

风对红松林地表火强度的影响

李存宇¹, 张景忠¹, 刘鹏² (1. 黑龙江省森林保护研究所, 黑龙江哈尔滨 150040; 2. 黑龙江职业学院, 黑龙江哈尔滨 150080)

摘要 以红松人工林的针叶为材料, 在实验室内, 根据之前平地无风研究的试验设计, 构建不同载量、高度和含水率的可燃物床层。在各层级风速条件下, 共进行 100 次平地点烧试验。结果表明, 风速在 0.9~4.6 m/s 时, 红松针叶床层的火强度风因子为 1.769~6.708。床层压缩比、含水率对预测结果影响显著, 床层载量与床层高度对预测结果影响不大。

关键词 风因子; 火强度; 红松针叶

中图分类号 S762 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)02-0078-03

Effect of Wind on Fire Intensity of *Pinus koraiensis*

LI Cun-yu¹, ZHANG Jing-zhong¹, LIU Peng² (1. Research Institute of Forest Protection of Heilongjiang, Harbin, Heilongjiang 150040; 2. Heilongjiang Polytechnic, Harbin, Heilongjiang 150080)

Abstract Fuel beds composed of Korean pine needles collected from Korean pine plantations were constructed with varied fuel loading, depth and fuel moisture. Totally 100 experimental fires with these fuel beds were burned inside laboratory when wind speed is in 0.9-4.6 m/s. Under this range of wind speed, the wind factor of fire intensity is in 1.769-6.708. The results indicated that packing ratio and fuel moisture significantly influence wind factor. The effect of fuel loading and fuelbed depth on wind factor was not significant.

Key words Wind factor; Fire intensity; *Pinus koraiensis* needles

火强度是林火行为的重要指标之一, 可以反映出林火能量释放的快慢。火强度分为高强度火、中强度火和低强度火 3 类, 当火强度超过高强度火时, 林内所有生物都会被烧死。火强度可以帮助人们判断森林火灾的扑救难易程度, 也是灾后评估的重要指标, 因此研究意义重大。影响火强度的因素包括气象、地形、可燃物属性等, 其中风速对其影响最大, 随着风速的增长, 火强度会呈几何级增长。笔者对比了有风与无风条件下, 同等条件可燃物床层点烧后的火强度, 总结出风速对可燃物火强度的影响, 旨在为做好森林火险预报、划分火险等级或火险区划及提高森林火灾安全扑救效率提供科学依据。

1 试验设计与计算方法

1.1 点烧试验 试验地点位于东北林业大学试验林场的点烧实验室, 可燃物采集点位于实验室以西的帽儿山红松人工林, 地理坐标 127°37'02.29" E, 45°18'36.11" N。该地区属温带大陆性气候, 所采集的红松针叶混有少量阔叶及小型果实, 后期需进行适量挑拣。试验时间通常为当年夏季, 于防火期开始前结束。燃烧床规格为 2.5 m × 1.0 m, 高度与风洞出风口中心平齐, 燃烧床固定于风洞气流最稳定的中心位置, 该设计可保证燃烧床前后两端风速误差低于 0.1 m/s。铺设不同含水率、载量和高度组合的红松针叶均匀床层, 其中可燃物含水率设 5 个水平: 5%、10%、15%、20%、25%, 载量设 5 个水平: 4、5、6、7、8 t/hm², 可燃物床层高度设 4 个水平: 3.5、7、9 cm。共铺设 100 个床层, 进行 100 次点烧试验。这些含水率、载量和高度的组合与之前平地无风条件下的试验^[1]一致, 以便计算风因子。可燃物含水率用烘箱进行调节, 风洞模拟的风速为常见风级 (2~5 级), 风速控制在 0.9~4.6 m/s。

点烧前将可燃物均匀地铺设在燃烧床上, 燃烧床前端固定有酒精点火槽, 点烧后可形成一条稳定向前的火线。开启风洞, 待气流稳定后测定燃烧床前后两端风速, 点燃酒精槽, 当火蔓延过引燃区且达到“似稳态”(quasi-steady state)时开始记录火焰长度。燃烧床表面风速用固定式测速仪与手持风速仪同时测量, 取平均值以减小误差。采用标杆法^[2]与视频图像观测法测算火焰长度, 取两者平均值以减小误差。含水率采用高精度快速水分测定仪 AND-ML50 测定。

1.2 数据分析 Byram^[3]在早期研究中给出过经典的火强度计算公式, 从中可见火强度只与火焰长度(L)有关, Byram 公式给出的是火焰长度与火强度的关系, 预测公式如下:

$$I = 258(L)^{2.174} \quad (1)$$

式中, I 为火线强度(kW/m); L 为火焰长度(m)。因此, 只需研究风对火焰长度的影响, 再通过 Byram 公式换算可得出风对火强度的影响。Byram 公式具有很强的实际意义, 首先测量火焰长度相对简单, 而直接获取火强度则较为困难。另外, 该研究在有风条件下进行, 火焰长度在风的作用下相较于其他火行为指标表现较为稳定。当然, 火焰长度的观测也存在波动周期较小而波动范围较大的弊端, 因此同时采用视频观测的方法来有效降低该类误差。

通过对 100 次点烧试验的统计分析, 给出红松针叶床层平地有风条件下火焰长度的基本统计。与已开展的平地无风条件下红松针叶床层的火焰长度进行比较^[1], 在相同床层条件下, 用有风时的火焰长度除以无风时的火焰长度, 得到该风速的实测风因子。

1.2.1 床层结构因子对风因子的影响。通过方差分析^[4], 确定红松针叶可燃物床层结构因子(可燃物含水率、床层高度、载量、压缩比)对火焰长度风因子是否存在影响, 如存在影响则在预测模型中引入该影响因子, 不存在影响的则可剔除出预测模型, 最终获取风速与红松针叶床层火焰长度风因子之间的关系, 从而得出风速与火强度之间的关系。

基金项目 黑龙江省财政项目资助。

作者简介 李存宇(1982—), 男, 河北抚宁人, 副研究员, 从事森林防火科研工作。

收稿日期 2017-11-03

1.2.2 建模方法与结果对比。目前主流的风因子模型主要有 2 种形式,即加式模型与乘式模型。加式模型主要由各因子相加而成,模型形式为 $\varphi_w = b_0 + b_1f(U) + b_2f(E)$,乘式模型由各因子相乘而成,模型形式为 $\varphi_w = b_0 \cdot f(U) \cdot f(E)$ 。其中, $f(x) = a \cdot e^{bx}$ 或 $a \cdot x^b$,即幂函数与指数函数 2 种形式, U 为风速(m/s); E 为方差分析中确定对预测结果存在影响的影响因子; a, b 为常数。

利用 SPSS 18 拟合得出所有形式模型的参数,对于每个模型,根据该研究的实测风速和实测影响因子的数值,计算得出风因子预测值,按式(1)、(2)计算得出各模型的平均绝对误差(MAE)和平均相对误差(MRE),再对不同模型的误差进行多重比较,以确定各结果间的差异是否显著^[5]。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - Y_j| \quad (1)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Y_i - Y_j}{Y_i} \right| \times 100\% \quad (2)$$

式中, Y_i 和 Y_j 分别为该试验计算的风因子值和由上述模型

计算的风因子值; n 为点烧次数。对比不同形式的风因子模型预测误差,分析各模型的预测精度及各结构因子对风因子模型精度的贡献大小。以上统计分析用 Office 2003 完成。

2 结果与分析

2.1 有风条件下红松针叶床层火焰长度和床层特征统计 表 1 为 100 次点烧试验的基本情况,其中红松针叶床层林火火焰长度为 24.5 ~ 132.0 cm,平均值为 59.4 cm,从 75% 的区间值观察,多数红松针叶点烧试验的火焰长度低于 72.1 cm。从 75% 的区间值观察风速数值,风速多数低于 2.8 m/s,当风速高于 3.0 m/s 时,火焰长度往往会急剧上升,火焰长度数值可达平均值的 2 倍以上,测量时会使面部产生明显灼热感,可见风速对火焰强度的影响之大。

在风速为 0.90 ~ 4.60 m/s 的条件下,100 次点烧试验中有 13 次无法持续燃烧,13 次无法持续燃烧的试验均为含水率高于 20% 或载量为 4 t/hm² 的难燃床层,该类床层即便调整风速也难以使其持续燃烧。

表 1 点烧试验和火焰长度的统计数据

Table 1 Point burning test and statistical data of flame length

项目 Items	火焰长度 Flame length cm	风速 Wind speed m/s	压缩比 Compression ratio	含水率 Moisture content %	载量 Load t/hm ²	床层高度 Bed height cm
均值 Mean value	59.4	2.33	0.037 1	15	6	6
最小值 Minimum value	24.5	0.90	0.014 0	5	4	3
最大值 Maximum value	132.0	4.60	0.084 0	25	8	9
25% 区间值 25% interval value	42.8	1.60	0.023 0	10	5	4
75% 区间值 75% interval value	72.1	2.80	0.047 0	20	7	8

注:由于风洞是由电脑数级控制,所以无法精准控制产生的风速数值,表中风速以床层两端实测数值为准。由于某些床层含水率过高或载量过低,在无风条件下虽可正常燃烧,但是在风的作用下会产生火焰熄灭、可燃物被吹散等不可控现象,此类床层点烧后火焰长度难以测量,因此火焰长度与风速样本数少于其他样本数。火焰长度和风速测定的样本数为 87,压缩比、含水率、载量、床层高度的样本数为 100

Note: Because the wind tunnel was controlled by a computer, the wind speed can not be precisely controlled. The wind speed in the table was based on the measured values at both ends of the bed. Because some bed water content was too high or the load was too low, even under the condition of no wind can be normal combustion, but under the action of the wind will produce flame extinguished, the fuel was blown away uncontrollable phenomenon. The flame length can not be measured after the point burning, so the flame length and wind speed sample were less than other samples. The sample number of flame length and wind speed was 87, and the sample number of compression ratio, moisture content, load and bed height were 100

2.2 预测模型的对比分析 可燃物压缩比、载量、高度、含水率对火焰长度风因子影响的方差分析结果表明,可燃物压缩比、含水率对火焰长度风因子影响显著 ($P < 0.05$),载量和床层高度对火焰长度风因子影响则不显著 ($P > 0.05$)。因此,在多因子模型中,选用的结构因子为可燃物压缩比和可燃物含水率。

表 2 给出了火焰长度单因子、多因子模型的结构、参数和误差。根据之前的分析,可燃物压缩比、可燃物含水率对火焰长度风因子模型存在影响,因此在多因子建模过程中引入了这 2 项影响因子,同时建立了只含风因子的单因子模型,对两者间的预测差异进行比较,最终选择出最优的预测模型。从表 2 中决定系数与 MAE 上看,2 个单因子模型预测效果一般,误差普遍高于含可燃物床层结构因子的多因子模型,但幂函数形式的单因子模型与多因子模型的预测误差较为接近,MAE 误差在 0.170 左右,MRE 低于 10%。含结构因子的多因子模型预测结果与单因子模型相比较效果普遍有所提高,在模型结构相同的情况下,可燃物压缩比对火焰

长度风因子的影响高于可燃物含水率。模型形式方面,加式模型与乘式模型效果相差并不明显。整体看,含 2 种可燃物结构因子的乘式模型与含可燃物压缩比的加式模型预测效果最好,由于乘式模型相对于加式模型在机理上更易于理解^[6],因此选择 7 号模型作为最佳预测模型,该模型 MAE 在 0.16 左右,MRE 低于 10%。

图 1 为最佳预测模型的风因子预测值和实测值的对比情况。从图 1 可见,散点整体均匀分布在中线两侧,模型在风因子小于 2 时预测略有偏高,随着风速增大,当风因子超过 2.1 时,该模型预测明显偏低。由此可见,火焰长度风因子预测模型存在风速阈值的问题,即在低于和高于阈值的 2 个方向应采用不同的模型进行预测,随着风速超出该研究的风速范围,是否还存在其他风速阈值有待进一步研究。

从图 1 可以看出,火焰长度风因子预测模型存在某一阈值,相对应的火强度风因子模型亦同样存在该阈值,即低于和高于风速阈值的 2 个方向应采用不同的模型进行预测,该阈值的准确值需要更多的针对性点烧试验才能得以确定,随

表2 新建风因子模型的参数和误差

Table 2 Parameters and errors of the new wind factor model

序号 No.	模型方程和参数 Model equation and parameter	F 检验 F Test	显著水平 Significant level (P)	调整后决定系数 Adjusted determination coefficient (R^2)	平均绝对误差 Mean absolute error (MAE)	平均相对误差 Mean relative error (MRE) // %
1	$\Phi_w = 1.338e^{0.106U}$			0.308	0.183	10.50
2	$\Phi_w = 1.395U^{0.261}$			0.365	0.171	9.80
3	$\Phi_w = 2.008U^{0.261}\beta^{0.107}$			0.402	0.167	9.66
4	$\Phi_w = 1.536U^{0.248}M^{-0.032}$			0.367	0.172	10.10
5	$\Phi_w = 811.206U^{0.001} + 326.673\beta^{0.001} - 1135.894$			0.408	0.163	9.40
6	$\Phi_w = 847.89U^{0.001} - 0.007M - 846.416$			0.377	0.172	10.00
7	$\Phi_w = 2.041U^{0.258}\beta^{0.1} \cdot M^{-0.015}$	$F(3,83) = 61.77$	<0.000	0.405	0.165	9.50
8	$\Phi_w = 0.184U + 3.644\beta - 0.004M + 1.219$			0.357	0.178	10.30

注: Φ_w 为风因子,无量纲; U 为风速(m/s); M 为可燃物含水率(%); β 为可燃物床层压缩比,无量纲。方程参数由 SPSS 拟合取得

Note: Φ_w is wind factor, dimensionless; U is wind speed (m/s); M is the fuel moisture content (%); β is bed compression ratio of combustible material, dimensionless. The parameters of the equation were obtained by SPSS fitting

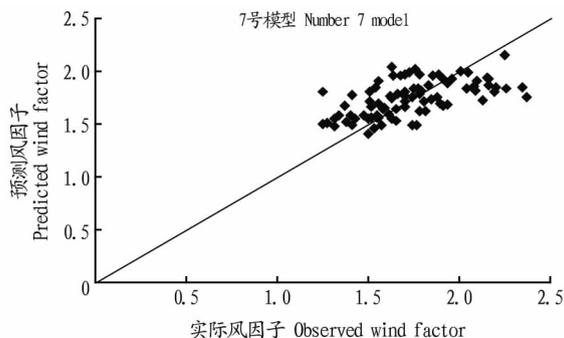


图1 火焰长度实测风因子值与最佳模型预测值的对比

Fig. 1 Comparison of wind factor measured by flame length and the predicted value of the best model

着风速的提高是否还有其他阈值的存在,还需进一步研究。

2.3 风速对火强度影响的预测模型 由火焰长度风因子模型转换为火强度风因子模型,只需将最佳预测模型(7号模型)带入公式(1)中。式(1)可视为无风时的火强度,带入火焰长度风因子模型后的式(1)可视为有风时的火强度,即式(3)。最终的火强度风因子模型为式(4)。

$$I_w = 1216.798U^{0.561}\beta^{0.217} \cdot M^{-0.033}L^{2.174} \quad (3)$$

$$\Phi_l = \frac{I_w}{L} = 4.716U^{0.561}\beta^{0.217} \cdot M^{-0.033} \quad (4)$$

3 结论与讨论

(1)当风速在0.9~4.6 m/s时,红松针叶床层的火强度风因子为1.769~6.708。预测效果最好的红松针叶床层火焰强度风因子模型为 $\Phi_l = \frac{I_w}{L} = 4.716U^{0.561}\beta^{0.217} \cdot M^{-0.033}$,其平均绝对误差与平均相对误差均低于其他形式模型。

(上接第67页)

照组提高4.71% ($P < 0.05$),差异显著;试验组的料蛋比与对照组相比,降低7.83% ($P < 0.05$),差异显著;而试验组在腹泻率与药物费用支出与对照组相比分别降低83.92% ($P < 0.01$)和73.47% ($P < 0.01$),差异极显著。

参考文献

- [1] 张金平. 蛋鸡产蛋高峰期的科学供水[J]. 乡村科技, 2012(4): 33.
- [2] 于云志, 张风. 农村饮用水及环境卫生的影响因素探讨[J]. 世界最新

(2)火焰强度风因子模型预测精度的规律表明,只含风因子的单因子模型预测精度最低,引入对火强度有影响的可燃物结构因子可以提高模型的预测精度,且可燃物床层压缩比对模型的精度贡献高于可燃物含水率。理论上来说,同时引入2个因子的模型预测精度应为最佳,且机理上更易理解的乘式模型预测精度应高于加式模型,但表2中的5号加式模型与最佳模型预测结果接近甚至更低,这可能与点烧次数不足且数据结果恰好与该形式模型拟合效果更好有关。随着后续研究继续积累点烧数据,该类情况是否会有所改善还需进一步观察。

(3)在火焰强度风因子模型的实际应用中,由于野外可燃物的自身属性往往难以准确估算,且加入可燃物结构因子的模型精度提高比例不大,同时考虑野外实际火情的不确定性,因此实际应用中也可不考虑结构因子的影响,而直接采用只含风速的幂函数形式单因子模型(表2中的2号模型)来估计风对火强度的影响。

参考文献

- [1] 刘礴. 平地无风条件下红松针叶床层的火行为研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
- [2] 崔文彬, 乔启宇, 牛树奎, 等. 地表火燃烧参数及其火头前影响区的实验研究[J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(5): 22-27.
- [3] BYRAM G M. Scaling laws for modeling mass firesp[J]. Pyrodynamics, 1966, 4: 271-284.
- [4] 叶红卫, 朱蓝辉. 应用 SPSS 进行双因子方差分析[J]. 河北北方学院学报(自然科学版), 2008, 24(2): 63-65.
- [5] 姜凌. 生物统计中多重检验问题的分析研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
- [6] ROTHERMEL R C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels[R]. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experimental Station. Research Paper INT-115, 1972.

医学信息文摘, 2016(95): 176.

- [3] 程哲婉. 我国农村水污染问题制度分析及对策[J]. 江南论坛, 2017(9): 30-32.
- [4] 中华人民共和国卫生部. 食品微生物学检验 大肠菌群计数: GB 4789.3-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [5] 中华人民共和国农业部. 无公害食品畜禽饮用水水质标准 NY 5027-2008[S]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [6] 姜琪. 蛋鸡大肠杆菌病的防控要点[J]. 养殖与饲料, 2017(6): 74-76.
- [7] 王海波. 蛋鸡大肠杆菌病的诊断与防治[J]. 当代畜牧, 2017(8): 53-54.