

西方国家森林火灾研究架构与技术建树

宋志龙¹, 王海晖^{1*}, 吴泽鹏², 杨峰峰^{1,3}, 靳邦鑫¹, 王振师²

¹中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥

²广东省林业科学研究院, 广东 广州

³陇东学院能源工程学院, 甘肃 庆阳

收稿日期: 2021年12月2日; 录用日期: 2022年3月26日; 发布日期: 2022年4月1日

摘要

本文从西方国家研究机构的主要技术成就出发, 对其利用经典实验方法和理论开发出的先进森林火灾防控技术路径进行跟踪和梳理, 探讨开发利用技术的一贯性和有效性。美国、加拿大和欧洲等国家及地区开展森林火灾科学防治工作较早, 火灾防治研究遵循系统化、信息化和标准化发展理念, 技术成果分别覆盖火险监测和预警、火行为预测预报以及应急管理等诸多方面。相应的林火管理的方针导向侧重于科学预防和大幅度使用现有技术成果。近些年全球气候变化加剧, 极端天气条件频发, 我国森林火灾呈多发性和显著灾害性特点, 运用成熟的林火行为和管理的理论以及智能化技术平台对于加强和提升我国林火管理工作的水平有现实意义。

关键词

森林防火, 研究机构, 研究策略, 防治技术, 系统化, 信息化, 标准化, 生态保护

Forest Fire Research Framework and Technical Achievements in Western Countries

Zhilong Song¹, Haihui Wang^{1*}, Zepeng Wu², Fengfeng Yang^{1,3}, Bangxin Jin¹, Zhenshi Wang²

¹State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei Anhui

²Guangdong Academy of Forestry Sciences, Guangzhou Guangdong

³School of Energy Engineering, Longdong University, Qingyang Gansu

Received: Dec. 2nd, 2021; accepted: Mar. 26th, 2022; published: Apr. 1st, 2022

*通讯作者 Email: hhwang4@ustc.edu.cn

Abstract

In light of the main technical achievements made by research institutions in western countries, we tracked and sorted out the path of advanced forest fire prevention and control technology developed from the classical experimental methods and theories, and discussed the consistency and effectiveness of the development and application of the associated technical systems. Since an earlier time in last century, forest fire prevention and control research in the United States, Canada, Europe and other countries and regions was carried out by following the development concept of systematization, informationization and standardization, with the technical accomplishments covering fire risk monitoring and early warning, fire behavior prediction and forecasting, and emergency management aspect. The corresponding policy in forest fire management and control focuses on scientific prevention and extensive use of existing technical achievements and systems. In recent years, global climate change has intensified and extreme weather conditions have occurred frequently. Forest fires in China are characterized by frequent occurrences and significant disastrous characteristics. The utilization of mature forest fire behavior and management theories and intelligent technology is essential and has practical significance for strengthening and improving forest fire management levels in China.

Keywords

Wildland Fire, Research Institution, Research Strategy, Fire Prevention and Control Technology, Systematization, Informatization, Standardization, Ecological Protection

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

作为燃烧植被为特征的野外火灾，破坏性不只是冲击自然生态环境，还会横扫林间各项设施，殃及毗邻的居民住宅，导致社会动荡和人民生命财产损失。遭受大规模火灾来袭的地区，不得不宣布进入紧急状态[1]。由于其地处偏远、发现和扑救困难等原因，常常造成动辄数亿元甚至数百十亿元灾害控制以及善后费用，及时评估和预测森林火灾风险并开展相应的林火管理成为森林火灾防治的工作重点[1] [2]。

现代森林火灾防治技术研究始于北美大陆，20世纪中后期逐步走向繁荣。其中以美国、加拿大等国研究策略和手段较为典型，成果集中体现在根据实验拟合了大量的经验公式和由此推导出的数学模型[2]-[7]。作为开放环境中的一种复杂的燃烧现象，火灾受到环境气流和湿度以及燃烧介质等因素的影响，也会随着自身的发展反过来影响这些因素。由于林区较为复杂的地理情况和气候条件，有效的预测预报曾经力不从心。计算机技术使得处理大量的数据以得到高精度的模拟结果成为可能，这些国家的研究人员率先将传统研究成果转化为标准的森林火灾风险评估模型，基于林火行为理论开发出的森林火灾决策支持系统也已在业界得到大规模应用[2]-[7]。

从传热学、流体力学、生物学、气象学等方面对火灾发生和发展影响因子进行分析，并利用计算机强大计算能力在高度实用的地理信息平台上演算，完全可以构建较好的森林火灾分析预测能力。本文从国际著名实验室的发展历程入手，跟踪其主体研究框架、技术路线和核心研究成果，并通过对比

分析其取得成就的根源。本文最后展望森林火灾防治技术在国内的应用前景并预测林火研究的未来发展方向。

2. 森林火灾研究发展沿革及主攻方向

1926年美国部署国家林火研究项目，并组建加利福尼亚试验站[3]。差不多同一时期，加拿大佩塔瓦瓦森林实验站的研究人员在安大略省的乔克河着手建立针对气象观测和可燃物含水量研究的观测站，利用野外实地点火实验对森林主要类型可燃物受天气、湿度等特征因子的影响进行研究[8]。二战结束后，美国政府加大资金投入力度，将林火研究的重心从战时的军事化应用和核攻击引起的生态灾害向林火发生和行为预测以及火灾控制等方面转移，相继在蒙大拿的米苏拉(Missoula)、加利福尼亚的里韦尔西(Riverside)建立了各有侧重的研究实验站。经过长期和一贯性努力，这些研究站不断涌现出举世瞩目的林火研究理论性成果，包括著名的 Rothermel 火蔓延模型，为后续开发利用技术软件和信息化系统奠定了坚实的基础。

上世纪七十年代，随着计算机技术快速发展，研究工作模式随之发生巨变。由美国农业部林务局牵头组织开发了一系列应用软件，包括 Behave、BehavePlus、FlamMap、Farsite 和 WindWizard 等，覆盖火险预测、蔓延发展、阻隔与扑救辅助决策以及善后管理诸多方面，在地形、地貌遥感数据以及气象数据基础上实现了系统功能的高度集成[2] [4] [5] [6]。与此同时，加拿大林务局组织许多林火专家，开发出了加拿大森林火灾危险等级系统(Canada Forest Fire Danger Risk System, CFFDRS)。该系统模块化程度高，便于移植，具有结果输出直观明晰、适用性强等特点，已经成为全世界范围内认可度最高的森林火险预测预报系统[8] [9] [10]。

依照不断发展的研究思路，欧洲国家相关研究机构也有大量研究成果产生。1971年 Kourtz 利用计算机的动态规划算法对不均匀、不连续的可燃物火灾蔓延情况进行模拟[11]；1985年 Kessel 主导开发的第一代森林火灾决策支持系统 Preplan 问世，系统将经典的 Rothermel 火蔓延数学模型叠加进地理信息系统(GIS) [4]。输入的参数基本涵盖了所有影响林火蔓延的因素，包括环境风速、地形坡度、燃料载量、体表比、含水量以及大气-林火-烟尘交互等方面，从而大大增强了系统的实用性和有效性[3]。此后，每隔几年研究人员都对该系统进行更新升级。

欧美国家间注重国际交流和优势互补，使得应用技术系统的重要组件和功能得以迅速拓展。1990年应用软件叠加进实时天气预报和监控模块；1991年加入火灾危险性评估指数；1994年 Eftichidis 开发出预防和灭火辅助决策支持子系统；1995年 Finney 成功建立早期火灾行为预测模拟的模块[2] [3] [12] [13] [14] [15] [16]。在之后的更新和维护中，研究人员不断优化算法，强化上述功能间的综合评估和协调校准，并随着平行技术的不断发展引入专家系统和人工智能等新技术。

西方国家较成熟的森林防火应用技术主要体现在构建了一个主体应用软件。该软件通常包含火灾风险评估、火蔓延预测、灭火辅助决策等几个关键技术单元，软件的底层逻辑则为经验公式组合[2] [6] [7] [12] [13] [14] [15] [16]。为改进和提高模型的适用性和准确性，研究人员将大量的参数直接整合进主体软件或与主体软件实现数据联用。以美国林火实验室为例，实验室迭代开发了多版本火场空间风场变化的软件，如 WindWizard 和 WindNinja 等，用于模拟森林火灾现场风场变化。可以将运行数据直接导入到主体软件 FlamMap 中作为输入参数，在进行计算后又可以将生成的文件导入 GIS 中进行可视化识别和使用，如图 1 所示[2] [12] [16]。与此类似的参数还有地形、地貌的空间模型和可燃物模型等。就发展的结果而言，西方国家研究机构开展森林火灾防治技术的软件化实践，克服了传统假设法的局限性，充分利用计算机算力将林火理论和经验公式进行多特征分析和研判，大大提升了输出结果的有效性和实际价值，已成为当今国际业界林火科学研究的主流方向[2] [6] [7]。



Figure 1. An example of the development framework of the US forest fire management systems
图 1. 美国林火管理系统研究开发框架举例

3. 代表性研究成果及应用领域

3.1. 米苏拉火灾科学实验室研究成果

米苏拉火灾科学实验室为美国农业部林务局下属机构，前身为北方林火实验室。实验室至今已有 60 年历史，其作为火灾领域的科学实验室在业界声名斐然[2]-[7]。实验室由业务主管和项目经理牵头，统筹协调项目开展；每名研究人员都有自己负责的总体研究方向。实验室拥有化学家、生态学家、林学家，还有高度专业化的空间火灾分析师、生物科学研究员、火灾行为研究员、信息技术人员和机械工程师等。这样的组织架构，既保证了有足够的力量组织实施大型综合性项目，也使得每一位研究员完全可以在自己所属领域自由发挥并有所建树[5] [6] [7]。米苏拉火灾科学实验室杰出的工作成果主要体现在系统开发了火灾预测和分析软件。

BehavePlus 软件是一款适用于各种火灾场景的预测软件，可以对正在发生的火灾行为进行模拟和评估[4] [5] [6] [7]。随着软件的不断开发完善，软件已具有评估可燃物潜力、火灾建模研究以及规划防火分隔和灭火战术等功能。系统以大量经验公式构建的数学模型为基础，设置了常见的 53 种标准燃料模型，如低矮灌木、下层林木和腐殖质层等，也可以由用户对可燃物进行自定义操作[4] [5] [6] [7]。系统配备了地表火灾蔓延、树冠火灾规模、可燃物之间的距离、烧灼高度、植被存活率和起火概率等几个火场主要模块，通过这些模块细化多项参数的预测，如地表火蔓延模块，输入项包括燃料类型、湿度、坡度、风速和方向等参数。据此给出了火灾蔓延速度、单位面积能量强度、火焰长度、最大速度方向等指标。另外，软件还提供了林火蔓延研究的辅助工具，包括确定火场坡度数据、计算林间腐殖质的水分含量和相对湿度等，为林火的快速模拟预测以及辅助防火分隔和灭火决策提供有力支撑[5] [6] [7]。调查数据显示，美国有超过 89% 林务从业人员在使用 BehavePlus，使其成为目前行业上最有影响的软件之一[5] [6] [7]。

开发的国家火灾风险等级评估系统(NFDRS)提供美国国家级森林火灾危险分级制度，具体由野外火灾评估系统(WFAS)来实现[7] [12] [15]。系统通过当前天气与近三十年左右的历史数据进行比对，

并考虑不同地区的火灾风险因素、天气、可燃物特性等几个重要相关因素，相应给出全国范围内的火灾风险等级地图[12] [15]。几乎所有已知与火灾风险相关的因素都被纳入该系统之中，包括测量低层大气稳定性和干燥度的海恩斯指数(Haines Index)、降水雷击分布以及雷击点火效率等。以 Google 地球为平台，结合使用包括环境湿度、温度、风速等因素在内的火场气象图，从而对美国全境超过 1000 个以上观测站的数据进行火灾风险评估。考虑的影响因子还包括可燃物沉积在时域上的水分图、水分输送的季节指数(Season index)和蒸散作用的 Keetch-Byram 干旱指数等。这些影响因子均会导致森林火灾风险迁移，将它们的影响进行加权分析后，获得的国家火灾风险分布有了更准确呈现和更高参考价值(参见图 2)[12] [15]。

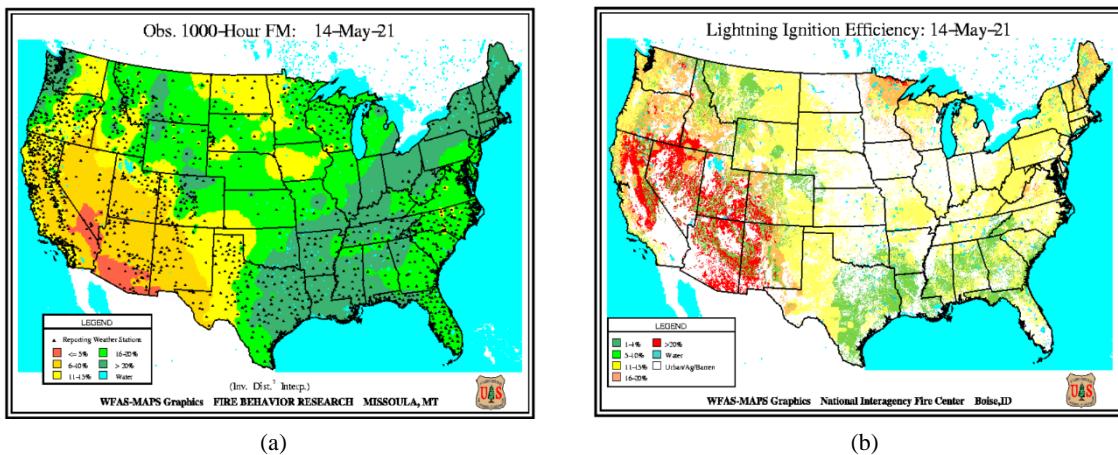


Figure 2. Part of the display interface in the WFAS wildfire assessment system: (a) Distribution moisture content of deactivated wildland fuels; (b) Lightning ignition efficiency across the nation

图 2. WFAS 野外火灾评估系统部分显示界面：(a) 失活可燃物含水量分布情况；(b) 雷击起火概率分布

火焰地图分析系统(Flam Map)用于表征特定条件下潜在的火灾行为，主要对空间火灾行为进行分析，包含有组件 Farsite、最小行程时间模型 MTT、处理优化模型以及条件燃烧机率模型[2] [12]。软件以地形(高度、坡度、长宽比)、特定燃料的火灾行为、林冠覆盖作用、林冠层高度、林冠基准高度、林冠堆积密度等八个参数构建初始的景观文件，再由 Farsite 组件将景观图像进行分析并导出每个区域的周长或时域变化面积，而 MTT 组件则可以在 Farsite 提取元素后计算给定的风速和天气条件下景观地域的燃烧概率和最少蔓延时间。系统成功将模拟局部地区风速分布的 Wind Ninja 软件与 Land fire 国家荒地森林基础数据库合并，可以在特定地形、燃料分布和含水量以及指定天气等环境条件下模拟预测较长时间的野火增长行为，为可燃物计划烧除以及可燃物管理提供工作指导[2] [12]。

3.2. 加拿大森林火灾危险等级系统(CFFDRS)

CFFDRS 是加拿大森林火灾危险性评估的国家级系统。这里的森林火灾危险性评估火灾环境中的多种因素，例如易燃性和火灾控制难度等，产生的指标可以直观反映森林火灾的破坏性和严重程度。系统通过运算可以量化潜在火灾相关指数，对未发生火灾地区的起火概率和已发生火灾的后续燃烧蔓延潜力进行评估。CFFDRS 系统主要由火灾气象指数系统(FWI)和火灾行为预测系统(FBP)两个子系统构成[8] [9] [10]。

FWI 研究的研究最早源自 20 世纪 20 年代，加拿大佩塔瓦瓦森林实验站的研究人员在安大略省的乔克河建立了针对气象观测和可燃物含水量研究的观测站，利用野外点火实验对森林主要类型可燃物受物种、天气和环境湿度方面的影响开展研究[8] [9]。1970 年 FWI 系统正式开发成功，软件的主体结

构如图 3 所示[9]。以时滞 - 平衡含水率理论作为基础, 实际输入项四项, 分别是区域地表温度、离地十米风速、降水量和相对湿度, 输入数据的简洁和易获得性保证了系统的实用性。

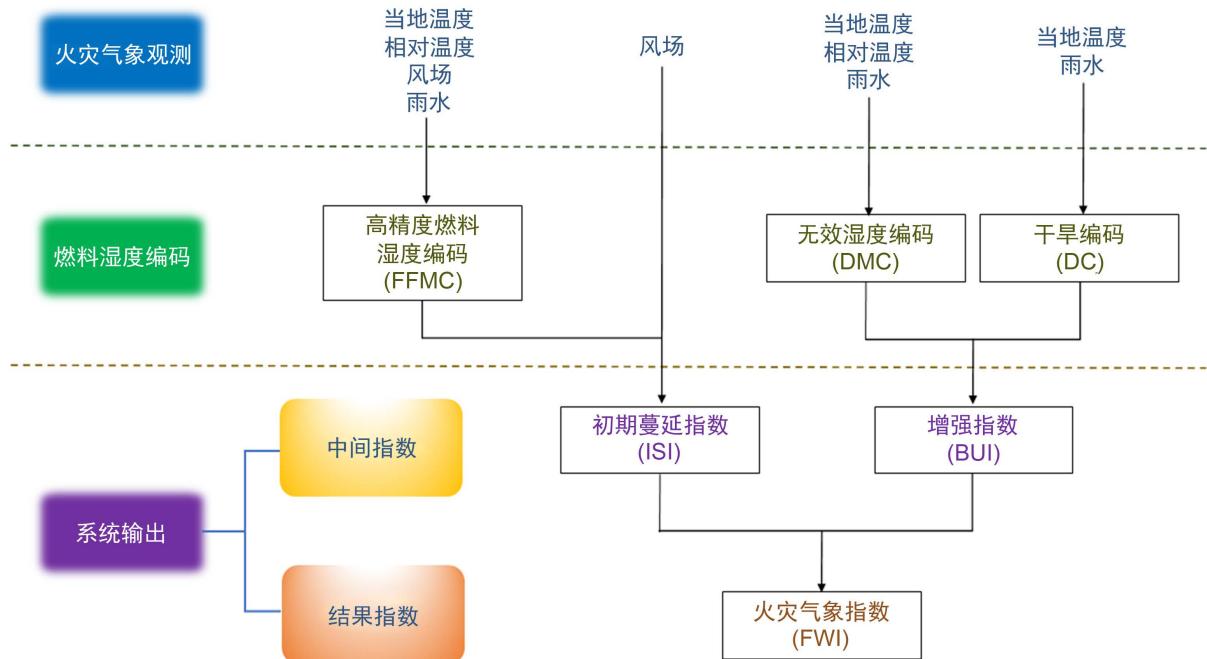


Figure 3. Structure of fire weather index system (FWI)

图 3. 火天气象指数系统(FWI)结构图

火灾行为预测系统 FBP 开发于 1984 年, 迄今进行过三次更新升级。输入变量有日期、海拔和经纬度、地形坡度、可燃物类型、FFMC、ISI、BUI 指数以及燃烧时长和燃烧模式。根据长期总结提取的经验公式, 可以使软件获得天气、地形、燃料、叶片含水量、预测类型和持续时间等五个类型的数据, 由此予以林火行为预测预报。主要输出结果有火蔓延速率、可燃物消耗量、火焰前锋的能量释放强度以及总体火灾图像, 也可以根据需要获得裙边和后翼的火势蔓延情况和过火面积的相关数据[8] [9]。

3.3. 欧洲地中海野外火灾实验室典型成果

森林火灾决策支持系统(Forest Fire Decision Support System, FFDSS)是泛欧洲实验室目前运行的主要系统之一, 已成功使用 35 年[16]。取得如此成功, 主要依赖其广泛适用性、高度有效性和稳定性。当然, 政策引导和支持也起到了重要推动作用。自 1984 年开发至今, 随着各项支撑学科的发展, 系统不断完善。

FFDSS 系统具体功能的开发采用面向对象程序设计的方法。依据森林火灾管理的需求, 模块化设计了以下子功能程序: 预防和抑制方案、火灾危险性评估、火灾探测、火灾行为预测、灭火作战(包括力量调度方案)、火灾影响评估和善后方案等。这些功能的实现虽然采用了模块化的设计方法, 但互相之间并不独立, 往往是其中一个功能模块也会应用另一个模块的数据信息和采用的数学模型等。针对火场恶劣且复杂的环境条件, 系统对火灾的扑灭与抑制进行预先规划, 主要操作步骤有可燃物分布地图生成与地形分析、电子数据库存储、火灾行为模型构建、火灾趋势模拟与评估以及相应的野外场景生成和分析工具实施[16]。计算机通过读取数据和信息, 可以帮助决策者识别危险, 确定优先等级, 并提供行动方案和指导等。在火灾探测预警层面, 主要考虑两个方面: 一是要尽早发现可能的起火点, 且要有一定的空

间精度。实践过程中要根据需求确定传感器的分布密度和使用特性。二是火灾探测是决策支持系统最重要的一个组成部分。在此基础上,研究人员开发了一款用于初期扑救策略的软件 IAFS,凭借地理数据、气候数据以及对以往真实火灾数据和监控获得的火灾视觉图像进行学习,采用模糊逻辑算法就火灾初期的扑救情况予以风险评估和决策指导。

4. 高度技术化的林火管理实践

美国国家林火管理和防治的思路是:将林火作为生态循环的一个环节,遵循自然发展的客观规律进行引导。目标是有效地实现林火发生前的预防,加强发生中的火灾扑救能力建设以及灾后损失评估与恢复。采取的方法很多,除传统的方法外,还有两个重要走向:一方面应用大数据的视角,分析和提取历史数据的深层价值;另一方面,着眼现阶段高新技术在防灾行业的应用,如生态防火、卫星遥感以及机器学习等[1] [17] [18] [19] [20] [21]。

目前广泛使用的国家火险等级评估系统 NFDRS,用于对全国范围内的地区的火灾风险等级进行评估,对重点地区有针对性的加强监控和防范。前边介绍的国土火灾风险评估系统(WFAS)即为该系统的重要子系统。WFAS 从宏观上给出了森林火灾预防的可视化参考,背后有大量的基础技术作为支撑,这就蕴含着上文所说的技术路线;例如,该系统以过去 30 年同时期国土火灾和气候数据作为权重,直接利用卫星接收站和气象监测站(FASS 塔)收集到的数据对全国的异常热点进行监控。该项技术日趋成熟,可以排除掉云层反射和工厂发热等情形,探测准确率基本满足实际使用要求。与此同时,以北美大陆两百年内的气候和森林演化数据为基础,WFAS 可以综合性地预测局部地区的生态演化情况并将其融入风险评估中[12] [18]。GIS 和 WindWizard 的联用使得考虑局部或整体地区的地形、地貌和风对火灾的影响成为可能。由美国农业部林务局牵头,以米苏拉火灾实验室、西太平洋林火实验室等实验室为具体实施单位,基于火灾行为分析还开发出一系列火灾烟气和碳排放估算以及灾后生态恢复的工具,均有广泛应用[4] [5] [6] [7] [12] [18]。

加拿大每年发生的野外火灾中只有 3%能达到 200 ha 以上,也正是这 3%的火灾造成了超过 97%的过火面积,产生八亿至十五亿美元的灭火费用[19] [20] [21] [22]。火灾的损失主要并不在于火灾数量,而是集中在大火。这是加拿大采取可燃物计划烧除策略的基本原因,人为调控好“火生态”能有效管理森林中可燃物的分布载量,从而避免形成大火甚至超级大火。加拿大国家森林火灾防治建设主要依赖智能火灾战略(Fire Smart)、火灾危险等级评估系统(CFFDRS)、火灾监测报告系统(Fire MARS)和加拿大野外火灾预警系统(CWFIS) [19] [20]。

利用 FireSmart 手册和网站,从生态因素和人为因素着手,为当地居民、林区规划人员和森林管理人员提供了森林附近保护房屋和社区的工作建议,还提供帮助提高公共安全、保护林火防护设施以及降低疏散和灭火成本的方法。在加拿大航天局的支持下,Fire Mars 更是高效利用多种分辨率的卫星图像与省市机构数据开展集成分析,为绘制全国性过火区域和有毒、有害气体动态分布状况提供了有力工具[19] [20]。

CWFIS 系统每天创建全国火灾气象图和火灾行为分布图,在森林火灾季节则提供全国高能热点分布情况以供参考[19] [20]。该系统利用地面卫星站对全国地区进行观测,可以对全国各地区火灾危险等级以及潜在火行为进行预测预报,极大地提高火灾预防和火灾扑救的效率[19] [20] [21] [22]。2016 年 5 月初野外火灾评估系统给出了阿尔伯塔省林火发生的危险等级和潜在火行为分布。可以看出,在火灾发生前 CFWIS 就已经揭示出了高火灾风险分布情况(图 4(a)),这在三日后森林大火卫星热点观测图中得到充分的验证(图 4(b)) [21] [22] [23]。大火的聚集区和蔓延趋势都和火灾危险性预测结果高度贴近。

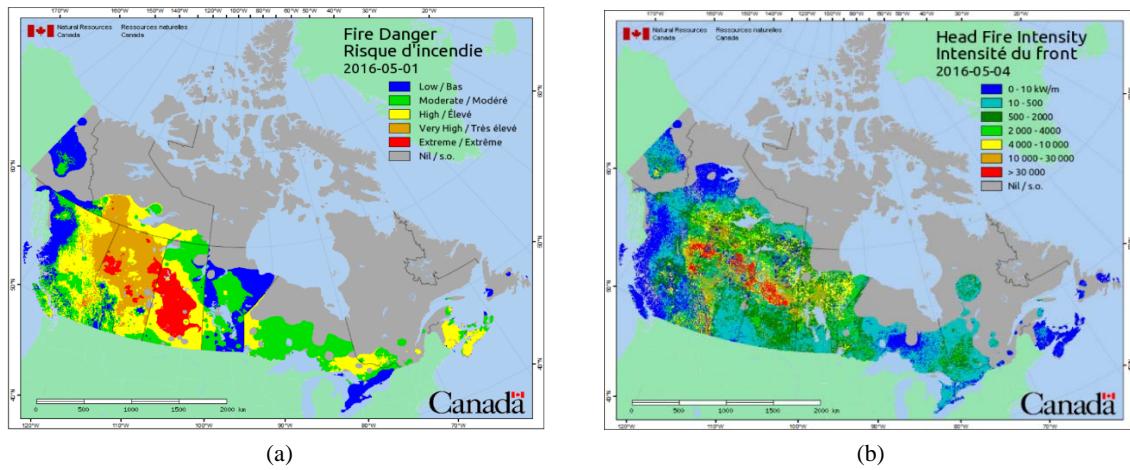


Figure 4. Map of Canadian national forest fire hazard risks and wildland fire behavior (intensity): (a) Canadian national fire hazard risks predicted on May 01, 2016; (b) Actual fire intensity distributed across the nation after three days

图 4. 加拿大国家森林火灾危险等级和潜在火灾行为(强度)分布图：(a) 2016 年 05 月 01 加拿大全国火灾危险等级；(b) 三天后加拿大全国实际火灾强度分布

欧洲和地中海地区以及俄罗斯等国，也展示出类似的科学预防和管理政策导向。这里不再赘述。

5. 结论和展望

美国、加拿大和欧洲等国家及地区开展林火科学防治工作起步较早，火灾防治技术研究遵循技术化和一贯性工作原则。在系统化、信息化和标准化的发展理念下，技术成果分别覆盖火险监测和预报、火行为预测预报以及应急管理等诸多方面。基于科学的认识和强大的理论技术支撑，选取恰当的治理方法以实现业务指导与实施的高效性。在具体操作中高度体现将林火作为生态循环的一个环节进行引导，依靠整体性、协调性和精细化的技术内核，充分运用可燃物计划烧除、增加林分耐火性等技术手段，有效预防和控制火灾及其产生的各项消极影响，维护生态平衡和森林生态系统可持续化。所有这些在诸国的长期实践中得到充分显示和拓展。

经历数十年的开创与完善，下一步的发展重点指向机器学习技术与传统林火研究结合，以进行更高效的火灾预防、监测预警以及应急响应战术与生态恢复规划。我国目前各行业对机器学习技术都有大量的资金投入并认为是促进行业产能进一步提升的重要方向；在森林火灾防控研究方面，应用机器学习智能分析实时监控图像和数据，目前我国也已走在世界的前列。中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室等研究单位开展了机器视觉学习在森林火险预测预报、森林火灾的监测预警相关研究和产品研发。从不同行业人工智能技术发展现状和应用前景来看，未来这方面的技术发展和应用将导致颠覆性变革。

基金项目

本项工作由中央财政国家重点实验室专项经费自主课题(SA2320000012)资助。

参考文献

- [1] 王海晖, 宋志龙, 王振师, 李小川. 基于生态学观念的森林防火目标定位和工作策略[J]. 森林防火, 2020(4): 1-8.
- [2] Finney, M.A. (2005) The Challenge of Quantitative Risk Analysis for Wildland Fire. *Forest Ecology and Management*, **211**, 97-108. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.02.010>
- [3] 姚树人, 田晓瑞, 舒立福. 美国林火研究历史与发展趋势[J]. 森林防火, 2002(1): 31-33.
- [4] Andrews, P.L. (2004) Current Status and Future Needs of the BehavePlus Fire Modeling System. *International Journal of Wildland Fire*, **23**, 21-33. <https://doi.org/10.1071/WF12167>

- [5] Andrews, P.L. (2010) Do You Behave?—Application of the BehavePlus Fire Modeling System. *Proceedings of 3rd Fire Behavior and Fuels Conference*, Spokane, 25-29 October 2010, 17 p.
- [6] Smith, J.K., Smith, D.M. and Hardy, C. (2011) 50 Years of Service: The Missoula Fire Sciences Laboratory. *Fire Management Today*, **71**, 24-30.
- [7] Smith, D.M. (2012) The Missoula Fire Sciences Laboratory: A 50-Year Dedication to Understanding Wildlands and Fire. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-270, US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, 62 p. <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-270>
- [8] Stocks, B.J., Lawson, B.D., Alexander, M.E., *et al.* (1989) The Canadian Forest Fire Danger Rating System: An Overview. *The Forestry Chronicle*, **65**, 450-457. <https://doi.org/10.5558/tfc65450-6>
- [9] 信晓颖, 江洪, 周国模, 余树全, 王永和. 加拿大森林火险气候指数系统(FWI)的原理及应用[J]. 浙江农林大学学报, 2011, 28(2): 314-318.
- [10] Wang, X., Wotton, B.M., Cantin, A.S., *et al.* (2017) CFFDRS: An R Package for the Canadian Forest Fire Danger Rating System. *Ecological Processes*, **6**, 1-11. <https://doi.org/10.1186/s13717-017-0070-z>
- [11] Kourtz, P.H. and O'Regan, W.G. (1971) A Model a Small Forest Fire to Simulate Burned and Burning Areas for Use in a Detection Model. *Forest Science*, **17**, 163-169.
- [12] Walding, N.G., Williams, H.T.P., McGarvie, S., *et al.* (2018) A Comparison of the US National Fire Danger Rating System (NFDRS) with Recorded Fire Occurrence and Final Fire Size. *International Journal of Wildland Fire*, **27**, 99-113. <https://doi.org/10.1071/WF17030>
- [13] Xanthopoulos, G., Varela, V., Fernandes, P., *et al.* (2004) Decision Support Systems and Tools: A State of the Art. Eufirelab: Euro-Mediterranean Wildland Fire Laboratory, a “Wall-Less” Laboratory for Wildland Fire Sciences and Technologies in the Euro-Mediterranean Region, EVR1-CT-2002-40028, Deliverable D-06-02.
- [14] San-Miguel-Ayanz, J., Barbosa, P., Schmuck, G., *et al.* (2003) The European Forest Fire Information System (EFFIS). *Proceedings of 6th AGILE Conference on Geographic Information Science*, Lyon, 24-26 April 2003, 24-26.
- [15] Fujioka, F.M., Weise, D.R., Chen, S.C., *et al.* (2021) Reaction Intensity Partitioning: A New Perspective of the National Fire Danger Rating System Energy Release Component. *International Journal of Wildland Fire*, **30**, 351-364. <https://doi.org/10.1071/WF20025>
- [16] Gavriil, X., Vassiliki, V., Paulo, F. and Luis, R. (2012) Decision Support Systems and Tools: A State of Art. <http://www.eufirelab.org/deliverable.php>
- [17] Wang, H.-H., Finney, M.A., Song, Z.-L., *et al.* (2021) Ecological Techniques for Wildfire Mitigation: Two Distinct Fuelbreak Approaches and Their Fusion. *Forest Ecology and Management*, **495**, Article ID: 119376. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119376>
- [18] U.S. Forest Service (2021) National Fire Danger Rating System. <https://www.firelab.org/project/national-fire-danger-rating-system>
- [19] The Canada Centre for Mapping and Earth Observation (2021) The Fire Monitoring, Accounting and Reporting System. <https://www.nrcan.gc.ca/our-natural-resources/forests-forestry/wildland-fires-insects-disturbance/fire-monitoring-reporting-tool>
- [20] 肖化顺, 刘小永, 曾思齐. 欧美国家林火研究现状与展望[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(2): 131-136.
- [21] Mrozewski, T. (2018) Geospatial Data and Software Reviews. *Bulletin-Association of Canadian Map Libraries and Archives (ACMLA)*, **160**, 17-19. <https://doi.org/10.15353/acmla.n160.309>
- [22] Nature Resources Canada (2021) Canadian Wildland Fire Information System. <https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca>
- [23] Ahmed, M.R., Hassan, Q.K., Abdollahi, M., *et al.* (2019) Introducing a New Remote Sensing-Based Model for Forecasting Forest Fire Danger Conditions at a Four-Day Scale. *Remote Sensing*, **11**, 2101. <https://doi.org/10.3390/rs11182101>