

文章编号: 2096-1618(2025)03-0384-06

森林火灾的卫星遥感监测与风险预警研究

黄云, 文军, 葛翔宇, 李晓玥, 宋雨曦

(成都信息工程大学大气科学学院/高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225)

摘要:森林火灾是威胁地球生态系统的主要自然灾害之一,对社会经济以及人民的生命安全带来巨大危害。因此,开展森林火灾的即时监测与预警的相关研究具有重要的科学意义和应用价值。针对目前卫星遥感数据、森林火灾监测算法和风险预警模型多种多样的问题,总结不同遥感数据应用的优势和不足,分析不同火灾监测算法和风险预警模型的适用性,并对未来国产卫星的联合监测和森林火灾风险机器学习模型的进一步深入研究提出展望,以期森林火灾的防护救治工作提供参考依据。

关键词:森林火灾;遥感监测;火灾风险;预警模型

中图分类号:P429

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2025.03.020

0 引言

森林对于人类的生存和发展具有重要意义,是地球生态系统中至关重要的组成部分,它不仅保护水资源、调节生态平衡、维持碳平衡,还在防风固沙、净化大气等方面发挥着重要作用,此外,森林还提供丰富的生态、经济和社会效益^[1]。而森林火灾作为八大自然灾害之一,其破坏性可能导致植被破坏,大气成分改变和生物物种的改变,对社会、经济和生态带来不可弥补的损失^[2]。2019年3月,四川凉山州木里县发生一起由雷击引发的森林火灾,造成31人遇难。2020年3月,西昌市发生森林火灾,造成19人死亡^[3]。连续发生的森林火灾以及由此引发的严重生命和财产损失引起社会的广泛关注。考虑到中国在森林火灾防控方面的紧迫形势,迫切需要加强森林火灾卫星遥感监测与风险预警的相关研究。这不仅有助于提升森林覆盖率,维护生态环境,还能确保人民的生命和财产安全,具有极为重要的现实意义。

早期森林火灾监测主要依靠瞭望塔、地面巡视以及飞机巡航监测等,但森林往往位于人迹罕至的山区,以上手段具有很大的局限性,不能很好地应对突发的森林火灾^[4]。自20世纪80年代以来,卫星遥感技术突飞猛进,观测覆盖面积大、时效性高、连续性强,可以快速发现并定位火点位置,弥补传统火灾监测方式效率低、耗费高的问题,被广泛应用于现代森林火灾监测之中^[5]。目前存在的森林火灾监测算法,主要有基于美国海洋大气管理局(National oceanic and atmospheric administration, NOAA)系列卫星/甚高分辨率辐射计(advanced very high resolution radiometer, AVHRR)数

据和国家航空航天局地球观测系统(Earth observation system, EOS)/中分辨率光谱成像仪(moderate-resolution imaging spectro-radiometer, MODIS)数据所发展出的固定阈值法^[6]、亮温-植被指数法^[7]、上下文(contextual)法^[8-9]和绝对火点法^[10],以及三通道合成法^[11]等。中国学者多是改良已有的算法以增强对于研究区域的适用性^[12],风云数据^[13]以及高分卫星(gaofen, GF)^[14]等遥感数据也用于监测森林火灾。

森林火灾预测一般可分为3种类型:火险天气预报、林火发生预报和林火行为预报^[15]。早期主要为单纯的火险天气预报,但火灾的发生往往不仅受到气象因子的影响,还受到植被、可燃物、地形、人类活动、火源等林火驱动因子。而林火发生预报模型综合考虑多个因子,预警效果更好。在林火预测模型方面,加拿大、美国等国家开展较早,具有较为成熟的模型,如加拿大森林火险等级系统(Canadian forest fire danger rating system, CFFDRS)^[16]和美国国家火险等级系统(National fire danger rating system, NFDRS)^[17],在多个国家都得到很好的应用效果。这两类模型以物理理论为基础,可归纳为物理模型。除此之外还有统计分析模型,包括线性回归模型^[18]和广义线性回归模型^[19],可以明确表达出火灾发生和各个因子之间的关系。近年来,各个机器学习模型,随机森林^[20]、深度学习^[21]、支持向量机(support vector machine, SVM)^[22]等方法也被广泛应用于森林火灾预测预警的研究中,其预测精度较高,但无法表达出火灾发生与各个因子之间的关系。

本文旨在回顾和总结国内外森林火灾卫星遥感监测算法及火灾风险预警模型的研究,重点讨论目前主要监测方法和预警模型的优缺点,进行深入评估和分析,促进中国森林火灾卫星遥感监测算法和火灾风险预警模型的改进,提高防火减灾能力并提供科学指导。

收稿日期:2023-11-15

基金项目:四川省科技计划资助项目(2021YJ0025)

通信作者:文军. E-mail: jwen@cuit.edu.cn

1 林火卫星遥感监测

着火点检测算法可按其所利用的卫星遥感波谱的特性来划分为基于亮温特性和基于反射特性的方法^[23]。基于 NOAA/AVHRR、EOS/MODIS, 风云系列卫星、高分系列卫星等遥感卫星数据所开发的遥感算法,主要利用中波红外通道和远红外通道的亮温特性,通过比较火点像元和背景像元的亮温值来确定判别条件。目前看来,这一类方法体系发展比较成熟,应用范围更广,火点监测算法更为准确高效。

1.1 基于 NOAA/AVHRR 卫星数据的火灾监测算法

1981 年,Dozier^[24] 基于 AVHRR 数据提出亚像元温度理论模型,是之后各种监测算法的理论基础。常用的算法主要为固定阈值法、亮温-植被指数法以及上下文法 3 种。

固定阈值法^[6] 基于 AVHRR 第 3 通道对于温度敏

感的特点,当第 3 通道(中红外波段)亮温值高于阈值时,即可判定为地表火点。卿清涛^[25] 采用固定阈值法,选择不同的第 3 通道参数阈值在四川地区进行了 3 次实验(表 1),其中实验 3 的阈值设置为 317 K,识别林火的准确率达到 77% 以上,验证了固定阈值法监测森林火灾的准确性。亮温-植被指数法由 Fraser 等^[7] 提出,增加了归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)的判定,但在高植被覆盖条件下,火点监测结果会产生误差^[26]。高华东^[27] 提出将固定阈值法和亮温-植被指数法相结合,从监测结果来看,该方法能准确检测到明火点、烟,且空间位置与事实相符。Justice 等^[28] 提出上下文法,考虑火点与背景像元环境的不同,比以往设置固定阈值的算法更具有适用性。赵彬等^[26] 利用 AVHRR 数据对吉林省东部的森林火灾进行火点检测,并分析 AVHRR 数据以上 3 种方法在火灾监测方面的优缺点。

表 1 固定阈值法林火识别结果^[25]

| 实验 | 林火总次数 | 总识别次数 | 准确识别次数 (准确率/%) | 漏识次数 (漏报率/%) | 空识别次数 (空报率/%) | 概括率/% | 备注 |
|------|-------|-------|-------------------|-----------------|------------------|-------|-------|
| 实验 1 | 126 | 139 | 102(73.4) | 18(12.9) | 17(12.2) | 85.70 | |
| 实验 2 | 126 | 139 | 96(69.1) | 24(17.3) | 17(12.2) | 80.70 | 6 次缺测 |
| 实验 3 | 126 | 129 | 100(77.5) | 20(15.5) | 7(5.8) | 84.00 | |

1.2 基于 EOS/MODIS 卫星数据的火灾监测算法

在实际研究中观察到,AVHRR 数据红外波段受水汽影响显著且容易出现饱和现象,进而对监测精度产生不利影响^[29]。而 EOS/MODIS 数据在实际监测时表现更好,在时空分辨率、精度方面都有较大提高。MODIS 的火灾监测算法多是在 AVHRR 算法的基础上改良而成,以绝对火点识别法、上下文法,以及三通道合成法为主。

为避免固定阈值法中阈值的设定对火灾监测结果产生影响,Kaufman 等^[10] 提出绝对火点法,基于 MODIS 数据结合背景像元的参数来监测地表火点。该方法去除了阈值设置的影响,主要以火点温度与背景温度之间存在的显著差异为依据来进行火点识别。但是在沙漠或者植被稀少的地区温度可能较高,容易出现误判,对于一些小火点可能出现漏判。

Giglio 等^[9] 为解决绝对火点法的误判、漏判问题,提出上下文法。首先根据历史经验设置阈值,筛选出疑似高温点,然后确定该高温点的有效背景像元,并计算相关参数,通过比较高温点与背景,识别出真实火点。肖霞^[30] 提出类间方差监测算法,减小背景像元特征参数大小的影响,可以检测出更多被烟雾覆盖的燃烧火点(图 1),提升了对于燃烧火点的检测能力。何全军等^[31] 同样提出了一种自适应火点监测算法,算法所监测出的真实火点数量增多,体现出改良后算法对于低亮温小火点的识别能力。

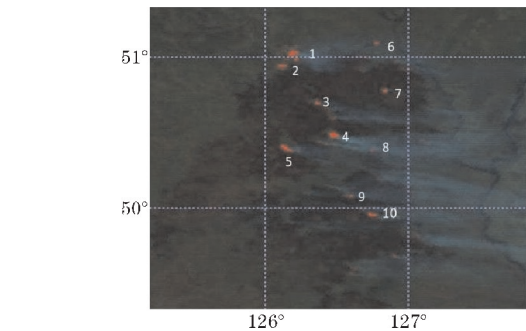


图 1 黑龙江省大型火灾类间方差算法检测结果(红色区域为着森林火灾区)^[30]

为更加简单、直接的监测到火灾的发生,梁芸^[11] 提出三通道合成法,火点在合成图像上显示为红色,与周边的地物颜色差异较大,可以通过目视直观的监测到火点的存在。但受遥感数据的空间分辨率和主观因素影响较大,通常只能起到辅助作用。

1.3 基于风云系列卫星数据的火灾监测算法

风云气象卫星是中国自主研发发射的气象卫星,包含极轨和地球静止轨道的卫星系列,在森林火灾监测领域具有极大的潜力及应用前景。

王钊^[29] 基于可见光红外扫描辐射计(visible and infra-red radiometer, VIRR)数据和 MODIS 数据采用相同的算法开展火点检测,结果表明 VIRR 数据对于低亮温火点的识别精度要高于 MODIS 数据。在使用风云卫星遥感数据进行火灾监测时,部分学者直接应用基于 AVHRR 以及 MODIS 的算法,也有学者提出结合

红外通道斜率的主动探测算法^[32]以及可自动判识火点的人机交互方法^[33]。

自中国风云四号新一代静止气象卫星发射后,解决了以往极轨卫星观测周期间隔长、连续观测能力不足的问题。石艳军等^[34]提出静止卫星在森林火灾监测领域的应用前景,可实现15 min一次的密集观测频次,实时快速获取火点位置、面积、温度等火情信息,提高了火灾监测反应能力。熊得祥等^[35]选用风云四号卫星数据,构建出4个模型的森林火灾监测精度都超过85%,表明风云四号遥感数据监测森林火灾的可行性。杨思慧等^[36]选取泸州市森林火灾判别的最优波段组合,构建泸州市森林火点判别决策树模型,3个验证火点全部被决策树模型监测出判别精度达到了100%。

1.4 基于高分系列卫星数据的火灾监测算法

高分卫星是中国自主研发的高分辨率遥感卫星,主要用于土地利用监测、资源勘探、灾害监测等领域。高分卫星具有高精度、高时空分辨率和高光谱分析能力^[37],可以提供全天候、全时段、多波段的遥感数据,配备有可见光近红外多光谱相机(panchromatic multispectral sensor, PMS)和中波红外面阵相机(infraRed scanner, IRS)。

高分系列卫星在森林火灾监测领域具有明显的优势,相较于传统卫星数据而言,具有较高分辨率的图像和较多的波段和谱段以及较短的重访周期,可以更全面地分析火灾特征,提供更详细的火源信息。利用高分卫星 IRS 中波红外通道对于异常高温敏感的特点,可采用固定阈值法设置阈值进行火点的检测^[38]。刘树超等^[39]采用自适应阈值检测算法检测火点,在3个实验区内的准确率均高于80%。

2 林火风险预警

森林火灾的发生和蔓延过程与区域气象条件密切相关,不同气象条件会增加或减小森林火灾的风险性^[40]。气象条件一直被认为是可能导致区域性火灾风险的多种因子中最为重要的之一^[41]。同时森林火灾发生还受到其他因素的影响,如可燃物、地形和人类活动等。林火发生预报模型研究已有上百年的历史,学者们也开发了多种模型。

2.1 基于物理过程建立的模型

物理模型基于物理定律,模拟火灾的物理过程和现象。原理在于通过对火源传播、燃烧速度、火灾热力学等关键因素进行数学建模,了解火灾如何在不同环境条件下传播。模型通常采用热力学方程等数学工具,以描述火灾发展中的能量传递、物质转移和气流动力学。

火险天气指数(fire weather index, FWI)模型是加拿大森林火险等级系统重要的组成部分^[16],它被广泛

应用于加拿大和其他国家,帮助决策者了解森林地区的火险程度,采取预防措施和管理森林火险。FWI模型根据时滞-平衡含水率理论,通过气象因子来计算可燃物含水量,从而确定森林火灾风险概率。美国国家火险等级系统^[17]是基于燃烧原理和点烧实验建立的物理模型,综合考虑了气象、可燃物和地形等多因素的影响,考虑了不同类型可燃物对火灾发生的贡献,其计算输出包括火发生指标、燃烧指标、火负荷指标等全面的防火指标。

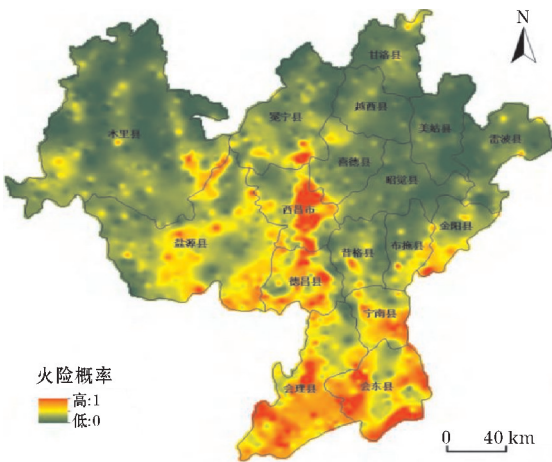
物理模型建立在牢固的科学基础上,通过对火灾物理过程的深入理解,能够提供对火灾行为的准确和可靠的描述。并且物理模型是基于已知的物理定律和原理建立的,因此其结果通常具有较高的可解释性,能追溯到模型中使用的物理参数和方程。但是物理模型中的某些参数难确定,尤其是在复杂的自然环境中,其不确定性可能导致模型的准确性受到影响。部分物理模型需要较大计算量,可能限制了模型在实际应用中的实时性。

2.2 基于统计分析方法建立的模型

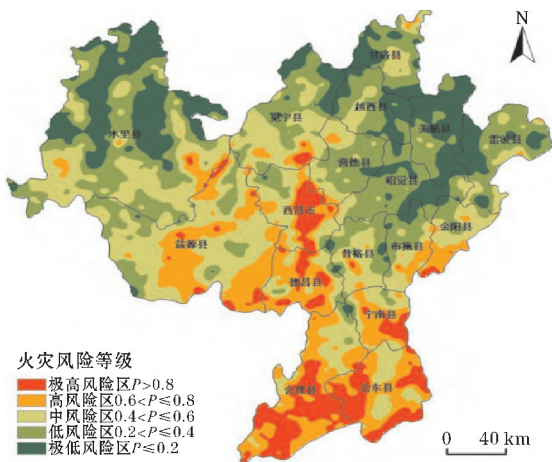
利用统计分析方法,通过历史火灾数据中的相关信息,研究出林火发生与气象条件等火灾影像因子之间的关系,建立统计模型。模型的建立,需要确定主要森林火灾影响因子以及合适的统计分析方法,进而探究出相应的发生规律并建立数学模型,从而计算得到火灾风险模型。

线性回归模型是较为常用的一种模型,可以直接以可燃物含水率为因变量,以相关气象因素为自变量来建立关系式,用可燃物含水率的大小表示火灾风险的大小^[42]。也可以直接选用气象因素作为自变量,火灾发生概率为因变量来构建关系式^[43]。但研究表明,逻辑回归模型(logistic regression, LR)等广义线性模型的拟合效果更好,适用性更加广泛,目前有诸多基于LR模型开展林火预测模型的研究^[44-45]。基于四川省凉山州历史火灾数据所建立的逻辑回归模型,接受者操作特性曲线(receiver operating characteristic curve, ROC)分析后,得到ROC曲线下的面积(area under curve, AUC)为0.768,约81%的检验火点落入极高风险、高风险和中风险等级,低风险和极低风险内的火点仅占18%,模型拟合能力良好(图2)^[3]。苏漳文^[46]建立大兴安岭林区地理加权逻辑斯蒂回归模型(geographically weighted logistic regression, GWLR)在防火期内和非防火期内的准确率分别达到86.03%和90.76%,此模型在LR模型的基础上,进一步考虑空间分布的影响^[47]。此前,苏漳文基于Gompit回归所构建的大兴安岭森林火灾风险预测模型,准确率也达到77%,ROC检验得到AUC为0.868,拟合度较高,也证明Gompit模型的适用性^[48]。

统计分析模型通常具有较强的可解释性,模型的参数和输出可以被理解并解释,可以通过对模型参数进行显著性检验来评估各个变量对目标变量的影响。但在处理非线性、高度交互作用或非常复杂的数据关系时,统计分析模型的拟合效果可能不佳。



(a) 火险概率空间分布



(b) 火险等级空间区划

图2 基于 Logistic 模型的四川省凉山州火险概率空间分布及火险等级空间区划^[3]

2.3 基于机器学习方法建立的模型

机器学习具有智能化的特点,能根据实际数据进行学习,自动挖掘隐藏在数据中的模式和规律^[49]。将历史火灾数据分类为训练集和测试集,选择适宜的机器学习算法进行训练并检验,可构建出较高精度的火灾风险预警模型。通常用于处理大规模和高维度的数据,并能适应非线性、复杂的关系。

随机森林(random forest, RF)是目前最好的机器学习算法之一,是一种基于分类和回归树进行数据挖掘的机器学习方法^[49-50]。宋雨^[51]的研究中,RF 模型的预测准确率为 92%,而 LR 模型的准确率仅为 75.9%。杨景标等^[52]采用 BP 神经网络构建林火预警模型,输入广东省与林火相关的气象影响因子,输出火灾情况,训练相对误差最大为 2%,证明 BP 神经网络

预测森林火灾的可行性。支持向量机^[22]和最大熵模型(MaxEnt)^[53]等算法在建立模型进行森林火灾风险预警的时候,也表现出很高的精度。孙立研等^[54]提出基于深度信念网络(deep belief network, DBN)的预警模型,采用相同的两组数据经过过采样(synthetic minority oversampling technique, SMOTE)算法提升数据量之后,由表 2 的预测结果可看出,通过 SMOTE 算法提升数据量之后,深度信念网络具有更高的预测精度,更适用于大量数据的火灾风险预警,符合大数据时代的发展趋势。

林区地形和气候条件较为复杂,气象因子与森林火灾之间的关系也在不断发生变化,基于统计分析方法所建立的模型,在进行预测时效果不佳,而机器学习则可以有效处理非线性过程函数关系,适用基于大数据的监测预警问题。但机器学习模型尤其是深度学习模型,难解释模型内部的决策过程,难表达出林火关键驱动因子和林火发生之间的明确关系。

表2 不同机器学习算法的预测结果对比^[54]

| 预测方法 | | 平均预测精度/% |
|-------|----------------------|----------|
| 第一组数据 | BP 神经网络 | 57 |
| | 结合 SMOTE 算法的 BP 神经网络 | 55 |
| | 支持向量机 | 79 |
| | 结合 SMOTE 算法的支持向量机 | 75 |
| | 深度信念网络 | 73 |
| 第二组数据 | 结合 SMOTE 算法的深度信念网络 | 84 |
| | 随机森林 | 83 |
| | 结合 SMOTE 算法的深度信念网络 | 85 |

3 总结与讨论

当前中国生态文明建设力度不断加强,森林火灾监测及风险预警面临着新挑战,卫星遥感监测森林火灾及火灾风险预警领域的研究越来越受到社会的重视。为发展关键技术,为建设完备的森林火灾监测预警平台提供科学参考,本文将目前主要的森林火灾卫星遥感数据、监测算法和火灾风险预警模型总结如下。

卫星遥感数据应用方面,AVHRR 早期应用最为广泛,但由于其中红外波段受大气水汽影响大,容易出现饱和现象,会对监测结果产生较大的影响;而后发展的 MODIS 数据在时空分辨率、精度方面具有较大优势,在国内外火灾监测领域起到重要作用;风云卫星和高分卫星数据在火灾监测领域获得广泛应用,成为国内学者的研究森林火灾监测预警的重点。

森林火灾监测算法方面,固定阈值法、亮温-植被指数法等方法受到阈值设置的影响,适用性不强;绝对火点法不受阈值的影响,但在沙漠、植被稀少等温度较

高的地区,容易产生漏判;三通道合成法直接通过目视观察到火点,但受人为主观因素的影响较大;结合背景信息的上下文法,应用最为广泛,适用性最强,但其监测精度也需要其他算法的辅助。

森林火灾预测模型方面,物理模型的发展较为成熟,解释性较高,但是模型中的某些参数难确定,且模型计算较复杂;统计分析模型中,线性回归模型拟合效果较差,应用更多的是广义线性回归模型,计算简单,并能充分解释火灾发生与各个因子间的关系,但在处理非线性处理非线性、高度交互作用或非常复杂的数据关系时,模型拟合效果较差;机器学习模型预测精度较高,可以处理非线性关系的数据,但无法解释林火关键驱动因子和林火发生之间的明确关系。

加强关于风云卫星、高分卫星等国产卫星的相关研究,探究如何有效联合使用多源遥感卫星以及不同的遥感监测算法,是以后的主要研究方向。此外,借助机器学习模型提取遥感图像中的特征并挖掘历史火灾数据的规律和模式,并联合统计分析模型进行林火发生预测,提升森林火灾自动化遥感监测与预警能力,也是未来的研究热点。

致谢:感谢成都信息工程大学科研项目(KYTZ201821)对本文的资助

参考文献:

- [1] 舒立福,田晓瑞. 国外森林防火工作现状及展望[J]. 世界林业研究,1997(2):29-37.
- [2] 田晓瑞,舒立福,王明玉,等. 林火与气候变化研究进展[J]. 世界林业研究,2006(5):38-42.
- [3] 李海萍,龙志航,杨滋恒,等. 基于 Logistic 模型的四川凉山州森林火灾风险分析[J]. 安全与环境学报,2021,21(2):498-505.
- [4] 覃先林,陈小中,钟祥清,等. 我国森林火灾预警监测技术体系发展思考[J]. 林业资源管理,2015(6):45-48.
- [5] 贾斌英. 中国林火卫星遥感监测的应用及评价[J]. 绿色科技,2021,23(13):97-98.
- [6] Li Z, Cihlar J, Moreau L, et al. Monitoring fire activities in the boreal ecosystem. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [J]. 1997, 102 (D24):29611-29624.
- [7] Fraser R H, Li Z, Cihlar J. Hotspot and NDVI differencing synergy (HANDS): A new technique for burned area mapping over boreal forest[J]. *Remote sensing of environment*, 2000, 74(3):362-376.
- [8] Flasse S P, Ceccato P. A contextual algorithm for AVHRR fire detection[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(2):419-424.
- [9] Giglio L, Descloitres J, Justice C O, et al. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS[J]. *Remote sensing of environment*, 2003, 87 (2/3):273-282.
- [10] Kaufman Y J, Kleidman R G, King M D. SCAR-B fires in the tropics: Properties and remote sensing from EOS-MODIS[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, 103 (D24):31955-31968.
- [11] 梁芸. 利用 EOS/MODIS 资料监测森林火情[J]. 遥感技术与应用, 2002(6):310-312.
- [12] 高懋芳,覃志豪,刘三超. MODIS 数据在林火监测中的应用研究[J]. 国土资源遥感, 2005(2):60-63+84.
- [13] 徐拥军. 基于 FY3A/VIRR 数据火情监测系统的设计与实现[D]. 北京中国地质大学, 2012.
- [14] 刘树超,李晓彤,覃先林,等. GF-4 PMI 影像着火点自适应阈值分割[J]. 遥感学报, 2020, 24(3):215-225.
- [15] 舒立福,张小罗,戴兴安等. 林火研究综述(II)——林火预测预报[J]. 世界林业研究, 2003(4):34-37.
- [16] 田晓瑞, Douglas J Mcrae, 张有慧. 森林火险等级预报系统评述[J]. 世界林业研究, 2006(2):39-46.
- [17] Deeming J E. National fire-danger rating system [M]. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Forest Service, US Department of Agriculture, 1972.
- [18] 杨贤为,张强. 神农架森林火灾发生率的长期预报[J]. 气象, 1995(12):42-44.
- [19] 蔡奇均,曾爱聪,苏漳文,等. 基于 Logistic 回归模型的浙江省林火发生驱动因子分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(2).
- [20] 侯晓静,明金科,秦荣水,等. 基于随机森林模型的交界域火灾风险分析[J]. 林业科学, 2019, 55(8):194-200.
- [21] 孙立研,刘美玲,周礼祥,等. 基于气象因子深度学习的森林火灾预测方法[J]. 林业工程学报, 2019, 4(3):132-136.
- [22] 许志卿,苏喜友,张颐. 基于支持向量机方法的森林火险预测研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(13):126-131.
- [23] 覃先林,李晓彤,刘树超,等. 中国林火卫星遥感预警监测技术研究进展[J]. 遥感学报, 2020, 24(5):511-520.
- [24] Dozier J. A method for satellite identification of surface temperature fields of sub pixel resolution [J]. *Remote Sensing of environment*, 1981, 11:221-229.
- [25] 卿清涛. NOAA/AVHRR 遥感监测森林火灾的准确性研究[J]. 四川气象, 2004(4):30-32.
- [26] 赵彬,赵文吉,潘军,等. NOAA-AVHRR 数据在吉林省东部林火信息提取中的应用[J]. 国土资源遥感, 2010(1):77-80.
- [27] 高华东. NOAA/AVHRR 数据在森林火灾监测

- 中的应用[D]. 青岛:中国海洋大学,2007.
- [28] Justice C O, Kendall J D, Dowty P R, et al. Satellite remote sensing of fires during the SAFARI campaign using NOAA advanced very high resolution radiometer data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, 101(D19): 23851–23863.
- [29] 王钊. 新一代极轨气象卫星 FY3A-VIRR 数据的地表火监测算法研究与评价[J]. *火灾科学*, 2011, 20(3): 140–145.
- [30] 肖霞. 基于类间方差的 MODIS 森林火灾监测方法研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2010.
- [31] 何全军,刘诚. MODIS 数据自适应火点检测的改进算法[J]. *遥感学报*, 2008(3): 448–453.
- [32] Lin Z, Chen F, Li B, et al. FengYun-3C VIRR active fire monitoring: algorithm description and initial assessment using MODIS and Landsat data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(11): 6420–6430.
- [33] 郑伟,陈洁,唐世浩,等. 基于 FY-3D/MERSI-II 远红外数据的火情监测研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2020, 39(1): 120–127.
- [34] 石艳军,单海滨,张月维,等. 新一代静止气象卫星林火监测研究[J]. *森林防火*, 2017(4): 32–35.
- [35] 熊得祥,谭三清,张贵,等. 基于 FY4 遥感数据的森林火灾判别研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2020, 40(10): 42–50.
- [36] 杨思慧,袁淑杰,王甚男,等. 基于 FY-4A 卫星遥感数据的泸州市森林火灾判别初步研究[J]. *成都信息工程大学学报*, 2023, 38(1): 64–69.
- [37] 何瑞瑞,赵凤君,曾玉婷,等. 多源遥感影像在森林火灾监测中的应用[J]. *世界林业研究*, 2022, 35(2): 59–63.
- [38] 曾超,曾珍,曹振宇,等. 多源时序国产卫星影像的森林火灾动态监测——以四川省木里县及其周边林区为例[J]. *遥感技术与应用*, 2021, 36(3): 521–532.
- [39] 刘树超,李晓彤,覃先林,等. GF-4 PMI 影像着火点自适应阈值分割[J]. *遥感学报*, 2020, 24(3): 215–225.
- [40] 傅泽强,陈动,王玉彬. 大兴安岭森林火灾与气象条件的相互关系[J]. *东北林业大学学报*, 2001(1): 12–15.
- [41] 狄丽颖,孙仁义. 中国森林火灾研究综述[J]. *灾害学*, 2007(4): 118–123.
- [42] 陈利均,杨辉,周伟军,等. 余姚市森林火灾发生时间及森林火险等级的研究[J]. *华东森林经理*, 2008, 22(4): 13–16.
- [43] 杨贤为,张强. 神农架森林火灾发生率的长期预报[J]. *气象*, 1995(12): 42–44.
- [44] 高博,陈响,单仔赫等. 基于 Logistic 回归模型的大兴安岭地区林火发生概率预测研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2022, 18(11).
- [45] 彭欢,史明昌,孙瑜,等. 基于 Logistic 的大兴安岭雷击火预测模型[J]. *东北林业大学学报*, 2014, 42(7): 166–169.
- [46] 苏漳文. 基于地理信息系统的大兴安岭林火发生驱动因子及预测模型的研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2020.
- [47] Brunsdon C, Fotheringham S, Charlton M. Geographically weighted regression[J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)*, 1998, 47(3): 431–443.
- [48] 苏漳文,曾爱聪,蔡奇均,等. 基于 Gompit 回归模型的大兴安岭林火预测模型及驱动因子研究[J]. *林业工程学报*, 2019, 4(4): 135–142.
- [49] 梁慧玲,郭福涛,苏漳文,等. 基于随机森林算法的福建省林火发生主要气象因子分析[J]. *火灾科学*, 2015, 24(4): 191–200.
- [50] 何锐,陆恒,晋子振,等. 基于随机森林算法的中国西南地区林火发生预测模型构建及驱动因子分析[J]. *生态学报*, 2023(22): 1–15.
- [51] 宋雨. 黑龙江省林火驱动因子及模型研究[D]. 东北林业大学,2018.
- [52] 杨景标,马晓茜. 基于人工神经网络预测广东省森林火灾的发生[J]. *林业科学*, 2005(4): 127–132.
- [53] 柳生吉,杨健. 基于广义线性模型和最大熵模型的黑龙省林火空间分布模拟[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(6): 1620–1628.
- [54] 孙立研,刘美玲,周礼祥,等. 基于气象因子深度学习的森林火灾预测方法[J]. *林业工程学报*, 2019, 4(3): 132–136.

A Review on the Researches of Forest Fire Monitoring and Risk Early Warning

HUANG Yun, WEN Jun, GE Xiangyu, LI Xiaoyue, SONG Yuxi

(Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: Forest fire is one of the major natural disasters threatening the Earth's ecosystem, causing significant harm to societal economies and the safety of human lives. Therefore, conducting relevant research on the real-time monitoring and early warning of forest fires is of great scientific significance and practical value. Based on current satellite remote sensing data, forest fire monitoring algorithms, and risk warning models, this investigation summarizes the advantages and weaknesses of the application of various remote sensing data, analyzes the applicability of major fire monitoring algorithms and risk warning models, and provides prospects for the future joint monitoring of Chinese national satellites and further research on machine learning models. The aim is to serve as a reference for the prevention and treatment of forest fires.

Keywords: forest fire; remote sensing monitoring; fire risk; early warning model