

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.005.008

# 林分尺度上的森林火灾风险评估方法及应用

宗学政, 田晓瑞\*, 刘畅

(中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业和草原局森林保护学重点开放性实验室, 北京 100091)

**摘要:** [目的] 基于森林燃烧概率、潜在火行为和火影响评估一个区域的森林火灾风险是有效开展林火管理的基础。[方法] 利用森林燃烧概率模拟软件 (Burn-P3) 模拟了北京九龙山林场的燃烧概率、潜在火强度、蔓延速度及火发生类型。根据林场内外各林班的生态重要性、生态脆弱性和保护等级确定火影响, 并考虑火对周围城镇和水源的潜在影响, 利用层次分析方法建立了林分尺度上的森林火灾风险评估体系。[结果] 结果表明, 研究区的平均燃烧概率为 0.0351, 燃烧概率高和很高的区域分别占研究区的 10.3% 和 6.0%。火烧以地表火和间歇性树冠火为主, 平均火强度及蔓延速度分别为  $2140.9 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$  和  $3.7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 。火行为指数高和很高的区域分别占 17.8% 和 14.0%。[结论] 研究区森林生态价值和火对环境的影响较高。森林火灾风险评估结果显示, 火灾风险高和很高的区域占 31.8%。西部、北部及南部的落叶松林和混交林的火灾风险较高, 未来需要加强针对性的林火管理。

**关键词:** 火灾风险; 燃烧概率; 火行为; 火影响; 暴露性; 火险评估

**中图分类号:** S762.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2021)05-0069-10

森林火灾风险评估是利用一个定量或定性指标描述一个区域潜在的林火发生可能及对环境产生的直接或间接影响<sup>[1-2]</sup>。森林火灾风险评估在林火管理技术发展起着重要作用<sup>[3]</sup>。火险评估结果是开展火险区划和可燃物管理等活动的必要基础<sup>[4]</sup>。

森林火灾风险评估的主要方法是根据火发生和火影响模型, 定量表达火灾风险<sup>[5]</sup>。地理信息系统 (GIS) 和遥感技术 (RS) 的应用为火险评估提供了更多的空间评价指标<sup>[6-7]</sup>。利用层次分析法对可能影响火动态的因素进行综合分析, 是火险评估中常用的方法<sup>[8-10]</sup>。森林火灾风险评估是我国实现科学林火管理工作的重要前提和基础, 现已开展了地区乃至全国范围的火险评估工作。如 You 等<sup>[11]</sup>采用地统计学方法从可燃物特征、地形、天气和人为活动角度分析了福建省武夷山的火险等级。Pan 等<sup>[12]</sup>利用逻辑斯蒂回归方程筛选了海拔、土地利用类型、地表温度、NDVI 和 GVMi 作为影响山西省林火发

生的驱动因子, 基于这些因子划分火险等级。田晓瑞等<sup>[13]</sup>基于经典自然灾害风险模型构建了森林火灾风险评估模型, 评估多气候情景下未来中国的森林火灾风险。

在林场尺度开展火险评估工作, 更有利于满足森林资源管理需求, 对林场开展针对性的森林防火措施具有重要的指导意义<sup>[14-15]</sup>。为了提高火险评估的可靠性, 火发生可能、火行为等指标也引入了火险评估。马振宇等<sup>[16]</sup>利用可燃物特征分类系统 (FCCS) 模拟了云南普洱市万掌山林场和莱阳保护区的潜在火行为, 并基于该指标评估了该区域的火险等级。在景观尺度上, 火是一种复杂的自然现象, 自然因素变化和人为干扰都会影响林火的发生、火行为和火灾损失。而景观模型的模拟可以较好反映区域内环境因子对林火发生及蔓延的影响, 其结果也能准确表示区域在一个时段内的火动态, 成为火险评估中的重要工具<sup>[17-20]</sup>。但利用这种方法

收稿日期: 2021-01-11 修回日期: 2021-03-30

基金项目: 中国林业科学研究院基本科研业务费专项 (CAFYBB2019ZB003) 和国家自然科学基金 (31770695) 共同资助

\* 通讯作者: 田晓瑞, 男, 研究员, 研究方向为森林防火, E-mail: tianxr@caf.ac.cn

进行林分尺度的火险评估在国内还很少。因此,有必要借助景观模型在林分尺度上开展森林火险评估,这有助于进一步提高在林场等基层单位的林火管理水平<sup>[21]</sup>。

本研究以北京市九龙山林场为例,利用森林燃烧概率模型(Burn-P3)模拟该区域的火动态特征。结合林场各植被类型的脆弱性和潜在森林火灾对承灾体的危害性,构建森林火灾风险评估指标体系,综合评估森林火灾风险。结果将有助于林场开展针对性的林火管理措施,减缓森林火灾风险。

## 1 研究区概况

研究区位于北京市门头沟区九龙山林场,呈“<”形围绕门头沟城区的西、北和南面,是门头沟城区森林生态建设中的重要组成部分。地理范围 115°59'~116°06'E, 39°54'~39°57'N, 总面积

19.1 km<sup>2</sup>。九龙山属太行山北端余脉,海拔 100~990 m。气候属大陆东岸季风气候,春季干旱多风,夏季炎热,冬季寒冷干燥。年平均气温为 11.7℃,1月平均气温最低(-4.3℃);7月平均气温最高(25.8℃)。年均降水量为 650.4 mm,集中在 7 和 8 月<sup>[22]</sup>。

该区域属于暖温带阔叶林带,主要树种包括:油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、侧柏(*Platycladus orientalis* (L.) Franco)、落叶松(*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.)、刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、栓皮栎(*Quercus variabilis* Bl.)、蒙古栎(*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb)、山杨(*Populus davidiana* Dode)、黄栌(*Cotinus coggygria* Scop.)、榆树(*Ulmus pumila* L.)、白蜡(*Fraxinus chinensis* Roxb)、五角枫(*Acer pictum* Thunb. ex Murray)等(图 1)。

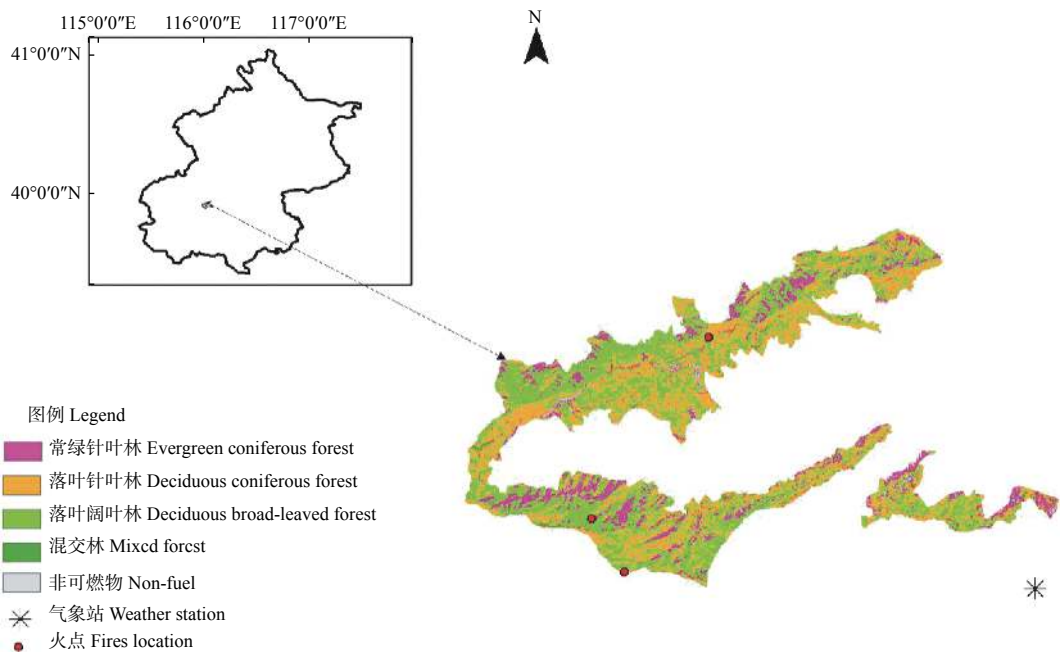


图 1 研究区位置与植被类型

Fig. 1 Study area and vegetation types

研究区的防火期为 10 月—翌年 5 月。根据 2011—2020 年的林火统计,林场共发生过 3 起森林火灾,火烧类型以地表火为主。

## 2 数据来源

2001—2018 年 MODIS-MCD64A1 过火面积数据(空间分辨率 500 m,时间分辨率 1 天)来源于 NASA (<https://earthdata.nasa.gov>)。研究区 DEM 数

据(分辨率为 30 m)源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。气象数据采用门头沟气象站(54505)逐日观测数据(2017 年 9 月至 2018 年 5 月),包括相对湿度、降水、温度、风速和风向。林内小班数据由中国林业科学研究院华北林业实验中心提供,包括树种组成、林龄、生态重要性、生态脆弱性和保护等级等信息。

## 3 研究方法

### 3.1 森林火灾风险评估模型

基于经典自然灾害风险模型构建森林火灾风险评估体系<sup>[23]</sup>(图2), 主要包括火发生可能、火行为、火影响和暴露性4个方面(公式1)。其中火发生可能性是指区域内林火发生可能, 以燃烧概率表示, 数值越高表示火发生可能性越高; 火行为指标包括火强度、蔓延速度及火发生类型, 数值越高表示火行为指标越大。这些指标通过 Burn-P3 模型

计算。火影响主要指火发生后对区域内森林资源的影响程度, 根据研究区的生态重要性、脆弱性和保护等级计算。暴露性主要考虑潜在的火烧可能对周围居民区或水源带来的安全威胁和污染影响, 数值越高表示对周围地理环境的影响越大。

$$H = P + B + V + E \quad (1)$$

式中:  $H$ —森林火灾风险;  $P$ —林火发生可能性;  $B$ —林火行为;  $V$ —火影响;  $E$ —暴露性。

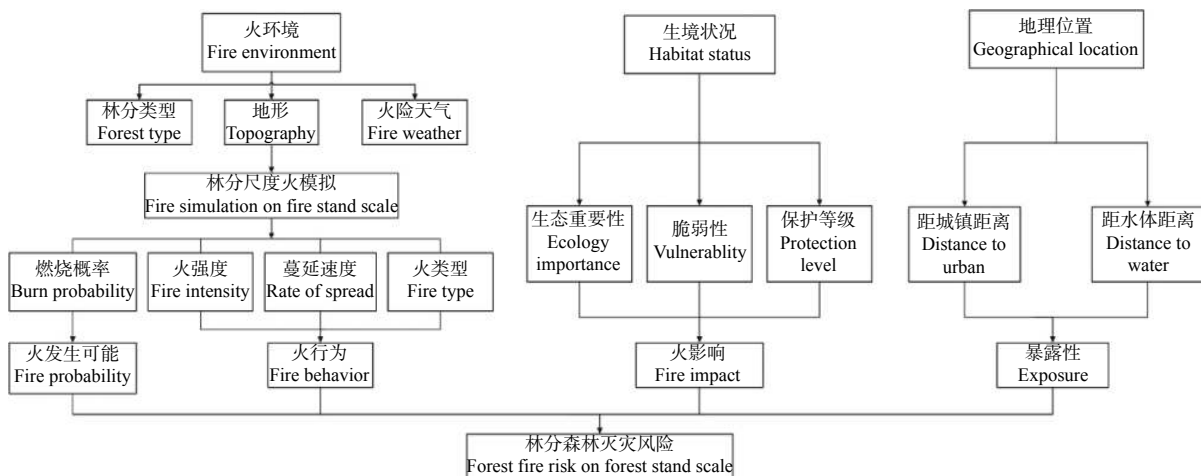


图2 森林火灾风险评估指标结构

Fig. 2 Structure chart for forest fire risk assessment index

### 3.2 燃烧概率及火行为模拟

Burn-P3 是一个景观尺度上的火模拟软件<sup>[24]</sup>。该模型可以模拟一个区域在给定时段内的每日火发生和蔓延过程。模型首先根据可燃物类型和天气条件判定每个栅格点能否发生火烧, 如果发生火烧则根据 Prometheus 火增长模型模拟蔓延过程。在一次迭代过程中, 同一格点不会发生重复燃烧的现象。每个格点的燃烧概率为该格点发生燃烧的迭代次数与总迭代次数的比值。

**3.2.1 Burn-P3 模型空间数据** Burn-P3 模拟需要输入的空间数据包括可燃物类型、海拔、风向和风速。所有空间数据采用相同投影和分辨率(100 m)(图3)。为了去除边界效应, 在模拟过程中添加 5 km 的缓冲区。

基于林分调查数据和高分 2 号遥感数据(2018 年 3 月)将研究区的植被分为常绿针叶林、落叶针叶林、阔叶林和针阔混交林等 4 类, 分别对应火行为预测系统(Canadian Fire Behavior Prediction,

FBP) 中的可燃物类型 C-3、M-1a、D-1 和 M-2b。C-3 表示成熟的短叶松林; M-1a 表示 80% 落叶针叶林和 20% 阔叶林; D-1 表示山杨等阔叶林; M-2b 表示由 50% 落叶针叶林和 50% 阔叶林组成的混交林<sup>[25]</sup>。

利用 WindNinja3.5.2 软件生成研究区风向/风速栅格数据。默认主导风速为  $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , 以  $45^\circ$  为间隔共创建了 8 种风向和风速栅格数据: 北( $0^\circ$ )、东北( $45^\circ$ )、东( $90^\circ$ )、东南( $135^\circ$ )、南( $180^\circ$ )、西南( $225^\circ$ )、西( $270^\circ$ )和西北( $315^\circ$ )<sup>[26]</sup>。

**3.2.2 Burn-P3 模型模拟参数** 模型需要输入的参数包括火险天气、蔓延天数频度分布、燃烧日时长和最小过火面积。模拟时段为 2017 年 9 月 1 日—2018 年 5 月 31 日。

火险天气由气象因子和火险天气指数组成。气象因子包括每日中午(12:00)观测的温度、湿度、风向、风速和过去 24 h 降水量。火险天气指数包括细小可燃物湿度码(Fine Fuel Moisture

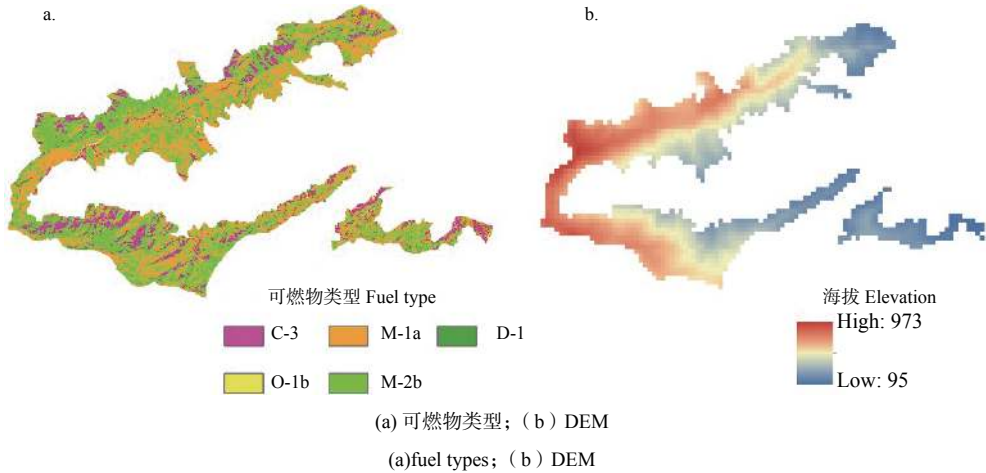


图3 Burn-P3 模型需要的空间数据  
Fig. 3 Spatial data for Burn-P3 model

Code, FFMC)、腐殖质湿度码 (Duff Moisture Code, DMC) 和干旱码 (Drought Code, DC) 以及初始蔓延速度 (Initial Spread Index, ISI)、累计指标 (Buildup Index, BUI) 和火险天气指数 (Fire Weather Index, FWI) 3 个火行为指标<sup>[25]</sup>。这部分指标采用 R 软件计算<sup>[27]</sup>, FFMC、DMC 和 DC 的初始值分别设为 85.0、6.0 和 15.0<sup>[25]</sup>。

蔓延天数频度根据 2001—2018 年 MODIS-MCD64A1 火产品数据对该区域的分析结果确定<sup>[24]</sup>。蔓延天数为 1 和 2 天的概率分别为 75% 和 25%。

模拟时段划分为春 (4 月 1 日—5 月 31 日)、秋 (9 月 1 日—10 月 31 日) 和冬 (11 月 1 日—翌年 3 月 1 日) 3 个季节。根据过去研究区及周边地区发生的火场信息, 设定春、秋和冬季的燃烧时长分别为 3、5 和 6 h。

由于研究区历史火发生次数很少, 因此每次模拟的火点位置采用随机点火模式<sup>[28]</sup>。

**3.2.3 Burn-P3 模型验证及燃烧概率模拟** 模型验证有助于提高模拟结果的真实性和可靠性<sup>[29]</sup>。不同火场面积大小的频度是验证 Burn-P3 模型的常用指标。该指标受蔓延天数频度、燃烧日时长参数的影响<sup>[24]</sup>。通过对这些参数进行调整以进行模型验证 (迭代次数为 100 次)。K-S 检验结果表明, 火场面积在 1.1~10 和 10.1~100 范围内的频度分别为 74% 和 26%, 与历史统计的火面积频度分布无显著差异 ( $D=0.2, P>0.95$ )。

利用验证后的模型参数对研究区进行燃烧概率的模拟, 迭代次数为 20000 次, 以获取相对稳定的燃烧概率图。模型的输出包括: 燃烧概率 (Burn

probability, BP) 分布图和每场火的信息表。火行为指标包括火强度 (Fire intensity, FI)、蔓延速度 (Rate of spread, ROS) 和树冠可燃物燃烧比例 (Crown fraction burned, CFB)。

### 3.3 各火险因子的赋值

采用专业打分法对各指标进行赋值, 确定各指标的相对重要性。燃烧概率、火强度和蔓延速度按照自然间断法 (Jenks) 划分为很低、低、中、高和很高 5 个等级<sup>[30]</sup>。燃烧概率越高, 表明火发生可能性越高<sup>[28]</sup>, 则分值越高。火强度和蔓延速度值越大, 则对植被造成的破坏及带来的扑救难度越大<sup>[24]</sup>, 其分值也越高。根据树冠可燃物燃烧比例可分为: 地表火 ( $CFB < 0.1$ ), 间歇性树冠火 ( $0.1 \leq CFB < 0.9$ ) 和稳进树冠火 ( $CFB \geq 0.9$ )<sup>[25]</sup>。稳进树冠火对森林资源破坏程度最大, 扑救也相对困难, 分值最高, 其次为间歇性树冠火和地表火<sup>[31]</sup> (表 1)。

研究区统计数据表明: 各小班生态重要性等级分为一般、比较重要、非常重要和极其重要。生态脆弱性分为一般、比较脆弱、非常脆弱和极其脆弱。保护等级分为一般保护地、特殊保护地和重点保护地。通过咨询相关专家, 生态重要性和保护等级越高, 其分值越高; 生态脆弱性等级越高, 表明易受林火干扰, 其分值也越高 (表 2)。

本研究利用 ArcGIS 中的 kernel 工具构建密度图。林火发生位置距离城镇或水源越近, 则可能造成的安全问题越大, 其分值也高<sup>[32]</sup> (表 3)。

### 3.4 各火险因子权重的确定及一致性检验

采用层次分析法 (AHP) 对各因子进行综合评



表1 燃烧概率及火行为赋值

Table 1 Assignments for burn probability and fire behavior

燃烧概率 Burn probability	火强度 Fire intensity	蔓延速度 Rate of spread	火类型 Fire type	赋值 Assignment
很低 Very low	很低 Very low	很低 Very low	地表火 Surface fire	1
低 Low	低 Low	低 Low	—	3
中 Moderate	中 Moderate	中 Moderate	间歇性树冠火 Intermittent crown fire	5
高 High	高 High	高 High	—	7
很高 Very high	很高 Very high	很高 Very high	稳进树冠火 Continuous crown fire	9

表2 生态价值赋值

Table 2 Assignment of ecological value

生态重要性 Ecology importance	生态脆弱性 Ecology vulnerability	保护等级 Protection level	赋值 Assignment
一般 Ordinary important	一般 Ordinary vulnerable	一般保护地 Ordinary protected area	1
比较重要 More important	比较脆弱 More vulnerable	—	3
非常重要 Very important	非常脆弱 Very vulnerable	特殊保护地 Special protected area	6
极其重要 Extreme important	极其脆弱 Extreme vulnerable	重点保护地 Key protected area	9

表3 影响环境因子赋值

Table 3 Assignment for environmental factors

距城镇距离 Distance to city	距水源距离 Distance to Water	赋值 Assignment
0~500 m	0~2 000 m	9
500.1~1 000 m	2 000.1~4 000 m	7
1 000.1~1 500 m	4 000.1~6 000 m	5
1 500.1~2 000 m	6 000.1~8 000 m	3
2 000.1~2 500 m	>8 000 m	1

利用随机性指标 (CR) 对判断矩阵进行一致性检验:

$$CR = CI/RI \quad (2)$$

$$CI = (\lambda_{max} - n)/(n - 1) \quad (3)$$

式中:  $n$  为判断矩阵的阶数;  $\lambda_{max}$  为判断矩阵的最大特征值;  $RI$  为随判断矩阵阶度而变的常数, 当  $n$  值为 1、2、3、4、5 时, 对应的  $RI$  值分别为 0、0、0.58、0.91、1.12。

当  $CR < 0.1$  时, 判断矩阵达到满意效果, 否则需要重新调整指标的分值, 直到具有满意的一致性为止。

根据各层指标的相对重要性确定了各层指标的权重 (表 4)。

判<sup>[23]</sup>。根据相关资料确定各指标之间的优先性, 构建判断矩阵。每个判断矩阵的最大特征根 ( $\lambda_{max}$ ) 所对应的特征向量即为各指标的权重, 进而确定各指标的权重  $\lambda_j$ ,  $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$ , ( $j = 1, 2, \dots, n$ )。

表4 森林火险评估指标的权重

Table 4 Weight of the indexes for forest fire risk assessment

B层指数 Index of B layer	B层权重 Weight of B layer	C层指标 Index of C layer	C层相对B层权重 Weight of C layer to the B layer	C层相对目标层权重 Weight of C layer to the target layer
火发生可能 Burn probability	0.42	燃烧概率 Fire probability	1.00	0.42
		火强度 Fire intensity	0.36	0.10
火行为 Fire behavior	0.33	蔓延速度 Rate of spread	0.18	0.05
		火类型 Fire type	0.46	0.12
		生态重要性 Ecology importance	0.27	0.05
火影响 Fire impact	0.17	生态脆弱性 Ecology vulnerability	0.27	0.05
		保护等级 Protection level	0.46	0.08
暴露性 Exposure	0.08	距城镇距离 Distance to city	0.63	0.06
		距水源距离 Distance to water	0.37	0.04

### 3.5 森林火险等级评估

利用 ArcGIS 对各指标进行归一化处理。然后利用公式 (1) 计算森林火灾风险等级。采用自然间断法将火险等级划分为很低、低、中、高和很高 5 个等级, 其中风险等级高和很高的区域是需要加强管理的区域<sup>[13]</sup>。

## 4 结果分析

### 4.1 燃烧概率及火行为

研究区平均燃烧概率为 0.0351 (变动范围 0~0.159)。燃烧概率等级很低、低、中、高和很高的区域分别占 33.2%、33.2%、17.3%、10.3% 和 6.0%。燃烧概率高和很高的区域主要在西部、北部及南部 (图 4-a)。东部森林由于受城镇和水源的阻隔, 森林分布破碎, 平均燃烧概率较低。

研究区的火类型以地表火为主, 占 64.7%; 间歇性树冠火主要位于南部及西部的针叶林内, 占 35.3%。区域内无稳进树冠火发生 (图 4-e)。潜在平均火强度和蔓延速度分别为  $2140.9 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$  (变动范围 0~16321.8  $\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ ) 和  $3.7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  (变动范围 0~23.3  $\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ )。火强度等级很低、低、中、高和很高的区域分别占 42.8%、38.1%、11.5%、5.4% 和 2.2%。蔓延速度等级很低、低、中、高和很高的区域分别占 34.0%、42.9%、15.8%、5.5% 和 1.8%。火强度和蔓延速度高和很高区域的空间分布相近, 主要在中北部和南部 (图 4-c, d)。火行为综合指标很低、低、中、高和很高的区域分别

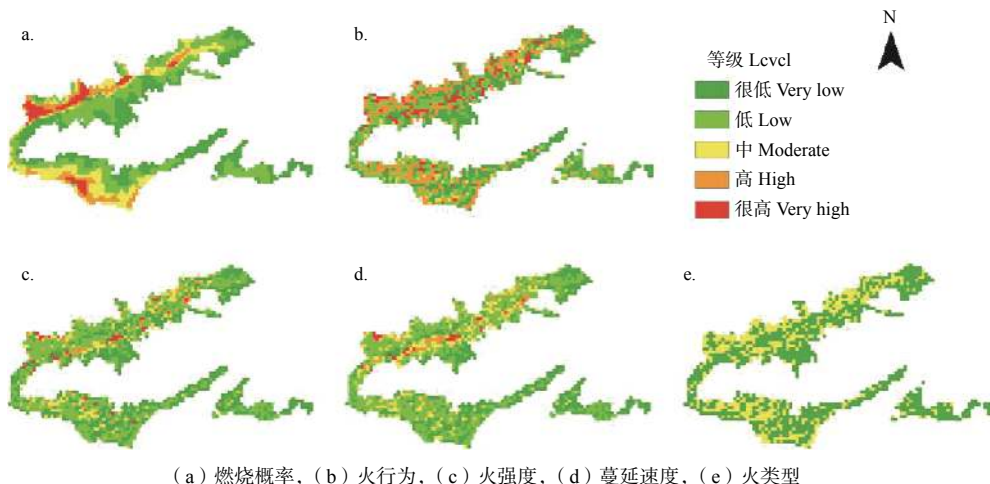
占 30.3%、31.6%、6.2%、17.8% 和 14.1%, 其中火行为指数高和很高的区域分布较零散 (图 4-b)。

4 种类型可燃物中, 落叶针叶林的平均燃烧概率最高, 为 0.0541。由于其燃烧后易形成树冠火, 导致火强度高、蔓延速度快, 其火行为指数也最高, 为 0.6414。针阔混交林的燃烧概率 (0.0477) 和火行为指数 (0.4927) 均高于常绿针叶林燃烧概率 (0.0362) 和火行为指数 (0.3678)。阔叶林的燃烧概率及火行为指数最低, 分别为 0.0265 和 0.0683。

### 4.2 火影响和暴露性

研究区中 93.4% 的林班生态重要性为非常重要或极其重要, 93.2% 属于重点保护对象。比较脆弱、非常脆弱和极其脆弱的林班比例分别为 59.7%、20.3% 和 7.8%。表明该地区的森林生态价值比较高。火发生后对该地区森林资源的潜在影响也较高, 平均火影响指数为 0.7375 (变动范围 0~1), 其中, 常绿针叶林指数最高 (0.7795), 其次为落叶针叶林、针阔混交林和阔叶林, 指数分别为 0.7571、0.7517 和 0.7367。火影响指数很低、低和中等级的区域分别占 4.4%、2.0% 和 32.5%, 主要分布在北部、中部及东部; 高和很高的区域分别占 0.8% 和 60.3%, 主要分布在研究区的中北部、中部及南部 (图 5)。

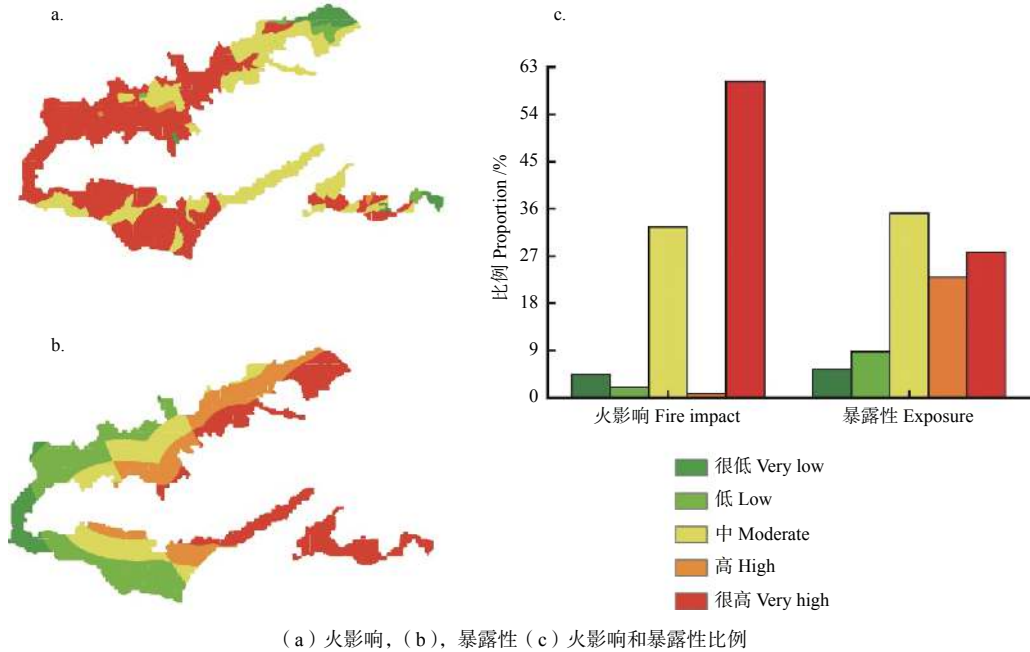
距城镇或水源越近, 带来的潜在安全及环境影响严重, 暴露性指数越高。研究区的平均暴露性指数为 0.5765, 暴露性很低、低和中的区域分别占



(a) Burn probability, (b) Fire behavior, (c) Fire intensity, (d) Rate of spread, (e) Fire type

图 4 区域燃烧概率及火行为

Fig. 4 Burn probability and fire behavior in study area



(a) 火影响, (b), 暴露性 (c) 火影响和暴露性比例  
 (a) Fire impact, (b) Exposure, (c) Proportion of different class for fire impact and exposure

图 5 区域火影响及暴露性

Fig. 5 Fire impact and exposure in study area

5.4%、8.8% 和 35.1%; 暴露性高和很高的区域分别占 23.0% 和 27.7% (图 5-b)。距离城镇和水源的距离越远的区域, 暴露性等级相应低。阔叶林暴露性指数最高 (0.6071), 其次为针阔混交林、落叶针叶林和常绿针叶林, 分别为 0.5387、0.5153 和 0.4940。

4.3 森林火灾风险综合评估

燃烧概率及火行为指数在火灾风险指数计算中

的比重大, 其对火灾风险综合指数的空间分布影响明显。森林火灾风险高和很高等级火险区分别占 16.2% 和 9.0%, 主要分布在西部、北部和南部; 森林火灾风险中等的区域占 22.9%, 其空间分布与高、很高等级燃烧概率区分布相近; 而火险很低或低的区域比例分别占 27.0% 和 30.5%, 主要分布在邻近城镇的区域 (图 6)。

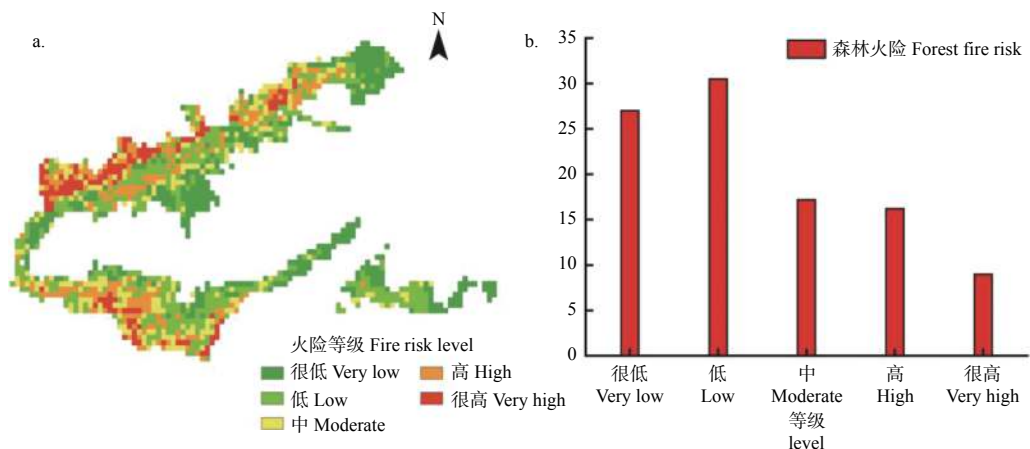


图 6 区域森林火险

Fig. 6 Forest fire risk in study area

落叶针叶林、针阔混交林、常绿针叶林和阔叶林的森林火灾风险值分别为 0.5163、0.4599、0.4237 和 0.283 0 (表 5)。落叶针叶林的火灾风险最高,

阔叶林最低, 针阔混交林和常绿针叶林的综合风险值比较相近。

表5 各植被类型的火险风险值  
Table 5 Fire risk assessment indexes for each forest types

林型 Forest types	燃烧概率 Burn probability	火行为 Fire behavior	生态价值 Ecological value	暴露性 Exposure	火险风险指数 Fire risk index
落叶针叶林 Deciduous coniferous forest	0.0541	0.6414	0.7571	0.5153	0.5831
针阔混交林 Mixed forest	0.0477	0.4927	0.7518	0.5387	0.5107
常绿针叶林 Evergreen coniferous forest	0.0362	0.3678	0.7795	0.4940	0.4343
阔叶林 Deciduous broad-leaved forest	0.0265	0.0683	0.7367	0.6071	0.2874

## 5 讨论

森林火灾风险评估是林火研究的重要内容，了解高火灾风险区域的空间分布及特征有助于开展针对性的林火预防和管理<sup>[1]</sup>。国内在林分尺度开展的森林火险评估研究主要采用层次分析法<sup>[14]</sup>、改进物元可拓法<sup>[33]</sup>和火险指数计算<sup>[15]</sup>等，这些研究中都没有考虑潜在的火行为及火影响。本研究提出的森林火灾风险评估方法考虑了火发生可能、火行为、林地生态价值和暴露性等4个指标。火发生可能和火行为基于火模拟结果定量描述研究区每个格点的燃烧概率和潜在火强度，林地的生态价值考虑了林分的生态功能和经济价值，暴露性则反映了火对社会和环境的安全威胁与影响。这一评估方法从多个角度对火灾风险进行了充分描述，对于基层单位开展针对性的林火管理活动降低森林火灾风险有指导意义。

火发生可能和火行为的模拟是评估的重点。Burn-P3模型根据可燃物、地形和火天气模拟一个区域燃烧概率和潜在火行为<sup>[29]</sup>。与单纯利用Rothermel模型计算林分的潜在火行为<sup>[34-35]</sup>相比，景观火模拟模型能更好地表现燃烧可能性和火行为的空间变化，表达信息更充分和直接<sup>[1, 16, 20-21]</sup>。研究结果表明落叶松林燃烧概率最大，其火行为指标也最高，其次为混交林和常绿针叶林。这一结果与单纯依靠可燃物参数和一般天气数据模拟的火行为有差异。过去利用Rothermel对西山林场的主要森林类型的火行为模拟研究表明，常绿针叶林的潜在火行为指标最高<sup>[34-35]</sup>。这种差异产生的原因主要是由于本研究是在景观尺度上模拟一个防火期内每日可能发生的火烧，每次火烧的模拟基于调查的可燃物数据和真实的火天气数据进行模拟，各林分的燃烧不但受可燃物和天气因子的影响，还受到景观格局的影响。研究区的森林在空间分布上比较破碎，常绿针叶林分布邻近城镇或水源，与主要森林分布区在空间上不连续。因此，该区域的森林燃烧基本

局限在小的分布范围内，不受主要森林分布区的影响。Burn-P3模型还考虑了城镇和河流等非可燃物分布区对火蔓延的阻隔作用，因此，该区域的森林燃烧概率及火行为指标低于主要森林分布区的同可燃物类型的燃烧概率。研究区的针阔混交林以油松刺槐混交林或者侧柏-阔叶树混交林为主，防火期主要处于阔叶落叶期，针叶林和针阔混交林的火行为的差异主要表现为树冠火的差异。但研究区的火类型以地表火为主。因此，针叶林和混交林的燃烧概率和火灾风险较高。

受获取的气象数据限制，本研究的燃烧概率模拟只采用了一个火险期的火天气数据，其模拟结果只反映这个火险期或者与这个火险期类似的火天气条件下的燃烧性，其结果可能与极端条件下的火行为模拟结果存在差异。在今后的研究中应利用多时段火险天气以获取稳定的燃烧概率。

## 6 结论

研究区内燃烧概率高和很高的区域比例分别为10.3%和6.0%，火行为指数高和很高的区域比例分别为17.8%和14.0%。两者的空间分布相近，主要包括西部、北部及南部的针叶林和针阔混交林。落叶针叶林燃烧概率及火行为指数最高，阔叶林燃烧概率及火行为指数最低。生态价值指数最高的林分为常绿针叶林，最低的林分为阔叶林。而阔叶林的暴露性指数最高，常绿针叶林暴露性指数最低。

火灾风险高和很高的区域分别占16.2%和9.0%，落叶针叶林的火灾风险最高，阔叶林的火灾风险最低。西部、北部和南部的针叶林和针阔混交林是林火管理的重点区域。

## 参考文献:

- [1] Johnston L M, Wang X, Erni S, et al. Wildland fire risk research in Canada[J]. Environmental Reviews, 2020, 28(2): 164-186.
- [2] 郑忠, 高阳华, 杨庆媛, 等. 西南山地区域森林火险综合预报模型



- 研究——以重庆市为例[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(1): 152-161.
- [3] Ager A A, Preisler H K, Arca B, *et al.* Wildfire risk estimation in the Mediterranean area[J]. *Environmetrics*, 2014, 25(6): 384-396.
- [4] Mitsopoulos I, Trapatsas P, Xanthopoulos G. SYPYDA: A software tool for fire management in Mediterranean pine forests of Greece[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 121: 195-199.
- [5] Mahdavi A. Forests and rangelands' wildfire risk zoning using GIS and AHP techniques[J]. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 2012, 10(1): 43-52.
- [6] Kanga S, Sharma L K, Pandey P C, *et al.* Forest fire modeling to evaluate potential hazard to tourism sites using geospatial approach[J]. *Journal of Geomatics*, 2013, 7(1): 93-99.
- [7] Ajin R S, Ciobotaru A, Vinod P G, *et al.* Forest and wildland fire risk assessment using geospatial techniques: A case study of Nemmara forest division, Kerala, India[J]. *Journal of Wetlands Biodiversity*, 2015, 5: 29-37.
- [8] Eskandari S. A new approach for forest fire risk modeling using fuzzy AHP and GIS in Hyrcanian forests of Iran[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, 10(8): 190.
- [9] Kanga S, Tripathi G, Singh S K. Forest fire hazards vulnerability and risk assessment in Bhajji forest range of Himachal Pradesh (India): a geospatial approach[J]. *Journal of Remote Sensing & GIS*, 2017, 8(1): 1-16.
- [10] Matin M A, Chitale V S, Murthy M S R, *et al.* Understanding forest fire patterns and risk in Nepal using remote sensing, geographic information system and historical fire data[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2017, 26(4): 276-286.
- [11] You W, Lin L, Wu L, *et al.* Geographical information system-based forest fire risk assessment integrating national forest inventory data and analysis of its spatiotemporal variability[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 77: 176-184.
- [12] Pan J, Wang W, Li J. Building probabilistic models of fire occurrence and fire risk zoning using logistic regression in Shanxi Province, China[J]. *Natural Hazards*, 2016, 81(3): 1879-1899.
- [13] 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.
- [14] 苗庆林, 田晓瑞, 陈立光. 基于层次分析法的森林火灾危险区划——以徂徕山林场为例[J]. *火灾科学*, 2013, 22(3): 113-119.
- [15] 吴明山, 周汝良, 张明莎, 等. 林分尺度上的森林火灾动态评估[J]. *林业资源管理*, 2020(2): 126-134.
- [16] 马振宇, 陈博伟, 庞勇, 等. 基于林火特征分类模型的森林火情等级制图[J]. *国土资源遥感*, 2020, 32(1): 43-50.
- [17] Carmel Y, Paz S, Jahashan F, *et al.* Assessing fire risk using Monte Carlo simulations of fire spread[J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257(1): 370-377.
- [18] Thompson M P, Gilbertson-Day J W, Scott J H. Integrating pixel-and polygon-based approaches to wildfire risk assessment: Application to a high-value watershed on the Pike and San Isabel National Forests, Colorado, USA[J]. *Environmental Modeling & Assessment*, 2016, 21(1): 1-15.
- [19] Woo H, Chung W, Graham J M, *et al.* Forest fire risk assessment using point process modelling of fire occurrence and Monte Carlo fire simulation[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2017, 26(9): 789-805.
- [20] Yavuz M, Sağlam B, Küçük Ö, *et al.* Assessing forest fire behavior simulation using FlamMap software and remote sensing techniques in Western Black Sea Region, Turkey[J]. *Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 2018, 18(2): 171-188.
- [21] 赵璠, 舒立福, 周汝良, 等. 林火行为蔓延模型研究进展[J]. *世界林业研究*, 2017, 30(2): 46-50.
- [22] 张连金, 孙长忠, 赖光辉. 北京九龙山侧柏生态公益林空间结构分析与评价[J]. *林业科学研究*, 2018, 31(4): 75-82.
- [23] 冯长根, 李杰, 李生才. 层次分析法在中国安全科学研究中的应用[J]. *安全与环境学报*, 2018, 18(6): 2126-2130.
- [24] Parisien M A, Miller C, Ager A A, *et al.* Use of artificial landscapes to isolate controls on burn probability[J]. *Landscape Ecology*, 2010, 25(1): 79-93.
- [25] Stocks B J, Lynham T J, Lawson B D, *et al.* Canadian forest fire danger rating system: an overview[J]. *The Forestry Chronicle*, 1989, 65(4): 258-265.
- [26] Wagenbrenner N S, Forthofer J M, Lamb B K, *et al.* Downscaling surface wind predictions from numerical weather prediction models in complex terrain with WindNinja[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(8): 5229-5241.
- [27] Wang X, Wotton B M, Cantin A S, *et al.* cffdrs: an R package for the Canadian forest fire danger rating system[J]. *Ecological Processes*, 2017, 6(1): 1-11.
- [28] Wang X, Parisien M A, Taylor S W, *et al.* Future burn probability in south-central British Columbia[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2016, 25(2): 200-212.
- [29] Parisien M A, Dawe D A, Miller C, *et al.* Applications of simulation-based burn probability modelling: a review[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2020, 28(12): 913-926.
- [30] Chen J, Yang S, Li H, *et al.* Research on geographical environment unit division based on the method of natural breaks (Jenks)[J]. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 2013, 3: 47-50.
- [31] 赵凤君, 王明玉, 舒立福. 森林火灾中的树冠火研究[J]. *世界林业研究*, 2010, 23(1): 39-43.
- [32] 张继权, 刘兴朋, 佟志军. 草原火灾风险评价与分区——以吉林省西部草原为例[J]. *地理研究*, 2007(4): 755-762.
- [33] 耿志伟, 薛伟, 王海滨, 等. 基于改进物元可拓法的东北林区贮木场火灾风险评估[J]. *中国安全科学学报*, 2019, 29(6): 90-96.
- [34] 王凯, 牛树奎. 基于Rothermel模型的北京鹫峰国家森林公园潜在火行为[J]. *浙江农林大学学报*, 2016, 33(1): 42-50.
- [35] 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.

# Method and Application of Forest Fire Risk Assessment on Forest Stand Scale

ZONG Xue-zheng, TIAN Xiao-rui, LIU Chang

(Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Key Open Laboratory of Forest Protection, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China)

**Abstract:** [Objective] To study the forest fire risk assessment based on the burn probability, fire behavior, and potential fire impact. [Method] The Burn-P3 model was used to simulate the burn probability, potential fire intensity, fire spread, and fire type in the Jiulongshan Forest Farm. The fire impact was calculated from ecology importance, vulnerability, and protection level of each forest stand. The exposure indicated the impacts of fire on urban and water resources. The forest fire risk assessment system on forest farm scale was established by using analytic hierarchy process (AHP). [Result] The results showed that the average burn probability was 0.035 1 for the forest stand area, and the areas with high and very high burn probability accounted for 10.3% and 6.0%, respectively. The fire types are surface fire and intermitted crown fire. The average fire intensity and rate of spread were 2 140.9 kW/m<sup>2</sup> and 3.7 m/min, respectively. The areas with high and very high fire behavior index accounted for 17.8% and 14.0%, respectively. [Conclusion] The ecological value and potential fire impact of the forests are relative high and the fire risk assessment will be helpful to enhance the fire management. The fire risk assessment shows that the areas with high and very high fire danger rating account for 31.8%. The deciduous coniferous forest and mixed forest in west, north, and south parts of the farm show the higher fire risk, fire management activities should be strengthened for the purpose of risk mitigation.

**Keywords:** fire risk; burn probability; fire behavior; fire impact; exposure; risk assessment

(责任编辑: 崔 贝)