

森林火灾遥感探测技术研究进展

张文文¹,王 劲¹,王秋华^{1*},曹恒茂¹,王金波²,左军宏²,王加庆²

(1. 西南林业大学 土木工程学院,云南省森林灾害预警与控制重点实验室,云南 昆明 650224;2. 施甸县善洲林场,云南 保山 678000)

摘要:森林火灾是陆地生态系统重要的自然干扰之一,也是森林面临的主要自然灾害。多源遥感技术在森林火灾探测中应用,使得森林火灾的早期探测与实时监测成为可能,遥感技术已成为森林火灾监测和防控的重要手段。本研究综述了遥感技术在森林火灾相关研究方面的应用进展,从灾前、灾时、灾后3个阶段,分析了遥感技术和方法在森林可燃物调查及载量评估、火场态势监测、火险等级预测预报、火烧迹地识别、火后森林受害评估以及植被修复等方面的应用,总结了现有研究方法中存在的问题,展望了未来森林火灾探测技术的发展方向。多源多尺度遥感探测技术如将无人机、雷达、航空遥感与航天遥感等互相结合,多方位进行森林火前火后监测,为火险等级预报、森林火灾防控、火后森林结构和功能的恢复提供依据。

关键词:森林火灾;航空与航天遥感;探测与监测;多尺度;多源遥感

中图分类号:S762.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2023)01-0123-08

Research Progress of Remote Sensing Detection Technology of Forest Fire

ZHANG Wen-wen¹, WANG Jin¹, WANG Qiu-hua^{1*}, CAO Heng-mao¹, WANG Jin-bo²,
ZUO Jun-hong², WANG Jia-qing²

(1. College of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Yunnan Key Laboratory of Forest Disaster Warning and Control, Kunming 650224, Yunnan, China; 2. Shidian Shanzhou Forest Farm, Baoshan 678000, Yunnan, China)

Abstract:Forest fire is an important natural disturbance to terrestrial ecosystem, and is also a major disaster for forests. The application of multi-source remote sensing technology to the detection of forest fire, which has made it possible to find early burning and real-time monitoring of the fire. Remote sensing has become a crucially important method to monitor and protect forest fire. This paper reviewed the latest progresses on the application of remote sensing technology to forest fire studies, analyzed the application of remote sensing technology and methods in forest fuel load assessment, fire behavior monitoring, fire risk prediction, identification of burning area, damage assessment of forest fire, and vegetation recovery, summarized the deficiencies in existing methods from three stages (before, during and after a fire), and prospected the development of remote sensing technology for forest fire detection in future. The combination among multi-source remote sensing technologies such as unmanned aerial vehicle, LIDAR, aerial remote sensing, and aerospace remote sensing would monitor the pre-fire and postfire conditions of forests in multi-scale, which would provide the theoretical basis for the prediction of forest fire risk, the prevention of forest fire, and the restoration of burned-forest structure and function.

Key words:forest fire; aerospace remote sensing; detection and monitoring; multi-scale; multi-source remote sensing

收稿日期:2021-12-14 修回日期:2022-02-24

基金项目:国家自然科学基金(31960318, 32160376);云南省农业联合面上项目(2018FG001-055);云南省教育厅科学研究项目(2020Y0382)。

第一作者:张文文。研究方向:森林防火。E-mail:zww819794389@163.com

*通信作者:王秋华,教授,博士生导师。研究方向:森林防火。E-mail:qhwang2010@swfu.edu.cn

森林火灾是严重的自然灾害,但火也是自然环境的重要干扰因子之一,影响着全球生态系统的演替模式和过程,包括植被分布和结构、碳循环等^[1-2]。森林火灾的发生频率和强度在不断增加,火灾防控形势更加严峻^[3-4]。因此,急需高效实用的技术手段支撑火灾扑救决策^[5]。近年来,空间观测、传感器技术、信息技术和计算能力的不断优化以及遥感数据空间分辨率、光谱分辨率和时相特征的多样化,有效提升了遥感技术探测森林火灾的效果。相较于传统森林火灾监测方法(如瞭望塔和航空巡护等),遥感技术探测信息丰富,观测范围广、周期短,具有覆盖面积广、采集数据快、受限条件少等,能较全面地反映地物动态变化,及时发现并提供火场信息,是开展森林火灾探测的有效手段^[6]。该技术已在可燃物调查、确定火烧面积、过火区制图、评估火烧程度、估算生物燃烧排放量、了解火后森林受害程度以及指导灾后植被恢复工作等方面发挥了重要作用^[7-8]。

将卫星遥感技术应用于森林火灾探测起源于20世纪80年代,最早是利用 GEOS/VAS 传感器以及 NOAA(national oceanic and atmospheric administration)/AVHRR(advanced very high resolution radiometer)进行火灾监测^[9](表1)。当前用于森林火灾遥感探测的卫星平台包括:MODIS(moderate-resolution imaging spectroradiometer)/EOS(earth observation system)、AHI(advanced himawari imager)/葵花8号(himawari-8)^[10]、哨兵二号(sentinel-2)^[11]以及国产系列:风云三号(FY-3)^[12]、高分一号(GF-1)、高分四号(GF-4)^[13]、资源三号(ZY-3)和环境系列(HJ)、吉林一号(JiLin-1)等^[14]。此外,机载遥感技术也被广泛应用于森林火灾的探测,尤其是应用于重大和特别森林火灾(按照受害森林面积和伤亡人数,森林火灾分为一般森林火灾、较大森林火灾、重大森林火灾和特别重大森林火灾)^[15],可获取火灾实时、高清数字正射影像,空间分辨率高达8~10 cm,航拍效率可达30~40 km²·d⁻¹,时效性高、地类识别精度高、区划精度性能优等^[16]。

现阶段森林火灾探测技术主要包括:利用遥感影像识别植被,估算植被面积、载量等,可定量估测可燃物载量^[17];利用地表辐射能巨大的变化监测火点,实现火情的实时跟踪^[18];利用火灾前后地物光谱特征变化确定火灾程度与变化,识别火烧迹地,能较精准地评价火灾危害程度^[19];利用植被指数以及光谱混合分析法(spectral mixture analysis; SMA)监测火后植被恢复,提高了植被的监测精度^[20]。但受数据时空分辨率及其质量的影响,监测面积较小

的火灾(受害森林面积<1 hm²)有一定难度。未来可开展植被群落的长期监测,实现森林火灾的早期探测与实时监测,及时精确评估火灾易发区的火险等级,实现森林火灾高效防控;综合不同尺度的遥感平台优势并结合遥感数据,对地理信息系统建模,突出遥感森林火灾探测产品的预测性,满足森林火灾探测的具体需求^[21]。

1 森林火灾灾前预测

1.1 森林可燃物载量评估及类型识别

可燃物载量对于计算空间火险等级以及模拟整个景观中的火行为至关重要。然而,在满足一定精度条件下,大空间尺度(景观尺度)可燃物载量数据的快速获取依赖传统的地面调查方式难以获得,但通过遥感探测技术,森林可燃物载量定量估测可被实现^[15]。非光合植被(non-photosynthetic vegetation, NPV)主要是指凋落物,其大量积累会导致森林火灾发生的风险加大。因此,定量掌握非光合植被覆盖度(f_{NPV})有利于可燃物载量的评估与火灾监测^[22]。目前,遥感技术凭借其大范围数据获取和连续观测等优势,已成为估算 f_{NPV} 的主要技术手段^[23]。自然状态下,林区可燃物载量取决于植被类型和火周期,利用遥感数据和少量地面信息可实现森林可燃物载量定量估测^[24]。其中, Landsat TM影像结合火历史数据、林木冠层转换率与林分因子对可燃物载量进行估算,其估测值与实测值之间的决定系数(R^2)高达0.79^[25]。激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)是一种主动遥感技术,雷达传感器能获取高精度的垂直结构信息,提供有关森林结构和生物量组成等方面的定量信息,可用于可燃物载量评估,其评估准确率和效率较高,可达90%^[26]。

可燃物载量和类型的变化会导致火灾模式存在较大差异^[27],而基于遥感影像的时间序列分析,遥感动态监测技术可实现可燃物类型分类,使得对象(可燃物)具备大小、形状、拓扑关系、类别层次等诸多信息,其分类的面积精度可达到89.3%^[28],可更好地进行火行为预测和空间模拟^[29-30]。此外,可燃物分类具有尺度依赖性,这种空间尺度的变化使得遥感影像的使用具有差异性。对于区域性乃至全国性的森林可燃物分类,可采用低空间分辨率遥感数据;在林分尺度上,可采用高分影像来反映可燃物的细微变化。美国最先应用 NOAA 数据,研究北美植被分布特点,为全球植被覆盖状况的研究提供了借鉴经验^[31]。Goodenough 等^[32]利用 Hyperion、ALI、ETM 3 种遥感数据对加拿大维多利亚区的 5

种森林类型进行了分类,在结果对比中发现高光谱遥感数据可以提供连续、精细的光谱信息,能有效地消除大气散射的影响,具有更强的森林识别能力。但由于高光谱遥感数据成本高、可获取数据有限,不能实现大范围长时间的监测。Giorgos 等^[33]通过对地中海可燃物类型进行分类与绘图,进而评估和比较了 EO-1 Hyperion、Quickbird 和 Landsat TM 图像中固有的光谱和空间信息,发现高空间分辨率在可燃物分类方面比高光谱分辨率更精确。

1.2 森林火险发生预报

森林火险预测预报是利用气象、可燃物、火源来预测预报森林火灾发生的可能性^[34]。中国最早利用森林火灾风险等级模型进行火险预测预报,随着遥感(remote sensing)、地理信息系统(geographic information system)等新技术的发展与应用,卫星遥感探测技术凭借其监测范围广,能及时准确地反馈地面信息,可获取全球气象及地表等相关参数的特点,为开展每日森林火灾风险发生等级预报和及时获取火险预报参数提供了可行的技术手段^[20]。彭光雄等^[35]基于 MODIS 数据探测的火险数据(可燃物类型及湿度),构建了火灾敏感性指数(FSI),结果表明该指数能够很好表征森林火灾险的实况。

遥感主要利用电磁波所携带的信息来反演被探测目标的各种属性,最广泛利用的电磁波谱主要是:可见近红外、热红外、微波波段^[36]。其中,微波遥感可提取地表含水量(干燥程度);热红外遥感可提供地表温度;可见光遥感反演的植被指数等生态指标可以更新可燃物分布地图。遥感探测技术可对火灾危险区域进行火灾风险评估^[37]。森林火灾风险评估和预警还需要结合气象、历史火点数据、植被类型、林分结构等,通过建模估测森林火灾发生概率,发布风险等级,有利于对高火险区域进行重点防控。

2 森林火灾实时监测

2.1 森林火点识别

森林火灾监测作为发现森林火灾火点的重要手段,是防灾减灾的基础,通过及时精准地识别森林火灾,精准定位火点,有利于早发现早扑救^[38]。传统的森林火灾监测需大量人力、物力、财力,有一定的局限性,但卫星遥感探测技术凭借其技术优势,节省了相应的成本,在火灾监测中得到了广泛应用,如 GEOS/VAS、NOAA/AVHRR、MODIS/EOS、TM、DMSP 等卫星数据以及中国的 FY 系列气象卫星和环境与灾害监测预报小卫星等^[39]。目前学术界主要将 NOAA/AVHRR、MODIS/EOS 影像作为火点监测的遥感数据源,其森林火灾识别精度达

到 90%以上^[9]。基于遥感技术的火点识别方法研究也在不断地发展与改进。Yuan 等^[40]将火的颜色特征和运动特征融入遥感森林火灾探测方案,提出了一种基于视觉传感器的无人机森林火灾监测与检测方法,提高了森林火灾探测性能并降低了误报率。Dozier^[41]提出一种亚像素的地表温度场卫星识别方法,为其他卫星数据火点识别方法的发展奠定了理论基础。

基于 NOAA/AVHRR 卫星数据发展出图像增强方法、阈值法(单阈值法、多阈值法、动态阈值法)、NDVI 指数法等火点识别方法^[42],如,刘良明等^[43]提出一种时空动态阈值火点检测算法,发现该算法能有效改善火点检测结果,具有时空尺度的自适应性。随后,在完整的 MODIS 火点识别算法体系及其火产品的基础上,发展出绝对阈值法、上下文算法(Contextual)和多通道合成法等 MODIS 火点识别方法^[44-45]。目前,在 AVHRR 和 MODIS 火点识别方法基础上,又提出一系列修正、改进算法,如,覃先林等^[46]基于 MODIS 各波段特性,利用地面信息,采用亮温-植被指数法建立了森林火灾识别模型,提高了火点判别精度。殷针针等^[38]基于 FY-3D MERIS 影像数据,改进了潜在火点像元的识别算法,并结合动态阈值法和 Contextual 进行了火点识别实验,结果显示,改进后的算法能快速有效地提取出火点信息,尤其是对较小火点有较好识别效果。此外有学者开始基于环境小卫星进行火点探测,李家国等^[47]提出一种能较好应用于 HJ-1B 森林火灾监测的归一化火点指数(Ku)算法。覃先林等^[48]提出了一种利用 HJ-1B 卫星红外相机数据的火点自动识别算法,火点漏分率低于 10%,错分率为 0,能满足森林火灾监测的精度要求。

2.2 森林火灾燃烧动态监测

火灾的实时监测需要对地观测卫星在时间和空间分辨率上须同时满足监测需求,因而,在森林火灾监测任务中多以极轨或静止轨道卫星为主,如风云系列(FY)、EOS/MODIS、NOAA/AVHRR、S-NPP/VIIRS、Himawari-8/9、COMS-1 等。极轨卫星已形成广泛的火点监测能力。如 NOAA/AVHRR 对温度极为敏感且具有夜间成像与动态获取无云状态下遥感影像的能力,能识别出比卫星空间分辨率远小的火点,具有独特的监测效果^[49]; EOS/MODIS 一天过境 4 次,在时间分辨率上可实现对森林火灾的监测需求。此外,其火产品包含了能够独立理解火灾的时间和空间分布规律及特性的信息^[50]; VIIRS 具有更高的空间分辨率(375 m),能够监测到比 MODIS 更小的火点。但极轨卫星观测

频次较低,且集中于相对固定的几个时段,对于火灾的实时监测来说,时间分辨率无法达到要求^[51]。静止卫星可通过重复凝视拍摄,对火灾进行高时空分辨率的监测。如,日本 Himawari-8/9 静止气象卫星和韩国 COMS-1(通信-海洋-气象卫星-1)地球静止轨道卫星具有观测频次高($10\text{ min} \cdot \text{次}^{-1}$),能对单一的森林火灾事件形成连续观测,可进行火情实时跟踪,此外,其覆盖范围广,适用于监测过火面积较小的火灾,能监测到林下阴燃阶段的火^[52]。我国的风云四号(FY-4)静止气象卫星可对地球环境参数、天气、气候实现高精度、高时效的定量观测,每15 min 返回1次火场信息,可满足森林火灾领域研究分析、模式计算、监测的需求^[53]。此外,国产高分系列适合连续监测我国突发性森林火灾,动态跟踪监测着火点^[11]。

火场动态监测常利用中高分辨率的卫星影像提取火灾的发展趋势、云烟走向和火烧强度等火场信息,这是由于多数森林火灾在低空间分辨率热红外通道卫星影像(NOAA、MODIS、FY等)上通常仅表现为点特征,而在 Landsat TM/ETM+/OLI、GF系列、Sentinel-2A/B等中高空间分辨率卫星影像上可较好地表征出火线具有的线面特征,分辨出正在燃烧的火场轮廓^[54]。如,中国目前已在轨运行高分六号(GF-6),其(尤其是蓝光波段)影像可较好反映植被燃烧形成的烟区(包括烟羽和烟团)的分布状况如位置、范围和形状),从而判定火场的位置和火蔓延趋势^[7]。Ononye 等^[55]基于梯度法,从多光谱红外图像中提取火场参数(火场周界、活跃火线和火势蔓延方向),提高了火蔓延预测能力。受火场地形、植被、风向等影响,火场时常出现多条火线、多个方向蔓延的现象,需要在卫星影像上定量提取出多个分散的燃烧区域。

3 森林火灾灾后评估

3.1 森林火灾受害程度评价

森林火灾受害程度可反映火后森林生态系统变化程度,即它与植被死亡率成正比,与植被修复能力成反比,是了解火后森林受害程度、开展森林火灾恢复重建工作极为重要的参数。国内外多用火烧烈度(burn severity)来定量评价森林受害程度^[56],尤其是借助激光雷达(LiDAR)在森林垂直结构测量方面的优势,通过植被垂直高度在森林火灾发生前后的变化来确定火烧烈度。不同类型遥感数据及光谱波段间组合指数,如 NBR(normalized burn ratio)、NDVI(normalized difference vegetation index)、EVI(normalized difference vegetation index)等,已

被广泛运用于火后森林受害程度评价^[57]。如,Victor^[58]提出了一种新的光谱指数 dNBR-EVI,能更精确地确定植被烧损严重程度及判断土壤烧伤程度。基于植被指数并结合地面调查组合指数 CBI(composite burn index)构建评价指标,也是评估森林受灾程度的方法。如,Re^[59]对美国地质勘探局(USGS)提供的遥感陆地卫星数据进行预处理,调查了森林火灾的空间特征,确定火点位置,并通过NBR 和 dNBR 来计算烧伤面积和调查烧伤严重程度(BS),估计火灾受损面积。此外,通过研究火灾前后遥感计算的值变化或通过目视判读选取不同程度的训练样本,借助分类方法可将森林受害程度进行分级。

遥感是大尺度动态的一种监测手段,被有效地用于监测森林火灾造成的陆地生态系统生产力和生物多样性的总体损失。Sannigrahi 等^[60]采用2种光能利用率(LUE)模型及 MODIS 遥感数据,对森林生态系统陆地净初级生产力(NPP)进行了定量分析,提出一种新方法(delta-NPP/delta-burn 指数)来量化森林火灾对陆地碳排放和生态系统生产的影响。长时序卫星遥感产品的广泛应用为利用遥感探测技术进行森林火灾烧毁生物量估算提供了有效的工具,利用 MODIS 火产品中的火辐射功率数据(fire radiative power;FRP)得到火辐射能(fire radiative energy;FRE),进而估算森林火灾消耗的生物量^[61]。静止卫星超高的时间分辨率可以通过 FRP 时间积分等方法对森林火灾燃烧总量进行计算^[53]。

3.2 火烧迹地生态修复状况

卫星传感器可提供地物在火烧迹地各波段的辐射能量差异,用于地物识别和区分,并具有很强的时效性和周期性,为卫星影像研究火烧迹地植被恢复提供了新的技术手段^[62]。目前火烧迹地植被研究仍广泛使用中低空间分辨率的遥感数据,具有高时间分辨率。高空间分辨率数据能够识别植物个体,而高光谱分辨率数据能够更好区分不同植被物种^[63]。除光学影像外,雷达数据在火后植被恢复研究方面也发挥了作用。Meng 等^[20]联合激光雷达与高分卫星影像(WorldView-2)研究了不同程度火烧迹地植被的短期恢复速率。

现阶段,火烧迹地植被恢复卫星遥感监测方法可概括为图像分类法^[64]、植被指数法^[65]、光谱混合分析法(SAM)^[66]。其中 SAM 得到的地物识别与区分结果更加精细、准确,能提高植被的监测精度,但此方法也常因空间异质性、地表复杂性以及像元组成差异性而受到限制。火后植被恢复评价模型常用植被指数(NDVI、EVI、SAVI、MSAVI、NBR 和

NBR2 等)作为灾后生态恢复的评价指标。此外,叶面积指数(LAI)^[67]、植被覆盖度(VCF)、净初级生

产力(NPP)和光合作用有效辐射吸收率(FAPAR)等生态参数也常用于植被恢复的研究中^[68]。

表 1 各种不同空间分辨率的遥感影像信息提取

Table 1 Information extraction of remote sensing images with different spatial resolutions

类型	主要方法	探测领域	主要数据来源	空间分辨率	光谱分辨率	参考文献
定量遥感	反演模型	评估可燃物载量	MODIS、AVHRR	低	高	Giorgos 等 ^[33] 、Brandis 等 ^[25] 、Sannigrahi 等 ^[60] 、Gowaard 等 ^[31]
遥感影像分类	监督与非监督 图像分类、梯度法	火后植被恢复监测、 火灾监测、火场参数 提取	MSS /TM、SPOT4、 CBERS	中	中	覃先林等 ^[39] 、Goodenough 等 ^[32]
目标识别	图像分割 模式识别	灾后评估、火烧迹地 识别	IKONOS、Quick- Bird、GF-1/6	高	低	唐尧等 ^[13] 、Meng 等 ^[20] 、 Somers 等 ^[66]
火点检测	阈值法	森林火灾识别与实 时监测	HJ-1A/1B、Hima- wari-8、FY 系列	低	高	Park 等 ^[10] 、郑伟等 ^[12] 、 殷针针 ^[38] 、Chuvieco 等 ^[54] 、 李家国等 ^[47]

4 结论与展望

随着气候变化,尤其是变暖趋势增强,人为干扰活动增加,全球森林火灾更具暴发性和危害性。人类也将面对更多大面积、高强度且影响大的森林火灾。现有灭火技术和方法将面临严峻挑战。更需要大空间、大尺度和大时间跨度的森林火灾实时探测和及时监测技术。遥感技术的发展、数据源的多样化以及方法模型的改进,为森林火灾探测提供了支撑。遥感技术能较全面地反映地物动态变化,及时发现并提供火场信息;形成了适用于不同卫星遥感数据的火情监测应用方法与技术系统,实用性好。已用于绘制可燃物载量火险图、主动或实时森林火灾探测和监测、火烧后损失评估和火烧迹地生态修复治理等方面,可靠性强。但遥感在森林火灾探测方面的应用还需拓展和深入,向多尺度模拟和多指标量化、功能拓宽化和性能精细化、航空遥感与航天遥感相结合发展。

及时、精确提供火场信息,为精准灭火服务。随着极端火事件频发,出于对火险的及时处置响应,现阶段对火点位置的精确度以及对目标探测时效性需求也要求更高。迅速向火管理者提供高清图像产品和衍生信息,及时评估森林火灾形势、提出灭火规划建议。特别是中国西南高山峡谷区,山高坡陡谷深,缺乏及时准确的火灾实时遥感信息,很容易在灭火行动中造成人员伤亡。要优化配置遥感监测系统,可将光谱采样限制在单个波段,完成直观的图像解译,以静态地图的形式向防灭火指挥员提供森林火灾的位置信息^[69]。系统处理大量不同光谱和空间分辨率的地球观测图像,得到从森林火灾探测、火线监测到受影响区域的损害评估、灾后恢复评估期间

精细化的专题产品。

自动解译、多方位评估,提高精准度和可信度。要形成高效准确的自动监测及分析能力,建立稳定和模块化的计算技术平台,促进多个火应用程序(如实时火灾探测、火锋动态监测、快速火区测绘和烧毁区域的时间序列分析)高效运行。借助遥感图像,对生物防火林带、箐沟、火场紧急开辟的防火隔离带以及天然河流、湖泊等进行隔火效能评估。

协同使用多源数据、信息互补和尺度转换。协同使用更多的数据源,进一步融合时间、空间、光谱信息,实现多尺度、多平台影像间的信息互补和尺度转换,不断提升多星源对火点的响应和监测能力。如航天与航空遥感相结合,无人机技术对火场进行实时监控与指挥,利用遥感技术和地理信息系统对高火险区的评估预测,及时发现、定位、指挥扑火。实现监测火烧迹地植被演替的更新状况,预测其恢复时间、评估火的生态效益等。

参考文献:

- [1] HICKE J A,JOHNSON M C,HAYES J L,*et al.* Effects of bark beetle-caused tree mortality on wildfire[J]. Forest Ecology & Management,2012,271(3):81-90.
- [2] BOWMAN D M J S,BALCH J K,ARTAXO P. Fire in the earth system[J]. Science,2009,324(5926):481-484.
- [3] OLIVEIRA S,PEREIRA,JOSE M C,*et al.* Exploring the spatial patterns of fire density in southern Europe using geographically weighted regression[J]. Applied Geography, 2014, 51 (2):143-157.
- [4] JOLLY W M,COCHRANE M A,FREEBORN P H,*et al.* Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013[J]. Nature Communications,2015,6(7):7537.
- [5] 饶月明,王川,黄华国.联合多源遥感数据监测四川木里县森林火灾[J].遥感学报,2020,24(5):559-570.
- RAO Y M,WANG C,HUANG H G. Joint multi-source re-

- mote sensing data monitoring forest fire in Muli County, Sichuan [J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24 (5): 559-570. (in Chinese)
- [6] KARAGIANNI A C, LAZARIDOU. Remote sensing techniques in monitoring areas affected by forest fire[J]. ProcSpie, 2017,28(2):3255-3269.
- [7] 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(05):511-520.
- QIN X L, LI X T, LIU S C, et al. Research progress of satellite remote sensing early warning and monitoring technology of forest fire in China [J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24 (05): 511-520. (in Chinese)
- [8] 田晓瑞,DOUGLAS J,MCRAE2,等.卫星遥感技术在林火管理与研究中的应用[J].林业研究,2005,16(1):73-78,86.
- TIAN X R, DOUGLAS J, MCRAE2, et al. Application of satellite remote sensing technology in forest fire management and Research; English[J]. Journal of Forestry Research, 2005, 16 (1): 73-78,86. (in Chinese)
- [9] 舒立福,王明玉,赵凤君,等.几种卫星系统监测林火技术的比较与应用[J].世界林业研究,2005,18(6):49-53.
- SHU L F, WANG M Y, ZHAO F J, et al. Comparison and application of several satellite systems for monitoring forest fire [J]. World Forestry Research, 2005, 18 (6): 49-53. (in Chinese)
- [10] PARK S H, PARK W, JUNG H S. Improvement of forest fire detection algorithm using brightness temperature lapse rate correction in HIMAWARI-8 IR Channels: application to the 6 may 2017 Samcheok City, Korea [J]. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2018, 42(3):1353-1354.
- [11] 李天驰,杨福芹,卢燕.基于Sentinel-2影像的四川木里森林火灾监测[J].南方林业科学,2020,48(6):49-53.
- LI T C, YANG F Q, LU Y. Forest fire monitoring based on Sentinel-2 image in Muli, Sichuan Province[J]. Nanfang Forestry Science, 2020, 48(6): 49-53. (in Chinese)
- [12] 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.
- ZHENG W, CHEN J, TANG S H, et al. Study on fire monitoring based on fy-3d/MERSI-II far infrared data [J]. Journal of Infrared and Millimeter Wave, 2020, 39 (1): 120-127. (in Chinese)
- [13] 唐尧,王立娟,张鑫,等.基于"三界"大数据的自然灾害应急处置服务系统建设与应用[J].国土资源信息化,2020(2):26-30.
- TANG Y, WANG L J, ZHANG X, et al. Construction and application of natural disaster emergency response service system based on "three circles" big data [J]. Land and Resources Informatization, 2020(2):26-30. (in Chinese)
- [14] 杨勇帅.吉林一号卫星遥感数据在林业中的应用[J].卫星应用,2016(10):63-65.
- YANG Y S. Application of jilin-1 satellite remote sensing data in forestry[J]. Satellite Application, 2016 (10): 63-65. (in Chinese)
- [15] 国务院.中华人民共和国森林防火条例[Z].中华人民共和国国务院令第541号,2008.
- [16] 马一瑞.无人机遥感技术在森林火灾调查中的应用[J].山西林业科技,2020,49(3):49-50.
- MA Y R. Application of UAV remote sensing technology in forest fire investigation [J]. Shanxi Forestry Science and Technology, 2020, 49 (3): 49-50. (in Chinese)
- [17] 刘海启,金敏毓,龚维鹏.美国农业遥感技术应用状况概述[J].中国农业资源与区划,1999,20(2):3-5.
- LIU H Q, JIN M Y, GONG W P. Overview of the application of agricultural remote sensing technology in the United States [J]. China's Agricultural Resources and Regionalization, 1999, 20 (2): 3-5. (in Chinese)
- [18] 刘诚,李亚军,赵长海,等.气象卫星亚像元火点面积和亮温估算方法[J].应用气象学报,2004(3):273-280.
- LIU C, LI Y J, ZHAO C H, et al. Estimation method of sub-pixel fire point area and brightness temperature of meteorological satellite [J]. Journal of Applied Meteorology, 2004 (3): 273-280. (in Chinese)
- [19] 宫大鹏,李炳怡,刘晓东.草原火烧严重度燃烧指数的适用性比较分析[J].生态学报,2018,38(7):2434-2441.
- GONG D P, LI B Y, LIU X D. Comparative analysis of applicability of grassland fire severity and combustion index[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(7): 2434-2441. (in Chinese)
- [20] MENG R, WU J, ZHAO F, et al. Measuring short-term post-fire forest recovery across a burn severity gradient in a mixed pine-oak forest using multi-sensor remote sensing techniques [J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 210:282-296.
- [21] ZINCK J A, LOPEZ J, METTERNICHT G I, et al. Mapping and modelling mass movements and gullies in mountainous areas using remote sensing and GIS techniques[J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2001, 3(1):43-53.
- [22] 王光镇,王静璞,邹学勇,等.遥感技术估算非光合植被覆盖度研究综述[J].遥感技术与应用,2018,33(1):1-9.
- WANG G Z, WANG J P, ZOU X Y, et al. Review of remote sensing technology for estimating non photosynthetic vegetation coverage [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33 (1): 1-9. (in Chinese)
- [23] GUERSCHMAN J P, HILL M J, RENZULLO L J, et al. Estimating fractional cover of photosynthetic vegetation, non-photosynthetic vegetation and bare soil in the australian tropical savanna region upscaling the EO-1 Hyperion and MODIS sensors[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(5): 928-945.
- [24] 赵宪文,李崇贵,斯林,等.森林资源遥感估测的重要进展[J].中国工程科学,2001(8):15-24,28.
- ZHAO X W, LI C G, SI L, et al. Important progress in remote sensing estimation of forest resources [J]. Engineering Science, 2001 (8): 15-24,28. (in Chinese)
- [25] BRANDIS K, JACOBSON C. Estimation of vegetative fuel loads using Landsat TM imagery in New South Wales, Australia[J]. International Journal of Wildland Fire, 2003, 12(2): 185-194.
- [26] BRADBURY R B, HILL R A, MASON D C, et al. Modelling relationships between birds and vegetation structure using airborne LiDAR data:a review with case studies from agricul-

- tural and woodland environments[J]. *Ibis*, 2010, 147(3): 443-452.
- [27] SAN-MIGUEL I, COOPS N C, CHAVARDES R D, et al. What controls fire spatial patterns? predictability of fire characteristics in the Canadian boreal plains ecozone [J]. *Eco-sphere*, 2020, 11(1): 1-25.
- [28] JARRON L R, HERMOSILLA T, COOPS N C, et al. Differentiation of alternate harvesting practices using Annual time series of landsat Data[J]. *Forests*, 2016, 8(1): 15.
- [29] 陈芸芝, 陈崇成, 汪小钦, 等. 漳平市森林可燃物类型变化遥感动态监测[J]. 地球信息科学, 2008, 10(6): 6792-6797.
CHEN Y Z, CHEN C C, WANG X Q, et al. Remote sensing dynamic monitoring of forest fuel type changes in Zhangping City [J]. *Geo-Information Science*, 2008, 10(6): 6792-6797. (in Chinese)
- [30] 夏明鹏, 官凤英, 范少辉, 等. TLS 技术在森林资源调查中的应用现状与展望[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(3): 238-244.
XIA M P, GUAN F Y, FAN S H, et al. Application status and prospect of TLS in forest resources inventory[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(3): 238-244. (in Chinese)
- [31] GOWAARD S N, TUCKER C J, DYE D G. North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 advanced very high resolution radiometer[J]. *Vegetation*, 1985, 64(1): 3-14.
- [32] GOODENOUGH D G, BHOGAL A S, DYK A, et al. Monitoring forests with Hyperion and ALI[C]// *Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2002.
- [33] GIORGOS M, GEORGIA G, IOANNIS G. A comparative analysis of EO-1 hyperion, quick-bird and landsat TM Imagery for fuel type mapping of a typical mediterranean landscape [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(2): 1684-1704.
- [34] VAROTSOS C A, KRAPIVIN V F, MKRTCHYAN F A. A new passive microwave tool for operational forest fires detection: a case study of siberia in 2019[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(5): 835.
- [35] 彭光雄, 陈云浩, 李京, 等. 结合遥感和气象数据的森林火灾监测研究——以马来西亚半岛为例[J]. 地球信息科学, 2007, 9(5): 99-104.
PENG G X, CHEN Y H, LI J, et al. Forest fire risk monitoring combined with remote sensing and meteorological data——taking Malaysia Peninsula as an example[J]. *Geo-Information Science*, 2007, 9(5): 99-104. (in Chinese)
- [36] LEBLON B. Forest wildfire hazard monitoring using remote sensing:a review[J]. *Remote Sensing Reviews*, 2001, 20(1): 1-43.
- [37] HERNANDEZ-LEAL P A, ARBELO M, GONZALEZ-CALVO A. Fire risk assessment using satellite data[J]. *Advances in Space Research*, 2006, 37(4): 741-746.
- [38] 舛针针, 陈方, 林政阳, 等. 基于 FY-3D MERIS 数据的火点识别方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(5): 1099-1108.
YIN Z Z, CHEN F, LIN Z Y, et al. Research on fire point recognition method based on fy-3d MERIS data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2020, 35 (5): 1099-1108. (in Chinese)
- [39] 覃先林, 张子辉, 李增元, 等. 基于 AATSR 数据的东北林火识别方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2007, 22(4): 479-484.
QIN X L, ZHANG Z H, LI Z Y, et al. Research on northeast forest fire identification method based on AATSR data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2007, 22 (4): 479-484. (in Chinese)
- [40] YUAN C, GHAMRY K A, LIU Z, et al. Unmanned aerial vehicle based forest fire monitoring and detection using image processing technique[C]// 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference(CGNCC). 2016.
- [41] DOZIER J. A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1981, 11: 221-229.
- [42] DOMENIKIOTIS C, LOUKAS A, DALEZIOS N R. The use of NOAA/AVHRR satellite data for monitoring and assessment of forest fires and floods[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2003, 3(1/2): 123-138.
- [43] 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 L M, WEI R, ZHOU Z. Fire point detection algorithm of forest grassland fire using dynamic threshold [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36 (12): 1434-1437. (in Chinese)
- [44] GIGLIO L, SCHROEDER W, JUSTICE C O. The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 178: 31-41.
- [45] ALONSO-CANAS I, CHUVIECO E. Global burned area mapping from ENVISAT-MERIS and MODIS active fire data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 163: 140-152.
- [46] 覃先林, 易浩若. 基于 MODIS 数据的林火识别方法研究[J]. 火灾科学, 2004(2): 83-89, 60.
QIN X L, YI H R. Study on forest fire identification method based on MODIS data [J]. *Fire Safety Science*, 2004 (2): 83-89, 60. (in Chinese)
- [47] 李家国, 顾行发, 余涛, 等. 澳大利亚东南部森林山火 HJ 卫星遥感监测[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36 (10): 1221-1224.
LI J G, GU X F, YU T, et al. HJ satellite remote sensing monitoring of forest fires in southeastern Australia [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010, 36 (10): 1221-1224. (in Chinese)
- [48] 覃先林, 张子辉, 李增元. 一种利用 HJ-1B 红外相机数据自动识别林火的方法[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(5): 700-706.
QIN X L, ZHANG Z H, LI Z Y. A method of automatic forest fire identification using HJ-1B infrared camera data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(5): 700-706. (in Chinese)
- [49] 刘诚, 李亚军, 赵长海, 等. 气象卫星亚像元火点面积和亮温估算方法[J]. 应用气象学报, 2004(3): 273-280.
LIU C, LI Y J, ZHAO C H, et al. Estimation method of sub-pixel fire point area and brightness temperature of meteorological satellite [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2004 (3): 273-280. (in Chinese)
- [50] 舒立福, 王明玉, 田晓瑞, 等. NOAA/AVHRR 和 EOS/MODIS 林火监测比较[J]. 森林防火, 2005(4): 27-29.

- SHU L F, WANG M Y, TIAN X R, et al. A comparison of forest fire monitoring between NOAA/AVHRR and EOS/MODIS [J]. Forest Fire Prevention, 2005 (4):27-29. (in Chinese)
- [51] 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.
- [52] GIGLIO L, KENDALL J D. Application of the Dozier retrieval to wildfire characterization: a sensitivity analysis[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 77(1):34-49.
- [53] 许健民, 钮寅生, 董超华, 等. 风云气象卫星的地面应用系统[J]. 中国工程科学, 2006(11):13-18, 24, 103.
- XU J M, NIU Y S, DONG C H, et al. Ground application system of Fengyun meteorological satellite[J]. Engineering Science, 2006 (11):13-18, 24, 103. (in Chinese)
- [54] CHUVIECO E, CONGALTON R G. Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping[J]. Remote Sensing of Environment, 1989, 29 (2):147-159.
- [55] ONONYE A E, VODACEK A, SABER E. Automated extraction of fire line parameters from multispectral infrared images [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 108(2):179-188.
- [56] 李明泽, 康祥瑞, 范文义. 呼中林区火烧迹地遥感提取及林火烈度的空间分析[J]. 林业科学, 2017, 53(3):163-174.
- LI M Z, KANG X R, FAN W Y. Remote sensing extraction of burned land and spatial analysis of forest fire intensity in Huzhong forest area [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2017, 53 (3):163-174. (in Chinese)
- [57] 余哲修, 何超, 李昔纯, 等. 基于归一化燃烧率火烧迹地遥感提取识别规则研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(1):216-224.
- YU Z X, HE C, LI X C, et al. Extraction and recognition of burned area based on normalized burn ratio by remote sensing [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(1): 216-224. (in Chinese)
- [58] VICTOR F G. Effects of fire recurrence and burn severity in fire-prone pine ecosystems[J]. Basis for Forest Management, 2019, 7(5):362-366.
- [59] RI J. Investigating the spatial characteristics of forest fire in north Korea using remote sensing and GIS[C]//AGU Fall Meeting Abstracts, 2015.
- [60] SANNIGRAHI S, PILLA F, BASU B, et al. Examining the effects of forest fire on terrestrial carbon emission and ecosystem production in India using remote sensing approaches[J]. Science of The Total Environment, 2020, 725(6):131-137.
- [61] WOOSTER M J, ROERTS G, PERRY G, et al. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2005, 110 (24):1-24.
- [62] 王明玉, 任云卯, 李涛, 等. 火烧迹地更新与恢复研究进展[J]. 世界林业研究, 2008, 21(6):49-53.
- WANG M Y, REN Y M, LI T, et al. Research progress on regeneration and restoration of burned land [J]. World Forestry Research, 2008, 21 (6):49-53. (in Chinese)
- [63] MITRI G H, GITAS I Z. Mapping postfire vegetation recovery using EO-1 hyperion imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2010, 48(3):1613-1618.
- [64] 苗庆林, 田晓瑞, 赵凤君. 大兴安岭不同植被火后 NDVI 恢复过程[J]. 林业科学, 2015, 51(2):90-98.
- MIAO Q L, TIAN X R, ZHAO F J. Post fire NDVI restoration process of different vegetation in Daxinganling [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51 (2):90-98. (in Chinese)
- [65] GOUVEIA C, DACAMARA C C, TRIGO R M. Post-fire vegetation recovery in Portugal based on spot/vegetation data [J]. Natural Hazards & Earth System Sciences, 2010, 10(4): 4559-4601.
- [66] SOMERS B, VERBESSELT J, AMPE E M, et al. Spectral mixture analysis to monitor defoliation in mixed-aged Eucalyptus globulus Labill plantations in southern Australia using Landsat 5-TM and EO-1 hyperion data [J]. International Journal of Applied Earth Observations & Geoinformation, 2010, 12(4):270-277.
- [67] 王强, 舒清态, 罗洪斌, 等. 基于机载 LiDAR 和光学遥感数据的热带橡胶林叶面积指数反演[J]. 西北林学院学报, 2020, 35 (4):132-139.
- WANG Q, SHU Q T, LUO H B, et al. Inversion of leaf area index of tropical hevea brasiliensis forest based on airborne LiDAR and optical remote sensing data[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(4):132-139. (in Chinese)
- [68] STOREY E A, STOW D A, et al. Assessing postfire recovery of chamise chaparral using multi-temporal spectral vegetation index trajectories derived from Landsat imagery. [J]. Remote Sensing of Environment, 2016(9), 183:53-64.
- [69] CHRISTOPHER D, LIPPITT D A, et al. Application of the remote-sensing communication model to a time-sensitive wildfire remote-sensing system[J]. International Journal of Remote Sensing, 2016, 37(14):101-112.