

西南林区森林火灾火行为模拟模型评价

赵 璠^{1,2} 舒立福^{1*} 周汝良² 肖向明³ 王明玉¹ 赵凤君¹ 王秋华²

(¹中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所国家林业局森林保护学重点实验室, 北京 100091; ²西南林业大学, 昆明 650224; ³美国俄克拉荷马大学, 美国俄克拉荷马州诺曼 73019)

摘 要 林火火行为特征是进行及时有效的林火预防和扑救的重要技术参考, 国外普遍做法是借助火行为模拟模型进行获取. 本文选用美国和加拿大行业普遍使用的 Farsite 和 Prometheus 火行为模拟模型对发生在中国西南林区的安宁“3·29”森林大火进行模拟, 通过对比模拟结果和相关林火资料, 定量评价模型的模拟精度. 结果表明: 在蔓延范围模拟方面, Farsite 在 Scott 可燃物模型下的模拟精度最高, Prometheus 最差, 但差距不大, Farsite 与 Prometheus 火场范围的差异区主要集中在云南松分布区; 在蔓延速度(ROS)模拟方面, Farsite 在 2 种可燃物模型下的平均 ROS 模拟输出最接近实际情况, Prometheus 则偏离实际情况较远, Farsite 与 Prometheus 的 ROS 差异区主要集中在云南松分布区; 在火线强度(FLI)模拟方面, Farsite 在 2 种可燃物模型下的平均 FLI 模拟输出结果类似, Farsite 与 Prometheus 的输出差异较大, 差异区主要集中在栎类灌木分布区.

关键词 森林火灾; 火行为; Farsite 模型; Prometheus 模型

Evaluating fire behavior simulators in southwestern China forest area. ZHAO Fan^{1,2}, SHU Li-fu^{1*}, ZHOU Ru-liang², XIAO Xiang-ming³, WANG Ming-yu¹, ZHAO Feng-jun¹, WANG Qiu-hua² (¹State Forestry Administration Key Open Laboratory of Forest Protection, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; ²Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; ³University of Oklahoma, Norman 73019, OK, USA).

Abstract: As an important technical reference for efficient prevention and fighting against forest fire, forest fire behavior parameters are mainly obtained from fire behavior simulators in some developed countries. This study selected two simulators, the Farsite from USA and the Prometheus from Canada, which were both widely used in local area. Through comparing simulated results and relative data of the ‘3·29 Fire’ occurred in Anning City, Southwestern China, we tried to evaluate accuracy of the simulators in a quantitative way. The results indicated that, in the simulation of perimeter, the precision of Farsite under Scott fuel model was the highest, while Prometheus was the lowest, but the difference was not significant. The difference in simulative perimeter between Farsite and Prometheus mainly concentrated in the distribution area of *Pinus yunnanensis*. In the simulation of rate of spread (ROS), the mean ROS results of Farsite under both fuel models were close to the actual situation, while the results of Prometheus were far away from the actual situation. The different simulative area of ROS between Farsite and Prometheus mainly concentrated in the distribution area of *P. yunnanensis*. In the simulation of fireline intensity (FLI), the mean FLI results of Farsite under both fuel models were similar, and Prometheus obtained significantly different FLI results from Farsite, while the different simulative area of FLI between Farsite and Prometheus mainly concentrated in the distribution area of *Quercus*.

Key words: forest fire; fire behavior; Farsite model; Prometheus model.

本文由国家自然科学基金项目(31570645, 31470658)和云南省森林灾害预警与控制重点实验室基金项目(ZK1500014)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31570645, 31470658) and the Key Laboratory Foundation of Forest Disaster Warning and Control in Yunnan Province, China (ZK1500014).

2017-02-06 Received, 2017-06-06 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shulif@caf.ac.cn

森林火灾是失去人为控制的森林燃烧,一旦发生将对森林资源和人类生存环境造成严重危害。林火行为研究是进行森林火灾预防与扑救的有效做法,主要研究对象是森林火灾从起火开始,在发展、蔓延、减弱到熄灭的整个过程中表现出来的火行为特征^[1]。进行林火行为研究并构建林火行为模型,对林火的预防和扑救具有重要的指导意义。林火行为模型研究大致可分为以下4个阶段:1) 20世纪20—30年代,初期阶段,主要是探索影响林火行为的主要因子;2) 20世纪30—70年代,物理研究阶段,主要从林火燃烧的化学变化和传热的物理过程入手构建物理模型,最早的火蔓延模型^[2]出现于这一阶段;3) 20世纪70—90年代,统计研究阶段,开始利用观测或试验获得的数据进行统计分析来建立统计模型方程,各种林火模型在这一阶段层出不穷;4) 20世纪90年以后,随着计算机技术、遥感技术和地理信息技术的快速发展,林火行为模型开始借助这些技术进入空间模拟模型阶段。

早期的林火模型主要是针对于火头蔓延速度进行构建,可提供的预报信息有限,不足以对林火的预报和扑救提供有力支持。因此,随后出现的空间模拟模型,借助适当的传播方程,将经典蔓延模型测算的火头蔓延速度推算到整个火烧范围,从而获得全向的林火蔓延速度和蔓延空间分布的时间序列,再结合地理信息系统即可直观地预测和还原林火蔓延的整个过程,提供林火发生发展过程中的各种空间蔓延信息。目前,在美国、加拿大等林火管理水平较高的国家已形成实用性较高的空间模拟模型,例如:美国林务局洛基山研究工作站开发的 Farsite^[3],已广泛应用于美国林务局、国家公园局和其他相关部门的林火和林业资源管理等工作中;加拿大林务局北部林业研究中心开发的 Prometheus^[4],经过加拿大跨部门林火中心推荐成为加拿大国家标准,用于扑火、火险分析,以及森林、社区等地点的消防安全设计。

这些空间模拟模型在国外大量实际应用中,进行反复验证和评价修正,模拟结果和真实林火发生发展的拟合度越来越高,成为现代林火管理必不可少的重要工具。然而我国尚未构建基于自身气候和植被特点的空间模拟模型。因此,本文利用具有详细记录的历史林火数据,对经典模拟模型进行评价分析,以确定这些模型在我国的模拟精度,可为我国林火空间模拟模型的选用和构建提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

安宁“3·29”森林大火是2006年3月29日17:00发生在安宁市温泉镇古朗箐的一场重特大森林火灾。该场林火过火面积大、持续时间长,其扑救难度和危险系数都实属罕见,集中反映了西南林区典型山地森林火灾的复杂多变性和危险性^[5-6]。安宁市(24°31′—25°6′N, 102°8′—102°37′E, 图1)隶属云南省昆明市,位于西南林区滇中高原中部,总面积1301 km²。该地区平均海拔2013.9 m,地形呈东南高、西北低,有3个山间盆地,其余为山区半山区。属于高原低纬度亚热带季风气候,季节温差不大,年平均气温14~17℃,干、湿季分明,年平均降水量750~1000 mm,降水主要集中于5—9月,全年多西南风。森林火险期从每年的11月中旬到翌年5月底,长达近7个月,其中戒严期为2—4月,是全国重点防火县(市、区)之一。森林面积51369 hm²,森林覆盖率51.2%,现有植被类型可分为半湿润常绿阔叶林、云南松林、松栎混交林3类^[7-8],主要树种包括云南松(*Pinus yunnanensis*)、华山松(*Pinus armandii*)、云南油杉(*Keteleeria evelynian*)、地盘松(*Pinus yunnanensis* var. *pygmaea*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)、光叶石栎(*Lithocarpus mairei*)等。

1.2 样地调查

2016年3月23—29日,在“3·29”火烧迹地选择典型植被云南油杉、云南松和栎类灌木连续分布的林分,各设置2块20 m×20 m样地,共计6块火烧样地。在距离火烧样地2 km内的非火烧区,根据相似林分、林相和海拔,各设置2块20 m×20 m非火

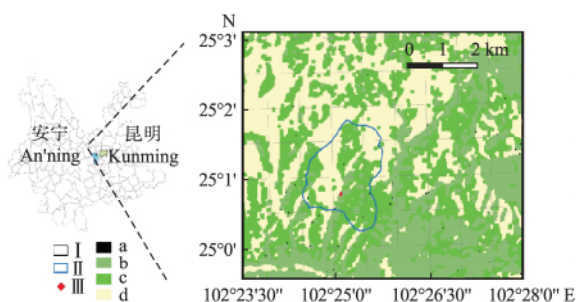


图1 研究区位置示意图

Fig.1 Sketch map of the location of the study area.

I: 研究区 Study area; II: 实际火场范围 Observed fire; III: 起火点 Ignition point. 下同 The same below. a) 非林地 Bare ground; b) 云南油杉林 *Keteleeria evelyniana* woodland; c) 云南松林 *Pinus yunnanensis* woodland; d) 栎类灌木林 *Quercus* shrubwood.

烧样地,共计 6 块非火烧对照样地.对每块样地的 GPS 位置、海拔、坡度、坡向等立地条件进行记录,选择标准木伐倒并按 1 m 分段锯开,称鲜质量后密封编号保存.在每块样地内沿对角线设置 5 个 2 m×2 m 小样方,分类统计样方内所有死可燃物和活灌木、草本,并称鲜质量后密封编号备用.样品带回实验室后,采用干燥法测出各时滞死可燃物、活灌草本和活乔木的含水率.死可燃物的时滞分类标准^[9]: 1 h 时滞死可燃物为直径(D) ≤ 0.6 cm 的小枝、树叶及枯死杂草; 10 h 时滞死可燃物为 $0.6 \text{ cm} < D \leq 2.5 \text{ cm}$ 的细枝; 100 h 时滞死可燃物为 $2.5 \text{ cm} < D \leq 7.6 \text{ cm}$ 的粗枝.

1.3 模拟模型

采用 Farsite 和 Prometheus 这两个目前最为成熟的林火模拟模型作为本研究的模拟模型. Farsite 是在 BEHAVE 火行为预测系统^[10]的基础上,利用地形和可燃物的空间数据,以及相应的天气和风等因子数据,通过整合 Rothermel 半统计蔓延模型和林火蔓延^[11]、树冠火^[12-13]、飞火^[14]、火后可燃物消耗^[15-16]、死可燃物湿度^[17]和火加速^[18]等经典模型,推算火线的时空变化过程,从而实现对林火行为的二维模拟. Prometheus 是在加拿大森林火险等级系统的火行为预测子系统^[18-19]的基础上,采用 Richards 小波传播模型^[20],使用与 Farsite 类似的惠更斯原理和椭圆增长理论作为传播方程,利用第三方 GIS 平台提供的地图和空间地理信息,进行近实时的空间林火蔓延模拟模型.

Farsite 进行林火蔓延模拟所需的基础数据包括地形数据(包括坡度、坡向、海拔)、可燃物模型、植被盖度组成的景观要素数据、降水量、降水持续期、最高最低气温、最高最低湿度等构成的气象数据,每日分时 10 m 风速、10 m 风向、总云量等构成的风场数据.其中,可燃物模型是将典型植被类型下的死可燃物(按照 1、10、100 h 的不同时滞进行分类)和活可燃物(主要包括乔木、灌木)的可燃物载量、床厚度、表面积体积比、熄灭含水率、热值进行聚类,以便于对目标地区进行快速的可燃物参数定制. Prometheus 模拟所需的数据与 Farsite 类似,同样包括地形数据、可燃物模型数据和气象数据.两个模拟模型所需的景观栅格数据都要求采用统一的空间分辨率,本研究中统一为 30 m.

由于 Farsite 内置了 2 套可燃物模型(Anderson 标准可燃物模型集^[9]、Scott 标准可燃物模型扩展集^[21]),本研究分别在这 2 套可燃物模型下对 Far-

site 进行模拟.因此,本研究连同 Prometheus 模拟,共有 3 种模拟输出结果,分别用 Farsite(Anderson)、Farsite(Scott)和 Prometheus 在后文中进行表示和区分.

1.4 模拟支持数据

1.4.1 历史林火数据 “3·29”森林大火开始于 2006 年 3 月 29 日 17:00,4 月 7 日全部扑灭,历时 10 d,起火点位于 $25^{\circ}0'4'' \text{ N}$, $102^{\circ}25'7'' \text{ E}$ (图 1).该场大火过火面积达到 1848.7 hm^2 ,受害森林面积 519.3 hm^2 ^[5].火场范围地形复杂、山高坡陡箐深,海拔范围 1837~2545 m,火场主体坡度多在 60° 以上.根据扑火队员每日 9:00 记录的扑救资料勾画火场边界日变化范围.由于 3 月 30 日以后进入全面扑火阶段,林火蔓延范围不再是自然状态下的发展态势,因此本研究的林火蔓延模拟进行到 3 月 30 日 9:00 为止.

1.4.2 地形数据 地球表面呈现出不同地形,分布着不同的植被类型,同时影响林火发生的传热过程,进而塑造多变的林火环境,造成林火蔓延和发展的态势变化.林火蔓延模拟研究主要考虑纬度、海拔、坡度、坡向等要素.地表描述目前主要采用数字高程模型(digital elevation model, DEM)进行表达,到现在为止覆盖全球范围的成熟 DEM 产品主要有 Aster GDEM 数据(分辨率 30 m)和 SRTM 数据(分辨率 90 m).本研究采用水平和垂直方向准确度都更高的 Aster GDEM 第 2 版数据作为本研究的地形数据(表 1),并利用 ArcGIS 软件生成火场范围的高程、坡向、坡度等专题图像(图 2).

1.4.3 气象数据 气象主要影响林火燃烧过程中所需氧气的供给、燃烧的热传递过程以及可燃物含水率的变化.影响森林火灾发生发展的气象要素主要包括大气温度、大气湿度、风速、风向、降水量、总云量等,这些要素统称为火险天气要素.本研究选取距离安宁“3·29”火场最近的 56778 号气象台(25° N , $102^{\circ}23'24'' \text{ E}$,观测场海拔 1888.1 m)作为

表 1 地形数据参数

Table 1 Parameters of GDEM

参数 Parameter	数值 Value
产品类型 Product type	Aster GDEM V2
输出格式 Output format	GeoTIFF
参考坐标系 Spatial reference	UTM-WGS84
分辨率 Pixel size	1 arc-second (30 m)
影像编号 Image number	ASTGTM2 _ N24E102、ASTGTM2 _ N25E102

表 2 “3·29”气象数据
Table 2 Weather data for ‘3·29 Fire’

日期 Date	时刻 O'clock	气温 Temperature (℃)	湿度 Humidity (%)	风速 Wind speed (km·h ⁻¹)	风向 Wind direction	总云量 Cloud cover (%)	降水量 Precipitation (mm)
03-28	2: 00	12.1	74	10.8	东	0	0
03-28	8: 00	10.4	90	3.6	西南偏南	25	0
03-28	14: 00	23.2	31	21.6	西南偏西	75	0
03-28	20: 00	21.2	35	10.8	西南	0	0
03-29	2: 00	16.5	54	14.4	西南偏西	0	0
03-29	8: 00	15.0	58	18.0	西南偏西	0	0
03-29	14: 00	23.4	21	36.0	西	0	0
03-29	20: 00	22.1	31	10.8	西	60	0
03-30	2: 00	17.8	41	18.0	西南	75	0
03-30	8: 00	16.0	45	10.8	西南	90	0
03-30	14: 00	23.3	24	25.2	西南偏西	40	0
03-30	20: 00	19.7	33	10.8	西南	90	0

数据来源 ,通过全球气象台站数据交换网络获取 3 月 28 日 2:00 至 3 月 30 日 20:00 的每日 4 次气象数据作为本研究的气象数据(表 2) .由于 Farsite 和 Prometheus 中所需气象数据为逐小时数据 ,因此 ,本

研究对气象数据所缺的小时数据利用上一次气象记录值进行填充 ,例如 3 月 28 日 2:00—7:00 的气象值均采用 2:00 的气象记录值 ,8:00—13:00 的气象值均采用 8:00 的气象记录值.

1.4.4 可燃物模型 森林可燃物是森林火灾的物质基础 ,在很大程度上决定森林火灾的发展走势.森林可燃物的性质主要受到森林地表植被类型构成的影响^[21] .根据目标地区常见植被类型的可燃物载量、表面积体积比、床厚度、燃烧热值和含水率等影响火行为的不同特征进行参数分类 ,构成可燃物模型 ,对目标地区的可燃物具有较高的代表性^[22] ,便于进行相关火行为研究.通过卫星遥感图像进行植被类型的遥测与典型植被类型照片和可燃物模型标准照片样张相比对的方法 ,确定可燃物模型的分类 ,既可以发挥卫星遥感解译效率高、准确度好的特点 ,同时又能保证可燃物模型分类的准确性.本研究的卫星遥感影像采用距离“3·29”森林火灾发生时间最近的 3 月 7 日 Landsat 5 TM 1 级遥感图像(表 3、4) .

表 3 Landsat 5 图像参数
Table 3 Image parameters of Landsat 5

参数 Parameter	数值 Value
产品类型 Product type	Landsat 5 TM L1T
输出格式 Output format	GeoTIFF
参考坐标系 Spatial reference	UTM-WGS84
影像编号 Image number	LT51300432006066BJC00
获取时间 Date acquired	2006-03-07
条带号/行编号 WRS path/row	130/043
太阳方位角 Sun azimuth	133.70149861
太阳高度角 Sun elevation	49.41857149
云量 Cloud cover	0.00

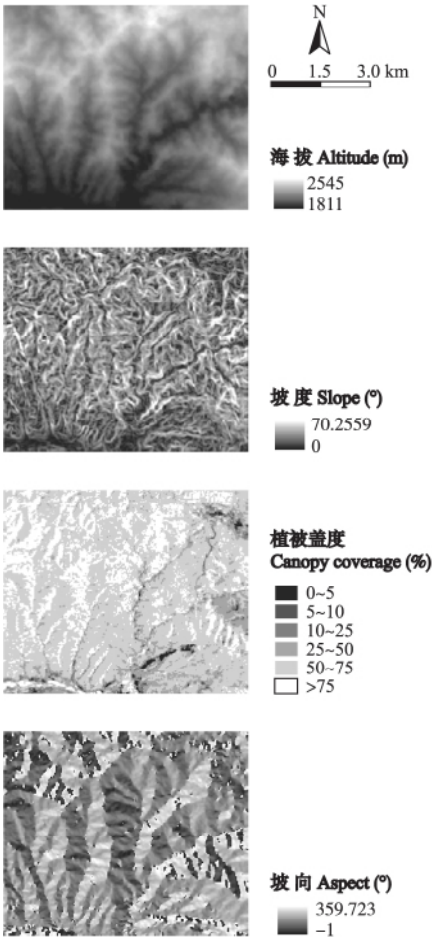


图 2 研究区地形和植被特征图
Fig.2 Topography and canopy maps of the study area.

表 4 Landsat 5 各波段参数
Table 4 Parameters of bands in Landsat 5

波段 Band	波段名 Name	频谱范围 Spectral range (μm)	分辨率 Pixel size (m)
1	Blue	0.42~0.52	30
2	Green	0.52~0.60	30
3	Red	0.63~0.69	30
4	Near-IR	0.70~0.90	30
5	Near-IR	1.55~1.75	30
6	Thermal	10.40~12.50	120
7	Mid-IR	2.08~2.35	30

遥感图像通常给出的像元二进制值是该像元在该波段的灰度值(即 DN 值),利用该值只能用于同景图像的内部比较。要利用不同地点、不同时间、不同传感器获取的遥感图像进行比较、反演等分析应用,就需要通过辐射定标将遥感传感器直接输出的 DN 值转换为对应地物的表观反射率^[23],以便于后续的地表信息提取。Landsat 5 TM 1 级遥感数据经过了辐射校正和几何校正,其 DN 值由辐射亮度经线性变换得到,可采用反变换公式进行辐射定标^[24](表 5)。

$$G_{\text{recal}} = \frac{L_{\text{max } \lambda} - L_{\text{min } \lambda}}{255} \quad (1)$$

$$B_{\text{recal}} = L_{\text{min } \lambda} \quad (2)$$

$$\rho_{\lambda} = G_{\text{recal}} \cdot Q_{\text{cal}} + B_{\text{recal}} \quad (3)$$

式中: G_{recal} 为 1 级产品辐射定标变化增益($\text{DN} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$); $L_{\text{max } \lambda}$ 、 $L_{\text{min } \lambda}$ 分别为最大、最小光谱辐射亮度($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$); B_{recal} 为 1 级产品辐射定标变化偏置($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$); ρ_{λ} 为地物反射率($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$); Q_{cal} 为 1 级产品的 DN 值(无因次量)。

利用经过辐射定标后的遥感图像进行地表植被状况度量,最简单、有效的方法是利用植被的光谱特

表 5 辐射定标参数
Table 5 Parameters of radiometric calibration

波段 Band	最大光谱辐射亮度 $L_{\text{max } \lambda}$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)	最小光谱辐射亮度 $L_{\text{min } \lambda}$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)
1	193.00	-1.52
2	365.00	-2.84
3	264.00	-1.17
4	221.00	-1.50
5	30.20	-0.37
6	15.30	1.24
7	16.50	-0.15

征将可见光波段和近红外波段进行相关组合形成各种植被指数。在这些植被指数中,归一化植被指数(NDVI)能消除大部分与仪器定标、太阳角、地形、云阴影和大气条件等有关的辐照度变化,可提高对植被的响应能力,因此是植被指数中应用最广的一种^[25]。在获取研究区 NDVI 图像后,通过 K-Means 非监督分类,并进行主/次要分析、分类集群、分类筛选等一系列后处理,形成研究区的植被聚类图像。将植被聚类图像与样地调查数据进行比较后就能获得研究区的植被类型分类图像。本研究区主要植被类型包括云南松、云南油杉和栎类灌木 3 类(图 1、表 6)。最后,根据 Farsite 内置的 Anderson 可燃物模型、Scott 可燃物模型和 Prometheus 内置的 FBP 可燃物模型^[18]所提供的标准照片样张,分别确定研究区植被类型的可燃物模型分类,并利用 ArcGIS 进行相应的代码替换(表 6),形成研究区的可燃物模型专题图像。

1.4.5 植被盖度数据 植被盖度指地面在垂直方向被树冠覆盖的百分比,是模型计算云影和风对可燃物含水率衰减作用的主要因子,是 Farsite 模型所特需的输入数据。由于 NDVI 和植被盖度具有明显的相关性^[26-27],可采用像元二分模型^[28]在 NDVI 图像的基础上反演植被盖度(图 2)。

$$f_c = \frac{NDVI - NDVI_{\text{soil}}}{NDVI_{\text{veg}} - NDVI_{\text{soil}}} \quad (4)$$

式中: f_c 为植被盖度(%); NDVI 为 NDVI 图像的原始值; $NDVI_{\text{soil}}$ 为纯裸土像元的 NDVI 值; $NDVI_{\text{veg}}$ 为纯植被覆盖像元的 NDVI 值。根据研究区的裸土和植被覆盖最密的 NDVI 值,将 $NDVI_{\text{soil}}$ 设为 0.169, $NDVI_{\text{veg}}$ 设为 0.736。

1.4.6 植被初始含水率数据 可燃物初始含水率主要用于推算可燃物含水率在模拟过程中的变化量,

表 6 研究区植被类型和可燃物模型代码
Table 6 Codes of vegetation types and fuel models for the study area

植被类型 Vegetation type	植被类型 代码 Vegetation code	可燃物模型代码(名称) Fuel model code (name)		
		Anderson	Scott	FBP
非林地 Non-forest	0	0	0	101 (non-fuel)
云南油杉 <i>Keteleeria evelyniana</i>	1	10 (FM 10)	165 (TU 5)	575 (M-2)
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	2	9 (FM 9)	164 (TU 4)	880 (M-4)
栎类灌木 <i>Quercus shrub</i>	3	4 (FM 4)	124 (GS 4)	32 (O-1b)

表 7 研究区可燃物初始含水率
Table 7 Initial fuel moistures of the study area (%)

植被类型 Vegetation type	死可燃物 Dead fuel			活可燃物 Live fuel	
	1 h	10 h	100 h	灌木 Shrub	乔木 Woody
云南油杉 <i>Keteleeria evelyniana</i>	10	12	20	45	60
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	10	12	20	45	60
栎类灌木 <i>Quercus shrub</i>	10	12	20	45	60

是关系到火行为模拟结果的重要参数 ,也是 Farsite 模型所特需的输入数据.根据对照样地的含水率调查 ,设置本研究中的可燃物初始含水率数值(表 7) .

1.5 模型评价

对 Farsite 和 Prometheus 模型的评价主要从蔓延范围和火行为指标两方面入手.蔓延范围评价方面 ,将 3 种模拟输出结果的蔓延范围与“3·29”林火实际火场范围进行比较 ,划分出与实际的重合区、模拟过火而实际未过火的过模拟区和模拟未过火而实际过火的未模拟区 ,根据 3 个区域的像元数和面积分别采用 *KC* 系数^[29]和 *SC* 系数^[30]作为精度系数进行蔓延范围的模拟精度评价.同时 ,对这 3 种模拟输出结果的蔓延范围进行两两比较.

KC 系数主要用于表征模拟结果和实际的符合程度 ,该系数可将偶然性的符合排除在外^[31].计算公式如下:

$$KC = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} x_{+i})}$$

(5)

式中: *KC* 为 *KC* 精度系数值; *N* 为混淆矩阵中的像元总数; *r* 为混淆矩阵的行数; x_{ii} 为混淆矩阵中第 *i* 行 *i* 列的像元数; x_{i+} 为混淆矩阵模拟结果中某一分类的像元总数; x_{+i} 为混淆矩阵真实结果中某一分类

的像元总数.

SC 系数是对模拟蔓延范围与实际的相关性进行表示.这 2 个系数的取值范围均为 0~1 ,值越接近 1 ,说明模拟蔓延范围和实际的符合程度越高^[32].该系数的计算公式如下:

$$SC = \frac{2a}{2a+b+c}$$

(6)

式中: *SC* 为 *SC* 精度系数值; *a* 为重合区的面积 (hm^2); *b* 为过模拟区的面积 (hm^2); *c* 为未模拟区的面积 (hm^2).

火行为指标评价方面 ,主要对蔓延速度 (*ROS*) 和火线强度 (*FLI*) 这 2 个对林火扑救具有重要意义的指标进行分析 ,*ROS* 是指火线向前推进的速度 , *FLI* 是指单位长度的火线燃烧时产生的热量.首先 ,对 3 种模拟输出的平均蔓延速度和平均火线强度进行总体比较.其次 ,为了展现各模型在蔓延指标上的景观尺度差异 ,根据地表火扑救效能对照表^[33]对 3 种模拟输出的 *ROS* 和 *FLI* 分级后进行两两比较.

2 结果与分析

2.1 蔓延范围

由表 8 可以看出 ,3 种模拟输出结果的蔓延范围的 *KC* 值在 0.30~0.43 ,*SC* 值在 0.39~0.50 ,总体模拟精度不高; *KC* 和 *SC* 最大值 (*KC* = 0.43、*SC* = 0.50) 获得于 Farsite (Scott) ,最小值 (*KC* = 0.30、*SC* = 0.39) 获得于 Prometheus; *KC* 的差值最大为 0.13、最小为 0.03 ,*SC* 的差值最大为 0.11、最小为 0.03 ,最大差值都产生于 Farsite (Scott) 与 Prometheus 之间 ,最小差值都产生于 Farsite (Scott) 与 Farsite (Anderson) 之间.说明 Farsite (Scott) 的蔓延范围拟合性比其他 2 种模拟更好 ,其次是 Farsite (Anderson) ,最差是 Prometheus ,3 种模拟输出结果的模拟精度都不高 ,差距也并不显著.

表 8 “3·29”模拟结果
Table 8 Simulation results for ‘3·29 Fire’

模拟模型 Simulator	可燃物模型 Fuel model	蔓延范围 Spreading area							火行为指标 Fire behavior parameter	
		<i>KC</i>	<i>SC</i>	<i>a</i> (hm ²)	<i>b</i> (hm ²)	<i>c</i> (hm ²)	模拟面积 Simulated (hm ²)	实际面积 Observed (hm ²)	蔓延速度 Average ROS (m • min ⁻¹)	火线强度 Average FLI (kW • m ⁻¹)
Farsite	Scott	0.43	0.50	334.56	605.10	69.07	939.66	403.63	3.53±3.23	2115.89±2260.44
	Anderson	0.40	0.47	350.25	738.94	53.37	1089.19		3.57±3.66	1530.57±1711.26
Prometheus	FBP	0.30	0.39	392.70	1194.50	10.93	1587.20		10.55±8.94	6102.27±7631.50
Farsite Anderson vs. Farsite Scott		0.82	0.86	867.83	221.37	71.83				
Farsite Anderson vs. Promtheus		0.56	0.68	905.76	183.43	681.43				
Farsite Scott vs. Prometheus		0.59	0.69	871.92	67.74	715.27				

a: 重合区 Coincident area; *b*: 过模拟区 Overestimated area; *c*: 未模拟区 Underestimated area.

在蔓延范围的空间分布中,从蔓延范围的形状来看,3种模拟输出大体相同,近似于实际火场范围(图3)。从蔓延面积来看,Farsite(Scott)最小(939.66 hm^2),Farsite(Anderson)其次(1089.19 hm^2),Prometheus最大(1587.20 hm^2),3者都大大超过实际火场面积(403.63 hm^2)。从与实际火场范围的比较来看,3种模拟输出的蔓延范围都基本覆盖整个实际火场,Farsite在2种可燃物模型下的过模拟区都主要集中在火头和火翼两侧,未模拟区集中在火后两侧,Prometheus则基本完整覆盖实际火场(图3)。从蔓延范围之间的比较来看,Farsite在2种可燃物模型下的蔓延范围基本相同($KC=0.82$, $SC=0.86$),只在火头和火左翼的少部分区域有所不同,差异区的植被类型分布不均;Prometheus和Farsite在2种可燃物模型下的差异较大(KC 和 SC 均小于0.70),差异区主要集中在火右翼区域(图4),差异区的植被类型主要为云南松。

综合说明,Farsite模型在蔓延范围上的模拟效果较好,特别是在Scott可燃物模型下的模拟蔓延范围更符合实际的火场范围,Prometheus则最差。

2.2 蔓延速度

由表8可以看出,3种模拟输出结果的平均蔓延速度(ROS)在 $3.53 \sim 10.55 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$,标准差在 $3.23 \sim 8.94$,差异较大。其中,Farsite在2种可燃物模型下的输出结果类似,Farsite(Scott)为(3.53 ± 3.23) $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$,Farsite(Anderson)为(3.57 ± 3.66) $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$;Prometheus与Farsite在2种可燃物模型下的差距都较大,为(10.55 ± 8.94) $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ 。与“3·29”扑救资料进行比较,Farsite在2种可燃物模型下的ROS模拟结果更贴近实际情况。

从ROS的空间分布来看,Farsite在2种可燃物模型下的ROS大部分都低于 $4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$,ROS较高地区主要集中在火头和火左翼;Prometheus在整个蔓延区域都呈现出较高的ROS,近80%的区域达到

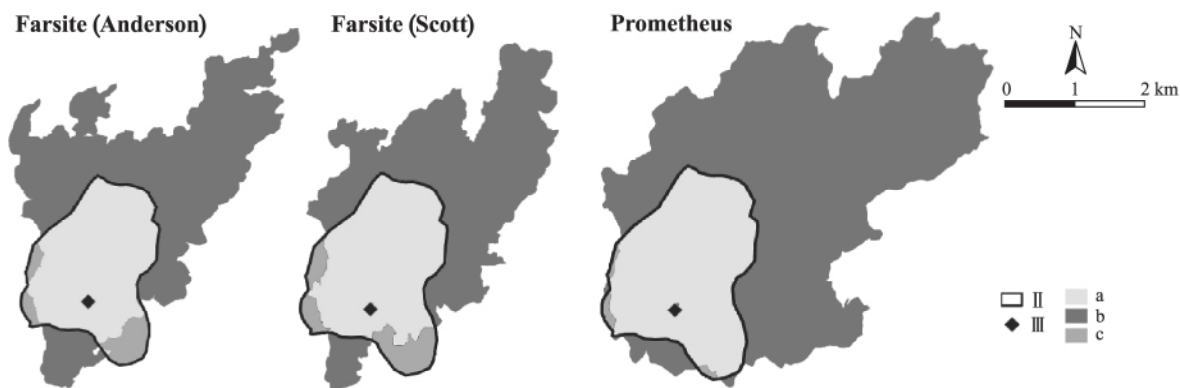


图3 “3·29”模拟蔓延范围

Fig.3 Simulative spread range for ‘3·29 Fire’.

a) 重合区 Coincident area; b) 过模拟区 Overestimated area; c) 未模拟区 Underestimated area.

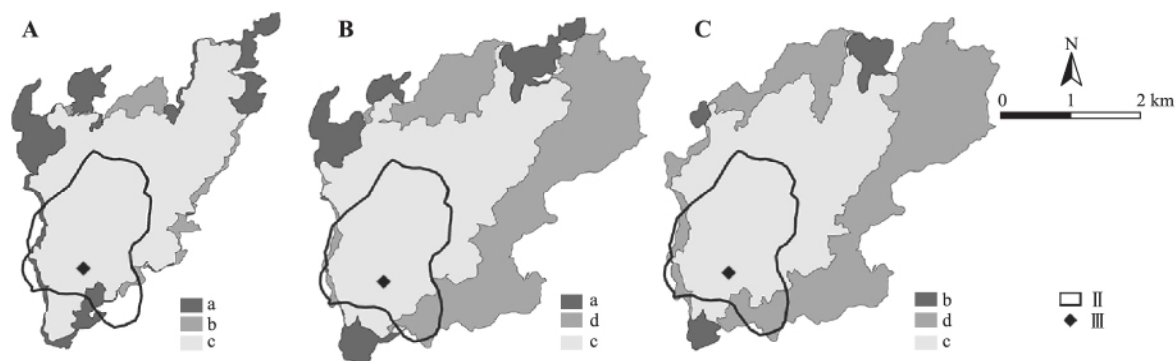


图4 模拟蔓延范围的比较

Fig.4 Comparison of simulated spread range for ‘3·29 Fire’.

A: Farsite Anderson 对比 Farsite Scott Farsite Anderson vs. Farsite Scott; B: Farsite Anderson 对比 Prometheus Farsite Anderson vs. Prometheus; C: Farsite Scott 对比 Prometheus Farsite Scott vs. Prometheus. 下同 The same below. a) Farsite (Anderson) 过度模拟区 Farsite (Anderson) overestimated area; b) Farsite (Scott) 过度模拟区 Farsite (Scott) overestimated area; c) 二者重合区 Coincident area by Farsite (Anderson) and Farsite (Scott); d) Prometheus 过度模拟区 Prometheus overestimated area.

了 $8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 以上(图 5). 需要指出的是, Farsite (Scott) 在蔓延区域中心以及火右翼出现了 3 片 ROS 为零的地区, 表示模拟中这些区域未过火, 这在 Farsite (Anderson) 和 Prometheus 中都未出现(图 5). 从 ROS 空间分布的比较来看, Farsite (Anderson) 在蔓延初期 ROS 比 Farsite (Scott) 高, 到蔓延中后期被 Farsite (Scott) 超过, 差值都在 $10 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 以内, 差异区均占整个重合区的近似 50%, 差异区的植被类型分布不均; Prometheus 和 Farsite 在 2 种可燃物模型下的 ROS 差异区主要集中在蔓延初期的着火点附近、火头和火右翼, 差值都在 $10 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 以上, 最大达到 $36.9 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ (图 6), 差异区的主要植被类型为云南松.

2.3 火线强度

由表 8 可以看出, 3 种模拟输出结果的平均火线强度 (FLI) 在 $1530.57 \sim 6102.27 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$, 标准差在 $1711.26 \sim 7631.58$, 差异较大. Farsite 在 2 种可燃物模型下的输出结果类似, Farsite (Scott) 为 $(2115.89 \pm 2260.44) \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$, Farsite (Anderson) 为

$(1530.57 \pm 1711.26) \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$; Prometheus 与 Farsite 在 2 种可燃物模型下的差异较大, 达到了 $(6102.27 \pm 7631.58) \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$.

从 FLI 的空间分布来看, Farsite 在 2 种可燃物模型下的 FLI 在蔓延初期都较低, 大部分低于 $1700 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$, FLI 的最大区域出现在火头, 达到了 $1700 \sim 3500 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$; Prometheus 的 FLI 在大部分蔓延区域都低于 $1700 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$, 但在蔓延初期的着火点附近和火右翼区域出现了 $3500 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$ 以上的 FLI 极值(图 7). Farsite (Scott) 在蔓延区域中心以及火右翼出现了 3 片 FLI 为零的未过火地带(图 7). 从 FLI 的空间分布比较来看, Farsite (Scott) 总体较 Farsite (Anderson) 高, 特别是火头区域的差值达到 $1700 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$, 其他区域则主要集中在 $\pm 350 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$ 以内. Farsite (Scott) 比 Farsite (Anderson) 的 FLI 值高的区域占整个重合区的近 40%, 这些差异区的植被类型分布不均; Prometheus 与 Farsite 在 2 种可燃物模型下的 FLI 差异区主要集中在着火点附近的火翼边缘区域, 其中, Prometheus 的 FLI 高于

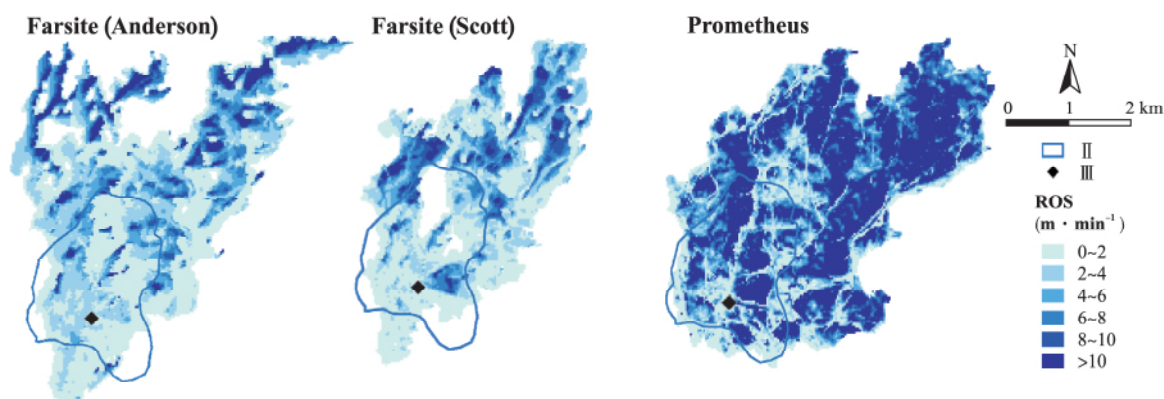


图 5 “3·29”模拟蔓延速度

Fig.5 Simulated rate of spread (ROS) for ‘3·29 Fire’.

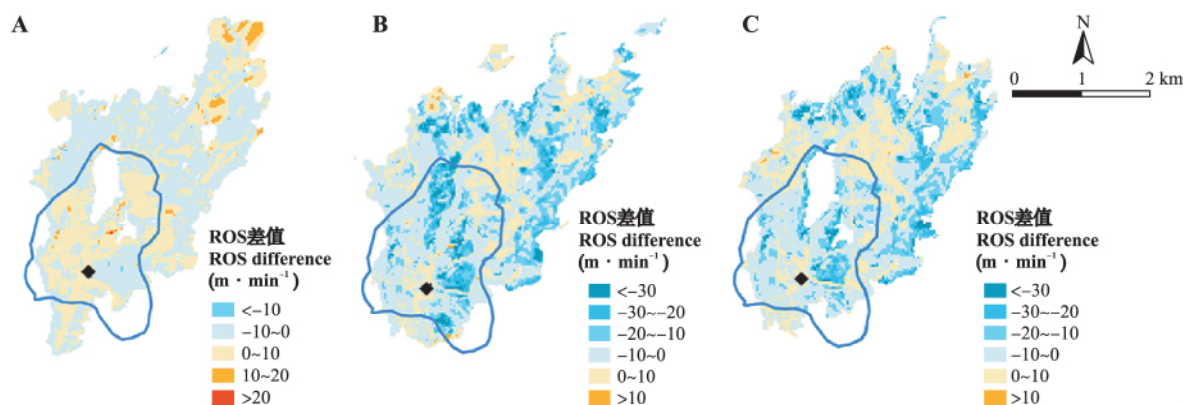


图 6 模拟蔓延速度的比较

Fig.6 Comparison of simulated rate of spread (ROS) for ‘3·29 Fire’.

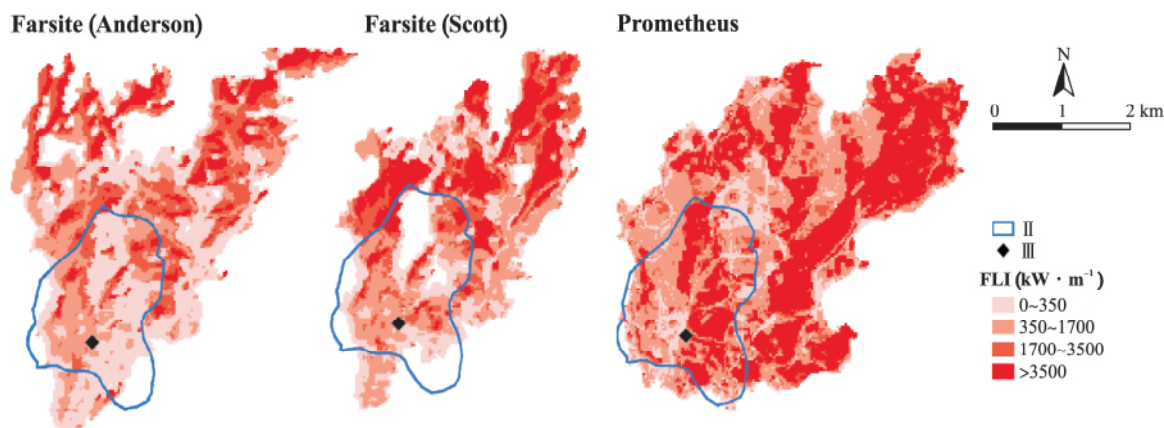


图7 “3·29”模拟火线强度

Fig.7 Simulated fireline intensity (FLI) for ‘3·29 Fire’.

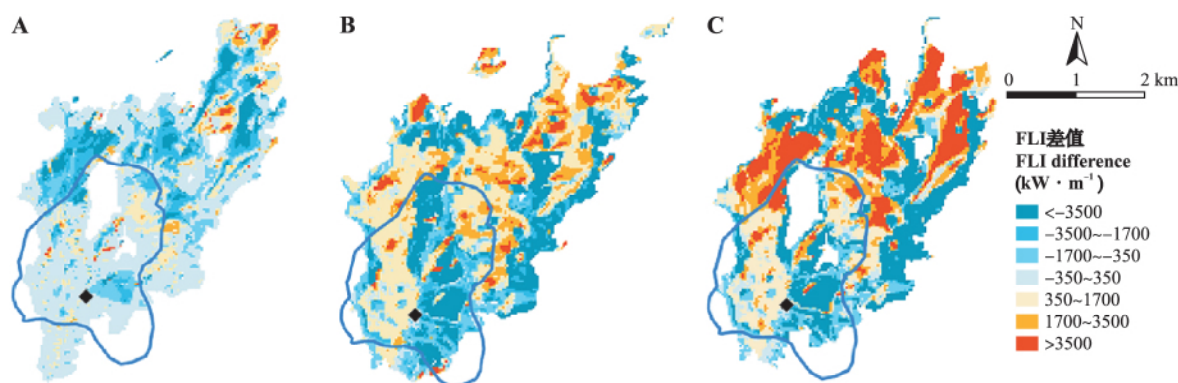


图8 模拟火线强度的比较

Fig.8 Comparison of simulated fireline intensity (FLI) for ‘3·29 Fire’.

Farsite 的区域主要集中在火右翼和火头区域,差值平均在 $3500 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$ 以上, Farsite 的 FLI 高于 Prometheus 的区域主要集中在火左翼和火场中心区域,差值 Farsite(Anderson) 在 $350 \sim 1700 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$ 、Farsite(Scott) 则在火左翼和火场中心近 50% 的区域比 Prometheus 高 $3500 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$ 以上(图 8), Prometheus 与 Farsite 在 2 种可燃物模型下的 FLI 差异区的植被类型主要为栎类灌木。

3 讨 论

相对于 Prometheus 模型, Farsite 模型在研究区背景下对火场范围、ROS、FLI 的模拟效果都更加贴合实际火场的情况。同时, Farsite 在 Scott 可燃物模型下的模拟精度进一步提高。但是, 3 种模拟输出结果的模拟精度都未达到实用阶段。究其原因主要有以下几方面: 1) Farsite 构建所使用的数据主要来源于美国境内, 美国在纬度上与我国基本一致, 可燃物具有更加近似的特征, 因此该模型更适合用于我国的西南林区; 2) Scott 可燃物模型集作为 Anderson 可

燃物模型集的改进, 引入了“动态可燃物”的概念^[26] 将活灌木根据其含水率的不同在活可燃物和死可燃物之间进行转换^[34], 这样的设定使得 Scott 模型的模拟效果较 Anderson 模型更接近于实际情况; 3) Farsite 在研究区的模拟精度仍未达到实用阶段, 主要原因来源于气象数据和可燃物特征 2 个方面。在气象数据方面, 由于 Farsite 内置的蔓延算法采用逐时的方法对气象数据进行抽象, 这样的处理无法完全还原气象因子的瞬时变化, 该处理会影响模拟精度。同时, 本研究中直接采用距离火场最近的气象台站的观测数据作为模拟时的气象数据, 由于距离和海拔差的关系, 该气象数据会与火场的真实气象情况存在差距。通常的解决方法是使用泰森多边形法、距离平方反比法、梯度距离平方反比法等插值方法对气象台站数据进行空间内插, 从而获得研究区的气象数据。但目前还没有公认插值效果较好的方法, 不同的方法插值结果迥然不同^[35-36], 这样的处理会影响对林火行为模拟模型的模拟精度做出客观评价, 因此, 本研究直接选用气象台站的观测数

据,保证了模拟精度和模拟模型的直接对应.在可燃物特征方面,本研究选用的 Farsite 是根据美国境内的可燃物特征所构建,由于所处气候带和地形等与西南林区仍存在不小的差异,可燃物特征也就不尽相同,因此,直接沿用这些可燃物模型会伴随较大的模拟偏差.但我国目前在研究区没有成熟的可燃物模型,直接采用这些内置可燃物模型进行评价,可得出模拟效果较好的可燃物模型,通过分析这些模拟效果较好的可燃物模型的构建思路,再根据我国境内的可燃物特征将其中的可燃物特征参数进行相应替换,就能快速地构建我国的可燃物模型.根据研究区的植被特征对可燃物模型进行自构,将大幅度提高 Farsite 相对于内置的可燃物模型的模拟精度^[32].

我国要进行高精度的林火行为模拟,以支持实际林火预防与扑救等业务工作,首先,需要根据纬度相似选取合适的模拟模型,例如中低纬度的西南林区适用于美国的 Farsite 模型,高纬度的东北林区则宜选用加拿大的 Prometheus 模型.其次,需要对当地主要植被类型的可燃物载量(活可燃物、不同时滞死可燃物)、床厚度、表面积体积比、燃烧热值和含水率等可燃物特征通过样地调查和内业试验的方法进行获取,并根据这些可燃物特征参数进行分类,而后再将分类后的可燃物特征参数对 Scott 等模拟效果较好的可燃物模型进行相应的参数替换,形成符合我国植被和气候状况的可燃物模型.再次,根据各林区的实际气象场特点选出插值拟合度较高的插值方法,并在风景旅游区、城市面山等重要林区增设气象台站,从提高插值拟合度和提高数据密度 2 方面下手,提高各火场进行林火行为模拟时所用气象数据的精度.最终,使 Farsite 和 Prometheus 这些成熟的林火行为模拟模型达到模型所在国的模拟精度,这样就能为我国实施精确的以火报火火险预报、根据潜在火行为进行重点林区的火险区划、根据林火发展态势选用合适的林火扑救策略等提供有力的技术支持.

参考文献

- [1] Shu L-F (舒立福), Wang M-Y (王明玉), Tian X-R (田晓瑞), *et al.* Calculation and description of forest fire behavior characters. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2004, **40**(3): 179-183 (in Chinese)
- [2] Fons WL. Analysis of fire spread in light forest fuels. *Journal of Agricultural Research*, 1946, **72**: 93-121
- [3] Finney MA. FARSITE: Fire Area Simulator: Model Development and Evaluation. Ogden, UT: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2004
- [4] Tymstra C, Bryce R, Wotton B, *et al.* Development and Structure of Prometheus: The Canadian Wildland Fire Growth Simulation Model, Information Report NOR-X-417. Edmonton, AB: Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, 2010
- [5] Li S-Y (李世友). The enlightenment to forest fire prevention and control in southwest of China from the study on '3.29' forest fire in Kunming area in 2006. *Journal of Safety Science and Technology* (中国安全生产科学技术), 2009, **5**(6): 48-52 (in Chinese)
- [6] Duan H (段辉). Characteristics of forest fire and countermeasures for forest fire prevention in central Yunnan forests. *Forest Inventory and Planning* (林业调查规划), 2009, **34**(A1): 47-49 (in Chinese)
- [7] Jiang H-Q (姜汉侨). Distributional features and zonal regularity of vegetation in Yunnan. *Acta Botanica Yunnanica* (云南植物研究), 1980, **2**(1): 22-32 (in Chinese)
- [8] Jiang H-Q (姜汉侨). Distributional features and zonal regularity of vegetation in Yunnan. *Acta Botanica Yunnanica* (云南植物研究), 1980, **2**(2): 142-151 (in Chinese)
- [9] Anderson HE. Aids to Determining Fuel Models for Estimating Fire Behavior, General Technical Report INT-122. Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1982
- [10] Andrews PL. BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System-BURN Subsystem, Part 1, General Technical Report INT-194. Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Research Station, 1986
- [11] Rothermel RC, Forest I. A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels, Research Paper INT-115. Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1972
- [12] Rothermel RC. Predicting Behavior and Size of Crown Fires in the Northern Rocky Mountains, Research Paper INT-438. Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experimental Station, 1991
- [13] Wagner CV. Conditions for the start and spread of crown fire. *Canadian Journal of Forest Research*, 1977, **7**: 23-34
- [14] Albini FA. Spot Fire Distance from Burning Trees—apredictive Model, General Technical Report INT-56. Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experimental Station, 1979
- [15] Albini FA, Brown JK, Reinhardt ED, *et al.* Calibration of a large fuel burnout model. *International Journal of Wildland Fire*, 1995, **5**: 173-192
- [16] Albini FA, Reinhardt ED. Modeling ignition and burning rate of large woody natural fuels. *International Journal of Wildland Fire*, 1995, **5**: 81-91
- [17] Nelson Jr RM. Prediction of diurnal change in 10-h fuel stick moisture content. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, **30**: 1071-1087
- [18] Forestry Canada Fire Danger Group. Development and Structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System, Information Report ST-X-3. Ottawa, ON:

- Forestry Canada, Science and Sustainable Development Directorate, 1992
- [19] Lawson B, Stocks B, Alexander M, *et al.* A system for predicting fire behavior in Canadian forests. The 8th National Conference on Fire and Forest Meteorology, Detroit, MI, 1985: 6–16
- [20] Richards GD. A general mathematical framework for modeling two-dimensional wildland fire spread. *International Journal of Wildland Fire*, 1995, **5**: 63–72
- [21] Varner Iii JM. Smoldering Fire in Long-unburned Longleaf Pine Forests: Linking Fuels with Fire Effects. Gainesville: University of Florida, 2005
- [22] Shan Y-L (单延龙), Zhang M (张敏), Yu Y-B (于永波). Current situation and developing trend of the study on forest fuel. *Journal of Beihua University (Natural Science)* (北华大学学报: 自然科学版), 2004, **5** (3): 264–269 (in Chinese)
- [23] Chander G, Markham B. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, **41**: 2674–2677
- [24] Zhang Z-M (张志明), He G-J (何国金). Radiometric calibration of Landsat 5 TM data. *Science and Technology Review (科技导报)*, 2008, **26** (7): 54–58 (in Chinese)
- [25] Guo N (郭锐). Vegetation index and its advances. *Arid Meteorology (干旱气象)*, 2003, **21** (4): 71–75 (in Chinese)
- [26] Scott JH, Burgan RE. Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel's Surface Fire Spread Model, RMRS-GTR-153. Fort Collins, CO: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2005
- [27] Luo Y (罗勇), Yan W-D (闫文德). Dynamic changes of vegetation cover in Changsha City based on MODIS/NDVI. *Journal of Central South University of Forestry and Technology (中南林业科技大学学报)*, 2014, **34** (6): 19–23 (in Chinese)
- [28] Shi S-L (史世莲), Zhang W-B (章文波), Wang G-Y (王国燕). The measurement of vegetation coverage and the analysis of seasonal change in Beijing. *Remote Sensing Technology and Application (遥感技术与应用)*, 2014, **29** (5): 866–872 (in Chinese)
- [29] Congalton RG. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 1991, **37**: 35–46
- [30] Legendre P, Legendre L. Numerical Ecology. 2nd Ed. Amsterdam: Elsevier Science, 1998
- [31] Filippi JB, Mallet V, Nader B. Evaluation of forest fire models on a large observation database. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, **14**: 3077–3091
- [32] Arca B, Duce P, Laconi M, *et al.* Evaluation of FAR-SITE simulator in Mediterranean maquis. *International Journal of Wildland Fire*, 2007, **16**: 563–572
- [33] Andrews PL, Heinsch FA, Schelvan L. How to Generate and Interpret Fire Characteristics Charts for Surface and Crown Fire Behavior, RMRS-GTR-253. Fort Collins, CO: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2011
- [34] Burgan RE. Estimating Live Fuel Moisture for the 1978 National Fire-Danger Rating System, General Technical Report INT-226. Ogden, UT: Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1979
- [35] Dong Z-N (董志南), Zheng S-N (郑拴宁), Zhao H-B (赵会兵), *et al.* Comparative analysis of methods of wind field simulation based on spatial interpolation. *Journal of Geo-information Science (地球信息科学学报)*, 2015, **17** (1): 37–44 (in Chinese)
- [36] Feng Z-M (封志明), Yang Y-Z (杨艳昭), Ding X-Q (丁晓强), *et al.* Optimization of the spatial interpolation methods for climate resources. *Geographical Research (地理研究)*, 2004, **23** (3): 357–364 (in Chinese)

作者简介 赵 璠,男,1983 年生,博士研究生,高级实验师. 主要从事森林防火、林业信息工程研究. E-mail: fffzhao@gmail.com

责任编辑 杨 弘

赵璠,舒立福,周汝良,等. 西南林区森林火灾火行为模拟模型评价. 应用生态学报, 2017, **28**(10): 3144–3154

Zhao F, Shu L-F, Zhou R-L, *et al.* Evaluating fire behavior simulators in southwestern China forest area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(10): 3144–3154 (in Chinese)