



森林草原火灾遥感监测预警技术及示范应用

何彬彬^{1,2*}, 陈 瑞^{1,2}, 全兴文^{1,2}, 姚劲松^{1,2,3}, 殷长明^{1,2},
王子励^{1,2}, 张启明^{1,2}, 杨 帅^{1,2}

(1. 电子科技大学 资源与环境学院, 成都 611731; 2. 四川省森林草原火灾监测预警工程技术研究中心, 成都 611731;
3. 四川省森林和草原防火监测中心, 成都 610081)

摘要 提升森林草原火灾综合防控与应急响应的能力, 达到减少森林草原火灾发生和火情快速动态监测的目的, 关键在于发展基于卫星遥感、地理空间信息、计算机、林火生态等多学科交叉融合的火灾监测预警信息化、智能化理论与方法。基于可燃物遥感定量反演和时空大数据挖掘等方法, 构建灾前-灾时-灾后的森林草原火灾遥感监测预警技术体系, 包括“可燃物-气象-地形”多源时空大数据协同的森林草原火险预报预警技术、多源卫星数据协同的高精度火点快速检测技术和灾情精准评估技术。针对我国西南地区实际业务需求, 定制化研发森林草原火灾监测预警系统, 集成火灾监测预警关键理论与技术, 实现灾前早期风险预警、灾时近实时监测、灾后灾情精准评估等功能。该系统可为森林草原火灾监测预警提供便捷、高效的动态信息服务, 其应用成效显著, 具有大范围推广应用的潜力。

关键词 森林草原火灾; 火险预报预警; 火点检测; 燃烧烈度; 时空大数据; 遥感反演; 可燃物
中图分类号 TP7 **文献标志码** A **DOI** 10.12178/1001-0548.2024212

Technology and Application Demonstration of Remote Sensing Monitoring and Early Warning for Forest and Grassland Fires

HE Binbin^{1,2*}, CHEN Rui^{1,2}, QUAN Xingwen^{1,2}, YAO Jinsong^{1,2,3}, YIN Changming^{1,2},
WANG Zili^{1,2}, ZHANG Qiming^{1,2}, and YANG Shuai^{1,2}

(1. School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;
2. Sichuan Forest and Grassland Fire Monitoring and Early Warning Engineering Technology Research Center, Chengdu 611731, China;
3. Sichuan Forest and Grassland Fire Monitoring Center, Chengdu 610081, China)

Abstract To enhance the comprehensive prevention, control, and emergency response capabilities for forest and grassland fires, aiming to reduce the occurrence of such fires and achieve rapid dynamic monitoring of fire situations, the keypoint is lying on developing the information-based intelligent theories and methods for fire monitoring and early warning by integrating remote sensing, geospatial information, computer technology, fire ecology, and other disciplines. Based on the methods including remote sensing quantitative inversion of fuel variables and spatiotemporal big data mining, the technology system of remote sensing monitoring and early warning for forest and grassland fires for the pre-fire/during fire/post-fire period is established. It mainly includes the fire risk forecasting and early warning technology incorporating multisource spatiotemporal big data on fuel, weather and topography variables, the rapid and high-precision fire detection technology based on multisource satellite data, and the technology of accurate burn severity estimations. In response to the practical applications in southwestern China, the customized system for forest and grassland fire monitoring and early warning is developed, involving the key methodologies and technologies of fire monitoring and early warning. This system could achieve functions of fire risk early warning, near-real-time fire monitoring and fast assessment of fire loss. It also provides convenient and efficient dynamic information services for forest and grassland fire monitoring and early warning, and shows the significant practical application effectiveness, indicating the potential for its widespread adoption.

收稿日期: 2024-08-11; 修回日期: 2024-08-23

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点支持项目(U20A2090); 国家重点研发计划(2022YFC3003001); 四川省重点研发项目(2023YFG0320)

作者简介: 何彬彬, 博士, 教授, 主要从事定量遥感、森林草原火灾监测预警技术等方面的研究。

*通信作者 E-mail: binbinhe@uestc.edu.cn

Key words forest and grassland fire; fire risk forecasting and warning; fire detection; burn severity; spatiotemporal big data; remote sensing retrieval; fuel

全球变暖背景下,森林和草原火灾频发,严重威胁生命财产安全,破坏生态环境^[1-2]。森林草原灭火已是全球各国公共应急体系建设的重要内容,事关社会发展稳定的大局^[3-4]。提升森林草原火灾与火情监测预警的精准性、实时性,为保护绿水青山、保护百姓和广大应急消防人员的人身和财产安全提供有力的技术支撑,对于提高防灾减灾能力,显得尤为迫切和重要。

森林草原火灾预报预警能够为火灾防控资源调配、应急响应预案制定等提供科学依据,减少火情发生及损失。目前国内外业务化运行的森林火灾预报系统,如中国森林火灾气象预报系统、加拿大森林火灾等级系统、美国国家火灾等级系统、澳大利亚 McArthur 火灾等级系统等^[5],较好地利用了气象、地形等火灾因子,但对可燃物信息考虑不足。事实上,文献[6]在1996年就提出了著名的野火环境三角模型,指出野火爆发与可燃物、气象和地形三方面信息密切相关。然而,这些风险因子对森林草原火灾发生发展的作用机制极为复杂,影响和制约火灾预报模型的精度。因此,如何在厘清火灾诱发机制的基础上,协同多类别可燃物信息,以及气候气象、地形地貌、人文活动等多源时空大数据,构建森林草原火灾时空大数据挖掘模型,是实现高精度森林草原火灾预报预警的关键。

针对森林草原火情监测,目前国内外主要采用地面传感或视频监控和卫星遥感火情监测等方式。然而,地面传感或视频监控范围小、维护成本高,难以大范围部署应用。在遥感火情监测方面,虽然 MODIS、VIIRS 等极轨卫星传感器目前可以提供相对可靠的火点产品,但一天最多只能观测4次,远不能满足火点实时检测需求。Himawari-8/9、GK-2A 等地球静止卫星覆盖范围大,监测频率高,但其空间分辨率低,难以精准识别火情信息,且存在较严重的位置偏移、虚警率和漏检率高等问题,这些问题在我国西南地区尤为突出。以上这些技术瓶颈将直接导致火点发现不及时、火情监测不精准等问题,从而严重影响森林草原火灾防控处置的及时性和效果。

虽然目前中国、美国、加拿大、澳大利亚等国家已初步具备“天-空-地”多模式森林草原火灾预报和火情监测能力,但现有的森林草原火灾预警

系统与火情监测系统通常相互独立,易导致火灾防控资源调配针对性较弱、应急响应方案不充分等问题。因此,亟须构建高精度、大范围森林草原火灾与火情协同监测预警技术体系,力求将火灾扼杀在萌芽状态。这对于完善我国森林草原火灾监测预警体系,提升森林草原防火与应急处置的科学性和精准性,具有重要的现实意义。

1 森林草原火灾遥感监测预警理论与技术框架

面向森林草原火灾精准监测预警需求,作者团队研发了基于森林草原可燃物遥感定量反演和时空大数据挖掘的森林草原火灾遥感监测预警理论与技术体系,重点解决了森林和草原火灾风险预警关键要素——可燃物信息严重不足的难题,并构建了一套灾前-灾时-灾后的森林草原火灾遥感监测预警系统(见图1),实现了森林草原火灾、火情与灾情时空信息协同处理和实时动态服务,为应急、林草等行业部门提供了大范围、高精度、低成本的森林草原火灾遥感监测预警方案。该方案实现了灾前高精度风险预警、灾时近实时火点精准监测、灾后燃烧烈度精细评估,能够为森林草原火灾防控的精准防控、火灾救援、灾后损失评估和生态恢复规划提供科学数据和决策支持。

1.1 森林草原火灾预报预警技术

野火三角模型指出:可燃物、气象和地形是森林草原火灾预报预警中最重要的3个因素^[6]。作者团队构建了一套“可燃物-气象-地形”多源时空数据协同的森林草原火灾预报预警技术,具体包括3个层面:火灾案例时空场景数据库构建、火灾时空大数据挖掘模型构建、火灾综合预报预警(见图2)。

在火灾案例时空场景数据库构建时,选用合适的火灾因子,对于火灾预报预警至关重要。关键可燃物信息(如可燃物含水率、可燃物载量、可燃物类型)与易燃性、火强度、火行为密切相关,是实现高精度森林草原火灾预报预警的重要前提。作者团队构建了复杂环境森林多类别可燃物信息遥感反演理论与方法体系,为火灾风险评估提供了时空连续的冠层可燃物含水率与载量、地表死可燃物含水率与载量等数据支撑^[7-11]。除了可燃物、气象和地

形等因子外,人文活动因子也直接或间接影响着森林草原火灾的发生发展,也被视为一种重要的火险因子被纳入火险建模中^[12-16]。森林草原火灾的爆发不仅与当前的各种因素(即可燃物、气象、地形等)有关,还与爆发时间点之前的因素变化和趋势存在关联性^[17-20]。因此,考虑可燃物、气象等动态因

子的时序特征,也是提高火险建模效果的重要手段^[21-22],但需要顾及降雨对时序特征提取的影响^[16]。此外,在构建火灾案例库时,不同正负样本的选取方式及比例,也将影响火险预报预警的精度和效果^[21,23]。通过非变异函数提取负样本构建的火灾数据库,使得火险建模性能更稳定。

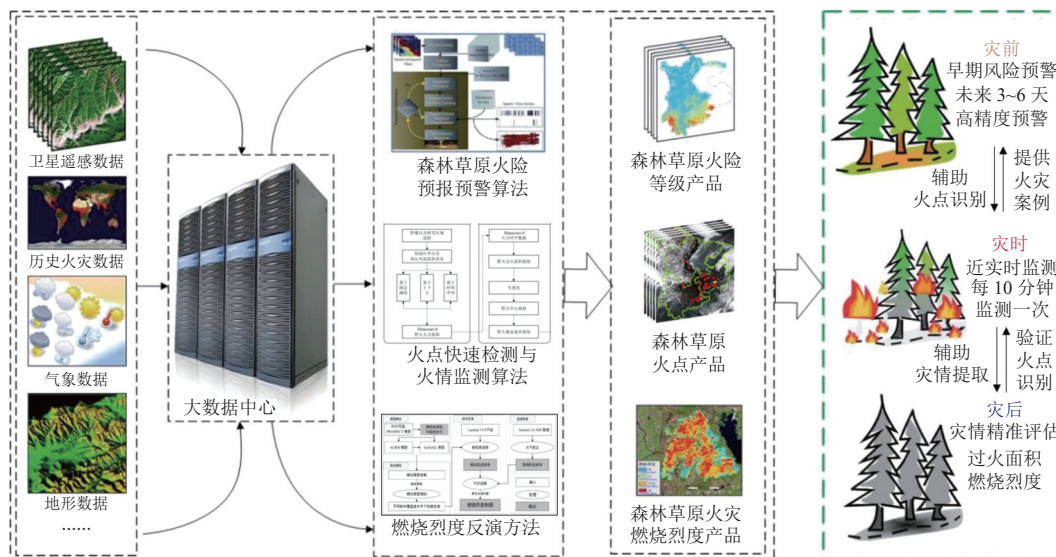


图1 森林草原火灾遥感监测预警技术框架

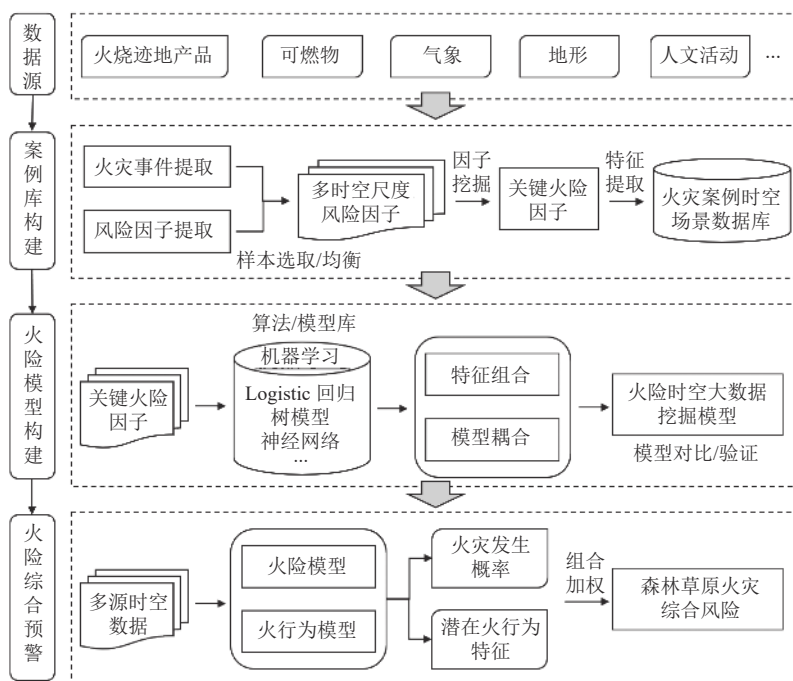


图2 森林草原火险预报预警技术框架

在火险时空大数据挖掘模型构建方面,选取合适的机器学习或大数据挖掘算法,尽可能准确表征森林草原火险与火险因子间复杂的非线性关系,对

于实现高精度火险预报预警至关重要。由于不同机器学习算法涉及的数据处理方式不同,其在火险建模时的性能差异极大。相比传统线性回归和逻辑斯

蒂(Logistic)回归算法,随机森林(Random Forest)回归和极端梯度提升模型(XGBoost)这类树模型在火险建模中性能更优,其中前者对应的火险空间制图与历史火灾案例分布吻合度更高,更适合实际火险预报预警应用场景。针对火灾案例时空场景数据库中正负样本的非平衡性,使用针对非平衡数据集的模型,例如平衡随机森林(Balanced Random Forest)、欠抽样(Under-sampling)的AdaBoost模型,可进一步提升针对中-高等级火险的预警精度和效果^[24]。为了缓解模型过拟合和火险因子不确定性对火险建模精度的影响,作者团队耦合了自适应模糊神经推理系统(ANFIS)、智能优化算法与长短期记忆网络(LSTM)等大数据挖掘方法,构建了高精度森林草原火险预报模型^[25]。具体地,首先构建基于耦合粒子群优化算法的自适应模糊神经推理系统模型,并利用火灾案例时空场景数据库训练模型,得到最优火险预警模型。然后,使用卷积长短时记忆网络对森林草原火险进行变化趋势分析,并构建火险预测模型。

在火险综合预报预警方面,传统森林草原火险预报以评估火灾发生概率为主,不包含火蔓延速度、火强度等潜在火行为特征,导致火灾防控针对性不强,实操性不高。事实上,在火蔓延过程中,

如果邻域像元发生了森林草原火灾,那么中心像元也可能受到该火灾影响。因此,考虑邻域像元的潜在火行为特征,对于提高森林草原火险等级预警的精准性十分必要。为此,作者团队构建了顾及火蔓延机理的森林草原火险综合预报预警算法。具体地,基于火灾案例时空场景数据库,利用火蔓延模型(Rothermel模型^[26]和王正非模型^[27])和元胞自动机算法进行火蔓延模拟,生成了目标区域的潜在火蔓延速度和火强度特征。然后,结合火险预报结果,进行综合风险预警。

1.2 森林草原火情监测技术

1.2.1 火点快速精准检测

受到静止卫星数据低空间分辨率的限制和传感器成像原理等因素的影响,传统的基于时空信息的火点监测方法存在监测精度偏低、虚警率偏高、位置偏移等问题,难以为火灾的精准防控和扑救提供及时的信息支持。针对上述问题,作者团队构建了协同多源卫星数据的高精度火点快速检测技术^[28-29],具体包括3部分:遥感影像数据预处理、火点精准监测、火情动态监测(见图3)。

在遥感影像数据预处理方面,主要涉及辐射校正、大气校正、水/云掩模等步骤,目的是剔除辐射亮温误差和非植被背景对火点探测的影响。

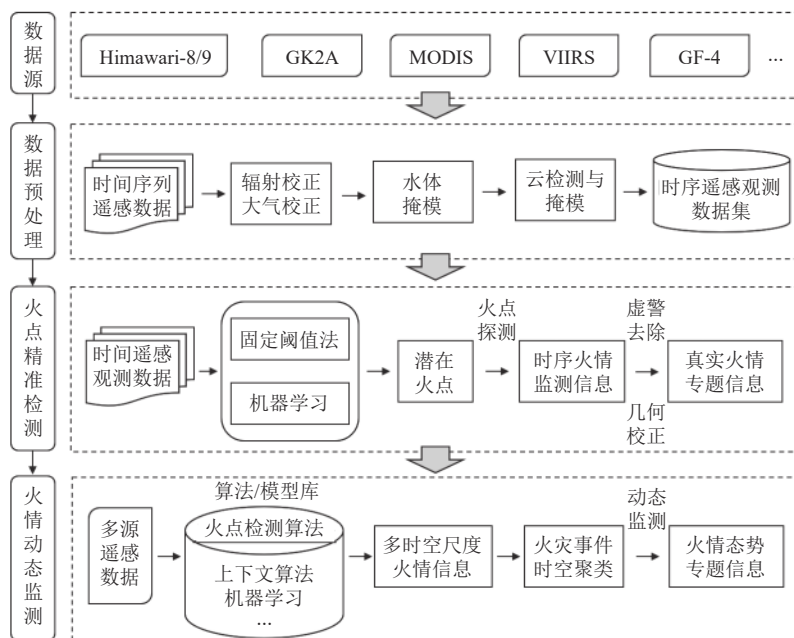


图3 森林草原火点快速检测技术框架

在火点检测方面,首先同时利用固定阈值法和机器学习算法提取亮温异常信息,作为潜在火点。该方式能提取充足的热异常信息,尽可能地降低火

点漏检^[30]。其次,应用空间上下文算法,计算潜在火点与背景像元的亮温差异,对火点真实性进一步判别。然后,同时结合土地覆盖、太阳高度角进一

步剔除太阳闪烁、工业和农业用火造成的虚假森林草原火点。最后,结合影像时间序列信息进一步去除火点虚警:针对研究区内每一个像元,构建昼夜温度循环(Diurnal Temperature Cycle, DTC)训练数据集,以及基于亮温变化率的火点判别表达式。针对每一个待判定时刻,利用亮温变化筛选可用的 DTC 数据集,然后使用鲁棒匹配算法和卡尔曼滤波算法对待判定时刻的亮温值进行估计,最后依据亮温的观测值与估计值之间是否存在明显差异对虚警进行去除。

为缓解静止气象卫星遥感影像畸变对火情监测的影响,对火点的几何位置进行校正。以 NOAA 提供的 GSHHG 海岸线和内陆水体数据作为几何参考数据,利用静止气象卫星数据特定波段的频域信息,对火点的位置偏移进行几何校正。首先,对待校正影像数据进行水体掩模处理,筛选出可用的控制点,利用 POC 频域算法对每个控制点的偏移量进行计算。针对每个待校正的火点像元,通过计算其最近的 3 个控制点的偏移量的均值得到该像元的行偏移和列偏移量,进而通过线性变化实现火点像元几何位置校正。

在火情动态监测方面,基于 Himawari-8/9、GK2A、MODIS、VIIRS 等提供的全天候、高精度森林草原火点监测信息,采用 DBSCAN 空间聚类算法对相邻火点设定空间缓冲区,将同一缓冲区内的火点合并,识别为一次火灾事件,并监测其火

情变化,以此辅助火势蔓延模拟。此外,根据空间分辨率较高的卫星火点信息,进一步校正火点位置。

1.2.2 灾情精准评估

传统的森林草原火灾灾情评估大多通过人工野外调查来完成,但这一过程费时费力,仅能覆盖小范围的景观尺度。卫星遥感技术具有高时空分辨率以及大范围监测的优势,为森林草原火灾灾情评估提供了一种快捷高效的新手段。

作者团队提出的火情精细评估技术包括过火区域提取和燃烧烈度评估两部分(见图 4)。在过火区域提取部分,基于长时间序列的多源遥感数据,利用 LandTrendr 变化检测算法确定植被潜在燃烧区域,提取植被燃烧前后光谱反射率及植被指数差异特征,构建森林草原火灾燃烧迹地识别模型,以实现森林草原过火区域快速提取和面积估算^[31]。在燃烧烈度评估部分,构建了耦合多层植被辐射传输模型的燃烧烈度遥感反演方法。具体地,通过耦合叶片尺度(PROSPECT 模型)和冠层尺度(ACRM 模型和 GeoSAIL 模型)的植被辐射传输模型,模拟不同树木覆盖度水平下的查找表,最后借助树木覆盖度产品(Landsat VCF)选择查找表进行燃烧烈度反演^[32]。该方法综合考虑了前向建模和后向反演中树木覆盖度的变化,并优化了实测燃烧烈度和遥感光谱反射率的匹配性的反演策略,实现了高精度的森林草原火灾燃烧烈度遥感反演。

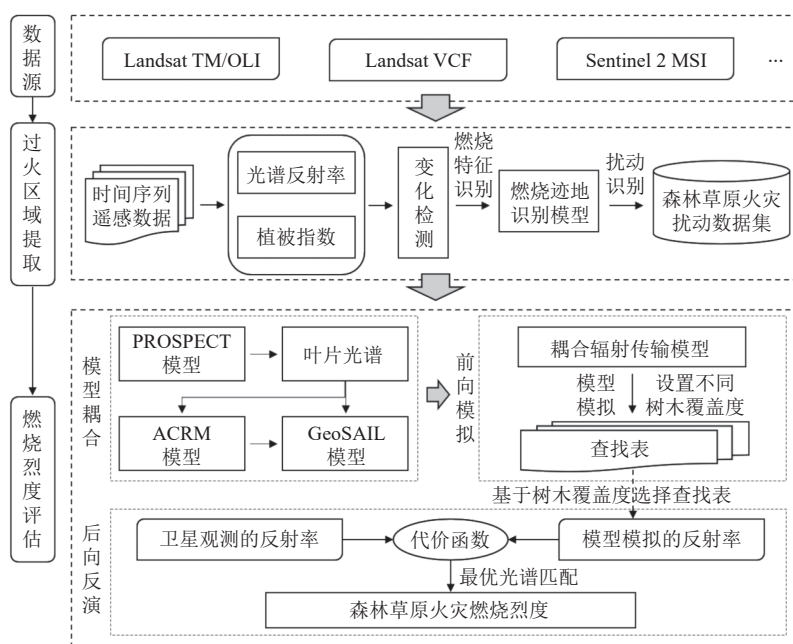


图 4 森林草原火情精准评估技术框架

2 典型示范应用

基于上述森林草原火灾遥感监测预警理论与技术框架,作者团队自主研发了森林和草原火灾预警监测大数据平台,后台集成了森林草原火险预报预警、火点快速精准监测、灾情精准评估等关键技术。该平台面向系统运行的高性能、高并发、高安全等需求,采用基于分布式和微服务混合架构,涵盖数据处理层、数据服务层、基础服务层、专业服务层、应用层,实现了火险和火情信息自动化、高性能、实时协同处理,为林火预防、应急响应提供实时、便捷和高效的动态信息服务。

我国西南林区冬春季节气候干燥,森林火灾多发,处置极为困难,是我国森林防火的重点和难点区域。针对该地区林区地形起伏强烈、植被类型多样与结构复杂等特点,作者团队从算法优化和平台定制两个层面设计了面向西南复杂林区大范围推

广的示范应用方案,研发了四川省森林草原火灾监测预警系统和云南省森林草原火灾监测预警系统。面向实际需求,设计了三大功能模块:灾前早期风险预警、灾时近实时监测、灾后灾情精准评估。灾前早期风险预警模块,具备未来3~6天日尺度森林草原火险预警能力,支持区域火险信息提取和高火险预警信息推送,支持火险等级报告自动生成、导出。灾时近实时监测模块,具备每10分钟一次的火点快速检测能力及火情信息实时处理、分析和可视化能力(见图5a和5c),支持火点状态核查和蔓延态势研判,支持火情报告自动生成、导出。灾后灾情精准评估模块,具备灾情信息快速提取、分析和可视化能力(见图5b和5d),支持火灾燃烧烈度精细评估专题报告和专题图自动生成、导出。需要注意的是,图5a和图5b中空白区域为低风险或非植被区域。

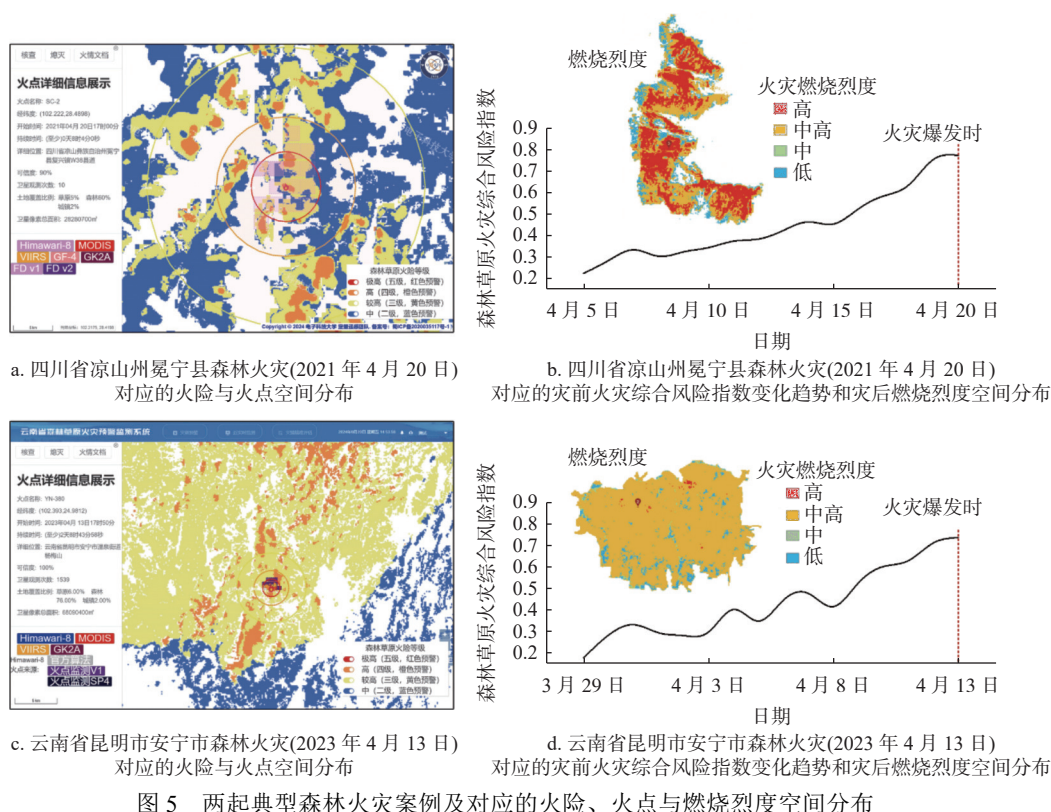


图5 两起典型森林火灾案例及对应的火险、火点与燃烧烈度空间分布

3 结束语

本文综述了作者团队历经十余年构建的森林草原火灾遥感监测预警理论与技术框架,从技术背景、体系构建、示范应用等层面阐述了其在提高森林草原火灾综合防控与应急响应能力的应用潜力,并总结了涉及的森林草原火险预报预警

和火情监测技术。这套理论技术将技术研发与示范应用相结合,使森林草原火险预防预警和火情监测具有科学性、精准性、实用性和可推广性,为我国乃至全球森林草原火灾防控提供了实用的共性技术、应用方案和技术支持,对促进我国生态文明建设、森林草原火灾防控、社会经济一体

化发展等方面具有十分重要的现实意义, 推广应用前景广阔。

参考文献

- [1] 岳超, 罗彩访, 舒立福, 等. 全球变化背景下野火研究进展[J]. 生态学报, 2020, 40(2): 385-401.
YUE C, LUO C F, SHU L F, et al. A review on wildfire studies in the context of global change[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(2): 385-401.
- [2] QUAN X W, XIE Q, HE B B, et al. Integrating remotely sensed fuel variables into wildfire danger assessment for China[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2021, 30(10): 807-821.
- [3] 狄丽颖, 孙仁义. 中国森林火灾研究综述[J]. 灾害学, 2007, 22(4): 118-123.
DI L Y, SUN R Y. Summarization of research on forest fire in China[J]. *Journal of Catastrophology*, 2007, 22(4): 118-123.
- [4] 舒立福, 田晓瑞, 李红. 世界森林火灾状况综述[J]. 世界林业研究, 1998(6): 42-48.
SHU L F, TIAN X R, LI H. Status of international forest fire in last decade[J]. *World Forestry Research*, 1998(6): 42-48.
- [5] 田晓瑞, MCRAE D J, 张有慧. 森林火险等级预报系统评述[J]. 世界林业研究, 2006, 19(2): 39-46.
TIAN X R, MCRAE D J, ZHANG Y H. Assessment of forest fire danger rating systems[J]. *World Forestry Research*, 2006, 19(2): 39-46.
- [6] PYNE S J, ANDREWS P L, LAVEN R D. Introduction to wildland fire[M]. New York: John Wiley and Sons, 1996.
- [7] QUAN X, LI Y, HE B, et al. Application of Landsat ETM+ and OLI data for foliage fuel load monitoring using radiative transfer model and machine learning method[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 5100-5110.
- [8] QUAN X, YEBRA M, RIAÑO D, et al. Global fuel moisture content mapping from MODIS[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 101: 102354.
- [9] LI Y, CHEN R, HE B, et al. Forest foliage fuel load estimation from multi-sensor spatiotemporal features[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 115: 103101.
- [10] FAN C, HE B, YIN J, et al. Regional estimation of dead fuel moisture content in southwest China based on a practical process-based model[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2023, 32(7): 1148-1161.
- [11] FAN C, HE B, YIN J, et al. Process-based and geostationary meteorological satellite-enhanced dead fuel moisture content estimation[J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2024, 61(1): 2324556.
- [12] JAAFARI A, TERMEH S V R, BUI D T. Genetic and firefly metaheuristic algorithms for an optimized neuro-fuzzy prediction modeling of wildfire probability[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 243: 358-369.
- [13] JANIEC P, GADAL S. A comparison of two machine learning classification methods for remote sensing predictive modeling of the forest fire in the North-Eastern Siberia[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(24): 4157.
- [14] CARRASCO J, ACUNA M, MIRANDA A, et al. Exploring the multidimensional effects of human activity and land cover on fire occurrence for territorial planning[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 297: 113428.
- [15] MALLINIS G, PETRILA M, MITSOPOULOS I, et al. Geospatial patterns and drivers of forest fire occurrence in Romania[J]. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 2019, 12(4): 773-795.
- [16] CHEN R, HE B, QUAN X, et al. Improving wildfire probability modeling by integrating dynamic-step weather variables over northwestern Sichuan, China[J]. *International Journal of Disaster Risk Science*, 2023, 14(2): 313-325.
- [17] ZONG X, TIAN X, YIN Y. Impacts of climate change on wildfires in central Asia[J]. *Forests*, 2020, 11(8): 802.
- [18] LUO K, QUAN X, HE B, et al. Effects of live fuel moisture content on wildfire occurrence in fire-prone regions over southwest China[J]. *Forests*, 2019, 10(10): 17.
- [19] NOLAN R H, BLACKMAN C J, DEDIOS V R, et al. Linking forest flammability and plant vulnerability to drought[J]. *Forests*, 2020, 11(7): 779.
- [20] STEFANIDOU A, GITAS I Z, STAVRAKLOUDIS D, et al. Midterm fire danger prediction using satellite imagery and auxiliary thematic layers[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(23): 2786.
- [21] WANG Z, HE B, CHEN R, et al. Improving wildfire danger assessment using time series features of weather and fuel in the Great Xing'an Mountain region, China[J]. *Forests*, 2023, 14(5): 986.
- [22] QUAN X, WANG W, XIE Q, et al. Improving wildfire occurrence modelling by integrating time-series features of weather and fuel moisture content[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2023, 170: 105840.
- [23] QUAN X, JIAO M, HE Z, et al. Effects of different sampling strategies for unburned label selection in machine learning modelling of wildfire occurrence probability[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2023, 32(4): 561-575.
- [24] 王子励. 大兴安岭地区森林火险预警方法与应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
WANG Z L. Forewarning method and application of forest wildfire danger in the Great Xingan's Mountain Region[D]. Chengdu: University of Electronic Science and

- Technology of China, 2023.
- [25] 谢谦. 多源时空数据协同的野火风险评估与预警[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- XIE Q. Wildfire danger assessment and early warning from multi-source spatio-temporal big data[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [26] ROTHERMEL R C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels[M]. Orden: Usda Forest Service General Technical Report, 1972.
- [27] 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 Z F. The measurement method of the wildfire initial spread rate[J]. Mountain Research, 1983, 1(2): 42-51.
- [28] 刘向茁. 基于地球同步轨道卫星遥感数据野火蔓延速率估算[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- LIU X Z. Estimation of wildfire spread rate from geosynchronous orbit satellite remote sensing data[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [29] 张詠钦. 基于 Himawari-8 卫星数据的野火火点近实时监测方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- ZHANG Y Q. Near real-time wildfire monitoring methods based on Himawari-8 data[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [30] LIU C, CHEN R, HE B. Integrating machine learning and a spatial contextual algorithm to detect wildfire from Himawari-8 data in Southwest China[J]. *Forests*, 2023, 14(5): 919.
- [31] YIN J, HE B, FAN C, et al. Fire has become a major disturbance agent in the forests of Southwest China[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 160: 111885.
- [32] 殷长明. 多模型耦合下的森林火灾燃烧烈度遥感反演方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- YIN C M. Retrieval of forest fire burn severity with coupled radiative transfer model and remotely sensed data[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.

编辑 刘飞阳