

卫星遥感火点监测应用和研究进展

陈兴峰¹, 刘李², 李家国¹, 欧文浩³, 张玉环⁴

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所 国家环境保护卫星遥感重点实验室, 北京 100101;

2. 中国资源卫星应用中心, 北京 100094;

3. 中国电力科学研究院, 北京 100052;

4. 生态环境部 卫星环境应用中心, 100094

摘要: 卫星遥感在自然灾害管理和应对中发挥了越来越多的作用。火点遥感在火灾频发的时候也被寄予厚望。梳理了火山、环境、气候、火灾等方面对火点遥感的需求, 中国火灾监测的行业用户对时空分辨率需求迫切程度不同; 概述了用于火点遥感监测的卫星数据源特点, 光谱维度上以热红外敏感波段最重要, 卫星轨道特点也是影响火点遥感监测能力重要因素; 在分析火点遥感物理原理和方法的基础上, 综述了当前火点遥感方法的研究进展及优缺点。按照火灾发生的灾前、灾中、灾后3个阶段, 分别讨论了当前火点遥感提供信息支撑的能力。火点遥感用于发现火灾仍需要与地面监测等手段联合使用。

关键词: 火点遥感, 红外, 灾害, 监测, 森林火灾, 地表温度

引用格式: 陈兴峰, 刘李, 李家国, 欧文浩, 张玉环. 2020. 卫星遥感火点监测应用和研究进展. 遥感学报, 24(5): 531-542

Chen X F, Liu L, Li J G, Ou W H and Zhang Y H. 2020. Application and research progress of fire monitoring using satellite remote sensing. Journal of Remote Sensing(Chinese), 24(5): 531-542[DOI:10.11834/jrs.20209118]

1 引言

在时间和空间上失去控制的燃烧以致产生灾害时, 被称为火灾。为了尽可能减少火灾造成的损失, 发现和掌握火情信息对于帮助人类控制住燃烧过程极为重要。然而火灾发生的时间和空间范围均较为随机, 自20世纪70年代卫星遥感诞生之初, 因具有宏观观测能力强的先天优势就被用于火灾监测, 至今已有近半个世纪的历史。

卫星遥感主要通过探测热红外电磁波辐射强度的方式监控地面火情 (Robinson, 1991)。单纯利用卫星遥感观测数据, 仅可以得知地表发生了热异常现象并估算其强度。遥感探测到的地表热异常现象通常包括: 火山喷发、森林、草原、溢出油气、人工目标等燃烧、农业秸秆焚烧、工厂热排放等。后面两种情况通常不形成火灾。火灾和农业秸秆焚烧对人类以及自然环境造成的破坏

较大, 且在特定区域和季节发生的概率和数量较大, 是当前卫星遥感火情监测的重点对象。遥感数据大多是以像素为单位的影像格式, 单个像素点是遥感火情监测的一个基本单元, 所以遥感监测火情的工作通常被叫做“火点遥感”(付迎春等, 2008; 胡梅等, 2008), 本文沿用这种说法。

2019年春, 中国发生了若干次较为严重的火灾。例如, 北京地区3月30日密云区东绍渠镇高各庄村村南发生山火, 4月4日怀柔区宝山镇下坊村发生山火; 山西长治沁源县3月14日沁河镇南石村发生火灾导致6名消防员牺牲, 3月29日该县王陶乡郭家坪村再次发生重大火灾; 3月30日, 四川省凉山州木里县雅砻江镇立尔村发生森林火灾, 截至4月4日31名扑火人员牺牲, 属火灾最高等级—特别重大火灾 (公安部办公厅, 2007)。遥感在上述火灾的救灾过程中发挥了一些作用, 但也存在一些问题。

收稿日期: 2019-05-02; 预印本: 2019-07-25

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2017YFB0503902); 高分辨率对地观测系统重大专项(编号:30-Y20A02-9003-17/18); 国家自然科学基金(编号:41501399); 国家留学基金(编号:201804910115)

第一作者简介: 陈兴峰, 1984年生, 男, 副研究员, 研究方向为大气环境遥感传感器定标和反演。E-mail: chenxf@aircas.ac.cn

通信作者简介: 李家国, 1982年生, 男, 副研究员, 研究方向为红外遥感和环境遥感。E-mail: jacoli@126.com

卫星遥感对火点监测提供了前所未有的机会和能力, 也被寄予了很高的期望。汇总分析了火点遥感需求驱动、原理方法、应用能力等, 以防用户和遥感学者夸大或者忽视火点遥感的能力, 做到更加客观、有效地利用这种技术手段。

2 应用领域和行业需求

2.1 应用的领域

火灾事件对人类生命财产造成损失而受到关注, 然而驱动卫星遥感火点监测研究的原因并非局限在火灾领域, 主要可以归结为以下4个方面。

(1) 自然界自发的燃烧及热异常现象监测。利用火山灰云在热红外波段的吸收特征, 通过亮温来监测火山灰云的分布 (尹京苑等, 2013)。利用长波热红外波段反演地表温度, 通过地表温度异常点进行地热探测 (彭芬等, 2014), 指导人们获得清洁能源。火点遥感还可以实现海洋油气燃烧等的监测。

(2) 大气环境污染监测。大气中的颗粒物造成的环境污染是全球关注的重要环境问题。在中国、东南亚等地区以生物质为主的燃烧导致的大气环境污染加剧, 秸秆焚烧等农业活动向大气中排放一氧化碳等有毒气体 (厉青等, 2009), 燃烧产生的黑碳型气溶胶 (Cheng等, 2010) 增加大气颗粒物浓度 (杭鑫等, 2017), 对人类健康造成损害。火点遥感为政府管控提供信息支撑 (张彦等, 2016)。如图1所示, 当前的2019年春季, 通过VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) 监测到的火点可以看出, 南亚地区印度和东南亚的中南半岛一如往年, 大量的生物质燃烧造成严重空气污染, 甚至跨境污染中国 (秦世广等, 2006)。同时, 火点遥感产品也可以作为大气环境污染排放源 (余超等, 2015; 张思等, 2019) 用于预测估算环境污染 (Tao等, 2013)。

(3) 全球气候变化研究。生物质燃烧活动向大气排放二氧化碳及臭氧等气体, 增强温室效应、在热带和亚热带主要燃烧区域对大气化学和气候产生重要影响 (Greenberg等, 1984); 燃烧产生的大气颗粒物及其前体会增加气溶胶含量, 气溶胶通过自身的散射吸收作用直接影响辐射收支, 并作为云的凝结核通过云间接影响辐射收支; 在高纬度地区, 燃烧使地表发射率发生变化, 反射

率严重降低可以吸收更多的太阳辐射, 导致冻土层及其陆表水文发生变化 (Jiang等, 2015)。

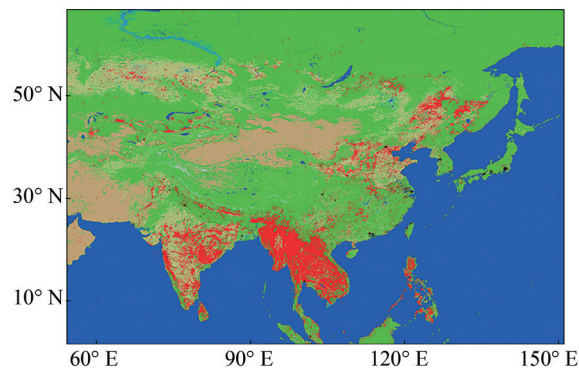


图1 Suomi NPP/VIIRS在2019年3月10日—4月10日监测到的中国及周边火点叠加 (Schroeder等, 2014)
Fig.1 All fire points monitored by Suomi NPP/VIIRS during March 10 to April 10, 2019 in China and near area (Schroeder et al., 2014)

(4) 火灾监测。中国大部分地区处于中纬度及其附近, 季节变化明显, 春季因气候干燥, 可燃条件好而易发火灾, 风力较大导致火灾发生后很难控制。而广大的森林和草原地区地广人稀, 火灾通过人工巡视、飞机巡查等手段效率较低。卫星遥感具有空间连续和监测范围大的特点, 因此在发现火灾、救灾过程、灾后评估等方面都可以发挥重要的信息支撑作用。

在中国, 火点遥感最为广泛且具有市场化能力的应用领域是火灾和秸秆焚烧的遥感监测。

2.2 中国行业用户对火点遥感的需求

当前在中国, 遥感的主要服务对象为各级政府所属部门。用户根据自身业务内容, 对于火点遥感的需求也有所差异。

(1) 林业应急管理相关用户。这些用户包括林业草地管理部门、消防部门、电力部门 (重要输电线路穿过人烟稀少的山林) 等。这些部门对于第一时间发现火灾更为关注。因此对火点遥感产品的时间分辨率和发现速度要求很高, 而出于快速救灾响应的需求, 对于火灾位置的准确性和精度要求也较高。静止卫星十分钟级别的时间分辨率最为符合要求, 虽然静止卫星空间分辨率不一定足够提供精确位置, 但配合有人驾驶航空器和无人机等手段, 可以弥补位置精度不足的缺陷。

(2) 大气环境相关用户。对于中国环境保护部门, 大气环境质量的监测监管是其重要的业务职能。火灾发生较为局部, 随机, 且不易监管控

制，而秸秆焚烧在特定季节会产生大范围持续的高强度空气污染，秸秆焚烧是环保和农业农村部门使用火点遥感手段监测的重点。秸秆焚烧的单个火点可能面积较小，监管上更加需要准确的位置信息和高空间分辨率，因执法过程的严谨性，对于火点置信度和时效性要求也很高。卫星遥感可以形成较为有效的监管信息支撑和执法依据。

(3) 其他行业。火山爆发对于航空交通等行业影响较大，但中国不属于火山高发地带，火山相关监测需求较小，卫星遥感可以在地热勘探等领域发挥作用；全球气候和环境交互的科学研究需求限于少数专业人员，但对火点产品的种类、精度、分辨率等则有更高的要求。

不同的行业用户形成了各有特色的针对火点遥感的问题。例如，1 km空间分辨率的卫星，能够监测到100 m尺寸的火点吗？卫星发现火点需要多久？卫星遥感这种技术监测出的火点信息可靠

吗？此类问题涉及遥感数据源，火点遥感的物理原理、提取方法，以及数据处理系统相关内容。本文将分别论述。

3 火点遥感卫星数据源

火点遥感的方法相对成熟，对火情的监测能力主要受制于数据源的类型和精度。在可见近红外和热红外波段，卫星上的遥感探测仪器通常具有光学镜头部分，获取的遥感数据具有特定的空间、光谱、时间分辨率，3者的提高都要求细分入瞳光的能量，3种分辨率指标的提高相互冲突，往往需要根据遥感器的应用需求进行取舍。对于火点遥感来说，目前并不是一种卫星或者遥感器就可以满足所有需求，当然，在特定的需求下，比如以发现火点为主的监测需求，也并不需要过多的光谱波段或者超高空间分辨率。表1列举了用于火点遥感的部分典型卫星及其传感器指标。

表1 火点遥感典型卫星及传感器

Table 1 Typical satellites and their sensors for fire remote sensing

卫星	轨道	主要传感器	波段范围/ μm	波段数量	最高空间分辨率/km	刈幅/km
NOAA	太阳同步	AVHRR	0.58—12.5	5	1.1	2700
Terra, Aqua	太阳同步	MODIS	0.4—14.4	36	0.25	2330
Suomi NPP	太阳同步	VIIRS	0.4—12.5	22	0.375	3000
FY-3C	极轨	VIRR	0.43—12.5	10	1.1	2800
		MERSI	0.4—12.5	20	0.25	2800
Himawari-8,9	地球同步	AHI	0.43—13.4	16	0.5	圆盘
GOES-R	地球同步	ABI	0.45—13.6	16	0.5	圆盘
FY-4	地球同步	AGRI	0.45—13.8	14	1	圆盘
GF-4	地球同步	VNIR, MWIR	0.45—4.1	5, 1	0.05	400凝视
Landsat-8	太阳同步	OLI	0.43—1.39	9	0.015	185
HJ-1B	太阳同步	CCD, IRS	0.43—12.5	4, 2	0.03	700, 720

从火点遥感的用户需求分析可知，时间分辨率、空间分辨率、置信度是重要的需求指标。判识出的结果火点置信度主要取决于光谱波段设置和辐射精度等，时空分辨率则跟卫星的轨道类型紧密相关。

3.1 传感器光谱波段

遥感主要是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3部分：可见近红外（扩展定义为0.38—3 μm ）反射波段，热红外（3—14 μm ）发射波段，微波波段（1—1000 mm）。在火点遥感中能利用的数据

也分布在这3个波段范围（Leblon, 2001）。太赫兹遥感（胡伟东等, 2017）发展较晚，几乎没有应用于火点的研究。

(1) 热红外是发现火点的主力波段。火点最典型的特点是温度高，热红外遥感对热辐射敏感，通过地物亮温异常来有效判识火点。相比较可见近红外波段的遥感器，尤其是在中国，热红外相机因探测器和制冷的限制使其研制更为困难（李向阳和贾嘉, 2018）。在长波红外（8—14 μm ）实现多波段、高灵敏度、高空间分辨率较为困难。因此，热红外相机的探测器件和整机研制

发展水平,是影响火点遥感技术水平的关键硬件基础。高性能的长波红外探测器件因其国防应用价值,目前很难从国际上获取。中国风云四号试验卫星搭载的自主研发的多通道扫描成像辐射计在 $10\ \mu\text{m}$ 以上波段实现3个波段探测能力,且在后续卫星计划中将实现与日本Himawari-8(该星成像仪与美国GOES-R卫星成像仪同为美国ITT EXELIS公司研制)卫星相当的探测能力(张鹏等,2016)。

(2) 可见近红外波段是火点识别辅助波段和灾后评估的重要波段。可见近红外波段用于云检测,太阳耀光的滤除。同时因为可见光具备人眼可见的特点,易于展现快视图,信息直观丰富,对于用户人工确认有重要辅助作用。因反射率变化明显,高空间分辨率的可见近红外波段遥感数据在火灾的后期评估方面提供更加精准的信息。

(3) 微波遥感。卫星所搭载的合成孔径雷达通过微波探测地表信息,因为微波对介电常数敏感,提取地表含水量(干燥程度)具有在火灾发生前的风险评估和预警价值(Leblon, 2001)。同时,在多云地区,在火灾救灾过程中,可以穿透云雾监测火烧迹地弥补光学遥感不具备全天候监测能力造成的观测空白。但因微波遥感相关卫星数据价格等因素,目前微波遥感在火点遥感中应用很少。

综上,卫星遥感用于火情监测,最有效最常见的是组合使用热红外和可见近红外波段的数据。

3.2 卫星轨道类型

遥感卫星的轨道可以划分为极轨和地球同步静止轨道两种。此处仅列举当前仍在轨运行的重要火点监测遥感卫星及其传感器。卫星距离地心的距离被称为轨道半径,距离地面的距离被称为轨道高度。而遥感考虑成像几何关系,更常用的是轨道高度。

(1) 极轨和太阳同步卫星。顾名思义,极轨卫星是绕着地球运转时经过北极和南极。太阳同步卫星每天在相同的地方时经过世界各地,其轨道经过北极和南极附近。军事侦察等特殊应用目标的卫星为了追求更高的空间分辨率指标,例如美国“锁眼”系列,可能部署在低至约200 km的高度(朱仁璋等,2015)。综合考虑到空间分辨率和刈幅设置,以及太空稀薄大气对轨道的影响,极轨

和太阳同步遥感卫星大都运行在约为600—800 km的高度上。几百公里的卫星轨道高度,使传感器在足够近的距离获得较高的空间分辨率,当卫星运行至向阳面,可以利用地表反射的太阳光实现可见近红外反射波段的全球数据获取,当卫星运行进入地球背阳面,具备夜间拍摄能力的遥感器可以获得夜间遥感数据。不论白天还是夜间,卫星数据均可用于火点信息的提取。

如果极轨和太阳同步卫星形成广泛的火点监测能力,至少需要具备以下3个特点:1) 刈幅足够大每天基本覆盖全球或观测地区至少1次;2) 公里级以上的空间分辨率(比如优于2 km);3) 具有热红外波段。美国国家海洋和大气管理局NOAA(National Oceanographic and Atmospheric Administration)的NOAA系列卫星,早期致力于服务气象领域,但确实具有火点监测的能力,成为最早用于火点监测的卫星(Flannigan 和 Haar, 1986),基于热红外亮温提取火点的方法为后续卫星火点遥感奠定了基础。美国搭载MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectrometer)传感器的Terra(1999发射)和Aqua(2002发射)两颗卫星,组合提供上下午2次和夜间2次共每天4次的时间分辨率,热红外波段空间分辨率为1 km。MODIS拥有36个波段,广泛应用于火点遥感研究,健全了火点遥感监测的技术框架。美国Suomi NPP卫星因搭载了基于MODIS和AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)发展的新一代传感器VIIRS将火点产品的空间分辨率推进到375 m。上述卫星在中国的行业和地方火点遥感系统中仍在发挥作用。但是,对于可见光波段来说,MODIS具备250 m的彩色合成图呈现能力,而VIIRS的375 m弱于MODIS。中国气象卫星风云三号系列具备与上述卫星类似的传感器,同样可以用于火点遥感(李亚君等,2017)。当然,为了更加清楚呈现火情,使用更高空间分辨率的卫星,例如中国HJ-1B小卫星(覃先林等,2010;贺宝华等,2011)监测火点,但这种空间分辨率较高的卫星刈幅较小,全球覆盖能力较差。Landsat-8卫星或者中国高分系列(1, 2, 6号),资源系列等空间分辨率较高的卫星,可以用于灾后的火情调查。

极轨和太阳同步卫星可以覆盖全球,对于全球气候等相关应用具有优势;但对于火灾发生的监控

来说，时间分辨率是不够的（伊坤朋和包玉龙，2016），当前较大数量的卫星协同观测或者组建星座有利于弥补该缺陷。

（2）静止卫星。又称地球同步静止轨道卫星，轨道高度3.6万 km。从轨道高度可以看出，地表反射辐射的电磁波信号到达静止卫星较为微弱。为了提高信噪比和空间分辨率，静止轨道的遥感器瞬时视场很小，也即单次拍摄的“刈幅”较小，通常采用线阵扫描或者面阵凝视扫描的方式，对地球进行全圆盘或者设定小范围进行观测。全圆盘扫描模式，每次全覆盖需要耗费一定的时间，所以时间分辨率受到限制，比如美国 GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) 每小时1次的时间分辨率为气象和火点监测提供高时效的数据，最新一代的气象卫星中，日本 Himawari-8 卫星为 10 min (Ge 等, 2019)，中国风云四号卫星为 15 min。而对于设定小范围重复观测，则可以使用更高的时间分辨率，比如 2.5 min。中国高分四号卫星，采用面阵凝视扫描模式，空间分辨率达 50 m (Chen 等, 2018)，同时具有对火点敏感的中波红外波段，因单次成像面积小数据量大等原因，对中国全境的覆盖能力有限，但在得知火灾发生后，通过重复凝视拍摄，对火情监控可以实现接近“放电影”式的高时空分辨率监控。

静止轨道气象卫星作为美国、欧洲、中国、日本、韩国等国家的航天遥感计划的重要部分，近几年发射的新型卫星空间分辨率和光谱分辨率有了很大进步，后续通过国际合作分区域观测，将形成十分钟级的全球高时间分辨率火点遥感能力。目前，在针对中国区域的火点遥感中，应用较为广泛的静止卫星是 Himawari-8 (Liu 等, 2018)，拥有丰富的光谱波段且热红外波段的分辨率高达 2 km，该卫星对东亚地区火点监测能力具有很大的提高，成为应用的热点数据源。中国的风云四号卫星空间分辨率在热红外波段低于 Himawari-8，风云四号系列后续卫星指标的提高，将有效增强中国及周边地区的火点遥感监测能力 (张鹏等, 2016)。

4 火点遥感原理和方法研究进展

火点遥感发展至今，从物理方法到经验方法都有很大的完善，图像处理技术和机器学习的方法

也有尝试。

4.1 火点遥感物理基础

热红外波段的地表辐亮度 $B_\lambda(T)$ 取决于地面发射的热红外电磁波强度，与地表热源的物质属性、面积、温度、波长等都有关系，称为热辐射。为了方便理解热辐射规律，人类假设了一种能够吸收全部外来辐射的理想物体—黑体。黑体不透射不反射电磁波，当温度一定时，吸收和发射的电磁波能量相同。这个规律用普朗克公式来表示 (李召良等, 2016)

$$B_\lambda(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right)} \quad (1)$$

式中， C_1 和 C_2 为常数， λ 为波长， T 为开氏温度。式 (1) 是热红外遥感温度反演的物理基础，依据式 (1) 推导出来的维恩位移定律式 (2) 和斯忒藩—玻尔兹曼定律式 (3) 分别为火点遥感的光谱波段选择和表征火点强度的辐射功率计算奠定了基础 (Peterson 等, 2013)。维恩位移定律表征了黑体的辐射强度最强波长 λ_{\max} 和温度之间的反比例关系

$$T\lambda_{\max} = 2897.9 \mu\text{m} \quad (2)$$

例如着火点温度约为 800 K，地表温度约为 250—330 K，火点和地表的 λ_{\max} 分别对应 4 μm 和 10 μm 附近的光谱波段，因此通过这两个波段容易识别火点。斯忒藩—玻尔兹曼定律定义了黑体总辐射出射度 M 与温度的 4 次方成正比

$$M = \sigma T^4 \quad (3)$$

式中， σ 为常数。火点温度是一般地表温度的几倍，从式 (3) 不难看出，辐射出射度可以相差几十倍，因此较小面积的高温火点也可以明显反映在空间分辨率较低的遥感图像中，例如 NOAA 卫星搭载的 AVHRR 空间分辨率为 1.1 km，可以分辨 0.1 hm^2 量级的火点 (舒立福等, 2005; 刘诚等, 2004)。

4.2 火点监测方法研究进展

利用 AVHRR、MODIS 等传感器以红外亮温为物理基础的方法体系发展较为成熟，基本方法没有大的改变 (周梅等, 2006)。当前 MODIS 最新版本 C6 算法基本集成了最新研究成果 (Giglio 等, 2018)，已有文献 (Robinson, 1991; Leblon, 2001;

舒立福等, 2005; 周永宝和韩惠, 2014; 伊坤朋和包玉龙, 2016; 李亚君等, 2017)对火点监测方法进行了综述, 方法类型可以归纳为多波段阈值法、上下文方法和其他方法。

(1) 多波段阈值法。通常来说, 火点识别依据热辐射物理基础, 在多波段遥感数据中根据维恩位移定律选择火点和背景敏感的波段, 在具体执行识别的时候, 还需要一些经验的阈值, 以区分火点和其他地表 (Kaufman等, 1989; Kennedy等, 1994)。设定阈值的关键参量包括特定波段的亮温、反射率、波段间亮温差异、火点指数 (李家国等, 2010)等。阈值法是利用物理基础识别火点的基本方法。因火点强度过大导致某些波段像元饱和, 不利于火点判识, 但也有学者认为发生饱和的波段依然是有用的 (周梅等, 2006)。为了考虑全球或者较大固定范围的业务化火点监测, 阈值往往是根据统计经验得来, 但在某个特定区域, 某个季节或者物候阶段, 这些阈值不一定是最优的 (Justice等, 1996)。因此, 基于某些固定区域, 学者发展了针对地物特性、季节、地区等不同限定范围的阈值组合, 提高火点遥感区域监测精度。

基于亚像元火点分解 (Dozier, 1981; Giglio和Kendall, 2001)方法可以开展火点精细识别。基于物理方法, 亚像元火点辐射功率FRP (Fire Radiative Power)计算的发展也将为高强度小火点识别提供更加精细化的方法 (Peterson等, 2013), 同时提高过火面积的计算精度, 且已经更新到了MODIS最新C6版本火点产品中, 且在后续的VIIRS等火点产品中得到使用 (Giglio等, 2016)。

(2) 上下文方法。多波段阈值法对每个像元利用多光谱数据单独判别是否火点, 没有使用周边像元联合判断。背景窗是一种基于阈值法向空间信息扩展的上下文方法 (Lee和Tag, 1990)。当针对某个像元判识火点时, 以其为中心设定一个方形区域为背景窗, 例如 3×3 , 15×15 , 25×25 等大小, 在窗内的非火点有效像素 (需要排除水体和云)保障一定比例的情况下, 通过与窗内统计的亮温均值等统计量比较来判识该中心像素是否火点, 背景窗的大小根据计算结果是否符合要求而逐渐扩大来增强火点识别精度。背景窗法也可以结合使用阈值法, 只不过阈值的设定不再是始终不变的, 各项阈值成为背景窗内各像素遥感观

测值的变量, 具体计算步骤可以优化为先使用较为宽松的阈值法初选出可能的火点, 然后针对这些初选结果进行背景窗法统计得到新的阈值进行再判断 (Flasse和Ceccato, 1996)最终确定火点。因逐像元的统计计算, 背景窗法的计算量较大, 过大的窗口设置计算量大会损失时间效率, 窗口大小的优选在业务应用算法中很重要。背景窗法根据火点类型的不同, 通过实际火点验证分析, 改善森林低温闷烧 (周小成和汪小钦, 2006)烟羽覆盖等火点的识别。当前背景窗法主要使用空间上下文信息。拓展到时间维度, 使用静止卫星邻近时相的遥感观测数据联合判识也将改进小火点识别的正确率 (李亚君等, 2017)。

(3) 其他方法。颜色空间转换等图像处理方法 (陈本清和徐涵秋, 2001)和机器学习方法 (梁益同等, 2003)在火点遥感中均有尝试。但总体来看, 因为目前基于物理原理的阈值法和背景窗法比较可靠, 图像处理手段和机器学习都有经验模型的属性, 可信度和推广能力受限, 使用范围较小。

(4) 静止卫星监测火点的发展。静止卫星的超高时间分辨率是火点监测能力的一个重要指标, 从着火到灭火全过程通过对FRP时间积分等方法计算燃烧总量方面, 可以评估燃烧产生的排放 (Roberts和Wooster, 2008)。通过高频次观测因云的运动出现的缝隙而发现火点。但静止卫星观测范围广, 早期静止卫星空间分辨率低, 且在一天中太阳天顶角变化较大 (Wooster等, 2005), 学者发展了大量方法尽量发挥静止卫星作用。日本Himawari-8基于可见光波段和红外多波段联合实现500 m空间分辨率监测能力 (Wickramasinghe等, 2016), 使静止卫星火点识别和FRP反演产生重大进展 (Xu等, 2017)。更多高空间分辨率和多波段设置的静止卫星发射, 将改变极轨卫星作为火点遥感主力军的局面。

具体的火点遥感处理过程, 涉及了遥感数据处理的一般过程, 例如辐射校正、几何校正、大气校正、云检测等。但是针对火点遥感, 处理过程应该有所优化, 考虑薄云下的部分火点可以识别, 一般的云识别没有必要。应急状态下, 大气校正也可以省略。考虑到太阳耀光、沙漠边缘、人工长期热异常点等情况的影响, 在火点识别后, 需要根据耀光角计算、土地覆盖类型和人工经验

数据库等信息剔除这些虚假火点或者使用者不关心的热异常点 (Giglio 等, 2003)。

4.3 精度检验方法进展

火点遥感误判误报是很难完全避免, 使用者非常关心误判概率。置信度是对火点热异常程度的量化。置信度的确定和火点判识过程类似, 也需要一系列阈值, 而且可以有不同的计算方法 (周利霞 等, 2008)。置信度是对已经判识为火点的像素, 给出的一个信心程度, 可以通过热红外通道反演的亮温值、波段组合计算值、耀光角、植被指数等与设定阈值的距离给出。不同的用户关注点不同, 可以根据自身需求定义置信度。置信度可以帮助用户在收到火点警报时判断火情, 但彩色合成快视图、火点数量、面积、着火区的环境状况等综合信息也是赶赴火场之前的人工确认依据。

对于火点的检验, 一般是通过高分辨率数据检验低分辨率数据。包括使用高空间分辨率的时间相近的卫星遥感数据检验低空间分辨率的卫星遥感数据 (Padilla 等, 2014, 2015, 2017)、航空遥感数据检验卫星数据、地面基于GPS定位的人工调查检验遥感数据等。国家气象局曾利用人工受控的着火试验精准检验火点遥感的敏感性 (戎志国 等, 2007)。因人工调查受到目视主观因素影响, 现场人工调查与航空无人机遥感结合的手段能够获得对于云覆盖、火点位置、过火面积、闷烧、火势发展过程等详细数据, 但成本较高。较低成本的检验手段, 也可以根据权威新闻媒体报道对火点位置、是否成功识别等基本信息进行验证。一般来说, 遥感判识火点的精度达到了90% (周艺 等, 2007)。

5 在火灾不同阶段的作用和问题分析

随着人们对气候变化等环境问题的认识提高, 同时遥感科学与技术自身发展较快, 提供新技术的能力也在增加, 在自然灾害管理的全过程使用遥感已经变得越来越普遍。对于火点遥感来说, 在火灾发生前、中、后的不同阶段, 都可以发挥重要作用。

(1) 火灾发生前。火灾发生之前, 对于火灾可能发生地带的风险评估 (Hernandez-Leal 等, 2006) 可以指导防灾工作。微波遥感可以提供地

表干燥程度、热红外遥感可以提供地表温度、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。火灾风险评估和预警还需要结合气象数据、历史火点数据等, 从而通过建模, 估算火灾发生的概率, 对高概率地点进行重点防控。在自身的业务范围内, 充分借助于遥感手段, 能够帮助火灾管理和应对相关部门建立对火灾危险的预先掌握。

(2) 火灾发生和救灾过程。遥感近实时的观测, 最快可以在观测到火灾发生的几分钟内给出火点信息, 因此是有效的火灾发生报警手段。在火灾发生后, 调集灾区及周边的灾前遥感影像, 提供地形、周边生态等遥感地图是救灾指挥和实施的重要指导; 安排静止卫星进行定点重复观测甚至调集极轨高空间分辨率的雷达和光学卫星进行数据获取, 可以监控火势、过火面积等, 并对火势做出预测。

当前火点遥感监测的行业和地方应用系统, 有些是政府单位用户自己运营使用的, 或者由商业公司提供运营服务。通常包含数据接收、预处理、数据传输、数据处理和反演、web展示和自动报告等过程。虽然新型遥感卫星不断发射引起了火点遥感用户的关注, 但在快速反应情况下提供获得的图像数据仍然面临技术上和财务上的挑战 (Joyce 等, 2009), 数据本地化处理网络化分发是当前应该鼓励使用的方案。消防人员需要的是及时的答案, 而非数据或者过时的答案, 技术人员必须通过遥感方法改进和工程架构的合理化来绕过复杂的技术曲线, 并提供直观的解译。当然, 用户最好对火点遥感有基本的认识, 对于高置信度结果有足够的信心, 也要做好准备接受遥感因云覆盖等无法监测或者置信度不高的可能性。

在2019年初的火灾事件中, 例如3.29山西沁源火灾, 火灾发生后由人工发现并报警, 但在救灾过程中卫星遥感提供火点数量和位置, 指导救灾工作安排。在3.30四川木里火灾中, 中国和国际卫星遥感相关机构协同获取了灾区的灾前、灾中影像。火点遥感在多次火灾事件中发挥重要作用, 但近几期火灾事件均未见遥感发现火点的报道, 有护林员瞭望发现, 有造成失火的人员报告, 在火点密集的春季, 遥感很难在小火点状态下第一时间发现并确认。从四川木里火灾的静止卫星图像来看, 当时很长一段时间云覆盖较为密集, 也很难

通过卫星遥感观测到。同样是木里, 2005-05-17 发生大规模火灾, 研究者使用 MODIS 数据没有发现火点, 在调整阈值条件之后才监测到 (肖利等, 2008), 所以遥感对火灾的发现能力还有进步的空间。在发火灾生后救灾过程中的火情监控方面, 遥感发挥作用比较好, 也更应该加强利用这方面优势。

(3) 火灾发生完之后。火灾发生前、中、后不同阶段的遥感数据集, 有助于发现火灾产生的原因以便总结规律 (范建容等, 1995); 根据过火面积和火灾前生物量等信息可以量化计算火灾过程向大气排放的碳和其他成分, 分析对气候和环境的影响; 过火区域的生态恢复也需要遥感持续的监测, 估算火灾严重程度、经济损失, 估算灾后植被生长和固碳的总量 (Lentile 等, 2006); 对于大范围和长时间序列的遥感监测的火点数量、火势、损失等统计分析 (Roy 等, 2006), 可以形成火情风险评估的先验知识 (Chuvieco 和 Congalton, 1989), 反馈指导防火工作。

6 结 语

在新型遥感卫星大量发射的形势下, 加之火点遥感技术的不断发展, 当前在无云覆盖的情况下, 火点遥感技术较为成熟。技术发展向着功能拓宽和性能精细化的方向发展。功能拓宽主要有: 给出火点辐射功率等火点定位之外的更多产品; 空间上从陆地火点到给出海洋油气燃烧火点产品 (Giglio 等, 2018); 时间上加强了夜间监测能力, 时间分辨率从小时级发展到秒级 (高分四号)。性能细化的主要方向有: 按照区域给出适应性的阈值调整, 按照火点多发季节细化阈值, 根据植被指数或者地物类型联合判识火点, 细化区分明火、闷烧等不同类型火点。

在火灾监测的各个阶段, 遥感都可以发挥重要作用, 但在火灾发现的环节, 火点遥感仍需要与其他手段一起使用。在火灾应急响应中, 明确数据、系统、人员之间的接口及响应机制, 建立标准化的行业应急预案或者响应流程, 有利于更好地使用火点遥感这个工具。中国国家级和省级相关机构对火点遥感已有较好的应用, 更高标准的技术、流程和使用规范将有助于提高使用水平。

火点遥感是一种高效的监测手段, 多源卫星遥感数据有效联合使用, 有利于满足全球气候研

究和火灾监测等需求。美国、欧洲、加拿大、印度等都有火点遥感系统提供实时或者周期监测结果 (伊坤朋和包玉龙, 2016), 中国幅员辽阔, 森林、草原火灾和秸秆焚烧监测等对很多部门都有需求, 整合国际国内卫星资源, 构建国家级火点遥感平台并通过标准化接口提供快速服务, 有利于节省资源并提高应用效率。

志 谢 感谢 NASA 的火点信息和资源管理系统 FIRMS (Fire Information for Resource Management System) 提供在线数据服务。

参考文献 (References)

- Chen B Q and Xu H Q. 2001. The application of remote sensing in extraction of forest burnt scar information. *Journal of Fuzhou University (Natural Science)*, 29(2): 23-26 (陈本清, 徐涵秋. 2001. 遥感技术在森林火灾信息提取中的应用. *福州大学学报(自然科学版)*, 29(2): 23-26) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-2243.2001.02.007]
- Chen X F, Li Z Q, Zhao S S, Yang L K, Ma Y, Liu L, Li D H, Qie L L and Xing J. 2018. Using the Gaofen-4 geostationary satellite to retrieve aerosols with high spatiotemporal resolution. *Journal of Applied Remote Sensing*, 12(4): 042606 [DOI: 10.1117/1.JRS.12.042606]
- Cheng T T, Han Z W, Zhang R J, Du H H, Jia X, Wang J J and Yao J Y. 2010. Black carbon in a continental semi-arid area of Northeast China and its possible sources of fire emission. *Journal of Geophysical Research*, 115(D23): D23204 [DOI: 10.1029/2009JD013523]
- Chuvieco E and Congalton R G. 1989. Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping. *Remote sensing of Environment*, 29(1): 147-159 [DOI: 10.1016/0034-4257(89)90023-0]
- Dozier J. 1981. A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution. *Remote Sensing of Environment*, 11: 221-229 [DOI: 10.1016/0034-4257(81)90021-3]
- Fan J R, Zhou W C, Gao S Z and Guo J. 1995. The application of remote sensing and fuzzy evaluation in ecological monitoring after forest fire. *Remote Sensing Technology and Application*, 10(4): 42-47 (范建容, 周万村, 高世忠, 郭洁. 1995. 遥感与模糊评判在森林火灾后生态监测评价中的应用. *遥感技术与应用*, 10(4): 42-47) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.1995.4.42]
- Flannigan M D and Haar T H V. 1986. Forest fire monitoring using NOAA satellite AVHRR. *Canadian Journal of Forest Research*, 16(5): 975-982 [DOI: 10.1139/x86-171]
- Flasse S P and Ceccato P. 1996. A contextual algorithm for AVHRR fire detection. *International Journal of Remote Sensing*, 17(2): 419-424 [DOI: 10.1080/01431169608949018]
- Fu Y C, Su Y Z and Zhong X J. 2008. Automatic extraction of information on small cool fires based on MODIS imagery. *Journal of*

- South China Normal University (Natural Science Edition), 40(3): 112-118 (付迎春, 速云中, 钟小君. 2008. 基于MODIS遥感影像的森林火灾火点检测方法. 华南师范大学学报(自然科学版), 40(3): 112-118)
- Ge B Y, Li Z Q, Liu L, Yang L K, Chen X F, Hou W Z, Zhang Y, Li D H, Li L and Qie L L. 2019. A dark target method for himawari-8/AHI aerosol retrieval: application and validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(1): 381-394[DOI: 10.1109/TGRS.2018.2854743]
- General Office of the Ministry of Public Security. 2007. Notice on the adjustment of fire grade standards[EB/OL]. [2007-06-26]. <https://wenku.baidu.com/view/f9cca432b90d6c85ec3ac6e4.html> (公安部办公厅. 2007. 关于调整火灾等级标准的通知[EB/OL].) [2007-06-26]. <https://wenku.baidu.com/view/f9cca432b90d6c85ec3ac6e4.html>
- Giglio L, Boschetti L, Roy D P, Humber M L and Justice C O. 2018. The collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. *Remote Sensing of Environment*, 217: 72-85[DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.005]
- Giglio L, Descloitres J, Justice C O and Kaufman Y J. 2003. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 87(2/3): 273-282[DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00184-6]
- Giglio L and Kendall J D. 2001. Application of the Dozier retrieval to wildfire characterization: a sensitivity analysis. *Remote Sensing of Environment*, 77(1): 34-49[DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00192-4]
- Giglio L, Schroeder W and Justice C O. 2016. The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. *Remote Sensing of Environment*, 178: 31-41[DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.054]
- Greenberg J P, Zimmerman P R, Heidt L and Pollock W. 1984. Hydrocarbon and carbon monoxide emissions from biomass burning in Brazil. *Journal of Geophysical Research*, 89(D1): 1350-1354 [DOI: 10.1029/JD089iD01p01350]
- Hang X, Li Y C, Zhang M M, Xie X P, Ren Y F and Zhang L. 2017. Study on the spatial and temporal distribution of AOD in Jiangsu Province influenced by straw burning based on satellite remote sensing. *Ecology and Environmental Sciences*, 26(1): 111-118 (杭鑫, 李亚春, 张明明, 谢小萍, 任义方, 张岚. 2017. 基于遥感的秸秆焚烧对江苏省气溶胶光学厚度时空分布的影响研究. 生态环境学报, 26(1): 111-118) [DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.01.017]
- He B H, Chen L F, Tao J H, Su L, Wang Z F, Li S S, Han D, Zhang Y and Yu C. 2011. A contextual fire detection algorithm based on observation geometry for HJ-1B-IRS. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 30(2): 104-108, 114 (贺宝华, 陈良富, 陶金花, 苏林, 王子峰, 李莘莘, 韩冬, 张莹, 余超. 2011. 基于观测几何的环境卫星红外相机遥感火点监测算法. 红外与毫米波学报, 30(2): 104-108, 114)
- Hernandez-Leal P A, Arbelo M and Gonzalez-Calvo A. 2006. Fire risk assessment using satellite data. *Advances in Space research*, 37(4): 741-746[DOI: 10.1016/j.asr.2004.12.053]
- Hu M, Qi S H, Shu X B and Chen L F. 2008. Monitoring fire from crop residues burning with MODIS data in north China plain. *Geo-Information Science*, 10(6): 802-807 (胡梅, 齐述华, 舒晓波, 陈良富. 2008. 华北平原秸秆焚烧火点的MODIS影像识别监测. 地球信息科学, 10(6): 802-807) [DOI: 10.3969/j.issn.1560-8999.2008.06.021]
- Hu W D, Ji J J, Liu R T, Wang W Q and Lighthart L P. 2017. Terahertz atmosphere remote sensing. *Chinese Optics*, 10(5): 656-665 (胡伟东, 季金佳, 刘瑞婷, 王雯琦, Lighthart L P. 2017. 太赫兹大气遥感技术. 中国光学, 10(5): 656-665) [DOI: 10.3788/CO.20171005.0656]
- Jiang Y Y, Rocha A V, O'Donnell J A, Drysdale J A, Rastetter E B, Shaver G R and Zhuang Q L. 2015. Contrasting soil thermal responses to fire in Alaskan tundra and boreal forest. *Journal of Geophysical Research*, 120(2): 363-378[DOI: 10.1002/2014JF003180]
- Joyce K E, Belliss S E, Samsonov S V, McNeill S J and Glassey P J. 2009. A review of the status of satellite remote sensing and image processing techniques for mapping natural hazards and disasters. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 33(2): 183-207[DOI: 10.1177/0309133309339563]
- Justice C O, Kendall J D, Dowty P R and Scholes R J. 1996. Satellite remote sensing of fires during the SAFARI campaign using NOAA advanced very high resolution radiometer data. *Journal of Geophysical Research*, 101(D19): 23851-23863[DOI: 10.1029/95JD00623]
- Kaufman Y J, Tucker C J and Fung I Y. 1989. Remote sensing of biomass burning in the tropics. *Advances in Space Research*, 9(7): 265-268[DOI: 10.1016/0273-1177(89)90173-7]
- Kennedy P J, Belward A S and Gregoire J M. 1994. An improved approach to fire monitoring in west Africa using AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 15(11): 2235-2255[DOI: 10.1080/01431169408954240]
- Leblon B. 2001. Forest wildfire hazard monitoring using remote sensing: a review. *Remote Sensing Reviews*, 20(1): 1-43[DOI: 10.1080/02757250109532426]
- Lee T F and Tag P M. 1990. Improved detection of hotspots using the AVHRR 3.7- μm channel. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 71(12): 1722-1730[DOI: 10.1175/1520-0477(1990)071<1722:IDOHUT>2.0.CO;2]
- Lentile L B, Holden Z A, Smith A M S, Falkowski M J, Hudak A T, Morgan P, Lewis S A, Gessler P E and Benson N C. 2006. Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire*, 15(3): 319-345[DOI: 10.1071/WF05097]
- Li J G, Gu X F, Yu T and Wei B. 2010. Detection of Australian southeast forest fire using HJ satellite. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 36(10): 1221-1224 (李家国, 顾行发, 余涛, 魏斌. 2010. 澳大利亚东南部森林山火HJ卫星遥感监测. 北京航空航天大学学报, 36(10): 1221-1224) [DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2010.10.022]
- Li Q, Zhang L J, Wu C Q, Sun Z P and Liu X M. 2009. Satellite-re-

- mote-sensing-based monitoring of straw burning and analysis of its impact on air quality. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 25(1): 32-37 (厉青, 张丽娟, 吴传庆, 孙中平, 刘晓曼. 2009. 基于卫星遥感的秸秆焚烧监测及对空气质量影响分析. *生态与农村环境学报*, 25(1): 32-37) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-4831.2009.01.007]
- Li X Y and Jia J. 2018. How the smallest clairvoyance in meteorological satellite was tempered?—The preparation of the infrared-detector chips of FY-4A multiple channel scanning radiation imager. *Chinese Journal of Nature*, 40(2): 90-101 (李向阳, 贾嘉. 2018. 气象卫星最小的“千里眼”是怎样炼成的?——风云四号A星多通道扫描成像辐射计红外探测器芯片研制回顾. *自然杂志*, 40(2): 90-101) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-9608.2018.02.002]
- Li Y J, Zheng W, Chen J and Liu C. 2017. Fire monitoring and application based on meteorological satellite. *Aerospace Shanghai*, 34(4): 62-72 (李亚君, 郑伟, 陈洁, 刘诚. 2017. 气象卫星遥感火情监测应用. *上海航天*, 34(4): 62-72) [DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2017.04.008]
- Li Z L, Duan S B, Tang B H, Wu H, Ren H Z, Yan G J, Tang R L and Leng P. 2016. Review of methods for land surface temperature derived from thermal infrared remotely sensed data. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 899-920 (李召良, 段四波, 唐伯惠, 吴骅, 任华忠, 阎广建, 唐荣林, 冷佩. 2016. 热红外地表温度遥感反演方法研究进展. *遥感学报*, 20(5): 899-920) [DOI: 10.11834/jrs.20166192]
- Liang Y T, Hu J L, Xie P and Liu L M. 2003. Auto-identifying forest fire-points in meteorological satellite images based on neural network. *Journal of Applied Meteorological Science*, 14(6): 708-714 (梁益同, 胡江林, 谢萍, 刘良明. 2003. 基于神经网络的气象卫星影像森林火点自动识别的试验研究. *应用气象学报*, 14(6): 708-714) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-7313.2003.06.009]
- Liu C, Li Y J, Zhao C H, Yan H and Zhao H M. 2004. The method of evaluating sub-pixel size and temperature of fire spot in AVHRR data. *Journal of Applied Meteorological Science*, 15(3): 273-280 (刘诚, 李亚君, 赵长海, 阎华, 赵洪森. 2004. 气象卫星亚像元火点面积和亮温估算方法. *应用气象学报*, 15(3): 273-280) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-7313.2004.03.003]
- Liu X Z, He B B, Quan X W, Yebra M, Qiu S, Yin C M, Liao Z M and Zhang H G. 2018. Near real-time extracting wildfire spread rate from Himawari-8 satellite data. *Remote Sensing*, 10(10): 1654 [DOI: 10.3390/rs10101654]
- Padilla M, Olofsson P, Stehman S V, Tansey K and Chuvieco E. 2017. Stratification and sample allocation for reference burned area data. *Remote Sensing of Environment*, 203: 240-255 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.041]
- Padilla M, Stehman S V and Chuvieco E. 2014. Validation of the 2008 MODIS-MCD45 global burned area product using stratified random sampling. *Remote Sensing of Environment*, 144: 187-196 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.01.008]
- Padilla M, Stehman S V, Ramo R, Corti D, Hantson S, Oliva P, Alonso-Canas I, Bradley A V, Tansey K, Mota B, Pereira J M and Chuvieco E. 2015. Comparing the accuracies of remote sensing global burned area products using stratified random sampling and estimation. *Remote Sensing of Environment*, 160: 114-121 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.01.005]
- Peng F, Huang S P, Shi Q J, Cheng Y X and Jing Y H. 2014. Satellite thermal infrared remote sensing in geothermal prospecting in volcanic areas: a case study of the Xilingol volcanic field, Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Geology*, 49(3): 899-914 (彭芬, 黄少鹏, 时庆金, 程玉祥, 荆勇河. 2014. 卫星热红外遥感技术在火山区地热探测中的应用——以内蒙古锡林郭勒火山区为例. *地质科学*, 49(3): 899-914) [DOI: 10.3969/j.issn.0563-5020.2014.03.016]
- Peterson D, Wang J, Ichoku C, Hyer E and Ambrosia V. 2013. A sub-pixel-based calculation of fire radiative power from MODIS observations: 1: algorithm development and initial assessment. *Remote Sensing of Environment*, 129: 262-279 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.10.036]
- Qin S G, Ding A J and Wang T. 2006. Transport pattern of biomass burnings air masses in Eurasia and the impacts on China. *China Environmental Science*, 26(6): 641-645 (秦世广, 丁爱军, 王韬. 2006. 欧亚大陆生物质燃烧气团的输送特征及对中国的影响. *中国环境科学*, 26(6): 641-645) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-6923.2006.06.001]
- Qin X L, Zhang Z H and Li Z Y. 2010. An automatic forest fires identification method using HJ-1B IRS data. *Remote Sensing Technology and Application*, 25(5): 700-706 (覃先林, 张子辉, 李增元. 2010. 一种利用HJ-1B红外相机数据自动识别林火的方法. *遥感技术与应用*, 25(5): 700-706) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2010.5.700]
- Roberts G J and Wooster M J. 2008. Fire detection and fire characterization over Africa using Meteosat SEVIRI. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(4): 1200-1218 [DOI: 10.1109/TGRS.2008.915751]
- Robinson J M. 1991. Fire from space: global fire evaluation using infrared remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 12(1): 3-24 [DOI: 10.1080/01431169108929628]
- Rong Z G, Liu C, Sun H, Ma L J, Lu N M, Liu J J, Zhang Y X, Zhong S Q, Zhang Y, Zhang P, Zhang J S, Li Y J, Zhang X Q, Ma R S and Wang J H. 2007. Sensitivity experiment for fire detecting using satellites' data and new detection channel selection for fire remote sensing. *Advances in Earth Science*, 22(8): 866-871 (戎志国, 刘诚, 孙涵, 马轮基, 卢乃锰, 刘京晶, 张玉香, 钟仕全, 张艳, 张鹏, 张甲坤, 李亚君, 张行清, 马瑞升, 王君华. 2007. 卫星火情探测灵敏度试验与火情遥感新探测通道选择. *地球科学进展*, 22(8): 866-871) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-8166.2007.08.013]
- Roy D P, Boschetti L and Trigg S N. 2006. Remote sensing of fire severity: assessing the performance of the normalized burn ratio. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3(1): 112-116 [DOI: 10.1109/LGRS.2005.858485]
- Schroeder W, Oliva P, Giglio L and Csaszar I A. 2014. The New VIIRS 375 m active fire detection data product: algorithm description and initial assessment. *Remote Sensing of Environment*, 143: 85-96 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.12.008]

- Shu L F, Wang M Y, Zhao F J, Li H and Tian X R. 2005. Comparison and application of satellites in forest fire monitoring. *World Forestry Research*, 18(6): 49-53 (舒立福, 王明玉, 赵凤君, 李红, 田晓瑞. 几种卫星系统监测林火技术的比较与应用. *世界林业研究*, 18(6): 49-53) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-4241.2005.06.008]
- Tao M H, Chen L F, Wang Z F, Tao J H and Su L. 2013. Satellite observation of abnormal yellow haze clouds over East China during summer agricultural burning season. *Atmospheric Environment*, 79: 632-640 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.07.033]
- Wickramasinghe C H, Jones S, Reinke K and Wallace L. 2016. Development of a multi-spatial resolution approach to the surveillance of active fire lines using Himawari-8. *Remote Sensing*, 8(11): 932 [DOI: 10.3390/rs8110932]
- Wooster M J, Roberts G, Perry G L W and Kaufman Y J. 2005. 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. *Journal of Geophysical Research*, 110(D24): D24311 [DOI: 10.1029/2005JD006318]
- Xiao L, Tang J F and Ni X H. 2008. A method to identify forest fire on MODIS data. *Surveying and Mapping of Sichuan*, 31(1): 10-13 (肖利, 汤家法, 倪星航. 2008. MODIS数据监测森林火灾方法的研究. *四川测绘*, 31(1): 10-13) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-5019.2008.01.003]
- Xu W D, Wooster M J, Kaneko T, He J P, Zhang T R and Fisher D. 2017. Major advances in geostationary Fire Radiative Power (FRP) retrieval over Asia and Australia stemming from use of Himawari-8 AHI. *Remote Sensing of Environment*, 193: 138-149 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.02.024]
- Yi K P and Bao Y L. 2016. A review on applications and contributions of remote sensing techniques in fire monitoring. *World Forestry Research*, 29(4): 36-41 (伊坤朋, 包玉龙. 2016. 遥感技术在火监测中的应用研究综述. *世界林业研究*, 29(4): 36-41) [DOI: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2016.04.004]
- Yin J Y, Shen D and Li C F. 2013. Application of satellite remote sensing in volcanic ash cloud monitoring. *Seismology and Geology*, 35(2): 347-362 (尹京苑, 沈迪, 李成范. 2013. 卫星遥感技术在火山灰云监测中的应用. *地震地质*, 35(2): 347-362) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2013.02.013]
- Yu C, Chen L F, Li S S, Tao J H and Su L. 2015. Estimating biomass burned areas from multispectral dataset detected by multiple-satellite. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 35(3): 739-745 (余超, 陈良富, 李莘莘, 陶金花, 苏林. 2015. 基于多源卫星多光谱遥感数据的过火面积估算研究. *光谱学与光谱分析*, 35(3): 739-745) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2015)03-0739-07]
- Zhang P, Guo Q, Chen B Y and Feng X. 2016. The Chinese next-generation geostationary meteorological satellite FY-4 compared with the Japanese Himawari-8/9 satellites. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 6(1): 72-75 (张鹏, 郭强, 陈博洋, 冯绚. 2016. 我国风云四号气象卫星与日本Himawari-8/9卫星比较分析. *气象科技进展*, 6(1): 72-75) [DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.010]
- Zhang S, Liu Z H, Tong H J, Ma S Y and Wang C Q. 2019. Emission inventory of crop straw field burning and its temporal and spatial allocation based on remote sensing data. *Research of Environmental Sciences*, 32(4): 627-635 (张思, 刘志红, 佟洪金, 马思源, 王楚钦. 2019. 基于遥感数据的秸秆焚烧源排放清单及时空分布特征. *环境科学研究*, 32(4): 627-635) [DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2019.01.24]
- Zhang Y, Liu T, Li B, Cheng Y Z, Wang L G, Guo Y, Wu X H and He J. 2016. Monitoring of autumn crop straw burning fire points in Henan province based on MODIS data. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 45(11): 149-154 (张彦, 刘婷, 李冰, 程永政, 王来刚, 郭燕, 武喜红, 贺佳. 2016. 基于modis数据的河南省秋季作物秸秆焚烧火点监测研究. *河南农业科学*, 45(11): 149-154) [DOI: 10.15933/j.cnki.1004-3268.2016.11.030]
- Zhou L X, Gao G M, Qiu D S and Huang B H. 2008. Fire-monitoring method of FPI-NDVI based on MODIS data. *Fire Safety Science*, 17(2): 77-82 (周利霞, 高光明, 邱冬生, 黄宝华. 2008. 基于MODIS数据的火点监测指数方法研究. *火灾科学*, 17(2): 77-82) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-5309.2008.02.003]
- Zhou M, Guo G M, Song D M and Wang G S. 2006. A discussion about fire monitoring with MODIS data. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 20(3): 180-183 (周梅, 郭广猛, 宋冬梅, 王广山. 2006. 使用MODIS监测火点的几个问题探讨. *干旱区资源与环境*, 20(3): 180-183) [DOI: 10.3969/j.issn.1003-7578.2006.03.035]
- Zhou X C and Wang X Q. 2006. Validate and improvement on arithmetic of identifying forest fire based on EOS-MODIS data. *Remote Sensing Technology and Application*, 21(3): 206-211 (周小成, 汪小钦. 2006. EOS—MODIS数据林火识别算法的验证和改进. *遥感技术与应用*, 21(3): 206-211) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-0323.2006.03.007]
- Zhou Y, Wang S X, Wang L T, Chen S R and Li H C. 2007. MODIS data-based automatic extraction of information on fire spot. *Journal of Natural Disasters*, 16(1): 88-93 (周艺, 王世新, 王丽涛, 陈世荣, 李浩川. 2007. 基于MODIS数据的火点信息自动提取方法. *自然灾害学报*, 16(1): 88-93) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-4574.2007.01.017]
- Zhou Y B and Han H. 2014. Research overview of forest fire monitoring based on remote sensing data. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 37(3): 134-136 (周永宝, 韩惠. 2014. 基于遥感数据的森林火灾监测研究概述. *测绘与空间地理信息*, 37(3): 134-136) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-5867.2014.03.039]
- Zhu R Z, Cong Y T, Wang H F, Xu Y J and Bai Z G. 2015. Global high-resolution optical satellite overview (1): USA and Canada. *Spacecraft Engineering*, 24(6): 85-106 (朱仁璋, 丛云天, 王鸿芳, 徐宇杰, 白照广. 2015. 全球高分光学卫星概述(一): 美国和加拿大. *航天器工程*, 24(6): 85-106) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-8748.

2015.06.015]

Application and research progress of fire monitoring using satellite remote sensing

CHEN Xingfeng¹, LIU Li², LI Jianguo¹, OU Wenhao³, ZHANG Yuhuan⁴

1. State Environmental Protection Key Laboratory of Satellite Remote Sensing Applications, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. China Centre for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100052, China;

4. Satellite Environmental Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100094, China

Abstract: Satellite remote sensing plays an important role in natural disaster management and response. Fire remote sensing is highly needed with the frequent occurrence of fire disasters. In this study, the demands of fire monitoring from volcanoes, environment, climate, and fire disasters were analyzed, and the needs of industrial users of fire monitoring in China were investigated under different temporal and spatial resolutions. This study aimed to introduce the principles, methods, and applications of fire remote sensing for providing insights into its effective use for remote sensing users and researchers.

This study analyzed the application fields and the needs of different users. Satellite data sources were listed on the basis of sensor spectral characteristics and satellite orbit styles. Physical principles and retrieval methods were classified and introduced followed by their developments. The effects and abilities of fire remote sensing were investigated on the basis of the 2019 spring fire disasters in China.

The satellite data sources used for fire remote sensing monitoring were summarized, and their characteristics were analyzed. Thermal infrared bands, which are sensitive, are important spectral bands. Satellite orbit is an essential factor that affects fire remote sensing ability. The research progress, advantages, and disadvantages of current fire remote sensing methods were reviewed through the analysis of the physical principles and methods of fire remote sensing. The information supporting ability of fire remote sensing was discussed on the basis of three stages, namely, before, during, and after the fire disaster. Fire remote sensing should be combined with ground-based and other methods to detect the occurrence of a fire disaster.

An increasing number of satellites have been launched in the past few years, and fire remote sensing technology has accelerated with many functions and good accuracy. Fire remote sensing contributes in different steps of a fire disaster but cannot detect its occurrence. A national platform of fire remote sensing with multisatellite data and standard service interface should be developed for China.

Key words: fire remote sensing, infrared, disaster, monitoring, forest fire, land surface temperature

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0503902); Major Special Project-the China High-Resolution Earth Observation System (No. 30-Y20A02-9003-17/18); National Natural Science Foundation of China (No. 41501399); Chinese National Scholarship (No. 201804910115)