

doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2023.06.026

云南松林土壤水文特征对计划烧除的响应

杨建光¹, 赵雨田², 黎建强², 杨学平³

(1. 新平县林业和草原局, 云南 新平 653499; 2. 西南林业大学 生态与环境学院, 云南 昆明 650224;
3. 新平县漠沙镇农业综合服务中心, 云南 新平 653499)

摘要:为探究计划烧除对云南松林土壤水文特征的影响,为计划烧除后森林生态系统服务功能评价提供依据,以云南省新平县实施多年计划烧除的云南松纯林为研究对象,设立 20 m×20 m 计划烧除样地和不进行计划烧除的自然对照样地各 3 块。2019 年 2 月实施计划烧除作业,进行样地调查、火烧强度和枯落物储量调查,2020 年 6 月采集土样,测定土壤物理、化学性质和土壤入渗性能。结果表明,计划烧除后土壤容重增加且在 0~10 cm 土层差异显著;毛管孔隙度和总孔隙度减少但差异不显著;有机质减少并在 0~20 cm 土层差异显著。计划烧除后土壤自然含水率、饱和持水率、毛管持水率和田间持水量减少但差异不显著;吸湿水量减少并且在 0~20 cm 土层差异显著。计划烧除后土壤初渗速率、土壤平均入渗速率和土壤稳定入渗率减少;土壤初渗速率和平均入渗速率在不同样地 0~20 cm 土层差异显著。计划烧除对土壤稳定入渗率的显著影响因素为土壤容重、孔隙度、有机质和饱和持水率。说明计划烧除后云南松林土壤持水性能下降,入渗性能下降,对于入渗性能的影响主要是源于土壤理化性质的改变。

关键词:土壤水文特征;土壤容重;土壤孔隙度;计划烧除;云南松林

中图分类号:S791.257;S714.4;S715.7;S762.8 文献标识码:A 文章编号:1671-3168(2023)06-0151-08

引文格式:杨建光,赵雨田,黎建强,等. 云南松林土壤水文特征对计划烧除的响应[J]. 林业调查规划,2023,48(6):151-158. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2023.06.026

YANG Jianguang, ZHAO Yutian, LI Jianqiang, et al. Response of Soil Hydrological Characteristics to Prescribed Fire in *Pinus yunnanensis* Forest[J]. Forest Inventory and Planning, 2023, 48(6):151-158. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2023.06.026

Response of Soil Hydrological Characteristics to Prescribed Fire in *Pinus yunnanensis* Forest

YANG Jianguang¹, ZHAO Yutian², LI Jianqiang², YANG Xueping³

(1. Xinning Bureau of Forestry and Grassland, Xinning, Yunnan 653499, China;
2. College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;
3. Moshan Center of Agricultural Comprehensive Service, Xinning, Yunnan 653499, China)

Abstract: The influence of prescribed fire on soil hydrological characteristics in *Pinus yunnanensis* forest was explored to serve as scientific basis of evaluating forest ecosystem services after prescribed fire. Series of prescribed fire were conducted on the *Pinus yunnanensis* forest in Xinning County during the past years. Six plots with size of 20 m×20 m were selected to investigate soil hydrological characteristics which

收稿日期:2022-05-05.

第一作者:杨建光(1969-),男,云南新平人,高级工程师.从事森林资源调查规划及森林资源保护工作.

included 3 in unburned forest and 3 in burned forest. In February 2019, the site investigation, fire intensity and litter storage were investigated after prescribed fire. In June 2020, soil samples were collected to determine soil physical and chemical properties and infiltration performance. The results showed that the bulk density of soil increased significantly in 0–10 cm soil layer after prescribed fire; the capillary porosity and total porosity decreased but not significantly; the organic matter decreased significantly in the 0–20 cm soil layer. Natural moisture content, saturated water capacity, capillary water capacity and field capacity decreased but not significantly after prescribed fire; hygroscopic water decreased significantly in 0–20 cm soil layer. After prescribed fire, the initial infiltration rate, average infiltration rate and stable infiltration rate descended; the initial infiltration rate and average infiltration rate had a significant difference in the 0–20 cm soil layer. Soil bulk density, porosity, organic matter and saturated water capacity were noticeable factors affecting the stable infiltration rate after prescribed fire. After conducting prescribed fire, soil water-holding capacity and infiltration capacity of *Pinus yunnanensis* forest were both lowered, which were mainly due to the change of soil physical and chemical property.

Key words: soil hydrological characteristics; soil bulk density; soil porosity; prescribed fire; *Pinus yunnanensis* forest

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,也是云贵高原上常见的主要针叶树种。云南松枝叶富含油脂,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。计划烧除的实施虽然能大幅降低森林火灾隐患,但容易引起水土流失、地力衰退等问题,多项研究证实其对环境的潜在风险^[1],如影响土壤理化性质和生态水文功能等。刘瑞斌等^[2]研究认为,森林火灾改变了土壤理化性质,短期内引起地力衰退;王丽红等^[3]研究发现,火灾后土壤水分入渗性能下降,水分入渗受土壤物理化学性质等的综合影响;Akihiro等^[4]研究认为,火烧改变了森林植被组成和土壤理化性质。由此可见,森林生态系统的土壤理化性质和水文特征受计划烧除或天然火灾的影响较大。前人的研究主要集中在计划烧除后土壤理化性质的变化,对于计划烧除后的土壤水文功能也仅关注土壤水指标的变化,有关土壤水文功能对计划烧除的响应研究较少。随着全球变暖,火灾的数量和燃烧的面积预计会增加^[5],计划烧除措施的必要性也更加凸显。本研究以云南松纯林计划烧除样地为研究对象,通过测定计划烧除样地与自然未烧除样地的土壤理化性质和水文功能指标,定量评价计划烧除后土壤水文功能变化及影响因素,为计划烧除区的森林生态系统功能评价提供依据。

1 材料与方法

1.1 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,多年平均降水量 1 050 mm,年平均气温 15℃。当地云南松林为 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 多年从未间断。2019 年 2 月 12—13 日实施了 2019 年度森林防火计划烧除工作。火焰高度 1.5 m。火烧过后云南松林下草本、灌木及枯落物全部烧成灰烬。

1.2 样地选取与土样采集

研究对象为云南松人工林计划烧除样地和对照自然样地,样地位于坡中上部,计划烧除样地与自然样地中间间隔一条防火通道。两个样地云南松林起源相同,林龄平均为 30 a,树高、胸径、郁闭度相似,土层厚度大于 1 m。自然样地的灌木主要有木荷 (*Schimasuperba* Gardn. et Champ.)、杜鹃 (*Rhododendron decorum* Fr.) 等,草本主要有紫茎泽兰、贯众 (*Cyrtomiumfortunei* J. Sm.)、毛茛 (*Ranunculus japonicus* Thunb) 等。

2020 年 6 月进行土壤样品的采集。在自然样地与计划烧除样地分别设置 3 个间隔超过 100 m 的

20 m×20 m 标准样地。在样地选取典型地段进行土壤调查和取样,用对角线法在样地内选取 5 个采样点,每个采样点分别设置 0~10、10~20、20~40 和 40~60 cm 土层,每层 3 个重复,用容积为 100 cm³ 的环刀采集测定土壤物理性质的土样,共采集 360 个环刀土样。同时,每个土壤层采集 1 000 g 扰动土样,用于测定土壤有机质。

1.3 土壤样品的测定

1.3.1 土壤理化性质的测定

将带回实验室的环刀原状土样浸水饱和以及扰动土样风干处理后测定相关土壤理化性质,其中土壤容重、土壤孔隙度采用环刀法测定,土壤有机质含量采用重铬酸钾氧化法测定。

1.3.2 土壤水的测定和计算

土壤饱和含水率 θ_s 、毛管持水量、田间持水量 θ_f 和凋萎含水量 θ_w 分别以环刀土在离心实验 0、0.1、0.33 和 15 bar 离心力下的土壤质量含水量表示^[6-7]。其中,各土样的毛管持水率、田间持水量均通过土样的离心实验测定,15 bar 时的凋萎含水量则利用吸湿系数进行计算^[8];

$$\theta_w = 1.75 \times \theta_h \quad (1)$$

式中: θ_h 为吸湿系数。

1.3.3 土壤饱和入渗率的测定

将原状土样饱和 24 h 后使用土壤渗透仪(ST-70)以定水头法测定土壤饱和入渗率 $K^{[8]}$ 。测定过程中,维持马氏瓶进气口内气泡点至渗透仪出水口之间的距离 H 不变,测定总流出量和相应流出时间,计算 K 。

$$K_s = \frac{QL}{AtH} \quad (2)$$

式中: K 为饱和入渗率(mm/min); Q 为出流量(mm³); L 为环刀长度(mm); A 为样品横截面积,即环刀底面积(mm²); H 为水头差(mm); t 为流出时间(min)。

1.4 数据分析

采用 Excel、SPSS 22 软件进行实验数据的统计分析;采用单因素方差分析和最小显著法(LSD)比较不同数据间的差异,显著性水平设定为 $P=0.05$ 。土壤入渗影响因素分析采用逐步回归分析,剔除不显著因子后得到回归方程并检验拟合 R^2 ,显著性水平设定为 $P=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质对计划烧除的响应

计划烧除后土壤表层地被物量锐减甚至燃尽,这时伴随着雨水冲刷和太阳直射,改变了浅层土壤小气候。温、湿度的改变以及向土壤输送的养分减少等因素会使土壤物理性质和土壤有机质发生改变,改变情况见表 1。

表 1 计划烧除后土壤理化性质变化及方差分析

Tab. 1 Variation of soil physical and chemical properties after prescribed fire and analysis of variance

样地	土壤深度 /cm	土壤容重 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	土壤毛管孔隙度 /%	土壤总孔隙度 /%	土壤有机质 /($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
计划烧除样地	0~<10	1.1± 0.1aA	39.33± 3.22aA	50.74± 4.48aA	57.87± 10.4baA
	10~<20	1.19± 0.02aA	37.24± 1.14aA	48.46± 1.87aA	33.44± 6.29bA
	20~<40	1.2± 0.03aA	36.87± 0.22aA	48.46± 0.29aA	24.5± 6.26aA
	40~60	1.22± 0.1aA	39.60± 1.48aA	48.59± 4.6aA	8.35± 3.73cA
自然样地	0~<10	0.77± 0.1aB	40.13± 1.37aA	54.93± 8.29aA	63.09± 4.87bB
	10~<20	1.05± 0.19bA	38.9± 2.13aA	51.87± 7.25aA	49.59± 1.19aB
	20~<40	1.08± 0.03bA	40.27± 1.23aB	53.87± 1.62aB	39.55± 5.03aA
	40~60	1.15± 0.13bA	40.01± 2.1aA	51.01± 4.59aA	17.11± 3.06aA

注:表中数值为平均值±标准误差;同一列数值后不同小写字母表示同样地不同土层在 $P<0.05$ 水平上存在显著差异,下同。

土壤容重是在自然状况下单位容积土体的质量,可以反映土壤通气性和透水性^[9]。两种样地土壤容重均随着土层的加深而增加,计划烧除样地 0~60 cm 土层的平均容重在 1.1~1.22 g/cm³,各土壤层容重差异不显著。自然样地 0~60 cm 土层的平均容重在 0.77~1.15 g/cm³,0~<10 cm 土层与其他各土层容重差异显著且显著高于自然样地,这说明计划烧除后云南松林土壤表层枯落物组成及地下根系的生长发育情况、枯落物的分解状况受到一定抑制,使得计划烧除样地的土壤容重变大。

土壤毛管孔隙度主要反应植物吸持水分供其正

常生理活动的能力。自然样地的各层土壤总孔隙度和毛管孔隙度都比计划烧除样地更大。计划烧除样地的土壤毛管孔隙度各层间无显著差异,自然样地 20~<40 cm 土层土壤毛管孔隙度与其他土层差异显著。此外,计划烧除样地 20~<40 cm 土层土壤毛管孔隙度显著低于自然样地,土壤总孔隙度显示出和毛管孔隙度相同的规律。

土壤有机质可以促进土壤团聚体的形成,进而改善土壤的孔隙状况,增强土壤入渗能力^[10]。随着土层深度的增大,两种样地的土壤有机质含量均表现出不同程度的减小趋势。两个样地 0~<20 cm 土层有机质含量差异显著,同一样地不同土层间差异不显著。出现这种差异可能是由于计划烧除减少了云南松林下盖度,土壤中根系分布减少,同时浅层土壤微生物的活性受温度影响分解有机质速度变慢所致。

2.2 土壤持水性能对计划烧除的响应

土壤水分是土壤中营养循环流动与物质转化的载体,对不同林分类型土壤蓄水能力的研究有助于了解不同林分类型的森林土壤保水性能^[11]。计划烧除后土壤理化性质的变化会改变土壤质地和土壤组成,随之而来的土壤持水量也会发生改变(表 2)。

表 2 计划烧除后土壤持水量变化及方差分析

Tab. 2 Variation of soil water capacity after prescribed fire and analysis of variance

样地	土层 /cm	自然含水率 /%	饱和持水率 /%	毛管持水率 /%	田间持水量 /%	吸湿水量 /%	萎蔫系数
计划烧除样地	0~<10	19.61±2.54aA	46.57±6.89aA	36.01±4.64aA	43.36±8.37cA	3.72±0.34bA	2.13
	10~<20	18.71±0.55aA	40.81±2.19aA	31.35±1.43aA	35.94±4.97bA	3.1±0.01aA	1.77
	20~<40	19.26±0.34aA	40.5±1.24aA	30.82±0.93aA	36.94±3.87bA	3.43±0.26abA	1.96
	40~60	20.95±0.65bA	40.1±7.52aA	32.51±3.52aA	30.35±3.15aA	3.46±0.16abA	1.98
自然样地	0~<10	22.67±2.3aA	73.01±4.67bA	52.82±7.63bA	47.55±6.63bA	4.72±0.3cB	2.70
	10~<20	20.69±0.63aB	51.18±6.17abA	37.73±5.93abA	40.56±8.65abA	4±0.02bB	2.29
	20~<40	19.66±0.69aA	49.93±2.62abB	37.33±2.05abB	37.3±6.68aA	3.52±0.3abA	2.01
	40~60	20.83±0.5bA	44.94±9.29aA	35±4.19abA	34.08±9.97aA	3.45±0.33aA	1.97

土壤自然含水率是土壤持水性能的重要指标之一。饱和持水率代表土壤最大蓄水能力。毛管水为植物生存的基础,可为植物根毛及土壤中细菌所利用;非毛管持水量主要受重力水作用向下运动,运动速度较快,可起到调蓄洪峰的重要作用^[12-13]。土壤吸湿水是土壤接近植物永久凋萎点时土层中土壤水的主要组分。由表 2 可以看出,除自然含水率、饱和持水率、毛管持水率在各层无显著差异以外,两种林分各层的田间持水量以及吸湿水量大部分存在显著差异,且计划烧除样地的各指标均不同程度低于自然样地。两种样地的田间持水量随着土层深度的增加均表现出下降的趋势,在 10~<20 cm 和 20~<40 cm 土层土壤田间持水量差异不显著,两种样地的最大田间持水量均在 0~<10 cm 土层最高。计划烧除样地 0~<10 cm 与 10~<20 cm 吸湿水量差异显著,与 20~<40 cm 和 40~60 cm 土层差异不显著,说明计划烧除降低了浅层土壤的吸湿水量。自然样地的吸湿水量随着土层加深不断下降,0~<10 cm、10~<20 cm 和 20~<40 cm 的吸湿水量相互差异显著,40~60 cm 土壤层与其他三层差异显著,这说明自然样地的吸湿水量随土层不断下降,但到达一定土层深度后吸湿水量保持稳定。

土壤持水性能的各项指标出现表 2 这种情况可能是由于计划烧除使得土壤的物理性质发生改变,土壤容重增加和土壤总孔隙度、毛管孔隙度减小,使计划烧除样地持水性指标均不同程度地低于自然样地。从自然含水量和吸湿水量上来看,计划烧除对于土壤持水性的影响主要表现在浅层土壤,对于深层土壤的影响并不明显。

2.3 土壤入渗特征对计划烧除的响应

2.3.1 计划烧除后土壤入渗特征变化

土壤入渗特性关系到地表径流的产生和土壤侵蚀等过程,是评价土壤抗侵蚀能力的重要指标之一^[14]。计划烧除对云南松林土壤物理性质产生影响势必会影响到土壤的入渗特征,具体见表 3。

根据土壤水分渗透所受作用力和运动特性,土壤水分渗透大致可分为 3 个阶段:渗透率瞬变阶段、渐变阶段和平稳阶段。本研究将入渗开始后 5 min 内的平均入渗速率当做土壤的初渗速率,两个样地的入渗速率均在 60 min 时稳定。为了便于比较,渗透总量统一取 60 min 内入渗量。由表 3 可以看出,除计划烧除样地 0~<10 cm 外,两个样地的初渗速率均表现出随着土层深度增加不断减少的趋势。计划

表 3 计划烧除后土壤水分入渗特征参数
Tab. 3 Characteristic parameters of soil water infiltration after prescribed fire

样地	土层 /cm	初渗速率 / (mm · min ⁻¹)	平均入渗速率 / (mm · min ⁻¹)	稳定入渗速率 / (mm · min ⁻¹)
计划烧除样地	0~<10	0.36±0.08bcA	0.30±0.15aA	0.23±0.13aA
	10~<20	0.99±0.47cA	0.78±0.36bA	0.53±0.28aA
	20~<40	0.51±0.24bA	0.39±0.19abA	0.32±0.14aA
	40~60	0.16±0.03aA	0.15±0.03aA	0.14±0.03bA
自然样地	0~<10	1.55±0.09baB	0.97±0.24aB	1.03±0.01aA
	10~<20	0.89±0.08abB	0.57±0.18aA	0.44±0.1aA
	20~<40	1.30±0.08bA	1.35±0.48aB	0.98±0.07aB
	40~60	0.68±0.07aA	0.56±0.26aA	0.18±0.07aA

烧除后土壤 0~<10 cm 和 10~<20 cm 土层的初渗速率显著低于自然样地,而其余两土层无显著影响。初渗期渗透速率很快,为渗透率瞬变阶段。计划烧除样地 0~<10 cm 土层的初渗速率较低的原因可能是由于计划烧除后地被物减少,土壤裸露导致土壤板结和空隙堵塞导致。计划烧除样地平均入渗速率除 10~<20 cm 土层外均低于自然样地,且 10 cm 土层以下随土层深度增加逐渐变小。自然样地的平均入渗速率未显示出明显规律,但 0~<10 cm 和 20~<40 cm 土层的平均入渗率与计划烧除样地有显著差异且 10~<20 cm 低于计划烧除样地。土壤稳定入渗速率的规律与平均入渗速率的规律相似,计划烧除样地的稳定入渗速率在数值上除 10~<20 cm 外均低于自然样地,在 20~<40 cm 土层与自然样地有显著差异。出现这种规律的原因可能是由于计划烧除样地表层土壤的板结,一方面使表层土壤渗透性变差,另一方面对于 10~<20 cm 土层也起到了屏障作用。

2.3.2 计划烧除后土壤入渗变化影响因素

土壤水分入渗受植被和土壤理化性质影响较大,土壤机械组成、土壤含水量、有机质、土壤密度、土壤孔隙度等均可影响土壤入渗性能^[15]。因土壤稳定入渗率更能准确表达土壤的渗透性,故本研究将土壤理化性质(表 1)和土壤持水量(表 2)与土壤的饱和稳定入渗率做逐步回归分析,筛除不相关因子后得到回归方程。土壤的机械组成在本研究中不予考虑。得到的回归方程见表 4。

由表 4 可以看出,两个样地的稳定入渗率与对应影响因子的回归方程拟合程度较好,但对土壤入

表 4 土壤稳定入渗影响因子回归分析
Tab. 4 Stepwise regression analysis of soil stable infiltration rate and influencing factors

样地	土层深度	回归方程	R ²	显著性
计划烧除样地	0~<10	$y = -0.405 + 0.442X_1 + 0.659X_2 - 0.224X_5$	0.99	$X_1, X_2, X_5; P < 0.05$
	10~<20	$y = -1.026 - 1.862X_8 - 0.004X_4 + 5.07X_3$	0.97	$X_8, X_4; P < 0.05$
	20~<40	$y = 0.394 - 0.092X_5$	0.64	$X_5; P > 0.05$
	40~60	$y = -0.218 + 0.251X_6 + 1.286X_5$	0.86	$X_5, X_6; P < 0.05$
自然样地	0~<10	$y = 1.615 - 0.728X_1$	0.53	$X_1; P > 0.05$
	10~<20	$y = 1.334 + 2.166X_6 + 1.159X_1 - 8.091X_2$	0.85	$X_6; P < 0.05$
	20~<40	$y = 6.053 - 9.678X_6$	0.73	$X_6; P < 0.05$
	40~60	$y = 13.182 - 6.443X_1 - 0.043X_4 - 5.664X_6 - 4.343X_8$	0.92	$X_1; P < 0.05$

注: X₁ 容重, X₂ 毛管孔隙度, X₃ 总孔隙度, X₄ 有机质, X₅ 自然含水率, X₆ 饱和含水率, X₈ 田间持水量。

渗影响显著的因素并不相同。计划烧除样地 0~<10 cm 土层稳定入渗率的影响因子有容重、毛管孔隙度和自然含水率,这三者对土壤稳定入渗都有显著影响。10~<20 cm 土层稳定入渗影响因子有总孔隙度、有机质和田间持水量,但只有有机质和田间持水量影响显著。20~<40 cm 土层稳定入渗影响因子只有自然含水率且影响不显著。40~60 cm 土层稳定入渗率影响因子有自然含水率和饱和含水率,两个因子对土壤稳定入渗均有显著影响。自然样地 0~<10 cm 土层的影响因子为容重但影响不显著。10~<20 cm 土层稳定入渗影响因子为容重、毛管孔隙度和饱和含水率,三个因子影响显著。20~<40 cm 土层稳定入渗影响因子为饱和含水率且影响显著。40~60 cm 土层稳定入渗影响因子为容重、有机质、饱和含水率和田间持水量,但只有容重对稳定入渗影响显著。这里我们可以看出,自然状态下土壤稳定入渗速率只与容重和饱和含水率有关,这是因为自然状态下的云南松林地地被物丰富、枯落物层复杂,这会抑制土壤蒸发,地被物对表层土壤的养分输入也更充足,这促进根系的生长及微生物生长,进而影响土壤孔隙度,而土壤的饱和持水率与土壤孔隙度密切相关。由计划烧除样地与自然样地不同,计划烧除样地土壤稳定入渗的影响因子更为复杂,由计划烧除 0~<10 cm 土层回归方程可以看出,计划烧除削减了地表枯落物层,使得表层土壤裸露在

外容重增加,同时计划烧除后的草木灰也会堵塞土壤孔隙,土壤孔隙与土壤含水率密切相关。从 10~<20 cm 土壤稳定入渗速率影响因子我们可以看出,土壤容重未在影响因子之中,说明计划烧除对容重的影响只在 0~<10 cm 土层内,计划烧除后的植物灰分进入更深一层土壤,同时地表枯落物层和土壤层的有机质释放到下一层土壤,但由于计划烧除原因释放的土壤有机质量并不大,所以在 20~<40 cm 土层中有机质并不是影响因素。40~60 cm 土层的影响因子饱和含水率同自然样地一致。由此可以看出,计划烧除后云南松林土壤由浅层至深层都有不同程度的退化,土壤容重增加、孔隙度变小,使得土壤的稳定入渗率降低,土壤渗透性变差,而在深土层的稳定入渗率则趋近于自然样地。

3 讨 论

3.1 计划烧除对云南松林土壤理化性质的影响

研究区 6 个样地空间距离较近,气候特征差异小,土壤性质的差异主要源于计划烧除对样地植被的影响,对植被的影响间接地影响了土壤中根系的生长发育,影响土壤的机械组成,进而影响土壤容重与土壤空隙。同时,计划烧除后土壤裸露,会导致土壤层温度的改变,从而影响到土壤微生物活性。对土壤层养分输入降低还会影响到土壤团聚体的稳定,土壤团聚体大小决定了土壤空隙状况,团聚体越多土壤空隙越大。计划烧除过程中地表枯落物的燃烧使土壤化学性质从轻微的挥发到炭化或者完全的氧化等不同程度的损失,造成有机质的减少,影响着森林生态系统的物质循环^[16]。针对计划烧除对森林土壤理化性质的影响研究已有许多^[17-18],刘发林等^[19]对火干扰后的枫香次生林的研究显示火干扰后土壤容重增加,这与本研究中土壤容重的规律一致。土壤毛管空隙度和总孔隙度随土层深度变化没有普遍规律性,但从数值上来看计划烧除样地小于自然样地,此研究结果与王丽红等^[3]对大兴安岭重度火烧迹地土壤孔隙度的研究一致。

许多研究表明,轻度火烧对表层土壤有机质含量的影响不明显,随着林火强度的升高,土壤表层有机质损失加剧。随土壤深度增加,火烧对土壤有机质含量的影响越来越小^[20]。已有研究^[21-22]发现,不同强度火烧后土壤有机质含量会增加、减少或者没有影响,这些都是因为其受火强度、火持续时间、立地类型,特别是土层深度的影响。本研究中两个样地的有机质含量均随土层深度增加而减少,计

划烧除样地表层土壤有机质含量低于自然样地但差异不显著,深层有机质含量与自然样地相似,这与刘发林等^[19]研究结果部分一致。至此,本研究中计划烧除后土壤理化性质指标多数与前人研究结果一致,具有很好的可靠性。

3.2 计划烧除对云南松林土壤持水性能的影响

土壤持水性是反映土壤保水、供水能力的重要指标,而土壤的贮水能力则多用来反映植被调节水分和涵养水源的能力^[23],其与土壤的孔隙状况密切相关。一般认为,不同林地随着土层深度的增加,土壤容重增加,土壤孔隙度减少^[24]。在研究区自然样地森林土壤中,各样地随着土层深度的增加,土壤容重逐渐上升,孔隙度逐渐下降,与本研究所得结果一致。

自然样地的土壤持水量各项指标均随着土层深度不断增加而减小。张晓梅等^[25]对黄土高原典型林分土壤持水性能的研究结果表明,不同林分的土壤持水能力在 0~60 cm 土层均呈现逐渐降低的趋势,在 80~100 cm 土层略有增加或不变,这与本研究结果部分一致,出现部分差异的原因可能是由于地理区位因素影响及林分差异性区别所致。

计划烧除样地各水文特征指标在土层间未显示出明显的规律性,出现此原因可能是由于计划烧除后地被物燃烧殆尽,云南松生长也受到抑制,由此导致稳定的土壤生态循环遭到破坏,表层土壤由枯落物覆盖变为裸露在外,经受降雨侵蚀与太阳炙烤,使土壤容重增加变得板结,同时地被物燃烧后的灰分会渗入土层,堵塞土壤空隙同时会改变土壤结构。地被物的消失使得土壤养分供给不足,加上根系与微生物受计划烧除影响活性降低,这会影响到土壤团聚体的稳定性,进而影响到土壤孔隙度。

计划烧除样地表层土壤的自然含水率和吸湿水量与自然样地出现显著差异。自然含水率的差异主要是因为土壤表层物理性质的改变所致;吸湿水量的差异则不同,吸湿水是以分子形式紧附在土壤颗粒上,所以出现差异的原因是计划烧除的火焰高温所致,从 20~60 cm 土层两种林分无差异也可以证明此观点。

3.3 计划烧除对云南松林土壤入渗特征的影响及机制

土壤渗透性是森林生态系统涵养水源和保持水土的重要指标,与其他土壤物理性状密切相关^[26]。从总体上来看,两种林分的初渗速率、平均入渗速率和稳定入渗速率均随着土层的加深而减小。姜淑兰

等^[27]对三峡山地土壤入渗特征的研究结果与本研究结果一致。计划烧除样地的各土壤入渗在0~<10 cm和10~<20 cm土层上与自然样地差异较大,这说明林木根系对土壤的穿插作用和林内凋落物的积累、分解使自然样地土壤渗透性更佳。而计划烧除样地由于地表裸露、地上植被少,在雨水的冲刷下导致土壤板结、结构较差,其渗透能力更弱。本研究中,自然样地的土壤初渗速率和稳定入渗速率低于李永涛等^[28]有关黄河三角洲地区的土壤渗透性指标,这可能与研究区立地条件、植被类型有关系。已有研究表明,重度火烧会严重破坏土壤结构,使土壤容重增加,孔隙度减少,有机质几乎全部被破坏,土壤入渗性能降低^[29],这与本研究结果一致。本研究中,计划烧除样地10~<20 cm土壤稳定入渗速率较自然样地更高的原因,可能是由于计划烧除后有机残体颗粒物和碳化颗粒物混入,经过后期水分淋移作用,增加了土壤中碳含量^[30];有机质有助于改善土壤空隙状况,提高土壤入渗性能^[10]。

土壤水分入渗是一个复杂的过程,其入渗特征与土壤质地、土壤空隙状况、土壤颗粒组成等因素有关^[31]。自然样地的稳定入渗率与容重和饱和含水率有显著的相关性,饱和含水率与土壤空隙密切相关。韩春兰等^[1]研究表明,土壤入渗性能与土壤孔隙度关系显著,而容重则是反映土壤质地的重要指标,自然样地反映出的稳定入渗特征可能是由于土壤受森林植被影响浅层土壤的持水性能,深层土壤受影响较小,所以影响土壤入渗的因素只在土壤质地方面。计划烧除样地0~<10 cm土层稳定入渗率受容重、毛管孔隙度和自然含水率的显著影响。有研究表明,饱和导水率受到土壤孔隙度、土壤容重、土壤机械组成等多种因素影响^[32-33],本研究中计划烧除样地常年规律的计划烧除作业使得林地植被丰富度差,根系分布不发达,导致计划烧除样地土壤非毛管孔隙度低且容重更大,水分不易渗透。计划烧除样地10~<20 cm土层稳定入渗速率受有机质和田间持水量显著影响。王丽红等^[3]的研究表明,土壤入渗性能与土壤有机质含量呈正相关关系。

土壤田间持水量是土壤毛管空隙中的水量达到最大时的量,它包含了吸湿水、薄膜水和毛管悬着水,在衡量水土保持特性和表示不同林地土壤持水能力变化中起到重要作用^[34]。有研究表明,土壤田间持水量与土壤物理性质密切相关^[27],故田间持水量对稳定入渗速率的影响是因为计划烧除对土壤物理性质的影响所致。计划烧除样地20~<40 cm土

层的稳定入渗速率只与土壤自然含水量有关,但影响不显著。可以看出,计划烧除样地的土壤稳定入渗率从这一土层有接近自然样地的趋势。自然样地深层土壤比较稳定,而计划烧除样地的表层土壤受扰动较大,深层土壤的理化性质也不如自然样地。计划烧除样地40~60 cm土层稳定入渗速率受自然含水率和饱和含水率的显著影响,由此可以认为计划烧除后的样地的土壤水文功能由下至上逐渐恢复。

4 结 论

1) 计划烧除后土壤容重、总孔隙度和毛管空隙度物理性质变差,但影响尚未到达显著水平,土壤有机质变少,在0~<20 cm土层影响显著。

2) 计划烧除后土壤自然含水率、饱和持水率、毛管持水率、田间持水率和吸湿水量变小,对土壤水的影响主要集中在表层土壤,土壤持水性变差。

3) 计划烧除后土壤初渗率、平均入渗率和稳定入渗率减小,土壤入渗能力变差。土壤饱和和稳定入渗率主要受土壤容重、孔隙度、有机质和饱和持水率的影响。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘瑞斌,李莉,陈鹏东,等. 森林火灾对烟台泰山次生林土壤性质的影响[J]. 生态环境学报,2016,25(8):1300-1305.
- [3] 王丽红,辛颖,赵雨森,等. 大兴安岭重度火烧迹地植被恢复过程中土壤入渗特征研究[J]. 水土保持学报,2014,28(4):13-17.
- [4] AKIHIRO K, KATHLEEN L. Kavanagh, Kirsten Stephan. Wildfire effects on soil gross nitrogen transformation rates in coniferous forests of central Idaho, USA [J]. *Ecosystems*, 2010,13(7):1112-1126.
- [5] 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.
- [6] 冯杰,解河海,黄国如,等. 土壤大孔隙流机理及产汇流模型研究[M]. 北京:中国水利水电科学研究院,2012.
- [7] ASSOULINE S D. The concept of field capacity revisited: defining intrinsic static and dynamic criteria for soil internal drainage dynamics [J]. *Water Resources Research*, 2014,50(6):4787-4802.
- [8] 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.

- [9] 刘淑燕,秦富仓,项元和,等. 基于 WEPP 模型进行坡度因子与侵蚀量关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2006(4):97-101.
- [10] 李岩,欧名豪,赵庚星. 土地整理的区域生态环境影响评价研究[J]. 生态环境学报,2010,19(2):398-403.
- [11] 梁博,聂晓刚,杨东升,等. 西藏尼洋河流域下游 5 种典型土地利用方式土壤物理性质差异分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2018,46(1):119-128.
- [12] 王光玉. 杉木混交林水源涵养和土壤性质研究[J]. 林业科学,2003(S1):15-20.
- [13] 顾宇书,邢兆凯,韩友志,等. 浑河上游 4 种典型水源林土壤物理性质及其水源涵养功能[J]. 东北林业大学学报,2013,41(1):37-41.
- [14] 幸定武,高建恩. WEPP 在黄土高原坡面径流调控中的适用性研究[J]. 人民黄河,2008(4):66-67.
- [15] 韩芳芳,刘秀花,马成玉. 不同降雨历时梯田和坡耕地的土壤水分入渗特征[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(4):14-20.
- [16] 高仲亮,周汝良,李浩,等. 计划烧除对思茅松林下可燃物碳贮量的影响[J]. 福建林业科技,2011(2):37-41.
- [17] 罗菊春. 大兴安岭森林火灾对森林生态系统的影响[J]. 北京林业大学学报,2010(5):101-107.
- [18] CERTINI G. Effects of fire on properties of forest soils: A review[J]. *Oecologia*,2005,143:1-10.
- [19] 刘发林,陈小伟,曾素平. 不同火干扰强度对枫香次生林土壤理化性质的影响[J]. 水土保持学报,2019,33(5):132-138.
- [20] 耿玉清,周荣伍,李涛,等. 北京西山地区林火对土壤性质的影响[J]. 中国水土保持科学,2011(5):69-73.
- [21] DOERR S H,DEKKER L W,RITSEMA C J,et al. Water repellency of soils[J]. *Society of America Journal*,2002,66(2):401-405.
- [22] ROBICHAUD P R,HUNGERFORD R D. Water repellency by laboratory burning of four northern rocky mountain forest soils[J]. *Journal of Hydrology*,2000,231/232(1):207-219.
- [23] 刘端,张毓涛,郝帅,等. 天山云杉林下土壤物理性质空间异质性研究[J]. 安徽农业大学学报,2009,36(3):397-402.
- [24] 毕建琦,杜峰,梁宗锁,等. 黄土高原丘陵区不同立地条件下柠条根系研究[J]. 林业科学研究,2006,19(2):225-230.
- [25] 张晓梅,杨宝宝,邸利,等. 黄土高原典型林分土壤水文物理性质及持水性能[J]. 甘肃农业大学学报,2019,54(3):117-124,133.
- [26] 李卓,吴普特,冯浩,等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. 农业工程学报,2009,25(6):40-45.
- [27] 娄淑兰,刘目兴,易军,等. 三峡山地不同类型植被和坡位对土壤水文功能的影响[J]. 生态学报,2019,39(13):4844-4854.
- [28] 李永涛,魏海霞,王振猛,等. 黄河三角洲不同林分类型对土壤水分物理特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2020,40(8):106-112.
- [29] 张野,苏芳莉. 土地整理过程中的水土流失与防治对策[J]. 水土保持应用技术,2008(5):31-32.
- [30] 严冬春,文安邦,张忠启,等. 坡面版 WEPP 模型在川中丘陵区的应用研究[J]. 水土保持学报,2007(5):42-45,63.
- [31] 蒋定生,黄国俊. 黄土高原土壤入渗速率的研究[J]. 土壤学报,1986(4):299-305.
- [32] 郑纪勇,邵明安,张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J]. 水土保持学报,2004(3):53-56.
- [33] LIU Z PENG,MA D H,HU W,et al. Land use dependent variation of soil water infiltration characteristics and their scale-specific controls[J]. *Soil and Tillage Research*,2018,178:139-149.
- [34] 宋林松,汪京,王棋,等. 喀斯特石漠化区顶坛花椒林地土壤水分物理性质变化[J]. 贵州科学,2016,34(2):19-25.

责任编辑: 刘平书