

引用格式: Wang Ting, Zou Bin, Zou Zhengrong, *et al.* Analysis and Prospect of Remote Sensing Monitoring of Straw Burning[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(2): 279–289. [王婷, 邹滨, 邹峥嵘, 等. 秸秆焚烧遥感监测进展分析与展望[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(2): 279–289.]
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.2.0279

秸秆焚烧遥感监测进展分析与展望

王 婷¹, 邹 滨¹, 邹峥嵘¹, 李沈鑫¹, 郑 忠²

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083;

2. 成都信息工程大学 资源环境学院, 四川 成都 610225)

摘要: 秸秆焚烧是生物质燃烧的重要组成部分, 不仅导致秸秆资源浪费, 而且还会对环境造成严重危害。传统秸秆焚烧监测方法以人工巡查为主, 监测范围受限且人力物力资源耗费大。遥感技术作为新兴的地表信息监测手段, 给秸秆焚烧大范围监测带来了发展契机。介绍了遥感技术在秸秆焚烧火点监测、过火面积估算和焚烧迹地监测 3 个方面的基本原理、监测方法和研究进展, 并分析了遥感技术在秸秆焚烧监测应用中存在的不足。在此基础上, 从多源数据融合互补、监测方法优化集成、监测信息深入挖掘和时空信息决策服务等 4 个方面对秸秆焚烧遥感监测的未来发展进行了展望。

关键词: 秸秆焚烧; 遥感监测; 焚烧火点; 过火面积; 焚烧迹地

中图分类号: P237 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2022)02-0279-11

1 秸秆焚烧遥感监测概述

我国是秸秆产量第一大国, 每年近 20% 的秸秆被露天焚烧^[1-2]。大规模秸秆焚烧会产生大量有毒有害气体(以碳氧化物和氮氧化物为主)以及可吸入颗粒物, 造成空气质量降低、人体健康受损、经济负担加重等问题^[3-6]。国家自 1999 年起发布了《秸秆禁烧和综合利用管理办法》等系列文件, 对秸秆焚烧防控工作进行了统一部署与指导, 也对农作物秸秆焚烧提出了新的监测需求。

秸秆焚烧具有燃烧时间短、分布零散、时间地点随机等特点, 如何对其进行快速有效的监管是政府部门面临的一大难题。当前秸秆焚烧监测已形成人工巡查、视频监控和卫星遥感监测三大主要手段。其中人工巡查和视频监控在小范围内具有快速精确监测的优势, 但因成本高、监控站点稀疏, 在大范围监测中无法发挥有效作用。卫星遥感作为

快速获取地表信息的新兴手段, 具有低成本、高覆盖以及时效性较强等优势, 为大范围秸秆焚烧监测提供了可能^[7]。

秸秆焚烧遥感监测较早可以追溯到 20 世纪 80 年代^[8], 至今已从监测手段、对象、方法与应用等方面形成了成熟的监测体系。如图 1 所示, 可用的遥感监测数据来源包括 MODIS、Landsat、FY-3、GF-1 等系列卫星平台; 监测区域覆盖全球秸秆焚烧重点地区, 特别是美国、印度、中国等农业大国^[9-10]; 监测内容涵盖秸秆焚烧火点监测、过火面积估算和焚烧迹地监测等多方面, 并取得了较好的研究进展和实际应用。

2 秸秆焚烧遥感监测卫星平台

秸秆焚烧遥感监测卫星平台最早可溯源至用于地表热异常监测的 GOES(Geostationary Operational Environmental Satellite)和 NOAA(National

收稿日期: 2021-01-04; 修订日期: 2021-09-16

基金项目: 国家自然科学基金项目“面向城市微环境场景的 PM_{2.5} 浓度空间分布精细模拟”(41871317), 国家自然科学基金项目“耦合多智能体系统与深度学习算法的城市开发边界精细模拟研究”(41871318)。

作者简介: 王 婷(1996—), 女, 湖南益阳人, 硕士研究生, 主要从事农田秸秆焚烧遥感监测研究。E-mail: 1281256528@qq.com

通讯作者: 邹 滨(1981—), 男, 湖南常德人, 教授, 主要从事时空多尺度大气遥感监测与制图研究。E-mail: 210010@csu.edu.cn

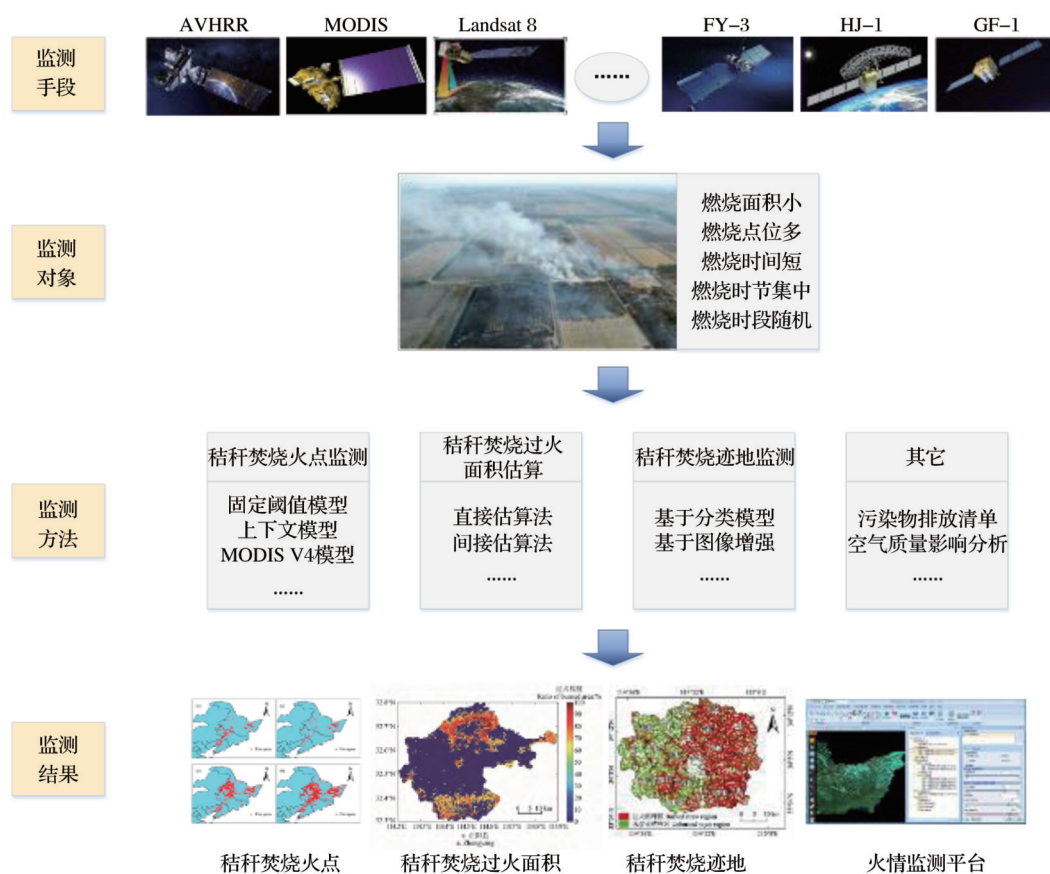
图 1 秸秆焚烧遥感监测^[11,36,50,69]

Fig.1 Remote sensing monitoring of straw burning

Oceanic and Atmospheric Administration Satellite) 卫星,特别是 NOAA 卫星搭载的 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)传感器以 1 d 过境 2 次的时间分辨率和 1.1 km 的空间分辨率优势得到了广泛应用^[12]。随后美国 EOS(Earth Observation System)系列卫星成功发射,其搭载的 MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)包含专门的火情监测波段,并衍生出了相关火情产品,具备秸秆焚烧遥感监测的优势^[13-14]。2008 年 5 月,我国发射 FY-3 气象卫星 A 星(FY-3A),其搭载的 VIRR(Visible and Infrared Radiometer)传感器在时空分辨率上与 MODIS 相同,同样适用于秸秆焚烧监测。同年 9 月我国发射专门用于环境与灾害监测的 HJ-1 卫星将空间分辨率提升至 150 m,有利于识别小规模火情,但存在较严重的条带问题^[15]。美国 S-NPP(the Suomi National Polar-orbiting Partnership)卫星搭载了基于 AVHRR 和 MODIS 发展的新一代传感器 VIIRS(Visible Infrared Imaging Radiometer),在时间分辨率保持不变的前提下,空间分辨率提升至 375 m,并拥有在任意成像角度下

像元大小保持不变的优势^[16]。2013 年美国 Landsat 8 和我国 GF-1 卫星成功发射,弥补了中低分辨率卫星在火烧迹地监测中空间精度较低的问题,其中 Landsat 8 搭载的传感器包含部分红外波段,应用范围更广,但是较长的重返周期不利于在秸秆焚烧关键期进行动态监测。日本的静止卫星 Himawari-8 能够实现 10 min 一次的高频观测,但由于离地面位置较高,火情监测波段的空间分辨率只有 2 km,存在较为明显的火点遗漏问题^[17-18]。2015 年,我国成功发射第一颗静止轨道高分辨率对地观测卫星 GF-4,时空分辨率均有了很大的提升,可以实现近实时的高精度动态监测,在地表火情监测中有广泛的应用前景^[19]。2017 年我国发射风云三号 D 星(FY-3D),其搭载的中分辨率成像光谱仪(MERSI-II)整合了 VIRR 和 MERSI 的功能,整体性能有所提高,其全球火点监测产品与 MOD14 相比增加了亚像元过火面积和火点强度等信息,具有较好的应用前景^[20]。我国相继发射首颗精准农业观测的低轨光学遥感卫星 GF-6,具有高分辨率、宽覆盖、高效成像的特点,与 GF-1 组网运行可以提高对秸秆焚烧火情的

监测频率。表 1 列举了用于秸秆焚烧遥感监测的主要卫星平台。

表 1 秸秆焚烧遥感监测的主要卫星平台

Table 1 The main satellite platform of straw burning remote sensing monitoring

卫星/传感器	波长/ μm	空间分辨率/km	时间分辨率	特点	主要监测场景
GOES/IMAGER	0.52~12.5	1~4	3 h 1 次	时间分辨率高,空间分辨率低;火点监测波段容易饱和。	火点
NOAA/AVHRR	0.58~12.5	1.1	1 d 2 次	广泛可用,方法成熟;火点监测波段容易饱和。	火点
EOS/MODIS	0.4~14	0.25~1	1 d 2 次	专用火点探测波段,算法成熟;容易遗漏低温火点;适合构建所有火烧迹地指数。	火点、火烧迹地
FY-3AB/VIRR	0.58~1.395	1	1 d 2 次	时间分辨率较高;容易遗漏低温火点。	火点
FY-3AB/MERSI	0.41~12.5	0.25~1	1 d 2 次	时间分辨率高,空间分辨率低;适合构建部分植被指数和迹地指数。	火烧迹地
HJ-1/IRS	0.75~12.5	0.15~0.3	4 d 1 次	空间分辨率高,时间分辨率较低;条带问题比较严重。	火点
HJ1-1/CCD	0.43~0.9	0.03	4 d 1 次	适合构建部分植被指数和迹地指数。	火烧迹地
S-NPP/VIIRS	0.412~12.01	0.375~0.75	1 d 2 次	专用火点探测波段,像元大小保持不变;适合构建所有火烧迹地指数。	火点、火烧迹地
Landsat-8/OLI	0.43~1.38	0.03	16 d 1 次	时间分辨率较低,适合构建所有植被指数和迹地指数。	火烧迹地
GF-1/WFV	0.45~0.89	0.016	4 d 1 次	适合构建部分植被指数和迹地指数。	火烧迹地
Sentinel-2/MSI	0.443~2.202	0.01~0.06	10 d 1 次	适合构建所有植被指数和迹地指数。	火烧迹地
Himawari8/AHI	0.4~14	0.5~2	10 min 1 次	时间分辨率高,空间分辨率低。	火点
GF-4/ VNIR	0.45~0.9	0.05	20 s 1 次	幅宽大,时间分辨率高,适合构建部分植被指数和迹地指数	火烧迹地
FY-3D/MERSI-II	0.470~12	0.25~1	1 d 2 次	波段信息丰富,适合构建所有植被指数和迹地指数。	火点、火烧迹地
GF-6/WFV	0.45~0.89	0.016	4 d 1 次	适合构建部分植被指数和迹地指数。	火烧迹地

3 秸秆焚烧火点遥感监测关键进展

3.1 基本原理

物体温度变化引起电磁辐射波长和频率改变是识别热源的关键^[21],秸秆焚烧火点遥感监测的主要依据是焚烧地表在中红外波段的辐射异常。基本原理包括普朗克定律和维恩位移定律等,其主要思想为黑体的辐射出射度与辐射波长成反比,公式如(1)所示。研究表明,常温地表(约 300 K)的辐射峰值在 11 μm 波长范围,燃烧地表(大于 500 K)辐射峰值波长为 3~5 μm ,刚好位于中红外波段范围内^[22](图 2)。而秸秆焚烧的温度为 500~1 000 K^[23],因此可以利用秸秆燃烧地表与常温地表在中红外波段的亮温差异提取火点。

$$M_i(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (1)$$

其中: M_i 是黑体的辐射出射度(W/m^2); λ 是电磁辐射波长(m); T 为黑体温度(K); c 为真空光速; h 为普朗克常数; k 为玻尔兹曼常数。

3.2 监测方法发展

1981 年,Dozier^[25]首次提出利用 AVHRR 数据识别地表热异常的理论模型,为地表火情信息提取奠定了基础。在 Dozier 模型基础上,逐渐发展形成

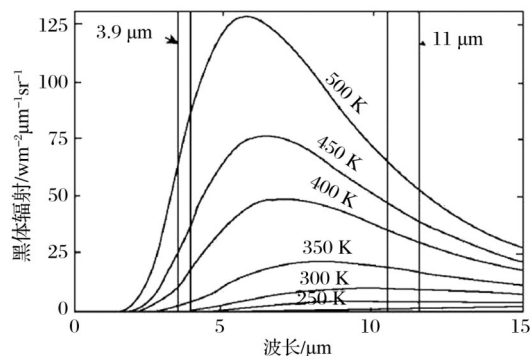


图 2 物体温度变化对辐射峰值波长的影响^[24]

Fig.2 The influence of object temperature change on radiation peak wavelength

了多种火点遥感监测方法,如经典的固定阈值模型、上下文分析法和 MODIS V4 模型。固定阈值模型由 Flannigan 等^[26]提出,该方法通过对中红外波段的亮温设定阈值来判别火点。由于固定阈值模型针对不同地区需要对参数阈值进行多次测试和调整,因此不具备广泛适用性。为解决固定阈值问题, Lee 等^[27]随后提出上下文分析法,提取阈值取决于目标像元周围一定窗口范围内的背景像元辐射值。相比于固定阈值模型,上下文分析法利用背景信息去除干扰因素,算法精度和适用性都有了很大的提升,但由于背景窗口固定不变,在大面积燃烧

的情况下可能会造成明显误差。MODIS V4 模型是 Giglio 等基于 MODIS 建立的火点监测算法^[28],该模型在背景像元分析中将固定窗口改进为自适应窗口,并进一步规范了火点提取流程,是应用最广泛的火点监测方法,目前 MODIS C6 模型集成了最新的研究成果^[29]。此外,还发展了最大类间方差法、归一化火点指数 (Ku)、基于烟羽掩膜等多种监测方法^[30-32]。

3.3 典型应用

围绕秸秆焚烧火点遥感监测的实践需求,Xie 等^[33]利用 MODIS 数据对 2010~2014 年中国夏秋两季的秸秆焚烧情况进行分析,发现中部和东部是主要秸秆焚烧地区,贡献量达到 59%~80%。Shuai 等^[34]利用 MODIS 火点产品对南亚和东南亚的生物质燃烧时空特征进行分析,结果表明南亚地区的生物质燃烧以秸秆焚烧为主,占比为 57.30%,且火点个数在 2001~2018 年间呈逐年上涨趋势。Zhang 等^[35]建立适用于 NPP/VIIRS 秸秆焚烧火点监测的新算法,提高了对小火点探测和虚假火点剔除的能力,并在中国东部地区得到了证实。Song 等^[36]对中国东北地区 2013~2017 年的秸秆焚烧火点时空分布进行分析,并基于此对秸秆焚烧总量进行评估。Zhuang 等^[37]利用 MODIS 火点产品分析中国长时期的秸秆焚烧动态,得到了各地区的秸秆焚烧规律。高玉宏等^[38]利用 FY-3 数据对 2017 年黑龙江省收获期间的秸秆焚烧情况进行监测,大致锁定嫩江流域和三江平原为主要燃烧地区。

3.4 存在问题分析

(1) 火点监测方法尚不完善。目前主流火点监测算法对于不同地区、不同传感器、不同地表覆盖以及不同秸秆焚烧强度都需要进行阈值调整,无法形成统一适用的监测流程。并且在利用后期发射的卫星数据进行火点监测时大多借鉴传统算法,例如 MODIS V4 模型被用做 S-NPP/VIIRS、FY-3/VIRR 等传感器的基准^[39];此外,火点监测算法中通常基于反射光谱特征设定阈值直接掩膜云覆盖区域,不仅影响云像元提取的精度,而且完全忽略云下火点,降低了遥感数据的利用效率和算法精度。

(2) 高时空动态监测难。秸秆焚烧火点遥感监测主流卫星的空间分辨率最高只有百米级。研究表明,MODIS 能探测到的最小完全燃烧火场面积为 50 m²,气象卫星仅 100 m²^[40],显然在秸秆焚烧规模较小、燃烧不充分的情况下,中低分辨率卫星的

火点遗漏问题明显。另外,尽管这些卫星可以在 1 d 内对同一地点重复观测,例如 MODIS 和 FY-3/VIRR 观测频率可达到 4 次,但监测结果仅能代表卫星过境瞬间的秸秆焚烧信息,实时监测能力有限。总的来说,能够满足秸秆焚烧火点高时空分辨率遥感监测的卫星平台还有待发展。

4 秸秆焚烧过火面积遥感估算关键进展

秸秆焚烧过火面积遥感估算针对卫星过境时刻的秸秆燃烧面积展开,是量化秸秆焚烧强度的基础参数,也是衡量秸秆焚烧向大气排放污染物程度的标准。秸秆焚烧过火面积估算大多在火点监测基础上展开,大致分为直接估算和间接估算两种类型。

4.1 基本原理

直接估算法通常根据火点监测结果统计被判别为火点像元的个数,将像元面积与火点像元个数的乘积直接作为秸秆焚烧过火面积估算结果。间接估算法利用混合火点像元中燃烧部分和非燃烧部分的光谱差异进行像元分解,确定燃烧地表所占比例,从而估算像元过火面积。由热力学定律可知,中红外波段 (3.7 μm) 和远红外波段 (11 μm) 对温度变化敏感程度的差异最大^[41],如图 3 所示,即当地表温度升高时,中红外波段的辐射量增长速度远高于远红外波段,因此利用这两个波段的辐射量差异来建立模型可以估算出混合火点像元的过火比例与过火面积,公式如 (2) 所示。

$$\begin{cases} U(P,T) = P \cdot N_{3hi} + (1-P) \cdot N_{3bg} - N_{3f} = 0 \\ V(P,T) = P \cdot N_{4hi} + (1-P) \cdot N_{4bg} - N_{4f} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中: P 是混合火点像元过火面积所占比例; T 代表亮温; N_{3hi} 和 N_{4hi} 分别是中红外和远红外波段在过火区的辐射值; N_{3bg} 和 N_{4bg} 分别是中红外和远红外波段在非过火区的辐射值; N_{3f} 和 N_{4f} 分别是中红外和远红外波段在混合区的辐射值。 U 和 V 分别代表混合火点像元在中红外和远红外波段过火面积比例和亮温的关系函数,即过火部分与非过火部分共同构成混合像元的辐射值。

4.2 估算方法发展

直接估算法在秸秆焚烧火点监测研究的基础上发展而来,由于计算简便、易于理解,在过火面积估算研究初期广泛应用。随着 Dozier^[25]提出亚像元火点面积估算法,逐渐发展形成了过火面积间接估算法。该方法根据地表热源在不同红外波段表现

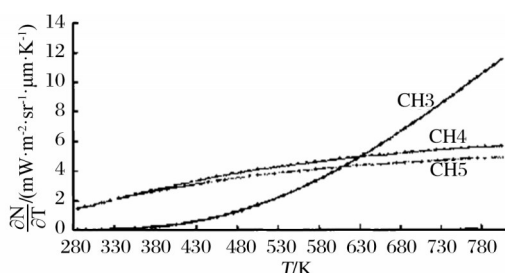


图3 中红外波段(CH3)和远红外波段(CH4,CH5)辐射率随温度的变化^[42]

Fig.3 The emissivity of medium infrared band(CH3) and far infrared band(CH4,CH5) varies with temperature

出的辐射增量存在巨大差异这一特性,识别亚像元即混合像元的实际燃烧面积^[42]。随着像元光谱分解技术的发展,混合像元过火面积估算依据从单一的辐射差异特性扩展到与反射光谱特性等多种光谱信息结合,构建了线性光谱混合模型、非线性光谱混合模型、神经网络分类等方法^[43],其中应用最广泛的是线性光谱混合模型,该模型假设光谱波段的反射率是由组成像元的各类地物反射率与地物占像元面积比例为权重的线性组合^[44]。利用秸秆燃烧区和相邻非燃烧区,以及农用地与相邻非农用地的反射光谱差异构建混合像元模型可以估算出过火面积。

4.3 典型应用

国际上对于秸秆焚烧过火面积遥感估算的研究较少,大多侧重于森林、草原这类火情^[45-46]。国内学者利用MODIS、HJ-1等数据在中国东北和华北等秸秆焚烧严重地区进行了广泛实践。在直接估算方面,齐少群等^[47]利用HJ-1/IRS数据对哈尔滨雾霾期的秸秆焚烧火点进行提取,并根据火点结果直接估算了秸秆焚烧过火面积,助力环保部门监管处理焚烧秸秆行为。李佳等^[48]利用MOD14火点产品对河南省夏季的秸秆焚烧情况进行分析,通过对火点像元在等面积投影影像中的面积进行求和,从而估算出秸秆焚烧过火总面积。在间接估算方面,刘诚等^[42]基于亚像元火点面积估算法,利用AVHRR传感器多个红外波段组合有效获取了混合火点像元的燃烧强度和过火面积。孙秀平等^[49]以FY系列卫星为主建立了卫星遥感火情监测系统,其中使用亚像元火点面积估算法估算火点强度,从而制作火情监测专题图产品。陈洁等^[50]在FY-3/VIRR提取秸秆焚烧火点的基础上,利用高分一号数据识别农用地,并采用混合像元分解技术构建火点与农用地的混合模型估算过火面积,精度达到了

94.35%。

4.4 存在问题分析

(1)直接估算法精度较低。直接估算法可以简单快速地获取过火面积,但估算精度不佳。由于地表温度的微小变化能引起电磁辐射的很大变化,燃烧面积不足像元大小的区域可能会被判别为火点。另外,受到火场边缘热溢出效应的影响,火场边缘的非燃烧地表也可能被误判为火点像元^[21]。因此,秸秆焚烧规模和遥感数据的空间分辨率将对直接估算法的精度造成很大影响。

(2)混合火点像元难以分解。当地表温度升高时,热红外传感器的中红外波段容易达到饱和状态,抑制地表高温的辐射增长反馈,不再适用于混合像元火点面积估算。如AVHRR数据的中红外波段饱和温度只有320 K^[51],在地表燃烧情况下基本处于饱和状态。此外,在地表覆盖空间分布相互交错关联时,中低分辨率的遥感数据像元混合情况尤为突出,此时背景像元的选取会对火点面积估算产生重要影响。通常背景像元的选取会优先考虑与混合火点像元邻近的非火点像元,而这些像元很可能受到混合火点像元的边缘效应影响,表现的亮温远高于实际温度,给估算结果带来误差。

5 秸秆焚烧迹地遥感监测关键进展

5.1 基本原理

秸秆焚烧迹地监测主要是利用地物光谱特征来识别秸秆燃烧后在地表留下的燃烧痕迹,其中最重要的是反射光谱特征。如图4所示,秸秆焚烧区域植被覆盖减少,反射光谱明显降低,其中近红外波段反射率下降幅度最大。由于燃烧后裸露地表含水量低于燃烧前植被叶片含水量,在短波红外波段会出现反射率增加的情况^[52]。另外,尽管秸秆燃烧过程已经结束,但受到地表散射量减少、裸露地

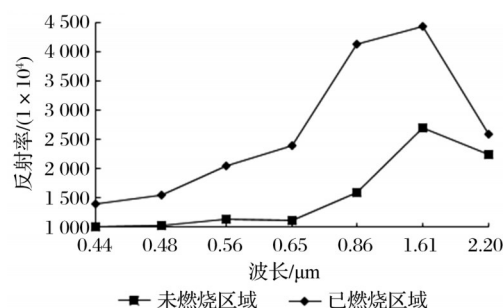


图4 秸秆焚烧和未焚烧区域光谱信息差异^[53]

Fig.4 Difference of spectral information between straw burning and non-burning areas

表增加等因素影响,中红外波段的亮温可能会有一定的升高^[53]。综上所述,依据秸秆焚烧地表在近红外波段和短波红外波段的反射率特征,并结合中红外波段的亮温变化可以实现迹地判别。

5.2 监测方法发展

焚烧迹地监测可以根据传感器特性、迹地范围以及地理环境等因素选择不同的遥感监测方法^[54],主要基于图像增强和图像分类展开。基于图像分类方法依据地物光谱信息的相关性,利用支持向量机、神经网络、决策树等模型将地表覆盖自动划分为焚烧区域和未焚烧区域^[55]。基于图像增强法通过选取对焚烧区域地物信息变化最敏感的特征波段,构建光谱指数或者其他方式突出焚烧区域,是最常用的秸秆焚烧迹地监测方法。常见的光谱指数可分为植被指数、焚烧迹地指数和基于亮温改进的迹地指数。植被指数选用对植被结构和水分变化敏感的光谱特征,代表性指数有归一化植被指数(Normalized Vegetation Index, NDVI)^[56]、土壤调整植被指数(Soil Adjusted Vegetation Index, SAVI)^[57]、全球环境监测指数(Global Environment Monitoring Index, GEMI)^[58]等。焚烧迹地指数选用对灰烬和焦炭物质敏感的光谱特征,包括归一化燃烧率(Normalized Burned Ration, NBR)^[59]、差值归一化火烧指数(differenced Normalized Burn Ration, dNBR)^[52]、燃烧面积指数(Burned Area Index, BAI)^[60]等。基于亮温改进的迹地指数以对植被覆盖、水分含量、焦炭物质敏感的反射波段为基础,结合对温度敏感的红外波段构建指数,包括 MODIS 全球扰动指数(The MODIS Global Disturbance Index, MGDI)^[61]、热—归一化燃烧率(Normalized Burned Ration Thermal, NBRT)^[62]、热—土壤调整植被指数(Soil Adjusted Vegetation Index Thermal, SAVIT)等^[63]。上述光谱指数的详细信息如表 2 所示。

5.3 典型应用

具体应用围绕秸秆焚烧迹地的识别和影响分析展开。Alonso 等^[65]基于 MERIS(Medium Resolution Imaging Spectrometer)数据估算了全球 2006~2008 年的火烧迹地情况,为全球气候变化分析提供依据。Chen 等^[66]利用 MODIS 火点和火烧迹地产品,分析发现中国有 78.6% 的陆地曾受火灾影响,其中秸秆焚烧的强度低于森林和草原火灾。Chuvieco 等^[60]利用 Landsat /TM 和 NOAA /AVHRR 数

据,以西班牙为研究区域验证了 BAI 指数对木炭信息的识别能力,并指出 BAI 指数适用于监测未翻耕前的秸秆焚烧迹地。马建行等^[53]基于 Landsat 8 数据,结合 NBR、NBRT、BAI 指数对松嫩平原的秸秆焚烧迹地进行提取,探讨了多种光谱指数集成在秸秆焚烧迹地监测中的适用性。王凯^[67]利用 GF-1/WFI、HJ-1/CCD 和 FY-3/MERSI 数据提取秸秆焚烧迹地,并以此补充秸秆焚烧火点,在保障精度的前提下实现了较高频率的监测,证实了多源遥感数据集成在秸秆焚烧监测中的可行性。徐婵等^[55]结合地理国情普查成果和 GF-1 数据,利用决策树模型对沈阳市新民区的秸秆焚烧迹地进行识别,结果表明该地区春季秸秆焚烧最为严重,2017 年的秸秆焚烧总面积约 440 km²。

5.4 存在问题分析

(1)监测数据时间分辨率有待提高。现有的多光谱数据最高空间分辨率可达到米级,但卫星重访周期较长,例如 Landsat 8 卫星的重返周期为 16 d, Sentinel-2 的 AB 星互补也只能达到 5 d。另外,受云雨等气象条件的影响,在时间上连续的遥感数据可获取性严重降低。总的来说,遥感数据在时空尺度上的缺失难以有效满足关键时期秸秆焚烧连续动态监测的需求。

(2)缺乏标准化光谱指数阈值。基于图像增强的秸秆焚烧迹地提取精度很大程度上依赖于光谱指数阈值。除了 NDVI、NBR、NBRT 等光谱指数是直接将 0 作为阈值,其余大部分光谱指数都需要自定义阈值,然而阈值的准确性可能会受到主观经验影响。此外,受太阳光照角度、传感器设计等条件制约,不同传感器对秸秆焚烧地表信息的响应特征有差异,即使对于同一区域也需要设定不同阈值。目前秸秆焚烧迹地监测缺乏可迁移使用的光谱指数阈值,构建标准化光谱阈值库或许是将来解决该问题的关键。

6 秸秆焚烧遥感监测研究展望

尽管遥感技术已经在秸秆焚烧监测中取得了较大研究进展,并且也有一些专门的卫星遥感产品能够快速便捷地获取秸秆焚烧信息,如 MOD14、NPP/VIIRS active fire、Globcarbon、MCD45A1 等。然而这些产品仍存在一些不足,如对地表热异常信息的监测未区分秸秆焚烧和其他燃烧现象的差异特征,并且在传感器技术、数据精度以及监测方法

表 2 常见焚烧迹地指数

Table 2 Common burned area index

指数名称	公式	特征
归一化植被指数(NDVI)	$NDVI = (\rho_{NIR} + \rho_{red}) / (\rho_{NIR} - \rho_{red})$	植被覆盖度的最佳指示因子
增强植被指数(EVI)	$EVI = 2.5 \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} - 6\rho_{red} - 7\rho_{blue} + 1}$	消除大气和土壤背景噪音的影响
土壤调整植被指数(SAVI)	$SAVI = (1 + 0.5) \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR1}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR1} + 0.5}$	降低了土壤和植被冠层背景对光谱指数的干扰
修改型土壤调整植被指数(MSAVI)	$MSAVI = \left(2\rho_{NIR} + 1 - \sqrt{(2\rho_{NIR} + 1)^2 - 8(\rho_{NIR} - \rho_{red})} \right) / 2$	将土壤背景的影响降到最低
归一化火烧指数(NBR)	$NBR = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR1}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR1}}$	与林火烈度之间有很高的相关性
全球环境监测指数(GEMI)	$GEMI = \gamma(1 - 0.25\gamma) - \frac{(\rho_{NIR} - 0.125)}{(1 - \rho_{NIR})}$ $\gamma = \frac{2(\rho_{SWIR1}^2 - \rho_{NIR}^2 + 1.5\rho_{SWIR1} + 0.5\rho_{NIR})}{(\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR} + 0.5)}$	具有一定的抗土壤背景值和大气干扰的能力
火迹地指数(GEMI_B)	$GEMI_B = \eta(1 - 0.25\eta) - \frac{(\rho_5 - 0.125)}{(1 - \rho_5)}$ $\eta = \frac{(2(\rho_7^2 - \rho_5^2) + 1.5\rho_7)}{(\rho_7 + \rho_5 + 0.5)}$ 其中 ρ_5 和 ρ_7 分别是 MODIS 第 5、7 波段反射率	增强对植被变化的敏感度,对同种地物的集中度较好
燃烧面积指数(BAI)	$BAI = \frac{1}{(0.1 + \rho_{SWIR1})^2 + (0.06 + \rho_{NIR})^2}$	适合识别过火区的木炭特征
归一化短波红外指数(NDSWIR)	$NDSWIR = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{SWIR2})}{(\rho_{NIR} + \rho_{SWIR2})}$	对裸地及火烧迹地均有很好的分离效果
热—归一化燃烧率(NBRT)	$NBRT = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR2} \times T/1000}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR2} \times T/1000}$	可以提供更多有关火灾燃烧严重程度的信息
MODIS 全球扰动指数(MGDI)	$MGDI = \frac{(L/E)_i}{(L/E)_{mean(i-1)}}$ 其中 L 是每 8 d 合成的 LST 最大值, E 是当年 L 对应的 时间之后 EVI 最大值, i 代表当前的年份	发生火扰动时,地表温度会出现显著的增高
近红外—温度指数(VIT)	$VIT = \frac{\rho_{NIR} - T/1000}{\rho_{NIR} + T/1000}$	加入亮温后对于区分林火迹地具有明显优势
热—土壤调整植被指数(SAVIT)	$SAVIT = (1 + 0.5) \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red} \times T/1000}{\rho_{NIR} + \rho_{red} \times \frac{T}{1000} + 0.5}$	在稀疏植被下对于迹地和非迹地具有更高的区分度 ^[64]

注: ρ_{red} 代表红波段反射率, ρ_{NIR} 代表近红外波段的反射率, ρ_{blue} 代表蓝波段反射率, ρ_{SWIR1} 代表中红外波段反射率, ρ_{SWIR2} 代表短波红外反射率, T 代表亮温

上还存在与秸秆焚烧精细动态信息服务需求不匹配的问题,因此关键技术和监测体系仍需进一步完善和提升。

(1)多源遥感数据融合互补。尽管遥感数据种类多样,在实际秸秆焚烧监测应用中仍以单一遥感数据源为主。然而受到地理要素时空异质性、光谱重叠交叉、传感器技术等影响,单一遥感数据源的精度和时效性不高^[68]。因此,今后应充分利用多源遥感卫星,从数据融合、时空信息挖掘、空间互补等方面展开深入研究,为秸秆焚烧时空动态监测奠定基础。数据融合方面,利用时空融合技术将高时间

分辨率、低空间分辨率的遥感数据和高空间分辨率、低时间分辨率的遥感数据在时间域和空间域上进行匹配,实现对秸秆焚烧这类小火点的全天候实时精准监测。信息挖掘方面,目前秸秆焚烧监测仅利用了电磁辐射、反射光谱等信息,然而遥感数据承载的信息十分丰富,未来可以挖掘地物纹理、几何形态、时空特征等在秸秆焚烧监测中的应用潜力。空间互补方面,云层遮挡一直是秸秆焚烧监测中的难题,在云覆盖导致数据严重缺失的情况下,利用其他无云可用的影像来代替,弥补“数据空洞”,如利用 MODIS、Himawari-8、FY-S-NPP 等数

据互补进行秸秆焚烧火点监测,利用 Landsat、GF、HJ1、Sentinel 等数据互补进行秸秆焚烧迹地监测。

(2)监测方法优化集成。各类卫星搭载的传感器在波段、波长、倾角等方面都具有各自的特点,因此对地表燃烧现象的响应机理存在差异,另外不同地物燃烧类型所表现的信息也不一致,因此在将某一卫星平台的火情监测算法应用到其他传感器或秸秆焚烧监测时不一定适用。未来可考虑全面对比不同地表燃烧现象的特性,分析各类传感器的响应方式并建立对应关系,引入机器学习等先进方法代替传统的经验阈值判别,构建秸秆焚烧集成监测算法。此外,虽然秸秆焚烧火点监测和焚烧迹地监测建立了不同的方法体系,但两者之间的协作监测效应尚未深入挖掘。未来可以通过建模构建其关联,利用秸秆焚烧火点补充焚烧迹地的时效特征,以及利用焚烧迹地补充焚烧火点的面积特征,达到优势互补的效果。

(3)监测信息挖掘分析。目前,国内外学者主要围绕获取秸秆焚烧信息和估算秸秆焚烧严重程度展开研究,未来可考虑向秸秆焚烧过程动态监测、影响评估等方向扩展。动态监测方面,通过长时序监测,总结秸秆焚烧规律特征,确定秸秆焚烧潜在风险区域,为有关部门针对重点地区和特殊时段制定防控方案提供依据。影响评估方面,利用火点空间位置、过火面积大小以及迹地范围等监测信息估算秸秆焚烧对大气污染的影响,例如将监测信息加入到大气污染模型中作为生物质燃烧的动态输入清单,为区域性大气污染的精细溯源提供一定依据;通过对秸秆焚烧现象的物理和化学机制进行模拟,分析不同秸秆焚烧程度对土壤结构、含水量的影响,为评估秸秆焚烧对土壤造成的危害提供理论支撑。

(4)时空信息决策服务。对于森林和草原火灾遥感监测研究,各国家和部分地区已初步尝试应用服务^[69-70]。针对秸秆焚烧这类火情,虽然环保部门已经利用 MODIS 和 FY-3/VIRR 数据定期发布秸秆焚烧火点监测日报,但是分析应用服务尚不完善。秸秆焚烧在燃烧时间、燃烧范围以及严重程度均不及森林草原火灾,但是其频繁发生、行为违法、污染严重以及可能引发更大火灾等问题值得引起重视。未来可结合大数据云计算、人工智能、机器学习等技术手段,统筹遥感、气象、地理、统计等多源数据,建立秸秆焚烧监测及决策信息服务系

统,实现秸秆焚烧监测数据与成果共享,为提升秸秆禁烧监管业务能力提供技术支持,同时也为秸秆焚烧事件应急响应、影响评估和预警预报工作提供决策服务。

总之,相比于传统的秸秆焚烧监测方法,遥感技术有着明显的优势。根据中国航天发射计划(2017~2023年),未来还会发射多颗风云气象卫星组成卫星观测网,美国、欧盟以及俄罗斯等国家也将继续组建 Landsat、Sentinel、Kanopus 等对地观测卫星系统。随着这些新卫星研制工作的推进,以及多源数据融合协同、监测方法优化集成、时空信息挖掘等技术的发展,实现秸秆焚烧精细化实时监测和决策服务,遥感技术将在秸秆焚烧监管防控工作中发挥更大的作用。

参考文献(References):

- [1] Zhang Jingyuan, Yang Xuhong, Tu Xinmeng, *et al.* Spatio-temporal change of straw burning Fire Points in field of China from 2014 to 2018[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2019, 35(19):191-199.[张景源, 杨绪红, 涂心萌, 等. 2014~2018年中国田间秸秆焚烧火点的时空变化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19):191-199.]
- [2] Peng Liquan, Zhang Qiang, He Kebin. Emission inventory of atmospheric pollutants from open burning of crop residues in China based on a National Questionnaire[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(8): 1109-1118.[彭立群, 张强, 贺克斌. 基于调查的中国秸秆露天焚烧污染物排放清单[J]. 环境科学研究, 2016, 29(8): 1109-1118.]
- [3] Mehmood K, Chang S C, Yu S C, *et al.* Spatial and temporal distributions of air pollutant emissions from open crop straw and biomass burnings in China from 2002 to 2016[J]. Environmental Chemistry Letters, 2018, 16(1):301-309.
- [4] Radhika S. Agricultural straw burning and its impact on the environment[J]. International Journal of Environment Research, 2021, 3(7):1112.DOI:10.3390/ijerph18031112.
- [5] He G J, Liu T, Zhou M G. Straw burning, PM_{2.5}, and death: Evidence from China[J]. Journal of Development Economics, 2020, 145:102468. DOI:10.1016/j.jdeveco.2020.10468.
- [6] Shi Y S, Tian P, Jin Z F, *et al.* Stable nitrogen isotope composition of NO_x of biomass burning in China[J]. Science of the Total Environment, 2022, 803. DOI: 10.1016/j.jscitotenv.2021.149857.
- [7] Xu Benben, Fan Meng, Chen Liangfu, *et al.* Analysis of temporal and spatial variations of crop residue burning in China from 2013 to 2017[J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(10):1221-1232.[徐奔奔, 范萌, 陈良富, 等. 2013年-2017年主要农业区秸秆焚烧时空特征及影响因素分析[J]. 遥感学报, 2020, 24(10):1221-1232.]
- [8] Muirhead K, Cracknell A P. Straw Burning over Great Britain detected by AVHRR [J]. International Journal of Remote Sensing, 1985, 6(5):827-833.

- [9] Twohy C H, Toohey D W, Levin E T, *et al.* Biomass burning smoke and its influence on clouds over the Western U. S. [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48 (15). DOI: 10.1029/2021GL094224.
- [10] Verma S, Dar J A, Malasiya D, *et al.* A MODIS-based spatiotemporal assessment of agricultural residue burning in Madhya Pradesh, India [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 105: 496-504.
- [11] Wu Xihong, Liu Ting, Cheng Yongzheng, *et al.* Dynamic monitoring of straw burned area using multi-source satellite remote sensing data[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(8): 153-159.[武喜红, 刘婷, 程永政, 等. 多源卫星遥感秸秆焚烧过火面积动态监测[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(8): 153-159.]
- [12] Pu R, 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. DOI: 10.1016/j.rse.2006.02.027.
- [13] Wang Zifeng, Chen Liangfu, Gu Xingfa. Monitoring of crop residue burning in North China on the basis of MODIS data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2008, 22(6): 2-3, 14-20.[王子峰, 陈良富, 顾行发. 基于MODIS数据的华北地区秸秆焚烧监测[J]. *遥感技术与应用*, 2008, 22(6): 2-3, 14-20.]
- [14] Li J, Bo Y, Xie S D. Estimating emissions from crop residue open burning in China based on statistics and MODIS fire products [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 44: 158-170.
- [15] Qin Xianlin, Zhang Zihui, Li Zengyuan. An automatic forest fires identification method using HJ-1B data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(5): 700-706.[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.]
- [16] Schroeder W, Oliva P, Giglio L, *et al.* The new VIIRS 375 m active fire detection data product: Algorithm description and Initial assessment[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 143: 85-96. DOI: 10.1016/j.rse.2013.12.008.
- [17] Hua L Z, Shao G F. The progress of operational forest fire monitoring with infrared remote sensing[J]. *Journal of Forestry Research*, 2017, 28(2): 215-229.
- [18] Bryan H, Luke W, Karin R, *et al.* Estimating fire background temperature at a geostationary scale: An evaluation of contextual methods for AHI-8[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(9): 1368. DOI: 10.3390/rs10091368.
- [19] Chen Xingfeng, Liu Li, Li Jiaguo, *et al.* Application and research progress of fire monitoring using satellite remote sensing [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(5): 531-542. [陈兴峰, 刘李, 李家国, 等. 卫星遥感火点监测应用和研究进展[J]. *遥感学报*, 2020, 24(5): 531-542.]
- [20] Zheng Wei, Chen Jie, Yan Hua, *et al.* Global fire monitoring products of FY-3D/MERSI-II and their applications[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(5): 521-530.[郑伟, 陈洁, 闫华, 等. FY-3D/MERSI-II全球火点监测产品及其应用[J]. *遥感学报*, 2020, 24(5): 521-530.]
- [21] Justice C O, Giglio L, Korontzi S, *et al.* The MODIS fire products [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1-2): 244-262. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00076-7.
- [22] Liu Yujie, Yang Zhongdong. Principle and algorithm of MODIS remote sensing information processing.[M]. Beijing: Science Press, 2001.[刘玉洁, 杨忠东. MODIS遥感信息处理原理与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2001.]
- [23] Wei Yingce, Sang Huiyong, Zang Tao, *et al.* Realization of straw incineration fire point identification in Hebei province by improved MODIS fire point detection algorithm [J]. *GNSS World of China*, 2019, 44(1): 125-130.[魏英策, 桑会勇, 张涛, 等. 利用改进型MODIS火点探测算法实现河北省秸秆焚烧火点识别[J]. *全球定位系统*, 2019, 44(1): 125-130.]
- [24] Zheng Wei, Wang Meng, Chen Jie, *et al.* Application of Himawari-8 satellite data in environmental monitoring: A case study of cyanobacteria bloom and straw incineration monitoring [C]// *Proceedings of the 2016 Annual Conference of Chinese Society for Environmental Sciences (Vol. 2)*, 2016: 307-313. [[郑伟, 王萌, 陈洁, 等. Himawari-8卫星资料在环境监测中的应用: 以蓝藻水华和秸秆焚烧监测为例[C]// 2016中国环境科学学会学术年会论文集(第二卷), 2016: 307-313.]]
- [25] Dozier J. A Method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1981, 11 (none): 221-229. DOI: 10.1016/0034-4257(81)90021-3.
- [26] Flannigan M D, Haar T H V. Forest fire monitoring using NOAA satellite AVHRR [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1986, 16(5): 975-982.
- [27] Lee T F, Tag P M. Improved detection of hotspots using the AVHRR 3.7 μm Channel [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010, 71(12): 1722-1730.
- [28] 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. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00184-6.
- [29] Louis G, Luigi B, Roy D P, *et al.* The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 217: 72-85. DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.005.
- [30] Xiao Xia, Song Weiguo, Wang Yan, *et al.* An improved method for forest fire spot detection based on Variance Between-Class [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(8): 2065-2068.[肖霞, 宋卫国, 王彦, 等. 基于类间方差的MODIS森林火灾火点检测方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(8): 2065-2068.]
- [31] Lia Jiaguo, Gu Xingfa, Yu Tao. Detection of Australian southeast forest fire using HJ satellite [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010, 36(10): 1221-1224.[李家国, 顾行发, 余涛. 澳大利亚东南部森林火灾HJ卫星遥感监测[J]. *北京航空航天大学学报*, 2010, 36(10): 1221-1224.]
- [32] Wang W T, Qu J J, Hao X J, *et al.* An improved algorithm for small and cool fire detection using MODIS data: A preliminary study in the southeastern United States [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 108(2): 163-170. DOI: 10.1016/j.rse.2006.11.009.
- [33] Xie H, Du L, Liu S C, *et al.* Dynamic monitoring of agricultural fires in China from 2010 to 2014 using MODIS and Globaland30 data [J]. *International Journal of Geo-Information*, 2016, 5(10): 172. DOI: 10.3390/ijgis100172.
- [34] Yin S. Biomass burning spatiotemporal variations over South

- and Southeast Asia [J]. *Environment International*, 2020, 145. DOI: 10.1016/j.envint.2020.106153.
- [35] Zhang T R, Wooster M J, Xu W D. Approaches for synergistically exploiting VIIRS I- and M-Band data in regional active fire detection and FRP assessment: A demonstration with respect to agricultural residue burning in Eastern China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 198: 407-424. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.028.
- [36] Cui S, Song Z H, Zhang L M, *et al.* Spatial and temporal variations of open straw burning based on fire spots in Northeast China from 2013 to 2017 [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, 244: 117962. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.117962.
- [37] Zhuang Y, Li R Y, Yang H, *et al.* Understanding temporal and spatial distribution of crop residue burning in China from 2003 to 2017 using MODIS data [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(3): 390. DOI: 10.3390/rs10030390.
- [38] Gao Yuhong, Cheng Yuan, Wang Wenling, *et al.* Study on spatial and temporal distribution of straw burning in Heilongjiang Province based on VIRR data [C] // The 35th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society S21 Satellite Meteorological and Ecological Remote Sensing, 2018: 49-53. [高玉宏, 程远, 王文玲, 等. 基于VIRR数据的黑龙江省秸秆焚烧时空分布研究 [C] // 第35届中国气象学会年会 S21 卫星气象与生态遥感, 2018: 49-53.]
- [39] Csizsar I, Schroeder W, Giglio L, *et al.* Active fires from the Suomi NPP visible infrared imaging radiometer suite: Product status and first evaluation results [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2014, 119(2): 803-816.
- [40] He Liming, Wang Wenjie, Wang Qiao, *et al.* Evaluation of the agricultural residues burning reduction in China [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2007, 23(1): 42-50. [何立明, 王文杰, 王桥, 等. 中国秸秆焚烧的遥感监测与分析 [J]. 中国环境监测, 2007, 23(1): 42-50.]
- [41] Tian Guoliang. Thermal Infrared Remote Sensing [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2006. [田国良. 热红外遥感 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.]
- [42] Liu Cheng, Li Yajun, Zhao Changhai, *et al.* The method of evaluating sub-pixel size and temperature of fire SPOT in AVHRR data [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2004, 15(3): 273-280. [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, 15(3): 273-280.]
- [43] Lai Peiyu, Chen Haoning, Huang Chang. Study on the suitability of dimidiate pixel model in surface water detection of MODIS at sub-pixel level [J]. *Journal of Geomatics*, 2019, 44(6): 56-59. [赖佩玉, 陈浩宁, 黄昌. 像元二分模型在MODIS水陆混合像元分解中的适用性研究 [J]. 测绘地理信息, 2019, 44(6): 56-59.]
- [44] Wang Yuqian. Hyperspectral imagery sparse unmixing based on spatial and spectral analysis [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(8): 1072. [王毓乾. 基于空间—光谱分析的高光谱遥感影像稀疏解混研究 [J]. 测绘学报, 2017, 46(8): 1072.]
- [45] Long T F, Zhang Z M, He G J, *et al.* 30 m resolution global annual burned area mapping based on Landsat images and Google Earth Engine [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(5). DOI: 10.3390/rs11050489.
- [46] Hally B, Wallace L, Reinke K, *et al.* Assessment of the utility of the advanced himawari imager to detect active fire over australia [J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, XLI-B8. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B8-65-2016.
- [47] Qi Shaoqun, Zhang Feifei, Wan Luhe, *et al.* Study on identification and extraction of straw burning area in autumn haze period in Harbin [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2016(4): 152-158. [齐少群, 张菲菲, 万鲁河, 等. 哈尔滨秋季雾霾期秸秆焚烧区域识别提取研究 [J]. 自然灾害学报, 2016(4): 152-158.]
- [48] Li Jia, Li Shuting, Duan Ping, *et al.* Remote sensing monitoring and analysis of straw burning in Henan Province based on MODIS [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2018, 27(1): 42-46, 51. [李佳, 李舒婷, 段平, 等. 基于MODIS的河南省秸秆焚烧遥感监测与分析 [J]. 测绘工程, 2018, 27(1): 42-46, 51.]
- [49] Sun Xiuping, Sun Xiaomin, Xu Chongbin. Satellite remote sensing fire monitoring service application platform [J]. *Dual Use Technologies & Products*, 2020(1): 16-23. [孙秀平, 孙晓敏, 徐崇斌. 卫星遥感火情综合监测服务应用平台 [J]. 军民两用技术与产品, 2020(1): 16-23.]
- [50] Chen Jie, Zheng Wei, Gao Hao, *et al.* Estimation method of straw burned area based on multi-source satellite remote sensing [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(3): 207-214. [陈洁, 郑伟, 高浩, 等. 多源卫星遥感农作物秸秆焚烧过火区面积估算方法 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 207-214.]
- [51] Zhan Jianfeng. The research on forest fire spot and burn scar extraction algorithms using HJ-IRS image [D]. Changsha: Central South University, 2012. [詹剑锋. 利用HJ-IRS影像提取林火火点和火烧迹地算法研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2012.]
- [52] Epting J, Verbyla D, Sorbel B. Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+ [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 96(3-4): 328-339. DOI: 10.1016/j.rse.2005.03.002.
- [53] Ma Jianhang, Song Kaishan, Wen Zhidan, *et al.* Quantification of crop residue burned areas based on burning indices using Landsat 8 image [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(11): 3451-3456. [马建行, 宋开山, 温志丹, 等. 基于Landsat 8影像的不同燃烧指数在农田秸秆焚烧区域识别中的应用 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(11): 3451-3456.]
- [54] Shan Tianchan. Research on extraction of burned area based on image enhancement [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS), 2018. [单天婵. 基于图像增强的过火区提取研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2018.]
- [55] Xu Chan, Xu Shanshan. Key technology research of applying the geographical national Census results and Chinese-built satellite images to straw burning monitoring [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2019, 42(10): 76-79. [徐婵, 刘珊珊. 地理国情普查成果与国产卫星影像应用于秸秆焚烧监测的关键技术研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(10): 76-79.]
- [56] Fraser R H, Fernandes R, Latifovic R. Multi-temporal burned area mapping using logistic regression analysis and Change metrics [C] // IEEE International Geoscience & Re-

- remote Sensing Symposium. IEEE, 2002.
- [57] Vita A, Lanorte A. Mapping burned area for fragmented Landscape using satellite aster data[C]// EGU General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2009.
- [58] Wei Y, Zhang S W, Tang J M, *et al.* A MODIS time series data based algorithm for mapping forest fire burned area[J]. Chinese Geographical Science, 2013, 23(3): 344-352.
- [59] Lopez Garcia M J, Caselles V. Mapping burns and natural reforestation using thematic mapper data[J]. Geocarto International, 1991, 6(1): 31-37.
- [60] Chuvieco E, Martin M P, Palacios A. Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(23): 5103-5110.
- [61] Mildrexler D J, Zhao M S, Running S W. Testing a MODIS global disturbance index across North America[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(10). DOI: 10.1016/j.rse.2009.05.016.
- [62] Holden Z A, Smith A M S, Morgan P, *et al.* Evaluation of novel thermally enhanced spectral indices for mapping fire perimeters and comparisons with fire atlas data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(21): 4801-4808.
- [63] Smith A M S, Drake N A, Wooster M J, *et al.* Production of Landsat ETM+ reference imagery of burned areas within Southern African Savannas: Comparison of methods and application to MODIS[J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(11-12): 2753-2775.
- [64] Wu Liye, Shen Runping, Li Xinhui, *et al.* Evaluating different remote sensing indexes for forest burn scars extraction[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29(4): 567-574.[吴立叶, 沈润平, 李鑫慧, 等. 不同遥感指数提取林火迹地研究[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(4): 567-574.]
- [65] Alonso-Canas I, Chuvieco E. Global burned area mapping from ENVISAT-MERIS and MODIS active fire data[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 163. DOI: 10.1016/j.rse.2015.03.011.
- [66] Chen D M, Pereira J M C, Masiero A, *et al.* Mapping fire regimes in China using MODIS active fire and burned area data[J]. Applied Geography, 2017, 85: 14-26.
- [67] Wang Kai. Straw Burning monitoring based on GF-1, HJ-1 and FY-3 satellite data[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2018.[王凯. 基于GF-1、HJ-1和FY-3数据集成的秸秆焚烧监测方法[D]. 兰州: 西北师范大学, 2018.]
- [68] Song Qian, Zhou Qingbo, Wu Wenbin, *et al.* Recent progresses in research of integrating multi-source remote sensing data for crop mapping[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(6): 1122-1135.[宋茜, 周清波, 吴文斌, 等. 农作物遥感识别中的多源数据融合研究进展[J]. 中国农业科学, 2015, 48(6): 1122-1135.]
- [69] Dong Xiaorui. Forest fire monitoring system based on FY-3 remote sensing image[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.[董晓锐. 基于FY3遥感影像的森林火灾监测系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.]
- [70] Zeng Chao, Zeng Zhen, Cao Zhenyu, *et al.* Forest fire dynamic monitoring based on time series and multi-source satellite images: A case study of the muli county forest areas in Sichuan Province[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(3): 521-532.[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.]

Analysis and Prospect of Remote Sensing Monitoring of Straw Burning

Wang Ting¹, Zou Bin¹, Zou Zhengrong¹, Li Shenxin¹, Zheng Zhong²

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: Straw burning is an important part of biomass combustion, which not only leads to waste of straw resources, but also causes serious harm to the environment. The traditional monitoring methods of straw burning are mainly manual inspections, with limited monitoring scope and high consumption of human and material resources. Remote sensing technology, as a new means of surface information monitoring, has brought development opportunities for large-scale monitoring of straw burning. This paper introduces the basic principles, monitoring methods and research progress of remote sensing technology in straw burning fire point monitoring, burning area estimation and burned area monitoring, and analyzes the deficiency of remote sensing technology in the application of monitoring straw incineration. On this basis, the future development of remote sensing monitoring of straw burning is prospected from four aspects: multi-source data fusion and complementation, optimization and integration of monitoring methods, in-depth mining of monitoring information and decision-making service of spatiotemporal information.

Key words: Straw burning; Remote sensing monitoring; Fire point; Burning area; Burned area