

计划烧除对云南松林枯落物蓄积特征及持水性能的影响

赵雨田¹, 陈奇伯^{1,2}, 黎建强^{1,2}, 杨建光³

(1.西南林业大学 生态与环境学院, 云南 昆明 650224;

2.西南林业大学 石漠化研究院, 云南 昆明 650224; 3.新平县县级自然保护区管护局, 云南 新平 653499)

摘要: [目的] 探讨计划烧除对枯落物蓄积特征及持水性的影响, 为科学实施森林计划烧除措施和评价计划烧除的生态环境效应提供理论支撑。[方法] 枯落物蓄积量采用样方调查法计算, 枯落物持水量采用室内浸泡法测定, 枯落物年输入动态调查采用野外定位收集器法。[结果] ① 计划烧除样地燃烧剩余物蓄积量为 3.84 t/hm², 仅为未烧除样地枯落物蓄积量的 21%; 未烧除样地枯落物蓄积量为 18.64 t/hm²。② 计划烧除样地燃烧剩余物最大持水量 14 t/hm², 未烧除样地分枯落物最大持水量 60.62 t/hm², 计划烧除和未烧除样地枯落物层持水量与浸泡时间符合对数函数关系, 枯落物层吸水速率与浸泡时间呈幂函数关系。③ 计划烧除和未烧除样地枯落物年输入总量相似, 最大输入量在 4 月, 占全年增加量的 20%~24%, 1 a 后计划烧除样地的有效持水量恢复到未烧除样地的 73%。[结论] 云南松林计划烧除后, 短期内枯落物蓄积量减少, 枯落物持水能力降低, 枯落物输入量无显著差别。

关键词: 计划烧除; 云南松林; 枯落物; 蓄积量; 持水性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)02-0099-06

中图分类号: S715.3

文献参数: 赵雨田, 陈奇伯, 黎建强, 等. 计划烧除对云南松林枯落物蓄积特征及持水性能的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 99-104. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.02.013; Zhao Yutian, Chen Qibo, Li Jianqiang, et al. Effects of prescribed burning on accumulation and water holding capacity of litters in *Pinus yunnanensis* forest [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 99-104.

Effects of Prescribed Burning on Accumulation and Water Holding Capacity of Litters in *Pinus Yunnanensis* Forest

Zhao Yutian¹, Chen Qibo^{1,2}, Li Jianqiang^{1,2}, Yang Jianguang³

(1.School of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224,

China; 2.Research Institute of Stony Desertification, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan

650224, China; 3.Management and Protection Bureau of Xinning County Nature Reserve, Xinning, Yunnan 653499, China)

Abstract: [Objective] The influence of prescribed burning on accumulation and water holding capacity of litters in *Pinus yunnanensis* forest was investigated, in order to provide a scientific basis for predicting the environmental effects of prescribed fire. [Methodes] The litter accumulation amounts and hydrological characters were tested and compared between the unburned and burned forests by prescribed fire. Litter accumulation amounts were obtained by field positioning collector methods and the hydrological character was investigate indoor immersion method. [Results] ① The volume of combustion residue after prescribed fire sample plot was 3.84 t/hm², which was only 21% of the volume of litter in the unburned sample plot, and the volume of litter in the unburned sample plot was 18.64 t/hm². ② The maximum water-holding capacity of forest litters after prescribed fire was 14 t/hm², which was significantly lower than that in unburned forest with the total maximum water-holding capacity of 60.62 t/hm². The water-holding capacity of the litter layer and soaking time in both unburned and prescribed burned sample land showed a significantly logarithmic relationship, and the immersion time and the absorption rate of forest litters showed a significantly

收稿日期: 2020-10-07

修回日期: 2020-12-07

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); 云南省教育厅科学研究资助项目(2020Y0389); 云南省高校土壤侵蚀与控制重点实验室建设项目[云教科(2016)37号]

第一作者: 赵雨田(1994—), 男(汉族), 辽宁省阜新市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。Email: zyt0099@126.com。

通讯作者: 陈奇伯(1965—), 男(汉族), 甘肃省通渭县人, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与恢复生态学方面的研究。Email: chenqb05@163.com。

power function relationship with the immersion time. ③ The maximum amount of litter input was in April, accounting for 20%—24% of the annual increase. After 1 year, the effective water-holding capacity in the prescribed burnt land was restored to 73%. [Conclusion] After the prescribed fire, the litter storage and the water holding capacity can decrease in short term. However, with the natural recovery, the water conservation of the litter of *Pinus yunnanensis* forest can gradually recover.

Keywords: prescribed burning; *Pinus yunnanensis* forest; accumulation; water-holding capacity

林火是森林生态系统中重要的干扰因子之一^[1],严重影响森林景观结构和功能^[2-7]。计划烧除与火灾不同,它作为一种消防策略,能降低干旱季节易发生火灾天气增加所带来的潜在威胁^[8]。另一方面,计划烧除的低强度和局部火干扰有利于森林群落自我更新,稳定森林生态系统平衡^[9-11]。国外针对计划烧除做了很多研究,主要关注计划烧除后森林的自然更新^[12]、计划烧除对森林生物量输入及养分输入等^[13]方面,国内有关计划烧除的研究主要在计划烧除的实施^[14]、计划烧除对土壤理化性质影响等^[15]。森林枯落物是森林生态系统的重要组成部分,森林植被产生大量枯枝落叶,堆积在地表,经过自然变化和微生物作用,形成一层像海绵一样的地被物,这些地被物具有强大的吸水能力和透水性,能够减少土壤蒸发,阻延径流的汇集,防止水土流失,在森林植被的水源涵养功能方面有着十分重要的作用^[16]。大量研究^[17-18]表明,枯落物持水性能是影响其在森林水文循环中水源涵养能力的重要因素,而枯落物蓄积量是影响枯落物持水性能的重要指标。计划烧除对森林的直接影响就是减少林内可燃物的积累。计划烧除直接减少了森林枯落物的蓄积量,对枯落物持水性能造成影响。云南松(*Pinus yunnanensis*)是云南省的乡土树种,多形成大面积纯林或与其他树种组成混交林,是西南地区主要用材树种之一,也是云贵高原常见的针叶树种。云南松针叶富含油脂,极易燃烧引发森林火灾。云南省多地在云南松林地开展计划烧除工作达二十多年,取得了良好的防火效果。随着全球变暖,火灾的数量和燃烧的面积预计会增加^[19],计划烧除实施的必要性也更加凸显。有关云南松林枯落物的水文效应研究已有很多报道^[20-21],针对计划烧除对云南松林枯落物水源涵养特性研究也将是一个持续的热点,本研究结果可为计划烧除对云南松林水文特征影响评价提供重要依据。

1 研究区概况

研究地点位于云南省玉溪市新平县照壁山,照壁山地处北纬 24°2′38″—24°2′41″、东经 102°0′7″—102°0′8″,平均海拔 1 990~2 050 m,是云南省亚热带北部与亚热带南部的过渡地带。根据当地气象部门资料,研究区近 50 a 多年平均降水量为 958 mm,降水量的年际变化较大,其中最大降水量出现在 1971 年,为 1 264 mm,最小降水量出现在 1979 年,为 614 mm。研究区干湿季分明,降水主要集中在湿季 5—10 月,占年降水量的 40%。研究期 2019 年的年降水量为 1 097 mm,月最大降水量出现在 7 月,为 183 mm,月最小降水量出现在 3 月,为 15.4 mm。研究区年平均气温 18.1 ℃,极端最高气温 32.8 ℃,最低气温 1.3 ℃。照壁山的云南松林为 20 世纪 80 年代飞播造林后经自然稀疏、抚育管理形成的人工林,林相为单层林,树种为云南松纯林,代表性土壤为红壤。照壁山每年 1 月底至 2 月中旬进行计划烧除,30 a 从未间断,2019 年 2 月 12—13 日实施了 2019 年度森林防火计划烧除工作,计划烧除火焰高度 1.5 m,属低强度火烧^[14],火烧过后云南松林下草本灌木全部烧成灰烬,云南松生长受到一定影响。

2 研究方法

2.1 样地选取

研究对象选择云南松人工林计划烧除样地与未烧除样地进行对比,两个样地均位于坡中上部,计划烧除样地与未烧除样地中间间隔一条防火通道。云南松林的林龄平均为 30 a,树高、胸径、郁闭度、盖度等详见表 1。土层厚度大于 1 m,土壤以红壤为主。未烧除样地的灌木主要有木荷(*Schima superba*)、大白杜鹃(*Rhododendron decorum*)等,草本主要有紫金泽兰(*Chalcites xanthorhynchus limborgi*)、贯众(*Cyrtomium fortunei*)、毛茛(*Ranunculus japonicus*)等。

表 1 样地类型和林分特征

样地类型	林分类型	坡度/(°)	树高/m	胸径/cm	乔木郁闭度/%	总盖度/%
计划烧除样地	云南松人工林	15	12.24	16.93	46	50
未烧除样地	云南松人工林	18	12.34	17.05	45	89

2.2 调查方法

在未烧除样地与计划烧除样地均设置 6 个间隔超过 100 m 的 20 m×20 m 的标准样地,标准样地内树高的测定采用布鲁莱斯测高器测量,树胸径采用胸径尺测量,林分郁闭度采用样点观测法,林分盖度用采样刺针法测定。在每块标准样地内四角和中间共选取 5 个大小为 50 cm×50 cm 的枯落物样方,仔细去除活地被物,收集样方内所有的未分解、半分解和完全分解层的枯落物,计划烧除样地枯落物无法分层,收集燃烧剩余物。从 2019 年 5 月 1 日当地进入雨季开始,采用收集器法观测枯落物蓄积动态。在每个标准样地四角及中心位置布设面积为 1 m×1 m 的正方形枯落物收集器(底部为孔径 1 mm 的尼龙网),距离地面高度 0.5 m 左右,共计 30 个。每月收取一次枯落物,将收集的枯落物带回室内,在 65 ℃ 下烘至恒重,以此计算年枯落物蓄积量及月输入量。

2.3 枯落物持水性的测定

采用室内浸泡法,称取 50 g 风干后的枯落物样品分别装入已称重的尼龙网袋,再将装有枯落物的尼龙网袋放入盛有清水的容器中完全浸没,分别浸泡 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 24 h 后,捞起网袋并静置不滴水时称重,每次称量所得枯落物湿重与干重的差值,即为枯落物样品在不同浸泡时长的持水量,并由此计算各时间段的吸水速率、最大持水量、有效持水量。

2.4 枯落物有效持水量的计算

枯落物有效持水量(W_E , t/hm²)采用以下公式计算:

$$W_E = W_{24} - W_N \quad (1)$$

式中: W_{24} 表示枯落物浸泡 24 h 时得到的最大持水量(t/hm²); W_N 表示枯落物的自然含水量(t/hm²)。

2.5 数据统计

采用 Excel 2016 和 SPSS 25 软件进行数据处理和做图,由原始数据拟合得到的多元回归关系经统计学检验得到拟合度参数 R^2 ,并在 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 的水平检验显著性。

3 结果与分析

3.1 计划烧除对枯落物蓄积量的影响

计划烧除使云南松林地表枯落物燃尽,只剩下燃烧剩余物。未烧除样地枯落物由于多年自然输入、自然腐殖质化,呈现明显的分层结构,将枯落物层划分为未分解层、半分解层和完全分解层。本研究在计划烧除作业完成的当月底对研究区的枯落物储量进行测定,测定结果详见表 2。由表 2 可知,计划烧除后从总量上来看未烧除样地远高于计划烧除样地,计划烧

除样地的蓄积量是未烧除样地的 21%。未烧除样地完全分解层占总蓄积 47.95%,说明自然状态下的云南松林枯落物大部分为分解状态蓄积在地表。

表 2 不同林分枯落物储量特征

林分类型	枯落物层	蓄积量/ (t·hm ⁻²)	比例/ %
计划烧除样地	燃烧剩余物总量	3.84±1.03 ^c	100
	未分解层	6.01±1.07 ^b	32.31
未烧除样地	半分解层	3.65±2.08 ^c	19.74
	完全分解层	8.98±2.91 ^a	47.95
	合计	18.64±4.77	100

注:不同字母表示两种林分枯落物蓄积量差异显著性($p < 0.05$),图表中数据均用平均值±标准差表示。下同。

3.2 计划烧除对枯落物持水量的影响

自然含水量是反映植物枯落物吸持水分的重要指标之一,其表征着枯落物吸持水分强弱和保水、涵养水源功效的显著与否,因此将最大持水量与自然含水量的差值作为枯落物实际吸持水分的大小即有效持水量^[23]。计划烧除使地表枯落物组成发生改变,这使计划烧除样地枯落物层的自然含水量及有效持水量发生改变,具体改变情况详见表 3。由表 3 可知,未烧除样地枯落物自然含水率是计划烧除样地的 6.39 倍,分层来看,计划烧除样地的燃烧剩余物自然含水率均低于未烧除样地各枯落物层,与未分解层和完全分解层的差异不显著,与半分解层的自然含水率差异显著。未烧除样地的最大持水量高于计划烧除样地,是计划烧除样地的 4.29 倍。计划烧除样地燃烧剩余物最大持水量低于未烧除样地的各个枯落物层,但燃烧剩余物的最大持水量与未烧除样地未分解层和半分解层差异不显著,未烧除样地完全分解层枯落物最大持水量最高 27.46 t/hm²,其最大持水量与燃烧剩余物的差值达到了 13.46 t/hm²,可见枯落物层的分解也很大影响了枯落物层的持水能力。有效持水量的变化与最大持水量的规律相近。

表 3 不同枯落物层持水量

林分类型	枯落物层	自然含 水率/%	最大持水量/ (t·hm ⁻²)	有效持水量/ (t·hm ⁻²)
计划烧除样地	燃烧剩余物总量	6.22 ^a	14.00 ^a	13.76
	未分解层	32.59 ^{bd}	16.93 ^a	15.29
未烧除样地	半分解层	51.85 ^c	16.23 ^a	14.35
	完全分解层	34.85 ^d	27.46 ^b	24.38
	合计	39.76	60.62	54.02

3.3 计划烧除对枯落物吸水过程的影响

计划烧除的燃烧剩余物中除了未烧尽的枝叶外

加入了灰分粗木质残体等物质,所以燃烧剩余物的组成更加复杂,这会导致燃烧剩余物在吸水过程中发生变化,变化情况如图 1 所示。计划烧除和未烧除样地枯落物持水量均与浸泡时间呈极显著对数函数关系 ($R^2 > 0.786, p < 0.01$)。由图 1 可知,未烧除样地枯落物层各时间段持水量均不同程度高于燃烧剩余物,未烧除样地枯落物分解层远远高于其他枯落物层,这主要是因为枯落物分解层虽然基本保留了枯落物形态,但是大都是半降解状态,具有较强的亲水性,有利于枯落物对水分的吸收;这也解释了枯落物层在前 1 h 迅速增加,占 73.09%~87.44%,而计划烧除样地燃烧剩余物由于枯落物在火烧过后大部分碳化变质,水分只能从表面孔隙进入,因而持水过程相对较缓慢且持水量更小。

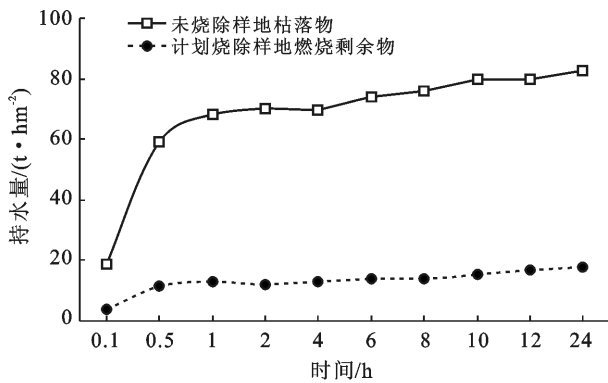


图 1 不同枯落物层持水量随时间变化的关系

由图 2 可知,对不同枯落物层吸水速率与浸水时间的数据拟合发现,枯落物吸水速率与浸水时间呈幂函数关系 ($R^2 > 0.774, p < 0.01$)。未烧除样地枯落物未分解和半分解层吸水速率变化过程极其相似,其持水过程曲线基本重合,在 1 h 之前吸水速率下降十分明显,之后明显放缓并趋近于 0。分解层持水速率变化过程在 1 h 前与未分解和半分解层相似,但直至 2 h 后明显放缓,计划烧除样地的燃烧剩余物吸水速率在 0—1 h 间不断下降,所有枯落物层在 4 h 后均趋近于 0。对于枯落物层吸水速率,初期为未烧除样地完全分解层 $38.94 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h}) >$ 未分解层 $22.01 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h}) >$ 半分解层 $19.78 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h}) >$ 燃烧剩余物 $15.2 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$,差异较大。在 2 h 后,所有枯落物层的吸水速率均已达到饱和而逐渐趋近于 0。

3.4 计划烧除对枯落物输入动态及持水性能的影响

3.4.1 计划烧除后枯落物蓄积动态变化 计划烧除后从当年雨季开始两个样地枯落物输入结果如图 3 所示,图 3 中每月时间按平均值 30.3 d 计算,保持每月时间相等。计划烧除样地枯落物的年输入总量为

$6.6 \text{ t}/\text{hm}^2$,未烧除样地总量为 $6.71 \text{ t}/\text{hm}^2$ 。由图 3 可以看出,计划烧除样地和未烧除样地枯落物蓄积量呈“单峰型”变化,峰值均出现在 4 月,计划烧除样地的凋落峰值 $1.23 \text{ t}/\text{hm}^2$,占整年输入量的 20%,未烧除样地的凋落峰值为 $1.56 \text{ t}/\text{hm}^2$,占年输入量的 24%。在计划烧除次年的 1 月前,计划烧除样地的凋落量是未烧除样地 $0.94 \sim 1.59$ 倍,在 1 月份后未烧除样地凋落量是计划烧除样地的 $1.27 \sim 1.32$ 倍。计划烧除的林火加速了云南松针叶的凋落,未凋落的针叶也受到一定影响。后期受新生长季新枝萌发和春季大风天气影响,计划烧除样地枯落物输入量反而开始降低,比未烧除样地减少。

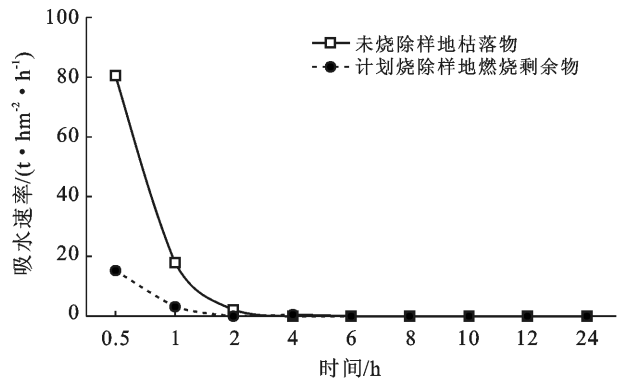


图 2 不同枯落物层吸水速率随时间变化关系

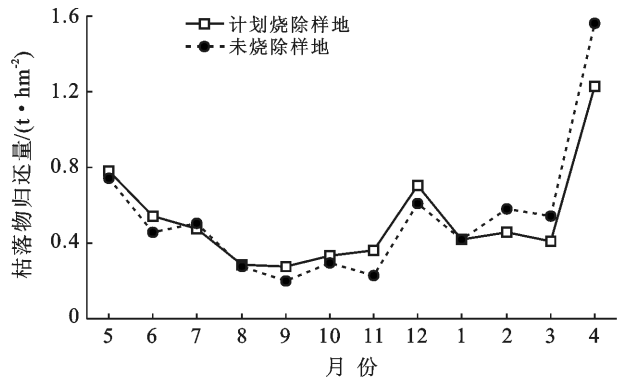


图 3 计划烧除样地和未烧除样地枯落物蓄积量月变化动态

3.4.2 计划烧除对枯落物持水性能动态的影响 计划烧除后由于枯落物的蓄积量下降,枯落物层的拦蓄雨水能力也一同下降,但随着云南松的自然快速恢复,计划烧除样地的枯落物持水性能也在恢复。计划烧除和未烧除样地的枯落物有效持水量变化动态如图 4 所示,在计划烧除之后林内枯落物层的有效持水量变小,计划烧除样地仅为未烧除样地的 39%。未烧除样地枯落物有效持水量匀速增长,1 a 后的有效持水量是初始的 2.33 倍,而计划烧除样地有效持水量在 1 a 后是初始的 4.27 倍,此时计划烧除样地的有

效持水量已经恢复到未烧除样地的72%。这表明了云南松林在自然状态下的枯落物有效持水量是一个逐步升高的过程,而在进行计划烧除后虽然枯落物有效持水量急剧下降,但随着枯落物层的自然恢复,枯落物层的降雨截持能力也在恢复。

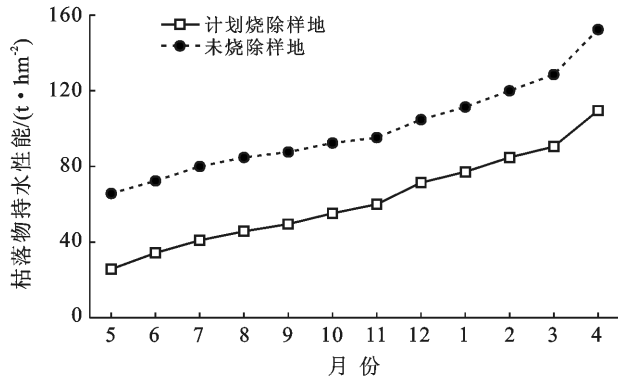


图4 计划烧除和未烧除样地总有效持水量变化动态

4 讨论

4.1 计划烧除对枯落物蓄积量的影响

枯落物的输入量、分解速度受林分类型、植被成长、气候条件等要素影响,因此不同森林类型的枯落物蓄积量有所差异^[23]。本研究结果表明,计划烧除后云南松林枯落物蓄积量显著低于未烧除样地,研究结果与张引对枯落物层蓄积特征的研究结果一致^[24]。林内枯落物一部分为自然凋落,另一部分为自然积存,经过长时间的分解,大部分都已达到分解状态。

4.2 计划烧除对枯落物持水能力的影响

森林枯落物的持水能力是整个森林生态系统水分循环中的重要一环,也是林地枯落物水文特性的重要指标^[16]。云南松未烧除样地的自然含水量总量和最大持水量总量均高于计划烧除样地,主要原因是计划烧除减少了枯落物蓄积量同时还改变了枯落物的组成。未烧除样地未分解层、半分解层和完全分解层的最大持水量均高于燃烧剩余物。特别是未烧除样地中最大持水量完全分解层最高,这与唐禾等^[25]的研究结果一致。本研究发现,计划烧除使云南松林枯落物有效持水量减小,未烧除样地的枯落物未分解层有效持水量最大,这与王玲等^[26]对枯落物层持水量的研究结果一致,因此计划烧除后云南松林枯落物的降雨拦截能力下降是由于枯落物层的自然含水量、最大持水量、有效持水量降低所致。

4.3 计划烧除对枯落物吸水速率的影响

各层枯落物持水量在初阶段增加较快,随着浸水

时间的延长,持水量增速减缓,最终达到饱和状态。各层枯落物的吸水过程都符合对数函数关系,这与陈进等^[27]的研究结果相似。各层枯落物的吸水速率均表现为浸水前期的0—0.5 h内较高,在0.5—4 h阶段明显减小,最后趋于平缓,说明干燥枯落物的死细胞间或枝叶表面存在较大水势差,是引起初段吸水速率较大的原因^[28]。以上可说明计划烧除不利于枯落物吸水。

4.3 计划烧除对枯落物层蓄积动态及持水性能动态的影响

在计划烧除后两个样地枯落物的蓄积动态呈“单峰型”规律,峰值的掉落量占全年的20%~24%,张雨雪等^[29]对红树林凋落物产量研究发现秋茄凋落物产量具有明显的季节变化规律,呈“双峰型”,峰值出现在5月和8月,出现这种差异可能由于树种自身生物特性导致凋落物季节变化规律不同。计划烧除后,地表枯落物燃烧殆尽,在计划烧除进行后初期由于林火的高温影响云南松生长,在一段时间过后,计划烧除样地内云南松新叶已焕发完毕,但其丰茂程度不及未烧除样地,所以凋落量较未烧除样地更低。

本研究结果表明,计划烧除后枯落物有效持水量仅为未烧除样地的39%,这是由于计划烧除的林火直接减少了枯落物的蓄积量,并且计划烧除后的燃烧剩余物组成复杂,虽然仍保持着枯落物吸持雨水的主要能力但在吸持水量上较差,这也证实了枯落物有效持水量不仅与枯落物的蓄积量、自然含水率有关,还与枯落物组成、分解情况、累计状况紧密相关。两种样地的有效持水量稳定增加,但计划烧除样地增速更快,这与两种样地枯落物的蓄积动态特征一致,在计划烧除进行1 a后有效持水量恢复到未烧除样地的72%,这是由于随着林内枯落物层的恢复,枯落物的输入分解逐渐恢复到自然状态,枯落物的吸持雨水特性也逐渐恢复。但计划烧除样地较未烧除样地仍有差距,但总体的趋势是计划烧除样地的蓄水能力是可以恢复到计划烧除前的水平。

5 结论

(1) 计划烧除使云南松林枯落物蓄积量减少,计划烧除样地总蓄积量 3.84 t/hm^2 是未烧除样地的21%,未烧除样地枯落物蓄积量为 18.64 t/hm^2 。

(2) 计划烧除后云南松林燃烧剩余物自然含水量为6.22%,最大持水量为 14 t/hm^2 ,低于未烧除样地自然含水量总量39.76%和最大持水量 60.62 t/hm^2 。两种样地枯落物层持水量和吸水速率与浸泡时间分别符合对数函数关系和幂函数关系。

(3) 两种林分的凋落动态呈“单峰型”变化,在初期计划烧除样地的凋落量是未烧除样地的 0.94~1.59 倍,末期末烧除样地的凋落量是计划烧除样地的 1.27~1.32 倍,二者的年归还总量相似;计划烧除后云南松林枯落物有效持水量降低为未烧除样地的 39%,经过 1 a 的恢复达到未烧除样地的 73%,未烧除样地 1 a 后有效持水量是初始的 2.33 倍,计划烧除样地 1 a 后的有效持水量是初始的 4.27 倍,计划烧除样地的拦蓄雨水能力逐渐恢复。

[参 考 文 献]

- [1] 胡海清,魏书精,魏书威,等.气候变暖背景下火干扰对森林生态系统碳循环的影响[J].灾害学,2012,27(4):37-41.
- [2] 杨达,吴志伟,梁宇,等.火干扰对森林碳库影响的量化研究进展[J].世界林业研究,2015,28(1):37-42.
- [3] 宋利臣,何平平,崔晓阳.重度林火对大兴安岭土壤生境因子的影响[J].生态学杂志,2015,34(7):1809-1814.
- [4] 杨健,孔健健,刘波.林火干扰对北方针叶林下植被的影响[J].植物生态学报,2013,37(5):474-480.
- [5] 韩春兰,邵帅,王秋兵,等.兴安落叶松林火干扰后土壤有机碳含量变化[J].生态学报,2015,35(9):3023-3033.
- [6] 罗旭,贺红士,梁宇,等.林火干扰对大兴安岭主要林分类型地上生物量预测的影响模拟研究[J].生态学报,2016,36(4):1104-1114.
- [7] 孙龙燕,李士美,李伟,等.林火对植物根围丛枝菌根真菌多样性的影响[J].生态学报,2016,36(10):2833-2841.
- [8] Fox D M, Martin N, Carrega P, et al. Increases in fire risk due to warmer summer temperatures and wildland urban interface changes do not necessarily lead to more fires [J]. Applied Geography, 2015,56:1-12.
- [9] 朱教君,刘足根.森林干扰生态研究[J].应用生态学报,2004,15(10):1703-1710.
- [10] Straaten O V, Doamba S W M F, Corre M D, et al. Impacts of burning on soil trace gas fluxes in two wooded savanna sites in Burkina Faso [J]. Journal of Arid Environments, 2019, 165: 132-140.
- [11] Serdar, Yowhan S, Ender, et al. Impacts of low-intensity prescribed fire on microbial and chemical soil properties in a Quercus frainetto forest [J]. Journal of Forestry Research, 2018,29(3):687-696.
- [12] Salverson W G, Walker R F, Fecko R M, et al. Influences of mechanized thinning and prescribed fire on natural regeneration in an uneven-aged Jeffrey pine stand [J]. Journal of Sustainable Forestry, 2011, 30(7): 654-676.
- [13] Muqaddas B, Lewis T. Temporal variations in litterfall biomass input and nutrient return under long-term prescribed burning in a wet sclerophyll forest, Queensland, Australia [J]. Science of The Total Environment, 2020, 706: 136035.
- [14] 王秋华,单保君,龚家平,等.滇中地区云南松纯林计划烧除研究[J].江西农业大学学报,2018,40(2):235-240.
- [15] 朱利英,赵春章,莫旭,等.计划烧除攀枝花苏铁林区地面覆盖物对苏铁生长和土壤理化性质的影响[J].应用与环境生物学报,2012,18(3):381-390.
- [16] 张东,邵社刚,赵辉.晋西黄土丘陵沟壑区主要人工林枯落物水文特性研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(5):97-101.
- [17] 兰亚男,孙旭,秦富仓,等.阴山北麓不同林分类型枯落物层持水性能研究[J].水土保持研究,2019,26(6):151-157.
- [18] 张志兰,郑云泽,于秀娟.重庆市几种常见经济林凋落物持水性能研究[J].中国水土保持,2019(2):59-62.
- [19] Moriondo M, Good P, Durao R, et al. Potential impact of climate change on fire risk in the Mediterranean area [J]. Climate Research, 2006,31(1):85-95.
- [20] 曾建军,史正涛.城市水源地 5 种森林枯落物水文效应特征[J].水土保持通报,2016,36(1):38-43.
- [21] 方斌,黄俊文,赵洋毅,等.滇中地区典型林分林地凋落物及土壤水文效应[J].防护林科技,2016(6):18-21.
- [22] 张宝琦,王忠禹,杨艳芬,等.黄土丘陵沟壑区典型灌木林地枯落物的蓄积特征及持水性能[J].水土保持通报,2019,39(4):76-81.
- [23] 孙欧文,蔡建国,吴家森,等.浙江省典型森林类型枯落物及林下土壤水文特性[J].水土保持研究,2019,26(1):118-123.
- [24] 张引,黄永梅,周长亮,等.冀北山地 5 个海拔梯度油松林枯落物与土壤水源涵养功能研究[J].水土保持研究,2019,26(2):126-131.
- [25] 唐禾,陈永华,张建国,等.抚育间伐对麻栎次生林枯落物持水性的影响[J].水土保持研究,2018,25(4):104-109.
- [26] 王玲,赵广亮,周红娟,等.八达岭林场不同密度油松人工林枯落物水文效应[J].生态环境学报,2019,28(9):1767-1775.
- [27] 陈进,徐明,邹晓,等.贵阳市不同林龄马尾松林凋落物储量及持水特性[J].水土保持研究,2018,25(6):146-151.
- [28] 赵鸿雁,吴钦孝.黄土高原几种枯枝落叶吸水机理研究[J].防护林科技,1996(4):15-18.
- [29] 张雨雪,胡伟芳,罗敏,等.闽江口秋茄凋落叶分解碳氮磷元素动态特征与水解酶活性[J].生态学报,2019,39(12):4242-4254.