

# 桂西南松栎林火行为研究及碳排放计量

潘登<sup>1,2</sup> 张合平<sup>1,2</sup> 潘高<sup>1,2</sup> 易浪<sup>1,2</sup>

(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:** 利用桂西南地区不同类型马尾松和栎林的冠层可燃物、地表可燃物、立地条件和气候因子等调查数据, 运用 Behave Plus 5.0.5 和 Consume 3.0 模型, 分析不同林型林火行为趋势, 并计算各林分过火后可燃物消耗量和含碳类气体排放量。结果表明: 不同林分可燃物载量分布差异显著, 马尾松纯林在风速大于  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 极易由地表火转化为树冠火, 马尾松-红锥-潺槁树林在风速大于  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 极易转化为树冠火, 马尾松-石栎林、石栎-马尾松林和大叶栎纯林可形成地表火, 但不易发生树冠火。研究可为进一步了解森林火灾对区域气候变化的影响提供基础数据。

**关键词:** 可燃物载量; BehavePlus; 林火行为; 碳排放; Consume

中图分类号: S762.1; X9

文献标志码: A

## Fire behavior and carbon emission of Pine Oak Forests in Southwest Guangxi of China

PAN Deng<sup>1,2</sup> ZHANG Heping<sup>1,2</sup> PAN Gao<sup>1,2</sup> YI Lang<sup>1,2</sup>

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

**Abstract:** Two methods which are Behave plus 5.0.5 and Consume 3.0 were applied to establish fire behavior prediction and carbon emission for Southwest Guangxi. The fuel loading spatial distribution, site conditions and climatic factors collected in southern Guangxi were used in a case study to simulate different forest fire behavior tendency, fuel consumption and carbon emission by using BehavePlus model and Consume model, respectively. In different stands, there existed significant difference in the fuel loading, Pinus massoniana forest not only are inclined to lead to surface fire, but also, the surface fire could be easily transformed into crown fire when wind speed over  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , and Pinus massoniana-Castanopsis hystrix-Litsea glutinosa forest could be easily transformed into crown fire when wind speed over  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , while Pinus massoniana-Lithocarpus pasania, Lithocarpus pasania-Pinus massoniana, and Quercus griffithii forests are likely to lead to surface fire but not crown fire. This study would provide some basic data for the influence of regional climatic variation caused by forest fire.

**Key words:** fuel loading; BehavePlus; fire behavior; carbon emission; Consume

收稿日期: 2016-10-24; 修回日期: 2017-03-16

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)

**Supported by:** Special Fund for Research on Public Interests, State Forestry Administration (201204512); Scientific Innovation Fund for Graduate of Central South University of Forestry and Technology (CX2015A03); Hunan Provincial Innovation Foundation for Postgraduate (CX2015B287)

作者简介: 潘登(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事林火生态学研究. E-mail: lxypd@126.com

通讯作者: 张合平(1962-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事森林生态学研究. E-mail: hepzhang@sina.com

全球森林生态系统碳储量占整个陆地生态系统碳储量的三分之二,其碳吸收能力占陆地净初级生产力的 60%,森林生态系统动态在很大程度上影响着陆地生态系统的稳定性。林火作为影响森林生态系统的重要干扰因子之一,在林分更新、林木生长和生物多样性保育等方面有着重要作用。随着全球气候变暖和极端天气频发,森林火灾强度、空间分布和火周期已与上世纪出现明显差异<sup>[1]</sup>。对森林火行为和碳排放的精准描述,有助于林火管理机构制定可燃物处理计划,保障森林生态系统稳定<sup>[2]</sup>。美国、加拿大对林火研究起步较早,研究成果应用性强<sup>[3-4]</sup>,并提出了一系列可燃物处理措施<sup>[5-6]</sup>;国内在森林可燃物组成、结构、属性和负载量方面也进行了一定探索<sup>[7-12]</sup>,但目前尚未开发出可靠的森林可燃物模型及林火行为评估系统,对于国内的森林潜在火行为的评估仍需借鉴国外系统,通过本地修正后进行预测<sup>[13]</sup>。

全球每年大约有 3.9 Pg 碳通过生物质燃烧排放到大气中,相当于人类每年化石燃料燃烧排放量的 70%<sup>[14]</sup>,所排放碳 90% 以 CO<sub>2</sub> 和 CO 的形式释放<sup>[15]</sup>。森林火灾可燃物燃烧所排放的大量温室气体可导致植被和土壤碳储量的动态变化<sup>[16]</sup>,对区域碳平衡产生重大影响。精确计量森林火灾直接碳排放碳量,对正确评价火干扰在生态系统碳循环和碳平衡中的作用有重要意义。

马尾松作为我国南方地区典型的针叶树种,分布极广泛,因马尾松的油脂含量高,属易燃树种,本研究结合样地可燃物特征,基于 BehavePlus 和 Consume 模型对松栎林火行为及碳排放进行预测,模拟不同风速下各林型火势及过火后可燃物消耗量和含碳气体排放量,为林火管理策略的制定提供参考。

BehavePlus 火行为模拟系统由美国北方林火实验室开发,内置 55 个可燃物标准模型,通过输入样地内可燃物状态、立地和气候条件等参数,输出地表火蔓延速度、火线强度、树冠火焰高度及蔓延速度、主动树冠火阈值、火类型等结果,在林火管理及火风险评估等方面应用广泛。Consume 模型由美国林署开发,通过与太平洋野火科学实验室开发的可燃物特征分类系统(Fuel Characteristics Classification System)进行数据交汇,可提供 458 个可燃物床数据集,通过输入可燃物特征、林火格局、气象条件等信息,可计算可燃物燃烧的碳排放量,相比于其他碳排放模型,Consume 的优势在于输入参数相对简单,数据采集可行性高,在过火区和森林可燃物载量空间数据相对缺乏的地区比较适宜。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区域概况

南宁位处北回归线南侧,属南亚热带季风气候,年均气温 21.6 °C,年均降雨量 1 304.2 mm,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。老虎岭位于南宁市北郊,范围 108°19'50" E ~ 108°20'3" E, 22°55'49" N ~ 22°56'9" N,海拔 135 ~ 217 m,坡度 0° ~ 40°。根据实地踏查,马尾松纯林处于 U 形地带,东西侧为山坡,坡向为东南,林内空气流动较缓,风速修正因子为 0.3,马尾松-石栎混交林和石栎-马尾松混交林所处为山顶台地区域,坡向东北,西面空旷,风速较大,风速修正因子为 3.5,马尾松-红锥-潺槁树林所处为山体中部,上坡位,坡向为东,林内存在林窗,风速较大,风速修正因子为 2.5,大叶栎纯林所处地形坡度较大,坡向为东,坡度 30°,东南面有林窗,风速修正因子为 1.8。

### 1.2 标准地设置与可燃物调查

#### 1.2.1 标准地设置与林分特征调查

2014 年 4 ~ 5 月,在老虎岭区域内,选取马尾松(*Pinus massoniana*)纯林(I)、马尾松-石栎(*Lithocarpus pasania*)林(II)、石栎-马尾松林(III)、马尾松-红锥(*Castanopsis hystrix*)-潺槁树(*Litsea glutinosa*)林(IV)、大叶栎(*Quercus griffithii*)纯林(V)5 类林型为研究对象。分别在每个林型内选取人为干扰较少的区域各设置 4 个 20 m × 20 m 标准地,同时每个样地内根据对角线设置 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,记录标准地的地理坐标、海拔、坡度、坡向、郁闭度、物种名称、胸径、树高等林分特征(见表 1)。

#### 1.2.2 乔、灌层和非木质可燃物调查

依据林业行业标准 LY/T 1952—2011 划分乔灌木,乔木(DBH > 1 cm)每木检尺,记录树高、冠基高。模拟过程中输入的林冠高度等数据为 3 ~ 6 株(纯林 3 株,混交林 4 ~ 6 株)标准木的平均值,冠基高是指生长有

足够“林冠有效可燃物”的最低高度。林冠有效可燃物指能将地表火垂直传播上林冠的枝条,通常包含树叶、直径3 mm以下的活树枝及直径6 mm以下死树枝。记录2 m×2 m样方内所有灌木(DBH≤1 cm)高度和冠幅,用全部收获法割取灌木,带回实验室。灌木层有效可燃物包括灌木活体和直径6 mm以下的死树枝,灌木可燃物床高度取其平均值。收获1 m×1 m样方内所有草本、藤本和蕨类的地上部分,测量干重及含水率,推算单位面积非木质可燃物载量。

表1 样地概况  
Table 1 General Situation of sampling plots

林型编号	海拔/m	坡度/°	坡向	郁闭度	树高/m	胸径/cm	林分组成	主要灌木
I	135	3	SE	90	15.5	20.8	10松	三叉苦、豺皮樟、潺槁树
II	180	10	NE	85	13.5	18.3	7松3栎	石栎、鸭脚木、红锥
III	182	10	NE	85	14.5	18.4	8栎2松-锥	石栎、鸭脚木、红锥
IV	211	15	E	65	16	24	9松+锥-潺	潺槁树、岗铃、野花椒
V	117	35	E	85	14	23.7	10栎	红锥、酸味子、乌药

### 1.2.3 林下可燃物调查

林下可燃物主要由凋落物、腐殖质和倒木质构成。凋落物作为生物组分,主要包括尚未分解的枝、草、藤、叶、球果,调查20 m×20 m样方内凋落物的平均深度和盖度,记录凋落物组分类型;调查0.5 m×0.5 m样方内腐殖质的厚度,取其平均值为标准地内腐殖质的平均厚度,收获5个小样方内腐殖质,带回实验室;倒木质可燃物指与植物活体分离,掉落在可燃物床、与地面距离小于2 m的木质可燃物<sup>[17]</sup>。收获2 m×2 m样方内倒木质可燃物,带回实验室,将倒木质可燃物按径级(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)<sup>[18]</sup>,测量每个组分可燃物的载量,由小样方内的载量值推算单位面积内各组分可燃物载量。

所有样品带回实验室后在105℃下30 min后,80℃烘至恒重,计算含水率(见表2)。倒木质可燃物、非木质可燃物和乔灌可燃物的“熄灭含水率”分别为25%、120%和180%<sup>[19]</sup>。

### 1.2.4 数据处理

运用BehavePlus v5.0.5计算不同林型的林火行为指标数值。利用Consume v3.0计算可燃物消耗量及含碳气体排放量。可燃物载量数据运用SPSS 18.0进行显著性检验,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)比较不同组间的差异,显著性水平设为 $\alpha=0.05$ 。使用SigmaPlot 12.5绘图。

## 2 林型参数和林火行为评估

### 2.1 各林型可燃物特征参数

由表3可知,不同林型内不同时滞可燃物载量特征差异显著,其影响可以在不同林型火行为特征的差异中反映出来。地表层可燃物可影响地表火的蔓延速率、火焰长度等指标,同时是计算地表火线强度(或长度)阈值的基础,进而可计算地表火向树冠火转化的动力阈强度<sup>[20]</sup>,冠层可燃物是树冠火燃烧和蔓延的物质载体<sup>[21]</sup>,各垂直高度上可燃物载量的分布影响树冠火转化概率、树冠火蔓延速率、树冠火类型等指标参数。

由图1可以看出,各林型的地表可燃物负载量变幅在 $163.46 \times 10^{-3} \sim 202.18 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,林型IV的地表可燃物负载量最大,是因为该林地的郁闭度最低,林内水热条件好,林下灌木和草本较丰富,地表凋落物和腐殖质较多,增大了地表可燃物累计量。地表可燃物负载量最低的是林型I,为 $163.46 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,其余3个林型地表可燃物负载量相近,在 $171.05 \times 10^{-3} \sim 178.77 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

表 2 各林型可燃物含水率

Table 2 Fuel moisture of different forest types

林型编号 Forest Type	I	II	III	IV	V
1 h 可燃物含水率 / %	15	22	22	21	23
10 h 可燃物含水率 / %	16	23	23	22	24
100 h 可燃物含水率 / %	17	24	24	23	26
活木质可燃物含水率 / %	235	102	102	137	155
活草可燃物含水率 / %	182	136	120	141	194
乔木叶片含水率 / %	62	94	98	75	147
腐殖质含水率 / %	80	75	60	70	85

表 3 不同林型可燃物方差分析

Table 3 Variance analysis of different forest types

	平方和	自由度	均方	F	显著性	
1 h 可燃物载量	组间	5.43	4	1.36	3.99	0.021
	组内	5.11	15	0.34		
	总数	10.54	19			
10 h 可燃物载量	组间	0.34	4	0.08	3.65	0.029
	组内	0.34	15	0.02		
	总数	0.68	19			
100 h 可燃物载	组间	0.08	4	0.02	4.86	0.010
	组内	0.06	15	0.00		
	总数	0.14	19			

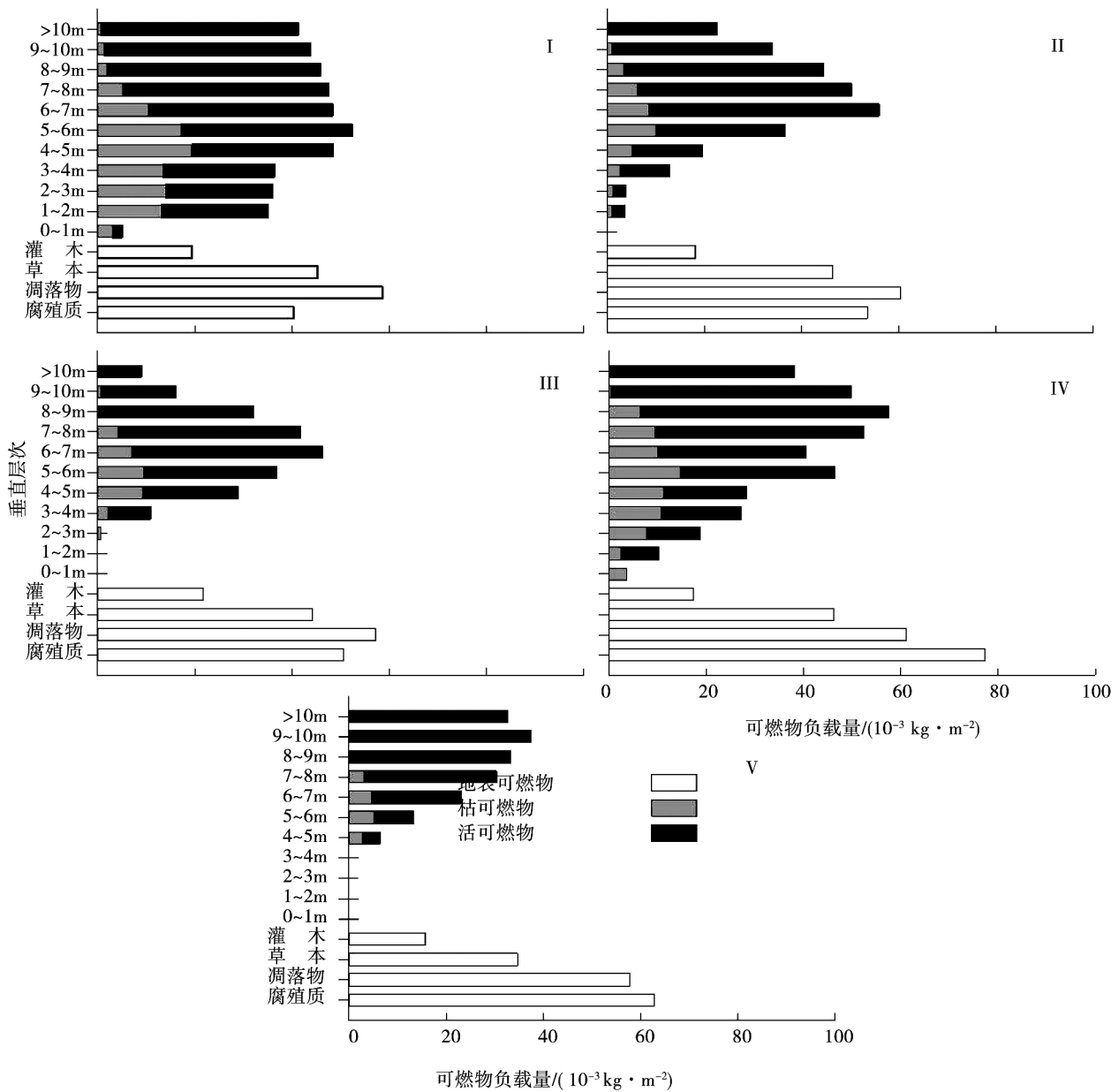


图 1 不同林型可燃物负载量垂直分布

Fig. 1 Vertical distribution of fuel loading in different forest types

各林型的冠层可燃物变幅在  $179.04 \times 10^{-3} \sim 440.04 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 差异较大。林型 I 的冠层可燃物负载量明显大于其余林型, 其冠层可燃物是最小林型的 2.46 倍, 当树冠被引燃时, 将发生高强度、高蔓延速率的树冠火。林型 IV 的冠层可燃物较林型 I 降低了 15.11%, 0~3 m 内可燃物载量为  $32.80 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 与林型 I 同层次相比要低 56.99%, 引燃树冠火概率也低于林型 I。林型 II、III、V 的冠层可燃物载量分别为  $284.60 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $222.83 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $179.04 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 主要集中在 6~7 m 以上, 冠层可燃物梯形结构不完整, 树冠火的转化率均低于 1.0, 非特殊情况(雷击、陨石、人为纵火等)下, 较难转化为树冠火。

林内可燃物垂直分布特征对林火类型和燃烧强度有重大影响, 当可燃物在垂直层次上呈连续性分布时, 林火可由地表火向树冠蔓延, 转化为树冠火, 其连续性越完整, 各层次载量越大, 转化率越高; 如果可燃物呈不连续分布, 则转化率下降, 若转化率低于 1.0, 林火类型通常仅为地表火, 灾后损失相比树冠火要小。由图 1 可以看出, 林型 I、IV 在每个垂直层面都有可燃物分布, 梯形结构完整, 连续性好, 林冠火转化率高, 在风力影响下, 有可能发生树冠火; 林型 II 可燃物在 0~1 m 层有间断, 距离超过其地表火焰阈值, 极难发生树冠火; 林型 III、V 的地表可燃物和冠层可燃物之间有 3~4 m 的间隔, 垂直连续性差, 不利于地表火焰向上蔓延, 因此不会发生树冠火。

### 2.2 林火行为评估

利用 BehavePlus 系统对各林型火行为指标进行预测, 为验证预测效果, 将预测结果与点烧试验结果进行对比, 采用平均相对误差 (Mean Relative Error, MRE) 对林火行为 3 大特征指标 (蔓延速度、火焰长度和火线强度) 的预测精度进行分析。

点烧试验材料来自于各林型地表枯枝落叶层, 点烧床设置为  $2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  尺寸, 点烧床前设置长 2 m 的火源区, 以便火焰蔓延至点烧床时达到“似稳态”, 含水率设 4 个水平: 5%、10%、15% 和 20%, 负载量设置 4 个水平:  $4 \text{ t}/\text{hm}^2$ 、 $5 \text{ t}/\text{hm}^2$ 、 $6 \text{ t}/\text{hm}^2$ 、 $7 \text{ t}/\text{hm}^2$ , 由于 BehavePlus 系统所采用的 Rothermel 模型对于可燃物床层厚度不敏感, 本研究可燃物床厚度设置为恒定值 4 cm。点烧床每 10 cm 放置一个 1 m 标杆, 固定热电偶, 用于测定燃烧过程中可燃物床温度, 燃烧时间用秒表测定; 可燃物含水率用烘箱和快速水分测定仪确定; 可燃物床厚度控制在  $\pm 0.5 \text{ cm}$ , 火环境温度控制在  $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , 空气相对湿度控制在  $\pm 15\%$ , 共进行 90 次点烧试验。

将 BehavePlus 系统模拟结果与室内点烧试验观测结果进行比较, 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

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

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。

将 BehavePlus 系统模拟值设为横坐标, 点烧试验观测值设为纵坐标, 依此绘制散点图, 并建立回归方程, 回归方程趋势线越接近  $y = x$  曲线, 则说明预测效果越好, 由于篇幅所限, 本文仅展示趋势线方程 (见表 4~表 6)。

表 4 各林型林火蔓延速度模拟值与观测值比较

Table 4 Comparison of predicted and observed values of ROS in different forest

林型	回归方程	$R^2$
I	$y = 1.1485x - 0.0522$	0.8616
II	$y = 1.1955x - 0.0554$	0.8823
III	$y = 1.1890x - 0.0829$	0.8501
IV	$y = 1.2559x - 0.0213$	0.9077
V	$y = 1.1812x - 0.0221$	0.9320

表 5 各林型林火火线强度模拟值与观测值比较

Table 5 Comparison of predicted and observed values of fireline intensity in different forest

林型	回归方程	$R^2$
I	$y = 1.3390x + 3.3664$	0.7133
II	$y = 1.3422x + 2.3833$	0.8228
III	$y = 1.3819x - 6.5037$	0.6144
IV	$y = 1.4780x - 5.6542$	0.7755
V	$y = 1.3806x - 3.1959$	0.8264

由回归方程可看出, BehavePlus 系统对于林火蔓延速度的预测效果较好, 各林型平均相对误差分别为 8.55% ( I )、11.35% ( II )、11.26% ( III )、18.39% ( IV ) 和 12.76% ( V )。对于火线强度的预测偏高, 各林型平均相对误差分别为 24.98%、25.08%、25.00%、29.34% 和 24.78%。对于火焰高度的预测在负载量较低时精确度高, 随负载量增加, 预测值偏低, 各林型平均相对误差分别为 7.51%、8.74%、14.07%、26.74% 和 25.06%。所有预测误差均低于 30%, 总体来说拟合效果较好, 可用于评估相关火行为。

表 6 各林型林火火焰高度模拟值与观测值比较  
Table 6 Comparison of predicted and observed values of fire length in different forest types

林型	回归方程	R <sup>2</sup>
I	$y = 1.0802x + 0.0188$	0.3136
II	$y = 1.1168x - 0.0006$	0.6148
III	$y = 0.9686x - 0.0773$	0.3853
IV	$y = 0.8570x - 0.0425$	0.5058
V	$y = 0.8452x - 0.0217$	0.5508

### 3 林火行为及碳排放结果分析

#### 3.1 各林型火行为特征

由表 7 可以看出, 在不考虑风速的情景模型中, 各林型地表火面强度顺序为: IV > II > III > V > I, 与地表火线强度变化趋势一致, 5 种林型的火线强度变化范围为 2 ~ 33 kw · m<sup>-1</sup>, 均属低强度火<sup>[22]</sup>。林型 V 的地表火线强度阈值(3915 kw · m<sup>-1</sup>)和地表火火焰长度阈值(3.5 m)最高, 是由于大叶栎纯林叶片含水率比其他林型树种叶片含水率高, 引燃树冠所需能量相比其他林分高, 且大叶栎林冠基高整体处于较高水平面(5.5 m), 林地内可燃物的垂直分布状态未形成梯状引燃结构, 若地表可燃物床火焰高度不够, 则难以产生被动树冠火; 林型 I、IV 的地表火线强度阈值和火焰高度阈值较低, 是由于其林内冠基高处于较低高度, 且林下灌草生长环境好, 地表可燃物载量丰富, 冠层可燃物与地表可燃物在垂直空间上有较高的重叠, 火焰不需太高即可引燃灌木, 继而燃至树冠; 林型 II、III 的地表火焰阈值处于中等水平, 是因为这 2 种林型冠层可燃物同样有 2 ~ 3 m 的间断, 同样会使火焰向上传播受阻。0 ~ 3 m 高度内的可燃物负载量是决定地表火能否转化为树冠火的关键基础, 虽然林型 II、III 的地表可燃物载量并非最低值, 但由于冠层可燃物连续性较差, 因此只可能发生地表火, 而林型 I、IV 在引燃地表可燃物后, 有可能发生树冠火并迅速蔓延。

表 7 不同林型火行为  
Table 7 Fire behavior of different forest types

林型编号	地表火面强度 / (kw · m <sup>-2</sup> )	地表火线强度 / (kw · m <sup>-1</sup> )	地表火线强度阈值 / (kw · m <sup>-1</sup> )	地表火火焰 长度阈值 /m	树冠火蔓延 速率阈值 / (m · min <sup>-1</sup> )
I	1 771	2	860	1.7	14.3
II	3 746	26	2 277	2.7	11.1
III	3 723	26	1 870	2.5	13.6
IV	4 644	33	382	1.2	10
V	2 636	10	3 915	3.5	7.5

\* 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。

表 8 列出了 8 个受风速影响的火行为参数, 可以看出, 林型 I 在风速达到 15 m · s<sup>-1</sup> 时, 火类型由地表火变为条件树冠火(conditional crown fire), 树冠火线强度达到 10 961 kw · m<sup>-1</sup>, 蔓延速率 11.5 m · min<sup>-1</sup>, 属高强度火, 当风速继续增大时, 其树冠火蔓延速率、火线强度和火焰高度显著增加, 均高于其余 4 种林型, 原因是马尾松纯林树冠层主要可燃物为松针, 富含油脂, 引燃后燃烧效率和所释放热量极高, 在有风天气, 燃烧的松针或屑块可借风势形成“飞火”, 在短时间内形成高强度林火, 由图 2 可以看出, 马尾松纯林产生树冠火的概率会随风力增强而显著增大。林型 II、III 和 IV 的地表火行为参数值差异不大, 整体上略高于其余 2 类林型, 是因为这 3 类林型立地条件(坡度、坡位、海拔等)和各类地表可燃物含水率相似, 使得三者相同风速下表现出的地表火行为变化范围差异不大, 且因混交林内凋落物层载量比纯林(林型 I 和林型 V)的略高, 在发生地表火时, 蔓延速度和火焰高度要高于同一情景下的纯林地表火参数, 3 类混交林树冠火火势顺序大

小为 IV > II > III ,且林型 IV 在风速达到  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  后有一定几率由地表火转化为条件树冠火 ,这与混交林中马尾松所占比例有关:IV (90%) > II (70%) > III (20%) ,因为在同级风速情况下 松针燃烧释放热量要高于栎类叶燃烧所释放热量<sup>[23]</sup> ,且树冠火火焰高度和蔓延速率比地表火火焰高度和蔓延速率更易受风速影响<sup>[24]</sup> 。林型 V 的地表火行为参数整体上略高于林型 I ,而树冠火行为各参数显著低于林型 I ,这是因为在相同风速下 坡度和可燃物含水率是影响地表火蔓延速率和火焰高度的关键因子<sup>[25-26]</sup> ,进而影响地表火线强度大小 ,而树冠火的火线强度和蔓延速度在其他影响因子相似的情况下 ,主要受可燃物燃烧效率影响 ,决定性影响因子的不同 ,导致了二者在火类型表征差异。

表 8 不同风速下各林型火行为参数

Table 8 Fire behavior of different forest types with different wind speed

林型 编号	风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	地表火蔓延 速率最大值/ ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )	地表火线强度/ ( $\text{kw} \cdot \text{m}^{-1}$ )	地表火 焰长度/m	树冠火蔓 延速率/ ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )	树冠火线强度/ ( $\text{kw} \cdot \text{m}^{-1}$ )	树冠火焰 高度/m	是否主动 树冠火	火类型
I	1	0.1	2	0.1	0.5	489	1.7	否	地表火
	3	0.7	2	0.5	1.4	1 336	3.2	否	地表火
	5	1.8	3	1.1	2.6	2 487	4.9	否	地表火
	10	2.2	5	1.6	6.6	6 253	9	否	地表火
	15	3.7	8	2.2	11.5	10 961	13.1	是	条件树冠火
	20	5.4	11	2.7	17.2	16 407	17.2	是	条件树冠火
	25	7.5	15	3.3	23.6	22 477	21.2	是	条件树冠火
II	1	0.4	26	0.3	0.4	374	1.4	否	地表火
	3	0.9	28	0.4	1	1 023	2.7	否	地表火
	5	2.0	30	0.8	1.8	1 905	4.1	否	地表火
	10	2.5	37	1.2	4.5	4 790	7.6	否	地表火
	15	3.9	45	1.7	7.9	8 395	11	否	地表火
	20	6.9	55	2.5	9.6	10 259	12.6	否	地表火
	25	7.8	66	2.5	9.6	10 259	12.6	否	地表火
III	1	0.4	27	0.4	0.3	281	1.1	否	地表火
	3	0.9	29	0.5	1	769	2.2	否	地表火
	5	1.9	31	0.7	1.8	1 432	3.4	否	地表火
	10	2.4	37	1.1	4.5	3 600	6.3	否	地表火
	15	3.8	45	1.4	7.8	6 309	9.1	否	地表火
	20	7.5	55	1.8	9.5	7 643	10.3	否	地表火
	25	7.7	65	1.8	9.5	7 643	10.3	否	地表火
IV	1	0.6	34	0.4	0.4	514	1.7	否	地表火
	3	1.1	35	0.5	1	1 404	3.3	否	地表火
	5	2.0	37	0.5	1.9	2 615	5.1	否	地表火
	10	2.6	45	0.8	4.8	6 573	9.3	否	地表火
	15	5.7	54	1.0	8.5	11 521	13.6	否	地表火
	20	7.8	64	1.5	12.7	17 246	17.8	是	条件树冠火
	25	8.1	76	1.7	14	19 046	19	是	条件树冠火
V	1	0.2	10	0.2	0.2	187	0.9	否	地表火
	3	0.8	11	0.5	0.5	510	1.7	否	地表火
	5	1.8	12	1.1	1	950	2.6	否	地表火
	10	2.3	15	1.7	2.5	2 389	4.8	否	地表火
	15	5.7	19	2.3	3.3	3 134	5.7	否	地表火
	20	6.5	24	2.7	3.3	3 134	5.7	否	地表火
	25	7.7	29	3.3	3.3	3 134	5.7	否	地表火

\* 地表火蔓延速度最大值为地表火顺风蔓延时的速度。

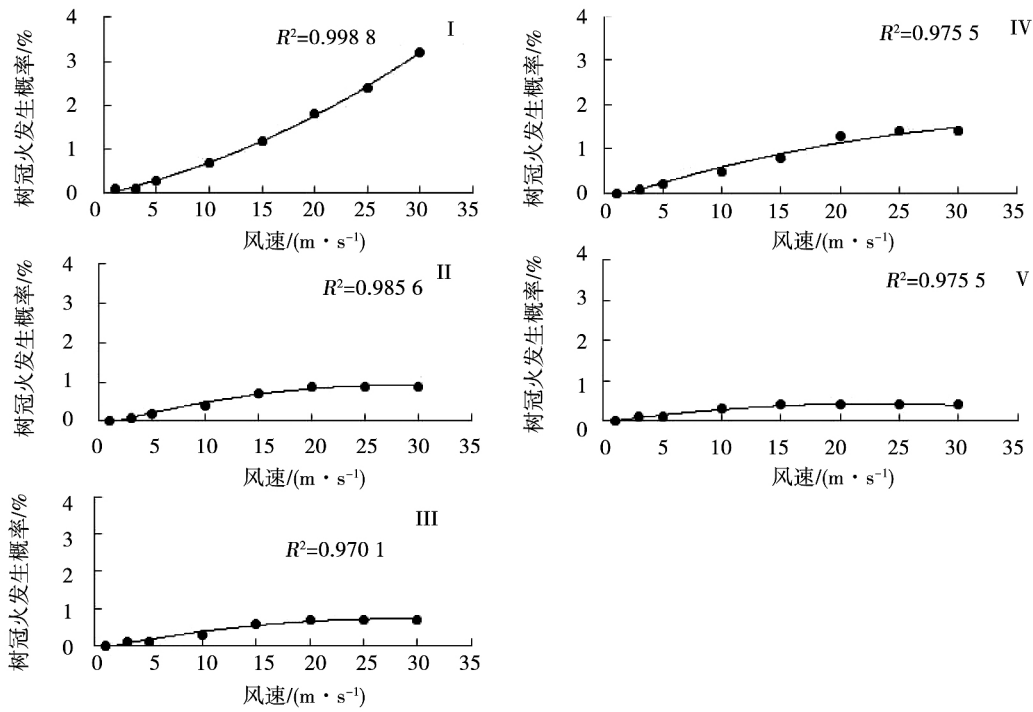


图 2 不同风速下树冠火发生概率

Fig. 2 Active ratio of crown fire with different wind speed

### 3.2 各林型可燃物消耗量及所排放含碳其体量

由图 3 可以看出各林型过火后可燃物的单位面积损失量,可燃物损失总量变化在  $481.65 \sim 237.12 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 差异较大,各林型总损失量大小为:  $I > IV > II > III > V$ , 林型 IV 总损失量为  $474.24 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 仅次于林型 I, 林型 II、III 总损失量较为接近, 分别为  $343.33 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $284.05 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ; 冠层可燃物损失量变化在  $98.8 \sim 350.74 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 林型 I 的冠层可燃物损失量最大, 占其可燃物总损失量的 72.82%, 林型 V 的冠层可燃物总损失量最小, 占其总损失量的 41.67%, 林型 II、III、IV 的占比分别为 63.02%、54.68% 和 49.57%。可燃物消耗率最高的为草本, 各林型草本消耗率均在 90% 以上, 最高的为林型 II (95.57%); 冠层可燃物的消耗率变化在 55.18 ~ 80.01%, 林型 IV 消耗率最高, 林型 I 仅次于林型 IV, 为 79.71%。林型 V 冠层可燃物消耗率最低, 林型 II、III 的冠层可燃物消耗率较为接近, 分别为 65.96% 和 63.18%。总体来看, 各林型燃烧效率大小为:  $IV (82.37\%) > I (79.81\%) > II (74.09\%) > III (71.60\%) > V (67.73\%)$ 。

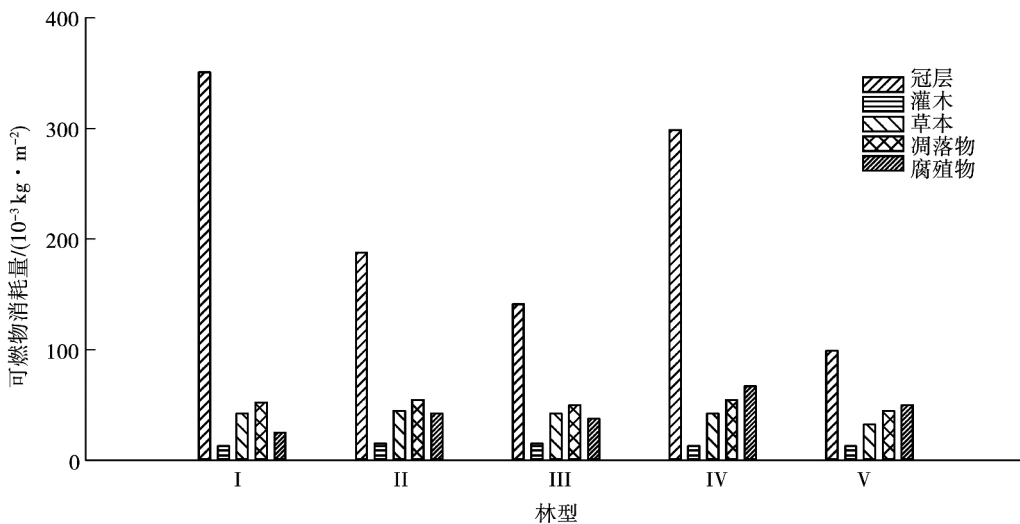


图 3 各林型可燃物燃烧所消耗量 ( $10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )

Fig. 3 Consumption of fuel combustion of different forest types



由图4可以看出,不同林型可燃物燃烧后所排含碳气体量,CO<sub>2</sub>排放量最大,各林型顺序为I > IV > II > III > V,与可燃物总消耗量变化规律一致,是因为在野外环境下,氧气量供给充足,可燃物燃烧时以有焰燃烧为主,CO<sub>2</sub>排放因子较高<sup>[27-28]</sup>,CH<sub>4</sub>和非甲烷烃(non-methane hydrocarbon, NMHC)排放因子较低,排放量远低于CO<sub>2</sub>的排放量,CO排放量稍高于CH<sub>4</sub>和NMHC,是因为在燃烧后期,无焰燃烧所占比例上升,从而提高了CO的排放因子,同时,含水率较多的腐殖质燃烧时,主要排放气体也以CO为主。

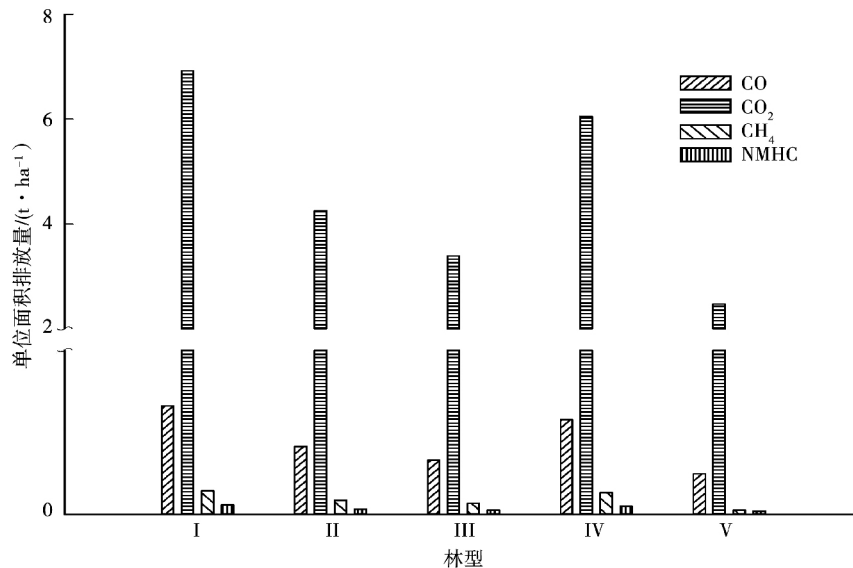


图4 各林型可燃物燃烧所排放主要含碳气体量(t · ha<sup>-1</sup>)

Fig. 4 Main carbonaceous gases emission from the fuel burning of different forest types

## 4 讨论

广西壮族自治区南宁地区处于亚热带季风区,每年4月中旬后气温会迅速升高,降雨量逐渐减少,随着林下可燃物载量的累积,林火发生概率增大,对松栎林的林火行为及可燃物燃烧碳排放量进行预测,可为森林经营、可燃物调控提供参考依据。经分析,南宁地区松栎林各林型间可燃物载量具有显著差异,地表可燃物、各高度冠层可燃物载量分布情况不同,导致各林型燃烧过程和燃烧强度也明显不同,进而形成不同的林火类型和灾后损失。冠层可燃物的垂直分布连续性与树冠火发生有极大联系,不同林型发生树冠火的概率大小为: I > IV > II > III > V,表明针叶纯林发生火灾的概率大于针阔混交林,而阔叶纯林发生火灾的概率最低,这与 Frank<sup>[29]</sup>和胡海清<sup>[30]</sup>的研究结果一致,本研究中,针叶纯林发生树冠火的概率最高为针阔混交林的4.57倍,与田晓瑞等<sup>[31]</sup>的研究结论有差异,这可能与森林经营时人为干扰(清灌除草、修枝、耙耨松针等)导致火前林冠组成及林下植被覆盖发生变化有关。

采用表面积加权算法和载量加权算法对林火主要行为特征进行预测,并将预测结果与点烧试验观测结果进行对比,发现预测效果较好,平均相对误差均控制在30%以内,其中包括试验环境自身误差干扰。不同风速情景下的模拟结果显示,随风速增大,地表火和树冠火强度均随之增强,表明风速对各林型林火蔓延均起到增益效果<sup>[32-33]</sup>,但部分林型在风速增大到一定值后,树冠火行为参数不再增加,是因为树冠火蔓延除了受气候因素,还与树种燃烧特性、冠层可燃物载量分布有关系<sup>[34]</sup>,而林型I相比于林型V,在风速增加情况下,树冠火线强度和火焰高度增幅显著,而地表火线强度和火焰高度略低,是因为林型V所处坡度在30°左右,其地表可燃物燃烧效率虽低于林型I,但借由地势影响,地表火强度可达到更高值,由此可见,在其他(林龄、海拔、树高、经营措施等)条件相近时,坡度因素对于地表火行为的影响要高于风因子,这与 Silvani等<sup>[35]</sup>和武金模<sup>[36]</sup>的研究结果相符。

火强度是影响燃烧效率和排放因子的重要因素,从而可影响森林火灾的碳排放量和各排放气体的种类和比例,通过 Consume 软件进行模拟发现,各林型燃烧后所消耗可燃物量最低为67.73%,最高可达到82.37%,主要排放含碳气体为CO<sub>2</sub>,占气体总排放量的96%以上。由此可预见,南宁地区松栎林发生森林火

灾后直接排放的含碳气体将对区域碳平衡造成重要影响,研究结果可为进一步了解森林火灾对区域气候变化的影响提供基础数据。

森林火行为受可燃物载量、树种燃烧特性、气候、立地条件等的制约,从而影响火强度和蔓延面积,而火强度和过火面积对可燃物的分布和载量又能起到反向调控。科学地预测火潜势,有计划地对可燃物进行清理和烧出,可以在一定程度上控制林火的发生。在制定森林可燃物调控措施时,可主要考虑几个方面:1)合理控制地表可燃物载量,通过计划火、粗可燃物清除和活可燃物疏松等措施<sup>[37]</sup>,可有效降低地表火发生概率,设置防火带,以阻断地表火传播途径;2)对冠层可燃物载量进行控制,调整枝下高,使冠层高度为树高的 $1/2 \sim 2/3$ <sup>[38]</sup>,破坏冠层可燃物梯状结构,以阻断地表火向树冠蔓延的通道;3)在针叶纯林中补植阔叶树种,营造针阔混交林,弱化冠层燃烧效率,减小冠层可燃物总量,以降低树冠火蔓延速率。

当然,由于人力和物力限制,本文仍存在一些不足,BehavePlus系统和Consume模型是美国林火实验室和林署基于当地森林生态系统特征开发而成,在我国森林内应用时,需要进行点烧试验以便对相关参数进行调整,并将预测结果与观测值进行比较,分析误差。本研究共进行了90次点烧试验,由于点烧试验的采样过程对于森林是破坏性采样,短时间进行大量重复性点烧势必会影响森林生态系统物质循环,故本文的点烧试验并未设置重复,且本研究中点烧试验所用材料均来自于同时期样本,并未考虑季节变化对可燃物床的动态影响,应当在后续研究中,将不同天气状况、不同季节内可燃物样品分别进行点烧,研究BehavePlus系统和Consume模型在桂西南地区的预测效果和误差范围,以便对模型参数进行本地化修正,更精准的模拟野外林火行为及碳排放特征。

## 参考文献:

- [1] Hessburg P F, Reynolds K M, Keane R E, et al. Evaluating wildland fire danger and prioritizing vegetation and fuels treatments[J]. *Forest Ecology & Management*, 2007, 247(1): 1-17.
- [2] Arroyo L A, Pascual C, Manzanera J A. Fire models and methods to map fuel types: The role of remote sensing[J]. *Forest Ecology & Management*, 2008, 256(256): 1239-1252.
- [3] 舒立福, 张小罗, 戴兴安, 等. 林火研究综述(II)——林火预测预报[J]. *世界林业研究*, 2003, 16(4): 34-37.  
SHU Lifu, ZHANG Xiaoluo, DAI Xingan, et al. Forest fire research (II): fire forecast[J]. *World Forestry Research*, 2003, 16(4): 34-37. (in Chinese)
- [4] Parresol B R, Blake J I, Thompson A J. Effects of overstory composition and prescribed fire on fuel loading across a heterogeneous managed landscape in the southeastern USA[J]. *Forest Ecology & Management*, 2012, 273(273): 29-42.
- [5] Ottmar R D, Blake J I, Croll W T. Using fine-scale fuel measurements to assess wildland fuels, potential fire behavior and hazard mitigation treatments in the southeastern USA[J]. *Forest Ecology & Management*, 2012, 273(1): 1-3.
- [6] Andreu A G, Dan S, Parresol B R, et al. Evaluating fuel complexes for fire hazard mitigation planning in the southeastern United States[J]. *Forest Ecology & Management*, 2012, 273(1): 4-16.
- [7] 罗永明, 孙涵, 何立, 等. 基于入射辐射的森林火险预报模型[J]. *自然灾害学报*, 2014(4): 120-126.  
LUO Yongming, SUN Han, HE Li, et al. Forest fire forecast model based on incident radiation[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2014, 273(1): 4-16. (in Chinese)
- [8] 唐丽玉, 毛行辉, 陈崇成, 等. 基于FARSITE的林火蔓延三维可视化模拟[J]. *自然灾害学报*, 2015(2): 221-227.  
TANG Liyu, MAO Xinghui, CHEN Chongcheng, et al. Three-dimensional visual simulation of forest fire spread based on FARSITE[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2015(2): 221-227. (in Chinese)
- [9] 田甜, 邱雪颖. 森林地表可燃物含水率变化机理及影响因子研究概述[J]. *森林工程*, 2013, 29(2): 21-25.  
TIAN Tiang, QIU Xueying. Research review on change mechanism and impact factors of forest surface fuel moisture[J]. *Forest Engineering*, 2013, 29(2): 21-25. (in Chinese)
- [10] 柳生吉, 杨健. 基于广义线性模型和最大熵模型的黑龙省林火空间分布模拟[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(6): 1620-1628.  
LIU Shengji, YANG Jian. Modeling spatial patterns of forest fire in Heilongjiang province using generalized linear model and maximum entropy model[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(6): 1620-1628. (in Chinese)
- [11] 金森, 王晓红, 于宏洲. 林火行为预测和森林火险预报中气象场的插值方法[J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(6): 1-7.  
JIN Shing, WANG Xiaohong, YU Hongzhou. A review on weather data interpolation methods used in forest fire danger forecast and behavior modeling[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2012, 32(6): 1-7. (in Chinese)
- [12] 吴志伟, 贺红士, 刘晓梅, 等. 丰林保护区地表森林死可燃物载量与环境因子的关系[J]. *东北林业大学学报*, 2011, 39(3): 52-55.  
WU Zhiwei, HE Hongshi, LIU Xiaomei, et al. Relationship between loading of dead forest fuels in surface soil and environmental factors in Fenglin nature reserve[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2011, 39(3): 52-55. (in Chinese)
- [13] WU Z W, HE H S, CHANG Y, et al. Development of customized fire behavior fuel models for boreal forests of northeastern China[J]. *Environmental Management*, 2011, 48(6): 1148.
- [14] Levine J. Biomass burning: Its history, use and distribution and its impact on environmental quality and global climate[J]. *Levine J. s. global*, 1991(1991): 3-21.

- [15] 田晓瑞,殷丽,舒立福,等. 2005—2007年大兴安岭林火释放碳量[J]. 应用生态学报,2009,20(12):2877-2883.  
TIAN Xiaorui, YIN Li, SHU Lifu, et al. Carbon emission from forest fires in Daxing'anling region in 2005—2007[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(12): 2877-83. (in Chinese)
- [16] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. Science, 1994, 263(5144): 185-90.
- [17] Keane R E, Gray K, Bacciu V, et al. Spatial scaling of wildland fuels for six forest and rangeland ecosystems of the northern rocky mountains, USA[J]. Landscape Ecology, 2012, 27(8): 1213-1234.
- [18] Andrews PL. 2011. BehavePlus fire modeling system, version 4.0: User's Guide [EB/OL]. [2013-07-30]. [http://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs\\_gtr106.html](http://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_gtr106.html).
- [19] 黄小荣,申文辉,庞世龙,等. 南宁老虎岭松栎公益林的火潜势评估[J]. 生态学杂志,2014,33(3):602-610.  
HUANG Xiaorong, SHEN Wenhui, PANG Silong, et al. Evaluating fire potential of non-commercial pine-beech forests in tiger mountain, nanning[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(3): 602-610. (in Chinese)
- [20] Wagner C E V. Conditions for the start and spread of crown fire[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1977, 7(1): 23-34.
- [21] Harrington M G, Service U F, Harrington M G, et al. Stand, fuel, and potential fire behavior characteristics in an Irregular southeastern arizona ponderosa pine stand[J]. 1982. Note RM-418.
- [22] 张吉利,刘礴霏,邱雪颖,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.  
ZHANG Jili, LIU Bofei, QI Xueying, et al. Fire behavior of Quercus mongolica leaf litter fuel bed under zero-slope and no-wind conditions. III. Analysis and modeling of fire line Intensity, fuel consumption, and combustion efficiency. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 12(24): 3381-3390. (in Chinese)
- [23] 田苗,宋广艳,赵宁,等. 亚热带常绿阔叶林和暖温带落叶阔叶林叶片热值比较研究[J]. 生态学报,2015(23):7709-7717.  
TIAN Miao, SONG Guangyan, ZHAO Ning, et al. Comparison of leaf calorific values in subtropical evergreen broad-leaved and warm temperate deciduous broad-leaved forests in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(23). (in Chinese)
- [24] Sharples J J. Review of formal methodologies for wind - slope correction of wildfire rate of spread[J]. International Journal of Wildland Fire, 2008, 17(2): 179-193.
- [25] Catchpole W R, Catchpole E A, Butler B W, et al. Rate of spread of free-burning fires in woody fuels in a wind tunnel[J]. Combustion Science & Technology, 1998, 131(1): 1-37.
- [26] Dupuy J L, Portier D, Valette J C. The effects of slope and fuel bed width on laboratory fire behavior[J]. International Journal of Wildland Fire, 2011, 20(2): 283-289.
- [27] Laursen K K, Hobbs P V, Radke L F, et al. Some trace gas emissions from north american biomass fires with an assessment of regional and global fluxes from biomass burning[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1992, 972(D18): 20687-20701.
- [28] Kasischke E S, French N H F, Bourgeau-Chavez L L, et al. Estimating release of carbon from 1990 and 1991 forest fires in alaska[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1995, 100(D2): 2941-2951.
- [29] FRANK A. ALBINI, BRIAN J. STOCKS. Predicted and observed rates of spread of crown fires in immature Jack pine[J]. Combustion Science & Technology, 1986, 48(1-2): 65-76.
- [30] 胡海清,魏书精,孙龙. 1965—2010年大兴安岭森林火灾碳排放的估算研究[J]. 植物生态学报,2012,36(7):629-644.  
HU Haiqing, WEI Shujing, SUN Long, et al. Estimation of carbon emissions due to forest fire in daxing'an mountains from 1965 to 2010 [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(7): 629-644. (in Chinese)
- [31] 田晓瑞,代玄,王明玉,等. 多气候情景下中国森林火灾风险评估[J]. 应用生态学报,2016,27(3):769-776.  
TIAN Xiaorui, DAI Xue, WANG Mingyu, et al. Forest fire risk assessment for china under different climate scenarios [J]. Yingyong Shengtai Xuebao, 2016, 27(3): 769-776. (in Chinese)
- [32] 毛贤敏. 风和地形对林火蔓延速度的作用[J]. 应用气象学报,1993(1):100-104.  
MAO Xianmin. The influence of wind and relief on the speed of the forest fire spreading [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1993 (1): 100-104. (in Chinese)
- [33] Simeoni A, Santoni P A, Larini M, et al. On the wind advection influence on the fire spread across a fuel bed: modelling by a semi-physical approach and testing with experiments[J]. Fire Safety Journal, 2001, 36(5): 491-513.
- [34] 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(3):1-9.  
NIU Shukui, HE Qingtang, CHEN Feng, et al. Spatial continuity of fuels in major coniferous forests in Beijing mountainous area: fuel horizontal continuity and crown fire spread [J]. Beijing Linye Daxue Xuebao/journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(4): 1-9. (in Chinese)
- [35] Silvani X, Morandini F, Dupuy J L. Effects of slope on fire spread observed through video images and multiple-point thermal measurements [J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2012, 41(41): 99-111.
- [36] 武金模. 外界风和坡度条件下地表火蔓延的实验和模型研究[D]. 中国科学技术大学,2014.  
WU Jinmo. Experimental and theoretical study on surface fire spread under effect of wind and slope. Beijing: PhD Thesis of University of Science and technology of China. 2014. (in Chinese)
- [37] HE H S, SHANG B Z, Crow T R, et al. Simulating forest fuel and fire risk dynamics across landscapes—LANDIS fuel module design [J]. Ecological Modeling, 2004, 180(1): 135-151.
- [38] 张景群,王春雷,王得祥. 树冠火与林分层间易燃可燃物分布关系研究[J]. 森林防火,1995,4(4):5-9.  
ZHANG Jingqun, WANG Cunlei, WANG Dexiang. Study on relationship between crown fire and distribution of flammable fuels in layers. Fire Safety Science. 1995, 4(12): 5-9. (in Chinese)