起树冠火<sup>[3]</sup>。国外研究计划烧除较早,1907 年,F.E.Olmosted 第一次提出了“计划火烧”概念<sup>[4]</sup>,经过科学研究者的研究,计划烧除已成为有效的森林、生态管理手段之一,并得到了广泛应用<sup>[5]</sup>。国内对计划烧除的研究主要集中在计划烧除对森林生态系统的影响领域,研究内容主要涉及计划烧除对森林生态系统恢复和更新<sup>[6]</sup>、群落结构与物种多样性<sup>[7]</sup>、微生物及酶活性<sup>[8]</sup>、土壤<sup>[9]</sup>、林内可燃物等<sup>[10]</sup>的影响。

计划烧除致使地被物层被破坏,导致降雨截留作用锐减或消失,并且使土壤结构受损,进而加速火烧迹地的水土流失<sup>[11]</sup>。但目前针对计划烧除林地土壤侵蚀的相关研究多集中于土壤稳定入渗速率<sup>[12]</sup>和地被物覆盖等<sup>[13]</sup>对水土流失的影响方面,而关于计划烧除对径流泥沙与降雨关系的影响研究报道较少。刘发林等<sup>[14]</sup>人发现火干扰主要使 1—3 cm 的土层斥水能力提高,进而使林地径流系数产生变化。Pier-son 等<sup>[13]</sup>人发现计划烧除增加了林地坡面流的空间连续性,降低了植被和地被物对径流和泥沙的过滤作用,促进了坡面流流速和输沙能力的提高。Hueso 等<sup>[15]</sup>人的研究结果显示,经过计划烧除,开始几个月,由于地表植被及枯落物被烧毁,产生地表径流的降雨阈值降低,易产生径流泥沙,而第二年因草本植物和灌木重新生长,径流泥沙量会迅速减少。Johan-sen 等<sup>[16]</sup>人得出了植被覆盖与径流和泥沙产率呈显著相关关系的研究结论。

云南松(*Pinus yumanensis*)是西南地区最主要的造林树种之一,分布在北纬 23°—29°、东经 98°—106°范围<sup>[17]</sup>。分布区自然地理特殊,冬春气候干暖,少雨,加之云南松及其林下灌丛、草本在休眠期,林下枯枝落叶最

容易着火,酿成森林火灾<sup>[3]</sup>。玉溪市新平县为预防森林火灾,在云南松人工林连续实施计划烧除 20 余年。本研究通过野外布设对比径流小区,观测每场降雨计划烧除小区和未烧除小区的径流泥沙变化,探索计划烧除对坡面水土流失的影响,以期为云南松林计划烧除后森林生态系统服务功能评价提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

云南省玉溪市新平县位于云南省中部偏西南,属于我国云贵高原、横断山地和青藏高原三大自然地理区域的结合部,地处哀牢山中段东麓,典型的高原山地丘陵地貌,地形以山地为主,地势西北高、东南低,局部气候受海拔影响,形成河谷高温区、半山暖温区、高山寒温区 3 个气候类型。研究区位于新平县照壁山,地处北纬 102°0′7″—102°0′8″,东经 24°2′38″—24°2′41″,海拔 1 990~2 050 m,土壤主要以红壤为主,土层厚度约为 100 cm。气候干湿季分明,夏秋季高温多雨,冬春季干暖少雨,年平均气温为 15℃。

研究区云南松林是 20 世纪 80 年代飞播造林形成的,以疏伐和计划烧除为主要管理方式,林龄约为 30 a,2019 年的计划烧除时间为 2 月 12 日—2 月 13 日,计划烧除平均熏黑高度为 1.48 m,属于低强度火烧。计划烧除与未烧除区域中间间隔一条防火通道,均位于坡中上部。

1.2 研究方法

1.2.1 坡面径流小区布设 根据照壁山研究区的地形,2019 年 4 月在云南松林烧除区和未烧区各设置水平投影面积为 2.5 m×10 m 的径流小区各 2 个。计划烧除小区和未烧除小区的径流小区的坡向分别为 SW28°、SW30°,坡度分别为 16°,17°。径流小区下方设置汇流槽及集流池,用于收集每次降雨产生的径流和泥沙。径流小区周围利用防护网围起来,禁止人为扰动。径流小区基本情况见表 1。

表 1 径流小区基本情况

径流 小区	调查 对象	物种	平均高/m	郁闭度/%	地面蓄积量/ (t·hm <sup>-2</sup> )
计划烧除小区	乔木层	云南松	13.00	46.00	燃烧剩余物 0.50
	灌木层	无	0.00	0.00	
	草本层	无	0.00	0.00	
未烧除小区	乔木层	云南松	12.24	45.00	枯落物 2.24
	灌木层	扁桃斑鸠菊( <i>Vernonia amygdalina</i> Delile)、石栎( <i>Lithocarpus glabra</i> )等	1.10	3.00	
	草本层	紫荆泽兰( <i>Eupatorium adenophora</i> Spreng)、鳞毛蕨( <i>Dryopteris chinensis</i> )、早熟禾( <i>Poa annua</i> L)等	0.60	95.00	

1.2.2 降雨、径流、泥沙测定 降雨观测:2019 年雨季 5—10 月的降雨采用 RG3—自记雨量计自动记录观测降雨历时、降雨量。径流量测定:坡面产流后,集流池收集地表径流,测定径流量。泥沙量测定:每个径流小区每次降雨产流后将集流池中的径流充分搅拌均匀,从中取出 1 L 重复水样 3 个,用烘干法测定平均泥沙含量,并结合径流量计算场降雨产沙量。

1.3 数据处理与分析

数据的计算处理、图表绘制及统计分析分别在 Microsoft Office Excel 2010 和 SPSS 22.0 中完成。

2 结果与分析

2.1 降雨特征分析

据新平气县气象局距离研究区最近的气象站资料显示,该地区近 60 a 平均降雨量 939.79 mm,最低年份 614.00 mm,最高年份 1 362.00 mm。该地区干湿季分明,雨季从 5 月开始至 10 月结束,5—10 月降雨量占年降雨量的 82.65%,见图 1。2019 年研究区全年降雨量 568.60 mm,占多年平均降雨量的 60.50%,总雨量偏少。2019 年的雨季开始时间 5 月 27 日,结束时间 10 月 27 日,该雨季共监测了 51 场降雨,降雨量达 419.60 mm,占全年降雨量的 73.80%,其中产流降雨 28 场降雨,降雨量 393.20 mm,占雨季降雨量的 93.71%。

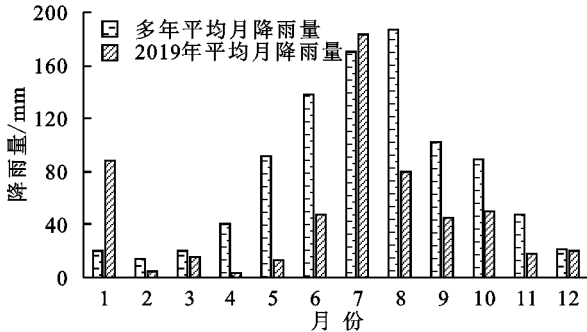


图 1 降雨特征分布

根据我国雨量分类系统,将降雨按 24 h 降雨量划分为 4 个等级:小雨<10 mm,中雨 10~24.9 mm,大雨 25~50 mm,暴雨>50 mm。2019 年 5—10 月产流降雨中小雨、中雨、大雨、暴雨的产流次数分别为 15 次、9 次、3 次和 1 次,即小雨的降雨次数最多,其次是中雨。各等级降雨的降雨量分别为 80.60 mm, 155.80 mm, 96.60 mm 和 60.20 mm,分别占产流降雨量的 20.50%, 39.62%, 24.57% 和 15.31%。表明研究区中雨是产流降雨量的主要贡献者,其次是大雨和小雨。见表 2,降雨事件多发生在 7—8 月,共发生降雨 29 次,其中产流降雨共发生 18 次,降雨量为 255.40 mm,占产流降雨量的 65.00%。7—8 月份的产流降雨量比其他月份大,降雨次数多易形成连续日降雨,所造成的水土流失也比其他月份多。

表 2 2019 年 5—10 月产流降雨月分配

项目	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	合计
降雨次数/次	4	6	13	16	5	7	51
产流降雨次数/次	2	2	11	7	2	4	28
产流降雨次数占雨季/%	7.14	7.14	39.29	25.00	7.14	14.29	100.00
总降雨量/mm	13.60	47.80	183.00	79.20	45.60	50.40	419.60
产流降雨量/mm	11.40	42.60	181.40	74.00	39.20	44.60	393.20
产流降雨量占雨季/%	2.90	10.83	46.13	18.82	9.97	11.34	100.00

2.2 计划烧除对坡面径流泥沙的影响

2.2.1 计划烧除对径流的影响 地表植被和枯落物促进了雨水渗透和降低地面水流流速,并保护土壤免受雨滴击溅的影响。

计划烧除不仅去除了地表植被和枯落物,使地表

土壤失去保护,而且多年连续计划烧除改变了土壤结构性质和土壤成分比例,使土壤入渗过程受到了影响,从而影响到径流的形成过程<sup>[18]</sup>。将 28 场产流降雨按降雨量从小到大排列,计划烧除小区和未烧除小区的产流情况见图 2。

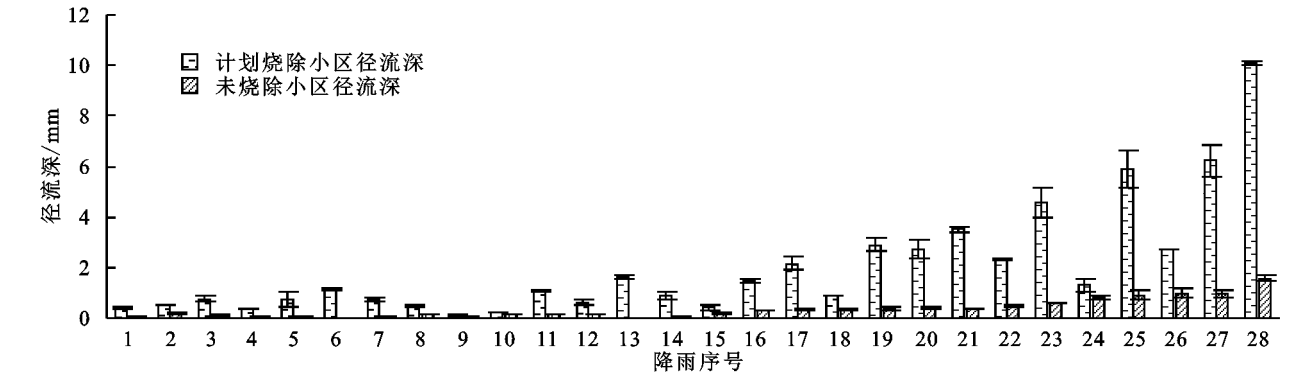


图 2 计划烧除和未烧除小区的径流特征

由图 2 可知,计划烧除小区每场降雨产生的径流量都比未烧除小区的大,最明显的是,在径流小区建造完成后的第一和第二场的产流降雨中(图 2 中降雨序号分别为 6,13),计划烧除小区的径流比未烧除小区高出 82 倍。整个雨季只有一场暴雨产生,此次降雨计划烧除小区的径流为 10.07 mm,未烧除小区为 1.58 mm,计划烧除小区径流比未烧除小区高出 5.37 倍。计划烧除小区的平均径流为 2.03 mm,变化范围为 0.12~10.07 mm,未烧除小区的平均径流为 0.35 mm,变化范围为 0.01~1.58 mm,即计划烧除造成坡面径流产生增多且变化范围增大。随着降雨量的增大,计划烧除小区和未烧除小区的径流深总体均呈增加趋势,计划烧除小区的径流深增幅比未烧区大,经单因素分析,计划烧除小区和未烧除小区的径流在 0.05 水平上呈显著

差异( $\text{sig}=0.00<0.01$ )。因此,多年连续计划烧除情况下,计划烧除促进坡面径流产生。

从表 3 中可以看出,随着降雨等级的增大,计划烧除小区的径流深分别是未烧除小区的 6.47,5.55,5.18,6.37 倍,则体现计划烧除促进地表径流产生的降雨等级排序为:小雨>暴雨>中雨>大雨。用计划烧除小区和未烧除小区各降雨等级的径流数据进行配对样本 T 检验(监测期间只有一场暴雨,不进行 T 检验),见表 4。经 T 检验证实,计划烧除小区小雨、中雨与未烧除小区的径流量在 0.05 水平上差异性显著,而大雨的差异性不显著。分析表明,小雨、中雨均显著地促进地表径流产生,但小雨比中雨的差异更显著,因此小雨比中雨更能体现计划烧除促进地表径流产生。

表 3 各降雨等级下的径流泥沙流失特征

类型	降雨等级							
	小雨		中雨		大雨		暴雨	
	径流深/	泥沙量/	径流深/	泥沙量/	径流深/	泥沙量/	径流深/	泥沙量/
	mm	( $\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$ )	mm	( $\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$ )	mm	( $\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$ )	mm	( $\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$ )
计划烧除小区	10.10	9.39	21.80	25.41	14.87	16.58	10.07	12.16
未烧除小区	1.56	0.61	3.93	1.67	2.87	1.23	1.58	0.71
烧除小区是未烧除小区的倍数	6.47	15.39	5.55	15.22	5.18	13.48	6.37	17.13

由图 3 可知,计划烧除小区的平均径流系数是 0.137,变化范围为 0.023~0.242,未烧除小区的平均径流系数是 0.023,变化范围为 0.003~0.052。计划烧除小区与未烧除小区相比,径流系数的相对变化率是未烧除小区的 58.3%。经单因素分析,计划烧除小区和未烧除小区的径流在 0.05 水平上呈显著差异。因此,同等降雨条件下,多年连续计划烧除林地显著

增强降雨转化为坡面径流的能力。

表 4 计划烧除小区和未烧除小区产流的差异显著性检验

降雨等级	降雨次数	差异平均值	$t$ 值	显著性(双尾)
小雨	15	0.57	5.325	0.000
中雨	9	1.98	5.201	0.001
大雨	3	4.00	3.561	0.071

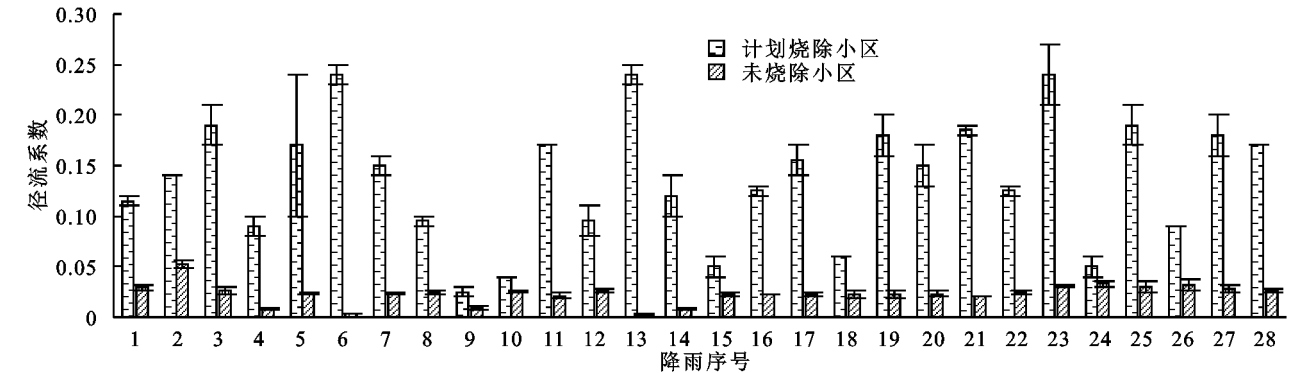


图 3 计划烧除和未烧除小区的径流系数特征

2.2.2 计划烧除对泥沙的影响 将 28 场产流降雨按降雨量从小到大排列,计划烧除小区和未烧除小区的产沙情况见图 4。

计划烧除小区和未烧除小区的产沙量分别为 63.54  $\text{t}/\text{km}^2$ , 4.21  $\text{t}/\text{km}^2$ , 即计划烧除小区的产沙量是未烧除小区的 15.10 倍,计划烧除对产沙量的影

响比径流更明显。随降雨量的增大,计划烧除小区和未烧除小区的产沙量总体均呈增加趋势,且计划烧除小区的增幅远大于未烧除小区。经单因素分析,计划烧除小区和未烧除小区的泥沙产量在 0.05 水平上呈显著差异。因此,多年连续计划烧除显著促进坡面泥沙产生。



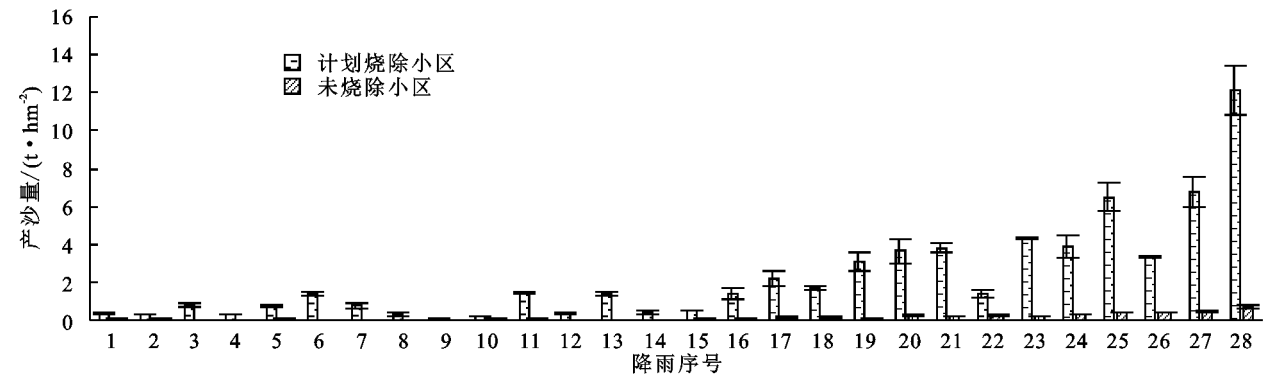


图 4 计划烧除和未烧除小区的产沙特征

随着降雨等级的增大,计划烧除小区产生的泥沙量分别是未烧区的 15.39,15.22,13.48,17.13 倍,则体现计划烧除促进泥沙流失的降雨等级排序为:暴雨>小雨>大雨>中雨(表 3)。用计划烧除小区和未烧除小区各降雨等级的泥沙数据进行配对样本 T 检验(检测期间只有一场暴雨,不进行 T 检验),见表 5。经 T 检验证实,计划烧除小区小雨、中雨、大雨与未烧除小区的泥沙产量在 0.05 水平上差异性显著。分析表明,经过计划烧除,小雨、中雨、大雨均显著地促进泥沙产生,且小雨比中雨、大雨产生的差异更显著,因此小雨最能体现计划烧除促进泥沙产生。

表 5 计划烧除小区和未烧除小区产沙的差异显著性检验

降雨等级	降雨次数	差异平均值	t 值	显著性(双尾)
小雨	15	0.58	4.864	0.000
中雨	9	2.64	7.041	0.000
大雨	3	5.11	4.657	0.043

2.3 计划烧除对降雨、径流、泥沙关系的影响

2.3.1 径流和降雨的关系 坡面径流的产生与降雨特征密切相关,降雨特征因子包括降雨量、雨强等。将 28 场产流降雨的数据作为样本,径流量分别与降雨量、 $I_{15}$ (最大 15 min 雨强)、 $I_{30}$ (最大 30 min 雨强)、 $I_{60}$ (最大 60 min 雨强)进行皮尔逊相关分析,计划烧除后径流与降雨特征的相关性见表 6。

表 6 径流和降雨的相关性分析

类别	降雨量	$I_{15}$	$I_{30}$	$I_{60}$
计划烧除小区径流深	0.927 **	0.485 **	0.580 **	0.565 **
未烧除小区径流深	0.980 **	0.469 *	0.529 **	0.557 **

注: \* 表示  $p < 0.05$ ; \*\* 表示  $p < 0.01$ ,下同。

由表 6 可知,计划烧除小区和未烧除小区的径流与降雨量均呈极显著相关,相关系数分别为 0.927,0.980;计划烧除小区径流与  $I_{15}$ , $I_{30}$ , $I_{60}$  均呈极显著相关,其中与  $I_{30}$  的相关系数最高,相关系数为 0.580;未烧除小区径流与  $I_{15}$  呈显著相关,与  $I_{30}$ , $I_{60}$  呈极显著相关,其中与  $I_{60}$  的相关系数最高,相关系数为 0.557。因此,计划烧除并未改变径流与降雨特征的相关关系,径流主要

与降雨量相关,与各时段雨强的相关系数较低。

分析计划烧除对坡面径流量的影响,先对计划烧除小区和未烧除小区的径流深与降雨量运用多项式、指数、幂函数、线性等多种数学分析方法进行模型拟合,再加入  $I$  因子进行模型拟合,得到的最优模型见表 7。

表 7 径流深和降雨特征值的关系回归模型

径流深	数学表达式	决定系数 $R^2$
计划烧除小区	$W=0.001H^2+0.131H-0.03$	0.864
	$W=0.051H^{1.104}I_{15}^{0.236}$	0.883
	$W=0.042H^{1.088}I_{30}^{0.351}$	0.899
	$W=0.053H^{1.113}I_{60}^{0.290}$	0.885
未烧除小区	$W=-7.609H^2+0.033H-0.077$	0.962
	$W=-0.055+0.028H+0.001I_{15}$	0.909
	$W=-0.055+0.028H+0.001I_{30}$	0.960
	$W=-0.057+0.028H+0.002I_{60}$	0.960

注:W 表示径流深;H 表示降雨量; $I_{15}$ 、 $I_{30}$ 、 $I_{60}$  分别表示最大 15 min 雨强、最大 30 min 雨强、最大 60 min 雨强,下同。

计划烧除小区和未烧除小区的径流与降雨量呈多项式关系最为密切,决定系数分别为 0.864,0.962。未烧除之前,径流与降雨呈线性关系最为密切,且决定系数在 0.909 以上。经过计划烧除,径流与降雨呈幂函数关系最为密切,且决定系数在 0.883 以上。表明增加相同单位的降雨量,计划烧除小区的径流增加量比未烧除小区的多。

2.3.2 泥沙与降雨、径流的关系 坡面产沙量与土壤结构、地形因素、降雨特征、植被覆盖等因素有关,经过计划烧除,土壤斥水能力提高<sup>[14]</sup>,植被及枯落物持水性能减弱,则相同地形、降雨条件下,计划烧除会改变泥沙与降雨的关系。坡面产沙量与降雨特征密切相关,计划烧除与未烧除小区的坡面产沙量与降雨特征因子( $H$ ,  $I_{15}$ ,  $I_{30}$  和  $I_{60}$ ),径流( $W$ )的相关性见表 8。计划烧除与未烧除小区的坡面产沙量与  $H$ ,  $I_{15}$ ,  $I_{30}$  和  $I_{60}$  均在 0.01 水平上显著相关,且与  $H$ ,  $W$  相关性较好。

分析计划烧除对坡面产沙量的影响,对计划烧除小区和未烧除小区的产沙量与  $H$ 、时段雨强和径流分别运用多项式、指数、幂函数、线性等多种数学分析方法进行模型拟合,得出计划烧除与未烧除小区的数学最优模

型,根据实测资料,计划烧除小区、未烧除小区的产沙量与降雨量、雨强的回归方程及决定系数见表 9。

表 8 产沙与降雨的相关性分析

类别	降雨量	径流深	$I_{15}$	$I_{30}$	$I_{60}$
计划烧除小区泥沙量	0.956 <sup>**</sup>	0.972 <sup>**</sup>	0.505 <sup>**</sup>	0.581 <sup>**</sup>	0.599 <sup>**</sup>
未烧除小区泥沙量	0.984 <sup>**</sup>	0.988 <sup>**</sup>	0.501 <sup>**</sup>	0.565 <sup>**</sup>	0.579 <sup>**</sup>

表 9 泥沙量和降雨特征值的关系回归模型

泥沙量	数学表达式	决定系数 $R^2$
计划烧除小区泥沙量	$S = -0.527 + 0.199H$	0.911
	$S = 0.041H^{1.169}I_{15}^{0.278}$	0.943
	$S = 0.04H^{1.155}I_{30}^{0.336}$	0.951
	$S = 0.04H^{1.178}I_{60}^{0.372}$	0.951
	$S = 0.209H^{0.617}I_{15}^{0.135}W^{0.474}$	0.968
	$S = 0.198H^{0.647}I_{30}^{0.151}W^{0.443}$	0.968
	$S = 0.172H^{0.678}I_{60}^{0.214}W^{0.418}$	0.971
	$S = -0.029 + 0.013H$	0.967
未烧除小区泥沙量	$S = 0.006H^{1.092}I_{15}^{0.107}$	0.969
	$S = 0.006H^{1.082}I_{30}^{0.144}$	0.971
	$S = 0.006H^{1.091}I_{60}^{0.156}$	0.971
	$S = 0.078H^{0.405}I_{15}^{0.083}W^{0.647}$	0.985
	$S = 0.073H^{0.415}I_{30}^{0.107}W^{0.630}$	0.986
	$S = 0.070H^{0.447}I_{60}^{0.099}W^{0.608}$	0.985

由表 9 可知,泥沙与降雨量呈线性关系,决定系数在 0.911 以上。泥沙与降雨量、时段雨强呈幂函数关系,决定系数在 0.943 以上。泥沙与降雨量、雨强、径流呈幂函数关系,决定系数在 0.968 以上。分析表明,计划烧除不会改变泥沙与降雨、径流的关系。可见多年连续计划烧除改变了林地水文特征,导致径流挟带泥沙的能力增强,才使计划烧除小区的径流泥沙比未烧除小区多。

3 讨论

3.1 计划烧除对坡面径流泥沙的影响

地表覆盖的数量是对入渗、径流和侵蚀的重要控制。本研究发现,小雨与中雨、大雨相比,小雨是最能凸显计划烧除促进坡面径流泥沙产生。这是因为在未烧除林地,地表覆盖通过降雨拦截、增加土壤有机质和促进生物活性来保持高孔隙度、防止土壤封闭和增加表面粗糙度等机制增加了入渗,减少了径流,减少了侵蚀<sup>[19]</sup>,导致未烧除林地下小雨时产流量极少,反之计划烧除林地缺乏这些机制而极易发生水土流失。调查发现,经过计划烧除,径流泥沙量与土壤裸露面积呈正相关<sup>[16]</sup>。本研究中,计划烧除前枯落物有 2.24 t/km<sup>2</sup>,计划烧除清除了灌木和草本,林下只有剩余燃烧物 0.05 t/km<sup>2</sup>(表 1),由于地表裸露造成计划烧除林地的径流泥沙量比未烧除林地多,这与以往研究结果一致,计划烧除促进坡面径流泥沙产生<sup>[20]</sup>。这是因为计划烧除燃烧灌木丛及地表植被,

通过降低地表覆盖、土壤渗透性及抗蚀性来促进坡面径流泥沙产生。首先,计划烧除降低了地表植被及枯落物的水土保持功能;再者,火烧使土壤温度升高造成水稳性团粒含量降低,容重增加,土壤分散率和侵蚀率增大,土壤抗蚀性下降<sup>[21]</sup>;其次,计划烧除提高了土壤斥水能力,导致林地土壤稳定入渗速率下降<sup>[22]</sup>。可见调节林下植被及枯落物、维持土壤良好结构对减少坡面水土流失具有重要意义。

本研究雨季计划烧除林地产沙量为 63.54 t/km<sup>2</sup>,可推测侵蚀模数远小于国家规定的 200 t/(km<sup>2</sup>·a)的最低允许流失量标准,何况水土流失还与坡度有关,在低坡度地区无论火烧强度如何,其对水土流失的影响不显著<sup>[23]</sup>。因此,在低坡度林地实施计划烧除引起的水土流失是能被接受的,并且计划烧除能减少林内可燃物,预防森林火灾的发生,但实施计划烧除的周期还有待研究。

3.2 计划烧除对水沙关系的影响

降雨是坡地发生水土流失的主要驱动因子,泥沙在降雨转化的径流作用下发生剥离、搬运和沉积作用,发生水土流失<sup>[24]</sup>。本研究中,计划烧除小区和未烧除小区的径流深、泥沙量分别与降雨量、各时段雨强均呈显著正相关,其中径流深与各时段雨强呈现较弱的相关性,与降雨量的相关性最高,这与李宗勋等<sup>[25]</sup>人的研究结果一致。这可能是因为自然降雨雨强不稳定所致。有研究表明,自然降雨事件的雨强多变,无法反映降雨过程的集中程度,因而反映雨强对坡面产流量的影响方面具有一定限制性<sup>[26]</sup>。

林分、地形、坡度、地被层等因子对坡面径流泥沙的产生有着重要影响。田波等<sup>[27]</sup>研究金沙江干热河谷不同处理坡面的产流产沙规律发现,径流与降雨、产沙与降雨均呈幂函数关系,并且马铃薯地、玉米地、裸地径流深与降雨也均呈较好的幂函数关系,泥沙流失量也表现出相似趋势<sup>[28]</sup>,与本文计划烧除小区的研究结果一致。说明计划烧除作为影响森林的重要生态因子,对林地坡面径流泥沙的产生与其他处理方式具有相似性。而未烧除小区的径流与降雨呈多项式关系,也是因为各个生态因子不同于金沙江干热河谷所致。

4 结论

(1) 2019 年研究区降雨量为 568.6 mm,仅为多

年平均降雨量 939.79 mm 的 60.5%,降雨主要集中在雨季 5—10 月,雨季降雨量占年降雨总量的 73.8%。雨季降雨 51 场次,其中产流降雨 28 场,占雨季降雨总量的 93.7%。

(2) 多年连续计划烧除增强了降雨转化为林地坡面径流的能力,且小雨最能凸显计划烧除显著促进林地坡面径流泥沙产生。

(3) 计划烧除小区和未烧除小区的径流主要与降雨量显著相关,计划烧除小区的径流与降雨呈幂函数关系,未烧除小区的径流与降雨呈多项式关系。

(4) 计划烧除小区和未烧除小区的泥沙均主要与降雨量、径流量显著相关,且泥沙与降雨、径流的关系均呈幂函数形式。

#### 参考文献:

- [1] 王艳霞,李承胜,丁琨,等.基于 GIS 空间分析的森林防火蓄水池选址[J].安全与环境学报,2015,15(2):151-154.
- [2] 马爱丽,李小川,王振师,等.计划烧除的作用与应用研究综述[J].广东林业科技,2009,25(6):95-99.
- [3] 王金锡,马志贵,牟克华,等.云南松森林计划烧除试验研究(之一)[J].森林防火,1993,36(1):9-13.
- [4] 周道玮,李晓波.草地计划火烧理论与技术[J].中国草地,1996(4):71-74.
- [5] 陶庆,王兰新,郭贤明,等.计划烧除对西双版纳保护区思茅松林的影响[J].林业调查规划,2013,38(5):89-94,99.
- [6] Short M F, Stambaugh M C, Dey D C. Prescribed fire effects on oak woodland advance regeneration at the prairie-forest border in Kansas, USA [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2019,49(12):1570-1579.
- [7] 王健敏,李帅锋,徐凡迪,等.计划烧除对思茅松天然林群落结构与物种多样性的影响[J].西北林学院学报,2020,35(1):62-67.
- [8] 田荣,陈奇伯,黎建强,等.计划烧除对云南松林土壤微生物及酶活性的影响[J].生态环境学报,2020,29(4):695-701.
- [9] 刘发林,曾素平.计划烧除对马尾松人工中龄林土壤的短期影响[J].土壤通报,2017,48(5):1025-1031.
- [10] 张文文,闫想想,王秋华,等.计划烧除对云南松纯林可燃物的影响[J].消防科学与技术,2020,39(6):750-753.
- [11] 王丽,千葉喬三.山地林火烧迹地水土流失动态变化的研究[J].水土保持研究,2007,14(6):44-47.
- [12] Cawson J G, Nyman P, Smith H G, et al. How soil temperatures during prescribed burning affect soil water repellency, infiltration and erosion[J]. Geoderma, 2016,278:12-22.
- [13] Pierson F B, Moffet C A, Williams C J, et al. Prescribed-fire effects on rill and interrill runoff and erosion in a mountainous sagebrush landscape[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2009,34(2):193-203.
- [14] 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.
- [15] Hueso-González P, Martínez-Murillo J F, Ruiz-Sinoga J D. Prescribed fire impacts on soil properties, overland flow and sediment transport in a Mediterranean forest: A 5 year study[J]. Science of the Total Environment, 2018,636:1480-1489.
- [16] Johansen M P, Hakonson T E, Breshears D D. Post-fire runoff and erosion from rainfall simulation: contrasting forests with shrublands and grasslands [J]. Hydrological Processes, 2001,15(15):2953-2965.
- [17] 涂宏涛,李华,张成程,等.基于森林资源连续清查数据的西南地区云南松林分生长模型研究[J].林业调查规划,2020,45(4):18-22.
- [18] Fernández C, Vega J A, Fonturbel T, et al. Immediate effects of prescribed burning, chopping and clearing on runoff, infiltration and erosion in a shrubland area in Galicia(NW Spain)[J]. Land Degradation & Development, 2008,19(5):502-515.
- [19] Isaac J. Larsen, Lee H. MacDonald, Ethan Brown, et al. Causes of Post-Fire Runoff and Erosion: Water Repellency, Cover, or Soil Sealing? [J]. Soil Science Society of America Journal, 2009,73(4):1393-1407.
- [20] 马志贵,鄢武先,杨道贵,等.计划烧除引起水土流失的定量研究[J].四川林业科技,2000,21(1):7-12.
- [21] 俞新妥,杨玉盛.林火与水土流失[J].世界林业研究,1992,5(3):30-35.
- [22] Plaza-Lvarez P A, Lucas-Borja M E, Sagra J, et al. Changes in soil water repellency after prescribed burnings in three different Mediterranean forest ecosystems[J]. Ence of the Total Environment, 2018,644:247-255.
- [23] Tufekcioglu M, Saglam B, Tufekcioglu A. Effects of fire intensity and slope on surface soil erosion following a prescribed fire in old Pinus nigra stands[J]. Fresenius Environ. Bull, 2017,26(12):7227-7234.
- [24] Defersha M B, Quraishi S, Melesse A. The effect of slope steepness and antecedent moisture content on interrill erosion, runoff and sediment size distribution in the highlands of Ethiopia [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011,15(7):2367-2375.
- [25] 李宗勋,李启艳,侯晓龙,等.不同自然降雨等级下不同郁闭度马尾松林的水土流失特征[J].水土保持学报,2020,34(1):27-33,40.
- [26] 肖婧.黄土丘陵沟壑区撂荒草地产流产沙特征研究[D].陕西杨凌:中国科学院大学:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2020.
- [27] 田波,陈奇伯,王克勤.金沙江干热河谷不同处理坡面的产流产沙规律研究[J].西南林学院学报,2006,26(6):44-48.
- [28] 周晗,严俊霞,李洪建,等.晋西黄土区坡耕地不同下垫面水土流失对侵蚀性降雨的响应[J].水土保持研究,2019,26(4):7-12.