

DOI: 10.5846/stxb202111223283

王博, 韩树文, 顾泽, 陈锋, 白夜, 刘晓东. 不同烈度林火对油松林潜在地表火行为的影响. 生态学报, 2023, 43(5): 1812-1821.

Wang B, Han S W, Gu Z, Chen F, Bai Y, Liu X D. Effects of wildfire of different severities on potential surface fire behavior of *Pinus tabulaeformis* forest. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 1812-1821.

不同烈度林火对油松林潜在地表火行为的影响

王 博^{1,2}, 韩树文³, 顾 泽^{1,2}, 陈 锋^{1,2,*}, 白 夜², 刘晓东^{1,2}

1 北京林业大学森林资源生态系统过程北京市重点实验室, 北京 100083

2 森林草原火灾风险防控应急管理部重点实验室, 北京 100083

3 河北省平泉市农业农村局, 承德 067500

摘要: 油松是我国华北地区代表性树种之一, 含有丰富油脂, 容易引发大面积高烈度森林火灾。阐明不同烈度林火对油松林地表可燃物负荷量和潜在地表火行为的影响, 对于油松林林火管理具有重要意义。以辽河源自然保护区 2014 年不同烈度林火干扰后油松林分为研究对象, 根据不同烈度(重度、中度、轻度)和对照(未过火)分别设置 3 块 20 m×20 m 样地, 共 12 块样地, 调查地表可燃物和林分结构指标, 结合室内实验, 利用 BehavePlus 5.0 软件进行潜在火行为模拟, 探讨不同烈度林火 5 年后油松林地表可燃物负荷量和潜在地表火行为特点, 并分析影响潜在地表火行为的主要因素。研究表明: (1) 不同烈度林火之间, 细小可燃物负荷量和地表可燃物总负荷量均不存在显著性差异 ($P>0.05$)。 (2) 不同烈度林火后, 在不同风速和可燃物含水率条件下, 油松林潜在地表火蔓延速度、火线强度不存在显著性差异 ($P>0.05$), 单位面积发热量、火焰高度、反应强度存在显著性差异 ($P<0.05$)。 (3) 不同烈度林火后油松林潜在地表火行为主要受油松更新幼苗基径、灌木负荷量、油松平均冠幅、上层枯叶负荷量、油松更新幼苗密度的影响。研究结果表明不同烈度林火均可以降低再次燃烧的火烈度和风险。

关键词: 林火烈度; 油松林; 地表可燃物负荷量; 潜在地表火行为; 辽河源自然保护区

Effects of wildfire of different severities on potential surface fire behavior of *Pinus tabulaeformis* forest

WANG Bo^{1,2}, HAN Shuwen³, GU Ze^{1,2}, CHEN Feng^{1,2,*}, BAI Ye², LIU Xiaodong^{1,2}

1 Beijing Key Laboratory for Forest Resources and Ecosystem Processes, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Key Laboratory of Forest and Grassland Fire Risk Prevention Ministry of Emergency Management, Beijing 100083, China

3 Pingquan Bureau of Agriculture and Rural Areas, Chengde 067500, China

Abstract: *Pinus tabulaeformis* is one of the representative tree species in North China, which is rich in oil and easy to cause large area and high severity wildfire. It is of great significance for wildfire management of *Pinus tabulaeformis* forest to elucidate the influence of wildfire of different severities on the surface fuel load and potential surface fire behavior of *Pinus tabulaeformis* forest. In this study, *Pinus tabulaeformis* forests with different severities of wildfire disturbance in Liaoheyuan Nature Reserve in 2014 were taken as the research object. According to different severities (high, moderate, low) and control (unburned), three 20 m × 20 m sample plots were set, and a total of 12 plots were set. Based on the investigation of surface fuel and stand structure index, combined with indoor experiments, the potential fire behavior was simulated by BehavePlus 5.0 software. The characteristics of surface fuel load and potential surface fire behavior of *Pinus tabulaeformis* forest after 5 years of fire with different severities were discussed, and the main factors affecting the potential surface fire behavior were analyzed. The results indicated that (1) there was no significant difference in the fine fuel load and the total

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1511601)

收稿日期: 2021-11-22; 网络出版日期: 2022-07-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenfeng1208@bjfu.edu.cn

surface fuel load between different severities wildfire disturbance ($P>0.05$). (2) Under the conditions of different wind speeds and fuel moisture content, there were no significant differences in the potential surface fire spread rate and fireline intensity ($P>0.05$), but there were significant differences in the calorific value per unit area, flame height and reaction intensity ($P<0.05$) after forest fire disturbance with different severities. (3) The potential surface fire behavior of *Pinus tabuliformis* forest with different severities was mainly affected by the regeneration seedling base diameter of *Pinus tabuliformis*, shrub load, average canopy width of *Pinus tabuliformis*, load of upper dead leaves, and the regeneration seedling density of *Pinus tabuliformis*. The results showed that forest fires with different severities could reduce the severity and risk of reburning.

Key Words: wildfire severity; *Pinus tabuliformis* forest; surface fuel load; potential surface fire behavior; Liaohuyuan Nature Reserve

林火烈度是指林火对森林生态系统的破坏程度,是衡量林火干扰后生态效应的重要指标,通常以火烧前后蓄积量变化或火烧前后林木死亡株数变化来表示^[1]。不同烈度林火具有不同的生态作用,高烈度森林大火严重威胁生命财产安全和森林生态安全,破坏野生动物生存栖息地,释放大量有害气体^[2-3],中、低烈度林火可以降低林分密度,减少地表可燃物积累,促进耐火树种的优势地位,维持森林结构和功能,降低森林火灾风险^[4]。受气候变暖、极端天气(长期干旱)、火灾季节延长、长期灭火政策等因素影响,森林火灾发生风险和反复发生火灾的可能性不断增加^[5]。

林火干扰后再次燃烧是森林管理的关键问题^[6],分析不同烈度林火后地表可燃物负荷量和潜在地表火行为特征,对于揭示火干扰后再次燃烧机制,制定火灾后长期管理措施具有重要意义。近年来,国内外学者借助 BehavePlus、FARSITE、FlamMap、FirefamilyPlus、FFE-FVS、Prometheus 等林火模拟软件开展了大量关于潜在火行为的研究。Johnson 等研究了火后管理对可燃物动态和潜在火行为的影响^[7]。Xie 等研究了山松甲虫爆发对火炬松林分可燃物动态和潜在火行为的影响^[8]。李连强等利用罗森迈尔(Rothermel)模型计算潜在火行为指标,研究了北京妙峰山林场油松林潜在地表火行为与林分结构的关系^[9]。综上所述,目前关于可燃物负荷量和潜在火行为的研究主要集中在林分潜在火行为特征及影响因素以及不同经营管理措施对潜在火行为的影响,鲜有火干扰后地表可燃物负荷量和潜在地表火行为的相关研究。

油松(*Pinus tabuliformis*)是我国华北地区代表性树种之一,分布广、面积大,且非常易燃,容易引发大面积高烈度森林火灾^[10]。本研究以河北辽河源自然保护区 2014 年不同烈度林火干扰后油松林分为研究对象,基于野外样地调查和室内实验分析,解决以下关键科学问题:(1)不同烈度林火对油松林地表可燃物负荷量和潜在地表火行为的影响?(2)影响火干扰后油松林潜在地表火行为的主要因素。研究结果可以为火干扰后油松林植被生态恢复和林火管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

辽河源自然保护区(北纬 41°01'30"—41°21'15",东经 118°22'39"—118°37'21")位于河北省东北部的平泉市境内,位于辽宁、内蒙、河北三省交界地,总面积 33554.3hm²,是我国暖温带和中温带交错地区典型地带性森林植被保护区。保护区内地形复杂、沟壑纵横,平均海拔 1180 m。该区属于半湿润半干旱大陆性季风型山地气候,四季分明,气候多变,年平均气温 7.3℃,年平均降水量 550 mm,当地月平均风速为 2 m/s,月平均极大风速可达 10 m/s,无霜期 120 至 130 天。受海拔高度影响,土壤类型主要包括棕壤、褐土、草甸土三大类型 8 个亚类。保护区的森林群落包括油松(*Pinus tabuliformis*)、落叶松(*Larix gmelinii*)、山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)、柞树(*Xylosma racemosum*),灌木及草本植被主要有胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、小叶鼠李(*Rhamnus parvifolia*)、悬钩子(*Rosa*

rubus)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、益母草(*Leonurus artemisia*)、葎叶蛇葡萄(*Ampelopsis humulifolia*)。历史火灾资料显示,近十年内平泉市发生森林火灾共 88 起,其中 30%的火灾为上坟烧纸引发,35%为农民烧荒引发,此外还有小孩玩火、电器短路、火因不明等其他火因^[11]。

1.2 样地设置与调查

2014 年 10 月,辽河源自然保护区实验区内因上坟烧纸引发森林火灾,过火面积达 100 多 hm^2 。2019 年 8 月,在对不同烈度林火干扰后油松林分全面踏查的基础上,选择林分和立地因子相似、人为干扰较少且具有代表性地段设置样地,包括不同火烧烈度(重度火烧、中度火烧、轻度火烧)和对照(未过火)样地(图 1),每块样地大小 20 m×20 m,共 12 块样地,样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本概况

Table 1 Basic characteristics of the sampling plots

火烧烈度 Fire severity	海拔 Altitude/m	坡向 Aspect	坡度 Slope/(°)	胸径 DBH/cm	树高 height/m	冠幅 Crown diameter/m	熏黑高度 Blackened height/m	油松存活率 The survival rate of <i>Pinus tabuliformis</i> /%
重度火烧 High severity (H)	1182	东北 Northeast	31	16.10±0.48	10.50±0.80	2.16±0.16	10.49±0.82	0
中度火烧 Moderate severity (M)	1174	东北 Northeast	32	17.59±0.77	12.21±0.87	3.13±0.24	8.10±0.99	50.8
轻度火烧 Low severity (L)	1189	东北 Northeast	29	21.75±0.72	13.70±0.38	4.56±0.19	1.76±0.07	87.4
对照 Control (C)	1200	东南 Southeast	28	17.56±0.96	14.69±0.19	4.26±0.43	—	100.0

火烧烈度是根据烧死木所占比例和树木平均熏黑高度与树高比值确定,火烧烈度划分标准见表 2^[12]。对照样地是过火林分周围未过火的油松林。

表 2 火烧烈度划分标准

Table 2 Criteria for the classification of fire severity level

火烧烈度 Fire severity	划分标准 Criteria for the classification
H	树木平均熏黑高度与树高的比值大于 2/3,林木死亡率>70%
M	树木平均熏黑高度与树高比值在 1/3—2/3 之间,林木死亡率在 30%—70%之间
L	树木平均熏黑高度与树高的比值小于 1/3,林木死亡率<30%

在每个标准地内,测定林分海拔、坡度、坡向、坡位,对林分的乔木层、灌木层、草本层、枯枝落叶层进行调查。测定林分密度、胸径、树高、冠幅、熏黑高度,每个标准地内设置 5 m×5 m 的灌木样方 5 个,1 m×1 m 的草本枯落物样方 5 个(图 2)。将样方内的灌木、草本、地表枯落物全部割除并称量湿重。地表枯落物包括枯枝和枯叶两大类,枯叶包括上层枯叶和下层枯叶,枯枝包括 1 h 时滞(直径<0.64 cm)、10 h 时滞(0.64 cm≤直径≤2.54 cm)、100 h 时滞(2.54 cm<直径≤7.62 cm)三类。细小可燃物是指 1 h 时滞可燃物和草本可燃物,每个类别的可燃物取样 100 g 装入信封,带回实验室进行室内实验^[13]。

1.3 可燃物理化性质

将野外采集的样品放入电热风干燥箱内,在 105℃条件下,将可燃物烘干至恒质量,根据以下公式计算可燃物干湿比。

$$D=(M_1-M_2)/(M_3-M_4) \tag{1}$$

式中: D 为可燃物干湿比,无量纲, M_1 为可燃物样品烘干后的质量(g), M_2 为信封烘干后的质量, M_3 为可燃物样品烘干前的质量(g), M_4 为信封烘干前的质量(g)。

样方内调查的各类可燃物量,分别乘以干湿比,得出各样方的各类可燃物绝干质量及平均样方可燃物质量,根据以下公式计算可燃物负荷量。

$$W=\frac{D \times M}{100S} \tag{2}$$

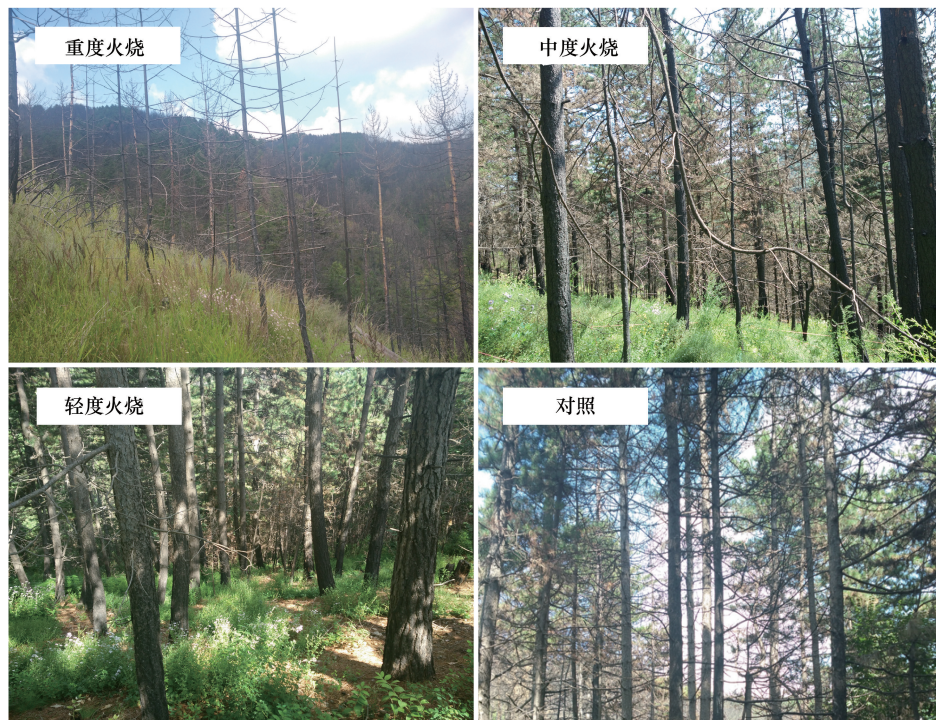


图1 不同烈度林火干扰后油松林样地示意图

Fig.1 Schematic diagram of *Pinus tabulaeformis* forest sample plots disturbed by different severities wildfire

式中: W 为可燃物负荷量 (t/hm^2), D 为可燃物干湿比, 无量纲, M 为地表可燃物质量 (g), S 为可燃物调查面积 (m^2)。

将野外样品烘干、粉碎, 取 1 g 压饼, 再烘干去除水分, 用分析天平准确称量 (精确到 0.0001 g), 使用 PRR3600 型全自动氧弹式热量仪测定样品的热值 (kJ/kg)。每种可燃物样品做 3 个重复, 求平均值^[14]。

1.4 潜在地表火行为

本研究利用 BehavePlus 5.0 软件进行潜在火行为模拟, 在不同风速条件和可燃物含水率条件下, 将野外调查和室内实验所得的相关指标输入系统, 得到地表火蔓延速度、单位面积发热量、火线强度、火焰高度、反应强度作为潜在地表火行为的评价指标^[15]。

综合前人研究成果, 本文将 1 h 时滞可燃物 SA/V (表面积与体积比) 设定为 $1260 \text{ m}^2/\text{m}^3$, 活草本 SA/V 设定为 $8845 \text{ m}^2/\text{m}^3$, 活木本 SA/V 设定为 $800 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ^[11], 死可燃物熄灭含水率设定为 30%^[16]。整个河北省地区防火期内累年月平均风速约为 $2 \text{ m}/\text{s}$, 平均极大风速约为 $10 \text{ m}/\text{s}$ ^[11]。由于本文没有深入分析坡度因子对潜在火行为的影响, 因此将所有样地坡度近似设置为 30° 。

可燃物含水率条件参照美国林火行为研究中采用的可燃物模型湿度系列, 分别表示当地的第 90、第 95、

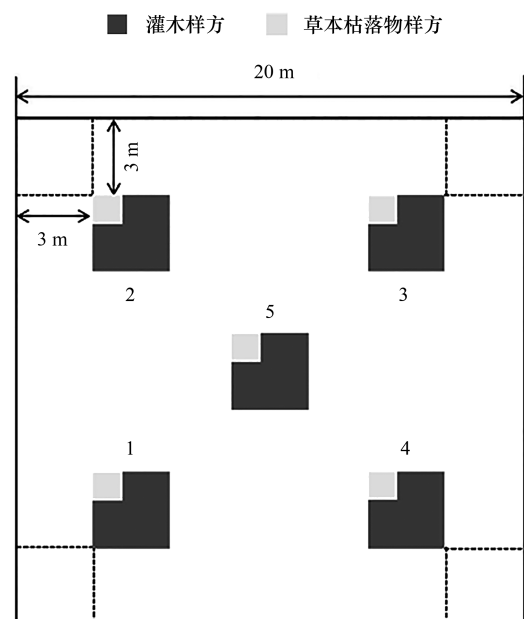


图2 样方布设示意图

Fig.2 Schematic diagram of quadrat layout

第 97 百分位的火险天气条件(分别用 1-Low、2-Med、3-High 表示)^[17]。因为林火的发生蔓延受风、可燃物含水率的强烈影响,在低风速、高可燃物含水率条件下通常不会发生林火,因此本研究设定 A、B、C、D 4 种风速和可燃物含水率条件,其中 A 代表月平均风速、1-Low 可燃物含水率条件,B 代表月平均风速、2-Med 可燃物含水率条件,C 代表月平均极大风速、1-Low 可燃物含水率条件,D 代表月平均极大风速、2-Med 可燃物含水率条件。

1.5 数据分析

本研究以辽河源自然保护区不同烈度林火干扰后油松林分为研究对象,调查地表可燃物和林分结构指标,结合室内实验,利用 BehavePlus 5.0 软件进行潜在火行为模拟,利用单因素方差分析方法分析不同烈度林火后油松林地表可燃物负荷量和潜在地表火行为的差异显著性,采用邓肯多重极差检验法(Duncan)在 0.05 水平和 0.01 水平上进行检验。利用 Pearson 相关性分析方法和主成分分析方法探讨不同烈度林火后,影响油松林潜在地表火行为的主要因素。所有的数据处理、统计分析均由 R 4.0.5 和 Excel 2016 完成。

2 结果与分析

2.1 不同烈度林火对油松林地表可燃物负荷量的影响

基于野外调查和室内实验分析结果,辽河源自然保护区不同烈度林火后油松林地表可燃物负荷量特征见表 3,油松林地表不同类型可燃物所占比例见图 3。

表 3 不同烈度林火后油松林地表可燃物负荷量(平均值±标准差)/(t/hm²)

Table 3 Surface fuel load of *Pinus tabulaeformis* forest disturbed by different severities wildfire (Mean±SD)

火烧烈度 Fire Severity	重度 High	中度 Moderate	轻度 Low	对照 Control
细小可燃物负荷量 Fine fuel load	1.77±0.51	1.93±0.07	1.62±0.04	1.57±0.26
地表可燃物总负荷量 Total surface fuel load	30.71±5.23	49.90±16.70	20.15±0.24	62.72±6.31

由表 3 可知,不同烈度林火后,油松林地表可燃物总负荷量的范围是 17.31—75.24 t/hm²,细小可燃物负荷量的范围是 1.11—2.78 t/hm²。地表可燃物总负荷量大小关系为对照>中度火烧>重度火烧>轻度火烧,细小可燃物负荷量大小关系为中度火烧>重度火烧>轻度火烧>对照。单因素方差分析结果表明,不同火烧烈度之间地表可燃物负荷量和细小可燃物负荷量均不存在显著性差异($P>0.05$)。

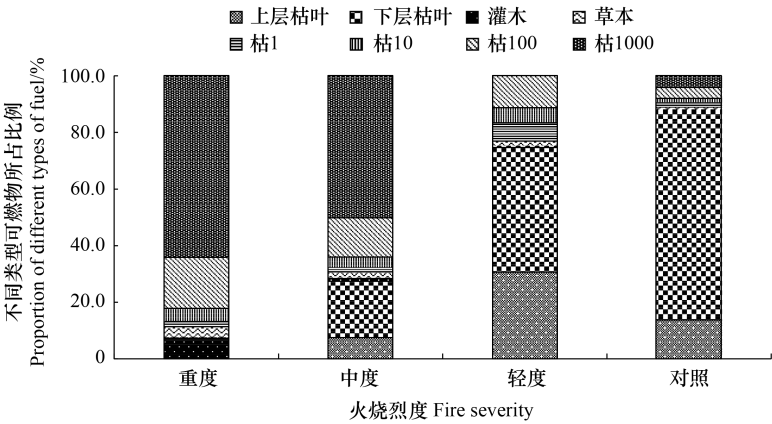


图 3 不同烈度林火后油松林地表不同类型可燃物所占比例

Fig.3 Proportions of different types of combustibles on the surface of *Pinus tabulaeformis* forest disturbed by forest fires of different severities

由图 3 可知,重度和中度林火后地表可燃物主要是 1000h 滞可燃物,分别占可燃物负荷量达到 64.0%和 50.0%,轻度火干扰和对照组的地表可燃物主要是下层枯叶,分别占可燃物负荷量达到 44.8%和 74.6%。火干

扰后,灌木、草本、枯 100 可燃物负荷量均有所增加,并且随着火烧烈度的增大而增大。下层枯叶可燃物负荷量减少,且随着火烧烈度的增大而减小。此外,火干扰后枯 1、枯 10 可燃物均有所增加。轻度林火后上层枯叶可燃物增多,枯 1000 可燃物减少,重度和中度林火后上层枯叶可燃物减少,枯 1000 可燃物增多。

2.2 不同烈度林火对油松林潜在地表火行为的影响

分析不同风速和可燃物含水率条件下,不同烈度林火后油松林潜在地表火行为特征(地表火蔓延速度、单位面积发热量、火线强度、火焰高度、反应强度),结果见图 4。

由图 4 可知,不同烈度林火后油松林潜在地表火行为特征(地表火蔓延速度、单位面积发热量、火线强度、火焰高度、反应强度)大小关系总体呈现出轻度火烧>对照>中度火烧>重度火烧的规律,重度火烧后地表火蔓延速度、火线强度、火焰高度均为 0,不会发生地表火。在不同风速和可燃物含水率条件下,油松林地表火蔓延速度和火线强度大小关系呈现出 C>D>A>B 的总体规律,当可燃物含水率条件相同时,不同风速条件下单位面积发热量和反应强度相同。火焰高度总体规律不明显。

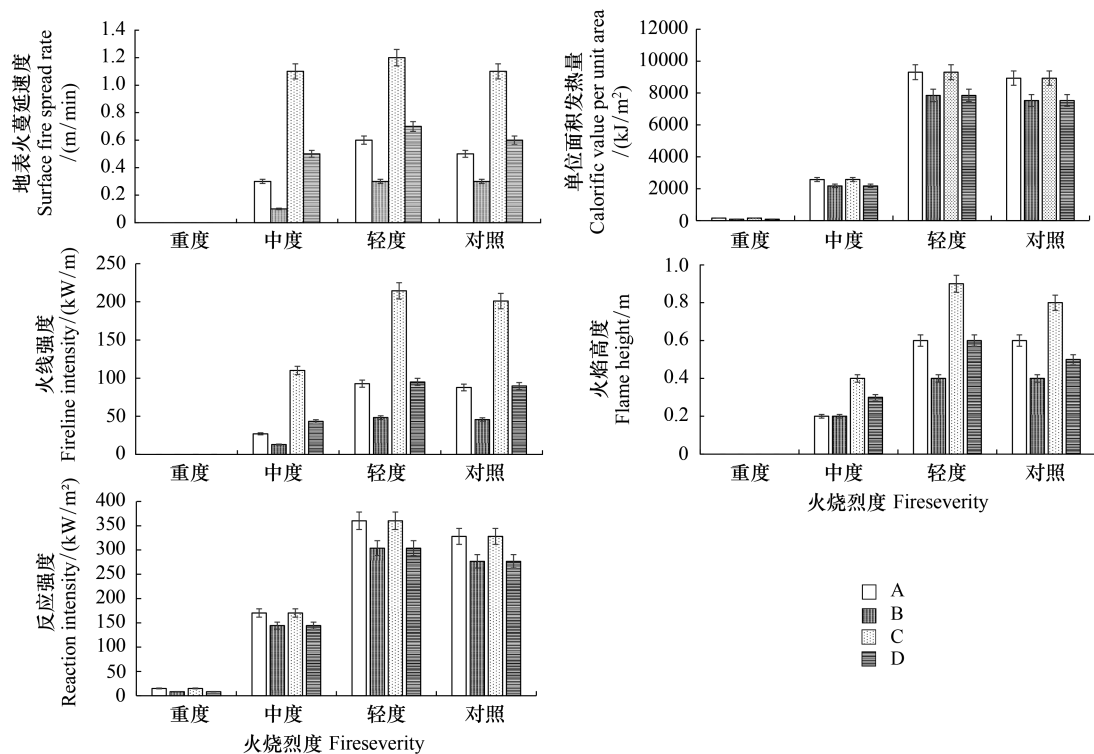


图 4 不同风速条件、不同可燃物含水率条件、不同烈度林火后油松林潜在地表火行为

Fig.4 Potential surface fire behavior of *Pinus tabulaeformis* forest under different wind speeds, moisture contents of fuel and fire severities

A:月平均风速、1-Low 可燃物含水率条件;B:月平均风速、2-Med 可燃物含水率条件;C:月平均极大风速、1-Low 可燃物含水率条件;D:月平均极大风速、2-Med 可燃物含水率条件

单因素方差分析结果表明,在不同风速和可燃物含水率条件下,不同烈度林火后油松林潜在地表火蔓延速度、火线强度不存在显著性差异 ($P>0.05$),单位面积发热量、火焰高度、反应强度存在显著性差异 ($P<0.05$)。

2.3 不同烈度林火后油松林潜在地表火行为与林分结构的相关性分析

利用 Pearson 相关性分析方法对潜在地表火行为与林分结构进行相关性分析,探讨不同烈度林火后油松林潜在地表火行为与林分结构的关系,相关性分析结果见表 4。

由表 4 可知,林分密度、平均胸径、1 h 可燃物负荷量与不同烈度林火后油松林潜在地表火行为均无显著相关关系 ($P>0.05$)。

在乔木层指标中,平均树高与单位面积发热量存在显著正相关关系($P<0.05$),平均冠幅与单位面积发热量、反应强度存在极显著正相关关系($P<0.01$),与火线强度、火焰高度存在显著正相关关系($P<0.05$)。

表 4 不同烈度林火后油松林潜在地表火行为与林分结构的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of potential surface fire behavior and stand structure of *Pinus tabulaeformis* forest disturbed by different severities wildfire

林分结构 Stand structure		相关性系数 Correlation coefficient				
		地表火蔓延速度 Surface fire spread rate	单位面积发热量 Calorific value per unit area	火线强度 Fireline intensity	火焰高度 Flame height	反应强度 Reaction intensity
乔木层 Tree layer	林分密度	-0.042	0.329	0.144	0.182	0.217
	平均胸径	0.247	0.553	0.377	0.460	0.504
	平均树高	0.189	0.686 *	0.408	0.508	0.569
	平均冠幅	0.372	0.809 **	0.591 *	0.672 *	0.723 **
灌草更新层 Shrub, grass and regeneration layer	灌木负荷量	-0.584 *	-0.784 **	-0.609 *	-0.749 **	-0.807 **
	草本负荷量	-0.371	-0.731 **	-0.514	-0.624 *	-0.654 *
	油松更新密度	0.327	0.863 **	0.532	0.672 *	0.733 *
	油松更新基径	-0.516	-0.774 *	-0.596	-0.713 *	-0.760 *
枯枝落叶层 Litter layer	上层枯叶负荷量	0.486	0.743 **	0.531	0.674 *	0.728 **
	1h 时滞可燃物	0.201	0.529	0.258	0.413	0.497
	土壤含水率	0.204	0.661 *	0.306	0.502	0.564

* 和 ** 分别代表显著性水平小于 0.05 和 0.01

在灌草更新层指标中,灌木负荷量与单位面积发热量、火焰高度、反应强度都存在极显著负相关关系($P<0.01$),与地表火蔓延速度、火线强度存在显著负相关关系($P<0.05$),草本负荷量与单位面积发热量存在极显著负相关关系($P<0.05$),与火焰高度、反应强度存在显著负相关关系($P<0.05$)。油松更新密度与单位面积发热量存在极显著正相关关系($P<0.01$),与火焰高度、反应强度存在显著正相关关系($P<0.05$)。油松更新基径与单位面积发热量、火焰高度、反应强度都存在显著负相关关系($P<0.05$)。

在枯枝落叶层指标中,上层枯叶负荷量与单位面积发热量、反应强度存在极显著正相关关系($P<0.01$),与火焰高度存在显著正相关关系($P<0.05$)。土壤含水率与单位面积发热量存在显著正相关关系($P<0.05$)。

2.4 影响潜在地表火行为的主要因素分析

运用方差膨胀因子(VIF)诊断法进行共线性检验,结果显示所有变量的 VIF 值均小于 5,说明不同变量之间不存在明显的共线性。剔除与潜在地表火行为特征不相关的影响因素(林分密度、平均胸径、1 h 时滞可燃物负荷量),对林分结构 8 个指标进行主成分分析,表 5 显示了影响潜在地表火行为因素的主成分分析结果,能够表示不同指标对潜在地表火行为的影响。

根据累计方差贡献率大于 80%的原则,选择了 2 个主成分累计方差贡献率为 82.8%。如表 5 所示,第 1 主成分中所有指标系数均小于 0.4,油松更新基径、灌木负荷量、平均冠幅、上层枯叶负荷量系数相对较大,反映了乔木层、灌草更新层、枯枝落叶层对潜在地表火行为的综合影响,第 2 主成分中油松更新密度的系数为 -0.843,其他指标系数均小于 0.4,主要反映油松更新对潜在地表火行为的影响。主成分分析结果表明,辽河源自然保护区不同烈度林火后油松林分潜在地表火行为主要受油松更新基径、灌木负荷量、平均冠幅、上层枯叶负荷量、油松更新密度的影响。

3 讨论

林火对再次燃烧的作用受之前火干扰烈度、之前火干扰间隔时间、树种组成、森林结构、可燃物、植被更新、地形、水平衡、天气、森林管理等因素影响^[6,18-21],既可以产生正反馈作用(自增强模式),也可能产生负反

馈作用(自调节模式)^[19,22]。

表 5 潜在地表火行为影响因素的主成分分析
Table 5 Principal component analysis of the factors influencing potential surface fire behavior

指标项目 Name of index			第 1 主成分 The first principal components	第 2 主成分 The second principal components
载荷矩阵 Load matrix	乔木层	平均树高	0.366	0.236
		平均冠幅	0.387	
	灌木更新层	灌木负荷量	-0.391	-0.122
		草本负荷量	-0.336	0.176
		油松更新密度	0.219	-0.843
		油松更新基径	-0.399	-0.208
	枯枝落叶层	上层枯叶负荷量	0.373	0.322
		土壤含水率	0.324	-0.184
贡献率 Contribution rate	主成分的方差开方		2.385	0.967
	方差贡献率		0.711	0.117
	累积方差贡献率		0.711	0.828

3.1 火干扰后油松林地表可燃物负荷量和潜在地表火行为

大面积高烈度火灾后冠层破坏,林内光照条件增强,灌木草本快速生长^[23],火烧迹地内残存大量断枝、枯木,随着时间的推移,断枝坠落、枯木倒下等都会增加地表可燃物负荷量,产生正反馈作用(自增强模式)^[19],增加未来再次发生地表火的风险^[24]。这种反馈作用有可能导致森林向灌木、草地方向逆行演替^[25],研究发现这种正反馈作用与较长的火灾间隔时间、极端火灾天气、地形等因素有关^[19],但本研究结果发现高烈度林火后没有再次发生地表火的风险,这主要是因为高烈度林火后 1 h 时滞可燃物和上层枯叶可燃物显著减少,导致火灾风险降低。

频繁的中、低烈度火灾可以消耗地表可燃物和梯形可燃物,降低再次燃烧的火烈度和风险,提高森林生态系统对再次燃烧的恢复能力^[26]。这种负反馈作用(自调节模式)主要受第一次火烈度和较短的火灾间隔时间的影响^[22]。随着时间的推移,林分结构的变化和可燃物动态可能会增加随后的火行为的影响^[27]。中度火烧与低度火烧的生态作用也存在差异,通常情况下,低烈度火烧只能烧掉地表的枯枝落叶,火烧后可燃物在短时间内快速积累,林分密度和可燃物负荷量仍处于较高水平^[28],而中度火烧可以明显降低危险可燃物和梯形可燃物水平,实现更多生态恢复目标^[29]。

不同烈度林火会产生不同的生态作用,降低林下可燃物负荷量,进而影响潜在地表火行为。但本研究结果发现,不同烈度林火之间,细小可燃物负荷量和地表可燃物总负荷量均不存在显著性差异($P>0.05$),这与田野等^[30]研究结果相矛盾。分析主要是因为重度和中度林火烧掉大量地表枯枝落叶,灌木草本快速更新,随着时间的推移,火干扰 5 年后地表可燃物逐渐积累,受枯枝坠落等因素影响,重度和中度火烧样地 1000 h 时滞可燃物明显增多,可燃物负荷量逐渐积累。

3.2 火干扰后油松林潜在地表火行为与林分结构的关系

乔木层林分结构会间接影响潜在地表火行为^[9],火干扰后森林冠层受到影响,特别是重度火烧后的森林冠层几乎被完全破坏,增加了林内光照条件,改变了局部小气候条件^[10,31]。灌木更新层和枯枝落叶层能够直接影响潜在地表火行为,火干扰后清理了部分地表可燃物,灌木草本快速生长,对再燃的火行为产生影响^[32-33],这种影响的具体作用主要与第一次火烈度和火灾间隔时间有关^[19]。此外枯枝可以作为余烬来源和余烬着火的接受面^[32],当枯枝掉落时可以增加地表可燃物负荷量^[34],增加火灾停留时间^[35],影响火行为和火蔓延。但本文的研究结果发现,只有上层枯叶与地表火蔓延速度存在显著正相关关系($P<0.05$),与火线强度存在极显著正相关关系($P<0.01$),其他指标均与地表火蔓延速度和火线强度不存在显著相关关系($P>$

0.05),这与其他研究发现的灌木和枯枝是再燃火烈度的重要预测因子的结果相矛盾^[32,36]。分析是因为样地中灌木植被的水平连续性较低,不会增加再次燃烧过程中的地表火烈度^[16]。

3.3 火烧迹地植被生态恢复管理应用

中、低烈度火烧是清理林内危险可燃物、降低森林火灾风险的有效手段^[37]。我国东北、西南部分林区在防火期到来之前的有利天气条件(低温度、低风速、高相对湿度)下开展计划烧除,一定程度上降低了森林火灾风险^[38],但受较低火烈度影响,干扰程度较小,地表枯落物积累速度快,林分密度和可燃物负荷可能仍处于较高水平,在极端天气条件下,可能无法达到预期生态恢复目标^[28,39]。大量研究发现中度火烧是恢复森林结构(长期采取灭火政策)的有效工具^[40],能够有效降低林分密度并清理林下危险可燃物^[39],可以平衡保护野生动物生存环境、提高林下生产力、降低森林火灾风险等多个目标^[21],同时中度火干扰后引起的树木密度降低和异质性,使这些森林能够适应高温和干旱环境^[41],实现更多生态恢复目标。但中度火烧存在跑火可能性,可能会导致部分冠层树木死亡,甚至烧毁附近的一些植被和房屋,这在居民区附近和生态重要性极高的一些区域是不允许的^[42]。

4 结论

本研究探讨了不同烈度林火对油松林地地表可燃物负荷量和潜在地表火行为的影响,为探讨油松林火后再次燃烧规律提供了经验数据。研究表明,不同烈度林火后油松林潜在地表火行为主要与平均冠幅、上层枯叶负荷量、灌木负荷量、油松更新密度密切相关,在不同风速和可燃物含水率条件下,不同烈度林火均可以消耗地表可燃物,降低再次燃烧的火烈度和风险。

火干扰后可燃物动态及潜在火行为规律是林火生态学的研究热点之一,揭示火干扰后再次燃烧机制对于火烧迹地植被生态恢复、森林经营管理(计划烧除)等具有重要意义。目前的研究多侧重于火干扰后短期反应,重点关注一个火灾季节或一次火灾干扰事件,没有深入分析多维度不同因素的协同作用,且受林火行为预测模型限制,模拟结果仍存在较大不确定性,降低研究结果的广泛适用性。同时森林可燃物空间异质性大,少量的野外调查样地难以充分反映区域可燃物负荷量变化,一些陡峭、偏远的地形条件很难到达,野外生长茂密的灌木给调查取样工作带来了很大不便,冠层断枝坠落和枯立木倒下增加了安全风险。建议在今后的研究中引入遥感、无人机、雷达、5G 等技术,基于不同时空尺度数据,结合地面验证数据,并增加实验重复次数,利用决策树、贝叶斯、人工神经网络、深度学习等机器学习算法,分析火干扰后可燃物动态变化规律及潜在火行为特征,揭示林火干扰后再次燃烧机制。

参考文献(References):

- [1] 常禹,陈宏伟,胡远满,冯玉婷,李悦. 林火烈度评价及其空间异质性研究进展. 自然灾害学报, 2012, 21(2): 28-34.
- [2] Szpakowski D, Jensen J L R, Butler D, Chow T E. A study of the relationship between fire hazard and burn severity in Grand Teton National Park, USA. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 2021, 98: 102305.
- [3] 岳超,罗彩访,舒立福,沈泽昊. 全球变化背景下野火研究进展. 生态学报, 2020, 40(2): 385-401.
- [4] Pellegrini A F A, Caprio A C, Georgiou K, Finnegan C, Hobbie S E, Hatten J A, Jackson R B. Low-intensity frequent fires in coniferous forests transform soil organic matter in ways that may offset ecosystem carbon losses. *Global Change Biology*, 2021, 27(16): 3810-3823.
- [5] Oakman E C, Hagan D L, Waldrop T A, Barrett K. Understory community shifts in response to repeated fire and fire surrogate treatments in the southern Appalachian Mountains, USA. *Fire Ecology*, 2021, 17(1): 1-15.
- [6] Collins L, Hunter A, Mccoll-Gausden S, Penman T D, Zylstra P. The effect of antecedent fire severity on reburn severity and fuel structure in a resprouting eucalypt forest in Victoria, australia. *Forests*, 2021, 12(4): 450.
- [7] Johnson M C, Kennedy M C, Harrison S C, Churchill D, Pass J, Fischer P W. Effects of post-fire management on dead woody fuel dynamics and stand structure in a severely burned mixed-conifer forest, in northeastern Washington State, USA. *Forest Ecology and Management*, 2020, 470/471: 118190.
- [8] Xie H T, Fawcett J E, Wang G G. Fuel dynamics and its implication to fire behavior in loblolly pine-dominated stands after southern pine beetle outbreak. *Forest Ecology and Management*, 2020, 466: 118130.
- [9] 李连强,牛树奎,陶长森,陈羚,陈锋. 妙峰山油松林分结构与地表潜在火行为相关性分析. 北京林业大学学报, 2019, 41(1): 73-81.
- [10] 王博. 河北辽河源自然保护区油松林火烧迹地植被恢复研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.

- [11] 王铮. 辽河源自然保护区主要森林类型负荷量及潜在火行为研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
- [12] Lentile L B, Holden Z A, Smith A M S, Falkowski M J, Hudak A T, Morgan P, Lewis S A, Gessler P E, Benson N C. Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire*, 2006, 15(3): 319.
- [13] 周润青. 大兴安岭南端主要森林类型可燃物负荷量及其潜在地表火行为研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [14] 郭利峰. 北京八达岭林场人工油松林燃烧性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [15] Schöpf H. C. truesdell, rational thermodynamics, New York, McGraw-hill book company, 1969, XII. 208 S. *Zamm-Zeitschrift Fur Angewandte Mathematik Und Mechanik*, 1978, 58: 360.
- [16] 牛树奎. 北京山区主要森林类型火行为与可燃物空间连续性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [17] 金文斌. 长白山森林地被可燃物载量及林火行为研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [18] Collins B M, Lydersen J M, Everett R G, Stephens S L. How does forest recovery following moderate-severity fire influence effects of subsequent wildfire in mixed-conifer forests? *Fire Ecology*, 2018, 14(2): 1-9.
- [19] Harvey B J, Donato D C, Turner M G. Burn me twice, shame on who? Interactions between successive forest fires across a temperate mountain region. *Ecology*, 2016, 97(9): 2272-2282.
- [20] Kane V R, Cansler C A, Povak N A, Kane J T, McGaughey R J, Lutz J A, Churchill D J, North M P. Mixed severity fire effects within the Rim fire: relative importance of local climate, fire weather, topography, and forest structure. *Forest Ecology and Management*, 2015, 358: 62-79.
- [21] Lydersen J, Collins B, Coppoletta M, Jaffe M R, Northrop H, Stephens S. Fuel dynamics and reburn severity following high-severity fire in a *Sierra Nevada*, USA, mixed-conifer forest. *Fire Ecology*, 2019, 15: 1-14.
- [22] Larson A J, Belote R T, Cansler C A, Parks S A, Dietz M S. Latent resilience in ponderosa pine forest: effects of resumed frequent fire. *Ecological Applications*, 2013, 23(6): 1243-1249.
- [23] 褚燕琴, 牛树奎, 陈锋, 芮淑君, 王凯. 火干扰及环境因子对油松林林下植被的影响. *浙江农林大学学报*, 2017, 34(1): 96-103.
- [24] North M P, Stevens J T, Greene D F, Coppoletta M, Knapp E E, Latimer A M, Restaino C M, Tompkins R E, Welch K R, York R A, Young D J N, Axelson J N, Buckley T N, Estes B L, Hager R N, Long J W, Meyer M D, Ostoja S M, Wyrsh P. Tamm Review: Reforestation for resilience in dry western US forests. *Forest Ecology and Management*, 2019, 432: 209-224.
- [25] Prichard S J, Stevens-Rumann C S, Hessburg P F. Tamm Review: shifting global fire regimes: lessons from reburns and research needs. *Forest Ecology and Management*, 2017, 396: 217-233.
- [26] Becker K M L, Lutz J A. Can low-severity fire reverse compositional change in montane forests of the *Sierra Nevada*, California, USA? *Ecosphere*, 2016, 7(12): e01484.
- [27] Dunn C J, Bailey J D. Modeling the direct effects of salvage logging on long-term temporal fuel dynamics in dry-mixed conifer forests. *Forest Ecology and Management*, 2015, 341: 93-109.
- [28] Higgins A M, Waring K M, Thode A E. The effects of burn entry and burn severity on ponderosa pine and mixed conifer forests in Grand Canyon National Park. *International Journal of Wildland Fire*, 2015, 24(4): 495.
- [29] Lydersen J M, Collins B M, Miller J D, Fry D L, Stephens S L. Relating fire-caused change in forest structure to remotely sensed estimates of fire severity. *Fire Ecology*, 2016, 12(3): 99-116.
- [30] 田野, 牛树奎, 陈锋, 王婕, 曹萌. 火干扰后的油松林地表死可燃物负荷及影响因子. *福建农林大学学报: 自然科学版*, 2018, 47(6): 691-697.
- [31] Stephens S L, Collins B M, Fettig C J, Finney M A, Hoffman C M, Knapp E E, North M P, Safford H, Wayman R B. Drought, tree mortality, and wildfire in forests adapted to frequent fire. *BioScience*, 2018, 68(2): 77-88.
- [32] Coppoletta M, Merriam K, Collins B. Post-fire vegetation and fuel development influences fire severity patterns in reburns. *Ecological Applications*, 2016, 26(3): 686-699.
- [33] Nemens D G, Varner J M, Kidd K R, Wing B. Do repeated wildfires promote restoration of oak woodlands in mixed-conifer landscapes? *Forest Ecology and Management*, 2018, 427: 143-151.
- [34] Ritchie M W, Knapp E E, Skinner C N. Snag longevity and surface fuel accumulation following post-fire logging in a ponderosa pine dominated forest. *Forest Ecology and Management*, 2013, 287: 113-122.
- [35] Monsanto P G, Agee J K. Long-term post-wildfire dynamics of coarse woody debris after salvage logging and implications for soil heating in dry forests of the eastern Cascades, Washington. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(12): 3952-3961.
- [36] Wagtendonk J W, Wagtendonk K A, Thode A E. Factors associated with the severity of intersecting fires in Yosemite National Park, California, USA. *Fire Ecology*, 2012, 8(1): 11-31.
- [37] Stevens-Rumann C, Morgan P. Repeated wildfires alter forest recovery of mixed-conifer ecosystems. *Ecological Applications*, 2016, 26(6): 1842-1853.
- [38] 高仲亮, 魏建珩, 龙腾腾, 王秋华, 周汝良, 舒立福. 安宁市计划烧除点烧区域遴选研究. *消防科学与技术*, 2020, 39(9): 1285-1290.
- [39] Hunter M E, Iniguez J M, Lentile L B. Short- and long-term effects on fuels, forest structure, and wildfire potential from prescribed fire and resource benefit fire in southwestern forests, USA. *Fire Ecology*, 2011, 7(3): 108-121.
- [40] Collins B M, Fry D L, Lydersen J M, Everett R, Stephens S L. Impacts of different land management histories on forest change. *Ecological Applications*, 2017, 27(8): 2475-2486.
- [41] Williams A P, Seager R, Abatzoglou J T, Cook B I, Smerdon J E, Cook E R. Contribution of anthropogenic warming to California drought during 2012-2014. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(16): 6819-6828.
- [42] Huffman D W, Crouse J E, Sánchez Meador A J, Springer J D, Stoddard M T. Restoration benefits of re-entry with resource objective wildfire on a ponderosa pine landscape in northern *Arizona*, USA. *Forest Ecology and Management*, 2018, 408: 16-24.