

# 大岗山地区主要林型 可燃物调查与林火行为

孙武, 牛树奎\*, 赵蓓, 张志旭, 王欢, 陈禹舟

(北京林业大学/省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 以江西大岗山地区 11 个主要植被类型为研究对象, 调查立地因子和林分因子。测量每个样方内的枯落物、鲜草和枯草、及 1、10、100 和 1 000 h 的地表枯枝载量, 并采集样品。在林火实验室测定可燃物热值、抽提物、灰分和粗纤维质量分数, 并进行相关分析, 计算林火蔓延速率、火强度和火焰长度。研究得出, 天然林地表可燃物载量普遍大于人工林; 天然林火行为指标大于人工林, 针叶林火行为指标大于阔叶林, 纯林火行为指标大于混交林, 落叶阔叶林火行为指标大于常绿阔叶林。通过比较各植被类型蔓延速度、火强度和火焰长度这 3 项林火行为指标, 对林火行为可能造成的森林危害做出评价, 并提出森林防火决策。

**关键词:** 可燃物; 林火行为; Rothermel 模型; 防火对策

中图分类号: S762.3<sup>+</sup>4 文献标志码: A 文章编号: 1000-2286(2012)06-1171-09

## Forest Fuel Survey and Fire Behavior in Main Forests in Dagangshan

SUN Wu, NIU Shu-kui\*, ZHAO Bei,  
ZHANG Zhi-xu, WANG Huan, CHEN Yu-zhou

(Key Laboratory for Silviculture and Conservation, Beijing Forestry University, Ministry of Education, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Taking 11 major vegetation types in Jiangxi Dagangshan area as the targets, the site factors and stand factors were surveyed. litter, grass and hay, and 1, 10, 100, 1 000 h of surface dry twig load were measured in every quadrat, and samples were collected. The calorific value, extract, ash and crude fiber mass fraction of combustibile materials were measured in the forest fire laboratory, and through correlation analysis, the fire spread rate, fire intensity and flame length were calculated. The study results showed, the forest surface fuel load in the natural forest was generally greater than in the plantation; the forest fire behavior indicators in the natural forest were greater than in the plantation, that in the coniferous forest were greater than that in the broad-leaved forest, that in the pure forest were greater than that in the mixed forest, that in the deciduous broadleaf forest were greater than that in the evergreen broad-leaved forest. By comparing the spread rate, fire intensity and flame length of these three forest fire behavioral indicators in each vegetation type, the loss and harm caused by forest fire behavior were assessed, and some countermeasures against forest fire are proposed.

**Key words:** fuel; fire behavior; Rothermel model; countermeasures

收稿日期: 2012-05-16 修回日期: 2012-10-17

基金项目: 国家林业局野生动植物保护与自然保护区管理司专项(2011)

作者简介: 孙武(1985—)男, 硕士生, 主要从事林火生态研究, E-mail: sw996@163.com; \* 通讯作者: 牛树奎, 教授, 博士, E-mail: shukuiniu@163.com。

近年来,我国森林火灾发生次数呈现有增无减的趋势,森林防火灭火工作的重要性愈加凸显。以森林可燃物调查为基础,结合林分、地形和气象因子,研究潜在林火行为是森林防火工作的重点。林火行为是森林可燃物从被点燃开始,到发生发展直至熄灭的整个过程中所表现出的各种现象和特征<sup>[1]</sup>。火行为受可燃物、火环境(气象、地形和植被)和火源条件的制约和控制<sup>[2]</sup>。国外以大量野外实验作为控制林火行为的关键,并且重视可燃物处理工作,一般通过林木疏伐+可燃物处理+控制点烧等方法<sup>[3]</sup>,来减少森林火灾的发生,或者影响火行为,即降低林火蔓延速率和火强度。国外注重通过可燃物模型来研究林火行为,在 Rothermel<sup>[4-5]</sup>公布可燃物模型以后,Anderson 和 Brown<sup>[6]</sup>于 1982 年,Scott and Burgan<sup>[7]</sup>于 2005 年陆续开发的 BehavePlus 软件现已发展到 53 个火行为的可燃物标准模型。国内在林火行为方面的研究大多以理论研究和室内试验为主,重点关注地表火和树冠火研究,多以可燃物调查为基础,或者结合室内燃烧实验,进行潜在火行为的预测<sup>[8]</sup>,对于气象因子和地形因子结合的不紧密。

本研究区域为江西大岗山地区。江西森林资源丰富,林地面积占全省面积 63%,以松树、杉树为主的针叶易燃林占 70.6%,抵御森林火灾的能力不强<sup>[9]</sup>。仅 2007 年,江西全省就发生森林火灾 326 起,其中火警 100 起,一般森林火灾 226 起,过火面积 4 542 hm<sup>2</sup>,受害森林面积 2 053 hm<sup>2</sup>,死亡 7 人,伤 12 人<sup>[10]</sup>。2008 年又发生森林火灾 572 起。特别是该地区受 2008 年南方大范围冰冻雨雪灾害的影响,大部分林内都发生严重的断梢、腰折、翻兜现象,林木损毁严重,枯枝枯梢积累较多。时至今日,部分林内倒木、枯立木随处可见,阵风吹过时断枝残梢落下,可燃物载量大<sup>[11]</sup>。加之近年来南方普遍干旱少雨,之前积累的可燃物逐渐干燥,山民林内活动频繁,在冬春少雨季节很容易引发人为森林火灾。所以,研究大岗山地区潜在林火行为对于本地森林防火灭火具有重要意义。

## 1 研究地区概况

大岗山位于江西省分宜县境内,东经 114°30′~114°45′,北纬 27°30′~27°50′<sup>[12]</sup>,站区面积 9 339.9 hm<sup>2</sup>。属罗霄山脉北端的武功山支脉,地质构造属华夏系,地势起伏较大,相对高差达 1 000 m,最高峰大岗山海拔 1 091.8 m。站区属亚热带湿润气候区,具有四季分明、日照充足、雨量充沛的特点,特别适合林木生长。年平均温度 15.8℃,年平均日照时数 1 656.9 h,年平均降水量 1 590.9 mm,其中 4~6 月份降雨量占全年的 45%,无霜期 265 d。全年以东风、东北风为主,年平均风速 1.2 m/s,平均最大风速 7.2 m/s<sup>[13]</sup>。土壤属长江中下游低山丘陵红壤、黄壤类型。地带性植被类型主要有常绿针叶林,包括马尾松林(*Pinus massoniana* Lamb)、柏木林(*Cupressus funebris*)、柳杉林(*Cryptomeria fortunei*)、水杉纯林(*Metasequoia glyptostroboides*)、杉木纯林(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook);常绿阔叶林,包括硬阔(刨花楠林(*Machilus pauhoi* Kaneh)、丝栗栲林及硬阔混交林栎类)和软阔(栲木林(*Alnus cremastogyne* Burk)和木荷林(*Schima superba* Gardn et Champ));灌木林(鹿角杜鹃林(*Rhododendron latoucheae* Franch))共 11 个植被类型<sup>[14]</sup>。

本研究依托大岗山森林生态站进行,该生态站隶属中国林科院森林生态环境与保护研究所,是国家林业局科技司所辖 CFERN 网络(中国森林生态系统定位研究网络)的主要台站,研究该地区的可燃物载量及潜在火行为特征,对于保护森林资源,做好防火工作具有参考价值。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置与调查

选取 11 个代表主要植被类型的典型样地,在不同样地内分别设置 20 m×20 m 的标准地。测定基本林分因子,包括树种组成、优势树种及林分郁闭度,地形因子主要测定海拔、坡度、坡向和坡位,气象因子主要是风速和温度。乔木进行每木检尺,测定种类、树高、胸径、冠幅、活枝下高和死枝下高;灌木层设置 2 m×2 m 样方(每个标准地 5 个),测定灌木种类、灌木基径、灌高,采用收割法,对全部样本称取鲜重并取样;草本层采用 1 m×1 m 样方(每个标准地 5 个),测定鲜草和枯草种类、草本盖度和高度,并用收割法分别称重并取样;地表枯落物层用 1 m×1 m 样方(每个标准地 5 个),主要测量上、下层枯落物厚度、负荷量,以及 1、10、100、1 000 h 这 4 个时滞的枯枝负荷量,分别称量并取样。在林火实验室内将采集样品置于烘箱内,在 105℃下连续烘干 48 h 至绝干质量,进行称重并计算出样方内灌木层、草本层、枯落物层可燃物负荷量。并对可燃物热值、抽提物含量、灰分含量和粗纤维含量进行测量。

## 2.2 可燃物理化性质测定

森林可燃物是林火发生的物质基础,其理化性质特征对于分析林火发生发展,以及整个火行为过程具有关键作用<sup>[15]</sup>。不同的可燃物类型具有不同的理化性质,产生相应的火行为特征。可燃物的理化性质主要包括可燃物空间结构、热值、抽提物、灰分等特征<sup>[16]</sup>。

2.2.1 可燃物负荷量 将野外采集的样品放到电热鼓风恒温烘箱内,在 105 °C 恒温下烘至质量,根据公式(1)计算样品的干湿比:

$$DM = \frac{W_D - W_B}{W_N - W_A} \quad (1)$$

(1) 式中  $D_M$  为可燃物的干湿比,无量纲;  $W_N$  为可燃物样品取样时质量, g;  $W_D$  为可燃物样品烘干后的质量, g;  $W_A$  为烘干前信封的湿质量, g;  $W_B$  为烘干后信封的干质量, g。

根据样品的干湿比,可以计算野外调查中相对应的各类可燃物的绝干质量,并依据调查面积计算出可燃物负荷量。有效可燃物负荷量为细小可燃物,包括枯落物上层、1、10 h 枯枝、草本和灌木小枝叶。

2.2.2 可燃物热值测定 将烘干的样品粉碎,取 1 g 左右压片,用分析天平准确称量后,使用 PRR3600 型全自动氧弹式量热仪测定样品的热值(kJ/g)。对每个样品进行 3 次重复实验,取平均值,得到不同种类可燃物的热值。

2.2.3 可燃物灰分含量测定 称取烘干后粉碎样品 10 g 左右,装于坩埚在电炉中炭化,之后在 600 °C 马弗炉中灰化 6 h 至恒质量,称量,根据公式(2)计算样品灰分含量百分比:

$$S = \frac{W_A - W_C}{W_B - W_C} \times 100\% \quad (2)$$

(2) 式中  $S$  为可燃物的灰分含量, %;  $W_B$  为炭化前装有烘干样品的坩埚质量, g;  $W_A$  为样品灰化后的坩埚质量, g;  $W_C$  为坩埚本身净质量, g。

2.2.4 抽提物含量测定 称取烘干后粉碎样品 2 g 左右,使用 SZC-C 型脂肪测定仪进行测量,根据公式(3)计算样品抽提物含量百分比:

$$S_T = \frac{W_Z - W_O}{W_A} \times 100\% \quad (3)$$

(3) 式中  $S_T$  为可燃物抽提物含量, %;  $W_A$  为样品质量, g;  $W_O$  为烘干后坩埚质量, g;  $W_Z$  为实验结束后抽提物 + 坩埚质量, g。

2.2.5 可燃物粗纤维含量 将经过去脂的样品 2 g 左右置于坩埚中,使用 SLQ-6 型粗纤维测定仪进行测量,根据公式(4)计算粗纤维含量:

$$C_F = \frac{A_1 - A_2}{S} \times 100\% \quad (4)$$

(4) 式中  $C_F$  为可燃物样品粗纤维含量百分比, %;  $S$  为样品质量, g;  $A_1$  为坩埚 + 灰分 + 粗纤维, g;  $A_2$  为坩埚 + 残渣及灰分质量, g。

## 2.3 林火火行为计算

目前应用广泛的林火蔓延模型是 Rothermel 模型,该模型是 Rothermel<sup>[17]</sup> 在 1972 年提出来的:

$$R = \frac{I_R \xi (1 + \phi_w + \phi_s)}{\rho_b \varepsilon_0 Q_{ig}} \quad (5)$$

(5) 式中:  $R$  为火蔓延速度;  $I_R$  为火反应强度;  $\xi$  为与热传播有关的系数;  $\phi_w$  和  $\phi_s$  分别为风和地形坡度影响系数;  $\rho_b$  为可燃物复合体烘干后的体密度;  $\varepsilon_0$  为与体密度有关的加热系数;  $Q_{ig}$  为点燃单位质量可燃物需要的热量。

火线强度的计算方法采用 1959 年美国物理学家 Byram<sup>[18]</sup> 提出的火线强度计算公式:

$$I = HWR \quad (6)$$

(6) 式中:  $I$  为火线强度 [Btu/(ft · s)];  $H$  为可燃物热值 (Btu/lb);  $W$  为有效可燃物负荷量 (lb/ft<sup>2</sup>);  $R$  为火蔓延速度 (ft/s)。

转换为国际单位,火强度计算公式(6)则变为:

$$I = 1.667HWR \tag{7}$$

(7) 式中:  $I$  为火线强度 (kJ/(m·s));  $H$  为可燃物热值 (kJ/g);  $W$  为有效可燃物负荷量 (t/hm<sup>2</sup>);  $R$  为火蔓延速度 (m/min)。

Byram 同时提出了利用火线强度计算火焰长度的公式:

$$L_f = 0.45I^{0.46} \tag{8}$$

(8) 式中:  $I$  为火线强度 [Btu/(ft·s)];  $L_f$  为火焰长度 (ft)。

转换为国际单位<sup>[19]</sup>, 公式(8) 则转换为:

$$L_f = 0.237I^{0.46} \tag{9}$$

(9) 式中:  $I$  为火线强度 (kJ/(m·s));  $L_f$  为火焰长度 (m)。

### 3 结果与分析

#### 3.1 可燃物模型参数理化性质比较

在影响林火行为的各项因素中, 天气和地形条件较难改变, 可燃物特征是影响和改变林火行为的重要因素。通过可燃物各项理化性质的比较分析, 可以得出影响林火行为的各项参数。

3.1.1 可燃物负荷量 可燃物负荷量是指单位面积上可燃物的绝干质量。本研究以地表火模型为主, 所指可燃物负荷量为有效可燃物负荷量(表 1)。

表 1 地表可燃物负荷量

**Tab. 1 Surface fuels loading** t/hm<sup>2</sup>

可燃物类型 Fuel types	下层枯叶 Lower leaves	上层枯叶 Upper leaves	枯枝 1 1-h	枯枝 10 10-h	枯枝 100 100-h	枯枝 1 000 1 000-h	枯草 Dead grass	鲜草 Live grass	灌木小枝叶 Bush twigs and leaves	易燃灌木 Flam mable shrubs	合计 Total	有效可燃物 Effective fuels
1	2.974	2.031	1.300	1.314	0.964	0.404	0.416	0.361	1.461	1.978	11.742	6.883
2	2.019	2.617	1.131	0.690	1.765	0.736	0.028	0.264	0.627	0.979	10.228	5.356
3	1.347	1.609	1.152	0.848	0.996	0.000	0.164	0.180	1.102	1.344	7.641	5.057
4	1.335	3.004	2.289	1.529	0.000	0.000	0.022	0.174	0.737	1.009	9.363	7.755
5	0.149	0.686	0.345	0.091	0.413	0.000	0.000	0.594	0.187	0.283	2.562	1.904
6	0.888	1.033	0.586	0.864	0.690	0.000	0.000	0.220	1.816	2.358	6.640	4.520
7	0.309	0.630	0.847	1.313	0.000	0.000	0.000	0.295	1.037	1.421	4.815	4.122
8	0.000	0.649	1.528	1.924	0.000	0.000	0.000	0.109	0.056	0.082	4.291	4.291
9	0.761	0.769	1.124	0.458	0.000	0.000	0.000	0.337	0.615	0.918	4.365	3.301
10	2.017	2.109	1.353	2.106	0.435	0.000	0.000	0.204	0.584	0.871	9.095	6.355
11	0.805	0.823	0.369	1.811	1.750	3.033	0.000	1.093	0.109	0.168	9.853	4.206

1-h 为 1-h timelag dead fuel 指 1 时滞枯枝, 之后的 10-h, 100-h, 1 000-h 依次类推;

1 为马尾松天然林 (Natural forest of *Pinus massoniana* Lamb) 2 为刨花楠天然林 (Natural forest of *Machilus pauhoi* kaneh) 3 为柳杉纯林 (*Cryptomeria fortune* forest) 4 为丝栗栲天然林 (Natural forest of *Castanopsis rargesn*) 5 为桫木人工林 (The planted forest of *Alnus cremastogyne* Burk) 6 为木荷人工林 (The planted forest of *Schima superba* Gardn et Champ) 7 为硬阔混交林 (Hard mixed forest) 8 为柏木人工林 (The planted forest of *Cupressus funebris*) 9 为鹿角杜鹃天然林 (Natural forest of *Rhododendron latoucheae* Franch) 10 为常绿阔叶林 (Evergreen broadleaf forest) 11 为水杉人工林 (The planted forest of *Metasequoia glyptostroboides*)。

通过可燃物调查发现, 大岗山地区除马尾松林为天然林之外, 其他林分多为人工林。马尾松天然林植被种类丰富, 郁闭度达 0.85, 其树种组成为: 4.2 马尾松 + 3.3 杉木 + 1.4 桫木 + 1.1 油茶, 基本为针阔混交林, 林内灌木主要有油茶、桫木、苦槠等乔木幼苗, 林内枯落物层厚 0.12 m, 枯落物载量 5.005 t/hm<sup>2</sup>, 有效可燃物为 6.883 t/hm<sup>2</sup>; 硬阔混交林多以高大乔木为主, 主要树种有丝栗栲、杉木、苦槠和拟赤杨, 其树种组成为: 6 丝栗栲 + 1 杉木 + 1 苦槠 + 1 拟赤杨, 林分郁闭度为 0.79, 平均树高 10.1 m, 平均胸径 20.5 cm, 平均活枝下高 3.7 m, 林枯落物不多, 有效可燃物负荷量为 4.122 t/hm<sup>2</sup>。常绿阔叶林其树种组成为: 5.9 鹿角杜鹃 + 2.1 青冈栎 + 1.3 红楠 + 0.7 东南石栎, 林内灌木种类较多, 包括矩形叶鼠刺、绒毛嫩楠、狗骨柴等。林分郁闭度达 0.86, 林内枯立木和断梢林木占 10%, 地表可燃物载量大, 有效可燃

物达 6.335 t/hm<sup>2</sup>。其他林分如桉木、木荷、柏木和水杉人工林由于林分层次结构简单,地表植被较为单一,可燃物载量均不大,尤其是地表细小可燃物不多。选取有效可燃物进行比较,得到图 1。

从图 1 可以看出,丝栗栲林的有效可燃物载量最大,  $W \geq 7 \text{ t/hm}^2$ , 主要原因是林木受冰雪灾害影响严重, 20% 的林木有严重的断梢、腰折和枯死现象,其中断梢现象更为突出,地表有效可燃物积累较厚,枯枝载量大。马尾松林、刨花楠林、柳杉林和常绿阔叶林可燃物载量相对较少,  $7 \text{ t/hm}^2 > W \geq 5 \text{ t/hm}^2$ , 该类型可燃物特点

为林分均为天然林,林内物种丰富,林分层级结构复杂,地表细小可燃物较多,灌木生长茂盛,该层可燃物载量丰富。另外,桉木、木荷、柏木和水杉人工林,以及硬阔混交林和鹿角杜鹃林可燃物载量小,  $W < 5 \text{ t/hm}^2$ , 该类林分主要是人工林和老龄天然林,林分自身代谢速度慢,凋落物较少,地表有效可燃物载量不大。

3.1.2 可燃物理化性质对比 通过林火室内实验,可以得出各种可燃物类型的理化性质,分别测定不同类型小枝和树叶的灰分、热值等性质,并求取平均值,得到以下数据:

表 2 可燃物理化性质对比

Tab. 2 Contrast physical and chemical properties of fuels

可燃物类型 Fuel types	小枝灰分/% Ash content	小枝热值/(kJ·g <sup>-1</sup> ) Calorific value	叶抽提物/% Extractive	叶粗纤维/% Crude fiber
1	1.80	21.158	6.86	29.70
2	4.01	20.691	4.61	44.62
3	1.99	19.936	4.13	32.98
4	4.76	20.173	1.56	45.60
5	0.48	21.055	1.85	47.93
6	1.87	20.085	1.97	42.49
7	3.86	17.973	1.34	27.88
8	1.32	21.085	8.52	33.44
9	10.46	18.542	2.12	31.43
10	9.69	18.993	2.34	43.54
11	1.97	19.862	1.38	50.07

1 为马尾松天然林( Natural forest of *Pinus massoniana* Lamb) 2 为刨花楠天然林( Natural forest of *Machilus pauhoi* kaneh) 3 为柳杉纯林( *Cryptomeria fortune* forest) 4 为丝栗栲天然林( Natural forest of *Castanopsis rargesn*) 5 为桉木人工林( The planted forest of *Alnus cremastogyne* Burk.) 6 为木荷人工林( The planted forest of *Schima superba* Gardn et Champ) 7 为硬阔混交林( Hard mixed forest) 8 为柏木人工林( The planted forest of *Cupressus funebris*) 9 为鹿角杜鹃天然林( Natural forest of *Rhododendron latoucheae* Franch.) 10 为常绿阔叶林( Evergreen broadleaf forest) 11 为水杉人工林( The planted forest of *Metasequoia glyptostroboides*)。

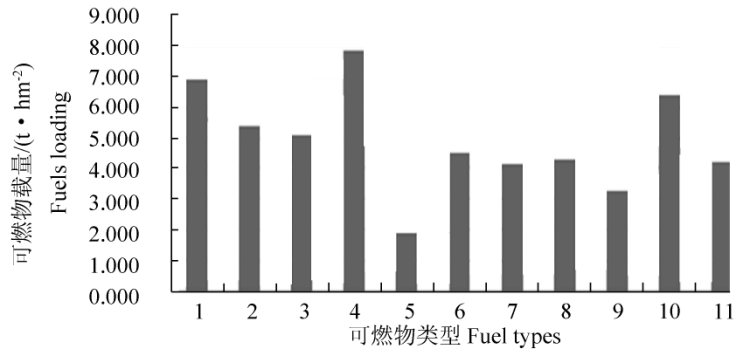


图 1 不同植被类型有效可燃物载量  
Fig. 1 The effective fuels loading of different fuel types

抽提物质量分数的大小是可燃物易燃性的重要指标。抽提物质量分数 <3% 时为低含量; 3% ≤ 抽提物质量分数 <6% 时为中含量; 抽提物质量分数 ≥6% 时为高含量<sup>[1]</sup>。由表 2 可以看出, 针叶树的抽提物含量相对较高, 都属于易燃可燃物。

灰分质量分数是指可燃物中的矿物质的含量, 可大大降低火焰的活动, 对能量的释放起抑制作用, 因此热值与灰分质量分数成反比, 灰分质量分数越低, 热值越高。一般情况下, 可燃物灰分质量分数 <5% 时为低灰分含量; 5 ≤ 灰分质量分数 <10% 时为中灰分含量; 灰分质量分数 ≥10% 时为高灰分含量<sup>[1]</sup>。由表 2 可以看出, 马尾松、柏木、柳杉、水杉这些针叶林灰分含量较低, 刨花楠、丝栗栲、硬阔混交林和鹿角杜鹃林的平均灰分含量较高。

纤维素是可燃物最基本的成分, 对提高可燃物燃烧性有积极作用, 纤维素含量高, 会使燃烧物持续火力增强。因而, 纤维素含量的高低对可燃物林火行为的发展起到重要作用。由表 2 可以看出, 水杉粗纤维含量最高, 落叶阔叶林粗纤维含量较低, 常绿阔叶林粗纤维含量较高。

可燃物的各种理化性质并不是相互孤立的, 其物理性质和化学成分相互作用, 形成了树种的各种属性。基于 SPSS18.0 对可燃物属性值进行相关性分析和显著性检验, 根据相关系数, 确定具有相关性的理化性质变量, 为理化性质的进一步定量研究奠定基础(表 3)。表 3 是各属性相关分析的系数矩阵, Pearson 相关性的数值表示变量间的相关系数。

表 3 各属性相关分析系数矩阵

Tab. 3 The correlation coefficient matrix for each attribute

理化性质 Physical and chemical properties		抽提物含量 Extractive	灰分含量 Ash content	热值 Heat value	粗纤维 Crude fiber
抽提物含量 Extractive	相关性	1	-0.317	0.603*	-0.484
	显著性(双侧)		0.342	0.050	0.132
	N	11	11	11	11
灰分含量 Ash content	相关性	-0.317	1	-0.666*	0.020
	显著性(双侧)	0.342		0.025	0.953
	N	11	11	11	11
热值 Heat value	相关性	0.603*	-0.666*	1	0.223
	显著性(双侧)	0.050	0.025		0.510
	N	11	11	11	11
粗纤维 Crude fiber	相关性	-0.484	0.020	0.223	1
	显著性(双侧)	0.132	0.953	0.510	
	N	11	11	11	11

在 0.05 水平(双侧)上显著相关。Significantly related at 0.05 level( double) .

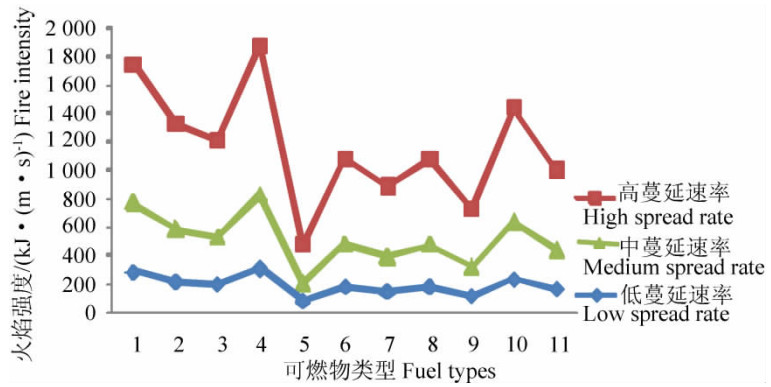
由此得出, 可燃物热值与抽提物含量、灰分的 Pearson 相关性系数分别为 0.603 和 -0.666, 呈显著性相关。抽提物含量与热值呈正相关, 主要原因是抽提物本身热值较高, 有助于燃烧; 灰分含量与热值呈负相关, 主要原因是灰分主要由矿物质组成, 在燃烧释放能量的过程中起到抑制作用。

### 3.2 可燃物林火行为分析

林火行为是林火发生、发展, 直至熄灭的全过程中着火、蔓延、能量释放、火强度、火灾种类等特征的综合<sup>[20]</sup>。由于火行为受可燃物、火环境(气象、地形和植被)和火源条件的制约和控制, 在林火发生现场一般具有一定的复杂性和多元性。火行为通常由林火蔓延速率、火强度和火焰长度等指标来表示<sup>[21]</sup>。

3.2.1 不同林火蔓延速率条件下火强度分析 林火蔓延速率是指森林可燃物燃烧时火焰在单位时间内向前蔓延的距离, 单位是 ft/min、m/min 等。蔓延速度是林火行为的重要指标之一, 也是林火行为的核心指标<sup>[22]</sup>。林火蔓延速率受天气、地形等因素影响, 现实火场表现较为复杂。假设火场风速为 0 m/min, 坡度为 0, 林火蔓延速率与当地年平均风速和最大平均风速相等, 则可以通过 Rothermel 模型

计算出火强度和火焰长度大小, 为林火行为分析提供依据。分别选取林火蔓延速率为 7.2 m/min 为高林火蔓延速率, 3.2 m/min 为中林火蔓延速率, 1.2 m/min 为低林火蔓延速率, 得出不同速率条件下火强度曲线图如下: 林火强度变化幅度一般为 20 ~ 100 000 kJ/(m · s), 与气象条件关系紧密, 在持续多年干旱少雨的原始林区一旦发生森林火灾, 高火强度林火导致扑火人员很难接近火场, 同时会烧死大部分森林植物。在森林防火、扑火和用火过程中, 常将林火划分为不同的火强度等级, 350 ~ 750 kJ/(m · s) 为低强度火, 750 ~ 3 500 kJ/(m · s) 为中强度火, >3 500 kJ/(m · s) 为高强度火<sup>[1]</sup>。



1 为马尾松天然林 (Natural forest of *Pinus massoniana* Lamb) 2 为刨花楠天然林 (Natural forest of *Machilus pauhoi* Kaneh) 3 为柳杉纯林 (*Cryptomeria fortunei* forest) 4 为丝栗栲天然林 (Natural forest of *Castanopsis rargesi*) 5 为桧木人工林 (The planted forest of *Alnus cremastogyne* Burk.) 6 为木荷人工林 (The planted forest of *Schima superba* Gardn et Champ) 7 为硬阔混交林 (Hard mixed forest) 8 为柏木人工林 (The planted forest of *Cupressus funebris*) 9 为鹿角杜鹃天然林 (Natural forest of *Rhododendron latoucheae* Franch.) 10 为常绿阔叶林 (Evergreen broadleaf forest) 11 为水杉人工林 (The planted forest of *Metasequoia glyptostroboides*)。

图 2 各类可燃物类型不同蔓延速率条件下火强度

Fig. 2 The fire intensity of each fule types in different fule spread rate

从图 2 可以看出, 当林火蔓延速率为 1.2 m/min 时, 各类可燃物类型火强度均低于 350 kJ/(m · s); 当林火蔓延速率为 3.2 m/min 时, 只有马尾松天然林和丝栗栲林的火强度超过 750 kJ/(m · s), 其他森林类型火强度均较低, 尤其是桧木人工林、木荷人工林、硬阔混交林和鹿角杜鹃人工林最低。这些林内郁闭度较高, 可燃物载量较少, 并且从树种可燃物理化性质来看, 均属于抗火性较强的树种, 所以在发生林火时火强度不高。当林火蔓延速率与当地最大平均风速相同, 为 7.2 m/min 时, 各类可燃物类型火强度差异明显。除桧木人工林和鹿角杜鹃天然林火强度 < 750 kJ/(m · s), 为低强度火之外, 其他各类可燃物均 >750 kJ/(m · s), 为中高强度火。

3.2.2 不同林火蔓延速率条件下火焰长度分析 火焰长度指一个蔓延地表火火头内火焰长度, 即从活动的燃烧区的中点到火焰的平均尖端的距离<sup>[24]</sup> (图 3)。在平坦野地和无风的情况下, 火焰的长度可通过照片观测, 但在斜坡或有风的情况下, 火焰长度的较难测量。

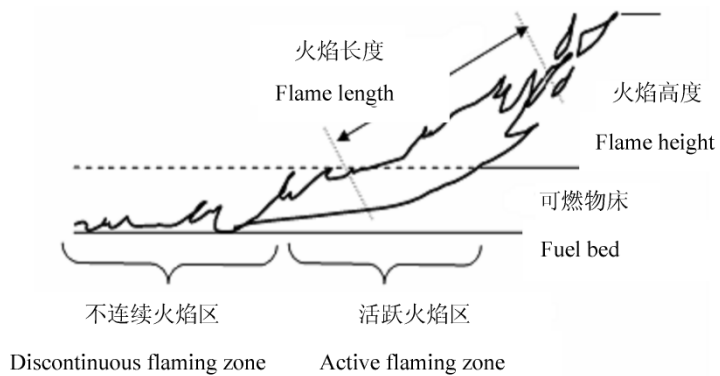


图 3 火焰长度示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Flame length

火焰长度一般可以通过火强度来计算火焰长度。火线强度在 3 500 kJ/(m · s) 以下, 火焰高度低于 3.5 m, 火焰长度低于 4.9 m 一般为中低强度火; 当火焰长度大于 4.9 m, 且可燃物载量较大, 连续性水平较大时容易发展为高强度火。同上述火强度计算方法一样, 分别选取林火蔓延速率为 7.2 m/min、3.2 m/min 和 1.2 m/min 为高、中、低林火蔓延速率, 得出不同速率条件下火焰长度曲线图见图 4。

从图中可以看出, 火焰长度与可燃物载量和火强度都呈正相关。当林火蔓延速率为 1.2 m/min 时, 火焰长度都 <4 m; 当林火蔓延速率为 3.2 m/min 时, 马尾松天然林和丝栗栲天然林的火焰强度均

超过 5 m ,其他各类人工林火焰长度较小 ,但是天然林火焰长度普遍较大。当林火蔓延速率随着最大风速达到最大值 7.2 m/min 时 ,各可燃物类型火焰长度均大幅增加 ,其中 ,马尾松天然林、刨花楠天然林、柳杉纯林、丝栗栲天然林和常绿阔叶林火焰长度均超过 6 m ,桉木人工林火焰长度最小 ,仅为丝栗栲天然林的 1/2 ,其他各种人工林的火焰长度介于 5 ~ 6 m ,具有一定的相似性。

#### 4 结论与讨论

本研究通过对江西大岗山地区 11 种森林类型可燃物的调查分析 ,对林火蔓延速率、火强度和火焰长度这几种林火行为指标进行了计算 ,得出以下结论:

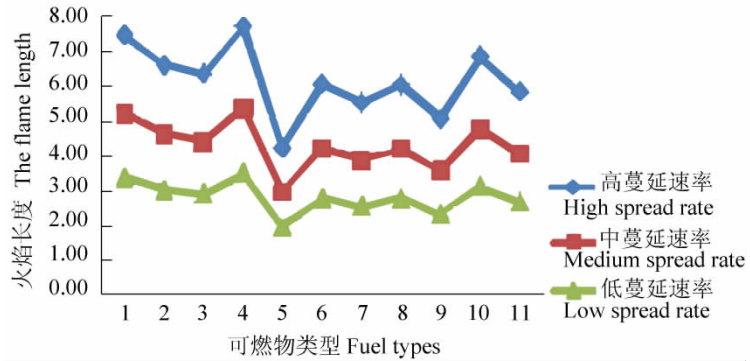
(1) 就可燃物载量分布情况来看 ,各类天然林 ,如马尾松、刨花楠、丝栗栲等可燃物类型地表可燃物载量较大 ,火险隐患较高;木荷、桉木、柏木和水杉等人工林可燃物载量小 ,火险隐患较低。虽然南方气候湿润 ,森林火灾发生几率小 ,但不排除个别极端干旱天气年份连续存在的可能性 ,特别是在经历了导致可燃物大量积累的自然冰冻雨雪灾害之后 ,如果再遭遇连年高温少雨天气 ,容易形成灾害叠加效应 ,导致森林火灾发生概率增加。

(2) 从林火行为的计算结果来看 ,当林火蔓延速率随着风速和坡度增加而提高时 ,火线强度和火焰长度这两个火行为指标均不断增大。通过对比发现 ,天然林火行为指标大于人工林 ,针叶林火行为指标大于阔叶林 ,纯林火行为指标大于混交林 ,落叶阔叶林火行为指标大于常绿阔叶林。马尾松天然林作为大岗山地区针叶林的典型树种 ,由于地表可燃物载量大 ,可燃物粗脂肪含量高 ,发生林火时蔓延速率较快 ,火强度大;而处于中龄林的桉木、木荷和水杉人工林正好相反 ,可燃物载量和粗脂肪含量都较小 ,林火很难蔓延成高强度火。

(3) 林火行为状况的预测预报 ,是森林防火灭火的重点。在防火期 ,及时准确地预测火灾的发生蔓延状况及趋势 ,对于有效组织防火灭火工作、减少火灾损失具有重要意义。大岗山地区由于山区交通不便 ,林内坡度较大 ,预防和扑救森林火灾的难度很大。天然林在特殊天气条件下有可能发生森林火灾 ,低强度地表火会很容易上升为高强度的树冠火 ,届时火势将很难控制 ,可采取开辟防火隔离带等办法灭火。森林防火重在可燃物管理 ,在天然林区可及时清理倒木、枯立木和大量枯枝 ,在条件允许的情况下可在非防火期进行适当的计划点烧。另外 ,要在平时就做好营林防火工作 ,利用当地木荷、水杉等抗火耐火性较强的树种建设防火林带 ,并通过卫生伐、间伐等营林方式改造林分 ,防止林火发生 ,减缓林火蔓延。

#### 参考文献:

[1]胡海清 ,牛树奎 ,王得祥 ,等. 林火生态与管理 [M]. 北京: 中国林业出版社 2005: 72 - 81.  
 [2]Albini F A. Wildland fires [J]. American Scientist ,1984( 72) : 590 - 597.  
 [3]王明玉 ,李涛 ,任云卯 ,等. 森林火行为与特殊火行为研究进展 [J]. 世界林业研究 2009 22( 2) : 45 - 49.  
 [4]Rothmel R C , Deeming J E. Measuring and interpreting fire behavior for correlation with fire effects [R]. Forest Service General Technical Report INT - 93. Ogden , UT: USDA Forest Service , Intermountain Forest and Range Experiment Station ,



1 为马尾松天然林 ( Natural forest of *Pinus massoniana* Lamb) 2 为刨花楠天然林 ( Natural forest of *Machilus pauhoi* Kaneh) 3 为柳杉纯林 ( *Cryptomeria fortune* forest) 4 为丝栗栲天然林 ( Natural forest of *Castanopsis rargesn*) 5 为桉木人工林 ( The planted forest of *Alnus cremastogyne* Burk.) 6 为木荷人工林 ( The planted forest of *Schima superba* Gardn et Champ) 7 为硬阔混交林 ( Hard mixed forest) 8 为柏木人工林 ( The planted forest of *Cupressus funebris*) 9 为鹿角杜鹃天然林 ( Natural forest of *Rhododendron latoucheae* Franch.) 10 为常绿阔叶林 ( Evergreen broadleaf forest) 11 为水杉人工林 ( The planted forest of *Metasequoia glyptostroboides*) 。

图 4 各类可燃物类型不同蔓延速率条件下火焰强度

Fig. 4 The fire length of each fule types in different fule spread rate



- 1980: 2 - 3.
- [5] Andrews P L. Behave: fire behavior prediction and fuel modeling system: BURN subsystem , part 1 [R]. USDA Forest Service , Intermountain Forest and Range Experiment Station , General Technical Report INT - 194 ,1986: 6 - 10.
- [6] Andrews P L. Behave fire behavior prediction and fuel modeling systems: BURN subsystem ,Part 2 [R]. USDA Forest Service Technical Report INT ,1989: 2 - 27.
- [7] 李世友, 张桥蓉, 马爱丽, 等. 6 种针叶树活枝叶在森林防火戒严期的燃烧性比较 [J]. 安徽农业大学学报, 2009, 36 (2): 178 - 183.
- [8] 张敏, 刘东. 长白山林区落叶松林可燃物模型及火行为 [J]. 自然灾害学报, 2007, 16(2): 127 - 132.
- [9] 孙科辉, 肖金香, 冯敏玉, 等. 江西森林火灾与火险天气分析及综合预防技术措施 [J]. 江西农业大学学报, 2004, 26 (3): 394 - 398.
- [10] 江西省减灾委员会办公室. 江西省 2007 年 1—12 月自然灾害公报(摘录) [J]. 气象与减灾研究, 2008, 31(1): 2 - 5.
- [11] 陈瑛, 牛树奎, 赵秀海. 九连山常绿阔叶林冻雨灾害后林分的受损与恢复 [J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(6): 20 - 34.
- [12] 马向前, 王兵, 郭浩, 等. 江西大岗山森林生态系统健康研究 [J]. 江西农业大学学报, 2008, 30(1): 59 - 63.
- [13] 王兵, 崔向慧, 李海静, 等. 大岗山森林生态站区气象要素分析 [J]. 林业科学研究, 2002, 15(6): 693 - 699.
- [14] 李少宁, 王兵, 郭浩, 等. 大岗山森林生态系统服务功能及其价值评估 [J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(6): 58 - 64.
- [15] 王明玉, 舒立福, 赵凤君, 等. 北京西山可燃物特点及潜在火行为 [J]. 林业科学, 2010, 46(1): 84 - 90.
- [16] 贺红士, 常禹, 胡远满, 等. 森林可燃物及其管理的研究进展与展望 [J]. 植物生态学报, 2010(6): 741 - 752.
- [17] Rothermel R C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels [R]. General Technical Report INT - 143. Ogden , UT: USDA Forest Service Intermountain Forest and Range Experiment Station ,1972: 1 - 50.
- [18] Byram G M. Combustion of forest fuels [M]//Davis K P. Forest fire: control and use. New York: McGraw - Hill Book Company ,1959: 1 - 30.
- [19] Byram. Evaluation of a passive flame - height sensor to estimate forest fire intensity [C]. USDA forest service pacific Northwest forest and range experiment station research Note PRW - 390 ,1981: 13
- [20] Andrews P L. BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modeling system BURN subsystem [C]. part 1. GTR - INT - 194 ,USDA Forest Service ,1986: 1 - 134.
- [21] Andrews P L. Behave fire behavior prediction and fuel load - ellirig systems BURN subsystem [R]. USDA Forest Service Technical Report INT ,1988(1): 194 - 199.
- [22] Scott J H. Nomographs for estimating surface fire behavior characteristics [R]. General Technical Report INT - 192. Fort Collins ,CO: U S Department of Agriculture , Forest Service , Rocky Mountain Research Station ,2007: 1 - 129.
- [23] 王秋华. 森林火灾燃烧过程中的火行为研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.