

基于 Rothermel 模型的北京鹫峰国家森林公园潜在火行为

王 凯, 牛树奎

(北京林业大学 林学院, 北京 100083)

摘要: Rothermel 模型以燃烧物理学为理论基础, 基于能量守恒定律, 属于物理机理模型。基于 Rothermel 模型, 利用 BehavePlus 5.0 5 软件, 采用自定义可燃物参数模型, 通过输入不同的可燃物模型参数, 包括不同时滞的地表枯枝负荷量、可燃物床层厚度、含水率、热值、风速、坡度等, 研究计算了不同可燃物湿度条件下北京鹫峰国家森林公园潜在地表火行为状况, 即蔓延速率、单位面积发热量、火线强度和火焰高度等。结果表明: 4 种林型火行为指标均随可燃物湿度、坡度增大而降低, 油松 *Pinus tabuliformis* 林极易发生高强度地表火, 侧柏 *Platycladus orientalis* 林易发生中强度地表火, 华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii* 因本身难燃, 仅可能发生低强度地表火, 栓皮栎 *Quercus variabilis* 林因地表凋落物累积较多, 且林分通风条件好, 在低湿度、干旱条件下易发生中等强度地表火, 对林分结构造成破坏。因此, 在护林防火工作中, 我们要以油松、侧柏林防火为主, 及时清理林下有效可燃物, 减少可燃物累积, 防止林火的发生与蔓延, 最大程度减少森林资源损失。图 5 表 3 参 19

关键词: 森林保护学; Rothermel 模型; BehavePlus; 潜在火行为; 鹫峰国家森林公园

中图分类号: S762.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2016)01-0042-09

Research on the potential fire behavior in Jiufeng National Forest Park of Beijing based on the Rothermel Model

WANG Kai, NIU Shukui

(Forestry College, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: To minimize the loss of forest resources by preventing the onset and spread of forest fires, the potential behavior of surface fire in different fuel moisture conditions were studied based on the Rothermel Model in Jiufeng National Forest Park of Beijing. The Rothermel Model is a physical mechanism model which is based on the theory of combustion physics and the law of conservation of energy. BehavePlus 5.05 software was used with input fuel parameters including surface dead branches with different load delays, thickness layer of the fuel bed, moisture content, calorific power, wind speed, and slope, to calculate forest fire behavior indicator of four forest types: speed of propagation, heat per unit area, fire line intensity, and flame length. The results showed that the forest fire behavior indicators of four forest types decreased with increase of fuel moisture content and slope value. High strength of surface fire easily occurred in *Pinus tabuliformis* forest. *Platycladus orientalis* Franco forest had a potential of medium strength of surface fire. The *Larix principis-rupprechtii* was difficult to be burned, and had only a possibility of low strength of surface fire. Owing to more accumulation of surface fuel and convenient ventilation conditions in the stand, *Quercus variabilis* forest had a potential of medium strength of surface fire in condition of low humidity and drought, easily causing damage to stand structure. Therefore, in process of forest fire prevention, priority should be given to *Pinus tabuliformis* and *Platycladus orientalis* Franco forests to timely cleaning the undergrowth fuel and to decrease the fuel accumulation. [Ch, 5 fig, 3 tab, 19 ref.]

收稿日期: 2015-03-16; 修回日期: 2015-04-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31270696)

作者简介: 王凯, 从事生态学研究。E-mail: 499826236@qq.com。通信作者: 牛树奎, 教授, 从事生态学研究。E-mail: shukuiniu@163.com

Key words: forest protection; Rothermel Fire-Spread Model; BehavePlus; potential fire behaviors; Jiufeng National Forest Park

森林火灾烧毁珍贵植物(如山珍、药材),烧死烧伤野生动物,破坏森林根系对土壤的固定作用,引发水土流失。燃烧产生大量烟雾,导致空气污染,位居破坏森林的三大灾害(林火、病害、虫害)之首。近年来,森林生态旅游作为一种新的休憩方式迅速崛起,由于人为活动过于频繁,森林保护意识淡薄,对森林环境的破坏也随之加大,森林火灾也快速增加。因此,充分认清森林火灾的起因、发生、发展过程,减少森林资源破坏,降低火灾风险是我们首要了解的内容。林火行为是指林火发生、发展,直至熄灭的全过程中着火、蔓延、能量释放、火强度、火灾种类等的综合特征,林内可燃物、火环境(气象、地形和植被)和火源等条件制约和控制火行为发生过程^[1]。按照火行为特征可分为地表火、地下火、树冠火、飞火、火旋风等特殊火行为^[2]。随着近年来地理信息技术的发展,影响林火发生的天气、可燃物条件等因素均被数据化,并建立了相关林火蔓延模型,火行为预报系统趋向可视化和实用化,能有效地为扑火决策提供依据。如以美国的 Rothermel 模型为代表的物理机理模型^[3],之后 ANDREWS 等^[4-10]在 Rothermel 模型的基础上,结合计算机技术,对林火展开信息化模拟研究,逐步建立了 BehavePlus 林火行为预测系统。以加拿大的国家林火蔓延模型为代表的半机理半统计模型,以澳大利亚的 McArthur 模型为代表的统计模型^[11]。王晓晶等^[12]利用 ArcView 实现数字高程模型(DEM)数据源的提取、模型转换,通过配准地形图、林相图,将影响林火蔓延的可燃物因子与 DEM 结合,在 ArcGIS 中实现林火行为的 3 维模拟。王明玉等^[13]采用加拿大火险天气指数(FWI)系统分析大兴安岭林区火险变化。柴瑞海等^[14]利用风速和含水率进行二元线性回归,建立草甸火顺风蔓延速度预测模型。宋卫国等^[15]基于森林火灾元胞自动机模型和数据分析,对火灾系统的幂律分布等自组织临界性特性进行了系统阐述。大多数研究都集中在林火行为的影响因子分析上,通过研究得出相关预测模型,对林火行为特征的表现研究较少,不能直观地表述林火行为对不同林型所造成的危害。因此,本研究应用 Rothermel 模型,结合 BehavePlus 5.0 软件,通过输入不同的可燃物模型参数,包括不同时滞的地表枯枝负荷量、可燃物床层厚度、含水率、热值、风速、坡度等,研究分析北京鹫峰国家森林公园的潜在火行为特征。

1 研究地概况

鹫峰森林公园位于北京城西 30 km, 39°54'N, 116°28'E, 横跨海淀、门头沟 2 区, 占地 832.04 hm², 海拔为 100~1 153 m, 坡度 16°~35°, 年均气温为 12.2 °C, 最高气温 39.7 °C, 最低气温 -19.6 °C, 年降水量近 700 mm, 多集中在 7-8 月。2009 年, 鹫峰森林公园被北京市旅游局正式批准为 3A 级旅游景区, 是目前北京市距离城区最近的国家级森林公园。本研究试验样地就位于森林公园内。

植被属于温带落叶林带的山地栎林和油松 *Pinus tabulaeformis* 林带, 森林覆盖率高达 96.2%, 共有陆地植物 110 科 313 属 684 种。针叶林以人工油松林和侧柏 *Platycladus orientalis* 林为主, 山顶区域覆盖有部分华山松 *Pinus armandii* 林、华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii* 林。阔叶林主要为以栓皮栎 *Quercus variabilis* 为主的栎类混交林, 林下植被主要由荆条 *Vitex negundo* var. *heterophylla*, 酸枣 *Ziziphus jujuba*, 小叶鼠李 *Rhamnus parvifolia*, 孩儿拳头 *Grewia biloba*, 多花胡枝子 *Lespedeza fioribunda*, 三裂绣线菊 *Spiraea trilobata* 等灌木和披针叶薹草 *Carex rigescens*, 茜草 *Rubies cordifolia*, 灰菜 *Cheopodium album*, 丛生隐子草 *Cleistogeues caespitosa*, 狗尾草 *Setaira viridis* 等草本组成, 是绿色植物的天然储藏地。

2 研究方法

2.1 样地设置

在防火紧要期(10 月至翌年 3 月)内, 在公园内自山脚至山顶选择连续性较好, 人为干扰较少且具有代表性的油松、侧柏、华北落叶松、栓皮栎等林地分别设置 20 m × 20 m 的样地, 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气温。对乔木层利用每木检尺, 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(5 个·标准地⁻¹), 测定灌木种类、灌木基径、灌高, 采用收割法, 称取所有样本

鲜质量且取样；草本层采用 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 样方(5个·标准地⁻¹)，测定鲜草和枯草种类、草本盖度和高度，全部收割并分别称量、取样；地表凋落物层用 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 样方(5个·标准地⁻¹)，主要测量上、下层凋落物厚度、负荷量，以及1, 10, 100 h等不同时滞的枯枝负荷量，分别称量并取样，并对可燃物热值等理化性质进行测量。

2.2 火行为输入参数

林火行为与可燃物载量、风速、相对湿度等气象因素和坡度、坡向、坡位、海拔等地形因子息息相关。可燃物含水率与空气相对湿度变化成正比，不同地形下的可燃物载量也不一样，伴随风速的变化，林火行为也会发生明显变化。北京 54511 自动气象站点近 35 a 观测结果显示(图 1)：防火紧要期(10月至翌年3月)内，北京地区平均风速为 $2\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，但最大风速和极大风速分别达到 $10\sim 11\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $16\sim 18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。最小相对湿度为 $5\%\sim 10\%$ ，远远低于平均相对湿度(40%)。如遇连续干旱，极易发生森林火灾。

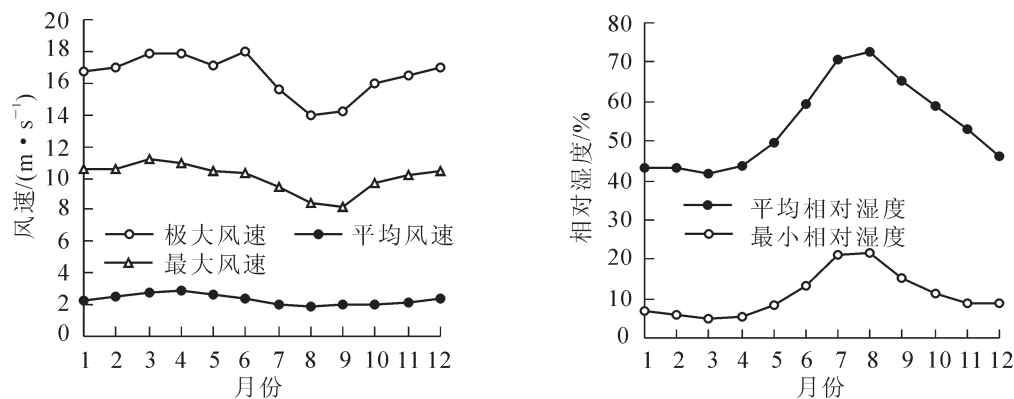


图 1 北京地区 54511 自动气象站点 1980–2014 年间月风速、相对湿度变化趋势

Figure 1 Wind speed, relative humidity change trend in the Beijing area by 54511 Automatic Weather Stations from 1980 to 2014

通过表 1~2 可以看出：华北落叶松林地表不同时滞可燃物累积均较多，达到 $5.778\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。因所处海拔较高，集中栽植在海拔 1 000 m 以上的鹫峰萝卜地顶端，坡度较缓，人为干扰较小所致。油松、侧柏林为人工林，大多在栽植在上坡和中坡位置，油松林常见于行道旁的半阴坡，因受人为干扰影响，且自然整枝现象比较明显，平均胸径较大，活枝下高和死枝下高均较高，达到 3.7 m 和 2.8 m，地表活草本较少，仅有 $0.079\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。侧柏林林龄较短，由于栽植较为偏僻，人为干扰较小，灌木丛生，且自然整枝能力较差，活枝和死枝下高均较低，分别为 2.4 m 和 1.5 m，且因栽植过密而导致一时滞枯枝负荷量较多，达到 $1.030\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。栓皮栎林位于海拔较低的下坡，且为阔叶树种，死枝下高较高，为 2.2 m，地表凋落物较少，人为干扰较为严重，地表可燃物总量只有 $3.469\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

表 1 各林型林分因子特征分析

Table 1 Each forest stand factors analysis

林型	海拔/m	坡度/(°)	坡位	坡向	平均胸径/cm	平均树高/m	活枝下高/m	死枝下高/m
油松林	413	31	上坡	北偏东 26°	14.8	6.4	3.7	2.8
侧柏林	398	21	中坡	北偏东 81°	10.6	6.9	2.4	1.5
栓皮栎林	272	27	下坡	北偏东 56°	12.3	7.3	2.5	2.2
华北落叶松林	996	12	坡顶	北偏东 45°	12.5	7.5	3.5	2.0

表 2 森林地表可燃物载量调查

Table 2 Survey of surface fuels loading

林型	地表可燃物载量/($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)							
	下层枯落物	上层枯落物	1 h 枯枝	10 h 枯枝	100 h 枯枝	活草本	活灌木	合计
油松林	0.364	0.419	0.589	0.434	0.522	0.079	1.508	3.917
侧柏林	0.452	0.368	1.030	0.359	0.835	0.577	1.945	5.566
栓皮栎林	0.167	0.336	0.358	0.205	0.308	0.768	1.327	3.469
华北落叶松林	0.613	0.503	0.847	0.991	0.794	0.369	1.661	5.778

2.3 模型及参数计算方法

2.3.1 Rothermel 模型 Rothermel 模型以燃烧物理学为理论基础，基于能量守恒定律，属于物理机理模型，它的基本假设是认为森林可燃物是连续分布的多孔燃料床，因此，这个模型适用于大部分可燃物类型。因为中国北方森林范围与美国北方森林纬度范围基本相同，气候状况差异性不明显，因此，借用美国林火行为研究中所采用的可燃物湿度系列，共 3 个等级，分别表示当地的第 90，第 95，第 97 百分点的火险天气条件^[16-17]，分别用 1-low，2-med，3-high 表示(表 3)。

2.3.2 BehavePlus 5.0 5 软件 BehavePlus 火模型系统是建立在 Rothermel 模型林火蔓延模型基础上的模拟林火行为的

计算机集成程序，广泛应用于美国国家防火系统。BehavePlus 软件运行于 Windows 95/98/2000 或 NT/Me /XP 以及 Vista 操作系统，可由用户选择固定可燃物类型或自定义可燃物参数等进行林火行为的模拟运算。我们在操作 BehavePlus 软件时，一般采用自定义可燃物参数，通过输入 1，10，100 h 等不同时滞地表枯落物、活灌木、活草本等可燃物载量及含水率、不同时滞表面积体积比、可燃物床层深度、林型主要可燃物热值、坡度、风速等因子，计算不同林型的潜在火行为状况，即蔓延速率、单位面积发热量、火线强度和火焰长度等^[18-19]，计算结果以表格图表等形式给出。该模型应用非常广泛，许多国家都采用该模型来进行火行为的研究，并且该模型可以根据当地的可燃物模型等来预测潜在的火行为。

2.3.3 火行为参数计算 目前，应用广泛的是 ROTHERMEL 于 1972 年在芬特逊研究基础上提出并建立的 Rothermel 模型：

$$R=I_R \xi(1+\theta_w+\theta_s)/(\rho_b \varepsilon_0 Q_{ig})。 \quad (1)$$

式(1)中： R 为火蔓延速度； I_R 为火反应强度； ξ 为与热传播有关的系数； θ_w 和 θ_s 分别为风和地形坡度影响系数；可燃物复合体烘干后的体密度是 ρ_b ； ε_0 为与体密度有关的加热系数；点燃单位质量可燃物需要的热量为 Q_{ig} 。本研究利用美国物理学家 BYRAM 在 1959 年提出计算火线强度的公式：

$$I=1.667HWR。 \quad (2)$$

式(2)中：火线强度用 I 表示，单位为 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ；可燃物热值用 H 表示，单位为 $\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ ；有效可燃物负荷量用 $W(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$ 表示；林火火蔓延速度用 $R(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$ 表示。BYRAM 同时提出结合火线强度来计算火焰长度的公式，转换为国际单位如下：

$$L_f=0.237I^{0.46}。 \quad (3)$$

式(3)中：火线强度用 $I(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$ 表示； L_f 为火焰长度(m)。

3 结果与分析

依据 Rothermel 地表火蔓延模型，结合 BehavePlus 5.0 5 软件，通过计算得出各林型潜在火行为特征参数，即林火蔓延速度、单位面积的发热量、火线强度、火焰高(长)度等。

3.1 林火蔓延速度

林火蔓延速度是预测林火行为过程中极为重要的参数之一，通过林火蔓延度计算，可以为林火扑救指挥员提供及时有效的火烧动态信息和火场变化规律，提高扑火效率，保证扑火人员安全，同时为计划火烧提供可靠的参考依据。

从图 2 可以看出：在低可燃物湿度(1-low)条件下，最大蔓延速率从大到小依次为栓皮栎林>侧柏林>油松林>华北落叶松林。这是由于栓皮栎为阔叶林，防火期内地表枯枝落叶相对较多，光线充足，通风条件好，极易发生高强度地表火；侧柏林地表可燃物多，但由于林龄较短，郁闭度高，通风条件较差，林火蔓延速率次之；油松林因自然整枝能力较强，且是林火防护重点，人为干扰因素较多，故最大蔓延速率较弱；华北落叶松因其本身难燃，最大蔓延速率最弱。随着可燃物湿度增加，林火蔓延速率明显变小。中等可燃物湿度(2-med)条件下，最大蔓延速率从大到小依次为侧柏林>油松林>华北落叶松林>栓皮栎林，栓皮栎林变化最大，侧柏林、油松林、华北落叶松林等蔓延速率降低 1/2，这是由于针

表 3 美国火行为可燃物模型湿度系列

Table 3 Humidity series of American fire havivor model

可燃物	可燃物湿度/%		
	1-low	2-med	3-high
1 h 死可燃物	3	6	12
10 h 死可燃物	4	7	13
100 h 死可燃物	5	8	14
活草本可燃物	70	120	170
活灌木可燃物	70	120	170

叶林本身油脂含量较栓皮栎林高所造成的；高可燃物湿度(3-high)条件下，最大蔓延速率从大到小依次为侧柏林>华北落叶松林>栓皮栎林 \geq 油松林，所有林型蔓延速率均较低，不易发生地表火。

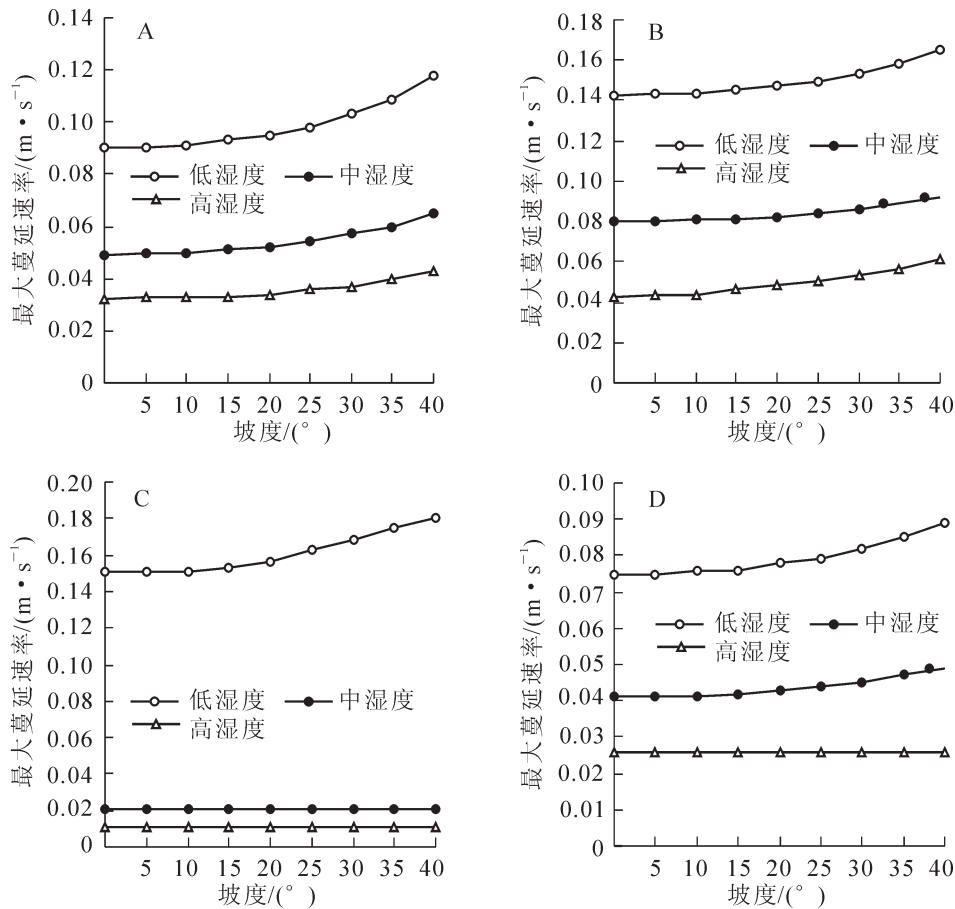


图2 油松林(A), 侧柏林(B), 栓皮栎林(C)和华北落叶松林(D)林火最大蔓延速率

Figure 2 Rate of forest fire spread of *Pinus tabulaeformis* (A), *Platycladus orientalis* (B), *Quercus variabilis* (C), *Larix principis-rupprechtii* (D) forests

3.2 单位面积发热量

单位面积发热量，指火头前沿单位燃烧面上释放出来的热量，也称火面强度，受可燃物热值及其载量变化影响，与风速、坡度和蔓延方向无关。在林火蔓延过程中，林火蔓延速度越快，散发的热量就越小，而慢速蔓延的林火会将彻底燃烧地表植被和枯枝落叶层，向周围散发的热量也较大。

从图3可以看出：低湿度条件下，4种林型单位面积发热量从大到小依次为油松林>栓皮栎林>侧柏林>华北落叶松林。华北落叶松地上枯枝的热值为 $19\ 839\ \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，而栓皮栎的热值 $22\ 283\ \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，油松林和侧柏林的热值分别为 $20\ 188$ 和 $21\ 232\ \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，栓皮栎林虽然热值最高，但载量较小，侧柏林蔓延速度较快，燃烧不充分，导致单位面积发热量不高。中湿度条件下，4种林型单位面积发热量从大到小依次为油松林>侧柏林>华北落叶松林>栓皮栎林，栓皮栎林因可燃物湿度影响不易燃烧，导致其单位面积发热量急剧降低。高湿度条件下，4种林型单位面积发热量从大到小依次为油松林>华北落叶松林>侧柏林>栓皮栎林。

3.3 火线强度

有林火专家认为，超过 $4\ 000\ \text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$ 的火强度会烧死林内所有生物体，只有火强度低于 $4\ 000\ \text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$ 时，才具有生态学意义。火强度一般变化很大，可将其分为： $750\ \text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$ 以下为低强度， $750\sim 3\ 500\ \text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$ 为中强度， $3\ 500\sim 4\ 000\ \text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$ 为高强度^[19]。

从图4可以看出：低湿度条件下，4种林型火线强度大小依次为油松林>栓皮栎林>侧柏林>华北落叶松林，其中，油松林有可能发生高强度地表火，侧柏林、栓皮栎林可能发生中强度地表火，华北落

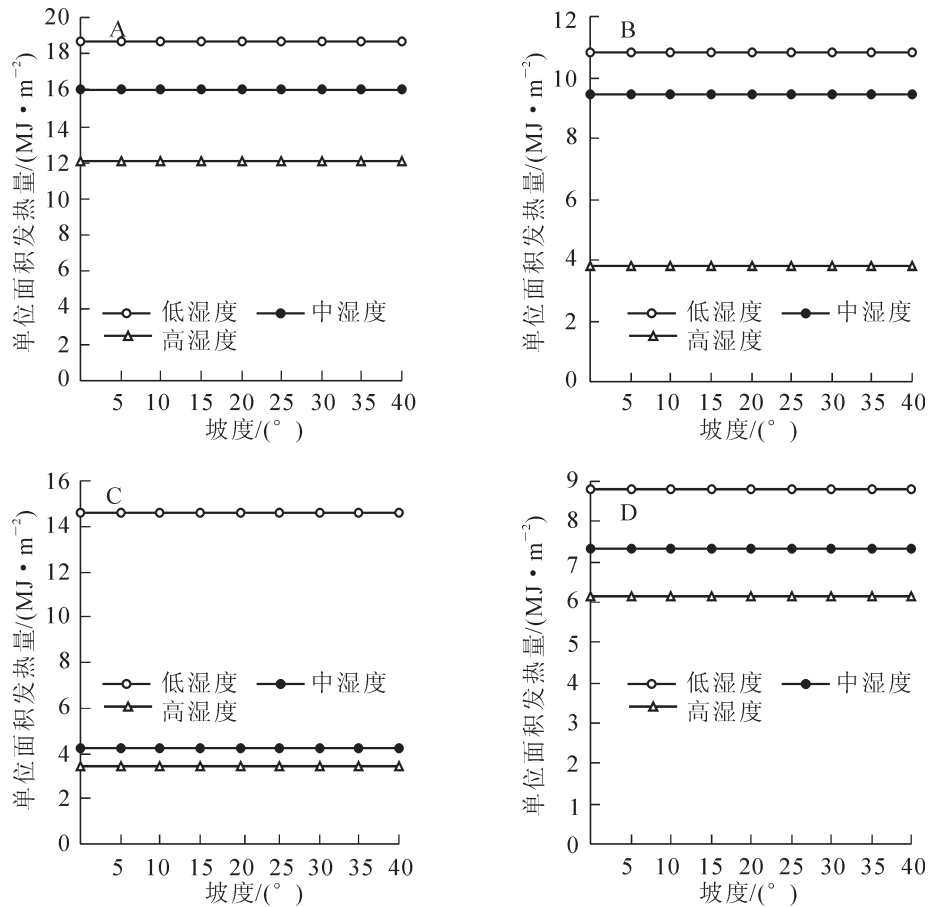


图 3 油松林(A), 侧柏林(B), 栓皮栎林(C)和华北落叶松林(D)单位面积发热量

Figure 3 Heat per unit area of *Pinus tabulaeformis* (A), *Platycladus orientalis* (B), *Quercus variabilis* (C), *Larix principis-rupprechtii* (D) forests

叶松林仅可能发生低强度地表火。这与火焰长度直接相关。中湿度条件下, 栓皮栎林火线强度急剧降低, 几乎降到 $100 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ 以下, 对林分难以构成威胁, 油松林依然可能发生中强度地表火, 侧柏、华北落叶松林仅可能发生低强度地表火。4 种林型火线强度大小依次为油松林 > 侧柏林 > 华北落叶松林 > 栓皮栎林。高湿度条件下, 4 种林型火线强度均降到 $750 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ 以下, 大小依次为油松林 > 华北落叶松林 > 侧柏林 > 栓皮栎林, 这对林分结构造成的威胁很小, 特别是侧柏林和栓皮栎林, 几乎降到 $150 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ 左右, 这种强度的火行为不仅对林分不会造成危害, 还能促进林下植被的更新, 为植物生长创造更好的条件。

3.4 火焰高度

通过火焰高度可以得出林火从地表转化为树冠火的可能性高低, 与火线强度密切相关, 火线强度越强, 火焰高度越高, 反之越低。

从图 5 可以看出: 低湿度条件下, 4 种林型火焰高度除华北落叶松外, 其他 3 种林型火焰高度均超过所属林型的死枝下高, 有可能在 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的最大风速条件下由地表火向树冠火转化。中湿度条件下, 栓皮栎林火焰高度缩短最快, 油松林缩短最慢, 大小依次为油松林 > 侧柏林 > 华北落叶松林 > 栓皮栎林, 4 种林型火焰高度均无法超过死枝下高, 因此, 向树冠火转化的几率大大降低。高湿度条件下, 油松林和华北落叶松林的火焰高度相对较高, 对林分下层依然构成威胁, 侧柏林和栓皮栎林火焰高度很小, 对林分结构破坏也最小。

4 结论与讨论

本研究利用 Rothermel 模型, 结合 BehavePlus 软件, 计算得出了鹫峰国家森林公园 4 种主要林型在不同湿度条件下可燃物的火行为指标。结果表明: 不同林型可燃物火行为均随可燃物湿度的增加而不断

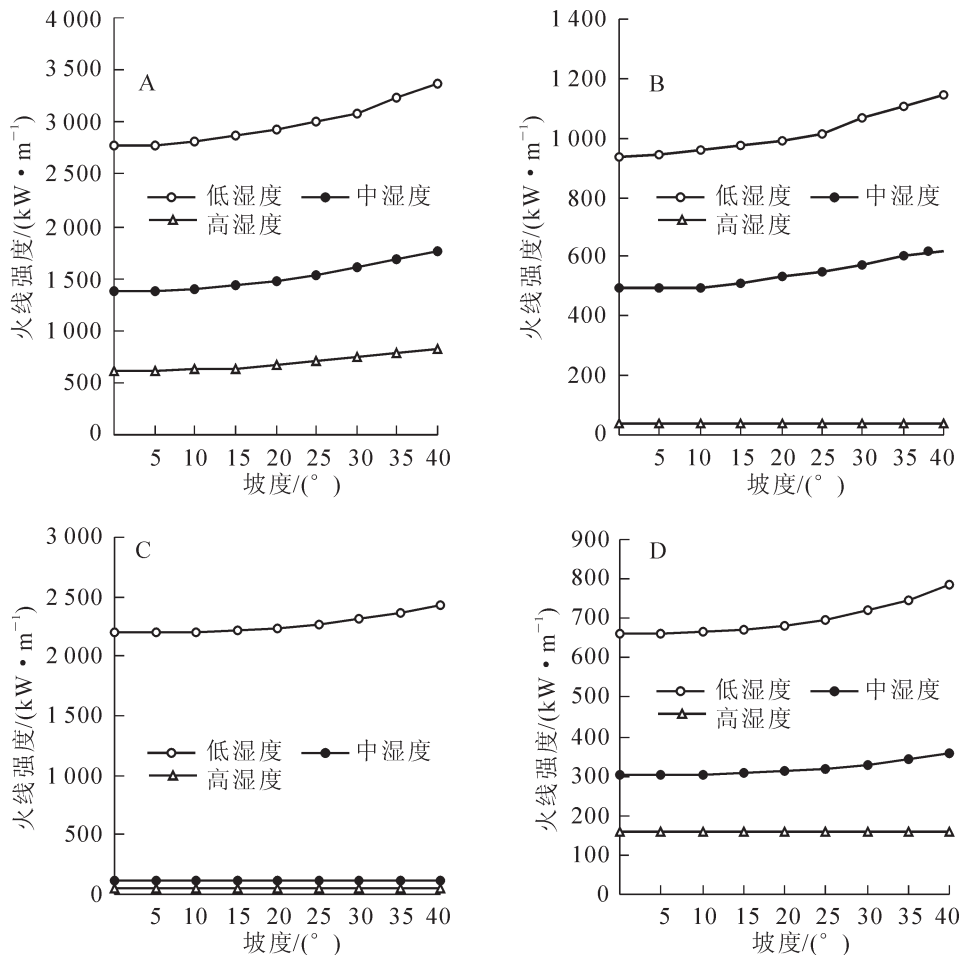


图4 油松林(A)、侧柏林(B)、栓皮栎林(C)和华北落叶松林(D)火线强度

Figure 4 Fire line intensity of *Pinus tabulaeformis* (A), *Platycladus orientalis* (B), *Quercus variabilis* (C), *Larix principis-rupprechtii* (D) forests

减小。栓皮栎林属阔叶林，火行为变化最明显，低湿度条件下极易发生中强度地表火，随着可燃物湿度增加，其火行为指标急剧降低，中、高湿度条件下，对林分结构都很难构成威胁，相反，还能起到一定的林分自然更新作用。而针叶林中，油松林地表可燃物载量较大，油脂含量较高，但因人为干扰因素较为严重，很可能在干旱大风天气下发生急进地表火，随坡度的增加而不断增大，且可能向树冠火转化。侧柏林由于林龄较短，且栽植过密，虽地表可燃物较多，连续性好，但郁闭度过高，通风条件不足，因此，在干旱大风条件下，极易发生中强度稳进地表火，由于其活枝下高较低，很容易向树冠蔓延形成新的树冠火。华北落叶松林由于其本身难燃，但由于其所处海拔较高，人为干扰小，地表可燃物累计较多，因此，在干旱大风条件下，能形成低强度稳进地表火，对林分结构造成破坏。通过分析得出，在森林防火工作中，我们要以油松林、栓皮栎林的防火工作为主，及时清理不同林型林下有效可燃物，减少可燃物载量，时刻关注大风、干旱等气象条件变化，最大限度减少森林火灾的发生，将森林资源的损失降到最低。本研究仅限于基于不同可燃物湿度条件下的 Rothermel 模型的北京鹫峰国家森林公园潜在地表火行为状况，要想进一步了解火灾实时动态发展，需要结合 ArcGIS, FlamMap 等空间分析软件，考虑到地形、环境等因素的变化等。

森林火灾被联合国粮农组织界定为世界第八大自然灾害。在全球气候变暖的背景下，国内外森林火灾呈现多发态势，森林防火形势异常严峻。中国是森林火灾多发的国家，做好林火管理工作，不仅关系到人民生命财产和自然资源的安全，更关系到国家的生态安全。因此，深入研究和掌握森林火灾发生的规律，最大程度减少森林资源的损失，为人们创造良好的绿色环境，是我们森林防火研究人员不可推卸的责任，我们要进一步研究林火发生的行为特征，充分发挥武警森林部队、森林公安等专业扑火队伍和护林员、民兵半专业扑火队伍等的作用，防止出现森林火灾大面积蔓延，人员伤亡等情况出现，为人们

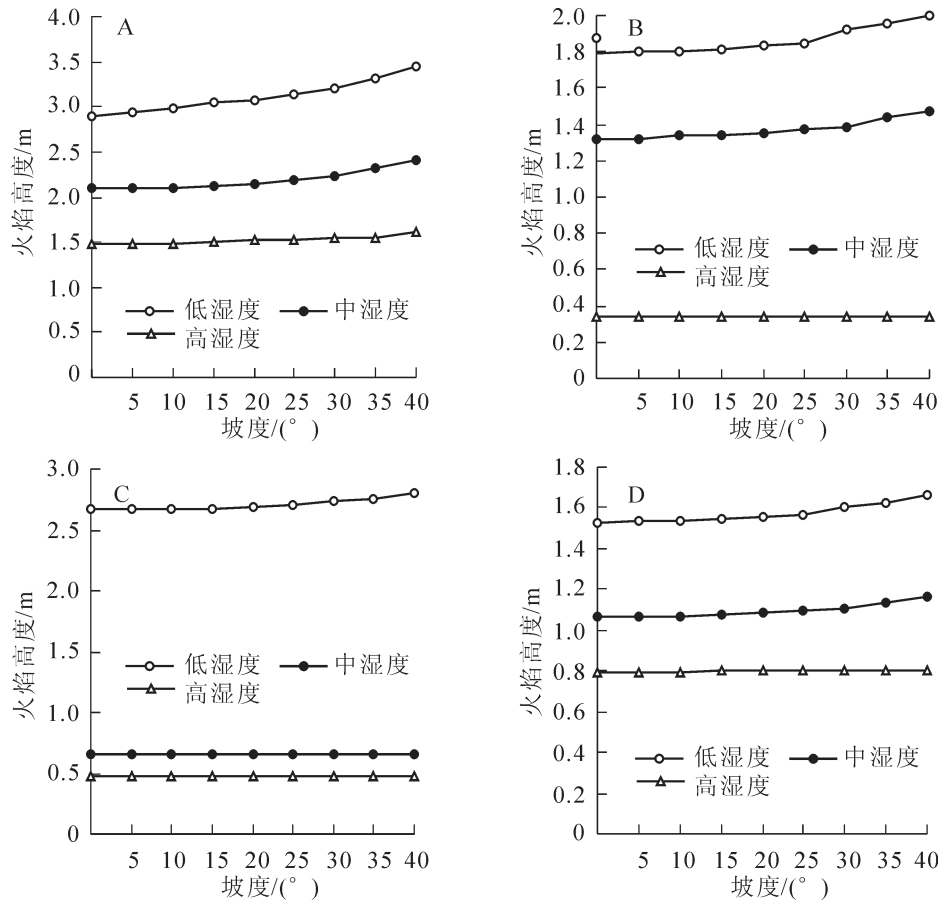


图 5 油松林(A), 侧柏林(B), 栓皮栎林(C)和华北落叶松林(D)火焰高度

Figure 5 Flame length of *Pinus tabuliformis* (A), *Platycladus orientalis* (B), *Quercus variabilis* (C), *Larix principis-rupprechtii* (D) forests

创造良好的生活环境而不断努力。

5 参考文献

- [1] 胡海清, 牛树奎, 金森, 等. 林火生态与管理[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005: 72 - 91.
- [2] 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.
WANG Mingyu, LI Tao, REN Yunmou, *et al.* Research advances in forest fire behavior and special forest fire behaviors [J]. *World For Res*, 2009, 22(2): 45 - 49.
- [3] ROTHERMEL R C. *A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels* [R]. Ogden: Intermountain Forest and Range Experiment Station of USDA Forest Service. USDA Forest Service Research Paper INT-115, 1972: 1 - 50.
- [4] ROTHERMEL R C. *How to Predict the Spread and Intensity of Forest and Range Fires* [R]. Ogden: Intermountain Forest and Range Experiment Station of USDA Forest Service, 1983: 1 - 5.
- [5] ROTHERMEL R C. *Predicting Behavior and Size of Crown Fires in the Northern Rocky Mountains* [R]. Ogden: Intermountain Forest and Range Experiment Station of USDA Forest Service. USDA Forest Service Research Paper INT-438, 1991: 1 - 46.
- [6] ANDREWS P L, ROTHERMEL R C. *Charts for Interpreting Wildland Fire Behavior Characteristics* [R]. Ogden: Intermountain Forest and Range Experiment Station of USDA Forest Service. General Technical Report/USDA Forest Service Research Paper INT-131, 1982: 1 - 22.
- [7] ANDREWS P L, CHASE C H. *BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System: BURN Subsystem, Part 1* [R]. Ogden: Intermountain Forest and Range Experiment Station of USDA Forest Service. General Technical Report/USDA Forest Service Research Paper INT-194, 1986: 20 - 24.

- [8] ANDREWS P L, CHASE C H. *BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System: BURN Subsystem, Part 2* [R]. Ogden: Intermountain Forest and Range Experiment Station of USDA Forest Service. General Technical Report /USDA Forest Service Research Paper INT-260, 1989: 1 – 134.
- [9] ANDREWS P L. BehavePlus fire modeling system: past, present, and future [C]//American Meteorological Society. *Proceedings of 7th Symposium on Fire and Forest Meteorology*. Maine: Bar Harbor, 2007: 23 – 25.
- [10] SCOTT J H, REINHARDT E D. *Stereo Photo Guide for Estimating Canopy Fuel Characteristics in Conifer Stands* [R]. Fort Collins CO: Rocky Mountain Research Station of USDA Forest Service. General Technical Report RMRS-GTR-145, 2005: 1 – 56.
- [11] 唐晓燕, 孟宪宇, 易浩若. 林火蔓延模型及蔓延模拟的研究进展[J]. 北京林业大学学报, 2002, **24**(1): 87 – 91.
TANG Xiaoyan, MENG Xianyu, YI Haoruo. Review and prospect of researches on forest fire spreading models and simulating method [J]. *J Beijing For Univ*, 2002, **24**(1): 87 – 91.
- [12] 王晓晶, 张晓丽, 黄华国. DEM 在林火行为模拟中的应用[J]. 林业资源管理, 2007(1): 99 – 101.
WANG Xiaojing, ZHANG Xiaoli, HUANG Huaguo. Application of digital elevation model in simulation of forest fire behaviors [J]. *For Resour Manage*, 2007(1): 99 – 101.
- [13] 王明玉, 舒立福, 田晓瑞, 等. 大兴安岭南部春季火行为特征及可燃物消耗[J]. 林业科学, 2009, **45**(3): 90 – 95.
WANG Mingyu, SHU Lifu, TIAN Xiaorui, *et al.* Fire behavior and consumption of fuel loadings in spring season in southern Daxing'an Mountains [J]. *Sci Silv Sin*, 2009, **45**(3): 90 – 95.
- [14] 柴瑞海, 赵雨森, 杜秀文. 大兴安岭林区草甸火顺风蔓延模型的研究[J]. 东北林业大学学报, 1988, **16**(4): 90 – 93.
CHAI Ruihai, ZHAO Yusen, DU Xiuwen. Studies on predicting model of grassland fire spread [J]. *J Northeast For Univ*, 1988, **16**(4): 90 – 93.
- [15] 宋卫国, 王健, 郑红阳. 火灾系统的自组织临界性分析[M]. 北京: 中国林业出版社, 2006: 101 – 114.
- [16] BURGAN R E, ROTHERMEL R C. *BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System: FUEL Subsystem* [R]. Ogden: Intermountain Forest and Range Experiment Station of USDA Forest Service, National Wildfire Coordinating Group PMS 439-1, 1984: 1 – 132.
- [17] PAGE W, JENKIS M J. Predicted fire behavior in selected mountain pine beetle-infested lodgepole pine [J]. *For Sci*, 2007, **53**(6): 662 – 674.
- [18] 郑焕能, 骆介禹, 耿玉超. 几种林火强度计算方法的评价[J]. 东北林业大学学报, 1988, **16**(5): 103 – 108.
ZHENG Huanneng, LUO Jieyu, GENG Yuchao. Evaluation of methods of calculation fire intensity [J]. *J Northeast For Univ*, **16**(5): 103 – 108.
- [19] 舒立福, 王明玉, 田晓瑞, 等. 关于森林燃烧火行为特征参数的计算与表述[J]. 林业科学, 2004, **40**(3): 179 – 183.
SHU Lifu, WANG Mingyu, TIAN Xiaorui, *et al.* Calculation and description of forest fire behavior characters [J]. *Sci Silv Sin*, 2004, **40**(3): 179 – 183.