

抚育间伐对北京西山林场油松林可燃物特征及潜在火行为的影响

童大龙^{1,2}, 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 102202)

摘 要【目的】研究间伐后油松林可燃物和潜在火行为特征随时间的动态变化过程, 为研究地区的可燃物管理提供依据。【方法】以北京市西山试验林场油松林为研究对象, 设置 15%轻度间伐(株数强度)后 3 年、5 年、7 年及未间伐油松林样地各 3 块, 对样地的地表可燃物(1 h 时滞、10 h 时滞、100 h 时滞枯枝及上层枯叶、下层枯叶和灌草可燃物)、冠层可燃物(叶、小枝、大枝)和林分因子(胸径、树高、冠幅等)进行调查, 通过单因素方差分析探讨间伐后不同时间油松林地表、冠层可燃物负荷量和冠层容积密度等特征; 结合研究区气象条件, 设置不同可燃物含水率场景(低、中、高含水率)和 10 m 高空风速(0~18 m/s), 利用 Behave Plus 5.0.4 软件对间伐后不同时间油松林的地表及冠层潜在火行为指标进行模拟, 探讨抚育间伐对树冠火发生的影响。【结果】① 间伐后不同时间的油松林细小可燃物负荷量(1 h 和 10 h 时滞枯枝、上层枯叶)、冠层可燃物负荷量和冠层容积密度存在显著差异($P<0.05$), 但地表可燃物总负荷量差异不显著($P>0.05$)。细小可燃物负荷量最高的是间伐后 3 年油松林(0.64 kg/m^2), 各样地冠层可燃物负荷量为 $1.80\sim4.30 \text{ kg/m}^2$, 间伐后 5 年(0.29 kg/m^3)、3 年(0.42 kg/m^3)油松林的冠层容积密度较对照(0.71 kg/m^3)显著($P<0.05$)降低。② 在不同含水率条件下, 间伐后 3 年油松林的潜在火行为指标与其他林分差异较大。低含水率条件下, 间伐后 3 年油松林地表火最大蔓延速率、地表火线强度、地表火焰长度随风速增大分别变化于 $3.60\sim9.91 \text{ m/min}$ 、 $4\,925.02\sim13\,559.59 \text{ kW/m}$ 和 $3.87\sim6.16 \text{ m}$, 单位面积发热量为 $82\,078.06 \text{ kJ/m}^2$, 树冠火转化比率随风速增大变化于 $3.00\sim8.27$, 地表火易蔓延发展成树冠火, 且树冠潜在火行为指标也较高, 树冠火蔓延速率、树冠火线强度、树冠火焰长度随风速增大分别变化于 $1.31\sim57.06 \text{ m/min}$ 、 $2\,546.10\sim110\,966.82 \text{ kW/m}$ 和 $4.96\sim61.49 \text{ m}$, 单位面积冠层热量为 $34\,611.22 \text{ kJ/m}^2$ 。【结论】间伐后 3 年油松林的细小可燃物负荷量和地表潜在火行为指标均高于未间伐及间伐后 5 年和 7 年的油松林, 且冠层潜在火行为指标值均较高, 在风速大于 4 m/s 、低可燃物含水率条件下有发生高强度连续型树冠火的可能。建议增加修枝、割灌等林下处理措施, 间伐工作后减少枯枝堆积, 以降低森林火灾发生的风险。

关键词: 油松林; 抚育间伐; 可燃物特征; 冠层容积密度; 潜在火行为

Effects of thinning on fuel characteristics and potential fire behavior of *Pinus tabulaeformis* in Xishan Forest Farm of Beijing

TONG Dalong^{1,2}, LIU Xiaodong^{1,2*}

(1 Key Laboratory for Forest Resources and Ecosystem Processes, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2 Emergency Management Department Key Laboratory of Forest Grassland Fire Risk Prevention and Control, Beijing 102202,

China)

Abstract: [Objective] To study the dynamic change process of fuel and potential fire behavior characteristics over time after thinning in *Pinus tabulaeformis* forests, and to provide a basis for fuel management in the study area. **[Method]** In the Xishan Experimental Forest Farm of Beijing, a total of 12 plots were selected, including 3 plots in each after 7, 5 and 3 years of 15% low-intensity thinning (plant number intensity) and unthinned plots. The stand factors (DBH, height, crown width, etc), surface fuels (1 h, 10 h, 100 h, upper dead leaves, lower dead leaves, live herbaceous, live shrub fuel load) and canopy fuels (leaves, twigs and large branches) of the sample plots were investigated. The characteristics of surface, canopy fuel load and canopy bulk density of *P. tabulaeformis* forests at different times after thinning were analyzed by one-way analysis of variance. Combined with the meteorological conditions of the study area, different scenarios of moisture content of fuel (low, medium and high moisture content) and wind speed at 10m altitude (0-18 m/s) were set, and use Behave Plus 5.0.4 to simulate the potential fire behavior indexes of surface and canopy of *P. tabulaeformis* forests at different times after thinning, so as to explore the influence of thinning on canopy fire occurrence. **[Result]** ① There were significant differences in fine fuel load(include 1 h, 10 h dead branch and upper dead leaves), canopy fuel load and canopy bulk density at different thinning times ($P < 0.05$). However, there was no significant difference in total fuel load on the surface ($P > 0.05$). The highest fire fuel load(0.64 kg/m^2) was found in the 3-year thinning forest, and the total fuel load of the canopy varied from $1.8\text{--}4.30 \text{ kg/m}^2$. The canopy bulk density of the 5-year thinning forest (0.29 kg/m^3) and 3-year thinning forest (0.42 kg/m^3) had a significant decrease ($P < 0.05$) compared with the control forest (0.71 kg/m^3). ② Under different scenarios of moisture content, the potential fire behavior indexes of *P. tabulaeformis* forests after thinning for 3 years were significantly different from those of other stands. Under the condition of low moisture, the surface rate of spread(maximum), surface fireline intensity and surface flame length varied with the increase of wind speed of $3.60\text{--}9.91 \text{ m/min}$, $4\ 925.02\text{--}13\ 559.59 \text{ kW/m}$ and $3.87\text{--}6.16 \text{ m}$, respectively, and the heat per unit area was $82\ 078.06 \text{ kJ/m}^2$. The crown fire transition ratio varied from 3.00 to 8.27 with the increase of wind speed. The surface fire easily spread into crown fire, and the potential crown fire behavior indexes was also high. The crown fire rate of spread, crown fireline intensity and crown flame length varied with the increase of wind speed of $1.31\text{--}57.06 \text{ m/min}$, $2\ 546.10\text{--}110\ 966.82 \text{ kW/m}$ and $4.96\text{--}61.49 \text{ m}$. The crown heat per unit area was $34\ 611.22 \text{ kJ/m}^2$. **[Conclusion]** The fine fuel load, and the surface potential fire behavior indexes of the 3-year thinning forests were higher than those of the unthinned forests, the 7-year and the 5-year thinning forests. High intensity continuous canopy fire is possible under the conditions of wind

speed greater than 4 m/s and low fuel moisture content. In order to reduce the risk of forest fire, it is suggested to increase the treatment measures such as pruning and cutting irrigation, and reduce the accumulation of dead branches after thinning work.

Key words: *Pinus tabulaeformis*; thinning; fuel characteristics; canopy bulk density; potential fire behaviour

大面积森林火灾被联合国列为世界八大主要自然灾害之一^[1]。森林火灾不仅破坏森林资源,而且严重破坏森林生态环境^[2]。森林可燃物是森林燃烧的基础,也是火环境中唯一可人为调控的因子,对其进行科学有效的管理,对于火灾预防具有重要的实践意义^[3]。

抚育间伐是最常见且最重要的营林抚育措施,也是最有效的可燃物调控措施之一,基于可燃物特征预测潜在火行为是预防森林火灾的基础^{[4][5]}。关于可燃物调控对林火影响的研究已有许多报道,在间伐对可燃物特征的影响研究方面,国内外主要对地表可燃物特征进行了研究,而关于冠层可燃物特征的研究较少。HOOD 等^[6]分析了黄松—花旗松林间伐后 21~23 年且不进行计划火烧处理的可燃物负荷量动态变化,发现间伐后 22~23 年,可燃物负荷量与对照样地几乎没有差异。HEVIA 等^[7]使用威布尔概率密度函数,拟合了不同强度修枝和间伐相结合的场景下冠层容积密度的垂直分布模型,以评估修枝和间伐这 2 种基本调控方法对预防林火的效果,结果显示对森林的干预程度越高,冠层容积密度降低效果越明显。在间伐对潜在火行为的影响研究方面,国内外学者常使用 Behave Plus、FARSITE、FirefamilyPlus、FFEFVS、FCCS 等林火模拟系统来进行潜在火行为模拟^[8]。SCHMIDT 等^[9]使用 NEXUS 和 Behave Plus 模拟标准样地不同可燃物处理措施在处理前后的林火行为,并用 FARSITE 模拟景观尺度上处理前后的林火行为,结果表明间伐后计划火烧的调控效果最佳,而不同处理措施的空间布置对景观尺度的林火行为影响很大;JOHNSTON 等^[10]基于 FCCS 系统对俄勒冈州东部黄松林的可燃物负荷量和潜在火行为随时间的变化进行研究,发现间伐显著减少了树冠火发生的概率,并且间伐后 2~3 年内的地表火行为强度有显著下降;BANERJEE 等^[11]在不同湿度条件下系统模拟不同强度间伐对林火的影响,结果表明低强度间伐会导致火灾强度增加,而高强度间伐虽可有效降低火灾强度,但同时会导致林火蔓延速度增加。国内学者常使用 Behave Plus 系统进行潜在火行为模拟,宋洁等^[12]研究了可燃物调控措施对北京山区主要森林类型林火行为的影响,用 Behave Plus 软件对潜在火行为进行模拟,结果表明油松林经过低强度间伐后,地表潜在火行为指标反而稍有增加;李炳怡等^[13]基于 Behave Plus 软件对北京门头沟地区油松林地表潜在火行为进行分析,认为油松林的火焰高度大于第一活/死枝下高,极有可能从地表火发展成为树冠火。林冠火蔓延速度快,极难控制,相较于地表火对森林的伤害更大^[14],冠层可燃物是树冠火发生和蔓延的基础。国外对树冠火的研究集中在使用模型对易燃的针叶林分如黄松(*Podocarpus imbricatus*)^[10]等的可燃物特征和火行为进行模拟估测,国内也是多针对于油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等易燃林分进行研究。牛树奎^[15]对可燃物负荷量的空间分布和潜在火行为特征进行分析,认为油松林易燃可燃物

负荷量高,是易发生地表火和树冠火的林分类型;陶长森^[16]针对北京山区主要针叶林的冠层潜在火行为进行模拟,发现侧柏林易发生间歇型树冠火,油松林易发生连续型树冠火;王晓丽^[17]基于对油松林易燃可燃物负荷量及垂直分布的研究,认为油松林不易发生地表火,但一旦起火易形成蔓延速度较快的树冠火。综上所述,国内对于火蔓延模型的研究主要关注于地表火,而树冠火的研究基于地表火模型进行研究,因此地表火向树冠火的转化过程和树冠火蔓延的过程,是今后树冠火研究的重点内容^[18]。

油松林是华北地区的主要造林树种之一,也是北京地区典型的针叶林树种之一,在水土保持、气候调节等方面发挥着重要作用。北京市西山试验林场的油松林多为人工纯林,且结构组成单一,可燃物密度大,油脂含量高,燃烧性强,更容易发生树冠火^[19]。依据北京园林绿化局发布的《北京市山区生态林管护职责和标准(试行)》,抚育间伐后人工林郁闭度应不低于 0.6,以防人为造成天窗和疏林地,因此北京市西山试验林场的油松人工林间伐株数强度大部分低于 25%,以确保山区生态林管护成效。有关北京市西山试验林场油松林抚育间伐的研究主要集中在不同间伐强度对油松林可燃物和潜在火行为的影响方面,较少研究间伐后油松林可燃物特征等随时间的动态变化过程^[12],因此本研究基于北京市西山试验林场实际间伐工作情况,选择 15%株数强度轻度间伐后的油松林为研究对象,通过对油松林地表可燃物和冠层可燃物的实地测定,分析其可燃物负荷量特征,并利用 Behave Plus 软件模拟油松林地表及冠层潜在火行为,探讨抚育间伐后油松林可燃物特征和潜在火行为的变化,为研究地区的可燃物管理提供依据。

1 研究区概况

北京市西山试验林场位于西郊小西山,地跨门头沟区、海淀区和石景山区,是华北地区建立最早、造林成效最显著的国营林场之一,总面积 5 949 hm²,森林覆盖率 92.32%,平均海拔 300~400 m。研究区域属于暖温带半湿润大陆性季风气候区,年平均气温 9~11℃,年平均降水量 660 mm,每年的 7 和 8 月降雨量最高,为主要降水期,冬春干旱多风,最高风速可达 7~8 级,森林火险较高。森林植被主要由人工纯林和针阔混交林组成,针叶林以油松(*Pinus tabulaeformis*)和侧柏(*Platycladus orientalis*)为主,阔叶林以栓皮栎(*Quercus variabilis*)和刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等为主。林下灌木主要包括酸枣(*Ziziphus jujuba*)、荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、君迁子(*Diospyros lotus*)等,草本主要包括细叶苔草(*Carex stenophylla*)、荩草(*Arthraxon hispidus*)、紫花地丁(*Viola philippica*)等。

2 研究方法

2.1 油松林可燃物调查

2023 年 6 月在北京市西山试验林场选择卧佛寺分场未间伐的小班、黑龙潭分场 2016 和 2018 年间伐的小班及三家店分场 2020 年间伐的小班,根据环境因子(坡度、坡向、郁闭度等),从上述小班中选择林相整齐、进行 15%轻度间伐(株数强度)后 7 年、5 年、3 年的具有代表性的油松林林分,以未间伐样地为对照(CK),每种间伐时间设置 3 块 20 m×20 m 的样地,共计 12 块样地,油松林样地基本情况如表 1 所示,其中林地土壤类型主要为砂壤土,海拔 400~700 m。对每块样地分别进行环境因子调查和每

木检尺，根据每木检尺结果计算每块样地油松林的平均胸径，并选择标准木各 3 株。在垂直方向上，对标准木的树冠以 1 m 为间隔进行分层，测算每层的平均枝条基径和平均枝条长度，根据枝条基径、枝条长度的平均值，每层选取 3 个标准枝，分别测定每个标准枝的枝条总鲜质量，再分枝（包括直径小于 1 cm 的小枝、直径大于 1 cm 的大枝）、叶分别称鲜质量^[20]。在每块样地内再设置 5 个 2 m×2 m 的样方，记录并测定每个样方内灌木（含胸径<5 cm、高度<3 m 的乔木幼树）和草本的种类、数量、叶片厚度、枝条直径等，并将灌木和草本全部收割后称质量。在每个 2 m×2 m 的样方内再设置 1 个 1 m×1 m 的小样方，测量每个小样方内上层枯叶（未分解）、下层枯叶（半分解）、1 h 时滞枯枝（直径(d)≤0.64 cm）、10 h 时滞枯枝（0.64 cm< d ≤2.54 cm）、100 h 时滞枯枝（2.54 cm< d ≤7.62 cm）、1 000 h 时滞枯枝（7.62 cm< d ≤20.3 cm）等地表可燃物的质量，并测定可燃物床层厚度。称取上述共计 11 类冠层和地表可燃物样品各 120 g（鲜质量）左右装入统一规格的牛皮纸信封内，带回实验室测其干质量。

表 1 北京市西山试验林场油松林样地的基本情况

Table 1 Basic information of *Pinus tabuliformis* forest plots in Xishan Forest Farm, Beijing

间伐后时间/a Time after thinning	伐前林分密度/ (株·hm ⁻²) Stand density before thinning	伐后林分密度/ (株·hm ⁻²) Stand density after thinning	平均胸径/cm Mean DBH	平均树高/m Mean tree height	平均冠幅/m Mean crown width	郁闭度 Canopy closure	坡度/(°) Slope degree	坡向 Slope aspect	坡位 Slope position
对照 CK	842	842	18.84±0.31	8.32±0.30	3.71±0.12	0.7	11	南 South	上坡 Up slope
3	748	642	18.31±0.09	8.30±0.06	4.24±0.05	0.7	29	东南 South east	上坡 Up slope
5	612	525	18.92±0.24	8.95±0.21	5.38±0.30	0.6	27	西南 Southwest	上坡 Up slope
7	612	525	17.16±0.36	5.96±0.42	4.30±0.42	0.6	23	南 South	上坡 Up slope

2.2 可燃物含水率测定

将采集的 11 类可燃物样品放入鼓风干燥箱内，在 105 ℃下烘干至恒质量，根据称取的样品干质量和鲜质量计算可燃物相对含水率(relative moisture content, RMC)^[19]。

$$C_{RM} = \frac{(m_N - m_1) - (m_D - m_2)}{(m_N - m_1)} \times 100\%。$$

(1)

式中： C_{RM} 为可燃物相对含水率(%，质量分数)， m_N 为可燃物鲜质量与未烘干信封质量之和(g)， m_D 为可燃物干质量与烘干后信封质量之和(g)， m_1 为未烘干的信封质量(g)， m_2 为烘干后信封质量(g)。

2.3 可燃物热值测定

将烘干的 11 类可燃物样品处理成粉末后，取 1 g 利用压片机压成样品块，再次烘干，用分析天平精确称其质量，然后使用 QZLRY-2002D 微机全自动量热仪测定样品热值，对每种可燃物样品重复测定 3

次, 取平均值^[21]。

2.4 可燃物表面积与体积比计算

可燃物的表面积与体积比越大, 单位体积可燃物的表面积也就越大, 燃烧时接受的热量就越多, 水分蒸发越快, 越容易燃烧。可燃物表面积与体积比的计算公式如下^[16]。

(1) 树木枝条。乔木和灌木的枝条可近似看作圆柱体, 其表面积与体积比计算公式为:

$$\sigma = \frac{\frac{\pi}{2}d^2 + \pi ld}{\frac{\pi d^2 l}{4}} = \frac{4}{d} + \frac{2}{l} \approx \frac{4}{d} \quad (2)$$

式中: σ 为表面积与体积比(cm^{-1}), d 为枝条直径(cm), l 为枝条长度(cm)。

(2) 针叶叶片。油松针叶是两针一束, 单个针叶的截面为半圆形, 可看作是半圆柱体^[15], 其表面积与体积比计算公式为:

$$\sigma = \frac{\frac{\pi}{2}dl + dl}{\frac{\pi d^2 l}{8}} = \frac{4(\pi + 2)}{\pi d} \quad (3)$$

式中: d 为针叶直径(cm), l 为针叶长度(cm)。

2.5 可燃物特征值计算

2.5.1 地表可燃物负荷量 利用以下公式计算各类活可燃物(灌木、草本)负荷量和各类死可燃物(上层枯叶、下层枯叶、1 h时滞、10 h时滞、100 h时滞枯枝)负荷量、1 000 h时滞枯枝在样地中未发现, 对每块样地 5 个样方内相同类型的地表可燃物负荷量取平均值, 即可得到样地中各类型地表可燃物负荷量^[22]。

$$W_f = \frac{(1 - C_{RM}) \times m}{100A} \quad (4)$$

式中: W_f 为地表可燃物负荷量(kg/m^2), m 为样方中调查的可燃物鲜质量(kg), A 为可燃物所在样方的面积(m^2)。

2.5.2 冠层可燃物特征值 描述冠层可燃物特征的指标主要包括冠层可燃物负荷量(canopy fuel load, CFL)和冠层容积密度(canopy bulk density, CBD)^[20], 通过以下公式计算。

$$W_s = \sum_{i=1}^m (W_B + W_T + W_L) \quad (5)$$

$$W_r = \frac{\sum_{k=1}^N W_s}{S} \quad (6)$$

式中: W_s 为单株树冠层生物量(kg), W_B 为大枝生物量(kg), W_T 为小枝生物量(kg), W_L 为叶生物量, m 为单株树冠总层数, W_r 为冠层可燃物负荷量(kg/m^2), N 为样地乔木数量(株), S 为样地面积(m^2)。

$$C_z = \frac{\sum_{k=1}^N W_s}{S(\bar{H} - H_c)} \quad (7)$$

式中: C_z 为样地冠层容积密度(kg/m^3), $\bar{H}$ 为样地乔木平均高度(m), H_c 为样地平均冠基高度(m)。

2.6 潜在火行为模拟

运用 Behave Plus 5.0.4 软件, 采用自定义可燃物模型的方式, 选择地表火和树冠火模块, 在不同可燃物含水率情景和风速条件下, 输入各类活可燃物负荷量(灌木、草本)、各类死可燃物负荷量(1 h

时滞、10 h 时滞、100 h 时滞枯枝)、热值、可燃物表面积与体积比、坡度、可燃物床层厚度、树冠高度、冠层容积密度等参数,模拟得到地表火最大蔓延速率、地表火焰长度、地表火线强度、临界地表火线强度、单位面积发热量、树冠火蔓延速率、临界树冠火蔓延速率、树冠火线强度、树冠火线长度、单位面积冠层热量等作为潜在火行为的评价指标。由于树冠火发生在距地表 10 m 左右高度,作用在树冠火的风速接近于气象站的风速^[23],且 10 m 高空风速及可燃物含水率与潜在火行为密切相关,因而风速条件设置选择 10 m 高空风速。根据北京地区极大风速(16~18 m/s),将 10 m 高空风速设置为 0~18 m/s(数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),选择北京市气象观测站,站点号为 54511)。可燃物含水率情景设置参照美国林火行为研究中采用的可燃物模型湿度系列,分别表示当地第 90、第 95、第 97 百分位的火险天气条件,分别用 Low、Med、High 表示^[24],见表 2。

表 2 Behave Plus 中可燃物含水率情景设置

Table 2 Fuel moisture scenario setting of Behave Plus			
可燃物类型	可燃物含水率情景/% Fuel moisture scenario		
Fuel type	低 Low	中 Med	高 High
1 h 时滞可燃物 1 h Fuel	3	6	12
10 h 时滞可燃物 10 h Fuel	4	7	13
100 h 时滞可燃物 100 h Fuel	5	8	14
活草本可燃物 Live herbaceous	70	120	170
活灌木可燃物 Live woody	70	120	170

树冠火转化比率是地表火线强度与临界地表火线强度的比值,如果转化比率大于或等于 1,则地表火足以转化成树冠火^[25]。利用 VAN WAGNER^[26]树冠火转化模型对该值进行计算,具体公式如下:

$$T_R = I_S/I_0。$$
(8)

式中: T_R 为树冠火转化比率, $T_R \geq 1$ 预示会转化为树冠火, $T_R < 1$ 则通常认为不会发生树冠火^[25]; I_S 为地表火线强度(kW/m), I_0 为临界地表火线强度(kW/m), I_S 、 I_0 均由 Behave Plus 计算得到。

2.7 数据统计与分析

利用 Excel 进行数据整理,用 SPSS 26.0 对地表和冠层可燃物特征、潜在火行为指标进行单因素方差分析(ANOVA)与差异显著性检验(Tukey),运用 Behave Plus 软件进行潜在火行为模拟,用 Origin 2019 软件绘图。

3 结果与分析

3.1 北京市西山试验林场油松林间伐后不同时间可燃物特征的变化

3.1.1 各类型地表可燃物负荷量特征 对间伐后不同时间油松林各类型地表可燃物负荷量进行调查

和计算，结果见表 3。

表 3 北京市西山试验林场油松林间伐后不同时间各类型地表可燃物负荷量

Table 3 Surface fuel load of different types of *P. tabuliformis* forests at different thinning times in Xishan Forest Farm, Beijing

间伐后时间/a Time after thinning	可燃物负荷量/(kg/m ²) Fuel load						
	灌木层	草本层	1 h 时滞枯枝	10 h 时滞枯枝	100 h 时滞枯枝	上层枯叶	下层枯叶
	Shrub layer	Herbal layer	1 h dead branch	10 h dead branch	100 h dead branch	Upper dead leaves	Lower dead leaves
对照 CK	8.17±1.19 a	2.97±0.36 a	0.11±0.05 a	0.08±0.01 b	0.02±0.02 a	0.35±0.01 a	0.29±0.03 b
3	5.15±0.19 a	0.21±0.21 b	0.10±0.01 a	0.20±0.02 a	0.10±0.07 a	0.34±0.02 a	0.75±0.12a
5	6.87±0.98 a	1.70±0.65 a	0.13±0.01 a	0.15±0.03 ab	0.17±0.17 a	0.25±0.07 ab	0.44±0.11 b
7	7.89±0.98 a	2.98±0.30 a	0.11±0.03 a	0.16±0.04 ab	0.00±0.00 a	0.17±0.01 b	0.28±0.03 b

注：同列数据后标不同小写字母表示在 $P\leq0.05$ 水平差异显著，表 4 和表 5 同。

Note: Different letters marked after the same line represent significant difference at $P\leq0.05$ level. Table 4 and 5 are the same.

如表 3 所示，随间伐后时间增加，草本负荷量显著增加，上层和下层枯叶负荷量则显著减少；对照和间伐后 3 年油松林的上层枯叶负荷量占比较高，1 h 时滞枯枝和 10 h 时滞枯枝负荷量在间伐后各年份占比较均匀，100 h 时滞枯枝负荷量在间伐后 3 和 5 年的油松林中占比较高。单因素方差分析结果表明，间伐后不同时间油松林分的草本、上层枯叶和下层枯叶负荷量存在显著性差异 ($P<0.05$)，灌木、1 h 时滞枯枝、10 h 时滞枯枝和 100 h 时滞枯枝不存在显著性差异 ($P>0.05$)。

细小可燃物（包括 1 h 时滞枯枝、10 h 时滞枯枝和上层枯叶）极易燃，是森林中的引燃物，细小可燃物较多的林分具有较高的火险性^[15]。地表总可燃物负荷量包括了活可燃物负荷量（灌木、草本）和死可燃物负荷量（上层枯叶、下层枯叶及 1 h 时滞、10 h 时滞、100 h 时滞枯枝）。如表 4 所示，间伐后不同时间的油松林间细小可燃物负荷量存在显著差异 ($P<0.05$)，以间伐后 3 年负荷量最高，而地表可燃物总负荷量不存在显著差异 ($P>0.05$)。

表 4 北京市西山试验林场油松林间伐后不同时间地表可燃物负荷量特征

Table 4 Characteristics of surface fuel load of *Pinus tabuliformis* forests at different thinning times in Xishan Forest Farm, Beijing

间伐后时间/a	细小可燃物负荷量/ (kg · m ⁻²)	可燃物总负荷量/ (kg · m ⁻²)
Time after thinning	Fine fuel load	Total fuel load
对照 CK	0.54±0.02 ab	13.39±2.45 a
3	0.64±0.06 a	6.86±0.53 a

5	0.53±0.04 ab	9.71±0.44 a
7	0.44±0.05 b	13.08±2.27 a

3.1.2 冠层可燃物特征 如表 4 所示，单因素方差分析结果表明，间伐后不同时间的油松林冠层可燃物负荷量(W_c)、冠层容积密度(C_c)和 ΔC_c 存在显著差异($P<0.05$)，而 ΔW_c 差异不显著($P>0.05$)。间伐后 3 年、5 年、7 年油松林的冠层可燃物负荷量分别较对照样地减少 58.14%，53.26%和 31.63%，冠层容积密度分别较对照减少了 40.66%，59.53%和 7.15%，间伐后 3 年油松林的冠层可燃物负荷量和冠层容积密度与对照样地的差异显著；间伐后 5 年的冠层可燃物负荷量与对照样地的差异不显著，而冠层容积密度显著降低；间伐后 7 年的油松林由于林分生长，其冠层可燃物负荷量和冠层容积密度均与对照样地无显著差异。由于对照和间伐后 7 年油松林的冠层可燃物负荷量分别为 4.30 和 2.94 kg/m²，如果被地表火引燃，容易形成高强度树冠火。

表 5 北京市西山试验林场油松林间伐后不同时间的冠层可燃物特征

Table 5 Canopy fuel characteristics of *Pinus tabulaeformis* forests at different thinning times in Xishan Forest Farm, Beijing

间伐后时间/a	冠层可燃物负荷量/ (kg·m ⁻²)	冠层容积密度/ (kg·m ⁻³)	ΔW_c / (kg·m ⁻²)	ΔC_c / (kg·m ⁻³)
Time after thinning	Canopy fuel load	Canopy bulk density		
对照 CK	4.30±0.02 a	0.71±0.002 a	—	—
3	1.80±0.01 b	0.42±0.003 b	−2.51±0.29 a	−0.29±0.12 b
5	2.01±0.01 ab	0.29±0.002 b	−2.30±0.28 a	−0.42±0.15 b
7	2.94±0.01 a	0.66±0.003 ab	−1.65±0.28 a	−0.05±0.14 a

注： ΔW_c . 间伐样地冠层可燃物负荷量相对于对照样地(CK)的增量； ΔC_c . 间伐样地冠层容积密度相对于对照样地(CK)的增量。
Note: ΔW_c . Canopy fuel load increment in thinning plots relative to CK; ΔC_c . Canopy bulk density increment in thinning plots relative to CK.

3.2 北京市西山试验林场油松林间伐后不同时间潜在火行为的变化

3.2.1 间伐后不同时间地表潜在火行为 由表 6 可知，在低可燃物含水率条件下，间伐后 3 年油松林的地表火最大蔓延速率与其他油松林差异显著。从图 1-A~C 可以看出，在相同风速条件下，随着可燃物含水率增加，间伐后不同时间的油松林地表火最大蔓延速率明显降低；在低可燃物含水率条件下，间伐后不同时间的油松林地表火最大蔓延速率随风速的增加而增大，在相同风速条件下由大到小为间伐后 3 年>间伐后 5 年>间伐后 7 年>对照；中、高含水率条件下，间伐后不同时间油松林的地表火最大蔓延速率在相同风速条件下由大到小为间伐后 5 年>间伐后 3 年>间伐后 7 年>对照，地表火最大蔓延速率均较低，不易发生地表火；在低含水率条件下，间伐后 3 年油松林地表火最大蔓延速率较高，随风速变化由 3.60 m/min 逐渐增加到 9.91 m/min，极易形成地表火。

表 6 北京市西山试验林场油松林间伐后不同时间地表潜在火行为在不同可燃物含水率条件下的变化

Table 6 Changes of potential fire behavior of *Pinus tabulaeformis* forests at different thinning times and different moisture content of fuel in Xishan Forest Farm, Beijing

可燃物含水率情景	间伐后时间/a	地表火最大蔓延速率(m/min)	地表火线强度(kW/m)	地表火焰长度(m)	单位面积发热量(kJ/m ²)
Fuel moisture scenario	Time after thinning	Surface rate of spread(maximum)	Surface fireline intensity	Surface flame length	Heat per unit area
低 Low	对照 CK	0.52±0.06 a	52.06±6.38 a	0.46±0.03 b	6 143.74±169.05 a
	3	6.73±0.45 b	9 201.37±62.97 b	5.10±0.02 c	75 508.07±34 960.03 b
	5	1.24±0.10 a	124.54±9.54 a	0.70±0.02 b	7 228.17±1972.52 a
	7	0.57±0.06 a	34.10±3.32 a	0.38±0.02 a	3 757.96±294.41 a
中 Med	对照 CK	0.28±0.03 a	24.00±2.94 a	0.32±0.02 a	5 175.98±142.18 b
	3	0.61±0.04 b	115.16±7.77 c	0.68±0.02 c	16 648.23±9230.84 a
	5	0.68±0.05 b	57.66±4.42 b	0.49±0.02 b	6 098.56±1659.27 a
	0.02 7	0.31±0.03 a	15.80±1.54 a	0.27±0.01 a	3 170.87±247.66 b
高 High	对照 CK	0.18±0.02 a	12.41±1.52 a	0.24±0.01 c	4 325.21±118.42 ab
	3	0.38±0.03 b	60.01±4.05 c	0.50±0.02 a	7 434.81±1216.40 a
	5	0.42±0.03 b	30.03±2.30 b	0.37±0.01 b	5 110.45±1382.57 ab
	7	0.19±0.02 a	8.25±0.80 a	0.20±0.01 c	2 657.47±206.39 b

注：同一可燃物含水率情景下，同列数据后标不同小写字母表示不同间伐后时间样地间差异显著 ($P\leq0.05$)。

Note: Under the same fuel moisture content scenario, different lowercase letters after the same column of data indicate significant differences between plots at different thinning times.

火线强度可分为低、中、强 3 种，通常认为 750 kW/m 以下是低强度，750~3 500 kW/m 为中强度，3 500~4 000 kW/m 为高强度^[27]。由表 6 可知，间伐后 3 年油松林的地表火线强度在 3 种可燃物含水率条件下均显著高于其他林分；在中、高可燃物含水率条件下，间伐后 5 年油松林地表火线强度与显著高于间伐后 7 年和对照样地。从图 1-D~F 可以看到，不同可燃物含水率条件下，间伐后不同时间油松林的地表火线强度均随风速的增加而增大；中、高可燃物含水率条件下，在相同风速下由大到小为间伐后 3 年>间伐后 5 年>对照>间伐后 7 年，间伐后不同时间油松林地表火线强度均小于 750 kW/m，即无发生中高强度火灾的可能性；低可燃物含水率条件下，对照和间伐后 3、5、7 年油松林地表火线强度的变化范围分别为 18.47~104.21，4 925.02~13 559.59，73.06~201.36 和 16.53~61.20 kW/m，在相同风速下由大到小为间伐后 3 年>间伐后 5 年>对照>间伐后 7 年，其中间伐后 3 年油松林地表火线强度大于 3 500 kW/m，表明低可燃物含水率条件下，间伐后 3 年的油松林样地容易发生高强度地表火。

由表 6 可知，不同可燃物含水率条件下，间伐后 3、5 年油松林的地表火焰长度与间伐后 7 年和对照

林分均有显著差异。由图 1-G~I 可以看出, 在 3 种可燃物含水率条件下, 间伐后不同时间油松林的地表火焰长度随风速的增加而增大, 相同风速下地表火焰长度由大到小为间伐后 3 年>间伐后 5 年>对照>间伐后 7 年。低可燃物含水率条件下, 对照样地和间伐后 3、5、7 年油松林地表火焰长度的变化范围分别为 0.30~0.63, 3.87~6.16, 0.56~0.89 和 0.28~0.51 m。中可燃物含水率条件下, 对照和间伐后 3、5、7 年油松林地表火焰长度随风速变化范围分别为 0.20~0.46, 0.52~0.82, 0.39~0.62, 0.20~0.36 m。高可燃物含水率条件下, 对照和间伐后 3、5、7 年油松林地表火焰长度随风速变化范围分别为 0.15~0.34, 0.38~0.61, 0.29~0.46, 0.15~0.27 m。

由图 1-J~L 可知, 不同可燃物含水率条件下, 间伐后不同时间油松林的单位面积发热量由大到小为间伐后 3 年>间伐后 7 年>对照>间伐后 5 年; 随可燃物含水率增加, 间伐后不同时间油松林和对照样地的单位面积发热量均有明显下降, 其中在低可燃物含水率条件下, 对照样地和间伐后 3、5、7 年油松林样地的单位面积发热量分别为 6 029.95, 82 078.06, 6 024.07 和 3 594.70 kJ/m²。

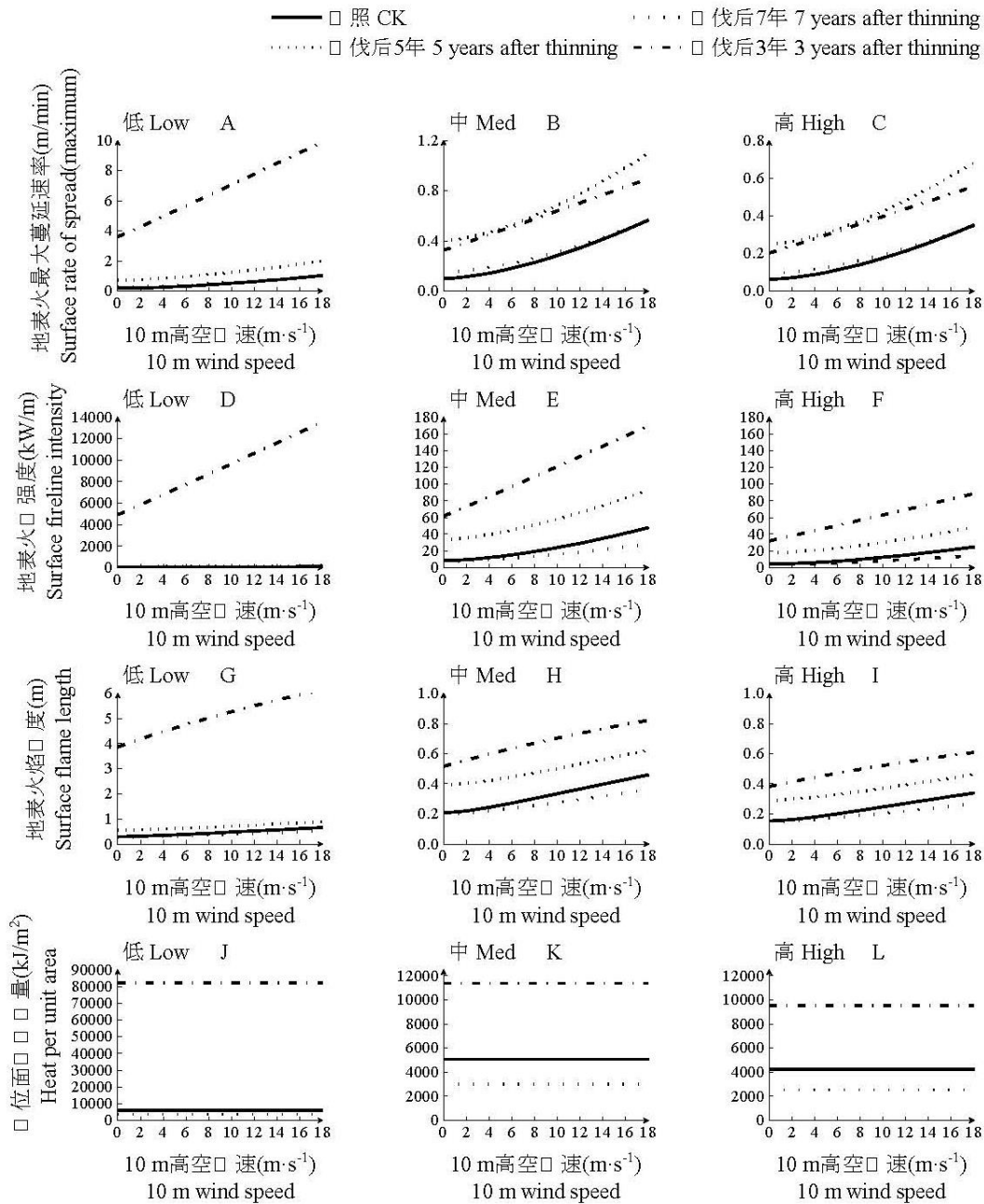


图 1 北京市西山试验林场油松林间伐后不同时间地表潜在火行为指标在不同可燃物含水率条件下随风速的变化

Fig. 1 Changes of surface potential fire behavior index with wind speed under different moisture content of fuel of *Pinus tabulaeformis* forests at different thinning times in Xishan Forest Farm, Beijing

如 2-A 所示, 低可燃物含水率条件下, 随风速增加, 间伐后 3 年油松林的树冠火转化比率由 3.00 增加到 8.27, 均大于 1, 表明间伐后 3 年油松林在火灾发生后容易形成树冠火, 对森林造成更大的伤害。如图 2-B, C 所示, 中、高可燃物含水率条件下, 间伐后不同时间油松林树冠火转化比率在任何风速下均远小于 1, 即无法由地表火转化为树冠火。

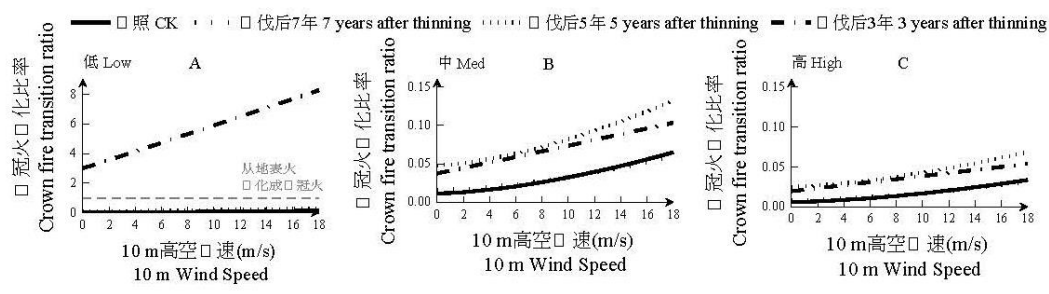


图 2 北京市西山试验林场油松林间伐后不同时间树冠火转化比率在不同可燃物含水率条件下随风速的变化
Fig. 2 Changes of crown fire transition ratio under different moisture content of fuel of *Pinus tabulaeformis* forests at different thinning times in Xishan Forest Farm, Beijing

3.2.2 间伐后 3 年油松林冠层潜在火行为 由于间伐后 3 年油松林在低可燃物含水率条件下易发生树冠火，因此利用 Behave Plus 模拟了低可燃物含水率条件下，间伐后 3 年油松林冠层潜在火行为指标随风速的变化，并得到临界树冠火蔓延速率为 7.17 m/min。由图 3-A 可知，间伐后 3 年油松林的树冠火蔓延速率随风速增大由 1.31 m/min 逐渐增加到 57.06 m/min，当风速大于 4 m/s 时，树冠火蔓延速率大于临界树冠火蔓延速率，即可能发生连续型树冠火。由图 3-B 可知，树冠火线强度随风速增大而增加，最小值为 2 546.10 kW/m，树冠火线强度均大于 750 kW/m，即容易发生中高强度的树冠火。由图 3-C 可知，树冠火焰长度随风速增大由 4.96 m 逐渐增加到 61.49 m，均大于间伐后 3 年油松林样地的平均冠幅 (4.23 m)，表明树冠火容易在油松林树冠层中蔓延。由图 3-D 可知，单位面积冠层热量为 34 611.22 kJ/m²。综上可知，间伐后 3 年油松林树冠火容易在树冠层中蔓延，形成高强度、高危险的连续型树冠火。

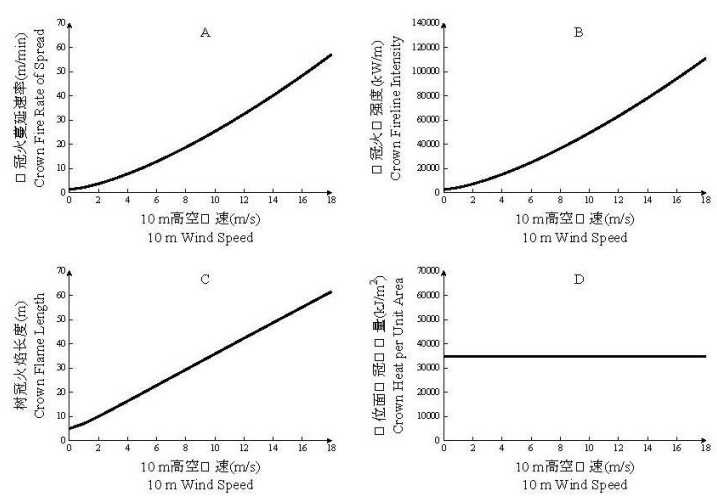


图 3 北京市西山试验林场油松林间伐后 3 年冠层潜在火行为指标在低可燃物含水率条件下随风速的变化
Fig. 3 Changes of crown potential fire behavior index with low moisture content of fuel of *Pinus tabulaeformis* forest after thinning of 3 years in Xishan Forest Farm, Beijing

4 讨 论

3.1 间伐对油松林可燃物特征的影响

地表可燃物负荷量是森林火灾发生的基础,间伐后不同时间的油松林地表总可燃物负荷量变化范围为 $6.86 \sim 13.39 \text{ kg/m}^2$,间伐油松林分的地表可燃物负荷量均低于未间伐林分,且间伐后 7 年油松林的地表可燃物负荷量(6.86 kg/m^2)和冠层可燃物负荷量(1.80 kg/m^2)较对照样地减少显著。间伐后 3 年油松林的草本负荷量(0.21 kg/m^2)显著低于对照样地(2.97 kg/m^2),而细小可燃物负荷量(0.64 kg/m^2)则高于对照样地(0.54 kg/m^2),原因可能是间伐作业遗留的枯叶、枯枝未分解完全,覆盖在地表抑制了草本的生长。间伐后的油松林冠层总可燃物负荷量显著降低,但油松林树冠较大且第一活枝高较高^[15],轻度间伐 7 年后林冠闭合、自然整枝能力较差,冠层可燃物增加有限。本研究发现油松林的冠层容积密度较高,间伐后 3、5、7 年的油松林冠层容积密度为 $0.29 \sim 0.66 \text{ kg/m}^3$ 。Agee^[28]基于引发树冠火的临界条件的计算分析,确定发生树冠火的冠层容积密度阈值为 0.1 kg/m^3 ;Cruz 等^[29]在对大量火灾案例进行分析后,也支持针叶林火灾垂直蔓延到冠层的临界冠层容积密度为 0.1 kg/m^3 ;Alexander 等^[30]研究计算出国际树冠火灾模拟实验地块的平均冠层容积密度为 0.16 kg/m^3 ,冠层可燃物负荷量范围为 $0.6 \sim 1.5 \text{ kg/m}^2$;Scott 等^[31]仅使用叶生物量计算出冠层容积密度为 $0.06 \sim 0.13 \text{ kg/m}^3$;Mitsopoulos 等^[32]使用针叶和小枝的冠层生物量计算冠层容积密度,结果为 $0.09 \sim 0.22 \text{ kg/m}^3$ 。鉴于以上研究结果,本研究的冠层容积密度较高是较为合理的。本次研究使用了叶、小枝、大枝可燃物负荷量来计算冠层容积密度,因而该值较高。大枝可燃物是直径较粗大的活可燃物,只有在高强度地表火和树冠火中易燃烧,且大枝积存了大量能量,一旦燃烧起来,释放出来的能量会对森林造成更大的伤害^[33]。

3.2 间伐对油松林潜在火行为特征的影响

对北京市西山试验林场油松林潜在火行为的研究结果显示,间伐后 3 年油松林的地表潜在火行为指标与其余油松林分差异显著,其地表火最大蔓延速率、火线强度、火焰长度与单位面积发热量均高于其余油松林分,该结果与 Banerjee 等^[11]的研究结果一致,即低强度间伐反而会增加火灾强度。原因主要是轻度间伐后油松林林分郁闭度有所降低,从而改善了林内光照条件,并促进了林下植被生长,而灌木的高度和密度直接影响到可燃物分布的垂直连续性^[15];另外,郁闭度降低还会改变林内小气候,增大林内风速^[11],可使火蔓延速度增加。间伐后 7 年油松林由于林分树冠闭合,林内风速和灌草生长受到抑制,地表枯枝大部分被分解^[12],因而地表火行为指标反而降低。在不同可燃物含水率条件下,间伐 3 年后油松林地表潜在火行为指标均较高,其中在低可燃物含水率条件下,间伐 3 年后油松林容易发生高强度连续型树冠火,这可能是由于间伐后剩余的枯枝堆积导致的,地表可燃物累积较多且易燃,提高了地表火发生的可能性^[12],因而在进行间伐作业时,可将枝条平铺在地表,避免枯枝堆积^[15]。

5 结 论

轻度间伐后不同时间的油松林分的细小可燃物负荷量、冠层可燃物负荷量及冠层容积密度具有显著

差异($P < 0.05$), 其中间伐后 3 年的油松林的细小可燃物负荷量高于对照, 而冠层可燃物负荷量及冠层容积密度均低于对照; 同时, 间伐后 3 年油松林的地表潜在火行为指标均高于对照和间伐后 5、7 年的油松林, 其冠层潜在火行为指标值也较高, 在低含水率、风速大于 4 m/s 条件下有发生高强度连续型树冠火的可能。建议增加修枝、割灌等林下处理措施, 以降低油松林分的冠层容积密度, 减小近地表可燃物垂直分布的连续性; 减少间伐工作后的枯枝堆积, 以降低地表可燃物密度, 保证在不影响林下物种多样性的情况下, 降低森林火灾发生的风险。

参考文献

- [1] 魏书精, 罗斯生, 罗碧珍, 等. 气候变化背景下森林火灾发生规律研究 [J]. 林业与环境科学, 2020, 36(2): 133-143.
- Wei S J, Luo S S, Luo B Z, et al. Occurrence regularity of forest fire under the background of climate change [J]. Forestry and Environmental Science, 2020,36(2):133-143.
- [2] 吴月圆, 舒立福, 王明玉, 等. 近年世界森林火灾综述 [J]. 温带林业研究, 2022, 5(4): 49-54.
- Wu Y Y, Shu L F, Wang M Y, et al. A review of forest fires worldwide in recent years [J]. Journal of Temperate Forestry Research,2022,5(4):49-54.
- [3] 李炳怡, 舒立福, 丁永全, 等.我国人工林森林可燃物特点及管理技术研究进展 [J]. 世界林业研究, 2021, 34(1): 90-95.
- Li B Y, Shu L F, Ding Y Q, et al. Research progress in plantation fuel characteristics and management in china [J]. World Forestry Research,2021,34(1):90-95.
- [4] 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.
- [5] Agee J K, Skinner C N. Basic principles of forest fuel reduction treatments [J]. Forest Ecology and Management, 2005,211(1/2):83-96.
- [6] Hood M S, Keyes R C, Bowen J K, et al. Fuel treatment longevity in ponderosa pine-dominated forest 24 years after cutting and prescribed burning [J]. Frontiers in Forests and Global Change,2020,3:78.
- [7] Hevia A, Crabiffosse A, Álvarez-González J G, et al. Assessing the effect of pruning and thinning on crown fire hazard in young Atlantic maritime pine forests [J]. Journal of Environmental Management, 2018,205:9-17.
- [8] 赵璠, 舒立福, 周汝良, 等. 林火行为蔓延模型研究进展 [J]. 世界林业研究, 2017, 30(2): 46-50.

- Zhao F, Shu L F, Zhou R L, et al. A review of wildland fire spread modelling [J]. *World Forestry Research*, 2017, 30(2): 46-50.
- [9] Schmidt A D, Taylor H A, Skinner N C. The influence of fuels treatment and landscape arrangement on simulated fire behavior, Southern Cascade range, California [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(8/9): 3170-3184.
- [10] Johnston J D, Olszewski J H, Miller B A, et al. Mechanical thinning without prescribed fire moderates wildfire behavior in an Eastern Oregon, USA ponderosa pine forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 501: 119674.
- [11] Banerjee T. Impacts of forest thinning on wildland fire behavior [J]. *Forests*, 2020, 11(9): 918.
- [12] 宋洁. 抚育间伐对北京西山林场典型林分可燃物调控影响研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- Song J. Research on the influence of thinning on typical forest of Beijing Xishan Forest Farm [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017.
- [13] 李炳怡, 刘冠宏, 舒立福. 北京门头沟区主要林分类型地表火行为模拟研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2022, 44(6): 96-105.
- Li B Y, Liu G H, Shu L F. Simulation study on surface fire behavior of main forest types in Mentougou District, Beijing [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, 44(6): 96-105.
- [14] 胡海清. 利用林分特征因子预测森林地被可燃物载量的研究 [J]. *林业科学*, 2005, 41(5): 96-100.
- Hu H Q. Predicting forest surface fuel load by using forest stand factors [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(5): 96-100.
- [15] 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.
- Niu S K. Fire behavior and fuel spatial continuity of major forest types in the mountainous area, Beijing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.
- [16] 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.
- [17] 王晓丽, 牛树奎, 马钦彦, 等. 北京地区主要针叶林易燃可燃物垂直分布 [J]. *北京林业大学学报*, 2009, 31(2): 31-35.
- Wang X L, Niu S K, Ma Q Y, et al. Vertical distribution of flammable fuels in major conifer forests of Beijing area [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31(2): 31-35.
- [18] 赵凤君, 王明玉, 舒立福. 森林火灾中的树冠火研究 [J]. *世界林业研究*, 2010, 23(1): 39-43.
- Zhao F J, Wang M Y, Shu L F. A review of crown fire research [J]. *World Forestry Research*, 2010, 23

(1):39-43.

[19] 王凯. 北京西山林场不同可燃物类型空间分布及潜在火行为研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2016.

Wang K. The spatial distribution of different fuel types and their potential fire behavior research on Beijing Xishan Forest Farm [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.

[20] 高敏, 任云卯, 周晓东, 等. 抚育间伐对西山林场侧柏林冠层可燃物特征及潜在火行为的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(8): 56-65.

Gao M, Ren Y M, Zhou X D, et al. Effects of thinning on canopy characteristics and potential crown fire behavior of *Platycladus orientalis* in Xishan Forest Farm of Beijing [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(8): 56-65.

[21] 高敏. 基于抚育间伐的北京西山林场侧柏林可燃物调控影响研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2022. Gao M. Study on fuel regulation effect of *Platycladus orientalis* forest in Beijing Xishan Forest Farm based on thinning [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022.

[22] 陈思帆, 高健, 高敏, 等. 火烧强度对山西太岳山油松林地表可燃物的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(10): 68-77.

Chen S F, Gao J, Gao M et al. Effects of fire intensity on surface fuel of *Pinus tabulaeformis* in Taiyue Mountain, Shanxi Province [J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2022, 50(10): 68-77.

[23] 王秋华, 肖慧娟, 李世友, 等. 基于 BehavePlus 的昆明西山国家森林公园潜在火行为研究 [J]. 浙江林业科技, 2013, 33(4): 43-48.

Wang Q H, Xiao H J, Li S Y, et al. Study on potential fire behaviors of Xishan National Forest Park in Kunming using BehavePlus model [J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2013, 33(4): 43-48.

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

Wang B, Han S W, Gu Z, et al. Effects of wildfire of different severities on potential surface fire behavior of *Pinus tabulaeformis* forest [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 1812-1821.

[25] 白海峰, 牛树奎, 刘晓东. 北京西山林场侧柏林潜在地表火行为及树冠火转化比率研究 [J]. 消防科学与技术, 2023, 42(4): 561-565.

Bai H F, Niu S K, Liu X D. Study on potential surface fire behavior and transition ratio to crown fire of *Platycladus orientalis* stands in Beijing Xishan Forest Farm [J]. Fire Science and Technology, 2023, 42(4): 561-565.

- [26] Van Wagner C E. Conditions for the start and spread of crown fire [J]. Canadian Journal of Forest Research,1977,7(1):23-34.
- [27] 舒立福, 刘晓东. 森林防火学概论 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2016: 80.
- Shu L F, Liu X D. Introduction to forest fire prevention [M]. Beijing: China Forestry Publishing,2016:80.
- [28] Agee J K. The influence of forest structure on fire behavior [C]// Proceedings of the 17th annual forest vegetation management conference. 1996: 52-68.
- [29] Cruz G M, Alexander E M, Wakimoto H R. Assessing canopy fuel stratum characteristics in crown fire prone fuel types of western North America [J]. International Journal of Wildland Fire,2003,12(1):39-50.
- [30] Alexander M, Stefinger C, Mason J, et al. Characterizing the jack pine-black spruce fuel complex of the International Crown Fire Modelling Experiment (ICFME) [R]. Canada: Natural Resources Canada Forestry Service, Northern Forestry Centre, 2004.
- [31] Scott J H, Reinhardt E D. Estimating canopy fuels in conifer forests [J]. Fire Management Today,2002,62(4):45-50.
- [32] Mitsopoulos D I, Dimitrakopoulos P A. 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.
- [33] Cheek W J, Biondi F, Sibold S J, et al. Fuel analysis and potential fire behavior in mixed conifer woodlands of the great basin, Nevada, USA [J]. Physical Geography,2012,33(3):205-228.