北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

贵州喀斯特生态系统典型针叶林地表火蔓延速度影响因子及预测模型

张运林 罗华 罗爱霞 孙甜甜 丁波

Influencing factors and prediction models of surface fire spreading rate of typical coniferous forest in karst ecosystem of Guizhou Province, southwestern China

Zhang Yunlin, Luo Hua, Luo Aixia, Sun Tiantian, Ding Bo

引用本文:
张运林, 罗华, 罗爱霞, 孙甜甜, 丁波. 贵州喀斯特生态系统典型针叶林地表火蔓延速度影响因子及预测模型[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(5):37–45. doi: 10.12171/j.1000–1522.20220348
Zhang Yunlin, Luo Hua, Luo Aixia, Sun Tiantian, Ding Bo. Influencing factors and prediction models of surface fire spreading rate of typical coniferous forest in karst ecosystem of Guizhou Province, southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(5):37–45. doi: 10.12171/j.1000–1522.20220348

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220348

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于Rothermel模型的红松人工林地表可燃物蔓延速率及参数修正

Spread rate and parameter correction of surface fuel in *Pinus koraiensis* plantation based on Rothermel model

北京林业大学学报, 2021, 43(11): 79–88. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200247

北京山区主要针叶林潜在火行为及冠层危险指数研究

Potential fire behavior and canopy hazard index of main coniferous forests in Beijing mountain area

北京林业大学学报, 2018, 40(9): 55–62. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180109

妙峰山林场主要针叶林冠层特征及潜在火行为

Canopy characteristics and potential crown fire behavior of main coniferous forest in Miaofeng Mountain Forest Farm in Beijing

北京林业大学学报, 2018, 40(5): 82–89. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170408

基于贝叶斯模型平均法的森林火灾预测模型构建研究

Construction of forest fire prediction model based on Bayesian model averaging method: taking Dali Prefecture, Yunnan Province of southwestern China as an example

北京林业大学学报, 2021, 43(5): 44–52. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200173

北京地区8种树种枯死可燃物含水率预测模型及变化规律

Prediction models and changing rules of dead fuel moisture content of 8 forest species in Beijing area

北京林业大学学报, 2020, 42(6): 80–90. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190370

帽儿山地区典型地表可燃物含水率动态变化及预测模型

Dynamic change and prediction model of moisture content of surface fuel in Maoer Mountain of northeastern China

北京林业大学学报, 2019, 41(3): 49–57. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180326

DOI:10.12171/j.1000−1522.20220348

贵州喀斯特生态系统典型针叶林地表火蔓延速度影响因子及预测模型

张运林[1,2]　罗　华[1]　罗爱霞[1]　孙甜甜[1]　丁　波[1,2]
（1. 贵州师范学院生物科学学院，贵州 贵阳 550018；2. 贵州省高等学校林火生态与管理重点实验室，贵州 贵阳 550018）

摘要:【目的】喀斯特生态系统农林交错，火源复杂，极易发生森林火灾，对喀斯特生态系统恢复等造成严重影响，研究该区域典型针叶床层平地无风条件下的林火蔓延速度，对于该区域植被恢复和森林防灭火工作具有重要意义。**【方法】**以喀斯特生态系统内 3 种典型针叶林下地表可燃物为研究对象，在室内平地无风条件下，构造与野外结构相似的针叶床层，以床层含水率、厚度和载量因子的不同梯度组合为变量，进行了 188 次点烧实验。**【结果】**(1)相同条件下，云南松和华山松针叶床层的林火蔓延速度没有显著差异，但显著高于马尾松针叶床层($P < 0.001$)。(2)可燃物床层含水率对针叶床层蔓延速度有显著的阻滞作用，床层厚度有显著的促进作用，床层载量对云南松和华山松针叶床层的蔓延速度有促进作用。(3)马尾松、云南松和华山松针叶床层林火蔓延速度的加式模型平均绝对误差分别为 0.013、0.029 和 0.020 m/min，乘式模型的平均绝对误差分别为 0.014、0.023、0.018 m/min，两种预测模型能解释 75% 以上的林火蔓延速度变化情况。(4)加式模型的外推误差的平均绝对误差和相对误差分别为 0.108 m/min 和 42.50%，乘式模型外推效果优于加式模型，误差均值分别为 0.086 m/min 和 28.20%。**【结论】**研究揭示喀斯特生态系统典型针叶林可燃物床层特征对林火蔓延速度的影响情况，3 种针叶床层平地无风条件下蔓延速度较大，具有蔓延成灾的可能。综合预测精度和外推效果，建议选择乘式模型建立林火蔓延速度预测模型，为该生态系统内森林防灭火工作提供基础。

关键词：喀斯特；针叶林；地表火；蔓延速度；预测模型；预测精度
中图分类号：S762.2　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2024)05−0037−09
引文格式：张运林，罗华，罗爱霞，等. 贵州喀斯特生态系统典型针叶林地表火蔓延速度影响因子及预测模型［J］. 北京林业大学学报，2024，46(5)：37−45. Zhang Yunlin, Luo Hua, Luo Aixia, et al. Influencing factors and prediction models of surface fire spreading rate of typical coniferous forest in karst ecosystem of Guizhou Province, southwestern China［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(5): 37−45.

Influencing factors and prediction models of surface fire spreading rate of typical coniferous forest in karst ecosystem of Guizhou Province, southwestern China

Zhang Yunlin[1,2]　Luo Hua[1]　Luo Aixia[1]　Sun Tiantian[1]　Ding Bo[1,2]
(1. School of Biological Sciences, Guizhou Education University, Guiyang 550018, Guizhou, China;
2. Key Laboratory of Forest Fire Ecology and Management of Guizhou Province, Guiyang 550018, Guizhou, China)

Abstract: ［**Objective**］ The karst ecosystem is relatively vulnerable to forest fire due to interlaced agriculture and forestry and the fire source, which poses serious impact on the restoration of karst ecosystem. Thus, investigating the spreading rate of forest fire under no-wind and zero-slope conditions was of great significance for the restoration of vegetation and forest fire prevention in this region. ［**Method**］ This study focuses on the surface combustibles under three typical coniferous forests within the karst ecosystem. Under indoor no-wind and zero-wind conditions, coniferous beds layers similar to those found in the wild were

收稿日期: 2022−08−19　**修回日期:** 2023−12−20
基金项目: 贵州省科技支撑计划项目 [黔科合支撑 [2022]249]。
第一作者: 张运林，博士，副教授。主要研究方向：林火预测预报。Email: 251045762@qq.com　地址：550018 贵州省贵阳市乌当区高新路 115 号贵州师范学院。
责任作者: 丁波，博士，教授。主要研究方向：林学。Email: 754181531@qq.com　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

constructed, and 188 ignition experiments were conducted with different gradient combinations of moisture content, thickness, and loads factors as variables. [**Result**] (1) Under the same conditions, there was no significant difference in forest fire spreading rate between *Pinus yunnanensis* and *Pinus armandii*, but both rates were significantly higher than that of *Pinus massoniana* ($P < 0.001$). (2) The moisture content of fuelbed could significantly retard the spreading rate of all fuelbed, while the height of fuelbed had a significant promoting effect, and the loading had promoting effect on the spreading rate of the needle bed of *Pinus yunnanensis* and *Pinus armandii*. (3) Fitting with additive model, the mean absolute error of spreading rate of fuelbed of *Pinus massoniana*, *Pinus yunnanensis* and *Pinus armandii* was 0.013, 0.029 and 0.020 m/min, respectively, and the mean absolute error of multiplier model of forest fire spreading rate of fuelbed of *Pinus massoniana*, *Pinus yunnanensis* and *Pinus armandii* was 0.014, 0.023, 0.018 m/min, respectively. Besides, both prediction models could explain over 75% of the dynamic of forest fire spreading rate. (4) The mean absolute error and mean relative error of the extrapolation error of additive model were 0.108 m/min and 42.50%, respectively. The extrapolation effect of multiplicative model was better than that of the additive model, with the mean absolute error and relative error of 0.086 m/min and 28.20%, respectively. [**Conclusion**] This study reveals the influence of fulebed characteristics on the forest fire spreading rate in karst ecosystem. The spreading rate of three coniferous beds is high under the experiment condition, and it is possible to spread and cause disasters. Based on prediction accuracy and extrapolation effect, it is suggested to select multiple model to simulate forest fire spreading rate. These findings provide valuable understandings and insights for forest fire prevention in karst ecosystem.

Key words: karst; coniferous forest; surface fire; spreading rate; prediction model; prediction accuracy

林火蔓延速度是衡量林火行为中最重要的火行为指标[1]。研究表明，林火通常最先引燃地表可燃物。准确预测地表火蔓延速度，能够准确得到火场形状变化、面积扩展速度等，对于定量分析林火对生态系统的影响具有重要意义，也有助于指导计划烧除和保障扑火人员生命财产安全等[2]。因此，它是林火管理中重要研究内容。

地表火蔓延速度受可燃物类型、床层特征、天气和地形条件等的综合影响，定量分析因子对蔓延速度的影响，并建立高精度蔓延速度预测模型是林火科学的重要研究内容[3−5]。其中，由于平地无风条件时的地表火蔓延速度（rate of spread of surface fire，R_0）提供了可燃物床层燃烧性的衡量标准，也是计算在有风和坡度条件时的基础蔓延速度[6]（以 R_0 为基准带入坡度系数和风速系数），因此准确预测 R_0 十分重要。目前，大部分蔓延速度的研究集中在有风和有坡度条件下，而平地无风条件下的蔓延速度 R_0 的研究较少。Rossa 等[6−7]分析了几种 R_0 的经验模型预测效果，金森等[8]和张吉利[9]以红松（*Pinus koraiensis*）和蒙古栎为（*Quercus mongolica*）研究对象，分别建立了两种床层 R_0 的预测模型。这些研究主要集中在北方森林生态系统。

南方喀斯特生态系统作为全世界独特的生态系统，其森林凋落物床层具有独特性，生境条件和结构特征存在明显差异。该区域农林交错，人为干扰较大，火源情况复杂，极易发生森林火灾，对生态系统恢复等造成严重影响[10]。因此，研究该区域凋落物床层对生态恢复和森林防灭火工作至关重要。然而，目前关于无风条件时的地表火蔓延速度 R_0 的研究却几乎空白，这严重阻碍了相关工作的进展。因此，分析南方喀斯特生态系统凋落物床层在平地无风条件下蔓延速度的影响因子，并建立 R_0 的预测模型，对于评估该地区林分燃烧性和全面考虑风速和坡度因素的蔓延速度预测具有重要意义。

目前，蔓延速度预测模型可分为经验模型、物理（理论）模型和半经验模型。其中，经验模型本质上是通过点烧实验的统计描述建立的，模型简单易用，但外推性差[11−13]。物理模型主要是基于流体力学、燃烧学和热传递建立的模型，外推能力和预测精度都较好，但模型复杂，参数众多，很难在实际中得到应用[14−15]。半经验模型根据建立模型的方法更接近统计方法还是物理方法，可分为半经验法和半物理法，兼具统计模型和物理模型的优点[16−18]。对于 R_0 而言，由于没有考虑风速和坡度的影响，模型自变量是可燃物理化性质和床层特征，主要包括可燃物床层载量、密实度、厚度、含水率和可燃物表面积体积比等[19]。相较于物理模型，经验模型更关注影响效果和实用性，而非蔓延中各过程的燃烧机理。对于指定地区的特定林型，经验模型不仅预测效果好，且耗费人力物力最少[20]。因此，本研究采用经验模型建立平地无风条件下地表火蔓延速度 R_0 的预测方程。

研究表明，喀斯特区域针叶林火灾更易发生森林火灾。因此，本论文以南方喀斯特地区典型针叶林内针叶床层为研究对象进行点烧实验，解决以下科学问题：(1)影响喀斯特典型针叶林平地无风条件时的蔓延速度的主导因素；(2)为不同森林类型分别建立 R_0 的经验模型，并检验模型预测精度和外推性。研究结果将为南方喀斯特典型针叶林火后生态恢复和森林防火管理工作提供科学指导。鉴于室内实验能够最大限度地减少客观因素对实验结果的影响，且能更好地控制床层特征条件[7]，本研究采用室内点烧实验。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

研究区位于中国西南林区大娄山(107°43′40″～107°43′47″E，27°51′44″～27°52′09″N)(图 1)，属典型喀斯特生态系统，森林资源丰富。研究区气候类型为亚热带湿润季风气候区，年均气温约为 15.1 ℃，年均降水量达 1 116.1 mm，年均湿度为 76%。主要乔木树种包括马尾松(*Pinus massoniana*)、云南松(*Pinus yunnanensis*)、华山松(*Pinus armandii*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)和青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)等；灌木主要有稠李(*Padus racemosa*)、腊梅(*Chimonanthus praecox*)和直角荚蒾(*Viburnum foetidum* var. *rectangulatum*)等。

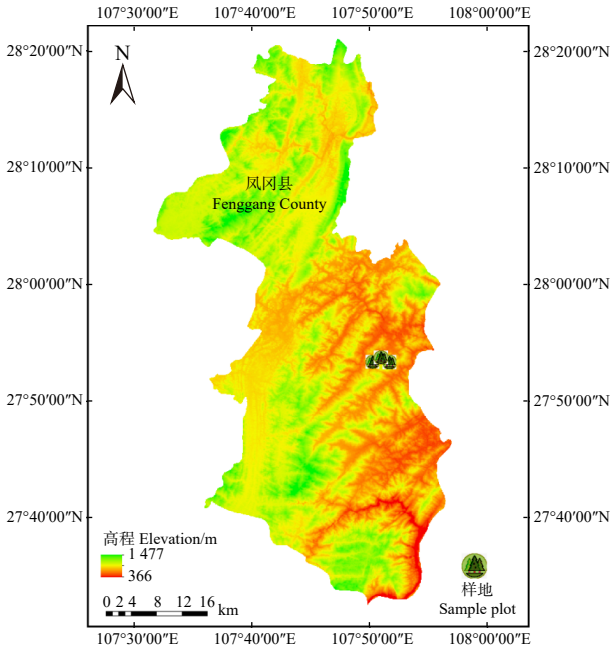


图 1　研究区概况

Fig. 1　Overview of study area

1.2　野外调查

马尾松、云南松和华山松是南方喀斯特生态系统中典型的森林类型，与其他非喀斯特生态系统相比，其林下植被类型更加复杂，生境条件存在明显差异。本研究在每种具有代表性的森林类型中分别设置 25.82 m × 25.82 m 的标准地，样地基本信息和位置见表 1 和图 1。研究区的防火期为每年 10 月至次年 5 月，其中 2—4 月为高火险期。由于当年落叶的地表可燃物与经过风化的可燃物理化性质存在差异[21]，为了使研究更具实际意义，于次年在每个林分类型的标准地采集地表可燃物。2021 年 2 月采用破坏性方法采集 3 个林分内地表可燃物，并在每个林分类型的标准地内随机设置 30 个 20 cm × 20 cm 的样方，调查地表可燃物床层特征。

1.3　室内燃烧实验

火行为点烧实验在室内进行。平地无风条件下地表火蔓延速度 R_0 主要与可燃物理化性质和床层特征有关，对于指定类型可燃物则主要与床层结构有关。因此，对每种针叶床层的室内点烧实验均是基于野外实验数据，根据可燃物床层的含水率、厚度和载量进行不同组合，并均匀铺设。可燃物床层含水率设置 4 个梯度：5%、10%、15%、20%；床层厚度设置 4 个梯度：2、3、5、9 cm；床层载量设置 4 个梯度：4、5、6、8 t/hm^2。所有变量误差均控制在±1% 以内，不同针叶类型的引燃和蔓延情况有所不同，例如在含水率为 20% 时，马尾松针叶床层大部分情况基本无法引燃。因此，马尾松、云南松和华山松的点烧次数，分别为 60、64 和 64 次。

使用大型烘箱在 105 ℃ 下对针叶进行烘干。在烘干过程中，定期取出部分针叶，利用快速水分测定仪(AND-ML50)测定针叶含水率。当针叶含水率满足实验设定条件时，即取出针叶进行点烧实验。根据本研究设定的载量梯度和实验时的含水率梯度，

表 1　样地基本信息

Tab. 1　Basic information of sample plots

林型 Forest type	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect	可燃物床层厚度 Fuelbed height/cm	可燃物床层载量/(t·hm^{-2}) Fuelbed load/(t·ha^{-1})	郁闭度 Canopy density	平均树高 Mean tree height/m	平均胸径 Mean DBH/cm
马尾松 *Pinus massoniana*	5	南坡 South slope	2.1～8.8	4.2～8.7	0.78	18.63	20.61
云南松 *Pinus yunnanensis*	9	南坡 South slope	3.6～9.2	5.3～8.3	0.82	17.99	19.88
华山松 *Pinus armandii*	7	东南坡 Southeast slope	1.8～8.7	5.2～8.8	0.85	19.23	21.76

计算所需可燃物质量，并按照床层厚度要求均匀地将针叶铺设在 2 m × 1 m 的燃烧床上。铺设好后，至少随机选择 20 个点，测定针叶床层厚度。若不满足实验厚度要求随时进行调整，直至平均厚度满足实验所需的床层厚度标准。

针叶燃烧床一端固定点火槽，倒入酒精后点燃形成一条火线，能够均匀引燃针叶床层。每次点烧时，火头呈一条直线向前蔓延，当火蔓延至“似稳态”时，利用针叶燃烧床两侧标杆记录林火蔓延速度[22−23]。标杆每隔 0.2 m 分布在燃烧床两层（每侧共计 10 个标杆），记录火头达到两个标杆的距离，即可计算出两个标杆间林火蔓延的瞬时速度，取“似稳态”后的 8 个瞬时速度的算数平均值即为该条件下的蔓延速度。为减少室内空气温湿度对蔓延速度的影响，实验在相似条件下进行，整个实验过程中平均温度和湿度分别为 22.8 ℃，变化幅度在±10% 以内。

1.4 数据分析

1.4.1 基本统计

统计整个实验过程中南方喀斯特 3 种典型针叶床层在平地无风条件下的林火蔓延速度，选择 *t*-检验分析这 3 种针叶床层的蔓延速度是否存在显著差异。

1.4.2 影响因子分析

针对每种针叶床层，以蔓延速度为因变量，床层含水率、厚度和载量为自变量，采用单因素方差分析来评估针叶床层特征及其交互作用对蔓延速度的影响。根据方差分析结果，以影响因子为横坐标，蔓延速度为纵坐标，绘制蔓延速度随影响因子的变化图，得到针叶床层特征对蔓延速度的具体影响情况。

1.4.3 针叶床层林火蔓延速度预测模型

本研究采用统计模型建立针叶床层林火蔓延速度预测模型，主要包括两种形式：加式模型和乘式模型。加式模型种，以针叶床层特征（含水率、厚度、载量）及其交互因子为自变量，林火蔓延速度为因变量，采用逐步回归方法得到最终预测模型（式 1）。对于乘式模型，则使用最小二乘法得到模型系数（式 2）。

$$R_0 = b_0 + \sum_{i=0}^{n} bX_i \tag{1}$$

$$R_0 = \prod (b_0 + bX_i) \tag{2}$$

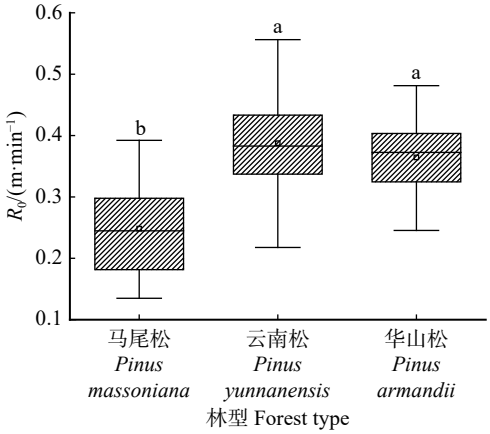
式中：R_0表示平地无风条件时的地表火蔓延速度（m/min）；b_0和 b 表示模型系数；X_i表示针叶床层特征；i 表示进入模型的床层特征数量。

对于每种针叶床层的林火蔓延速度预测模型，采用交叉验证计算模型平均绝对误差（mean absolute error，MAE）和平均相对误差（mean relative error，MRE），检验预测模型预测精度；以实测值为横坐标，预测值为纵坐标，绘制 1∶1 图，比较预测模型预测效果；分别加式和乘式模型，将预测模型外推至其余两种针叶床层，计算模型 MAE 和 MRE，并绘制外推柱状图，比较预测模型的外推效果。

2 结果与分析

2.1 R_0 基本统计信息

图 2 展示了中国南方喀斯特生态系统内 3 种典型针叶林内 R_0 的基本统计特征。可以看出，平地无风条件下，3 种可燃物类型的平均 R_0 由低到高依次为马尾松、华山松和云南松。其中，华山松和云南松的最大 R_0 均超过 0.5 m/min，分别达到了 0.528 4 和 0.556 2 m/min。马尾松的最大蔓延速率最小（0.392 3 m/min）。在研究范围内，华山松和云南松的蔓延速度显著高于马尾松（$P < 0.05$），两者间没有显著差异。



不同字母表示不同针叶林在平地无风条件下的蔓延速度差异显著（$P < 0.05$）。R_0.平地无风条件时的地表火蔓延速度。下同。Different letters indicate significant differences in spreading rate of varied coniferous forests under no-wind and zero-slope conditions at $P < 0.05$ level. R_0, spreading rate of surface fire. The same below.

图 2 R_0 基本信息

Fig. 2 Basic information of R_0

2.2 方差分析

从表 2 可以看出，床层含水率和厚度对 3 种典型森林的 R_0 均有极显著影响（$P < 0.001$），载量对云南松和华山松林下的 R_0 有显著影响（$P < 0.05$）。在马尾松林中，含水率与载量、含水率与厚度的交互作用对 R_0 均有极显著影响（$P < 0.001$）。然而，床层特征间的交互作用对云南松的 R_0 则没有显著影响。对于华山松，含水率与厚度的交互作用对 R_0 有极显著影响（$P < 0.001$）。

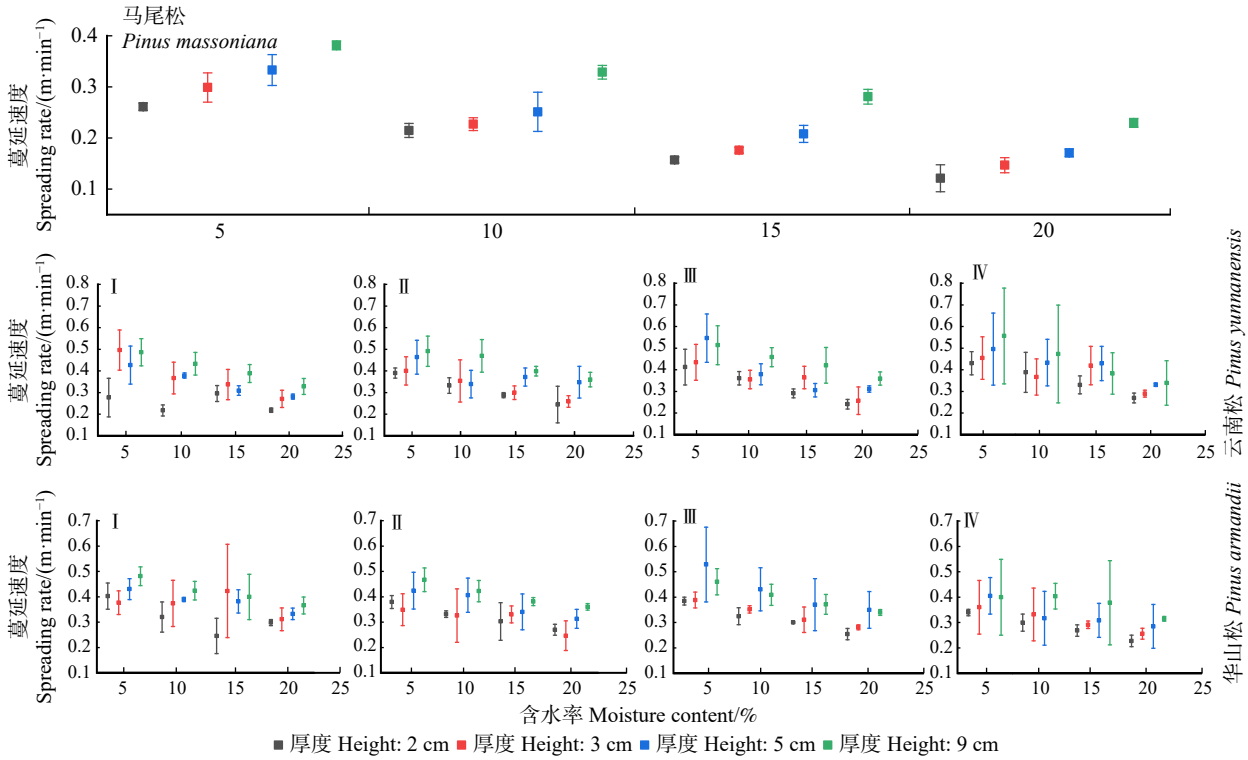
2.3 影响因子分析

由方差分析可知，马尾松针叶床层载量对 R_0 没有显著影响，因此仅分析含水率和厚度对 R_0 的影响。如图 3 所示，固定床层含水率时，马尾松床层的

表 2　方差分析结果

Tab. 2　Results of variance analysis

林型 Forest type	指标 Index	离差平方和 Sum of squared deviations	自由度 Degrees of freedom	均方差 Mean squared error	*F*	*P*
马尾松 *Pinus massoniana*	含水率 Moisture content	0.759 8	3	0.253 3	133.617 8	0.000 0
	载量 Load	0.011 2	2	0.005 6	2.951 9	0.054 4
	厚度 Height	0.059 8	2	0.029 9	15.769 3	0.000 0
	含水率 × 载量 Moisture content × load	0.034 1	6	0.005 7	3.000 4	0.007 8
	含水率 × 厚度 Moisture content × height	0.040 2	6	0.006 7	3.531 2	0.002 4
	载量 × 厚度 Load × height	0.002 5	1	0.002 5	1.307 0	0.254 2
云南松 *Pinus yunnanensis*	含水率 Moisture content	0.869 4	3	0.289 8	32.469 7	0.000 0
	载量 Load	0.083 7	3	0.027 9	3.125 2	0.026 1
	厚度 Height	0.483 0	5	0.096 6	10.823 1	0.000 0
	含水率 × 载量 Moisture content × load	0.098 6	7	0.014 1	1.578 8	0.140 9
	含水率 × 厚度 Moisture content × height	0.165 9	10	0.016 6	1.858 9	0.050 3
	载量 × 厚度 Load × height	0.002 7	1	0.002 7	0.300 7	0.583 9
华山松 *Pinus armandii*	含水率 Moisture content	0.382 2	3	0.127 4	14.744 2	0.000 0
	载量 Load	0.187 4	3	0.062 5	7.230 4	0.000 1
	厚度 Height	0.340 2	4	0.085 1	9.843 2	0.000 0
	含水率 × 载量 Moisture content × load	0.076 6	7	0.010 9	1.266 2	0.267 7
	含水率 × 厚度 Moisture content × height	0.241 3	8	0.030 2	3.490 9	0.000 8
	载量 × 厚度 Load × height	0.010 5	1	0.010 5	1.220 6	0.270 3



Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ分别表示 4、5、6 和 8 t/hm² 床层载量。Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ, and Ⅳ represent bed loads of 4, 5, 6, and 8 t/ha, respectively.

图 3　R_0 随床层特征动态变化

Fig. 3　Dynamic change of R_0 with characteristics of fuelbed

R_0 随床层厚度增加而增加。当床层厚度不变时，R_0 随着床层含水率的增加而下降。对于云南松，固定床层载量和厚度时，R_0 随着床层含水率的增加呈下降趋势。当云南松针叶床层载量和含水率不变时，床层厚度对 R_0 的影响基本成促进作用。当含水率和厚度不变时，随着床层载量的增加，云南松针叶床层 R_0 也呈增加趋势。影响因子对华山松针叶林 R_0 的影响结果与云南松基本相似。

2.4　预测模型

不论是加式模型还是乘式模型，3 种针叶床层

的含水率、载量和厚度均能解释 75% 以上的 R_0 情况。从调整后决定系数及预测误差来看，对于马尾松针叶床层，加式模型预测效果优于乘式模型，对于另外两种针叶床层，乘式模型预测效果则更好(表 3)。

对于马尾松林，当 R_0 实测值偏低时，加式模型更接近 1∶1 线，当蔓延速度超过 0.25 m/min 时，两种模型预测效果相差不大；对于云南松和华山松，乘式模型的预测效果均优于加式模型，但在使用乘式模型的过程中仍需要进行矫正，云南松矫正±0.01 m/min，华山松约为±0.008 m/min(图 4)。

图 5 展示了南方喀斯特 3 种典型林分的 R_0 预测模型外推误差图。对于加式模型，外推误差：MAE 和 MRE 的最小值仅为 0.037 m/min 和 10.70%，此时为云南松模型外推至华山松；对于乘式模型，外推误差 MAE 和 MRE 的最小值分别为 0.041 m/min 和 11.30%，此时为华山松模型外推至云南松。不论是加式模型还是乘式模型，外推误差基本均显著高于自身误差，加式模型的外推误差 MAE 和 MRE 的均值分别为

表 3 R_0 预测模型的参数和误差

Tab. 3 Parameter and error of prediction model of R_0

林型 Forest type	模型方程 Model equation	P	R^2_{adj}	平均绝对误差 Mean absolute error/(m·min^{-1})	平均相对误差 Mean relative error/%
马尾松 *Pinus massoniana*	$R_0 = 0.286 - 1.02M + 0.016H$	0.000	0.935	0.013	5.74
	$R_0 = (0.145 - 0.403M)(1.895 - 0.033L)(1.012 + 0.094H)$	0.000	0.930	0.014	6.63
云南松 *Pinus yunnanensis*	$R_0 = 0.432 - 1.021M + 0.002LH$	0.000	0.775	0.029	8.13
	$R_0 = (0.196 - 0.402M)(1.241 + 0.055L)(1.323 + 0.065H)$	0.000	0.818	0.023	6.66
华山松 *Pinus armandii*	$R_0 = 0.375 - 0.112ML + 0.012H$	0.000	0.761	0.020	5.79
	$R_0 = (0.145 - 0.403M)(1.895 - 0.033L)(1.012 + 0.094H)$	0.000	0.789	0.018	5.18

注：H、M和L分别表示针叶床层厚度、含水率和载量。Notes: H, M, and L represent height, moisture content and load of the needle bed, respectively.

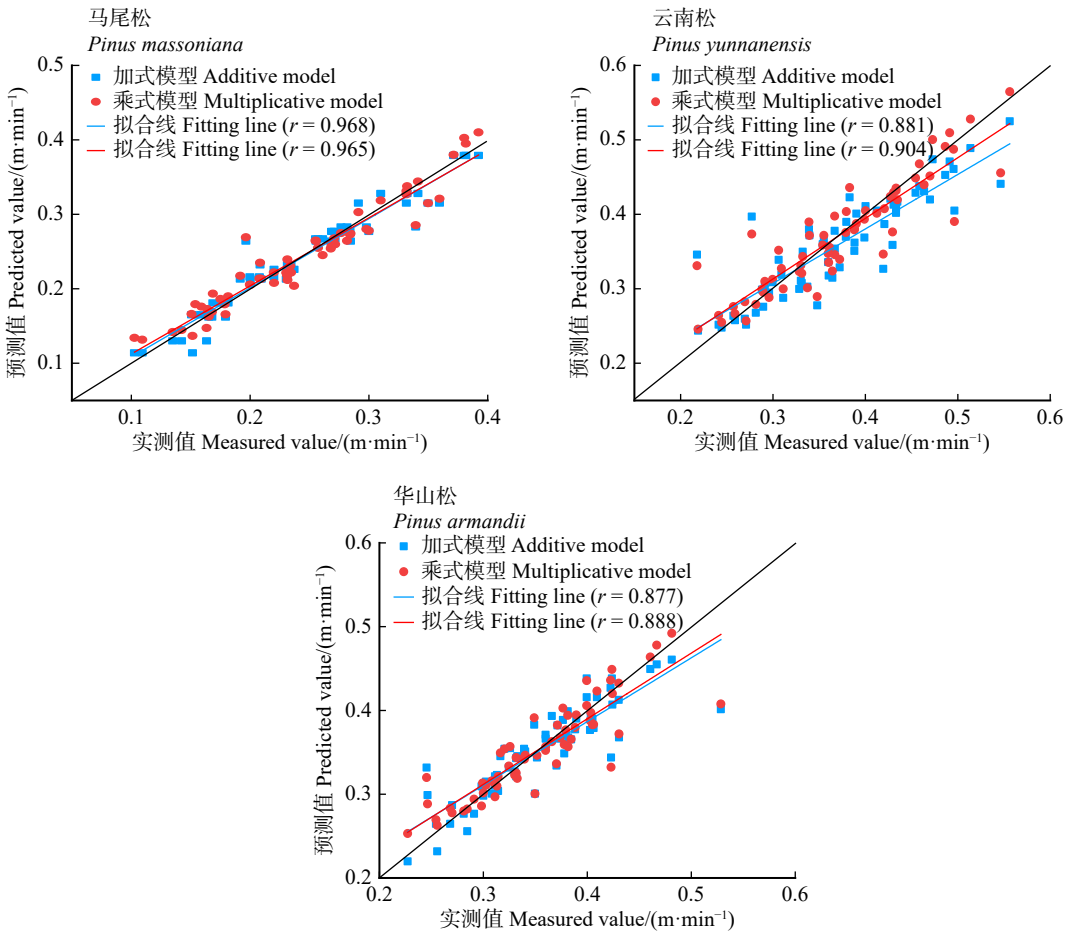
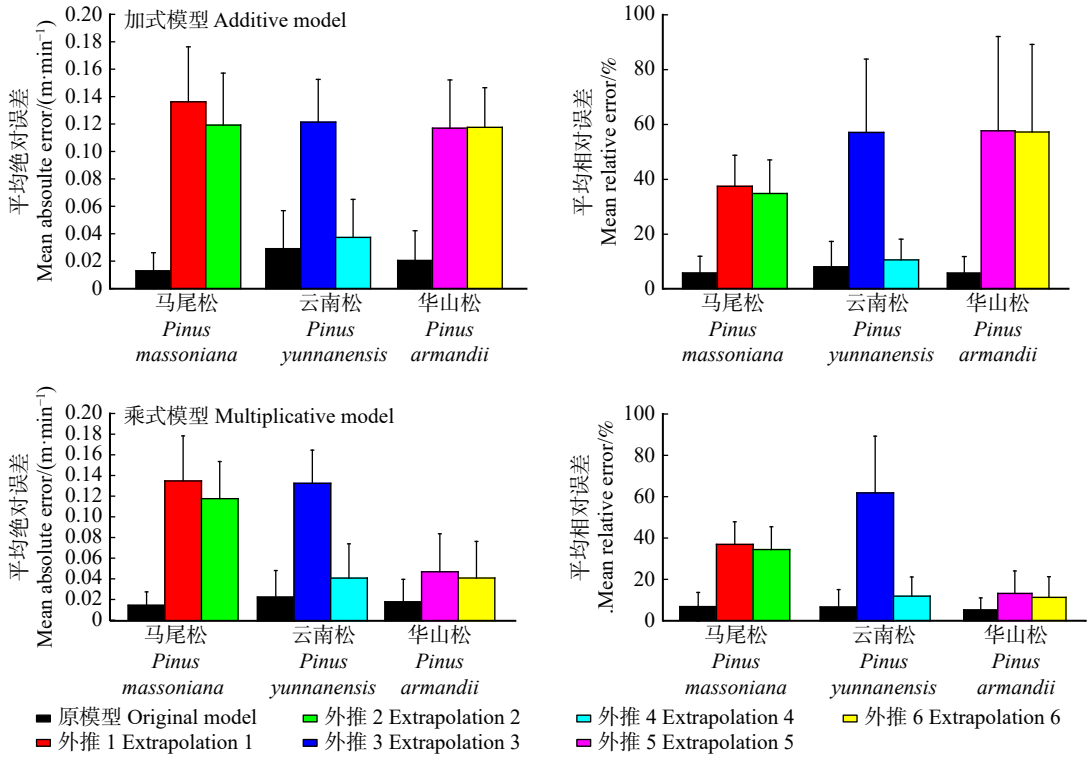


图 4 3 种林型 R_0 实测值和预测值 1∶1 图

Fig. 4 1∶1 plot between measured and predicted values for three forest types of R_0



外推 1 表示马尾松模型外推至云南松；外推 2 表示马尾松模型外推至华山松；外推 3 表示云南松模型外推至马尾松；外推 4 表示云南松模型外推至华山松；外推 5 表示华山松模型外推至马尾松；外推 6 表示华山松模型外推至云南松。Extrapolation 1 means the *Pinus massoniana* model is extrapolated to *Pinus yunnanensis*; extrapolation 2 means the *Pinus massoniana* model is extrapolated to *Pinus armandii*; extrapolation 3 means the *Pinus yunnanensis* model is extrapolated to *Pinus massoniana*; extrapolation 4 means *Pinus yunnanensis* model is extrapolated to *Pinus armandii*; extrapolation 5 means the *Pinus armandii* model is extrapolated to *Pinus massoniana*; extrapolation 6 means the model of *Pinus armandii* is extrapolated to *Pinus yunnanensis*.

图 5　加式模型和乘式模型外推误差

Fig. 5　Extrapolation errors of additive model and multiplicative model

0.108 m/min 和 42.50%，乘式模型外推效果优于加式模型，误差均值分别为 0.086 m/min 和 28.20%。

3　讨　　论

3.1　R_0 基本统计

在南方喀斯特生态系统内，典型针叶林包括马尾松林、云南松林和华山松林的针叶床层，在平地无风条件下的最大蔓延速度分别为 0.392 3、0.556 2 和 0.528 4 m/min，金森等[8]在室内点烧红松针叶床层的最大 R_0 为 0.399 m/min。本研究中云南松和华山松的针叶床层 R_0 高于 0.399 m/min，主要是因为本研究设置的针叶床层载量范围要高于红松针叶床层，根据本研究得到的载量对 R_0 的影响，本研究的 R_0 也应该超过金森等的结果。张笑一等[24]在室内点烧中，兴安落叶松针叶床层的最大蔓延速度为 1.550 m/min，这主要是由于实验中考虑了风速和坡度的影响，增大蔓延速度。Rossa 等[25]和 Filho 等[26]测定多种林下地表可燃物床层的 R_0 最大值变化范围为 0.132 ~ 1.500 m/min，本研究在此范围内。

相同实验条件下，云南松和华山松针叶床层的 R_0 显著高于马尾松针叶床层，但云南松和华山松之间却没有显著差异。这可能是由于可燃物自身理化性质不同所致[25]。研究表明，可燃物表面积体积越大，越有利于热量传递，促进燃烧，蔓延速度越大。Zhang 等[27]研究得到马尾松针叶的表面积体积比最小，仅为 6.608 4 m/min，而云南松和华山松分别为 12.663 8 m/min 和 9.642 0 m/min，显著高于马尾松。

3.2　影响因子分析

可燃物床层含水率对 3 种针叶床层 R_0 的影响都是极显著的，有明显的阻滞作用，这与张吉利[9]的研究结果相似，但含水率与厚度、载量的交互作用对 R_0 的影响不同，这可能是由于 3 种针叶的理化性质不同所致，而且不同针叶类型在室内构建床层时可能也会产生一定的不同，导致实验结果产生差异。本研究中，当床层含水率超过 20% 时，都无法蔓延，与金森等[8]研究结果一致，但与满子源等[28]设置统一的熄灭含水率值不同。与云南松和华山松不同，当马尾松含水率为 20%，载量为 8 t/hm^2 时，不论床层厚度如何改变都无法蔓延，这可能是由于本研究当当载量为 8 t/hm^2 时，无法设置低床层厚度，床层密实度较低，而如前文所述，马尾松针叶表面积体积比较小，蔓延需要更大的密实度储存热量和进行

热传递，因此无法蔓延。也证实了床层含水率对 R_0 的影响受可燃物床层结构的作用，与 Wilson[29] 的研究结果相同。

床层厚度对 3 种针叶床层 R_0 均有显著促进作用，与 Rossa[25]研究结果相同。马尾松载量对 R_0 没有显著影响，与金森等[8]对红松针叶床层的研究结果相同，但云南松和华山松针叶床层的厚度对 R_0 有极显著影响，与 Wilson 和 Anderson 等[29−30]研究结果一致，3 种针叶表现出不同的结果可能与本研究设置的梯度范围和针叶本身的理化性质有关，还需深入研究。

3.3 预测模型

马尾松、云南松和华山松针叶床层 R_0 的加式模型的 MAE 分别为 0.013、0.029 和 0.020 m/min，金森等[8]研究得到红松针叶床层 R_0 的预测模型误差为 0.04 m/min，Rossa[25]室内模拟得到地表可燃物床层 R_0 的 MAE 为 0.093 m/min，本研究得到的加式模型预测效果更好。3 种针叶床层 R_0 的乘式模型 MAE 分别为 0.014、0.023、0.018 m/min，误差低于其他人研究结果[8]，且都在可接受范围内[31]。加式模型和乘式模型都能解释约 75% 的林火蔓延速度变化情况，两者预测误差虽没有显著差异，但乘式模型优于加式模型，且其外推效果也好于加式模型。

4 结　　论

综上，本研究揭示了南方喀斯特生态系统内典型针叶林下可燃物床层特征（含水率、载量和厚度）对平地无风条件下林火蔓延速度的影响情况，并基于统计方法建立 R_0 的预测模型，为实际应用提供基础。3 种针叶床层平地无风条件下蔓延速度较其他可燃物类型较高，具有蔓延成灾的可能。在进行 R_0 的预测时建议选择乘式模型建立林火蔓延速度预测模型。本研究是在室内进行的，主要是为减少野外环境不稳定性对实验结果造成影响，但实验室模拟和野外实际情况存在一定的误差，因此，在今后的研究中，要增加野外验证实验，并增加风速和地形条件的影响，建立南方喀斯特生态系统内典型针叶林更全面的林火蔓延速度预测模型。此外，当前还有很多半统计模型以及利用机器学习等方法进行林火蔓延的预测，在以后的研究中，还需要进行多种预测模型、多种预测方法的比较，对于更好理解林火蔓延速度和建立精度更高的预测模型具有重要意义。

参 考 文 献

[1] Beet T. The speed of a fire front and its dependence on wind speed[J]. International Journal of Wildland Fire, 1993, 3(4): 193−202.

[2] 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 [J]. 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[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(10): 3144−3154.

[3] Cheney N P, Gould J S, Catchpole W R. Prediction of fire spread in grasslands[J]. International Journal of Wildland Fire, 1993, 3(1): 31−44.

[4] 王博, 韩树文, 顾泽, 等. 不同烈度林火对油松林潜在地表火行为的影响 [J]. 生态学报, 2023, 43(5): 1812−1821.
Wang B, Han S W, Gu Z, et al. Effects of wildfires of different severities on potential surface fire behavior of *Pinus tabuliformis* forest[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 1812−1821.

[5] 吕沣桐, 周雪, 丁佳欣, 等. 兴安落叶松人工林潜在地表火行为特征的影响因素 [J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(7): 83−90.
Lü F T, Zhou X, Ding J X, et al. Influence factors of potential surface fire behavior in *Larix gmelinii* plantation[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(7): 83−90.

[6] Rossa C G, Davim D A, Viegas D X. Behaviour of slope and wind backing fire[J]. International Journal of Wildland Fire, 2015, 24(8): 1085−1097.

[7] Rossa C G. The effect of fuel moisture content on the spread rate of forest fires in the absence of wind or slope[J]. International Journal of Wildland Fire, 2017, 26(1): 24−31.

[8] 金森, 刘礴霏, 邸雪颖, 等. 平地无风条件下蒙古栎阔叶床层的火行为Ⅰ. 蔓延速率影响因子与预测模型 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 51−59.
Jin S, Liu B F, Di X Y, et al. Fire behavior of Mongolian oak leaves fuel-bed under no-wind and zero-slope conditions (Ⅰ): factors affecting fire spread rate and modeling[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(1): 51−59.

[9] 张吉利. 平地无风条件下红松蒙古栎混合可燃物地表火行为研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
Zhang J L. Study on fire behavior in mixed fuel complexes of Korean pine and Mongolian oak under no-wind and zero-slope conditions[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012.

[10] 张运林, 郭妍, 胡海清. 2001—2017 年西南地区森林火灾数据特征分析 [J]. 西北林学院学报, 2021, 36(1): 179−186.
Zhang Y L, Guo Y, Hu H Q. Characteristics of forest fire data in southwest China during 2001−2017[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(1): 179−186. .

[11] Sullivan A L. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 2: empirical and quasi-empirical models[J]. International Journal of Wildland Fire, 2009, 18: 369−386.

[12] Fernandes P A M. Fire spread prediction in shrub fuels in Portugal[J]. Forest Ecology and Management, 2001, 144(1−3): 67−74.

[13] Tankskanen H, Granstrom A, Larjavaara M, et al. Experimental fire behaviour in managed *Pinus sylvestris* and *Picea abies* stands of Finland[J]. International Journal of Wildland Fire, 2007, 16(4): 414−425.

[14] Dupuy J L. Testing two radiative physical models for fire spread

through porous forest fuel beds[J]. Combustion Science and Technology, 2000, 155: 149−180.

[15] Morvan D, Dupuy J L, Rigolot E, et al. FIRESTAR: a physically based model to study wildfire behaviour[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 234: S114.

[16] Sullivan A L. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007.1: physical and quasi-physical models[J]. International Journal of Wildland Fire, 2009, 18: 349−368.

[17] Koo E, Pagni P, Woycheese J, et al. A simple physical model for forest fire spread[C]//Gottuk D, Lattimer B. Fire safety science: Proceedings of 8th International Symposium. Beijing: International Association of Fire Safety Science, 2005.

[18] Vaz G C, Andre J C S, Viegas D X. Fire spread model for a linear front in a horizontal solid porous fuel bed in still air[J]. Combustion Science and Technology, 2004, 176(2): 135−182.

[19] 宗学政, 田晓瑞. 可燃物处理对大兴安岭地区主要林型火行为的影响 [J]. 林业科学, 2021, 57(2): 139−149.
Zong X Z, Tian X R. Impacts of fuel treatment on potential fire behavior of main forest types in Daxing'anling[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(2): 139−149.

[20] Weber R O. Modelling fire spread through fuel beds[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1991, 17(1): 67−82.

[21] 张运林, 田玲玲, 向敏, 等. 室内模拟空气温湿度对蒙古栎林凋落物床层平衡含水率和时滞的影响 [J]. 生态学杂志, 2022, 41(9): 1−13.
Zhang Y L, Tian L L, Xiang M, et al. Effects of indoor simulated air temperature and relative humidity on the equilibrium moisture content and time lag of the fuelbed of *Quercus mongolica*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(9): 1−13.

[22] Wotton B M, McAlpine R S, Hobbs M W. The effects of fire front width on surface fire behavior[J]. International Journal of Wildland Fire, 1999, 9: 247−253.

[23] Balbi J H, Santoni P A, Dupuy J L. Dynamic modeling of fire spread across a fuel bed[J]. International Journal of Wildland Fire, 1999, 9: 275−284.

[24] 张笑一, 胡同欣, 刘方策, 等. 兴安落叶松针叶床层火蔓延的模拟 [J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(1): 117−124.
Zhang X Y, Hu T X, Liu F C, et al. Simulation of fire spread in coniferous bed of *Larix gmelinii*[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(1): 117−124.

[25] Rossa C G. Dynamic model for fire behaviour prediction[D]. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2009.

[26] Filho G C K, Bufacchi P, Santos J C, et al. Probability of surface fie spread in Brazilian rainforest fuels from outdoor experimental measurements[J]. Europe Journal of Forest Research, 2017, 136(2): 217−232.

[27] Zhang Y L, Tina L L. Examining and reforming the Rothermel surface fire spread model under no-wind and zero-slope conditions for the Karst ecosystems[J]. Forests, 2023, 14: 1088.

[28] 满子源, 孙龙, 胡海清, 等. 南方 8 种森林地表死可燃物在平地无风时的燃烧蔓延速率与预测模型 [J]. 林业科学, 2019, 55(7): 197−204.
Man Z Y, Sun L, Hu H Q, et al. Prediction model of the spread rate of eight typical surface dead fuel in southern China under windless and flat land[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(7): 197−204.

[29] Wilson R A. Reexamination of Rothermel's fire spread equations in no-wind and no-slope conditions[R]. Ogden: Intermountain Forest and Range Experiment Station, Forest Service, USDA, 1990.

[30] Anderson H E, Brackebusch R P, Mutch R W. Mechanisms of fire spread research progress report No. 2[R]. Ogden: Intermountain Forest and Range Experiment Station, Forest Service, USDA, 1966.

[31] 张景群. 不同树种含水率季节变化的测定 [J]. 森林防火, 2000(2): 17−18.
Zhang J Q. Determination of seasonal variation of moisture content in different tree species[J]. Forest Fire Prevention, 2000(2): 17−18.

（责任编辑　范　娟
责任编委　臧润国）