

基于 Rothermel 的南亚热带马尾松人工林 潜在火行为研究

潘 登^{1,2}, 张合平^{1,2}, 潘 高^{1,2}, 易 浪^{1,2}

(1. 中南林业科技大学, 湖南 长沙 410004; 2. 南方林业生态技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410004)

摘 要: 马尾松 *Pinus massoniana* 是我国南方大面积的主要造林树种, 耐贫瘠, 生长迅速, 但抗火能力弱, 发生火灾后极易造成重大损失。本研究基于广义 Rothermel 模型, 对不同林龄马尾松人工林在不同风速下点燃概率和火类型进行了评估, 模拟了火线强度, 地表火、树冠火蔓延速度、火焰高度, 树冠火的发生率和转化率等参数; 并与室内点烧试验观测结果进行了比较。结果表明: 广义 Rothermel 模型对于林火蔓延速度的拟合对最好, 对于火线强度的模拟值偏高, 而对于火焰高度的模拟值随林龄增大逐渐降低; 20 a 马尾松林地表火的蔓延速度和火线强度均最高, 且发生树冠火的概率也最大; 10 a 和 20 a 马尾松林树冠火转化率较高, 50 a 马尾松林的各项火行为参数均较低。可燃物床含水量对于地表火行为影响较大, 而冠基高和林下灌木生长情况对于树冠火的发生起决定性作用, 尤其在干旱季节, 需要周期性清除林下灌木和地表可燃物, 减少可燃物床载量, 另外, 在对不同林龄马尾松人工林进行林火管理时, 可针对不同林分的火行为参数有区别地采取不同的经营措施。

关键词: Rothermel 模型; 可燃物载量; 火行为; 可燃物调控

中图分类号: S762

文献标志码: A

文章编号: 1673-923X(2017)06-0014-10

Research on masson pine potential fire behavior in southern subtropical based on Behave Plus

PAN Deng^{1,2}, ZHANG Heping^{1,2}, PAN Gao^{1,2}, YI Lang^{1,2}

(1. Central South University of Forestry and Technology, Changsha, 410004, Hunan, China; 2. National Engineering Laboratory for Applied Forest Ecological Technology in Southern China, Changsha, 410004, Hunan, China)

Abstract: Masson Pine is characterized by barren tolerance and rapid growth, and it is the main afforestation tree in south China, But its ability to resist fire is weak, in case of fire, it is very apt to causes severe personnel casualty and property losses. This research predicted different ages of Masson Pine forest firebrand ignition and fire type under different wind speeds, calculated fireline intensity; surface fire and crown fire' s spread speed and length; crown fire transition ratio and active ratio, based on Rothermel model. The predicted results were compared with those measured by laboratory burning experiment to test the performance of the model. The results showed that extended Rothermel model has best equation in rate of spread, the predicted values of fireline intensity were higher than observed ones, and the predicted values of fire length were decreased with the increase of forest age; 20 a Masson Pine plantation has highest surface fire spread speed and fireline intensity, and its active ratio is higher than other forest type; 10 a and 20 a Masson Pine plantation' s transition ratio is higher than average value, all of 50a Masson Pine plantation' s parameters are lower than other forest type. Fuel bed moisture content has a greater influence on surface fire behavior, crown base height and understory shrubs growth is crucial for crown fire, Especially in the dry season, periodically remove understory shrubs and surface fuel is necessary, In addition, different management measures is needed in the different forest age of Masson pine plantation forest fire management.

Keywords: Rothermel model; fuel load; fire behavior; fuel management

森林火灾是森林生态系统最强烈的扰动因子之一^[1], 全球范围内, 每年受火灾影响的森林、灌

丛及草地面积超过 $4 \times 10^8 \text{ hm}^2$, 向大气环境输入约 1.74 Pg 碳元素^[2]。火灾通过高温燃烧林内可燃物

收稿日期: 2016-12-22

基金项目: 国家林业公益性行业专项 (201204512); 中南林业科技大学研究生科技创新基金资助项目 (CX2015A03); 湖南省研究生创新项目 (CX2015B287)

作者简介: 潘 登, 博士研究生

通讯作者: 张合平, 教授, 博士生导师; E-mail: hepzhang@sina.com

引文格式: 潘 登, 张合平, 潘 高, 等. 基于 Rothermel 的南亚热带马尾松人工林潜在火行为研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(6): 14-23.

床,使土壤有机质变性、改变土壤营养元素的输入和输出过程、并通过焚毁地表凋落物层和腐殖质层改变土壤的持水能力和地表径流的形成过程、同时高温会在短时间内改变微生物区系和物种组成,进而直接或间接的对森林生态系统的物质循环和能量流动产生影响^[3-4]。目前,林火对于森林生态系统的研究多集中于东北地区^[5],且多数为林火对土壤理化性质的研究等方面^[6-7],相比之下,我国南方林区地貌复杂,森林破碎化程度高,火烧面积小,但火烧频度高,且因地形地势因素影响,扑救过程较为复杂,在林场或林区的林火管理中,森林火灾的预防是重中之重,广西地处南亚热带,是我国的森林大省,南方用材林重要种源地,也因其独特的气候和地形特征,成为南方林火多发区域。

马尾松是我国亚热带地区主要的造林树种,具有较高的生态价值和经济价值,在维护区域生态系统平衡方面有着不可替代的重要作用。但我国南方马尾松多为大面积栽植的人工纯林,层次较为单一,结构简单,从而造成整个林分抗逆性差、抗扰动能力差^[8-9],同时使得林分潜在火灾风险提高,严重阻碍了马尾松人工林的持续生产和发展。本研究通过对南亚热带典型地域马尾松人工林可燃物床的空间分布特征和物理性状的分析,评估马尾松人工林潜在火灾风险及其林火行为特征,为南方马尾松人工林的林火管理提供必需的参数。

1 研究区域概况和研究方法

1.1 研究区域自然概况

研究地点设置于广西凭祥的中国林业科学研究院热带林业试验中心实验林场(22°10'N, 106°42'E),位于南亚热带季风气候区,属湿润半湿润气候。林场内水热资源丰富,干湿季节明显。极端最高气温 40.4 °C,极端最低气温 -2.1 °C。冬季最冷的 1 月平均 12.8 °C,夏季最热的 7、8 月平均 28.3 °C。地貌多为低山丘陵,土壤为砖红壤。林场内主要林分类型有马尾松人工林、*Pinus massoniana*、马尾松-石栎 *Lithocarpus pasania* 混交林、马尾松-红锥 *Castanopsis hystrix* 混交林、大叶栎 *Quercus griffithii* 纯林。

1.2 研究内容和方法

1.2.1 样地设置

2013 年 5—6 月,在林场内选取立地条件相近的

不同林龄马尾松人工林,分别设置 5 块 20 m × 20 m 的样地,林龄梯度为 10 a、18 a、20 a、30 a 和 50 a;所选林分均为人为干扰较小,30 年内无火灾记录发生的马尾松林,同时每个 400 m² 样地内用对角线法设置 5 个 2 m × 2 m 的灌木样方、5 个 2 m × 2 m 的倒木质样方、5 个 1 m × 1 m 的非木质(草本和蕨类)样方、5 个 1 m × 1 m 的样方调查凋落物、5 个 0.5 m × 0.5 m 的样方调查腐殖质,记录样地的坐标,海拔(m)、坡度(°)、坡向、郁闭度、物种名称、胸径(DBH, cm)、树高(H, m)等林分特征(表 1)。

1.2.2 可燃物床调查

根据林业行业标准 LY/T 1952-2011,对林地内乔灌进行划分,乔木(DBH > 1 cm)每木检尺,记录冠基高、枝下高;灌木(DBH ≤ 1 cm)记录高度、盖度和冠幅,并用全部收获法割取 2 m × 2 m 小样方内灌木的地上部分,称鲜重,然后带回实验室后烘干至恒重,以计算其含水量;收获 1 m × 1 m 小样方内所有草本、藤本和蕨类等地被植物的地上部分,采用同样的方法测定含水量,依比例推算单位面积内非木质可燃物载量;收获 1 m × 1 m 小样方内所有凋落物,主要包括未分解的枝、草、藤、叶、球果,沿 S 形路线测定样方内凋落物的平均厚度,取其平均值,并估算样方内凋落物盖度;收获 0.5 m × 0.5 m 小样方内腐殖质,采用同样的方法测定腐殖质的平均厚度;同时测定凋落物层和腐殖质层的含水量;拾取 2 m × 2 m 小样方内的倒木质,带回实验室后按其直径(0 ~ 0.635 cm、0.635 ~ 2.54 cm、2.54 ~ 7.62 cm)分成 3 个时滞组分(1 h、10 h、100 h),测定每个组分倒木质的负载量,并依比例推算单位面积内各组分倒木质可燃物载量,然后将各组分倒木质烘干至恒重,测定其含水量。

1.2.3 可燃物灰分测定

根据林业行业标准 LY T 1268—1999,对标准样地内所采集的乔、灌、草和枯落物样品灰分进行测定。测定步骤为:(1)将所采集样品放入烘箱,105 °C 下烘烤 30 min,再调至 80 °C,烘至恒重;(2)通过粉样机将烘干后的样品制成粉样,各取 10 g 分别装入洗净的瓷坩埚内,编号,称重,再次重复步骤(1);(3)将瓷坩埚放在万用炉上加热,使样品缓慢冒烟,将其碳化,至不再冒烟,停止加热;(4)将瓷坩埚放入马弗炉,温度设定为 600 °C,加热时长为 8 h,将其灰化,取出后放置于干燥器内,降温至恒重,称重。可燃物灰分计算公式为:

$$S = \frac{W_A - W_C}{W_B - W_C}。$$

式中: S 为可燃物灰分含量, %; W_A 为灰化后总重, g; W_B 为碳化前总重; W_C 为瓷坩埚自重, g。

1.2.4 可燃物热值测定

可燃物的热值用于计算林火强度及蔓延速度, 测定过程使用 PARR 6300 型氧弹量热仪对样品进行测定。测定步骤为: (1) 将样品在烘箱中烘干至恒重, 然后至成粉样; (2) 将粉样各取 1 g, 分别压制成 1 g 重的粉饼; (3) 将粉饼装入细净的瓷坩埚内, 再次烘干至恒重, 称重; (4) 将装有样品的瓷坩埚放入量热仪内, 此时氧弹会自动充氧, 并建立初始热平衡; (5) 量热仪会自动采用恒温模式进行测量, 并记录量桶内热交换量, 对测量结果进行修正, 最后输出结果。

根据各树种不同组分可燃物的热值和所占全株比重, 对热值进行加权平均, 可得到整个树种的平均热值。

1.2.5 可燃物燃烧反应强度计算

通过各类树种的负载量加权, 可由下列公式计算各可燃物单元的反应强度^[10]:

$$I_R = \tau \sum_{i=1}^n F_i W_{ni} H_i \mu_{si} \mu_{Mi}。$$

其中:

$$W_{ni} = \sum_{i=1}^n F_{ij} W_{nij} = \sum_{j=1}^m \frac{F_{ij} W_{oij}}{1 + S_{ij}}。$$

$$H_i = \sum_{i=1}^n F_{ij} H_{ij}。$$

$$\mu_{si} = 0.174 S_{ei}^{-0.19}。$$

$$S_{ei} = \sum_{j=1}^m F_{ij} S_{eij}。$$

$$\mu_{Mi} = 1 - 2.59 \left(\frac{M_{fi}}{M_{Xi}} \right) + 5.11 \left(\frac{M_{fi}}{M_{Xi}} \right)^2 - 3.52 \left(\frac{M_{fi}}{M_{Xi}} \right)^3。$$

$$M_{fi} = \sum_{j=1}^m F_{ij} M_{fij}。$$

$$\tau = \tau_{\max} \left(\frac{\beta}{\beta_{op}} \right)^A \exp \left[A \left(1 - \frac{\beta}{\beta_{op}} \right) \right]。$$

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma^{1.5}}{495 + 0.0594 \sigma^{1.5}}。$$

$$\sigma = \sum_{i=1}^n F_{ij} \sigma_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m F_{ij} \sigma_{ij}。$$

$$\beta = \frac{1}{\delta} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{W_{ij}}{\rho_{pi}}。$$

$$\rho_b = \frac{1}{\delta} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij}。$$

式中: I_R 为可燃物反应强度, Btu/(ft²·min); τ 为潜在反应速率, 1/min; W_{ni} 为第 i 类可燃物净负载量, lb/ft²; W_{oij} 为第 i 类第 j 等级可燃物负载量, lb/ft²; S_{ij} 为第 i 类第 j 等级可燃物矿质含量; W_{nij} 为第 i 类第 j 等级可燃物净负载量, lb/ft²; H_i 为第 i 类可燃物平均热值, Btu/lb; H_{ij} 为第 i 类第 j 等级可燃物平均热值, Btu/lb; μ_{si} 为第 i 类可燃物矿质抑制系数; S_{ei} 为第 i 类可燃物有效矿质系数; S_{eij} 为第 i 类第 j 等级可燃物有效矿质系数; μ_{Mi} 为第 i 类可燃物水分阻滞系数 (Retardation factor); μ_{Mij} 为第 i 类第 j 等级可燃物水分阻滞系数; M_{vj} 为第 j 等级可燃物熄灭含水率; τ_{\max} 为最大反应速率, 1/min; σ 为可燃物表积比, 1/ft; σ_{ij} 为第 i 类第 j 等级可燃物表积比, 1/ft; β 为平均紧密度; β_{op} 为最适紧密度; ρ_b 为平均容积密度, lb/ft³; δ 为可燃物厚度, ft; ρ_{pij} 为第 i 类第 j 级可燃物基本密度, lb/ft³。

1.2.6 林火蔓延速度计算

林火蔓延速度计算基于 Rothermel 模型, 有关公式为:

$$R = \frac{IR\zeta(1 + \Phi_W + \Phi_S)}{\beta_b \varepsilon Q_{ig}}。$$

其中:

$$\zeta = (192 - 0.259\sigma)^{-1} \exp[(0.792 + 0.681\sigma^{0.5})(\beta + 0.1)]。$$

$$\varepsilon Q_{ig} = \sum_{i=1}^n F_i \sum_{j=1}^m F_{ij} \exp\left(\frac{-138}{\sigma_{ij}}\right) Q_{igij}。$$

$$Q_{igij} = 250 + 1116 M_{fij}。$$

$$\Phi_W = CUB \left(\frac{\beta}{\beta_{op}} \right)^{-E}。$$

$$\Phi_S = 5.275 \beta^{0.3} (\tan\theta)^2。$$

$$C = 7.47 \exp(-0.133\sigma^{0.55})。$$

$$B = 0.02526\sigma^{0.54}。$$

$$E = 0.715 \exp(-3.59 \times 10^{-4} \sigma)。$$

式中: R 为林火蔓延速度 ft/min; I_R 为林火反应强度, Btu/(ft²·min); ζ 为无风通量比率; Φ_W 和 Φ_S 分别风和坡度影响系数; ρ_b 为可燃物密度, lb/ft³; ε 为与密度有关的加热系数; Q_{ig} 为引燃 (ignition) 单位重量可燃物所需热量, Btu/lb; U 为作用在火焰上的风速, ft/min; θ 为坡度, °; C 、 B 、 E 为修正系数。

1.2.7 林火行为计算

(1) 林火强度。林火强度为森林火灾单位火线长单位时间内释放的能量,亦称火线强度(fireline intensity)。根据 Byram 提出的经典公式^[11],可推导出林火强度计算公式:

$$I = \frac{HWR}{600}$$

式中: I 为林火强度, Kw/m; H 为可燃物热值, J/g; W 为有效可燃物负载量, t/hm²; R 为林火蔓延速度, m/min; 1/600 为英制单位到公制单位的转化系数。

(2) 火焰长度。火焰长度指可燃物床 (fuel bed) 引燃后连续火焰的长度, 故飞火不包括在内, 根据 Byram 提出的公式, 可推导出林火强度计算公式

$$L = 0.077476I^{0.46}$$

式中: L 为火焰长度, m; I 为林火强度, Kw/m; 0.077476 为转化系数。

(3) 火焰高度。无风情况下, 火焰形态为垂直向上, 此时火焰长度即为火焰高度, 有风情况下, 火焰的蔓延速度受到影响, 且火焰受风速影响会发生倾斜, 此时高度要低于长度, 其高度计算公式为:

$$h = L_w = 0.77476I_w^{0.46} = 0.077476 \left(\frac{HWR_w}{600} \right)^{0.46}$$

式中: h 为火焰高度, m; L_w 为受风速影响下林火强度, Kw/m; R_w 受风速影响下的林火蔓延速度, m/min, 当风速为 0 m/s 时, $R_w = R$ 。

1.2.8 点烧试验

试验材料来自各林龄林分下的枯枝落叶层。采取无重复的不完全区组试验设计方法, 由于各点燃可燃物床组成成分均来自于其标准样地, 且 Rothermel 模型对可燃物床层厚度不敏感^[12], 所以本研究以含水率和载量为控制变量, 而将可燃物床组分混合比例和层厚度设定为常数。含水率设 3 个水平, 10%、15% 和 20%; 载量设 3 个水平 4 t/hm², 5 t/hm², 6 t/hm²; 混合比例为各标准样地自然混合比例, 可燃物床厚度 4 cm。

点烧试验床为 2 m 长, 1 m 宽, 每 10 cm 放置一个 1 m 高标杆, 用于固定热电偶, 用于测定燃烧过程中可燃物床温度, 燃烧速度用秒表测定; 可燃物含水率用烘箱和快速水分测量仪确定; 在点烧床前端设置长 2 m 火源区 (用乙醇设置线状火带), 以便火焰在到达可燃物床时接近稳态, 燃烧彻底完成后收集灰烬, 用于测定可燃物消耗量。可燃物床厚度的随机误差控制在 ± 0.5 cm, 火环境温度变化用空控制在 $\pm 2^\circ\text{C}$, 空气相对湿度变化控制 $\pm 15\%$, 共进行 45 次点烧试验。

1.2.9 数据处理

马尾松人工林潜在火行为特征的计算基于 Rothermel 和 Byram 所提出的经典公式, 结合样地实测数据和室内可燃物特征分析结果采用负载量加权模拟完成, 将模拟结果与室内点烧试验观测结果进行比较, 若平均相对误差低于 30%^[13], 则认为模拟结果可接受, 通过比较对林火蔓延速度、反应强度和火焰高度的模拟结果进行验证。平均相对误差计算公式为:

$$MRE = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - y_j}{y_i} \right| \right)}{n} \times 100\%$$

式中: MRE 为平均相对误差; y_i 为点烧试验观测值; y_j 为特征值经负载量加权后的模拟值, n 为点烧试验次数。

表 1 不同林龄马尾松人工林可燃物床特征[†]
Table 1 Fuelbed characteristics of different ages *Pinus massoniana* plantation

指标	P1	P2	P3	P4	P5
1 h 可燃物载量 (t/hm ²)	4.11	5.14	5.30	6.54	6.02
10 h 可燃物载量 (t/hm ²)	1.42	2.11	2.34	3.55	2.27
100 h 可燃物载量 (t/hm ²)	0.2	0.2	0.4	0.6	0.3
活草可燃物载量 (t/hm ²)	0.08	0.14	0.22	0.22	0.19
可燃物床厚度 /m	0.15	0.15	0.25	0.24	0.22
死可燃物热量 (kJ/kg)	22 889	22 889	22 889	22 889	22 889
活可燃物热量 (kJ/kg)	22 889	22 889	22 889	22 889	22 889
林冠高 (m)	14.0	14.7	15.3	16.4	17.2
冠基高 (m)	1.4	1.7	2.4	2.2	2.2
林冠容重 (kg/m ³)	0.35	0.37	0.4	0.33	0.3
风速调整因子	0.18	0.18	0.25	0.25	0.2
可燃物隐蔽度 /%	90	85	90	90	90
坡度 /%	58	50	50	45	60

[†] *P1、P2、P3、P4、P5 分别代表 10 a、18 a、20 a、30 a 和 50 a 林龄马尾松人工林。可燃物床数据为各林龄样地中所选出的标准木所测得平均值。

2 结果与分析

2.1 模拟结果验证

图 1a ~ e 分别展示了不同林龄马尾松人工林林火蔓延速度模拟值与观测值的对比情况。从整体来看, 各林分的模拟值与观测值的散点都比较均匀的分布于 $y=x$ 的直线两侧, 表明经过负载量加权后计算的蔓延速率效果较好, 各林分平均相对误差分别为 8.55% (10 a)、11.35% (18 a)、11.26% (20 a)、18.39% (30 a) 和 12.76% (50 a), 对于 10 a 马尾松林分的拟合效果最好, 而对于 30 a

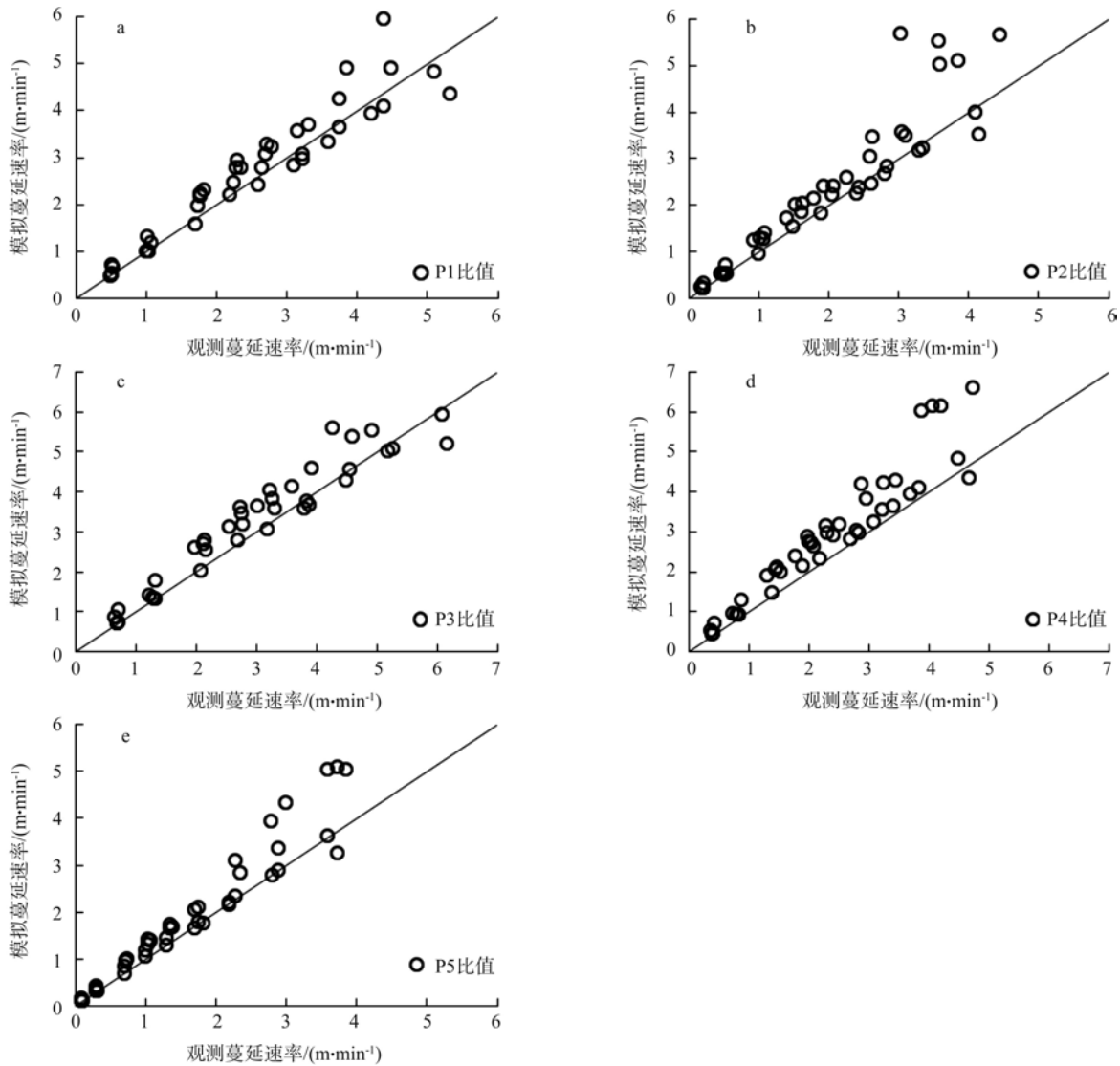


图 1 不同林型林火蔓延速率模拟值与观测值比较

Fig.1 Comparison of predicted and observed values of ROS in different forests

林分的拟合效果最差, 由图还可以看出, 同一林分内, 当蔓延速率逐渐变大时, 拟合度会有所下降, 这是因为当蔓延速率增大后, 火强度和火焰高度会相应增大, 对于蔓延速率的贡献度会增大, 而负载量的贡献度会有所下降, 单纯地使用负载量加权进行模拟会对模拟精度带来一定干扰, 但所有结果仍处于可接受范围内。

图 2a ~ e 分别展示了不同林龄马尾松人工林林火火线强度模拟值与观测值的对比情况。从整体来看, 各林分的模拟值与观测值的散点都略高于 $y=x$ 直线, 表明经过负载量加权后计算的火线强度偏高, 各林分平均相对误差分别为 24.98% (10 a)、25.08% (18 a)、25.00% (20 a)、29.34% (30 a) 和 24.78% (50 a), 对于 50 a 马尾松林分的拟合效果最好, 而对于 30 a 林分的拟合效果最差, 还可以看出, 对于火线强度的拟合同样有随着强度增大而偏差增大的趋势, 这是因为在 Rothermel

模型中, 可燃物床的设定为多孔连续均质型, 随着火线蔓延速度的加快和火焰高度的增加, 火线强度也随之提高, 近似于线性, 而点烧试验中, 可燃物床并非完全均质, 连续性也低于理想状态, 火线强度的增速会略低。

图 3 a ~ e 分别展示了不同林龄马尾松人工林林火火焰高度模拟值与观测值的对比情况。从整体来看, 火焰高度的模拟值与观测值所定位的散点随着林龄的增大, 分布位置逐渐从 $y=x$ 直线两侧向右下方偏移, 50 a 林分的散点已基本已全部移至直线下方, 这是因为随着林龄的增大, 地表 1 h 和 10 h 可燃物增多, 这两类可燃物属于细小可燃物, 对于火焰高度的贡献度比 100 h 可燃物要大, 但负载量权重要低于 100 h 可燃物, 造成模拟结果低于实际观测结果。各林分平均相对误差分别为 7.51% (10 a)、8.74% (18 a)、14.07% (20 a)、26.74% (30 a) 和 25.06% (50 a), 对于 10 a 马

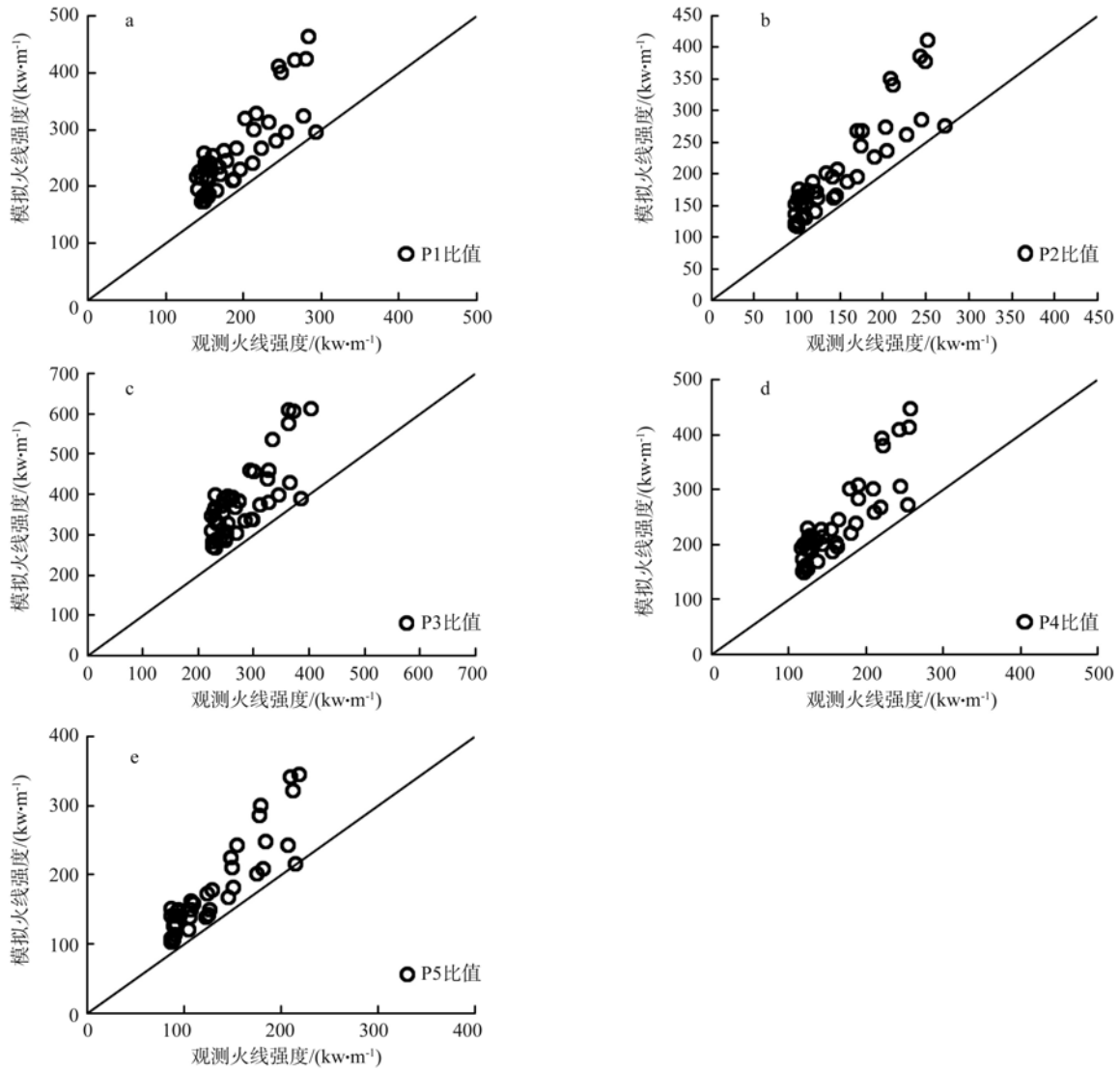


图 2 不同林型林火火线强度模拟值与观测值比较
Fig.2 Comparison of predicted and observed values of fireline intensity in different forests

尾松林分的拟合效果最好，而对于 50 a 林分的拟合效果最差，

在广义 Rothermel 模型的基础上，通过可燃物负载量加权后的模拟结果与点烧试验的观测结果相比较，有一定偏差，对于林火蔓延速度的拟合对最好，对于火线强度的模拟值偏高，而对于火焰高度的模拟值随林龄增大逐渐降低，但总体来说，拟合结果较理想。说明 Rothermel 扩展模型通过负载量加权后，预测效果较好，可用于桂西南地区马尾松潜在林火行为特征计算。

2.2 不同林龄马尾松林可燃物模型的地表火行为比较

图 4 ~ 图 6 为各林龄马尾松人工林在不同风速下地表火蔓延速度、火线强度和火焰长度的变化趋势。不同林龄马尾松地表火行为随风速增加，其火行为指标也呈线性增加，且 3 个指标参数值

的排序基本一致，即 20 a 马尾松人工林 (P3) 的火行为参数要高于其他林分，其地表火蔓延速度在无风状态下 (6.1 m 处风速为 0 m/s) 就达到了 3.8 m/min (图 4)，火线强度达到了 228 kw/m (图 5)，当风速增大到 5 m/s 时，P3 林型的地表火蔓延速度开始增至 3.9 m/min，火线强度也升至 234 kw/m，当风速增大至 30 m/s 时，P3 林型的地表火蔓延速度为 6.1 m/min，火线强度为 367 kw/m，分别为 P5 林型的 1.69 倍和 1.76 倍，除了受坡度影响外，地表可燃物床厚度教高也是导致该林分地表火燃烧更迅速的重要原因之一。

50 a 马尾松人工林 (P5) 的各项火行为参数均处于最低值，但仍呈现为随风速增加而线性提高的趋势。各林分在风速较低时，地表火蔓延速度和火线强度增益不显著，是因为地表可燃物床在未点燃时仍含有一定水分，其预燃烧过程教长，可燃物含水量降低速度较慢，而当风速较大时，

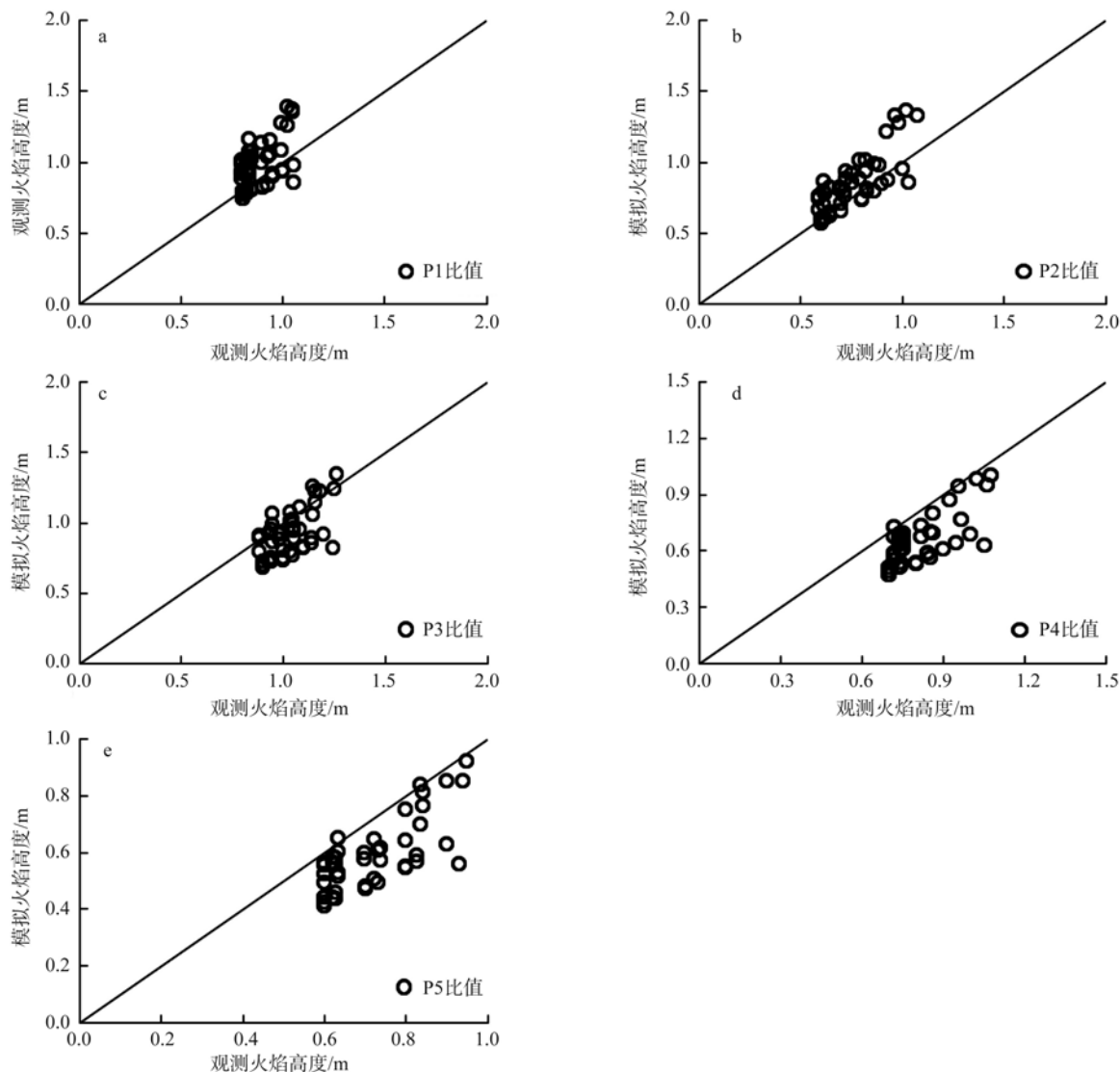


图 3 不同林型林火火焰高度模拟值与观测值比较
 Fig.3 Comparison of predicted and observed values of fire length in different forests

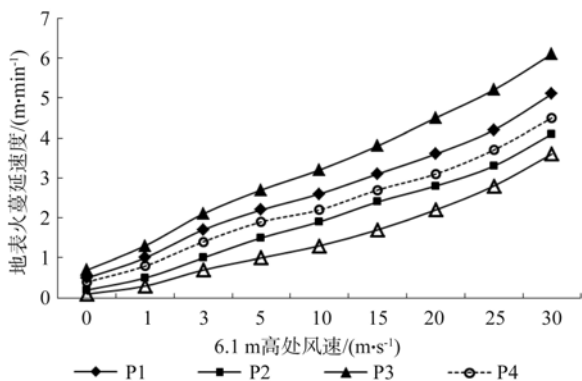


图 4 不同风速下各马尾松林可燃物模型地表火蔓延速度
 Fig.4 *Pinus massoniana* plantation surface ROS with different wind speeds

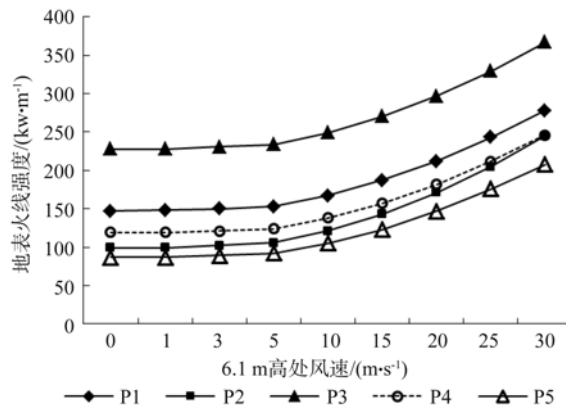


图 5 不同风速下各马尾松林可燃物模型地表火线强度
 Fig.5 *Pinus massoniana* plantation surface fireline intensity with Different wind speeds

火焰会受风速影响被拉长, 未点燃可燃物床在被点燃之前就会受到火焰炙烤, 高温可使其含水量迅速降低, 一经点燃, 便可迅速进入明火燃烧阶段; 同时, 经模拟发现火面强度、反应强度和点燃可

能性这 3 个指标不受风速影响。

各林型地表火焰长度随风速增加而提高, 但提高幅度不明显, 风速在 0 ~ 5 m/s 区间内, 火焰

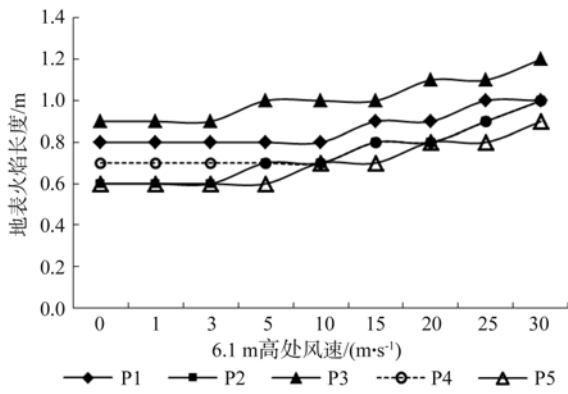


图 6 不同风速下各马尾松林可燃物模型地表火焰长度
Fig.6 *Pinus massoniana* plantation surface fire length with different wind speeds

长度变化不大，这是因为地表火焰长度更大程度上受坡度影响，林冠上方 6.1 m 处风速对于地表火焰长度的贡献度有限，与树冠火焰蔓延速度和火焰长度的相关性更大。

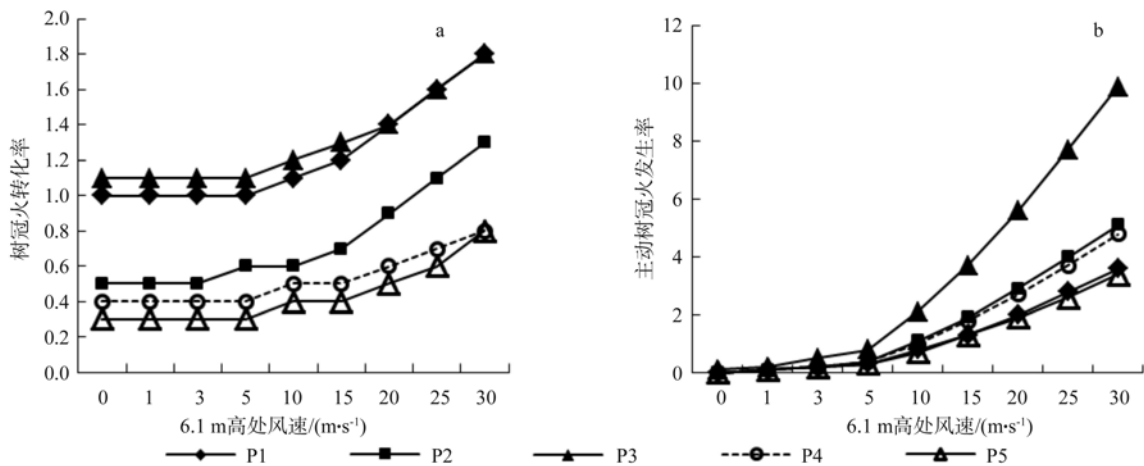


图 7 不同风速下各马尾松林可燃物模型树冠火转化率 (a) 和主动树冠火发生率 (b)
Fig.7 *Pinus massoniana* plantation transition ratio form surface fire to crown fire (a) and active crown fire ratio (b)

由图 7 (a) 可见，各林龄马尾松人工林的树冠火转化率随风速增大呈线性增加，P1 和 P2 林分在无风状态下，转化率便已达到 1 以上；P4 和 P5 林分的树冠火转化率会随风速增加而增加，但最大为 0.8；P2 林分在风速超过 20 m/s 时，其转化率会超过 1。图 7 (b) 显示，P3 林分随风速增大，其主动树冠火发生率显著提升，其他林分则提升缓慢，增幅基本一致，均是在 10 m/s 左右提升至 1。

由图 8 可知，各林龄马尾松人工林树冠火的蔓延速度和火焰长度均与风速呈正相关关系，P3 林分的指标随风速增加而提高的幅度最大，可知，在 20 a 马尾松人工林 (P3) 发生大火时，因其蔓延速度快，火焰长度大，且由于 20 a 马尾松人工林通常密度较大，单位面积里株数较多，导致树冠火强度也随风速迅速提高，可造成极大面积的

2.2 不同林龄马尾松林可燃物模型的树冠火行为比较

图 7 分别展示了不同风速下，各林龄马尾松人工林由地表火向树冠火的转化率 (a) 以及主动树冠火的发生率 (b)。根据 BehavePlus 对于转化率的定义，当转化率 ≥ 1 时，地表火的燃烧强度和火焰高度便足以使其在垂直方向上延伸，从而点燃树冠形成树冠火；而当发生率 ≥ 1 时，某一株乔木树冠上的火焰强度和高度便足以使其蔓延至周边 (最近) 的一株乔木树冠，从而使树冠火蔓延，形成遍燃树冠火；若发生率 < 1 ，但转化率 ≥ 1 时，可以形成树冠火，但难以蔓延，此时树冠火的状态一般为间歇型，若转化率 < 1 ，而时发生率 ≥ 1 时，地表火难以向上蔓延形成树冠火，但树冠有可能在特定条件下 (雷击、飞火等) 被点燃并蔓延，此时树冠火的状态可定义为条件树冠火。

林分重度受损，并对扑救人员带来严重的人身安全威胁，故在大风季节 (月份)，应对 20 a 左右林龄的马尾松进行有针对性的林火管理，严防其发生森林大火；树冠火蔓延速度和火焰长度增幅最低的为 P5 林分，是因为老龄马尾松人工林会因人工抚育等手段而降低林分密度，造成火焰的传播途径非连续，但由于 50 a 马尾松树干和针叶均含有丰富的油脂，其燃烧时所产生的火烧强度 (图 9) 并非最低，在进行林火管理时，应有意识地切断其树冠火的传播途径，并且在扑救时，采用粉剂或沙土，对其燃烧点进行有效阻燃。

森林火灾对于森林生态系统内动植物的灼烧是其最直接的影响形式，火面强度是评估林火灼烧烈度的重要指标。对火强度进行量化评估，结合火烧后马尾松林土壤性质和林分结构变化情况，

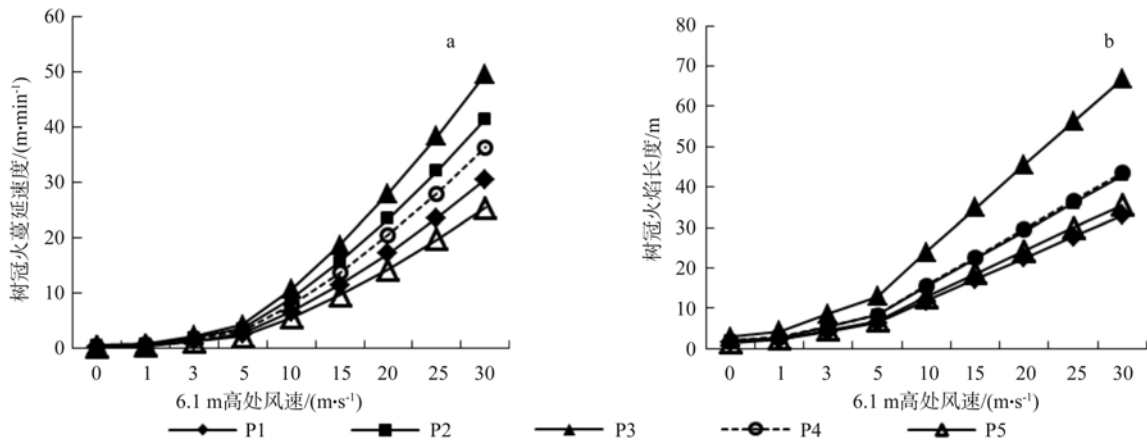


图 8 不同风速下各马尾松林可燃物模型树冠火蔓延速度 (a) 和树冠火焰长度 (b)
Fig.8 *Pinus massoniana* plantation crown ROS (a) and crown fire length (b)

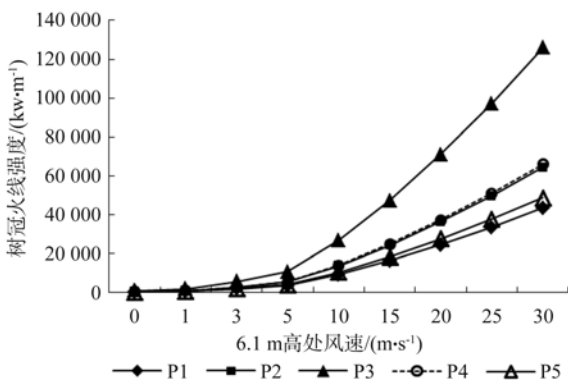


图 9 不同风速下各马尾松林可燃物模型树冠火线强度
Fig.9 *Pinus massoniana* plantation crown fire intensity

可探明不同强度火烧对于土壤团聚体和原生土粒数量的影响, 从而阐明火烧对土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度的干扰, 以及对持水量的扰动, 可预测不同强度火烧对马尾松人工林的

影响贡献度和影响机制。

各林分可燃物床点燃后火面强度在 3 455 ~ 3 599 kJ/m² 范围内变化(表 2), 各林分相差不明显, P4 和 P5 林分地表火强度阈值较高, 是因为这两种林型林内灌木较其他林分更少, 垂直方向的可燃物分布呈不连续状, 地表可燃物被点燃后, 向上传播途径受到阻碍, 若非地表火强度达到一定值, 否则很难向上传播引燃树冠; P1 和 P2 林分树冠火蔓延阈值较高, 是因为这两种林型林冠容重较低, 且由于林龄较小, 叶片含水量较其他林分更高, 树冠火传播过程中, 叶片烘干所需要的火强度更高; 整体来看, P3 林分引燃树冠火并蔓延形成遍燃树冠火的概率最大, 因此, 在进行林火管理时, 要尤其注意防止其发生遍燃树冠火, 从而避免更大程度的林木受损。

表 2 各马尾松林可燃物模型火行为及类型[†]
Table 2 *Pinus massoniana* plantation potential fire behavior and fire types of the fuel models

林分	P1	P2	P3	P4	P5	
火面强度 (kJ/m ²)	3540	3598	3599	3540	3455	
地表火强度阈值 (kw/m)	154	191	206	293	276	
树冠火蔓延阈值 (m/min)	8.6	8.1	5	7.5	7.5	
点燃可能性 (%)	14	16	17	14	12	
不同风速下火类型 (m/s)	0	地表火	地表火	间歇树冠火	地表火	地表火
	1	地表火	地表火	间歇树冠火	地表火	地表火
	3	地表火	地表火	间歇树冠火	地表火	地表火
	5	地表火	地表火	间歇树冠火	地表火	地表火
	10	地表火	条件树冠火	遍燃树冠火	条件树冠火	地表火
	15	条件树冠火	条件树冠火	遍燃树冠火	条件树冠火	条件树冠火
	20	条件树冠火	条件树冠火	遍燃树冠火	条件树冠火	条件树冠火
	25	遍燃树冠火	遍燃树冠火	遍燃树冠火	条件树冠火	条件树冠火
30	遍燃树冠火	遍燃树冠火	遍燃树冠火	条件树冠火	条件树冠火	

[†] * 地表火线强度阈值为点燃树冠从而引燃树冠火的火线强度值; 地表火焰长度阈值是点燃树冠从而引燃树冠火的火焰长度值; 树冠火蔓延速度阈值为产生主动树冠火的蔓延速度值。

3 结论与讨论

通过与点烧试验观测结果对比,发现采用负载量加权的 Rothermel 模型预测效果较好,造成误差的主要原因有 3 点:一是来自于点烧可燃物床(设置)误差,一是来自于影响火行为特征变化的多因子协同作用^[14],三是来自于试验设置水平的梯度与真实火场的可燃物特征变化梯度间的差异。本文仅在平地无风条件下进行了点烧试验,而风和坡度也是影响可燃物火行为的重要因素,关于风因子和地形因子条件下对于 Rothermel 模型的模拟结果验证需要进一步加强。

根据 Ottmar^[15]对于火灾等级的划分,本研究中马尾松人工林潜在林火均为低中强度火,火面强度在 $3\ 600\ \text{kJ}/\text{m}^2$ 以内,无风状态下火焰长度低于 $0.9\ \text{m}$,火线强度低于 $230\ \text{kw}/\text{m}$,地表火蔓延速度低于 $4\ \text{m}/\text{min}$,除 P3 林型外,其余林分火类型均为地表火。本文研究的人工林均在林场内,在森林经营和管理时在一定程度上受到了人为的影响,尤其是清除林下杂灌和地表凋落物,从而降低了森林火灾的发生概率,但仍有林型存在较高的火灾风险,在进行林火管理时,除了在可燃物床方面进行人为管理外,可考虑间种大叶栎乔木作为防火带,大叶栎冠基高较高,可有效阻止地表火向上蔓延。

可燃物床的厚度和含水率是决定火行为的重要因素,在干旱季节,长达数月的高温无雨天气会使地表可燃物的含水量降至最低,此时的引燃概率最大,遇上极端天气(如雷击)或林区内人为用火不当,既有可能被迅速点燃,所以在森林经营时,要密切关注可燃物的含水率,在干旱季节,要有计划的对地表可燃物进行清除,并且要针对不同林龄的马尾松林设置安全的冠基高,周期性的对马尾松枝干进行修剪,人为在可燃物垂直分布方向清理出隔断,以便切断地表火上传播的通道,可有效降低树冠火的发生概率。

参考文献:

[1] Thonicke K, Venevsky S, Sitch S, *et al.* The role of fire disturbance for global vegetation dynamics: coupling fire into

a Dynamic Global Vegetation Model[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2001, 10(6): 661-677.

- [2] Debano L F, Neary D G, Follett P F. *Fire Effects on Ecosystems* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [3] 许舟,刘发林.马尾松林植物及土壤养分对频繁火干扰的响应[J].中南林业科技大学学报,2016,36(6):46-50.
- [4] 黄小荣,谭一波,申文辉,等.广西三门江松栎公益林可燃物处理前后的树冠火风险[J].中南林业科技大学学报,2016,36(3):46-52.
- [5] 赵志霞,李正才,周君刚,等.火烧对中国北亚热带天然马尾松林土壤有机碳的影响[J].生态学杂志,2016,35(1):135-140.
- [6] 孙龙,赵俊,胡海清.中度火干扰对白栎落叶松混交林土壤理化性质的影响[J].林业科学,2011,47(2):103-110.
- [7] 胡海清,刘洋,孙龙,等.火烧对不同林型下森林土壤水分物理性质的影响[J].水土保持学报,2008,22(2):162-165.
- [8] 唐万鹏,李吉跃,漆良华,等.江汉平原连栽杨树人工林对土壤化学性质的影响[J].中南林业科技大学学报,2009,29(5):72-76.
- [9] 韩艺师,魏彦昌,欧阳志云,等.连栽措施对桉树人工林结构及持水性能的影响[J].生态学报,2008,28(9):4609-4617.
- [10] Rothermel R C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels: research paper INT-115 [R]. USDA Forest Service General Technical Report, 1972, 115.
- [11] Byram G M. *Combustion of forest fuels* [C] Davis, KP, *Forest Fire: Control and Use*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1959:77-84.
- [12] 张吉利,刘磷霏,褚腾飞,等.广义 Rothermel 模型预测平地无风条件下红松-蒙古栎林地表混合可燃物的火行为[J].应用生态学报,2012,23(6):1495-1502.
- [13] 张吉利,刘磷霏,邸雪颖,等.平地无风条件下蒙古栎阔叶床层的火行为 III.火线强度、可燃物消耗和燃烧效率分析及预测模型[J].应用生态学报,2013,24(12):3381-3390.
- [14] Nelson R M, Jr. Reaction times and burning rates for wind tunnel headfires[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2003, 12(2):195-211.
- [15] Ottmar R D, Prichard S J. Fuel treatment effectiveness in forests of the upper Atlantic Coastal Plain - An evaluation at two spatial scales[J]. *Fuel & Energy Abstracts*, 2012, 273(12): 17-28.

[本文编校: 吴 彬]