

DOI:10.12171/j.1000-1522.20210084

八达岭林场油松林冠层可燃物特征及潜在火行为

陈敏斯¹ 杜建华² 王 薇² 于海晨¹ 王 博¹ 顾 泽¹ 刘晓东¹

(1. 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083; 2. 应急管理部森林防火预警监测信息中心, 北京 100055)

摘要:【目的】研究冠层可燃物特征和树冠火发生条件, 模拟潜在火行为特征, 对于森林可燃物管理及树冠火有效防控均具有重要意义。【方法】本文以北京市八达岭林场油松林为研究对象, 利用破坏性取样方法, 选择具有代表性的 18 株油松样木进行采伐, 自第一活枝高始, 以 1 m 为一个层次对油松林冠层由下而上进行划分, 不足 1 m 的按照 1 m 层次划分, 并按照冠层可燃物枝条阶大小(针叶: 大枝直径 ≥ 0.64 cm; 小枝直径 < 0.64 cm)调查冠层总可燃物生物量, 结合样地面积和油松林平均冠长, 计算样地平均冠层可燃物负荷量(CFL)和冠层容积密度(CBD)。基于林分因子, 建立与林分结构参数(胸径、第一活枝高、冠长、树高、冠幅)的多元回归模型; 根据冠层可燃物负荷量模型可估算样地平均冠层容积密度, 结合研究区防火期内月平均最大风速和地表可燃物负荷量, 在 3 种细小可燃物含水率条件下(6%、10%、14%), 利用 van Wagner 和 Cruz 的树冠火蔓延模型, 预测油松林树冠火的发生, 利用 Byram 模型计算冠层潜在火行为特征(如火线强度和火焰高度)。【结果】(1)油松林平均冠层可燃物负荷量为 4.54 t/hm^2 , 冠层容积密度为 0.21 kg/m^3 , 可燃物负荷量分布呈现由下而上逐层递减的趋势。林冠底层(0~1 m)可燃物占冠层总可燃物比例最大, 为 54.03%, 大枝在林冠底层分布比例较大且快速逐层递减, 针叶在各层次均有较大比例分布。(2)基于林分因子建立的冠层可燃物负荷量非线性模型具有较高的拟合度, 其中胸径和第一活枝高与冠层可燃物负荷量呈极显著相关($P < 0.01$), 在不破坏林木的情况下, 根据林分易测因子可较好地估测油松林冠层可燃物负荷量。(3)在低燃烧条件下, 除 4 月份外油松林发生间歇型树冠火的概率均低于 0.5; 在中度燃烧条件下, 春季(3—5 月份)风速较大, 均存在发生连续型树冠火的可能; 在极端干燥的高燃烧条件下, 2—5 月连续型树冠火的潜在火行为指标较高, 4 月份发生的连续型树冠火, 表现出最高的潜在火行为指标, 蔓延速度为 46 m/min , 火线强度为 $8\,062 \text{ kW/m}$, 火焰高度为 15 m。【结论】冠层可燃物是影响林火发生的重要因素, 胸径和第一活枝高为冠层可燃物负荷量的主要影响因子。通过破坏性取样直接获得冠层可燃物实测数据, 所构建的冠层可燃物负荷量估测模型具有较高精度。风速、冠层容积密度和细小可燃物含水率与树冠火的发生和蔓延关系密切, 油松林春季存在的树冠火发生隐患较大, 大风和极端干燥气候条件下易发生高强度树冠火, 通过营林抚育措施(抚育间伐, 修枝)可有效降低可燃物密度, 增大活枝高, 以降低树冠火发生概率及危害程度。

关键词: 油松; 冠层可燃物负荷量; 冠层容积密度; 树冠火; 火行为

中图分类号: S762.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2022)03-0055-10

引文格式: 陈敏斯, 杜建华, 王薇, 等. 八达岭林场油松林冠层可燃物特征及潜在火行为 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(3): 55-64. Chen Minsi, Du Jianhua, Wang Wei, et al. Characteristics and potential fire behavior of combustibles in the canopy of *Pinus tabulaeformis* forest in Badaling Forest Farm of Beijing [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(3): 55-64.

Characteristics and potential fire behavior of combustibles in the canopy of *Pinus tabulaeformis* forest in Badaling Forest Farm of Beijing

Chen Minsi¹ Du Jianhua² Wang Wei² Yu Haichen¹ Wang Bo¹ Gu Ze¹ Liu Xiaodong¹

(1. School of Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Forest Fire Prevention Early Warning and Monitor Center of Ministry of Emergency Management, Beijing 100055, China)

Abstract: [Objective] Canopy fire is a type of high-energy fire which severely damages forest resources. It

收稿日期: 2021-03-11 修回日期: 2021-03-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(31770696)。

第一作者: 陈敏斯。主要研究方向: 森林防火。Email: 925913259@qq.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学生态与自然保护学院。

责任作者: 刘晓东, 教授。主要研究方向: 森林防火。Email: xd-liu@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

is difficult to extinguish and threatens the safety of fire fighting personnel. Analyzing the characteristics of canopy combustibles and the occurrence conditions of canopy fires, and simulating potential fire behavior characteristics are of great significance for forest combustibles management and effective prevention and control of canopy fires. [Method] The study took the *Pinus tabuliformis* forest in the Beijing Badaling Forest Farm as the research object. Using destructive sampling methods to harvest 18 representative samples of *P. tabuliformis*, starting from the first living branch height, the canopy of the *P. tabuliformis* forest was divided from bottom to top with 1 m as a level, those less than 1 m were divided into 1 m level, and investigated the total biomass of combustibles in the canopy according to the diameter of the canopy combustible branches (needles; bough diameter ≥ 0.64 cm; twig diameter < 0.64 cm), which combined the plot area and the average canopy length of the *P. tabuliformis* forest to calculate the canopy fuel load (CFL) and canopy bulk density (CBD). Based on stand factors, we established a multiple regression model with stand structure parameters (DBH, height of the first living branch, crown length, tree height, crown width); estimated the sample plot based on the canopy fuel load model. Under the conditions of three fine combustibles moisture content (6%, 10%, 14%), the average CBD, combining with the average monthly maximum wind speed and the surface fuel load in the study area, the canopy fire spread rate model of van Wagner and Cruz was used to predict the occurrence of canopy fire in the *P. tabuliformis* forest, and the Byram model was used to simulate potential fire behavior characteristics (such as the intensity of the fire line and the height of the flame). [Result] (1) The average canopy fuel load of *P. tabuliformis* forest was 4.54 t/ha, the CBD was 0.21 kg/m³, and the fuel load distribution was gradually decreasing from bottom to top. The combustibles at the bottom of the canopy (0–1 m) accounted for the largest proportion of the total combustibles in the canopy, which was 54.03%. The boughs distributed at the bottom of the canopy and rapidly decreased layer by layer, and the needles were distributed in a large proportion at each layer. (2) The non-linear model of canopy fuel load based on stand factors had a high degree of fit, in which DBH and height of the first living branch were extremely significantly correlated with CFL ($P < 0.01$). Under the condition of not destroying the forest, the canopy fuel load of *P. tabuliformis* forest can be better estimated according to the easy-to-test factor of the forest stand. (3) Under moderate burning conditions, the wind speed was high in spring (March to May), and there was a possibility of continuous canopy fire; under extremely dry and high combustion conditions, the potential fire behavior index of continuous canopy fires from February to May was relatively high. The continuous canopy fire that occurred in April showed the highest potential fire behavior index, with a spreading rate of 46 m/min. The fire line intensity was 8 062 kW/m, and the flame height was 15 m. [Conclusion] Canopy combustible is an important factor affecting the occurrence of forest fires, and the DBH and the height of first living branch are the main influencing factors of CFL. The measured data of canopy combustibles are directly obtained through destructive sampling, and the constructed canopy fuel load estimation model has high accuracy. Wind speed, CBD and moisture content of fine combustibles are closely related to the occurrence and spread of canopy fires. The forests in the study are prone to high-intensity canopy fires under extreme dry climate conditions. The hidden dangers of canopy fire in the *P. tabuliformis* forest in spring are greater, high winds and extreme dry climate conditions are prone to high-intensity canopy fires. Through forest tending measures (thinning and pruning), the density of combustibles can be effectively reduced, and the height of live branches can be increased to reduce the probability and harm of canopy fire degree.

Key words: *Pinus tabuliformis*; canopy fuel load; canopy bulk density; crown fire; fire behavior

森林火灾有着突发性强、危害严重的特点,森林火灾发生的种类有地表火,树冠火和地下火,其中树冠火的火行为非常复杂^[1],对森林资源和人民群众安全存在严重威胁^[2]。

森林可燃物是林火发生和燃烧的物质基础,森

林可燃物的特性包括可燃物的理化性质和空间特征^[3]。对于冠层可燃物的研究主要集中在3个方面:冠层可燃物空间分布特征;估测冠层可燃物负荷量;模拟潜在冠层火行为。在冠层可燃物空间分布特征方面,牛树奎等^[4-5]对可燃物进行调查发现北京山区

主要针叶林冠层可燃物垂直和水平连续性与树冠火蔓延相关。Gómez 等^[6]开发了密度管理图(DMD),分析林分结构与潜在树冠火之间的关系,为抚育间伐提供依据^[7]。Cruz 等^[8]评估了公认标准 3 m 树冠间距可能导致过度疏伐。在对冠层可燃物负荷量估测方面,一般使用分段标准枝法估测冠层可燃物负荷量^[9],冠层容积密度是预测树冠火蔓延的重要冠层特征,但在实际中很难测量^[10]。Keane 等^[11]评估 6 种间接采样技术以估算 CBD, Alexander 等^[10]采用冠段与冠长的比值建立冠层总可燃物量的函数, Botequim 等^[12-13]利用激光雷达数据估算了 CBD,间接估测可以避免对林木的破坏,但破坏性取样方法较间接估测方法精确度更高。在冠层可燃物负荷量模型构建方面,根据林分实测数据, Cruz 等^[14]对北美西部 4 种林分冠层可燃物特征的回归模型进行评估。Fernández 等^[15]利用树木生物量干质量方程估计 4 种松树林分冠层可燃物特征,在不同燃烧条件下模拟树冠火的发生和蔓延。在模拟树冠火发生与蔓延方面,国外主要通过模型拟合对蔓延速度和火强度等潜在火行为指标进行预测,国内也相继应用各种模拟系统进行树冠火预测^[16],如 NEXUS、FFE-FVS、FARSITE、FMAPlusO、Flam Map 以及 Behave Plus 等,在美国西部林分树冠火的研究中得到广泛应用^[17]。上述模型都基于 Rothermel 预测地表火蔓延速率的理论基础,以及 van Wagner 树冠火发生模型和 Byram 火蔓延模型,虽然在判断树冠火发生方面已有数个模型,但 van Wagner 模型仍然是参数较简单并且较准确的模型^[8]。通过这些模型对树冠火的潜在火行为评估对于有效进行森林可燃物管理与调控提供参考^[18-19]。

综上所述,国外对冠层可燃物的研究多针对易燃的针叶林如阿勒颇松(*Pinus halepensis*)、西黄松(*Pinus ponderosa*)等开展^[6,10,14-15,18,20-21],国内对于树冠火研究也主要在油松(*Pinus tabulaeformis*)林、侧柏(*Platycladus orientalis*)林等易燃林分中开展,包括对可燃物在林分中的空间分布特征及其主要影响因素研究^[22],以间接方法估测冠层可燃物负荷量,如标准枝法等^[9],相较于实测数据存在一定的误差,基于可燃物实测值模拟冠层潜在火行为的研究仍然较少。因此本研究利用破坏性取样方法对华北地区典型针叶林油松林进行冠层可燃物负荷量调查,选择具有代表性的 18 株油松样木进行采伐,进而构建林分因子与冠层可燃物负荷量的模型,估算样地平均冠层容积密度,并根据树冠火发生和蔓延模型,计算油松林树冠火发生概率、模拟树冠火潜在火行为特征。八达岭林场油松林可燃物负荷量大,含水率小,

油脂含量高,易发生高强度树冠火^[23],本研究对抚育间伐管理提供参考,以达到降低首都森林火灾风险,保护森林资源的目的。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

北京市八达岭林场(116°01'E、40°20'N)地处北京市延庆区,为燕山山脉一部分,平均海拔为 780 m,属暖温带半湿润大陆性季风气候^[24]。年平均气温 10.8℃,全年无霜期 160 d,年均降水量 454 mm,降水集中在 7—8 月,年均相对湿度 56.2%,土壤类型以花岗岩等发育而来的褐土、棕壤为主,植被类型为 20 世纪 50 年代之后营造的人工林,其中油松林面积为 860.23 hm²^[25]。另有侧柏(*Platycladus orientalis*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和元宝枫(*Acer truncatum*)等。灌木主要有山杏(*Armeniaca sibirica*)、荆条(*Vitex negundo*)、山桃(*Prunus davidiana*)、三裂绣线菊(*Spiraea trilobata*)、黄栌(*Cotinus coggygria*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)和酸枣(*Ziziphus jujuba*)等;草本主要有白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、披针叶苔草(*Carex lanceolata*)和野青茅(*Calamagrostis arundinacea*)等^[26]。

1.2 油松林冠层可燃物调查

2020 年 9—10 月在北京八达岭林场青龙桥分场 3 林班 5 小班采伐作业期间随机选取 3 块 20 m × 20 m 油松林标准样地,记录各个标准样地的地形因子(海拔、坡度、坡向、坡位)和林分因子(平均胸径、平均树高等),并进行每木检尺。对地表可燃物取样,将标准地划分为 16 个 5 m × 5 m 的样方以调查灌木基本信息,其中以 1 m × 1 m 小样方利用收获法调查草本和不同时滞的枯落物鲜质量^[4],分别取样约 200 g 带回。

采伐样地内的 18 棵树木,进行了破坏性取样,对冠层可燃物进行分层次分类型的调查^[10,27]。采样的油松是随机从均匀林分中选择的,具有代表性,排除其中树冠分布极其不平衡,严重落叶和顶部折断的油松树木。测量每一株砍伐的油松树木的胸径(cm)、地径(cm)、第一活枝高(m)、树高(m)、冠长(m),并取南北冠幅和东西冠幅的平均值作为冠幅(m)(表 1)。将油松林树冠由第一活枝高,根据枝条着生位置,垂直向上划分每 1 m 高度为一个层次,不足 1 m 的按照 1 m 层次划分。每层次冠层可燃物分为大枝(直径 ≥ 0.64 cm),小枝(直径 < 0.64 cm)和叶 3 种类型,将各层次的大枝,小枝,叶全部收获,分别称质量记录各类型可燃物的鲜质量,并分别取

表 1 油松样本基本情况

Tab. 1 Basic information of *Pinus tabulaeformis* sample wood

树号 Tree No.	胸径 DBH/cm	地径 Ground diameter/cm	第一活枝高 Height of the first living branch/m	冠长 Crown length/m	树高 Tree height/m	冠幅 Crown width/m
1	7.20	10.50	3.20	3.10	6.30	1.05
2	6.80	9.60	3.40	1.85	5.25	1.90
3	5.40	6.50	3.52	1.30	4.82	1.55
4	6.50	7.10	2.30	2.45	4.75	2.50
5	14.40	18.60	4.70	2.62	7.32	2.95
6	10.40	12.60	5.40	2.75	8.15	1.60
7	8.50	10.40	4.80	1.50	6.30	1.70
8	5.40	6.80	3.20	3.10	6.30	1.35
9	7.80	10.20	3.70	1.20	4.90	1.05
10	8.70	11.60	5.00	2.20	7.20	1.60
11	5.40	8.60	3.30	1.40	4.70	1.45
12	6.70	8.50	5.30	2.70	8.00	1.50
13	8.20	10.60	5.20	2.05	7.25	1.65
14	9.00	10.30	5.20	1.00	6.20	2.00
15	7.10	10.50	3.50	1.40	4.90	2.30
16	8.30	11.40	4.90	2.50	7.40	1.70
17	7.90	10.30	5.30	1.40	6.70	1.65
18	10.00	13.00	4.00	4.00	8.00	2.80

注：表中数据均为实测原始数据。Note: data in the table are the measured original data.

样约 200 g 装入信封称得湿质量，带回实验室烘干以计算可燃物含水率。

1.3 油松林冠层可燃物含水率测定

将野外采集带回的油松冠层可燃物样品以及地表可燃物样品，在电热鼓风恒温烘箱内以 105 ℃ 持续烘干至恒质量，计算样品湿质量与干质量之差得到样品含水量，样品含水量与样品湿质量的比值为可燃物的相对含水率(RMC, %)，根据相对含水率计算油松林树冠各层次大枝、小枝和叶的可燃物生物量。

$$W = \sum_{i=1}^n (W_B + W_T + W_L) \tag{1}$$

式中： W 为油松冠层可燃物生物量(kg)； W_B 、 W_T 、 W_L 分别为大枝、小枝和叶的可燃物生物量(kg)； i 为树冠层次。

冠层可燃物负荷量和冠层容积密度是评估树冠潜在火行为的主要参数，通过以下公式计算^[28]：

$$CFL = \frac{WN}{S} \tag{2}$$

$$CBD = \frac{CFL}{CL} \tag{3}$$

式中： CFL 为冠层可燃物负荷量(kg/m²)，指在树冠火发生和蔓延中被消耗的可燃物量； N 为每个样地油松平均株数； S 为样地面积(m²)； CBD 为冠层容积密度(kg/m³)，指单位体积内的可燃物量； CL 为油松平均冠长(m)^[28]。

热值(H)是可燃物燃烧性的重要参量，是预测冠层潜在火行为的重要指标。将不同高度层次和类型的可燃物样品在实验室烘干，磨粉，取约 1 g 粉末用

压片机压成样品块，烘干之后用万分之一天平称质量(精确到 0.000 1 g)，使用 PRR3600 型全自动氧弹式量热仪测定样品的热值(H , kJ/kg)，每个样品重复试验 3 次取平均值，得到各层和类型的可燃物热值^[29]。

1.4 油松林冠层可燃物负荷量模型构建

以冠层可燃物负荷量为因变量，以胸径、地径、第一活枝高、冠长、树高、冠幅为自变量，进行多元逐步回归筛选，最终确定油松林冠层可燃物负荷量关系模型。可根据构建的冠层可燃物模型计算八达岭地区油松林样地的平均冠层容积密度。

1.5 油松林冠层潜在火行为计算

根据北京市延庆区 2019 年 11 月至 2020 年 5 月的风速气象数据，计算得到每个月的平均最大风速(数据来源：中国气象数据网 <http://data.cma.cn>，站点位于北京市延庆区，区站号为 54406，均为 10 m 高空处的风速)。

分析八达岭林场油松林每个月潜在火行为及其存在的火灾隐患。树冠火蔓延速率取决于冠层容积密度(CBD)、风速和细小可燃物含水率，地表细小可燃物含水率决定林火发生的难易程度，细小可燃物主要由 1 h 时滞的枯枝组成，其大小受到气温，相对湿度，遮阳程度等影响^[30]。参考 Mitsopoulos 等^[10]以及 Fernández 等^[15]对 4 种典型针叶林的研究，根据八达岭地区植被以及气象资料，结合油松林的实际状况，本文将细小可燃物含水率设置为 3 个梯度，低燃烧条件的细小可燃物含水率为 14%，中度燃烧条件的细小可燃物含水率为 10%，高燃烧条件的细小可燃物含水率为 6%^[15]。

树冠火的发生概率根据 Cruz 等的模型, 概率阈值 $P = 0.5$ 为决策标准, 以判断树冠火的发生, 低于该值为地表火^[15]。

$$P(Y = 1) = \frac{e^{4.236 + 0.357U_{10} - 0.710FSG - 4.613I_1 - 1.856I_2 - 0.331EFFM}}{1 + e^{4.236 + 0.357U_{10} - 0.710FSG - 4.613I_1 - 1.856I_2 - 0.331EFFM}} \quad (4)$$

式中: P 为树冠火发生概率; U_{10} 为 10 m 高空风速 (km/h); FSG 为冠层可燃物与地表可燃物的距离 (m); $EFFM$ 为细小可燃物含水率 (%); I_i 是定义如下的虚拟变量: SFC 为地表可燃物消耗量 (kg/m^2), 当 $SFC < 1.0 \text{ kg}/\text{m}^2$ 时, $I_1 = 1$; $I_2 = 0$; 当 $1.0 \text{ kg}/\text{m}^2 < SFC < 2.0 \text{ kg}/\text{m}^2$ 时, $I_1 = 0$; $I_2 = 1$; 当 $SFC > 2.0 \text{ kg}/\text{m}^2$ 时, $I_1 = 0$; $I_2 = 0$ ^[15]。

其中, 地表可燃物消耗量根据 3 个样地的地表可燃物负荷量数据确定, 本研究内业实验表明地表可燃物负荷量均值为 $0.845 \text{ kg}/\text{m}^2$, 则公式 (4) 中虚拟变量 $I_1 = 1$, $I_2 = 0$ 。

若发生树冠火, 则采用 Van Wagner 等提出的树冠火蔓延临界速率 (R_0) 判断发生树冠火的类型, 根据 Cruz 等的树冠火蔓延速率 (R_c), 通过比较树冠火蔓延速率 (R_c) 和树冠火蔓延临界速率 (R_0) 的大小对于不同类型的树冠火进行判定^[15]: 当 $R_c < R_0$ 时, 间歇型树冠火发生概率为 p ; 当 $R_b > R_0$ 时, 连续型树冠火发生概率为 p ; 当 $R_c > R_0 > R_b$ 时, 间歇型树冠火发生概率为 $p(R_c - R_0)/(R_c - R_b)$, 连续型树冠火发生概率为 $p(R_0 - R_b)/(R_c - R_b)$ ^[31]。

$$R_c = 11.02U_{10}^{0.9}CBD^{0.19}e^{-0.17EFFM} \quad (5)$$

$$R_0 = \frac{3}{CBD} \quad (6)$$

$$R_b = R_c e^{-\frac{R_c}{R_0}} \quad (7)$$

式中: R_c 为树冠火蔓延速率 (m/min); R_0 为树冠火蔓延临界速率 (m/min); R_b 为间歇型树冠火蔓延速率 (m/min)。

火线强度和火焰高度参考 Byram 方程估算, 均已转化为国际计量单位^[29]。

$$I = \frac{HWR}{60} \quad (8)$$

$$L = 0.237I^{0.46} \quad (9)$$

式中: I 为火线强度 (kW/m); H 为可燃物热值 (kJ/kg); W 为可燃物燃烧消耗量 (kg/m^2); R 为树冠火蔓延速度 (m/min); L 为火焰高度 (m)。

1.6 数据统计和分析

本文利用 Excel 和 SPSS 25.0 进行数据统计分析, 在 Origin 中作图包括冠层可燃物负荷量垂直分布图, 使用 R 3.4.2 建立油松林冠层总可燃物负荷量估测模型。

2 结果与分析

2.1 冠层可燃物负荷量分布特征

油松林冠层可燃物垂直分布对树冠火发生, 以及是否由间歇型树冠火发展为连续型树冠火有重要影响^[4]。根据冠层可燃物的实测值和样地内油松林木的株数, 计算得到树冠各类型的平均可燃物负荷量, 如表 2。

由表 2 可知, 油松冠层可燃物负荷量最小值为 $0.14 \text{ kg}/\text{m}^2$, 最大值为 $1.21 \text{ kg}/\text{m}^2$, 平均值为 $0.45 \text{ kg}/\text{m}^2$ 。油松冠层容积密度最小值为 $0.06 \text{ kg}/\text{m}^3$, 最大值为

表 2 油松冠层可燃物分布特征

Tab. 2 Distribution characteristics of combustibles in *Pinus tabulaeformis* canopy

树号 Tree No.	针叶生物量 Needle biomass/kg	小枝生物量 Twig biomass/kg	大枝生物量 Bough biomass/kg	冠层总生物量 Total canopy biomass/kg	冠层可燃物负荷量 Canopy fuel load/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	冠层容积密度 Canopy bulk density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
1	0.72	0.45	0.83	2.00	0.50	0.23
2	0.82	0.58	1.27	2.67	0.67	0.31
3	0.20	0.22	0.19	0.61	0.15	0.07
4	1.34	0.67	2.00	4.01	1.00	0.47
5	0.63	1.44	1.77	3.84	0.96	0.45
6	1.53	1.00	2.31	4.84	1.21	0.56
7	0.16	0.29	0.29	0.74	0.19	0.09
8	0.77	0.26	0.00	1.03	0.26	0.12
9	0.15	0.24	0.91	1.30	0.33	0.15
10	1.04	0.43	0.81	2.28	0.57	0.27
11	0.71	0.41	0.63	1.75	0.44	0.20
12	0.41	0.28	0.32	1.01	0.25	0.12
13	0.66	0.33	0.38	1.37	0.34	0.16
14	0.14	0.10	0.30	0.54	0.14	0.06
15	0.23	0.25	0.25	0.73	0.18	0.09
16	0.48	0.34	0.04	0.86	0.22	0.10
17	0.24	0.29	0.11	0.64	0.16	0.07
18	0.70	0.63	1.01	2.44	0.61	0.29

0.56 kg/m³, 平均值为 0.21 kg/m³, 为进一步分析其垂直分布特征, 按照树冠层次进行分析, 如图 1 所示。

由图 1 可知, 油松林样地平均冠层可燃物负荷量为 4.54 t/hm², 垂直向上各层次可燃物负荷量为 2.45、1.43、0.62、0.04 t/hm², 比例为 54.03%、31.51%、13.65%、0.81%。各类型冠层可燃物负荷量分别为大枝 1.87 t/hm²、小枝 1.14 t/hm²、叶 1.52 t/hm², 比例为 41.33%、25.14%、33.53%。油松林冠层可燃物负荷量分布呈现由下而上逐层递减的趋势, 各类型可燃物负荷量均逐层减少, 在 0~1 m 树冠层次的大枝所占比例较高, 逐层递减最快, 在 3~4 m 层次基本无分布。叶可燃物负荷量在 4 个层次均有较大比例的分布, 油松针叶表面积比大, 热值高, 在树冠火蔓延时为主要的可燃物。

2.2 冠层可燃物负荷量模型构建

根据多元逐步回归筛选方法, 对胸径、地径、第

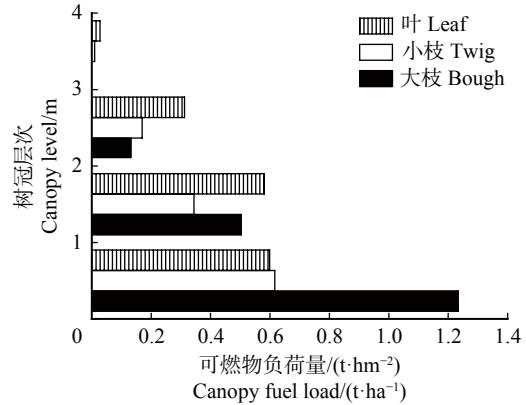


图 1 油松林冠层可燃物负荷量垂直分布特征
Fig. 1 Vertical distribution characteristics of canopy fuel load in *Pinus tabuliformis* forest

一活枝高、冠长、树高和冠幅 6 个自变量与冠层总可燃物负荷量进行非线性拟合, 确定油松林冠层总可燃物负荷量估测模型如表 3。

表 3 油松林冠层总可燃物负荷量估测模型

Tab. 3 Estimation model of total canopy fuel load in *Pinus tabuliformis* forest

估测模型 Estimation model	R^2	调整 R^2 Adjusted R^2	P
$Y = -0.27 + 1.41X_1 - 0.85X_2 + 0.40X_3^2 + 0.33X_4 + 0.46X_5^2 - 0.58X_6^2$	0.867 2	0.794 8	0.000 3

注: Y 为冠层可燃物负荷量(kg/m²); X_1 为胸径(cm); X_2 为地径(cm); X_3 为第一活枝高(m); X_4 为冠长(m); X_5 为树高(m); X_6 为冠幅(m)。Notes: Y , canopy fuel load (kg/m²); X_1 , DBH (cm); X_2 , ground diameter (cm); X_3 , height of the first living branch (m); X_4 , crown length (m); X_5 , tree height (m); X_6 , crown width (m).

为保证模型的精确度, 并不是所有的因子都在模型中进行拟合, 经过筛选及非线性拟合, 去除了地径变量, 最终确定的油松林冠层总可燃物负荷量估测模型的 R^2 达到 0.867 2, $P = 0.000 3 < 0.05$, 模型具有较高拟合度, 胸径和第一活枝高因子与冠层可燃物负荷量呈极显著相关($P < 0.01$), 冠长、树高和冠幅因子与冠层可燃物负荷量呈显著相关($P < 0.05$)。本研究采用破坏性取样获取可燃物负荷量的实测值, 构建了林分结构因子与总冠层可燃物负荷量模型, 可依据本模型估测八达岭油松林样地的平均冠层容积密度。

2.3 冠层潜在火行为发生

风速是决定树冠火传播速率的主要因素^[18], 风对火行为的影响通过提高能量的产生速率以及通过将可燃物暴露于辐射和对流加热中来传播热通量^[32]。本文将细小可燃物含水率设置为 3 个梯度, 低燃烧条件的细小可燃物含水率为 14%, 中度燃烧条件为 10%, 高燃烧条件为 6%^[15]。北京市森林防火期为每年 11 月 1 日至次年 5 月 31 日, 重点防火期为 3 月 15 日至 4 月 15 日, 本文仅对防火期内的树冠火发生情况进行讨论。北京市延庆区八达岭林场油松林的树冠火发生情况如表 4。

由表 4 可知, 在低燃烧条件下, 八达岭林场油松林在防火期内均不具备发生连续型树冠火的条件, 在春季(3—5 月)有较大可能发生间歇型树冠火。中度燃烧条件下, 春季(3—5 月)均有可能发生连续型树冠火, 春季风速较大, 风速是影响树冠火发生的重要条件。在极端干燥的高燃烧条件下, 只有 12 月和 1 月不具备发生连续型树冠火的条件, 并且 3—5 月

表 4 不同燃烧条件下每个月油松林树冠火发生概率

Tab. 4 Occurrence probability of canopy fire in *Pinus tabuliformis* forest in each month under different combustion conditions

不同燃烧条件树冠火类型及发生概率 Type and occurrence probability of crown fire under different combustion conditions									
月份 Month	低 Low			中度 Moderate			高 High		
	A	P	S	A	P	S	A	P	S
11	—	9	91	—	28	72	22	38	40
12	—	6	94	—	20	80	—	49	51
1	—	3	97	—	9	91	—	28	72
2	—	13	87	—	36	64	24	44	32
3	—	49	51	41	37	22	26	67	7
4	—	52	48	41	39	20	26	68	6
5	—	35	65	38	29	33	26	62	12

注: A. 连续型树冠火; P. 间歇型树冠火; S. 地表火。Notes: A, continuous crown fire; P, intermittent crown fire; S, surface fire.

发生连续型树冠火的风险最大, 3 月份发生树冠火的概率为 93%, 4 月份树冠火发生概率为 94%。由计算结果可知, 油松林在防火期内存在不同的树冠火发生隐患, 并且春季发生树冠火的隐患较大。

2.4 连续型树冠火潜在火行为

由于间歇型树冠火的蔓延不稳定, 对冠层可燃物的燃烧量难以确定, 而连续型树冠火的蔓延较为稳定, 因此对于连续型树冠火的潜在火行为进行预测对于林火管理更有借鉴意义^[9]。

根据连续型树冠火蔓延速度利用 Byram 方程进行估算, 由表 5 可知, 低燃烧条件下, 油松林基本不发生树冠火, 4 月份有 52% 的概率发生间歇型树冠火。一旦地表火蔓延至树冠, 根据油松林可燃物负荷量密度自第一活枝高向上逐层降低的垂直分布特征, 易形成连续型树冠火。中度燃烧条件下, 4 月的连续型树冠火蔓延速度为 24 m/min, 火线强度为 4 085 kW/m, 火焰高度为 11 m。

表 5 中度燃烧条件下每个月油松林连续型树冠火潜在火行为

Tab. 5 Potential fire behavior of continuous canopy fire in *Pinus tabulaeformis* forest every month under moderate burning conditions

火行为 Fire behavior	月份 Month						
	11	12	1	2	3	4	5
蔓延速度 Spreading rate/(m·min ⁻¹)	-	-	-	-	23	24	22
火线强度 Fire line intensity/(kW·m ⁻¹)	-	-	-	-	4 022	4 085	3 742
火焰高度 Flame height/m	-	-	-	-	11	11	10

基于可燃物热值, 可燃物消耗量和连续型树冠火蔓延速度, 计算火行为指标包括火线强度和火焰高度。由表 6 可知, 在极端干燥的高燃烧条件下, 2—5 月连续型树冠火火线强度均达到 6 000 kW/m 以上, 3 月份油松林连续型树冠火蔓延速度达到

表 6 高燃烧条件下每个月油松林连续型树冠火潜在火行为

Tab. 6 Potential fire behavior of continuous canopy fire in *Pinus tabulaeformis* forest every month under high burning conditions

火行为 Fire behavior	月份 Month						
	11	12	1	2	3	4	5
蔓延速度 Spreading rate/(m·min ⁻¹)	33	-	-	35	46	46	43
火线强度 Fire line intensity/(kW·m ⁻¹)	5 787	-	-	6 132	7 932	8 062	7 386
火焰高度 Flame height/m	13	-	-	13	15	15	14

46 m/min, 火线强度为 7 932 kW/m, 火焰高度为 15 m, 4 月份油松林连续型树冠火蔓延速度达到 46 m/min, 火线强度为 8 062 kW/m, 火焰高度为 15 m。12 月和 1 月份不发生连续型树冠火则未在表中列出。

3 结论与讨论

3.1 冠层可燃物负荷量分布特征

油松林平均冠层可燃物负荷量为 4.54 t/hm², 冠层可燃物负荷量最小值为 1.35 t/hm², 最大值为 12.10 t/hm²。油松林平均冠层容积密度为 0.21 kg/m³, 冠层容积密度最小值为 0.06 kg/m³, 最大值为 0.56 kg/m³。可燃物负荷量分布呈现由下而上逐层递减的趋势。林冠底层(0~1 m)可燃物占冠层总可燃物比例最大, 为 54.03%, 大枝在林冠底层分布比例较大且快速逐层递减, 针叶在各层次均有较大比例分布, 可能是八达岭林场每年对油松林进行抚育间伐, 及时去除了着生位置较低矮的枝条, 导致 0~1 m 层次内的可燃物较为集中。根据 Agee 分析的林分火灾发生条件, 确定了冠层容积密度(CBD)阈值为 0.10 kg/m³, 低于此阈值, 树冠火蔓延受到极大限制, Cruz 等在火灾案例研究分析中支持这一阈值^[33], 高强度树冠火发生时均具有较高的 CBD 值(平均为 0.28 kg/m³)^[20], 从零(无树冠)到非常密集的林分中达到 0.4 kg/m³^[34]。但 Perry 等研究的黄松林分的 CBD 较低(0.06~0.13 kg/m³), 其原因可能是只考虑了针叶生物量作为有效 CFL^[10], 本研究的冠层可燃物负荷量值较低于各针叶林的研究(9.60~18.00 t/hm²)^[10], 但冠层容积密度较高, 原因是将大枝, 小枝和针叶均作为可燃物, 另外由于人为地增大了第一活枝高, 林分的平均冠长较小, 树冠可燃物呈现较密集特征。较大的 CBD 和较低的活枝高易引发高强度树冠火^[19], 八达岭林场油松林的抚育间伐需注重降低冠层容积密度, 增大活枝高, 在理论上降低树冠火的发生概率^[10]。

3.2 冠层可燃物负荷量模型构建

目前利用林分因子估测地表可燃物的模型已有大量研究^[35], 而在冠层可燃物负荷量模型构建方面由于缺乏冠层可燃物的实测数据, 相应的估测模型鲜少报道。本文结合样地 18 棵油松的实测因子(胸径, 树高等), 利用多元逐步回归筛选建立冠层可燃物负荷量的非线性模型, 拟合度较高(R^2 为 0.867 2, P 为 0.000 3), 其中胸径和第一活枝高为冠层可燃物负荷量的主要影响因子。在不破坏林木的情况下, 根据所建立模型, 在之后对八达岭林场油松林的树冠火研究中, 由林分易测因子可较好地估测油松林冠层可燃物负荷量。本研究与 Cruz 对北美西部四种

林分冠层可燃物特征建立回归模型采用的方法一致^[14]。破坏性取样方法较间接估测更为准确,结合气象条件以分析油松林存在的火灾风险,与 Fernández-Alonso 等^[15]利用树木生物量干质量方程估计冠层可燃物特征,在不同燃烧条件下模拟树冠火灾发生概率和树冠火灾蔓延的思路一致,可根据火灾风险大小以确定林分抚育间伐方法。

3.3 冠层潜在火行为发生与蔓延

通过收集北京市延庆区森林防火期的月平均最大风速,判断北京市延庆区八达岭林场油松林每月的树冠火发生概率,以及存在的潜在火行为特征,为更有效进行防火管理工作提供参考。在中度燃烧条件下,3—5月份有较大概率发生连续型树冠火,春季(3—5月)存在的火灾隐患较大,与韩梅等^[16]的研究结果一致,可能是春季风速较大,风速是影响树冠火发生的重要条件^[36]。在极端干燥的高燃烧条件下,4月份表现出了最高的潜在火行为指标,蔓延速度为46 m/min,火线强度为8 062 kW/m,火焰高度为15 m。油松的冠层容积密度较大,油松针叶油脂含量高,在大风干燥的极端天气下油松林树冠火灾隐患较大,需加大防火工作力度。观测到北京市油松林含水率的月变化情况,12月到次年2月细小可燃物含水率低^[37],由于冬季气温低油松林存在的火灾隐患较小,每年夏季(6—8月)降雨量较全年平均水平高,并且风速较全年平均水平小,存在的火灾隐患较小,在此期间可采取适当的营林抚育措施^[38],减少地表可燃物负荷量^[16,39]。或者在10月份左右防火期之前进行抚育间伐,增大活枝高,降低冠层容积密度^[6]。

本研究通过破坏性取样的实测方法能更直接准确获得冠层可燃物负荷量,包括冠层各层次和各径阶的可燃物负荷量,构建的冠层可燃物负荷量模型,可以估算样地平均冠层容积密度。风速,冠层容积密度和细小可燃物含水率与树冠火的发生和蔓延关系密切,所研究林分在极端干燥气候条件下易发生高强度树冠火,通过营林抚育措施(抚育间伐,修枝)可有效降低可燃物密度,增大活枝高,以降低树冠火发生概率及危害程度,为北京市八达岭地区的森林防火管理提供依据。

参 考 文 献

[1] 陶长森,牛树奎,陈锋,等.北京山区主要针叶林潜在火行为及冠层危险指数研究[J].北京林业大学学报,2018,40(9):55-62.
Tao C S, Niu S K, Chen F, et al. Potential fire behavior and canopy hazard index of main coniferous forests in Beijing mountain area[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(9): 55-62.

[2] 杨光,舒立福,孙思琦,等.我国森林火灾中人员伤亡时空分布特征研究[J].灾害学,2015,30(2):21-25.
Yang G, Shu L F, Sun S Q, et al. Temporal-spatial distribution regularities of forest fire casualties in China[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(2): 21-25.
[3] 金琳,刘晓东,张永福.森林可燃物调控技术方法研究进展[J].林业科学,2012,48(2):155-161.
Jin L, Liu X D, Zhang Y F. A review on the forest fuel treatment and reduction[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(2): 155-161.
[4] 牛树奎,王叁,贺庆棠,等.北京山区主要针叶林可燃物空间连续性研究:可燃物垂直连续性与树冠火发生[J].北京林业大学学报,2012,34(3):1-7.
Niu S K, Wang S, He Q T, et al. Spatial continuity of fuels in major coniferous forests in Beijing mountainous area: fuel vertical continuity and crown fire occurrence[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(3): 1-7.
[5] 牛树奎,贺庆棠,陈锋,等.北京山区主要针叶林可燃物空间连续性研究:可燃物水平连续性与树冠火蔓延[J].北京林业大学学报,2012,34(4):1-9.
Niu S K, He Q T, Chen F, et al. Spatial continuity of fuels in major coniferous forests in Beijing mountainous area: fuel horizontal continuity and crown fire spread[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(4): 1-9.
[6] Gómez-Vázquez I, Fernandes P M, Arias-Rodil M, et al. Using density management diagrams to assess crown fire potential in *Pinus pinaster* Ait. stands[J]. Annals of Forest Science, 2014, 71(4): 473-484.
[7] 王成德.人工林树冠生长模拟及密度控制决策技术研究[D].北京:北京林业大学,2019.
Wang C D. Research on crown growth simulation and density control decision-making technology of plantation in the case of *Cunninghamia lanceolata* and *Eucalyptus robusta* Smith[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
[8] Cruz M G, Alexander M E. Evaluating the 3-m tree crown spacing guideline for the prevention of crowning wildfires in lodgepole pine forests, Alberta[J]. Forestry Chronicle, 2020, 96(2): 165-173.
[9] 陶长森,牛树奎,陈羚,等.妙峰山林场主要针叶林冠层特征及潜在火行为[J].北京林业大学学报,2018,40(5):82-89.
Tao C S, Niu S K, Chen L, et al. Canopy characteristics and potential crown fire behavior of main coniferous forest in Miaofeng Mountain Forest Farm in Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(5): 82-89.
[10] Mitsopoulos I D, Dimitrakopoulos A P. Canopy fuel characteristics and potential crown fire behavior in Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) forests[J]. Annals of Forest Science, 2007, 64(3): 287-299.
[11] Keane R E, Reinhardt E D, Scott J, et al. Estimating forest canopy bulk density using six indirect methods[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2005, 35: 724-739.
[12] Botequim B, Fernandes P M, Borges J G, et al. Improving silvicultural practices for Mediterranean forests through fire

- behaviour modelling using LiDAR-derived canopy fuel characteristics[J/OL]. International Journal of Wildland Fire, 2019, 28(11): 823[2021-01-15]. <https://www.publish.csiro.au/wf/WF19001>.
- [13] Cortés-Molino Á, Aulló-Maestro I, Fernandez-Luque I, et al. Using ForeStereo and LIDAR data to assess fire and canopy structure-related risks in relict *Abies pinsapo* Boiss. forests[J/OL]. PeerJ, 2020, 8(2): 10158[2021-01-12]. <https://peerj.com/articles/10158/>.
- [14] Cruz M G, Alexander M E. Evaluating regression model estimates of canopy fuel stratum characteristics in four crown fire-prone fuel types in western North America[J/OL]. International Journal of Wildland Fire, 2012, 21(2): 168[2021-01-19]. <https://www.publish.csiro.au/wf/WF10066>.
- [15] Fernández-Alonso J M, Alberdi I, Álvarez-González J G, et al. Canopy fuel characteristics in relation to crown fire potential in pine stands: analysis, modelling and classification[J]. European Journal of Forest Research, 2013, 132(2): 363-377.
- [16] 韩梅, 温鹏, 许惠敏, 等. 北京市十三陵林场油松林地表火行为模拟[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(10): 95-101.
- Han M, Wen P, Xu H M, et al. Simulation of surface fire behavior of *Pinus tabulaeformis* forest in Ming Tombs Forest Farm in Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(10): 95-101.
- [17] Varner J M, Keyes C. Fuel treatments and fire models: error and correction[J]. Fire Management Today, 2009, 3(69): 47-50.
- [18] Molina J R, Rodriguez Y, Silva F, et al. Potential crown fire behavior in *Pinus pinea* stands following different fuel treatments[J]. Forest Systems, 2011, 20(2): 266-277.
- [19] Banerjee T, Heilman W, Goodrick S, et al. Effects of canopy midstory management and fuel moisture on wildfire behavior[J/OL]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 17312[2021-02-15]. <https://www.nature.com/articles/s41598-020-74338-9>.
- [20] Mitsopoulos I D, Dimitrakopoulos A P. Estimation of canopy fuel characteristics of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) forests in Greece based on common stand parameters[J]. European Journal of Forest Research, 2014, 133(1): 73-79.
- [21] Dimitrakopoulos A P, Mitsopoulos I D, Raptis D I. Nomographs for predicting crown fire initiation in Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) forests[J]. European Journal of Forest Research, 2007, 126(4): 555-561.
- [22] 王叁, 牛树奎, 李德, 等. 云南松林可燃物的垂直分布及影响因子[J]. 应用生态学报, 2013, 24(2): 331-337.
- Wang S, Niu S K, Li D, et al. Vertical distribution of fuels in *Pinus yunnanensis* forest and related affecting factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(2): 331-337.
- [23] 郭利峰, 牛树奎, 阚振国. 北京市八达岭林场不同林型林下可燃物调查分析[J]. 林业调查规划, 2007, 32(2): 134-137.
- Guo L F, Niu S K, Kan Z G. Investigation and analysis of combustible materials under different forest types of Badaling Center in Beijing[J]. Forest Inventory and Planning, 2007, 32(2): 134-137.
- [24] 周娅, 陈宇轩, 邹瑞, 等. 北京八达岭不同密度油松土壤团聚体特征研究[J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(2): 25-30.
- Zhou Y, Chen Y X, Zou R, et al. Effect of stand density on characteristics of soil aggregates in *Pinus tabulaeformis* plantation in Badaling Area, Beijing[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2016, 36(2): 25-30.
- [25] 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.
- Wang L, Zhao G L, Zhou H J, et al. Hydrological characteristics of litter in a *Pinus tabulaeformis* plantation with different densities in Badaling Forest Farm[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(9): 1767-1775.
- [26] 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.
- Guo L F. Research on artificial *Pinus tabulaeformis* forest combustibility of Badaling Forest Center in Beijing[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2007.
- [27] Cruz M G, McCaw W L, Anderson W R, et al. Fire behaviour modelling in semi-arid mallee-heath shrublands of southern Australia[J]. Environmental Modelling & Software, 2013, 40: 21-34.
- [28] Cruz M G, Alexander M E, Wakimoto R H. Assessing canopy fuel stratum characteristics in crown fire prone fuel types of western North America[J]. International Journal of Wildland Fire, 2003, 12: 39-50.
- [29] 李连强. 北京妙峰山林场潜在火行为及森林燃烧性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- Li L Q. Study on potential fire behavior and forest combustion of Miaofeng Mountain in Beijing[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [30] Cruz M G, Alexander M E, Wakimoto R H. Development and testing of models for predicting crown fire rate of spread in conifer forest stands[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2005, 35(7): 1626-1639.
- [31] 陶长森. 北京山区主要针叶林冠层可燃物特征及潜在火行为研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- Tao C S. Characteristics of canopy fuel and potential fire behavior in major coniferous forests in the Mountainous Area, Beijing[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [32] Cruz M G, Alexander M E, Wakimoto R H. Modeling the likelihood of crown fire occurrence in conifer forest stands[J]. Forest Science, 2004, 50(5): 640.
- [33] Cruz M G, Alexander M E. Modelling the rate of fire spread and uncertainty associated with the onset and propagation of crown fires in conifer forest stands[J/OL]. International Journal of Wildland Fire, 2017, 26(5): 413[2021-01-15]. <https://www.publish.csiro.au/wf/WF16218>.
- [34] Scott J H, Reinhardt E D, Scott J H, et al. Estimating canopy fuels in conifer forests[J]. Fire Management Today, 2002, 4(62): 45-50.
- [35] 梁瀛, 李吉玫, 赵凤君, 等. 天山中部天山云杉林地表可燃物载量及其影响因素[J]. 林业科学, 2017, 53(12): 153-160.

- Liang Y, Li J M, Zhao F J, et al. Surface fuel loads of Tianshan spruce forests in the Central Tianshan Mountains and the impact factors[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2017, 53(12): 153–160.
- [36] Cruz M G, Alexander M E, Fernandes P M, et al. Evaluating the 10% wind speed rule of thumb for estimating a wildfire's forward rate of spread against an extensive independent set of observations[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2020, 133(2): 104818.
- [37] 田晓瑞, 舒立福, 赵凤君, 等. 气候变化对中国森林火险的影响[J]. *林业科学*, 2017, 53(7): 159–169.
- Tian X R, Shu L F, Zhao F J, et al. Impacts of climate change on forest fire danger in China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2017, 53(7): 159–169.
- [38] Sieg C, Allen K, Hoffman C, et al. Forest fuels and predicted fire behavior in the first 5 years after a bark beetle outbreak with and without timber harvest[J]. *Forest Health Monitoring*, 2016, 12(3): 145–151.
- [39] Jain T B, Fried J S, Loreno S M. Simulating the effectiveness of improvement cuts and commercial thinning to enhance fire resistance in west coast dry mixed conifer forests[J]. *Forest Science*, 2020, 66(2): 157–177.
- (责任编辑 范 娟
责任编辑 臧润国)