

森林草原火灾监测技术研究现状和展望*

汪东¹ 贾志成² 夏宇航² 张弛³ 苏婷²

(1 南京森林警察学院, 南京 210023; 2 南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037;

3 应急管理部森林防火预警监测信息中心, 北京 100054)

摘要: 森林草原火灾监测技术是指人类通过现有的科技工具对森林草原火灾的发生进行监控、测量。文中综述了地面监测、航空监测和卫星监测等3种森林草原火灾监测技术的研究进展, 总结各种监测方式与手段的优点及不足, 旨在通过对各项技术相关研究进展的比较, 了解各项技术的优劣; 概述载人航空监测和无人机监测的特点和发展现状; 对森林草原火灾监测技术的未来发展趋势进行展望和预测, 指出未来将利用现代信息技术形成“慧眼”, 健全森林草原火灾监测系统的科学完整性。

关键词: 森林草原, 火灾监测, 地面监测, 航空监测, 卫星监测

中图分类号: S762

文献标识码: A

文章编号: 1001-4241(2021)02-0026-07

DOI: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2021.0006.y

Research Progress and Trend in Forestry and Grassland Fires Monitoring Technology

Wang Dong¹ Jia Zhicheng² Xia Yuhang² Zhang Chi³ Su Ting²

(1 Nanjing Forest Police College, Nanjing 210023, China;

2 College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

3 Forest Fire Prevention Early Warning and Monitor Center of Ministry of Emergency Management, Beijing 100054, China)

Abstract: Forestry and grassland fire monitoring technology means that people monitor and measure the occurrence of forestry and grassland fire through existing scientific and technological tools. For ground monitoring, air monitoring and satellite monitoring, this paper introduced the research progress of different forestry and grassland fire monitoring technologies, presented the advantages and disadvantages of various monitoring ways. By comparing the technical related research progress, the functions and characteristics of each technology were summarized and analyzed. Meanwhile, the status and state-of-the-art of manned aerial monitoring and UAV monitoring were given in detail. The application prospect of forestry and grassland fire monitoring technology was expected, which pointed out that we should make use of modern information technology to form "smart eyes" to improve the scientific integrity of forestry and grassland fire monitoring system.

Keywords: forestry and grassland, fire monitoring, ground monitoring, air monitoring, satellite monitoring

森林在自然界中有净化水资源、稳定土壤、循环养分、调节气候和储存碳等重要作用, 草原是全国面积最大的陆地生态系统和生态屏障; 它们还为野生生物提供栖息地, 是丰富生物多样性的培育环境^[1-2]。

根据联合国粮食及农业组织发布的《全球森林资源评估》数据, 2018年世界森林面积仅有40亿hm², 其中俄罗斯、巴西、加拿大、美国和中国等5国的森林面积总和占到世界森林面积总和的50%以上。近30年

*收稿日期: 2020-12-31; 修回日期: 2021-02-04; 网络出版日期: 2021-02-08。

基金项目: 江苏省“六大人材高峰”项目(GDZB-036); 江苏高校“青蓝工程”项目; 江苏省重点建设学科“林学”项目。

第一作者: 汪东, 男, 副教授, 研究方向为林业机械, E-mail: 83184424@qq.cm。

来,全球森林面积不断减少,超过10个以上的国家森林已经完全消失^[3]。据第9次全国森林资源清查成果——《中国森林资源报告(2014—2018)》,我国最新的全国森林覆盖率为22.96%,相较于上一次森林资源清查我国森林覆盖率同比提高了1.33%。全国现有森林面积2.2亿 hm^2 ,森林蓄积量175.6亿 m^3 ,已成为全球森林资源增长最多、最快的国家^[4],草原面积近4亿 hm^2 ,约占国土面积的41.7%^[2]。然而,森林草原火灾对生态系统破坏巨大,也给国家和人民的生命财产造成了重大损失^[5]。据统计,2019年全国共发生森林火灾2345起,其中重大火灾8起、特大火灾1起,受害森林面积约13505 hm^2 ;发生草原火灾45起,其中重大火灾1起、特别重大火灾2起,受害草原面积约66705 hm^2 。^[2]

森林草原火灾的原因主要有有人为原因(纵火、吸烟、打猎、野餐火等)和自然原因(雷击、腐殖质积热等)。影响森林草原火灾发生的因素有温度、相对湿度、森林中的树木种类、风速、距人类活动地点的距离等^[6]。受全球变暖影响,全球森林草原火灾频发。据统计,全球每年约有1%的森林会受到火灾的破坏^[7]。2019年燃烧4个多月的澳大利亚森林草原火对当地生态环境、野生动物等造成了巨大影响,横跨8个南美国家的亚马孙森林火灾引起国际社会广泛关注。近年来,我国部分地区也遭遇了高温大风干雷暴等极端天气,森林草原防火形势严峻。

为有效减少森林和草原火灾造成的资源损失,应结合现有手段并寻求创新,利用现代化科学技术,形成“慧眼”监测捕捉广袤森林与草原上的星星之火,逐步构建现代高效的森林草原火灾监测体系^[8]。随着通信技术、计算机技术、空间信息技术的发展,使森林草原火灾的监测能力得到了有效提高^[9]。对森林草原火灾进行科学、有效地监测有助于掌握森林草原大火的潜在频率,跟踪评估火灾最有可能发生的地点,从而避免或降低损失。本文拟从应用环境角度,综述当前国内外森林草原火灾监测技术的原理、特点和应用,并对森林草原火灾监测技术的未来发展趋势进行展望和预测。

1 地面监测

地面监测主要是在地面上通过人工巡查、塔台监测、雷达监测、预测预报模型等进行森林草原火灾的实时监测和预警预报。地面监测火情的优点是识别

率高、定位准确,但由于林区环境复杂,地面监测会受到地形地势、自然条件的影响,在高温、高寒、雨雪雾霾等恶劣天气条件下不易进行监测、效率低。

1.1 人工巡查

人工巡查主要是由护林员及森林专业防火人员亲自对地域偏远、交通不便的林区,按照不同的火险等级,开展地面巡逻工作^[10]。人工巡查的优点是专业的巡查人员可以到森林深远处进行监测,可提高监测预防森林草原火灾的精确性,但是人工巡查工作量较大、监测效率低、巡护范围有限,且树木高大浓密^[11],处于森林底层的护林员会因为视线遮挡而阻碍观察范围。这种方式距离短,巡护范围小,不能及时发现火情,尤其是在夜间或巡检密度高时不能进行有效巡查,目前已经不能满足全区域森林防火监测工作的需求。此外,因为山路地形复杂,护林员的人工巡查签到监督缺乏科学的手段,多点、定时的巡护和静态观察很难做到,失火的失职原因不易判定^[12]。

1.2 塔台监测

塔台监测是利用地面制高点上的瞭望塔观测火情的一种方法。塔台监测的优点是相较于人工巡查,覆盖面积更广,提升了效率,降低了劳动强度;缺点是受塔台数量、地形、地势影响,盲区大、监测准确率低,而且造价成本较高,得不到大范围的应用。要想达到良好的火灾监测效果,塔台的选址和工作环境,以及塔台自身结构是最需要关注的3个要素^[13]。塔台组网密度要适中,网眼过大会出现“盲区”,不利于早期发现火情;网眼过小,台数增多,会造成不必要的损失^[14]。只有科学合理地构建塔台组,才会显著提高监测点空间分析与计算预测能力,从而有效地提升监测火灾的准确度。

1.2.1 有人值守塔台

有人值守塔台的首要任务就是瞭望员要在第一时间发现火情后,及时向森林防火指挥部报告,加强对林火的监控和巡查,密切关注火势蔓延、发展和变化,为快速扑灭森林草原火灾提供详实而准确的火场信息^[15]。通常有人值守塔台的高度都为24m,这种瞭望塔没有监控死角,可以做到大范围监测,但这种塔台没有保温措施,而且对讲机的使用距离也会受到限制,恶劣的工作环境不利于瞭望员及时监控火情。因此,吴精财等^[16]对其进行了研究改进:一是将高度改为28m,并且在顶部设置一个通讯平台,可以改善通讯质量;二是在顶部增设太阳能利用机房,充分利用

能源;三是为了避免瞭望台遭受雷击,在塔台顶部增设了10 m的分段避雷针,同时为了保证天线与避雷针的水平距离,增设了收发天线框架。应用表明,有人值守塔台坚固耐用,宽敞明亮,光线充足,信息通讯传递准确,火点的辨识、监控效果显著提升。

1.2.2 无人值守塔台

近年来,有人值守塔台正逐渐被基于无人值守塔台所取代,无人值守塔台配备了高清数字录像机、无线网络和可再生能源驱动系统,这不仅减少了操作员的工作量,而且提高了火灾发生时发出警报的准确性和可靠性,利用配备的激光夜视摄像机或高清摄像机的塔台,可以建立自动森林草原火灾监测系统^[17-19]。但无人值守塔台的视距比有人值守塔台的视距要小,这导致了需要部署的塔台数量急剧增加^[20]。由于塔台之间的重叠区域比传统的塔台网络更大,重叠频率更高,如果为了扩大探测范围必须增加所需的塔台数量,那么塔台之间的重叠是不可避免的,就会导致视域冗余。为使建筑成本最小化和森林草原火灾监测覆盖率最大化,合理设置塔台是至关重要的^[21]。

无人值守塔台在某些时候比有人值守塔台效率更低,且价格昂贵,每个摄像塔的价值超过3万美元,在偏远林区需要花费更高的费用建造塔台和安装通讯基础设施^[22]。有时系统检测会比训练有素的人工塔台观察员更慢、更不可靠,而且不可能只依赖摄像头,使用这些系统作为辅助工具来改善有人值守塔台瞭望员的工作条件则更加可行^[23]。

1.3 雷达监测

雷达监测是基于森林燃烧时引起的回波和气象回波存在较大差异而间接监测^[24-25]。当林火燃烧时产生的热空气垂直向上运动,四周冷空气补充产生对流热,加之火场有部分热能变为动能,推动热空气上升,这样就形成一个升起的热对流柱,它会把燃烧的和未完全燃烧的叶片、树枝等抬升起来,当抬升高度达到雷达的探测范围后,雷达接收未完全燃烧物被电磁极化的散射物的后向散射,这样就形成了雷达回波。当森林燃烧时存在2种散射机制:一是燃烧的叶片、树枝或爆炸时有导电介质的物质粒子对雷达电磁波的散射,另一个则是持续燃烧产生的大气湍流对雷达电磁波的散射。通常在雷达探测林火回波时,以上提到的2种散射机制同时存在^[26]。2种监测地面火情的主要方法是激光雷达和气象雷达,雷达遥感形成的图像通常比光学或热红外图像具有更高的空间分辨率^[27]。

雷达监测作为一种半定性预测森林草原火灾的工具,优点是监测灵敏度好,有极高的时间分辨率,对森林草原火灾引起的烟气能实现连续、实时监测^[28],森林防火部门可以根据雷达测到的风速、风向等气象数据、所处的山坡斜度等位置信息以及烟气运动特征,对森林草原火灾的蔓延速度、发展情势等进行精准的分析 and 预测^[29];缺点是有些波段在大气低层提供高分辨率观测时会受到限制,影响观测结果^[30]。

1.4 森林草原火灾监测预警系统和预测预报模型

森林草原火灾监测预警系统具有查询定位、图形编辑、空间分析、统计分析和火情损失估算功能,由监控中心、数据基站节点、监测节点和网络传输等部分构成。在系统工作过程中,每个监测节点和数据基站节点都有独立的编码地址。空间位置都有一个相对应的节点坐标,如若某个地点发生火灾,管理服务器会监测到报警信号,将火灾信息直接显示在电子地图上^[31]。监测节点主要负责收集环境信息,通过前端感知、信息分析、专家库及应急预案和各类外部数据的支持,划分火险等级,提高监测预警的时效性和准确性,实现多种时间、空间、视图的可视化展示和辅助指挥管理决策等功能,从而达到提前预警的目的。

森林草原火灾预测预报模型系统由具有传感、处理和无线通信能力的小型传感器节点组成,这些传感器节点构成的无线传感器网络(WSN)收集环境温度、湿度、气压、风向、风速、烟雾、CO₂气体浓度等数据,并将这些数据通过接收器节点传递到控制中心,经控制中心自动分析数据来进行火灾监测^[32-33]。WSN具有体积小、功耗低、成本低以及在小范围内易于通信等优点,但也存在处理能力低、存储不足和电池寿命有限等缺点^[34]。与采用摄像头、卫星等拍摄静态图像相比,森林草原火灾预测预报模型采集的数据更加精准,能直接反映林区各种环境因子的动态变化,可以有效解决全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)、遥感(RS)等3S技术中的精度低、实时性差及误判与漏判多等问题^[35-36]。缺点是可靠性较低,若传感器发生故障或被野生动物损坏,它就不能提供准确的数据,且WSN传递冗余数据会增加通信成本。因此,其在森林草原火灾监测方面仍没有得到大范围推广应用,实际应用较少^[37]。

2 航空监测

航空监测是通过载人机或无人机等低空飞行器

搭载林火监测设备实现对大范围的森林草原火灾进行快速有效实时监测, 如利用红外传感器或可见光传感器等对森林动态做到有序的观测成相。航空监测具有反应速度快、效率高等特点, 而且通过可视航拍遥控器可以增大观测视角、扩大监测范围。航空监测是森林防火监测的重要组成部分, 通过利用飞机等航空手段监测森林草原火灾, 以保护环境和国家资源。航空监测视野广、效率高, 缺点是存在安全风险、巡护成本高、视频图像无法实时回传, 同时受夜航和环境因素限制, 难以进行长时间连续监测。

2.1 载人航空监测

载人航空监测飞机主要有载人直升机和固定翼飞机, 载人直升机具有的定点悬停和起降场地要求较低的优势, 使其成为航空监测的主力^[38]。当进行航空巡护时, 也可以借助望远镜或者通过人工观测火情、定位着火点, 从而指挥人员及物质运输, 进行吊桶灭火。目前, 我国林区使用直升机进行日常巡护, 固定翼飞机用于火场监测^[39]。

航空护林在预防和扑救森林草原火灾中发挥着不可替代的重要作用, 充分体现出“机动、灵活、快速、高效”的优势。载人航空监测可以及时准确地发现起火点、快速传递火情蔓延状况, 可以弥补地面瞭望台的盲区和死角, 充分体现了空中移动瞭望台的作用, 为实现早发现、早扑救赢得了宝贵的时间; 还可以通过对火场实施空中观察, 应用多媒体信息传输技术, 快速准确、直观生动地提供火场态势, 辅助火场救援队伍做出扑救火灾的科学部署。为了提高飞机探测林火的速度和精度, 国外在飞机上安装了红外相机。红外热成像通过对热红外敏感相机对林木进行成像, 是一种被动式的非接触检测与识别, 能反映出温度场。它不受电磁干扰, 作用距离远, 探测能力强, 能全天候工作。在大面积的森林中, 火灾往往是由不明显的隐火引发的, 用现有的常规方法很难发现森林草原火灾或火灾隐患。而采用基于红外热成像仪的飞机巡逻, 则可以快速有效地发现这些隐火, 把火灾消灭在最初。近年来, 面向机载平台的红外相机作为重要的探测器手段, 已经广泛应用于森林草原火灾监测, 从而实现快速定位隐火、昼夜连续工作和扩大观测范围^[40]。载人航空监测能及时准确地发现和传递火情, 但缺点是技术还不够发达、飞机数量少, 如适用于南方特别是西南高海拔林区的大型直升机机源十分紧张, 缺少适应高原、山区等特殊地理环境作业的大中型直升机^[41],

场站数量较少且布局不合理, 相关的技术还不够先进^[42]。经过 60 多年的发展, 我国的航空护林已初具规模, 但和国外发达国家相比, 仍处于起步阶段, 在飞机数量、航护范围和直接灭火能力等方面尚不能满足森林防火工作的需要^[43]。

2.2 无人机监测

无人机是一种由动力驱动、机上无人驾驶、可重复使用的新型遥感平台^[44]。无人机监测是指依靠遥控或飞控来实现操纵无人机飞行对林区环境进行监测的技术, 通过在无人机上搭载的视觉传感器、气体传感器、温度传感器和红外传感器等传感器完成数据收集与研判^[45]。

中等高度固定翼无人机可对林地特定区域进行永久监视, 如果发现潜在的火灾, 则触发低空旋转翼无人机以确认是否发生森林草原火灾。在火灾得到确认后, 无人机将通知地面工作小组, 固定翼无人机将继续进行火情监视。如果出现误报, 固定翼无人机将保持其监视程序, 并返回基地。2 款无人机均配备 RGB 和热传感器^[46]。另外, 很多无人机配备了多源传感器, 包括视觉相机、红外微型相机和点火传感器^[47]。同轴四轴无人机被用于收集林火监测数据, 其优点是性能稳定, 即使在强风和湍急的风力条件下也能提供稳定的平台^[48]。基于无人机的森林草原火灾监测系统也投入了使用, 系统包括了机载部分与地面部分。机载部分由双目摄像系统、图传发射机、嵌入式系统和通信设备组成。地面部分则由个人电脑、图传接收机和通信设备组成^[49]。

无人机具有优于其他遥感平台的灵活性、实时性、移动性等特点, 无人机监测的优点包括固有风险小、使用成本低、应急机动性强、空间分辨率高、数据实时性强; 相较于地面监测, 监测时间更短, 范围更广。无人机监测结果更加直观, 其通过空中摄影模块能够完成火灾场景的应急测绘, 将实时状况传送给远程控制中心。但无人机监测受天气状况影响大, 无人机可靠性还有待提高^[50]。由于不能装填足够的燃料, 续航时间短, 导致不能执行时间较长的任务^[46]。这些都是限制其规模化应用的主要瓶颈因素^[51]。

3 卫星监测

卫星监测是指基于先进的成像设备, 通过遥感系统、地理信息系统和全球定位系统技术的综合应用, 实现卫星对地的森林草原火灾监测^[38]。利用卫星遥感

来监测森林草原火灾可做到大范围观测、快速确定火灾位置并估算火灾面积^[52]。卫星监测流程主要包括数据获取、提取位置信息、区域投影、大气校正、水体判识及火点识别等。遥感火点判识的原理是由于温度升高引起热辐射增强,不同热红外通道增长幅度差异,从而进行判断识别。处于 300 K 的常温地表对应的辐射峰值波长在 10 μm 左右,当林火爆发时,地表温度达到 500 ~ 750 K,其对应的辐射峰值波长在 3.9 ~ 5.8 μm ,该波长正好位于卫星探测器的红外通道范围,遥感气象卫星正是利用不同波长热辐射的差异性来判定火点^[53]。

在对于林火的卫星监测手段上,石艳军等^[54]提出了利用新一代静止气象卫星 AHI/葵花 8 号和 AGRI/风云四号高频次、全覆盖的优势对林火进行实时监控的方案。葵花 8 号成像仪 AHI 能够在 10 min 内完成全盘扫描,共有 16 个通道(包括 3 个可见光通道、13 个近红外和红外通道),波段范围为 0.46 ~ 13.3 μm 。运用卫星监测林火时,要选取与林火监测相关的通道,即 4 μm 和 11 μm 波段附近。气象卫星 AGRI 特性与 AHI 类似,但是受制冷器和探测器研制水平限制,部分通道特性比 AHI 低,因此在 4 ~ 11 μm 范围内的多个波段的性能稍逊。Eunna 等^[55]提出了使用韩国境内的 Himawari-8 对地静止卫星数据的组合式三步森林草原火灾检测算法(即阈值、基于机器学习的建模和后处理),该算法成功地监测出了大多数的森林草原火灾。卫星监测收集资料受地面条件影响小而且可以反映林火的动态变化;多采用多光谱摄影,形象信息丰富;利用微波可以实现全天候监测;成像迅速,成本低廉^[56]。随着遥感卫星的不断发射以及遥感技术的不断发展,遥感技术已经成为林火实时监测的重要手段。卫星监测范围广、数据采集速度快,且不受地形等环境条件的影响,但受限于重复周期及探测分辨率,且机动灵活性差,难以实现连续监测。

4 森林草原火灾监测技术研究展望

我国作为森林资源大国,防范森林草原火灾任重道远。利用现代信息技术形成“慧眼”,健全森林草原火灾监测系统的科学完整性,从而根据各种监测信息预警、预测火灾发生时间、地点是“防火于未然”的重要途径。展望未来,森林草原火灾监测系统将有以下发展热点和趋势:

1) 利用“大智移云”汇总分析海量森林草原火灾

监测数据。随着 5G 时代的到来,大(大数据)智(智能化)移(移动互联网)云(云计算)等高科技领域飞速发展,新兴信息技术交融渗透,将有助于推动森林草原火灾监控技术的变革。可依托国家、地方等不同层次的平台,利用移动物联网汇总多元化、多维度、多尺度的海量森林草原火灾监测数据,同时大数据收集气象环境条件数据,从而由云计算进行分析、驱动决策,智能化地提供精准的预警预测。首先,要利用互联网产业的发展,提高森林草原火灾监测系统的完整性与科学性。无线传感器系统应用于森林草原火灾监测系统功能的构建,其作用已经越来越明晰。同时,地面基站可以利用遥感卫星、气象卫星对地球表面的红外线监测,对可能发生森林草原火灾的地域进行实时监测,但如何提高准确性则成为当前阶段所面临的问题。通过物联网系统进行森林草原火灾的监测会极大减少人力成本,提高效率,降低误报率。要尽快更新完善“林地一张图”,优化卫星监测底图,减少热点核查误差。

2) 利用北斗全球卫星导航系统和高分卫星实现精准监测、实时监测。近几十年来,随着航天航空技术的不断发展,使得通过遥感卫星进行森林草原火灾的全区域监控成为可能。在国家层面应重点扶持专门的救灾减灾卫星的研发与发射,补齐短板,改变卫星少和受制于人的现状,如大力发展北斗全球卫星导航系统和高分卫星监测,推动遥感数据更快、更新、更准地服务森林草原火灾监控,实现精准监测、实时监测。结合遥感技术,对火情监控进行整体规划,建立全方位的森林草原火灾监控系统及高效的数据处理、信息反馈和响应机制。卫星监测作为重要手段与信息化扑火指挥深度融合,实现方式可以是将卫星监测作为灭火综合指挥平台重要模块,与其他模块一起为扑火指挥服务。

3) 构筑全方位、立体式、连续性监测体系。构筑全方位立体式监测体系,空中和地面监测相结合,实现大空间的区域监测和局部监测的适时补充。将传统与现代监控森林草原火灾方法相结合,集成地面巡护、近地面监测、航空巡护和卫星监测等多种方式,真正实现空中、陆地全方位防火,采取“多点发力、地空协同、全线巡护、合力监测”的方法,对森林草原火灾实施全方位、立体式、连续性观测,为努力实现“打早、打小、打了”的目标奠定基础,尽可能降低森林草原资源损耗。

参 考 文 献

- [1] YUAN C, ZHANG Y M, LIU Z X. A survey on technologies for automatic forest fire monitoring, detection, and fighting using unmanned aerial vehicles and remote sensing techniques[J]. NRC Research Press, 2015, 45(7): 783 – 792.
- [2] 中华人民共和国生态环境部. 2019中国生态环境状况公报[EB/OL]. (2020-06-03) [2020-11-10]. http://www.luoshan.gov.cn/departmen_tnews.php?cid=1&id=18556.
- [3] 林中才. 全球各洲林业资源及其产业发展现状[J]. 中国林业产业, 2019(12): 79 – 80.
- [4] 中华人民共和国国家统计局. 2015中国统计年鉴(2015)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [5] AL-KAFF A, MADRIDANO Á, CAMPOS S, et al. Emergency support unmanned aerial vehicle for forest fire surveillance[J]. *Electronics*, 2020, 9(2): 260. DOI: 10.3390/electronics9020260.
- [6] VOLKAN S, OMER K, MERIH G. A Bayesian network model for prediction and analysis of possible forest fire causes[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020; 457. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.117723.
- [7] 朱教君, 刘足根. 森林干扰生态研究[J]. *应用生态学报*, 2004(10): 1703 – 1710.
- [8] KARLIKOWSKI T. Forest fire detection systems[C]// United Nations Economic Commission for Europe. Forest fire prevention and control proceedings of an international seminar. Holland: Springer-Science+Business Media, B. V., 1982: 85-91.
- [9] PU R L, LI Z Q, GONG P, et al. Development and analysis of a 12-year daily 1-km forest fire dataset across North America from NOAA/AVHRR data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 108(2): 198 – 208.
- [10] 楚艳萍, 张大伟, 颜雪娇. 浅谈林火监测方法[J]. 农家参谋, 2018(13): 77.
- [11] 南玉龙, 张慧春, 郑加强, 等. 基于圆柱面模型的仿形喷雾植物冠层密度超声量化测试[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(1): 209 – 216.
- [12] 曹隽, 尹远新, 薛风波. 信息技术在林火管理中的应用[J]. 林业科技, 2008(2): 27 – 29.
- [13] 林其钊, 舒立福. 林火概论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003: 205-211.
- [14] 肖化顺, 段祝庚, 邓立斌. 林区瞭望台监测网选址研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(7): 6 – 9.
- [15] 崔勤善, 王艳玲. 瞭望台在林火监测体系中的应用[J]. *森林防火*, 2004(1): 27 – 28.
- [16] 吴精财, 倪连江. 24 m防火瞭望塔的结构及使用[J]. 林业劳动安全, 2010(2): 32 – 33.
- [17] HANG F Q, ZHAO P C, THIYAGALINGAM J, et al. Terrain-influenced incremental watchtower expansion for wildfire detection[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 654: 164 – 176.
- [18] KUROSH M, VIACHASLAU K, CHRISTOPHE S, et al. A human-like visual-attention-based artificial vision system for wildland firefighting assistance[J]. *Applied Intelligence*, 2018, 48(8): 2157 – 2179.
- [19] MERIH G, TUFAN D, İNCİ Ç. Visibility analysis of fire watchtowers using GIS: a case study in Dalaman State Forest Enterprise[J]. *European Journal of Forest Engineering*, 2017, 3(2): 66 – 71.
- [20] ZHANG F Q, ZHAO P C, XU S W, et al. Integrating multiple factors to optimize watchtower deployment for wildfire detection[J]. *Science of the Total Environment*, 2020; 737. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139561.
- [21] BAO S T, XIAO N C, LAI Z H, et al. Optimizing watchtower locations for forest fire monitoring using location models[J]. *Fire Safety Journal*, 2015, 71(1): 100 – 109.
- [22] STUART M, ANDREW S, JIM G, et al. Field evaluation of two image-based wildland fire detection systems[J]. *Fire Safety Journal*, 2011, 47: 54 – 61.
- [23] AHMAD A A A. A review on forest fire detection techniques[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2014, 10(3): 8722 – 8747.
- [24] 闫德民, 李庆阁. 我国森林火灾监测体系现状及展望[J]. *森林防火*, 2017(3): 27 – 30, 54.
- [25] 徐八林, 解莉燕, 陆鹏, 等. 云南C波段天气雷达的森林火灾预警系统实现[J]. *灾害学*, 2020, 35(3): 125 – 130.
- [26] 张深寿, 魏铭, 赖巧珍. 两次火情的新一代天气雷达回波特征分析[J]. *气象科学*, 2017, 37(3): 359 – 367.
- [27] LEBLON B, SAN-MIGUEL-AYANZ J, BOURGEOU-CHAVEZ L, et al. Remote sensing of wildfires[M]// BAGHDADI N, ZRIBI M. Land surface remote sensing. Elsevier Ltd. 2016: 55 – 95. DOI: 10.1016/B978-1-78548-105-5.50003-7.
- [28] LI Z M, CHEN H N, CHU H X, et al. Monitoring wildfire using high-resolution compact X-band dual-polarization radar: a case study in southern China[J]. *Atmospheric Research*, 2019, 225: 165 – 171.
- [29] 黄克慧, 朱景, 黄以平, 等. 基于多普勒天气雷达的火情自动识别系统[J]. *气象*, 2013, 39(2): 241 – 248.
- [30] 马振宇, 陈博伟, 庞勇, 等. 基于林火特征分类模型的森林火情等级制图[J]. *国土资源遥感*, 2020, 32(1): 43 – 50.
- [31] 张文文, 闫想想, 王秋华, 等. 澳大利亚草地火研究进展[J]. *世界林业研究*, 2021, 34(1): 113 – 118.
- [32] 舒立福, 周汝良. 森林火灾监测预警和扑救指挥数字化技术[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2012: 3-9.
- [33] YAN X F, CHENG H, ZHAO Y D, et al. Real-time identification of smoldering and flaming combustion phases in forest using a wireless sensor network-based multi-sensor system and artificial neural network[J]. *Sensors*, 2016, 16(8): 1228. DOI: 10.3390/s16081228.
- [34] NEETU V, DINESH S. Analysis of cost-effective sensors: data fusion approach used for forest fire application[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 24(4): 2283 – 2289.
- [35] YUNUS E A, IBRAHIM K, ÖZGÜR U. A framework for use of wireless sensor networks in forest fire detection and monitoring[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2012, 36(6): 614 – 625.
- [36] CUI F M. Deployment and integration of smart sensors with IoT

- devices detecting fire disasters in huge forest environment[J]. *Computer Communications*, 2020, 150: 818 – 827.
- [37] NICHOLAS M C, ADRIEN G, ANDREW D, et al. Wildfire and weather radar: a review[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(1): 266 – 286.
- [38] 伍小洁, 陈利明, 张洁, 等. 林火监测技术分析与应用[J]. *卫星应用*, 2017(5): 24 – 28.
- [39] OLLERO A, MERINO L. Control and perception techniques for aerial robotics[J]. *Annual Reviews in Control*, 2004, 28(2): 167 – 178.
- [40] 陈凯, 孙德新, 刘银年. 应用于森林火灾监测的中波红外相机设计[J]. *红外技术*, 2016, 38(6): 514 – 518.
- [41] 杨林, 袁俊杰, 王文元, 等. 我国南方航空护林现状及发展对策探讨[J]. *华东森林经理*, 2017, 31(2): 6 – 9, 13.
- [42] 龚涛. 当前航空护林发展问题的思考[J]. *中国科技投资*, 2018(15): 363. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5811.2018.15.337.
- [43] 王殊, 邓田, 窦征, 等. 载人航天器火灾探测技术研究[J]. *航天医学与医学工程*, 2014, 27(6): 444 – 447.
- [44] 史舟, 梁宗正, 杨媛媛, 等. 农业遥感研究现状与展望[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(2): 247 – 260.
- [45] 贾峰. 基于多传感器信息融合的无人机火灾监测技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [46] AMBROSIA V G, WEGENER S, ZAJKOWSKIC T, et al. The Ikhana unmanned airborne system (UAS) western states fire imaging missions: from concept to reality (2006-2010)[J]. *Geocarto International*, 2011, 26(2): 85 – 101.
- [47] MARTINEZ D, MERINO L, CABALLERO F, et al. Experimental results of automatic fire detection and monitoring with UAVs[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 234: S232. DOI: 10.1016/j.foreco.2006.08.259.
- [48] DASH J P, WATT M S, PEARSE G D, et al. Assessing very high resolution UAV imagery for monitoring forest health during a simulated disease outbreak[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 131(9): 1 – 14.
- [49] 徐燕翔, 裴海龙. 基于无人机的森林火灾检测系统[J]. *计算机工程与设计*, 2018, 39(6): 1591 – 1596, 1618.
- [50] SUDHAKAR S, VIJAYAKUMARI V, KUMAR C S, et al. Unmanned aerial vehicle (UAV) based forest fire detection and monitoring for reducing false alarms in forest-fires[J]. *Computer Communications*, 2020, 149: 1 – 16.
- [51] 王峰, 吴云东. 无人机遥感平台技术研究与应用[J]. *遥感信息*, 2010(2): 114 – 118.
- [52] 李英科, 李全民. 基于卫星数据的森林火灾监测系统探讨[J]. *森林防火*, 2019(2): 25 – 29, 43.
- [53] 刘志勇, 蒋岳新, 申志强, 等. 利用卫星系统提升我国森林火灾监测能力探讨[J]. *航天器工程*, 2019, 28(6): 96 – 100.
- [54] 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.
- [55] EUNNA J, YOOJIN K, JUNGBO I, et al. Detection and monitoring of forest fires using himawari-8 geostationary satellite data in South Korea[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(3): 271. DOI: 10.3390/rs11030271.
- [56] 阚振国. 林火基础理论[M]. 北京: 人民武警出版社, 2006: 190 – 197.