引文格式:张玉春,叶子群,高云骥,等.森林火灾燃烧蔓延预测模型及预报平台研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(6):1137-1149.DOI:10.13203/j.whugis20250016

Citation:ZHANG Yuchun,YE Ziqun,GAO Yunji,et al.Forest Fire Burning Spread Prediction Model and Forecasting Platform[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(6):1137-1149.DOI:10.13203/j.whugis20250016

森林火灾燃烧蔓延预测模型及预报平台研究

张玉春[1] 叶子群[1] 高云骥[1] 向中意[1] 王春翔[1] 彭 勇[1]
向 冬[1] 任 福[2] 岳韦霆[1]

1 西南交通大学地球科学与工程学院,四川 成都,611756
2 武汉大学资源与环境科学学院,湖北 武汉,430079

摘 要:森林火灾燃烧蔓延是一个复杂多变的过程,极易受到地形、气象、可燃物以及人为活动的影响,因此森林火灾燃烧蔓延预测在林火应急救援工作中具有重要意义。以Rothermel模型和Van Wagner树冠火临界引燃模型为核心计算模型,以惠更斯原理为核心计算原理,确定了森林火灾燃烧蔓延预测的计算流程,设计开发了森林火灾燃烧蔓延预报平台,实现了情景数据动态输入、火灾范围蔓延和火场关键信息实时预测等功能。以真实森林火灾数据为例,依托森林火灾燃烧蔓延预报平台,利用森林火灾燃烧蔓延预测模型,对区域内风场变化和火灾蔓延过程分别进行模拟预测。结合对风场的模拟结果,分析了地形与风向对实际风场变化的影响;通过调用较高精度火场范围和气象数据迭代优化火灾蔓延的模拟预测结果,降低了蔓延模拟与实际森林火灾燃烧面积的误差,验证了蔓延预测模型和平台功能的可行性和有效性。该预报平台可有效提高中国森林火灾防控能力,为森林火灾应急救援提供决策支持,为森林生态健康可持续发展提供有力保障。

关键词:森林火灾;预测预报;遥感卫星;森林火灾燃烧蔓延预测模型;预报平台;应急救援

中图分类号:X43 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-01-08

DOI:10.13203/j.whugis20250016 **文章编号**:1671-8860(2025)06-1137-13

Forest Fire Burning Spread Prediction Model and Forecasting Platform

ZHANG Yuchun[1] *YE Ziqun*[1] *GAO Yunji*[1] *XIANG Zhongyi*[1] *WANG Chunxiang*[1]
PENG Yong[1] *XIANG Dong*[1] *REN Fu*[2] *YUE Weiting*[1]

1 Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China
2 School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: **Objectives**: The spread of forest fires is a complex and variable process, and the direction and speed of its spread are highly susceptible to the influence of terrain, weather, combustible materials and human activities. Therefore, it is of great significance to improve the real-time accuracy of forest fire burning and spreading in forest fire emergency rescue work. **Methods**: Based on the research of existing fire spread prediction and system, this paper selected Rothermel model and Van Wagner canopy fire critical ignition model as the core calculation model, chose Huygens principle as the core calculation principle, determined the calculation process of forest fire burn spread prediction, and designed and developed a forest fire burn spread prediction platform. The function of dynamic input of scene data, spread of fire range and real-time prediction of key information of fire site was realized. This paper took real forest fire data as an example, relied on the forest fire burning and spreading prediction platform, which used the forest fire burning and spreading prediction model, simulated and predicted the regional wind field changes and the fire spreading process respectively. Meanwhile iteratively optimized the simulation and prediction results of fire spreading by invoking high-precision remote sensing satellite dynamic scenario data. The feasibility and effectiveness

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3005704);四川省科技计划(2024YFFK0111);应急管理部四川消防研究所项目(20248815Z)。

第一作者:张玉春,博士,教授,主要从事隧道及地下空间火灾防治、应急救援技术等方面的研究。zycfire@swjtu.edu.cn

通信作者:高云骥,副教授,博士。gyjl19@swjtu.edu.cn

of the model and the function of the platform were verified. **Results**: The influence of slope and wind direction effect on wind field was analyzed by simulating the wind field in the region. It was found that the wind speed and direction changed little in the open plain area on both sides of the river, the wind speed of the upslope wind was lower, and the wind speed of the downslope wind was higher. At the same time, due to the influence of wind direction and terrain, the wind speed in the valley plain region was higher than that in the broad plain region when the trend was parallel to the wind direction, and it was also higher than when the trend in the valley plain region was not parallel to the wind direction. Through the simulation of the forest fire spread process and scope, it was found that the similarity between the fire spread prediction and the actual fire area had significantly improved, especially as the secondary simulation results were more similar. This verified the feasibility and effectiveness of the forest fire spread prediction model and prediction platform. **Conclusions**: The forecast platform overcame the limitations of static input and output in the traditional forest fire simulation system, combining scene data to enhance the accuracy of spread prediction. It met the actual needs of fire rescue and provided a robust decision-making support for forest fire prevention emergency command and rescue deployment.

Key words: forest fire; forecasting and forecasting; remote sensing satellite; forest fire burning spread prediction model; prediction platform; emergency rescue

在中国2023年共发生328起森林火灾,受害面积约4 000万m^2[1],森林火灾是一种突发性强、破坏性大、波及范围广、火灾扑救困难的自然灾害,其直接导致了森林面积减少、空气污染、动植物数量及多样性降低等危害,严重破坏了森林生态系统的结构和功能[2-6]。森林火灾蔓延常受地形、气候、可燃物等众多因素的相互影响[7],局部复杂的地形和突变的气象条件极易导致火灾蔓延方向与速度突变。目前,常规管理方式难以应对突变复杂场景,因此优化森林火灾燃烧蔓延预测系统,准确预报森林火灾蔓延范围,对森林消防应急救援具有重大意义。

目前,国内外学者针对火灾蔓延模型与预测系统展开了大量的研究。在火灾蔓延模型研究方面,文献[8]建立了第一个火灾蔓延物理模型,把火的传播理解为相邻燃料层的连续引燃,依次起到热源和散热的作用;文献[9]提出了目前应用最广泛的Rothermel林火蔓延模型,并应用到美国国家火险等级系统当中,已成为美国国家火险等级预报系统的重要依据;文献[10-11]对中国大兴安岭地区的火灾实验数据进行了回归分析,建立了适用于中国的林火蔓延计算模型,描述了各要素对森林火行为的影响;文献[12]提出了可以根据风速、地形、可燃物类型与性质等预测树冠火的蔓延速度、强度和规模等森林火行为的模型。基于加拿大森林火灾行为预测系统中的现有模型,文献[13]提出了可以模拟火灾增长情况的FARSITE林火模型,后续文献[14-15]对FARSITE模型也开展了一定研究;文献[16-17]定义了树冠火的3种类型,并提出了树冠火发生的临界引燃模型。现有的森林火灾蔓延模拟系统主要有美国农业部林业局开发的BEHAVE系统[18]、美国农业部开发的FARSITE和FlamMap系统[19]、加拿大开发的用于林火发展模拟的Prometheus系统[20]、澳大利亚开发的灌木风险管理工具Phoenix系统[21]等。文献[22-27]开展了不同坡度、风向及风速条件下地表火的火焰行为特性实验研究,发现了爆发火现象,探讨了对流传热对火蔓延模型的影响;文献[28-31]研究了不同倾斜角度、燃料载荷与风速条件下地表火火蔓延行为特性,建立了火焰前锋辐射传热预测模型,同时还对地表火引燃树冠火临界火蔓延模型开展了一定研究;文献[32-33]研究了倾斜地表火火焰蔓延中火焰形态、质量损失速率的特性,探讨了地表火火焰模型的影响;文献[34]探讨了防御空间,以应对野火防控中的挑战。

现有林火蔓延预测系统的应用大多为通过初始火场范围、地形、可燃物、气象条件等数据,只能输出确定的林火模拟结果[35-36]。但在模拟过程中,由于初始火线范围、地形和可燃物数据的误差、气象条件变化等原因,可能会导致预测结果与真实火灾蔓延的误差增大[6]。文献[37]研究了卡尔曼滤波对森林火灾蔓延预测的优化作用;文献[38-39]研究了集合卡尔曼滤波算法的原理和流程,并基于FARSITE模型验证了集合卡尔曼滤波对森林火灾蔓延预测的优化作用;文献[40]利用可见光红外成像辐射仪(visible infrared imaging radiometer suite,VIIRS)的火监测数据进

行了动态模拟,探究了该方法在林火蔓延模拟中的应用;文献[41]研究了火灾行为建模在犹他州陆军驻地威廉姆斯营燃料处理评估中的应用;文献[42]基于FARSITE和Cell2Fire两种模拟器,使用VIIRS火点数据和遥感监测数据开展了两次森林草原火灾预测;文献[43]基于元胞自动机模型和知识元模型构建了综合多要素、多事件的森林火灾应急救援情景演化时间线模型;文献[44]利用反卷积算法优化了王正非模型,提升了模型的适用性。随着中国对地观测技术的迅速发展,用于环境与灾害监测预报的遥感卫星或无人机遥感(UAV remote sensing,UAVRS)可获取高精度的火场信息和气象数据,可以较好地降低模拟预测结果的误差[45-50]。综上分析可知,现有的森林火灾燃烧蔓延预测系统仅能输入初始数据、输出确定的预测结果,并不能实现情景数据动态输入及对预测结果动态修正。因此本文提出在模拟林火蔓延过程中,基于传统森林火灾物理计算模型,动态输入高精度对地观测火场遥感卫星影像数据和气象数据,实时修正模拟结果,对森林火灾救援方案提供较为准确的指导。

1　森林火灾燃烧蔓延情景数据

森林火灾的影响因子主要包括可燃物、地形、气象、火点等,蔓延预测模型计算所用的情景数据由静态情景数据和动态情景数据组成。静态情景数据包括地形和可燃物,是不易受外界因素影响长期形成的;动态情景数据包括气象信息和火场信息,极易受可燃物、地形、气象及人为等因素影响导致热动力学性质变化。

1)静态情景数据

可燃物信息主要包括可燃物的物理、化学性质及空间特征[51],常通过遥感卫星影像数据、Anderson和Scott经典燃料模型、现场调研等方式获得[52-53]。地形信息主要包括坡度、坡向、高程(digital elevation model,DEM)等参数,通过改变植被和可燃物的分布,形成气流和局部小气候影响林火的传播和蔓延[29];其通常利用高分辨率的遥感卫星数据提取DEM,将DEM数据进一步处理得到坡度、坡向数据。

2)动态情景数据

气象信息主要包含温度、降水量、风速、风向等环境气象数据,相互作用且耦合影响火灾蔓延过程,其中风场是影响火蔓延速度和方向的重要因素。通过表面温度、至山脊顶部或山谷底部的距离、坡度角、沿程可燃物类型及初始风速、风向等参数模拟输出不同位置的地形风向和风速,预测火灾蔓延过程中风场变化。在实际火灾燃烧蔓延时,气象突变或地形、火场变化诱发的局部小气象、人为等因素,极易导致火场的蔓延方向与速度变化。实时利用现场传感器或气象站获得的风速、风向的原始数据,基于计算流体动力学(computational fluid dynamics,CFD)模型计算不同地形和可燃物位置具体的风速、风向代入模拟,更精准地模拟不同位置的气象对火场蔓延的影响。

火场信息主要为火场燃烧的范围。火灾发生后,实时通过遥感卫星检测及UAVRS等[45-50]方式获取火场范围,进行降噪处理与集合卡尔曼滤波原理优化,利用优化后的火场数据对模拟进行修正优化,实时更新调整应急救援方案,更精准地开展火场扑救行动,对提高森林火灾消防扑救效率具有重要影响。

2　森林火灾燃烧蔓延预测模型计算

2.1　模型框架与计算流程优化

现有的森林火灾蔓延预测模型FARSITE和FlamMap系统计算森林火灾蔓延路径,通过输入地理、可燃物、气象、火场范围等情景数据,利用Rothermel模型计算输出单一时间段内森林火灾蔓延迹线,缺乏对火灾蔓延过程的实时优化修正。而在火灾发生后,火灾蔓延迹线极易受气象及人为因素影响发生改变,导致模拟与实际的火灾蔓延路径差异增大。因此本文的森林火灾燃烧蔓延预测模型增加数据动态输入与迭代优化功能,分模块地利用惠更斯原理计算预测火场内各个位置的火蔓延行为及每个时间节点的火场范围。实时获取火场范围数据和气象数据,对火场范围数据进行去噪与集合卡尔曼滤波原理优化,同时针对不同地形和可燃物位置的风场进行模拟优化。将上述较高精度的动态情景数据迭代重新模拟预测,最后输出更高模拟精度的预测结果,具体流程见图1。

2.2　核心模型与计算原理

本预报平台利用的森林火灾燃烧蔓延预测模型的核心计算模型为Rothermel蔓延模型和Van Wagner模型,核心的计算原理为惠更斯原理,预测每个时间节点火场范围的生成。

1)Rothermel模型

Rothermel[12]模型是一个以燃烧物理学为理

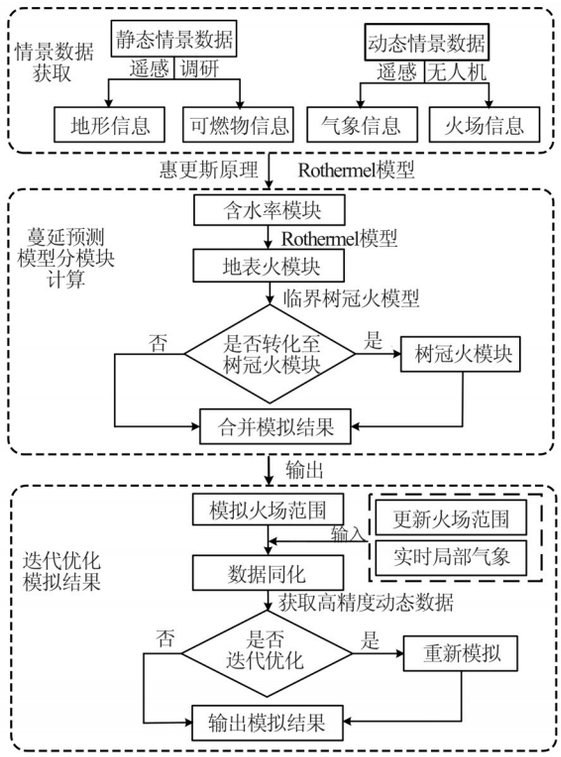


图1 计算流程

Fig. 1 Calculation Process

论基础,以林火实验为依据的半理论、半经验的数学模型。该模型以能量守恒定律为基础,火焰区通过辐射、对流和传导的方式传递热量给前方的未燃可燃物,当未燃的可燃物吸收足够的热量升温达到燃点时被引燃,推动火焰前锋向前蔓延。林火蔓延速度公式具体见文献[54-55]。

2) Van Wagner树冠火临界引燃模型

树冠火大多数情况由地表火诱发而成,现有的森林火灾模拟系统计算树冠火燃烧时均应用Van Wagner树冠火临界引燃模型[14-15]。因此,地表火计算完成后,根据郁闭度与树高判断当前位置植被类型,选择调用树冠火计算模块。结合Rothermel地表火蔓延模型、可燃物模型FM10[18]与植被水分效应,树冠火蔓延速度利用风速和地表可燃物含水率计算得到。当地表火提供的热量蒸干冠层燃料的水分,并将其温度升高到燃点时,树冠就会被点燃,引燃树冠火的临界地表火火焰强度表达式如下:

$$I_0=\left(\frac{h_{\mathrm{CBH}}(460+25.9C_{\mathrm{FMC}})}{100}\right)^{\frac{3}{2}} \tag{1}$$

式中,I_0为临界地表火火焰强度(kW/m);h_{CBH}为树冠层基高(crown base height)(m);c_{FMC}为树冠层叶面水分含量(foliar moisture content)(%)[56],其中h_{CBH}和c_{FMC}均可通过遥感卫星获取。树冠火的计算流程与地表火相同,均利用惠更斯原理模拟火线向四周蔓延扩散的过程。

文献[16]对山杨、桦树、针叶林及灌木等展开了研究,指出叶面水分是影响树冠火行为的主要因素,因此,本文利用文献[16-17]的临界树冠火模型判断地表火火线强度与临界地表火火焰强度的关系,确定是否达到树冠火引燃的阈值[56],若地表火火线强度大于或等于临界地表火火焰强度,则调用树冠火计算模块;反之利用地表火模块计算燃烧速度。

3)惠更斯原理

惠更斯原理是通过矢量数据进行计算一个随时间变化的多边形的扩张来表示火灾蔓延的过程,这个多边形由一系列二维顶点定义。在计算过程中,蔓延时间被均匀地划分为若干段时间步长,蔓延方向利用风速矢量和坡度矢量计算每个点火灾的蔓延,蔓延速度由风速、坡向、可燃物等数据利用Rothermel模型计算得到,最终通过蔓延速度和方向乘以时间步长的持续时间来确定火场边界扩张,垂直于火线的蔓延方向和速度是通过椭圆变换依据方向矢量和最大蔓延速度确定,如图2所示。

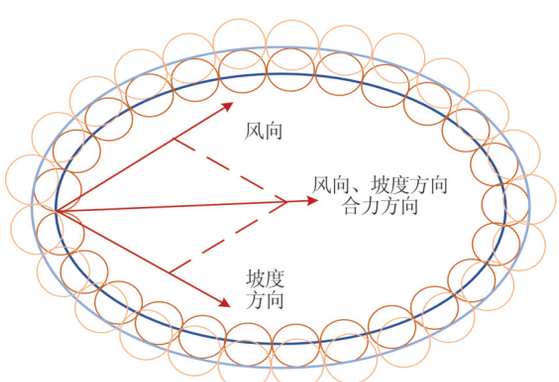


图2 惠更斯原理火势蔓延方向的计算方法

Fig. 2 Calculation of the Direction of Fire Spread on Huygens' Principle

2.3 分模块计算原理

输入获取的地理、可燃物、气象、火场信息等数据,利用核心计算原理,通过含水率模块、地表火模块、树冠火模块分别预测计算火场内各个位置的含水率、火蔓延行为及每个时间节点的火场范围。

1)含水率计算

燃料含水率是指燃料中所含水分的百分比,随时间和地形的变化影响森林火灾蔓延速度和强度。含水率调节模块是在计算火行为特征之

前,利用Nelson模型[49]根据气象信息和地形信息进行修正,将景观地图内不同位置可燃物的含水率进行调整,以符合该位置的特定地理和气候条件,是Rothermel森林火灾蔓延模型的重要输入参数。

2)地表火计算

地表火计算模块主要计算包括火场范围、蔓延速度、火线强度、火焰长度等在内的火行为参数,其根据Rothermel蔓延模型,通过惠更斯原理计算所有火焰前锋的位置。在结果输出之前,检查计算火场的面积和周长,判断火场的位置,将起火点与蔓延模拟计算的火场合并交叉,最后输出火场的栅格与矢量信息。图3展示了地表火蔓延的计算流程。

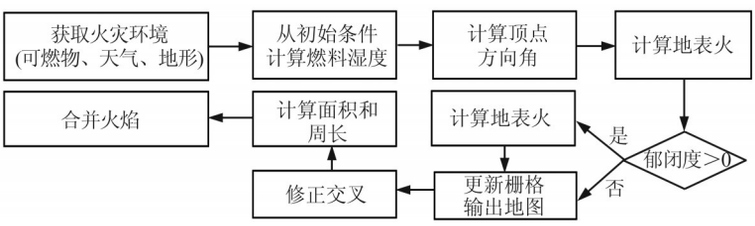


图3　森林火灾地表火计算流程

Fig. 3　Calculation Process for Surface Fire

3)树冠火计算

树冠火大多数情况由地表火诱发而成。因此,地表火计算完成后,根据郁闭度与树高判断当前位置植被类型,选择调用树冠火计算模块。结合Rothermel地表火蔓延模型、可燃物模型FM10[18]与植被水分效应,树冠火蔓延速度利用风速和地表可燃物含水率计算得到。当地表火提供的热量蒸干冠层燃料的水分并将其温度升高到燃点时,树冠就会被点燃,引燃树冠火的临界地表火火焰强度表达式如下:

$$I = HWR \tag{2}$$

式中,I为火线强度(kW/m);H为可燃物的热值(kJ/kg);W为燃烧的有效可燃物载量(kg/m^2);R为火蔓延速度(m/s)。树冠火的计算流程与地表火相同,均利用惠更斯原理模拟火线向四周蔓延扩散的过程,如图4所示。

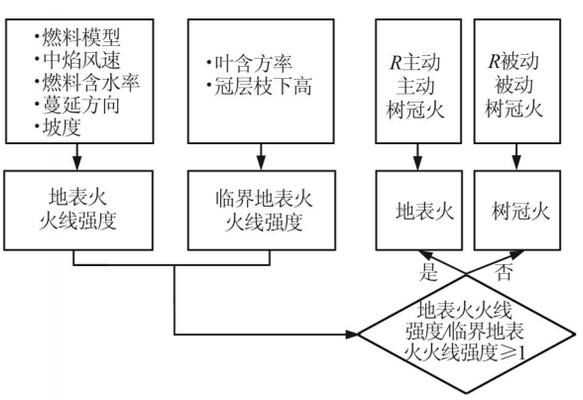


图4　树冠火的计算流程

Fig. 4　Calculation Process for Crown Fire

4)优化迭代计算

在模拟过程中,受人为、环境和气候的影响,火场范围与实际存在一定误差,同时受地形和可燃物影响,风速、风向数据常与传感器和气象站获取的原始数据不同。因此,实时获取并调用较高精度的火场范围数据与更新的气象数据,再次重新输入森林草原燃烧蔓延预测模型开始模拟,修正得到较高精度的模拟结果。

实时获取与修正的动态数据主要包含火场范围与气象数据。变化的火场范围利用遥感卫星、UAVRS等方式实时获取,利用Canny边缘算法对其先进行去噪,以减小火场烟雾对数据的影响;再利用模型预测得到预测的火线范围数据,计算观测的火线范围数据和预测模拟数据的预测均值和预测协方差矩阵统计量;然后进行数据同化,计算卡尔曼增益矩阵,分析比较更新集合;最后计算分析均值和协方差矩阵,分析均值即为更新的火线范围[37,39]。实时获取变化的气象数据主要通过现场传感器与气象站实时获取更新,然后利用CFD模型进行风场模拟,得到各个位置较为准确的风速与风向。将实时获取与修正的火场范围与气象数据输入模拟流程,对火蔓延过程进行迭代优化,以提高模拟预测精度。迭代优化计算流程如图5所示。

3　森林火灾燃烧蔓延平台与案例应用

以某真实森林火灾案例数据为例,依托开发的森林火灾燃烧蔓延预报平台,利用森林火灾燃烧蔓延预测模型对风场情况与森林火灾蔓延范围进行模拟预测,验证平台情景数据动态输入、火灾范围蔓延与火场关键信息实时预报等功能。

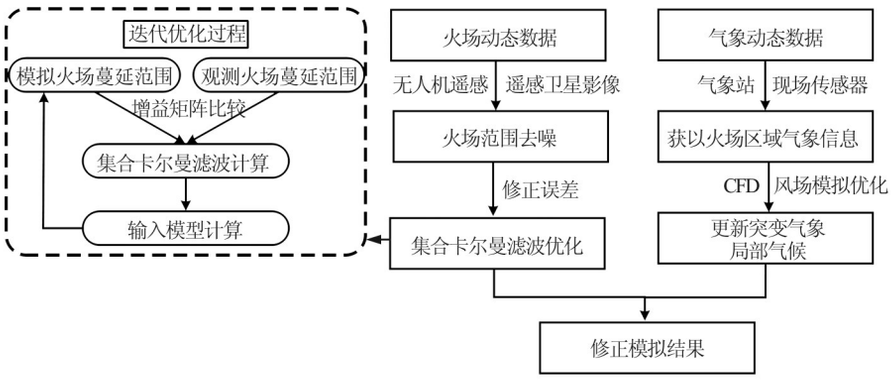
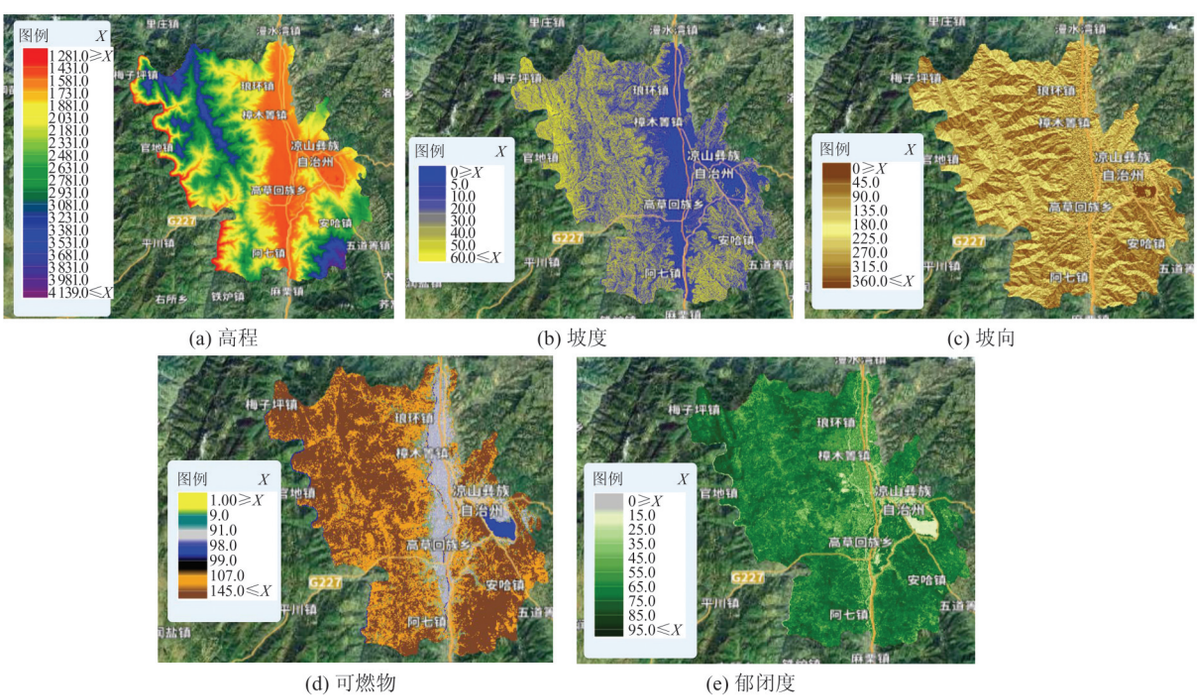


图5 迭代优化的计算流程

Fig. 5 Calculation Process of Iterative Optimization

3.1 输入情景数据

本文地形数据通过中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)获取,分辨率为30 m;可燃物数据通过刘良云团队发布的2020年全球30 m地表覆盖精细分类产品V1.0(GLC_FCS30-2020)地球大数据科学工程数据共享服务系统(https://data.casearth.cn/?locale=zh),参考Anderson等13种、Scott等40种经典燃料模型[41],结合调研数据获得[57-60];气象数据来源于美国国家海洋和大气管理局Hourly/Sub-Hourly Observational Data(https://www.noaa.gov),可获取到研究区域内气象站详细历史数据,包括温度、降水量、风速、风向等。将获取的数据上传至预报平台生成初始景观图层,实现了平台情景数据的动态输入与展示,见图6,各个图层中展示了火灾发生区域内的高程、坡度、坡向、可燃物及郁闭度信息。通过输入不同时刻的气象数据模拟风向和风速的分布情况,分析不同地形和气象对风场和森林火灾蔓延的影响;再动态输入火点数据模拟森林火灾蔓延过程,动态修正森林火灾燃烧蔓延过程,验证森林火灾燃烧蔓延预测模型的有效性。



(a) 高程 (b) 坡度 (c) 坡向

(d) 可燃物 (e) 郁闭度

图6 静态情景数据图层

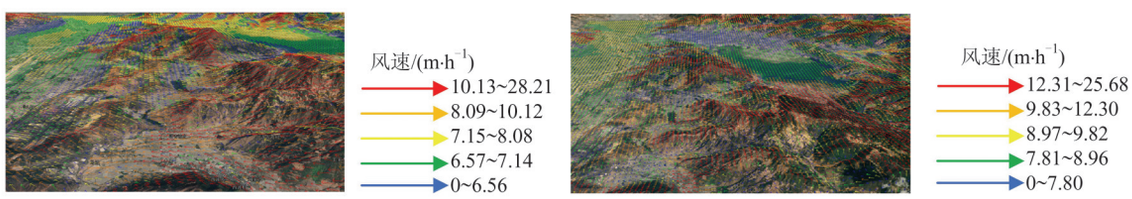
Fig. 6 static scenario data layers

3.2 风场模拟结果分析

为研究不同地形坡度对风场变化的影响,依托模型对不同气象条件进行了模拟。本文展示了两次典型时刻的模拟结果(图7),模拟初始气象数据如表1所示。

输出风场模拟结果后,展示研究区域内不同

位置的风速、风向情况。第一次模拟结果(图7(a))可以发现,受地形影响,中间河流两侧开阔的平原区域风向不变,风速基本与初始风速一致,在6.57～8.08 m/h之间;在山区内,下坡风风速较高,在8.09～28.21 m/h之间,上坡风风速较低,在0～10.12 m/h之间。这是由于受风向影响,气流翻越过高海拔的山峰形成干热的下坡风,与峡谷风汇合,导致峡谷中间的平原区域及山顶区域风速较高,红色箭头分布密集。值得注意的是,山顶的风速极高,在10.13～28.21 m/h之间。第二次模拟结果(图7(b))发现,受地形和风向形成的焚风效应影响,风速、风向变化规律与第一次模拟一致。河流两侧的平原地区风速、风向变化较小,与初始风速基本一致,在7.81～9.02 m/h之间;山区内上坡风速较低,在0～9.8 m/h之间,山顶与下坡的风速较高,在0～12.3 m/h之间,红色箭头分布密集。第一次与第二次模拟结果对比发现,第二次模拟由于风向与峡谷平原区域的走向不平行,其最高风速相比于第一次模拟有所降低,为25.68 m/h,山区内风向变化较大,尤其在第二次模拟结果中峡谷区域密集区域,风向变化最大可至90°。环境风的增大能加剧可燃物水分蒸发,使林内植被迅速干燥、燃点降低;通过模拟结果对比分析可知,区域内的地形与风向均对风场变化有较大影响,因此对区域内不同位置开展风速风向模拟,对增加区域内各个位置火灾蔓延模拟准确度具有显著的影响。



(a) 第一次模拟结果　　(b) 第二次模拟结果

图7　风场模拟结果图

Fig. 7　Wind Field Simulation Results

表1　模拟气象初始数据

Table 1　Initial Data for Meteorological Simulation

日期	温度/℃	风速/(m·h⁻¹)	风向/(°)
3月30日16时	31	7.15	121
3月30日17时	25	9.33	181

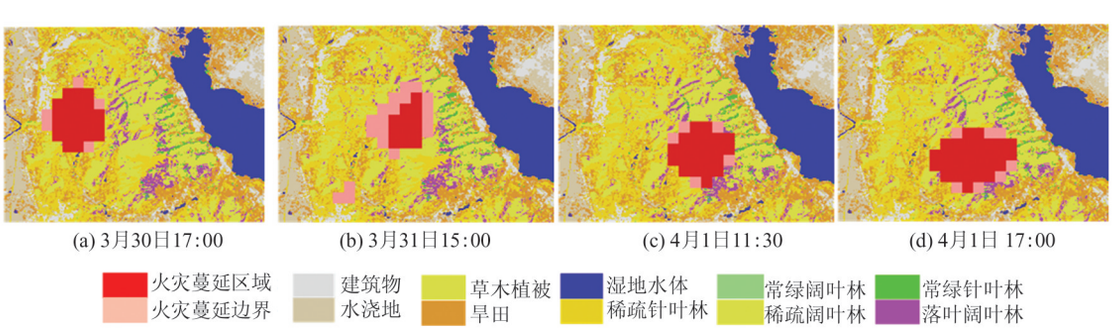
3.3　火灾蔓延模拟

3.3.1　模拟过程

为验证模型对火场蔓延的有效性,首先在上传的气象数据文件中设定本文的模拟时间间隔为每60 min输出一次模拟结果。第一次预测以3月30日17:00火场范围为起火源,分别模拟至3月31日15:00、4月1日11:30及4月1日17:00,这个过程为没有动态修正的模拟;第二次模拟预测调用3月31日15:00的火场范围和气象数据,分别模拟至4月1日11:30和4月1日17:00,这个过程为第一次动态修正的模拟;第三次模拟预测调用4月1日11:30的火场范围和气象数据模拟至4月1日17:00,这个过程为第二次动态修正的模拟。通过3次模拟,比较模拟与实际火场之间的差异,以验证平台数据动态调用的功能。火场原始范围图像如图8所示。

3.3.2　模拟结果

平台输出模拟结果后,利用界面下方的时间



(a) 3月30日17:00　(b) 3月31日15:00　(c) 4月1日11:30　(d) 4月1日 17:00

图8　火场范围

Fig. 8　Range of Fire

线及火场信息标签页,实现了对火灾蔓延范围与关键信息的实时可视化,如图9所示。

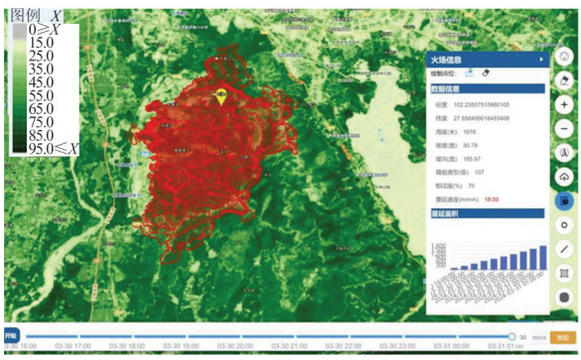


图9 平台模拟界面展示

Fig. 9 Platform Simulation Interface Display

通过火灾蔓延预测结果复盘分析,模拟结果与实际火场范围对比如图10所示,暗红色为模拟火场蔓延范围,鲜红色为实际火场蔓延范围。可以发现,从3月30日17:00开始模拟的结果显示,模拟的火灾主要向南北两侧蔓延,最高蔓延速度为23.65 m/min,但东侧实际火场的火灾蔓延较预测火场过快。分析产生差异的原因为:在火灾发生后,消防救援紧急扑救河流边沿南北方向的平原农田区域的火灾,扑救城镇-森林交界域的火灾蔓延,因此南北方向上火灾蔓延较慢。同时根据获取的气象数据发现,在3月31日上午08:00至10:00风向突变为东风,因此加速了森林火灾向东的蔓延。通过后续火场蔓延模拟与实际对比发现,系统能模拟火灾向东蔓延趋势。从3月31日15:00的火场开始模拟的结果显示,蔓延经过一次修正后,基本实现了对东部山区的蔓延预测,同时能预测火灾向南北方向的蔓延趋势,对南北两侧与峡谷平原地区的城镇-森林交界域火灾救援行动具有一定的指导意义。从4月1日11:30的火场模拟结果显示,再次经过修正后,模拟的精确度有了大幅提升,基本实现东侧及南北两侧的火灾蔓延预测。

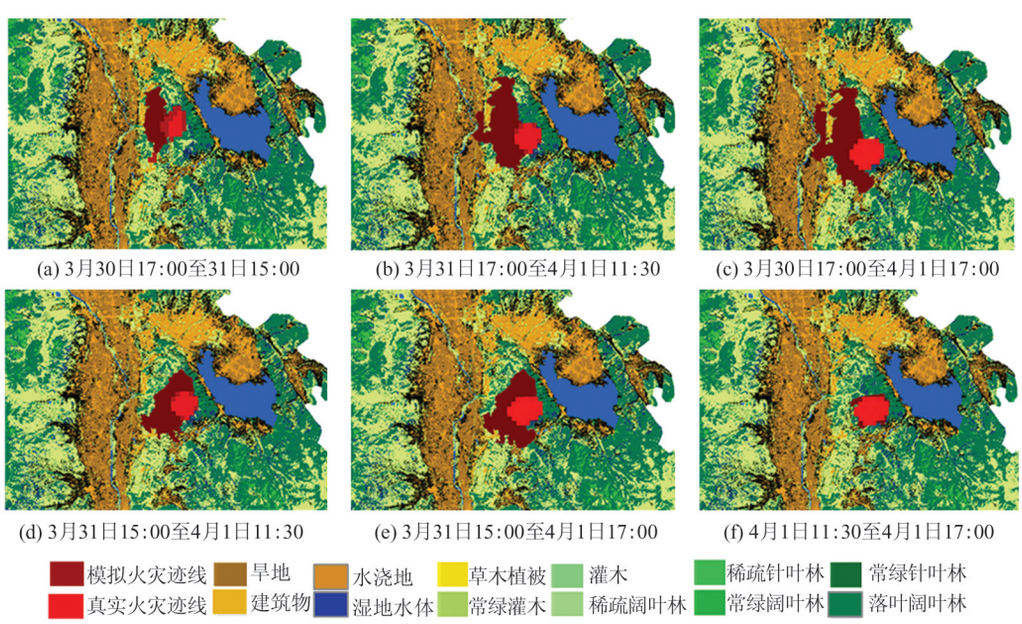


图10 火灾蔓延模拟预测结果

Fig. 10 Fire Spread Simulation and Prediction Results

3.3.3 误差分析

为分析模拟与实际火场范围的差异,全面反映森林火灾燃烧蔓延预测模型动态修正模拟结果功能,引入Sørensen-Dice(SC)系数、均方根误差(root mean square error,RMSE)、平均绝对误差(mean absolute error,MAE)[61]。SC系数越高,相似度越高;而RMSE和MAE系数越低,误差越低。计算公式如下:

$$c_{SC}=\frac{2|S\cap R|}{|S|+|R|} \tag{3}$$

$$E_{RMSE}=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i-\hat{y}_i\right)^2/n} \tag{4}$$

$$E_{MAE}=\sum_{i=1}^{n}\left|y_i-\hat{y}_i\right|/n \tag{5}$$

式中,c_{SC}为SC系数值;|S|和|R|分别是预测火场与实际火场的面积;$|S\cap R|$表示预测火场与实际火场的交集部分面积;y_i为第i个实际火场面积;$\hat{y}_i$为第i个模拟预测的火场面积;n为样本数量。

图11为模拟的实际交集与实际火焰蔓延面积的对比,可以发现,3次火灾蔓延模拟与实际火

灾的交集面积均随时间的增加逐渐增大。3月30日17:00未经修正时,预测的面积与实际面积的差值较大;但经过修正模拟后,模拟火灾蔓延与实际火灾蔓延的交集面积逐渐增加,能更好地预测火灾蔓延。分析可知,4月1日11:30第二次优化,交集面积与实际蔓延面积的差值较前两次模拟有了很大的减小,由此证明实时调用动态情景数据可有效降低预测与实际火灾蔓延面积的误差,提高森林火灾燃烧蔓延预报的精度。

图12为各个工况的SC、RMSE及MAE系数的变化。通过图12(a)RMSE和MAE系数发现,随着动态修正次数的增加,对应系数值均逐渐降低,MAE和RMSE系数表现的模拟与预测面积的误差值最终均降至0.55 km^2,反映了模型动态修正降低模拟与实际面积误差的功能。通过图12(b)SC系数可以发现,第一次模拟结果与实际具有较大差异,相似系数逐渐变小,最终模拟结果与实际火场对比相似系数低于0.1,这可能是由于人为、气象等因素影响森林火灾蔓延的过程,同时蔓延时长较长。经过动态修正后,相似系数有著提升,最终达到80%以上。同时,随着模拟时长增加,模拟精度逐渐降低。

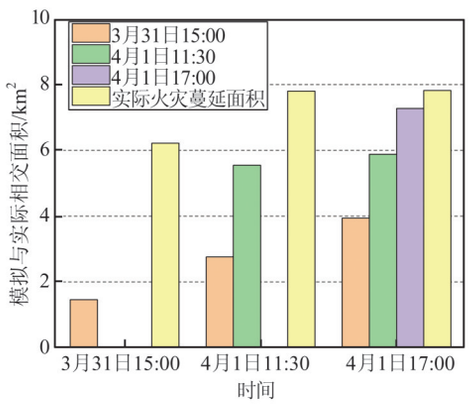
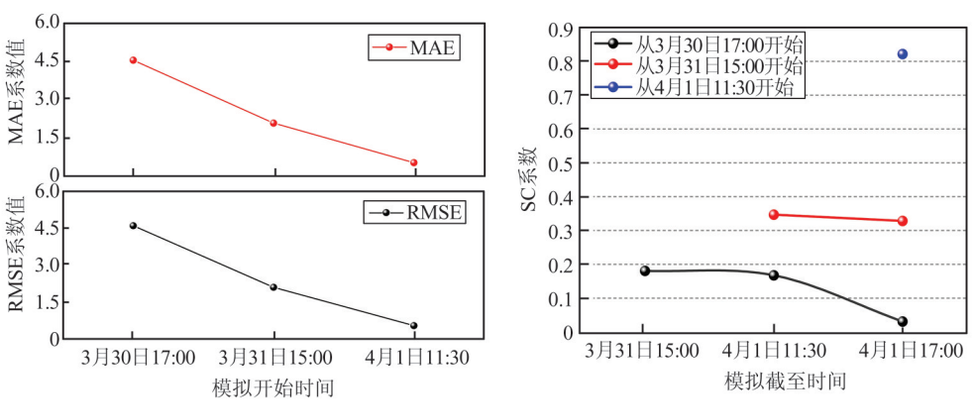


图11　模拟与实际火灾蔓延面积对比

Fig. 11　Simulated and Actual Fire Spread Area



(a) RMSE和MAE系数　　(b) SC系数

图12　系数变化图

Fig. 12　Factors Changes

3.4　讨论

本文利用真实案例对森林火灾燃烧蔓延预报平台进行了验证,采用SC、RMSE及MAE系数对平台动态修正功能进行了评估,发现该平台能较好地实现对森林火灾蔓延的模拟预测,能为森林火灾消防救援与应急决策提供一定的指导。但本文仅对一个真实森林火灾案例进行了分析,且未充分考虑强风、飞火等特殊条件,因此后续将利用更多的真实森林火灾案例验证预测模型的适用性,也将进一步考虑特殊条件对预测适用性的影响。另外,机器学习方法在灾害态势预测与风险评估方面得到了广泛应用,因此后续研究会将机器学习方法引入蔓延预测模型中,以优化提升森林火灾蔓延预测模型的适用性。

4　结　语

本文以Rothermel模型和Van Wagner树冠火引燃模型为核心计算模型,惠更斯原理作为森林火灾燃烧蔓延预测模型的核心计算原理,确定了森林火灾燃烧蔓延预测模型的计算流程,设计开发了森林火灾燃烧蔓延预报平台,实现了情景数据动态输入、火灾范围蔓延与火场关键信息实时预报及动态修正等功能。以某真实森林火灾数据为例,依托森林火灾燃烧预报平台,利用森林火灾燃烧蔓延预测模型,对区域内风场变化和火灾蔓延过程分别进行模拟预测,并调用高精度遥感卫星动态情景数据迭代优化火灾蔓延的模拟预测结果。

通过对区域内风场的模拟,分析地形与风向

对实际风场的影响,发现河流两侧开阔的平原区域风速与风向变化较小,上坡风风速较低,下坡风风速较高;同时受风向与地形的影响,峡谷平原区域的走向与风向平行时风速较广阔平原的风速更高,也高于峡谷平原区域的走向与风向不平行时的风速。通过对森林火灾蔓延过程与范围的模拟预测与优化,发现火灾蔓延预测与实际火灾面积相似度有明显提高,有效地降低了蔓延预测结果与实际火场的误差,验证了森林火灾燃烧蔓延预测模型与预报平台的可行性及有效性。本预报平台解决了传统森林火灾模拟系统静态输入、输出的局限性,结合现场情景数据以提高蔓延预测精度,满足了火场救援的实战需求,为森林防灭火应急指挥救援部署提供了有力的决策保障。

参 考 文 献

[1] 国家统计局. 中华人民共和国2023年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2024-02-29) https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228_1947915.html.
National Bureau of Statistics. People's Republic of China National Economic and Social Development Statistical Bulletin for the Year 2023 [EB/OL]. (2024-02-29) https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228_1947915.html.

[2] 邓欧,李亦秋,冯仲科,等. 基于空间Logistic的黑龙江省林火风险模型与火险区划[J]. 农业工程学报,2012,28(8):200-205.
DENG Ou, LI Yiqiu, FENG Zhongke, et al. Model and Zoning of Forest Fire Risk in Heilongjiang Province Based on Spatial Logistic[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(8): 200-205.

[3] 王爱斌,殷继艳,翟杰休,等. 近十年林火科学方向学位论文分析[J]. 森林防火,2023,41(1):47-52.
WANG Aibin, YIN Jiyan, ZHAI Jiexiu, et al. Analysis of the Dissertations of Graduate Stude nts on Forest Fire Science in Recent Ten Years[J]. *Journal of Wildland Fire Science*, 2023,41(1):47-52.

[4] 王明玉. 气候变化背景下中国林火响应特征及趋势[D]. 北京:中国林业科学研究院,2009.
WANG Mingyu. Characteristics and Trend of Forest Fire Response in China Under the Background of Climate Change[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2009.

[5] 郭福涛,苏漳文,马祥庆,等. 大兴安岭塔河地区雷击火发生驱动因子综合分析[J]. 生态学报,2015,35(19):6439-6448.
GUO Futao, SU Zhangwen, MA Xiangqing, et al. Climatic and Non-Climatic Factors Driving Lighting-Induced Fire in Tahe, Daxing'an Mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(19): 6439-6448.

[6] 潘登,张合平,潘高,等. 桂西南松栎林火行为研究及碳排放计量[J]. 自然灾害学报,2017,26(5):51-61.
PAN Deng, ZHANG Heping, PAN Gao, et al. Fire Behavior and Carbon Emission of Pine Oak Forests in Southwest Guangxi of China[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2017, 26(5): 51-61.

[7] 惠珊,芮小平,李尧. 一种耦合元胞自动机的改进林火蔓延仿真算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2016,41(10):1326-1332.
HUI Shan, RUI Xiaoping, LI Yao. An Improved Forest Fire Spread Simulation Algorithm Coupled with Cellular Automata[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(10): 1326-1332.

[8] FONS W. Analysis of Fire Spread in Light Forest Fuels[J]. *Journal of Agricultural Research*, 1946, 72(3):93-121.

[9] ROTHERMEL R. A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels[R]. Ogden: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1972.

[10] 王正非. 通用森林火险级系统[J]. 自然灾害学报,1992,1(3):39-44.
WANG Zhengfei. Current Forest Fire Danger Rating System[J]. *Journal of Natural Disasters*, 1992, 1(3): 39-44.

[11] 王正非. 山火初始蔓延速度测算法[J]. 山地研究,1983,1(2):42-51.
WANG Zhengfei. The Mesurement Method of the Wildfire Initial Spread Rate[J]. *Journal of Mountain Research*, 1983, 1(2): 42-51.

[12] ROTHERMEL R C. Predicting Behavior and Size of Crown Fires in the Northern Rocky Mountains [M]. London:Forgotten Books, 1991.

[13] FINNEY M, ANDREWS P L. FARSITE—A Program for Fire Growth Simulation[J]. *Fire Management Notes*, 1999, 59(2):13-15.

[14] 王晓红,王千雪,于宏影,等. FARSITE模型原理、结构及其在林火行为模拟中的应用[J]. 温带林业研究,2022,5(4):55-60.
WANG Xiaohong, WANG Qianxue, YU Hongying, et al. Principle and Structure of FARSITE Model and Its Application in Simulation of Forest Fire Be-

havior[J]. *Journal of Temperate Forestry Research*, 2022, 5(4): 55-60.

[15] 王惠, 周汝良, 庄娇艳, 等. 林火蔓延模型研究及应用开发[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2008, 22(3): 295-300.
WANG Hui, ZHOU Ruliang, ZHUANG Jiaoyan, et al. Research of Forest Fire Spread Models and the Development of Simulation Module[J]. *Journal of University of Jinan* (*Science and Technology*), 2008, 22(3): 295-300.

[16] VAN WAGNER C E. Conditions for the Start and Spread of Crown Fire[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1977, 7(1): 23-34.

[17] VAN WAGNER C E. Prediction of Crown Fire Behavior in Two Stands of Jack Pine[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1993, 23(3): 442-449.

[18] ANDREWS P L. BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System—BURN Subsystem, Part 1[M]. GTR-INT-194, USDA Forest Service, 1986.

[19] Finney M A. FARSITE: Fire Area Simulator-Model Development and Evaluation [EB/OL]. FARSITE Software and Users Guide, http://www.farsite.org,2004.

[20] PAPADOPOULOS G D, PAVLIDOU F N. A Comparative Review on Wildfire Simulators[J]. *IEEE Systems Journal*, 2011, 5(2): 233-243.

[21] CWFGM Steering Committee. Prometheus User Manual V. 3.01[J]. *Canadian Forest Service*, 2004.

[22] LIU N A, WU J M, CHEN H X, et al. Upslope Spread of a Linear Flame Front over a Pine Needle Fuel Bed: The Role of Convection Cooling[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(3): 2691-2698.

[23] YAN W D, LIU N A, ZHU H, et al. Effect of Cross-Wind on Firebrand Flame: An Experimental Study and Scaling Analysis[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2024, 40(1/2/3/4): 105621.

[24] 吕云欢, 刘乃安, 谢小冬, 等. 火前锋附壁的模拟实验研究[J]. 火灾科学, 2020, 29(4): 207-213.
LÜ Yunhuan, LIU Naian, XIE Xiaodong, et al. Experimental Simulation Study on Flame Attachment in Fire Spread[J]. *Fire Safety Science*, 2020, 29(4): 207-213.

[25] XIE X D, LIU N A, RAPOSO J R, et al. An Experimental and Analytical Investigation of Canyon Fire Spread[J]. *Combustion and Flame*, 2020, 212: 367-376.

[26] 杜治昊, 刘乃安, 谢小冬, 等. 坡度对峡谷火蔓延影响的实验研究[J]. 火灾科学(中英文), 2024, 33(1): 10-17.
DU Zhihao, LIU Naian, XIE Xiaodong, et al. Experimental Study of Slope Effect on Canyon Fire Spread[J]. *Fire Safety Science*, 2024, 33(1): 10-17.

[27] 吴荻, 刘乃安, 谢小冬, 等. 坡度条件下湍流扩散火焰形态的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(8): 2150-2154.
WU Di, LIU Naian, XIE Xiaodong, et al. Experimental Study on the Turbulent Diffusion Flame Under Slope Conditions[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2021, 42(8): 2150-2154.

[28] GUO H W, KONG L Y, GAO Y J, et al. Transition from Surface Fire to Crown Fire and Effects of Crown Height, Moisture Content and Tree Flower[J]. *Fire Technology*, 2024, 60(2): 1403-1419.

[29] GUO H W, XIANG D, KONG L Y, et al. Upslope Fire Spread and Heat Transfer Mechanism over a Pine Needle Fuel Bed with Different Slopes and Winds[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 229: 120605.

[30] GUO H W, XIANG D, ZHANG P Y, et al. Effects of Wind on Heat Transfer and Spread of Different Fire Lines Across a Pine Needle Fuel Bed[J]. *Combustion Science and Technology*, 2025, 197(4): 782-802.

[31] GUO H W, YANG Z Y, YE Z Q, et al. Experimental Analysis on the Behaviors of a Laboratory Surface Fire Spreading Across a Firebreak with Different Winds[J]. *Forests*, 2023, 14(12): 2455.

[32] SINGH A V, GOLLNER M J. Estimation of Local Mass Burning Rates for Steady Laminar Boundary Layer Diffusion Flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(3): 2527-2534.

[33] TANG W, MILLER C H, GOLLNER M J. Local Flame Attachment and Heat Fluxes in Wind-Driven Line Fires[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(2): 3253-3261.

[34] GOLLNER M J,林少润,黄鑫炎. 防御空间:应对野火防控中的挑战[J]. 中国林业, 2020(5):4.
Gollner M J, LIN Shaorun, HUANG Xinyan. Defensive Space: Addressing the Challenges in Wildfire Prevention and Control[J]. *Forestry of China*, 2020(5):4.

[35] SHEIKH B. Phoenix: Development and Application of a Bushfire Risk Management Tool[J]. *Australian Journal of Emergency Management*, 2008, 23(4):47-54.

[36] MANDEL J, BEEZLEY J D, COEN J L, et al.

Data Assimilation for Wildland Fires[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2009, 29(3): 47-65.

[37] 钱兰, 张启兴, 张永明. 集合卡曼滤波算法对FARSITE模型林火蔓延预测的修正效果研究[J]. 火灾科学, 2020, 29(1): 32-41.
QIAN Lan, ZHANG Qixing, ZHANG Yongming. Correction Effect of Ensemble Kalman Filter Algorithm on FARSITE Prediction [J]. *Fire Safety Science*, 2020, 29(1): 32-41.

[38] 周腾蛟. 基于ETKF的大尺度林火蔓延预测数据同化研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
ZHOU Tengjiao. Study on Data Assimilation of Large Scale Wildland Fire Spread Prediction Based on Ensemble Transform Kalman Filter[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.

[39] ZHOU T J, DING L, JI J, et al. Ensemble Transform Kalman Filter (ETKF) for Large-Scale Wildland Fire Spread Simulation Using FARSITE Tool and State Estimation Method[J]. *Fire Safety Journal*, 2019, 105: 95-106.

[40] 徐奔奔, 王炜烨, 陈良富, 等. 基于VIIRS火点数据和FARSITE系统的森林火灾蔓延模拟[J]. 遥感学报, 2022, 26(8): 1575-1588.
XU Benben, WANG Weiye, CHEN Liangfu, et al. Forest Fire Spread Simulation Based on VIIRS Active Fire Data and FARSITE Model[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(8): 1575-1588.

[41] FROST S M, ALEXANDER M E, JENKINS M J. The Application of Fire Behavior Modeling to Fuel Treatment Assessments at Army Garrison Camp Williams, Utah[J]. *Fire*, 2022, 5(3): 78.

[42] 辛淇, 袁媛, 周君晗, 等. FARSITE和Cell2Fire森林火灾蔓延模拟系统对比及重初始化研究[J]. 遥感学报, 2025, 29(4): 945-957.
XIN Qi, YUAN Yuan, ZHOU Junhan, et al. Comparative Analysis of Forest Fire Spread Simulation and Reinitialization Methods Based on FARSITE and Cell2Fire[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2025, 29(4): 945-957.

[43] 韩超然, 李霖, 任福. 森林火灾应急救援情景演化Web三维模拟: 以四川省西昌市泸山"3.30"森林火灾为例[J]. 时空信息学报, 2024, 31(4): 541-552.
HAN Chaoran, LI Lin, REN Fu. Web-Based 3D Simulation of the Emergency Rescue Scenario Evolution for Forest Fires—A Case Study of the "3.30" Forest Fire in Lushan, Xichang City, Sichuan Province [J]. *Journal of Spatio-Temporal Information*, 2024, 31(4): 541-552.

[44] 田玉萍, 金成宇, 王斌, 等. 基于改进的王正非模型结合元胞自动机的林火蔓延预测[J]. 中南林业科技大学学报, 2024, 44(5): 14-25.
TIAN Yuping, JIN Chengyu, WANG Bin, et al. Forest Fire Spread Prediction Based on Improved Wang Zhengfei Model Combined with Cellular Automata[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2024, 44(5): 14-25.

[45] 刘良明, 魏然, 周正. 利用动态阈值的森林草原火灾火点检测算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(12): 1434-1437.
LIU Liangming, WEI Ran, ZHOU Zheng. Forest and Grassland Fire Detection Algorithm Based on Dynamic Threshold[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(12): 1434-1437.

[46] 李传荣, 贾媛媛, 胡坚, 等. HJ-1光学卫星遥感应用前景分析[J]. 国土资源遥感, 2008, 20(3): 1-3.
LI Chuanrong, JIA Yuanyuan, HU Jian, et al. An Analysis of the Prospects of HJ-1 Optical Satellites in Remote Sensing Application[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2008, 20(3): 1-3.

[47] 万天真, 潘俊, 王密. 双边加权组稀疏残差约束的面阵卫星影像去噪[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(6): 935-944.
WAN Tianzhen, PAN Jun, WANG Mi. Area-Array Satellite Images Denoising Based on Bilateral Weighted Group Sparsity Residual Constraint Model [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(6): 935-944.

[48] 眭海刚, 冯文卿, 李文卓, 等. 多时相遥感影像变化检测方法综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 1885-1898.
SUI Haigang, FENG Wenqing, LI Wenzhuo, et al. Review of Change Detection Methods for Multi-Temporal Remote Sensing Imagery[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 1885-1898.

[49] 李德仁, 李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(5): 505-513.
LI Deren, LI Ming. Research Advance and Application Prospect of Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing System [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(5): 505-513.

[50] 张致齐, 王密, 曹金山, 等. 基于物方一致性的珞珈三号01星视频数据在轨实时稳像[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(6): 899-910.
ZHANG Zhiqi, WANG Mi, CAO Jinshan, et al.

Object-Space-Consistency-Based Real-Time Stabilization Approach for Luojia3-01 Video Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(6): 899-910.

[51] 和桂舒. 森林火灾的风险性评估分析[J]. 中国林副特产, 2021(1): 108-109.
HE Guishu. Risk Assessment and Analysis of Forest Fires[J]. *Forest By-Product and Speciality in China*, 2021(1): 108-109.

[52] ANDERSON H E. Aids to Determining Fuel Models for Estimating Fire Behavior[R]. Gen Tech Rep INT-GTR-122, U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT, 1982.

[53] SCOTT J, BURGAN R. Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel's Surface Fire Spread Model[R]. General Technical Report RMRS-GTR-153, United States Department of Agriculturem, 2005.

[54] 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 Researohes on Forest Fire Spreading Models and Simulating Method[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(1): 87-91.

[55] 单延龙, 舒立福, 王洪伟, 等. Rothermel火蔓延模型特征参数的解析[J]. 森林防火, 2003(1): 22-25.
SHAN Yanlong, SHU Lifu, WANG Hongwei, et al. Analysis of Characteristic Parameters of Rothermel Fire Spread Model[J]. *Journal of Wildland Fire Science*, 2003(1): 22-25.

[56] 吴志伟, 贺红士, 胡远满, 等. FARSITE火行为模型的原理、结构及其应用[J]. 生态学杂志, 2012, 31(2): 494-500.
WU Zhiwei, HE Hongshi, HU Yuanman, et al. Principle, Structure, and Application of FARSITE Fire Behavior Model[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(2): 494-500.

[57] NELSON R M. Prediction of Diurnal Change in 10-h Fuel Stick Moisture Content[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, 30(7): 1071-1087.

[58] 严刚. 基于Pleiades影像的川西南山地常绿阔林林分胸径、树高和冠幅的估测研究[D]. 雅安:四川农业大学, 2015.
YAN Gang. Estimation of Stand DBH, Tree Height and Crown Width of Montane Evergreen Forest Wide Based on Pleiades Image in Sichuan Southwest[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2015.

[59] 张玉春, 向冬, 郭瀚文, 等. 川西南森林可燃物分布调研及潜在火行为研究[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(2): 108-116.
ZHANG Yuchun, XIANG Dong, GUO Hanwen, et al. Research on the Distribution of Combustible Materials and Potential Fire Behavior in Southwest Sichuan Forests[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2023, 32(2): 108-116.

[60] 柏艺. 基于3种不同数据源的川西南常绿阔叶林郁闭度估算模型研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016.
BAI Yi. Canopy Density Estimation Model of Three Different Data Sources of Southwest Sichuan Evergreen Broad-Leaved Forest[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2016.

[61] SØRENSEN T. A Method of Establishing Groups of Equal Amplitude in Plant Sociology Based on Similarity of Species and Its Application to Analyses of the Vegetation on Danish Commons[M]. Biologiske Skrifer: Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab, 1948.