

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.028.

杨馥羽, 陈奇伯, 黎建强, 等. 计划烧除对云南松林土壤抗剪性能的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 214-221.

Yang Fuyu, Chen Qibo, Li Jianqiang, et al. Effects of Prescribed Burning on Soil Shear Strength in *Pinus yunnanensis* Forests[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 214-221.

计划烧除对云南松林土壤抗剪性能的影响

杨馥羽¹, 陈奇伯^{1,2}, 黎建强¹, 杨波^{1,2}, 付钇珊¹, 赵月¹, 徐红运¹

(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)

摘要: [目的]探究计划烧除后云南松林土壤力学特性变化特征, 为森林的可持续经营、优化林区计划烧除作业以及防治水土流失提供可靠的科学依据。[方法]以滇中高原云南松林周期性计划烧除样地为研究对象, 采用野外调查取样与室内直剪实验相结合的方法, 系统研究了计划烧除对云南松林土壤抗剪性能的影响及影响因素。[结果]与未烧除样地相比, 计划烧除样地 0—20 cm 土层中根、细根生物量密度和根长密度显著降低, 20—60 cm 土层差异不显著。计划烧除后 0—20 cm 土层抗剪强度、土壤黏聚力显著减小, 对深层土壤无显著影响。RDA 分析结果表明: 计划烧除和未烧除样地均显示土壤抗剪强度指标与土壤有机质、细根根长密度呈显著 ($p < 0.05$) 正相关关系, 细根根长密度在两种处理中均是解释度最高的因子。[结论]周期性计划烧除后细根系分布减少, 土壤有机质含量降低, 是云南松林地土壤抗剪性能减弱的主要原因。

关键词: 计划烧除; 云南松林; 土壤抗剪性; 根系特征

中图分类号: S714.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0214-08

Effects of Prescribed Burning on Soil Shear Strength in *Pinus yunnanensis* Forests

Yang Fuyu¹, Chen Qibo^{1,2}, Li Jianqiang¹, Yang Bo^{1,2}, Fu Yishan¹, Zhao Yue¹, Xu Hongyun¹

(1.College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

2.Research Institute of Rocky Desertification, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: [Objective] The purpose of this study is to explore the characteristics of soil mechanical properties to prescribed burning in *Pinus yunnanensis* forests, so as to provide scientific basis for sustainable forest management and optimization of prescribed burning in forest areas and control of soil erosion that may be caused by prescribed burning. [Methods] The sample plots of *P. yunnanensis* forest in central Yunnan Plateau were selected as the research objects so that to systematically study the effects of prescribed burning on soil shear strength of *P. yunnanensis* forest by combining field investigation and sampling with indoor experimental analysis. [Results] The root and fine root biomass density and root length density in the 0—20 cm soil layer significantly reduced and the difference in the 20—60 cm soil layer were not significant compared with the unburned forest. The shear strength, soil cohesion significantly reduced in 0—20 cm soil layer after the prescribed burning, the impacts were no significant with the increase of soil depth. The RDA analysis results showed that the soil shear strength, soil cohesion, soil friction angle and soil organic matter and fine root length density significantly positively correlated ($p < 0.05$) in both treatments, and the fine root long density was the highest explaining factor in the two treatments. [Conclusion] The decrease of fine root distribution and soil organic matter content after prescribed burning in *Pinus yunnanensis* forests are the main reasons for the decrease of soil shear strength.

收稿日期: 2022-09-18

修回日期: 2022-10-02

资助项目: 国家自然科学基金“云南松林凋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: 杨馥羽(1998—), 女, 云南永仁县人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: 1030523473@qq.com

通信作者: 陈奇伯(1965—), 男, 甘肃通渭县人, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与恢复生态学研究。E-mail: chengqb@swfu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

Keywords: prescribed burning; *Pinus yunnanensis* forest; soil shear strength; root characteristics

云南省经过长期飞播造林建设,形成了大面积的云南松人工林^[1]。随着人们对森林资源的保护与重视,林下可燃物不断堆积,长期未受人为干扰的林地火险等级较高,使云南松林长期处于森林火灾高发区^[2]。云南松松针含有大量油脂,再加上云南特殊的气候条件,入冬后干燥少雨,林下蓄积大量凋死地被物,一旦有林火发生,将削弱森林涵养水源和水土保持能力,对生态环境造成严重破坏^[3]。火是陆地生态系统进化发展的重要因素,在生态系统的进化与发展中十分重要^[4],适当强度和频次的林火干扰利于森林生态系统修复与更新,在一定程度上促进生态系统的物质循环和能量流动。与森林火灾不同,计划烧除是针对适宜林种,在规定范围用低强度地表火烧除林内可燃物,达到降低火险、提高森林防火能力的技术性措施^[5]。周期性计划烧除能减少病虫害,增强土壤碳稳定性,促进森林的生长与更新,对森林群落演替和保护生态环境具有重要作用。长期的林火干扰促进云南松林的繁衍与进化,在不断的进化中,产生了对周期性火的适应,使计划烧除工作能在云南松林内大面积开展,并成为云南松林地防火的有效手段。各林业先进国家相继开展火烧对生态系统演化发展研究,19世纪末美国首先提出“计划火烧”这个概念,20世纪40年代起,计划火烧被推广应用,技术和体系逐渐发展成熟,至今仍作为各国森林防火和经营管理的有效手段^[6]。而我国计划烧除工作开展较晚,研究内容主要集中在计划烧除对于森林防火的积极作用以及长期林火干扰下对森林生态系统、群落结构的影响等^[7-8]。

国内外学者对土壤抗剪性能做了大量研究,并系统地分析了土壤理化指标对土壤抗剪性能的影响机制。Yildiz等^[9]总结了前人的研究结果,认为根系在土壤中交错穿插来提高土体结构的稳定性;朱春鹏等^[10]的研究表明土壤抗剪强度与pH值呈正相关关系;Fan等^[11]研究发现,土壤抗剪强度随土壤含水率增加而呈现下降趋势。计划烧除后降雨直接冲刷裸露地表,表层土壤团粒结构改变,土体间力学机制必然会受到影 响。目前,国内外学者针对林火干扰后泥石流、滑坡等多发的自然地质现象开展了深入研究,Vega^[12]和王丽^[13]等在火烧迹地开展研究,结果表明林地水文特征受火烧强度影响较大,较高强度林火干扰下植被生长受到严重影响,地表凋落物层烧毁,土壤表层的持水能力下降,导致地表径流的增加;Bolan^[14]和胡卸文^[15]等研究发现,高强度林火发生后,地表大面积裸露,难以抵御降雨和水流的直接冲

击与破坏。关于火烧对土壤力学机制的影响已有报道,但主要集中在林火发生的频次和强度不固定的火灾区,在指定树种林区内开展周期性计划烧除是否存在水土流失风险尚不明确,因此探究计划烧除对林内土壤抗剪性能的影响,以期揭示计划烧除对土壤侵蚀、森林生态环境的影响,并对森林的可持续经营、优化林区计划烧除制度以及防治计划烧除可能会引发的水土流失提供可靠的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于滇中高原玉溪市新平县南部的照壁山(24°2′38″—24°2′41″N,102°0′7″—102°0′8″E),照壁山的云南松纯林为次生林经飞播造林后经营改造而成,海拔1 990~2 050 m,典型高原山地丘陵地貌,代表性土壤为红壤,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,降水主要集中在5—10月,最高气温32℃,最低气温1℃,年平均气温15℃。林区内以云南松林(*Pinus yunnanensis*)为主,树龄约为30 a,灌木主要有羊耳菊(*Inula cappa*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)等,草本主要有紫茎泽兰(*Ageratina adenophora*)、贯众(*Cyrtomium fortunei*)、四脉金茅(*Eulalia quadrinervis*)等。20世纪90年代末期,该区域制订了相对完善的计划烧除制度,并于每年1月下旬开展计划烧除工作,至今20余年从未间断。

1.2 样地布设与样品采集

在照壁山上对该区域内林分类型、地质地貌及自然条件进行系统的调查,选择立地条件相似,平均树龄为30 a且长势较好云南松林地作为研究对象。以防火通道为分界分别布设计划烧除与未烧除的对照样地,在两个大样地内分别设置3块20 m×20 m标准样地,每个样地设置3个采样点。将每个采样点地表凋落物和植被根系去除,按0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm和40—60 cm土层分层取样,每层取1 kg鲜土用于土壤基本理化性质测定,用61.8 mm×20 mm直剪环刀采集直剪试验样品。土壤根系采用小样方挖掘法进行调查,在计划烧除和未烧除两块大样地内,选择4~5棵长势较好的云南松林木为几何中心,距树干至少1.5 m,分层挖掘,从上至下按土层依次取长、宽、高为20 cm×20 cm×10 cm土样,挑拣出土样内根系,带回实验室测定。

1.3 试验方法

土壤根系测定:将根系置于0.25 mm筛子中冲

洗,洗出后于 65℃ 条件下烘干至恒重,用游标卡尺三段法将根系按照径级(粗根 5~10 mm;中根 2~5 mm;细根 0~2 mm)分类,用直接法测量根系长度,分别称重并计算根系生物量密度和根长密度。

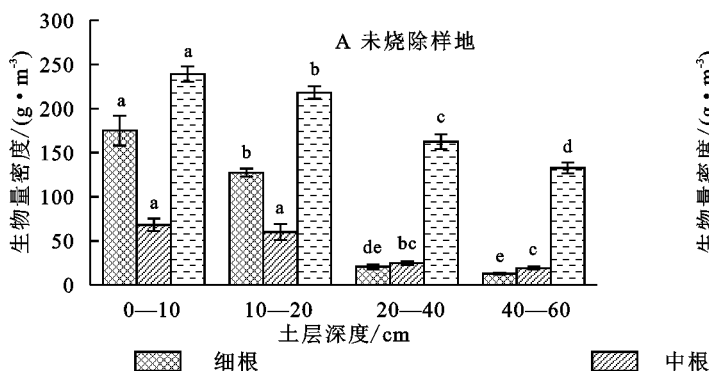
土壤基本理化性质采用常规法进行测定;土壤容重采用环刀法测定,土壤含水率采用烘干法,土壤有机质采用重铬酸钾外加热法,土壤机械稳定性团聚体和水稳性团聚体采用干筛法和湿筛法,土壤 pH 值采用电极法。

土壤抗剪性能测定:采用室内应变控制式直剪仪来测定。试验剪切速率为 0.8 mm/min,分别设置不同的垂直压力为 50,100,150,200 kPa,记录试样在上、下盒的剪切面上产生剪切变形直至破坏过程中最大剪切力,若剪切力没有出现峰值,则设定剪切时间为 10 min。根据试验数据,绘制土壤抗剪强度与垂直压力关系图,根据摩尔库仑定律计算土壤黏聚力、内摩擦角,计算公式如下:

$$\tau = C_0 \times R_0 \times 10 / A_0 \quad (1)$$

式中: τ 为土壤抗剪强度(kPa); R_0 为计量表读数(0.01 mm); C_0 为测力环系数; A_0 为剪切盒面积(cm^2)。

根据公式(1)计算出土壤抗剪强度,并绘制土壤抗剪强度与垂直压力关系图,根据摩尔库仑定律计算土壤黏聚力、内摩擦角。



$$\tau = \sigma \tan \varphi + C \quad (2)$$

式中: τ 为土壤抗剪强度(kPa); σ 为垂直荷载(kPa); φ 为土壤内摩擦角(°); C 为土壤黏聚力(kPa)。

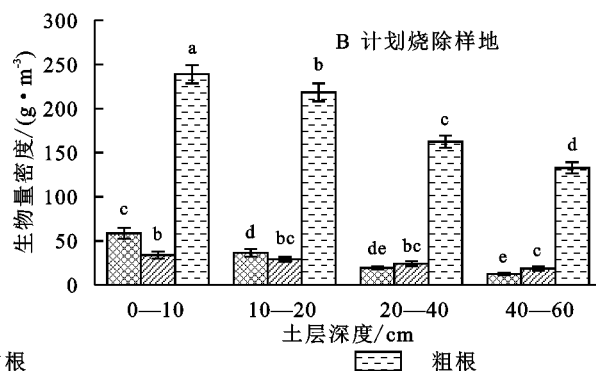
1.4 数据处理与分析

采用 Excel 和 SPSS 21.0 进行数据统计分析,并用 Origin 9.0 和 Canoco 5.0 绘制图形。

2 结果与分析

2.1 计划烧除对土壤根系分布的影响

2.1.1 计划烧除对土壤根系生物量密度分布特征的影响 根系生物量密度表示单位体积土壤中根系干重,是评价森林群落结构与功能的重要指标。长期林火干扰使林下灌草生长发育受到影响,森林群落结构改变,植物根系生长发育受到影响。如图 1 所示,计划烧除和未烧除样地中各径级根系生物量密度随着土层深度增加逐渐减小;各土层中均呈现粗根(5—10 mm)生物量密度最大,0—20 cm 土层细根(0—2 mm)生物量密度次之,中根(2—5 mm)生物量密度最小,20—60 cm 土层中根生物量密度次之,细根生物量密度最小。与未烧除样地相比,各土层粗根生物量密度分布无显著差异,0—20 cm 土层中根和细根生物量分布显著降低,20—60 cm 土层差异不显著。



注:不同小写字母表示在不同土层相同径级根系差异显著($p < 0.05$),下同。

图 1 土壤根系生物量密度分布特征

Fig. 1 Distribution characteristics of soil root biomass density

2.1.2 计划烧除对土壤根长密度分布特征的影响

根长密度表示单位体积土壤中根系总长度,直接反映土壤中根系分布的多少。周期性计划烧除使林区内灌草覆盖度小,土壤中根系分布随之改变。如图 2 所示,计划烧除和未烧除样地中各径级根长密度随着土层深度增加逐渐减小;各土层中细根根长密度最大,未烧除样地 0—10 cm 土层中根根长密度次之,粗根根长密度最小,其余均呈现粗根根长密度次之,中根根长密度最小。与未烧除样地相比,各土层粗根根长密度无显著差异,0—20 cm 土层中根和细根根长密度显著降低,20—60 cm 土层差异不显著。

2.2 计划烧除对土壤理化性质的影响

林火干扰后地表土壤温湿条件直接改变,土壤生境平衡被打破,土壤植被和土壤内生物数量明显减少,土壤理化性质受到影响。表 1 是计划烧除后土壤基本理化性质变化表。

林火干扰后地表温度升高,燃烧剩余灰烬堵塞土壤孔隙,土壤结构改变。从表 1 可以看出,计划烧除和未烧除样地土壤容重均呈现随土层深度增加先减小后增大的趋势。与未烧除样地相比,多年连续计划烧除使土壤 0—20 cm 土层容重显著增大,而 20—60 cm 土层容重无明显变化。林火干扰后,燃烧剩余灰分堵塞土壤孔

隙,而未烧除样地林内植被覆盖度高,有利于微生物活动,土质疏松,最终导致计划烧除样地土壤表层容重显著增加。凋落物覆盖能很大程度上减少土壤水分蒸发,未烧除样地地表覆盖大量凋落物,使 0—40 cm 土

层土壤含水率显著高于计划烧除样地。表明计划烧除后地表裸露,土壤失去凋落物层的覆盖作用,表层土壤中水分散失,含水率降低,深层土壤也因土壤孔隙堵塞,影响水分流通而降低了土壤中的水分含量。

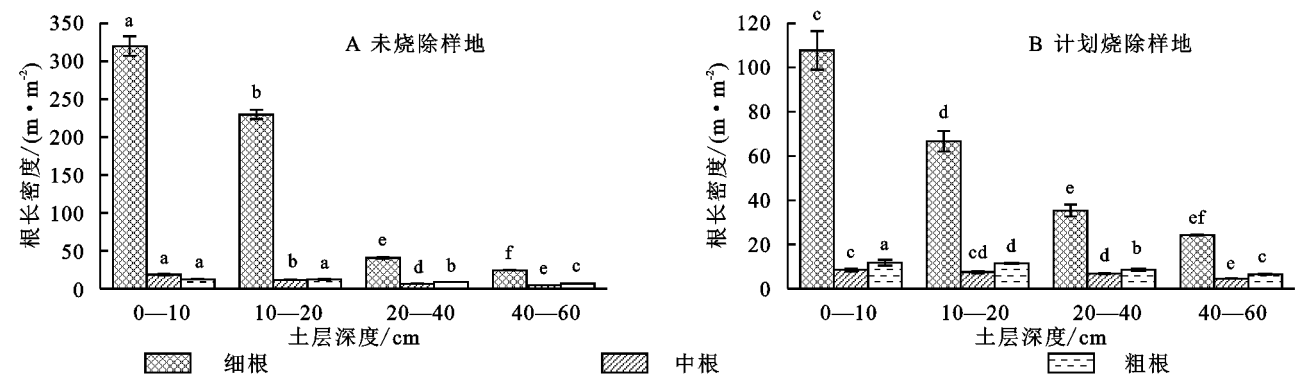


图 2 土壤根长密度分布特征

Fig. 2 Characteristics of soil root density distribution

表 1 土壤基本理化性质性质							
Table 1 Basic physical and chemical properties of soil							
样地类型	土层/cm	容重/(g·cm ⁻³)	含水率/%	有机质/(g·kg ⁻¹)	机械稳定性 团聚体含量/%	水稳性 团聚体含量/%	pH 值
未烧除样地	0—10	1.12±0.08B	23.51%±0.37A	38.28±1.73A	81.87±2.20B	69.24±2.82A	4.84±0.03C
	10—20	1.06±0.06C	22.57%±0.56A	21.65±2.10C	79.26±3.28C	58.52±1.62C	5.03±0.05B
	20—40	1.23±0.07A	22.15%±0.39B	12.86±0.34D	73.62±2.14D	53.90±0.69D	4.99±0.06B
	40—60	1.24±0.04A	20.49%±0.84C	9.39±0.53E	73.36±1.78D	44.14±0.61E	4.96±0.06B
计划烧除样地	0—10	1.21±0.09A	20.41%±0.87C	32.41±2.11B	86.42±0.97A	65.07±0.98B	5.29±0.16A
	10—20	1.13±0.05B	20.88%±0.69B	18.75±3.13C	77.82±3.28C	55.61±1.54D	5.12±0.13A
	20—40	1.23±0.08A	20.63%±0.77C	11.19±0.76D	73.90±0.25D	53.80±0.64D	5.04±0.10B
	40—60	1.23±0.07A	20.56%±0.58B	7.71±0.54E	73.04±0.68D	43.75±1.04E	5.06±0.11B

注:表中数值为平均值±标准差;同一列数值后同土层的不同大写字母表示在 $p<0.05$ 水平上存在显著差异。

土壤表层凋落物和植物是土壤有机质的重要来源,对土壤的物理和化学性质产生直接影响。火烧后林下灌草植物稀少,地表凋落物层烧毁,有机质含量发生变化。计划烧除后土壤 0—60 cm 土层有机质均减小,其中 0—10 cm 土层有机质含量显著减小,在 10—60 cm 土层有机质差异不显著。凋落物和植被根系能有效增强土壤的团聚作用,土壤中有有机质的胶结作用也能有效促进土壤团聚体的形成。与未烧除样地相比,计划烧除样地 0—10 cm 土层机械稳定性团聚体含量显著增加,10—60 cm 土层无显著差异;而 0—20 cm 土层水稳性团聚体含量显著减少,20—60 cm 土层无显著差异。

适宜的酸碱度有利于微生物活动,提高土壤中的酶活性,有效促进林木的生长与更新。计划烧除样地 0—20 cm 土层土壤 pH 值显著高于未烧除样地,计划烧除样地 pH 值比未烧除样地高 0.45,对其他土层无显著影响。可见火烧后地表裸露,凋落物和腐殖质层被烧毁,土壤水分流失,土壤酸性下降,碱性增强,pH 值增加。

2.3 计划烧除对土壤抗剪强度的影响

2.3.1 计划烧除对土壤抗剪强度的影响 土壤抗剪强度是表征土壤力学特性的指标,受土壤结构、土体根系等影响。周期性计划烧除后地表凋落物蓄积量减少,根系受损,土体结构改变,土壤抗剪强度发生变化。

图 3 显示,计划烧除和未烧除样地抗剪强度总体上随土层深度增加而呈下降趋势。与未烧除的对照样地相比,计划烧除样地 0—10, 10—20, 20—40, 40—60 cm 土壤抗剪强度(200 kPa)分别减小了4.22, 3.61, 0.63, 0.04 kPa。可见计划烧除使土壤 0—20 cm 土层抗剪强度减小,越往深层这种影响逐渐减小,20—60 cm 土层基本无影响。

2.3.2 计划烧除对土壤黏聚力和内摩擦角的影响

土壤黏聚力和内摩擦角反映土粒间的各种物理化学作用力,主要反映相对位移发生面上土壤颗粒之间的摩擦力和咬合力,土壤黏聚力和内摩擦角越大,土样发生相对滑动越难。图 4 是计划烧除对土壤黏聚力和内摩擦角的影响。

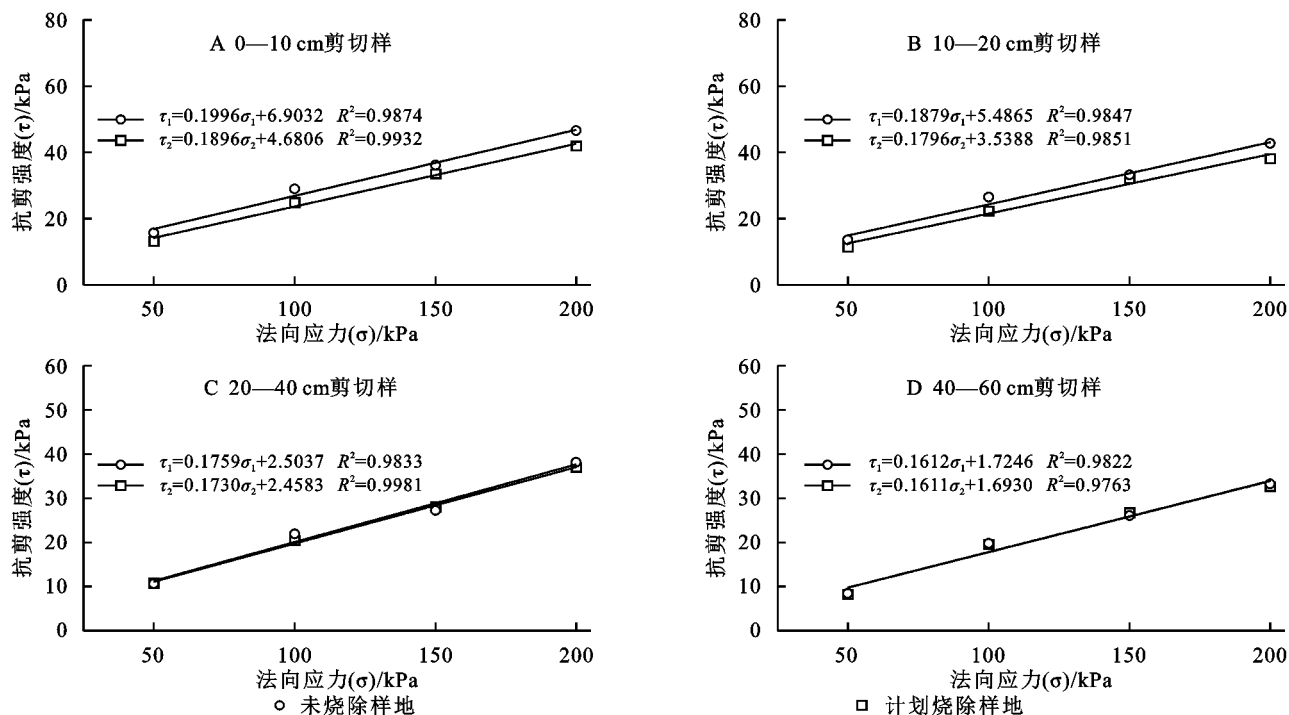
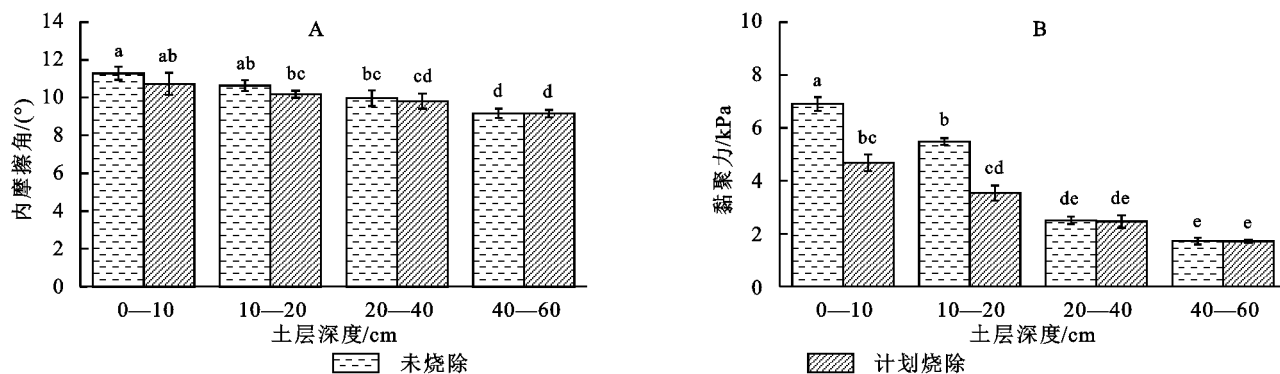


图3 土壤法向应力—抗剪强度关系

Fig. 3 Relationship between normal stress and shear strength of soil

图4表明,计划烧除和未烧除样地土壤黏聚力和内摩擦角随着土层深度增加均呈现下降趋势。多年连续计划烧除样地0—10,10—20,20—40,40—60 cm 土壤内摩擦角与未烧除样地相比分别减小了0.55°,

0.46°,0.16°,0.01°,但并无显著差异,土壤黏聚力分别减小了2.22,1.95,0.04,0.01 kPa。其中,0—20 cm 土层土壤黏聚力显著减小,可见计划烧除使0—20 cm 土层土壤黏聚力和内摩擦角减小,对深层土壤无显著影响。



注:不同小写字母表示在表示不同土层在 $p < 0.05$ 水平上存在显著差异。

图4 计划烧除对土壤黏聚力和内摩擦角的影响

Fig. 4 Prescribed burning on soil cohesion and internal friction angle

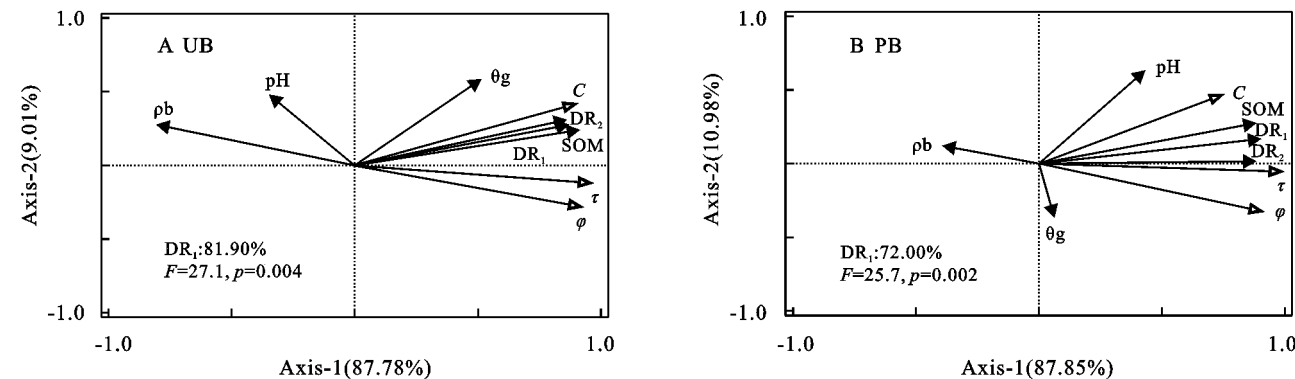
2.4 计划烧除对土壤抗剪性能影响因素分析

土壤抗剪性能受多种因素的综合影响,根据试验结果,选择土壤容重、含水率、有机质、中根根长密度、细根根长密度,采用约束性排序方法分析不同处理下土壤基本理化性质、根系指标与土壤抗剪强度、土壤黏聚力、土壤内摩擦角之间的关系,如图5所示。RDA分析表明,未烧除样地和计划烧除样地,土壤理化性质及根系指标对土壤抗剪强度指标的总解释度分别为87.78%,78.85%;其中,在未烧除样地中,土壤抗剪强度、土壤内摩擦角与土壤容重呈极显著($p < 0.01$)负相关关系,土壤

黏聚力与含水率呈显著($p < 0.05$)正相关关系,土壤抗剪强度、土壤黏聚力与土壤有机质、细根根长密度呈极显著($p < 0.01$)正相关关系,土壤内摩擦角与土壤有机质、细根根长密度呈显著($p < 0.05$)正相关关系;在进行周期性计划烧除样地中,土壤抗剪强度、土壤黏聚力、土壤内摩擦角与土壤有机质、细根根长密度呈极显著($p < 0.01$)正相关关系。两种处理结果均显示土壤抗剪强度、土壤黏聚力、土壤内摩擦角与土壤有机质、细根根长密度呈显著($p < 0.05$)正相关关系,细根根长密度在2种处理中均是解释度最高的因子,分别为81.9%,72.0%。

可见长期的林火干扰使细根分布显著减少,也是造成

土壤抗剪强度减小的主要原因。



注: τ 为土壤抗剪强度; ϕ 为土壤内摩擦角; C 为土壤黏聚力; pb 为土壤容重; θ_g 为土壤含水量; SOM 为土壤有机质; DR₁ 为细根根长密度; DR₂ 为中根根长密度; UB 为未烧除的对照样地; PB 为计划烧除样地。

图 5 土壤抗剪强度指标与土壤理化因子及其土壤根系分布的关系

Fig. 5 Relationship between soil shear strength index, soil physicochemical factors and soil root distribution

3 讨论

3.1 计划烧除对土壤抗剪强度的影响

本研究发现,随着垂直载荷增加,土壤抗剪强度增大,这是由于垂直压力的增加会减少土壤间孔隙,从而提高了土壤的抗剪强度,与宋鹏帅等^[16]的研究结果基本一致。已有研究表明,土体内部结构在林火干扰下会遭到破坏,使土壤表层黏聚力降低,土壤内摩擦角呈现衰减趋势^[17],本研究结果表明,周期性计划烧除后燃烧剩余灰烬堵塞土壤孔隙,土壤持水能力下降,土壤抗剪强度指标呈下降趋势,其中土壤表层黏聚力显著降低,抗剪强度随之减小,与前人研究结果相似^[18]。计划烧除属于低强度地表火,一般来说对土壤表层影响较大,随土层深度增加这种影响逐渐减弱,在本研究中有类似结论,计划烧除对土壤抗剪强度、土壤黏聚力、土壤内摩擦角的影响随土层深度增加而减小。

研究证明,林火会促进林木根系生物量的增加:张敏等^[19]研究表明,火烧迹地的细根系生物量均有所增加;向泽宇等^[20]也发现火烧后高寒草甸土壤表层根土比显著增加。而在本研究中发现,低强度高频率的林火干扰下,对粗根生物量无显著影响,但却显著降低了 0—20 cm 土层中根和细根生物量。这是由于低强度地表火对云南松林生长影响不大,对其根系分布也无影响,却能直接将草本植物烧毁,影响灌木生长发育,高频率的林火干扰也使林下草本根系无法向下延伸,灌草层植被覆盖度降低。而采样时距离本年度计划烧除工作已半年有余,虽然计划烧除样地部分草本植物恢复生长,但植株较短,根系不发达,仅分布于土壤浅层,导致计划烧除样地 0—20 cm 土层中

根和细根生物量显著低于未烧除样地,20 cm 以下土层细根分布减少,因此 20 cm 以下土层细根分布无显著差异,与 Ryu 等^[21]研究结果相似。

3.2 计划烧除对土壤抗剪强度影响因素分析

土壤抗剪强度受多种因素共同影响。土壤根系分布、土壤有机质、容重、含水量、酸碱度等均会影响土壤抗剪强度。根系在土壤中不断盘根错节固持土壤,根系分泌物产生大量的胶结物质,促进土壤团聚体的形成,也能增强土壤颗粒间的结合强度,在本研究中同样发现,长期的林火干扰下,0—20 cm 土层中根和细根的生物量显著降低,且根系生物量密度、根长密度与土壤抗剪强度、土壤黏聚力、土壤内摩擦角呈极显著的正相关关系。本研究结果显示,土壤抗剪强度指标与土壤有机质、细根根长密度呈显著正相关关系。林地内地表凋落物、腐殖质层、微生物等都是有机质的主要来源,王瑞等^[22]在森林火灾区岩土体物理力学特性研究中发现,火烧后地表裸露,土壤团聚结构遇到雨水冲刷容易解体,有机质流失,本研究也有类似结论,计划烧除使林下地被物烧毁,植被根系受损,土壤结构发生变化,导致土壤黏聚力降低,同时土壤有机质含量减少,土壤颗粒间的胶结作用减弱,抗剪强度随之减小。团聚体结构稳定性亦直接正向影响土壤的抗剪强度,地表覆盖物的拦蓄作用以及植物根系的胶结作用能有效减缓降雨雨滴击溅带来的土壤侵蚀,提高水稳性团聚体含量,增强土体结构稳定性,火烧后地表裸露,根系受损,土壤有机质减少,不利于大团聚体的形成,最终导致土壤团聚结构容易解体,抗剪强度减小,与前人研究结果一致^[23]。大部分研究认为,含水量增加会导致土壤抗剪强度和黏聚力下降^[24-25],但在本研究中发现土壤含水量与抗

剪强度呈正相关关系,这是由于含水率对土壤抗剪强度的影响存在一个临界值,土壤中过多的水分才会分解水稳性团聚体,使颗粒间的相互移动变得容易,朱龙祥等^[26]也发现当含水率高于25%时,粗颗粒周围的黏粒会发生分散。土壤酸碱性对抗剪强度也有一定影响,随着酸度增加,土壤抗剪强度降低^[27],本研究结果与之相反,本研究发现土壤抗剪强度随酸度增加而增大,未经火烧的林地内有大量植物根系与微生物活动的分泌物会使土壤酸化,而计划烧除样地大量草本被烧毁,微生物活动受到抑制,降雨发生时雨滴直接冲刷裸露地表,土壤中的盐基离子向下淋溶,导致pH值升高,土壤内部化合物的胶结状态被破坏。同时植被根系、有机质、水稳性团聚体含量减少等共同作用的结果,最终导致计划烧除样地土壤抗剪强度有减小的趋势。

4 结论

(1) 与未烧除样地相比,各土层粗根生物量密度和根长密度无显著差异,0—20 cm土层中根和细根生物量密度和根长密度显著降低,20—60 cm土层差异不显著。

(2) 计划烧除后,0—20 cm土层土壤抗剪强度、土壤黏聚力显著均减小,20—60 cm土层无明显变化。

(3) 两种处理下土壤抗剪强度、土壤黏聚力、土壤内摩擦角与土壤有机质、细根根长密度呈显著($p < 0.05$)正相关关系,细根根长密度在两种处理中均是贡献度最高的因子,分别为81.9%,72.0%。

参考文献:

- [1] 邓喜庆, 皇宝林, 温庆忠, 等. 云南松林在云南的分布研究[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2013, 35(6): 843-848.
Deng X Q, Huang B L, Wen Q Z, et al. A research on the distribution of *Pinus yunnanensis* forest in Yunnan Province[J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2013, 35(6): 843-848.
- [2] 鲁韦坤, 李湘, 余凌翔, 等. 云南省森林火险气象等级区划研究[J]. 大气科学学报, 2011, 34(3): 322-328.
Lu W K, Li X, Yu L X, et al. A study on meteorological forest fire risk area division in Yunnan Province[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2011, 34(3): 322-328.
- [3] Brockway D G, Gatewood R G, Paris R B. Restoring fire as an ecological process in shortgrass prairie ecosystems: Initial effects of prescribed burning during the dormant and growing seasons[J]. Journal of Environmental Management, 2002, 65(2): 135-152.
- [4] 高岚, 赵铁珍. 我国的森林灾害与林业可持续发展[J]. 北京林业大学学报: 社会科学版, 2003, 2(S1): 1-6.
Gao L, Zhao T Z. The relationship between forest disasters and forestry sustainable development in China[J]. Journal of Beijing Forestry University: Social Sciences, 2003, 2(S1): 1-6.
- [5] 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.
Wang Q H, Shan B J, Gong J P, et al. A study on prescribed burning in pure forest of *Pinus yunnanensis* Franch in central Yunnan Province[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2018, 40(2): 235-240.
- [6] 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.
Wang J M, Li S F, Xu F D, et al. Effects of prescribed burning on the community structure and species diversity in *pinus kesiya* var. *langbianensis* primary forest[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(1): 62-67.
- [7] 张文文, 王秋华, 龙腾腾, 等. 周期性计划烧除对森林生态系统的影响研究综述[J]. 西南林业大学学报: 自然科学版, 2021, 41(4): 181-188.
Zhang W W, Wang Q H, Long T T, et al. A review of the effects of periodic prescribed burning on forest ecosystems[J]. Journal of Southwest Forestry University: Natural Sciences, 2021, 41(4): 181-188.
- [8] 代丽, 张喜, 刘济明. 计划火烧对植被和土壤影响研究综述[J]. 世界林业研究, 2022, 35(2): 47-52.
Dai L, Zhang X, Liu J M. Review on effects of prescribed fire on vegetation and soil[J]. World Forestry Research, 2022, 35(2): 47-52.
- [9] Yildiz A, Graf F, Rickli C, et al. Determination of the shearing behaviour of root-permeated soils with a large-scale direct shear apparatus[J]. Catena, 2018, 166: 98-113.
- [10] 朱春鹏, 刘汉龙, 沈扬. 酸碱污染土强度特性的室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(7): 1146-1152.
Zhu C P, Liu H L, Shen Y. Laboratory tests on shear strength properties of soil polluted by acid and alkali[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(7): 1146-1152.
- [11] Fan C C, Su C F. Role of roots in the shear strength of root-reinforced soils with high moisture content[J]. Ecological Engineering, 2008, 33(2): 157-166.
- [12] Vega J A, Fernández C, Fonturbel T. Throughfall, runoff and soil erosion after prescribed burning in gorse shrubland in Galicia (NW Spain)[J]. Land Degradation &

- Development, 2005, 16(1): 37-51.
- [13] 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): 43-46.
Wang L, Qian Y Q S. Research on the dynamic analysis of soil and water losses in the burned area of forest field[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(6): 43-46.
- [14] Bolan N S, Adriano D C, Kunhikrishnan A, et al. Dissolved organic matter: Biogeochemistry, dynamics, and environmental significance in soils[J]. Advances in Agronomy, 2011, 110: 1-75.
- [15] 胡卸文, 王严, 杨瀛. 火后泥石流成灾特点及研究现状[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1562-1573.
Hu X W, Wang Y, Yang Y. Research actuality and evolution mechanism of post fire debris flow[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6): 1562-1573.
- [16] 宋鹏帅, 王健, 陈琳, 等. 模拟干湿交替对夯实土壤抗剪强度的影响[J]. 水土保持研究, 2021, 28(2): 74-79.
Song P S, Wang J, Chen L, et al. Effect of wet-dry cycle on shear strength of compacted soil[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(2): 74-79.
- [17] 于振江, 胡卸文, 曹希超. 火烧迹地土壤斥水特性研究及其对火后泥石流诱发机理[J]. 地质灾害与环境保护, 2020, 31(2): 93-99.
Yu Z J, Hu X W, Cao X C. Research on the soil water repellency in burned area and its inducing effect on debris post-fire debris flow[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2020, 31(2): 93-99.
- [18] 胡卸文, 侯羿腾, 王严, 等. 火烧迹地土壤根系特征及其对抗剪强度的影响[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 106-112.
Hu X W, Hou Y T, Wang Y, et al. Root characteristics and its influences on shear strength in burned areas[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(5): 106-112.
- [19] 张敏, 马鸿伟, 王希才. 林火对土壤细根系生物量影响的研究[J]. 林业科技, 2003, 28(2): 30-33.
Zhang M, Ma H W, Wang X C. Effect of forest fire on fine root in soil[J]. Forestry Science & Technology, 2003, 28(2): 30-33.
- [20] 向泽宇, 陈瑞芳, 蒋忠荣, 等. 川西北高寒草甸对火烧干扰的短期响应[J]. 草业科学, 2014, 31(11): 2034-2041.
Xiang Z Y, Chen R F, Jiang Z R, et al. The short-term responses of alpine meadow to fire disturbance in Northwest Sichuan[J]. Pratacultural Science, 2014, 31(11): 2034-2041.
- [21] Ryu S R, Concilio A, Chen J, et al. Prescribed burning and mechanical thinning effects on belowground conditions and soil respiration in a mixed-conifer forest, California[J]. Forest Ecology & Management, 2009, 257(4): 1324-1332.
- [22] 王瑞, 兰恒星, 刘世杰, 等. 森林火灾对岩土体物理力学特性的影响[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(1): 114-123.
Wang R, Lan H X, Liu S J, et al. Influence of forest fire on physical and mechanical properties of rock and soil[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(1): 114-123.
- [23] 李聪会, 朱首军, 陈云明, 等. 黄土丘陵区牧草篱对坡耕地土壤抗侵蚀性的影响[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(5): 41-46.
Li C H, Zhu S J, Chen Y M, et al. Effects of forage hedgerows on soil erosion resistance of sloping land in loess hilly areas[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(5): 41-46.
- [24] Sadek M A, Ying C, Liu J. Simulating shear behavior of a sandy soil under different soil conditions[J]. Journal of Terramechanics, 2011, 48(6): 451-458.
- [25] 罗斯生, 罗碧珍, 魏书精, 等. 森林火灾对马尾松次生林土壤理化性质的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(11): 2141-2152.
Luo S S, Luo B Z, Wei S J, et al. Effects of forest fires on soil physical and chemical properties in secondary forest of *Pinus massoniana* [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(11): 2141-2152.
- [26] 朱龙祥, 范昊明, 郭成久, 等. 冻融作用对原状棕壤抗剪强度的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 55-60.
Zhu L X, Fan H M, Guo C J, et al. Effect of freeze-thaw cycles on shear strength of undisturbed brown soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2): 55-60.
- [27] 刘新荣, 袁文, 傅晏, 等. 酸碱环境干湿循环作用下砂岩抗剪强度劣化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(12): 2320-2326.
Liu X R, Yuan W, Fu Y, et al. Deterioration rules of shear strength in sandstones under wetting and drying cycles in acid and alkali environment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(12): 2320-2326.