

秦岭多源卫星森林火情监测预警系统设计及应用

金丽娜¹, 张高健¹, 周辉², 杨阳¹

¹西安市生态与农业气象中心, 陕西 西安

²陕西省农业遥感与经济作物气象服务中心, 陕西 西安

收稿日期: 2023年9月3日; 录用日期: 2023年10月7日; 发布日期: 2023年10月19日

摘要

利用多源卫星数据, 基于多光谱遥感、AI识别、深度学习等技术, 研究本地化动态火点识别阈值调整技术、火险因子评估模型、气象火险指数、过火区判识等方法, 构建基于多源卫星影像的智能火点识别算法, 开展秦岭火情网格化、全天时、全覆盖的精细化监测、预警、预报, 研发秦岭多源卫星森林火情监测预警系统, 实现火点监测、预警及评估等功能。系统智能化程度高, 业务操作简捷, 多角色用户, 安全性较高。在西安市、秦岭西安段、秦岭区域的森林防火工作中业务化应用, 实现了对疑似火点的快速定位、连续监测, 与相关部门建立及时反馈机制, 确认火点真实性, 为制定合理林火扑救方案, 提供了更加准确的信息支撑; 基于高分卫星的灾后评估为开展灾后修复提供了有效的卫星监测依据; 本地化的森林火险气象等级预报, 守好气象防灾减灾第一道防线。系统为实现“打早、打小、打了”提供技术支持, 为提高秦岭防火能力发挥积极作用。

关键词

多源卫星, 森林火情, 监测预警

Design and Application of Qinling Multi-Source Satellite Forest Fire Monitoring and Early Warning System

Lina Jin¹, Gaojian Zhang¹, Hui Zhou², Yang Yang¹

¹Xi'an Ecological and Agricultural Meteorological Center, Xi'an Shaanxi

²Shaanxi Agricultural Remote Sensing and Cash Crop Meteorological Service Center, Xi'an Shaanxi

Received: Sep. 3rd, 2023; accepted: Oct. 7th, 2023; published: Oct. 19th, 2023

文章引用: 金丽娜, 张高健, 周辉, 杨阳. 秦岭多源卫星森林火情监测预警系统设计及应用[J]. 林业世界, 2023, 12(4): 248-258. DOI: 10.12677/wjf.2023.124031

Abstract

Using multi-source satellite data, based on multi-spectral remote sensing, AI recognition, in-depth learning and other technologies, research the dynamic fire point recognition threshold adjustment technology, fire risk factor evaluation model, meteorological fire risk index, fire zone identification on localized, build an intelligent fire point recognition algorithm based on multi-source satellite images, carry out fine-grained monitoring, early warning, and prediction of Qinling fire situation in a grid, all day and all coverage manner, researched and developed the Qinling multi-source satellite forest fire monitoring and early warning system, implement functions such as fire point monitoring, early warning, and valuation. The system has a high degree of intelligence, simple business operations, multiple role users, and high security. The business application in forest fire prevention work in Xi'an City, the Xi'an section of the Qinling Mountains, and the Qinling region has achieved rapid positioning and continuous monitoring of suspected fire points, established a timely feedback mechanism with relevant departments, confirmed the authenticity of fire points, and provided more accurate information support for formulating reasonable forest fire extinguishing plans; the post disaster assessment based on high-resolution satellites provides an effective satellite monitoring basis for carrying out post disaster restoration; localized forest fire risk meteorological level forecasting, and maintaining the first line of defense for meteorological disaster prevention and reduction. The system provides technical support for achieving "early strike, small strike, and late strike", and plays a positive role in improving the fire prevention capacity of Qinling Mountains.

Keywords

Multi-Source Satellite, Forest Fire, Monitoring and Early Warning

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

森林火灾是破坏森林资源的重要灾害之一，一旦发生，较难控制，突发性强、影响范围广、损失巨大，将严重危害人民生命财产安全；同时森林火灾也是陆地生态系统碳循环的重要影响因子[1]。可多途径、多手段开展森林火灾监测，如卫星遥感监测、高清摄像头、无人机巡航、人工巡查等等。其中，卫星遥感监测森林火点，成像周期快，空间、时间分辨率较高、覆盖范围广，可实时跟踪监测火点具体位置以及估算燃烧速度和过火面积，因此充分利用遥感技术监测火点是火情快速监测预警中不可或缺的重要手段，可为扑救指挥提供可靠的数据保障和技术支撑。

自 20 世纪 80 年代中期以来，多源卫星遥感技术为森林防火提供了大量的监测信息，在防火工作中发挥了重要作用[2] [3] [4] [5]。近年来，气象卫星观测范围宽广，监测频次密且探测信息丰富，已成为监测森林火灾的重要手段之一[6] [7]。随着新一代静止气象卫星的发射，高频次、高时效的静止气象卫星，结合极轨卫星、高分卫星，形成了多源卫星遥感监测天基网络，成为火情监测的必然趋势[8] [9]。

秦岭多源卫星森林火情监测预警系统，利用多源卫星数据，通过对秦岭区域大范围、高频次、低成本、全天候的精准监测，实现火点监测、火点预警及评估等功能，具有较高的时效性、科学性和准确性。

2. 卫星数据选取

2.1. 极轨卫星

系统选用 FY-3C、FY-3D、FY-3E、NPP、NOAA-20、NOAA-19、NOAA-18、MODIS/TERRA、MODIS/AQUA、METOP-B 10 颗极轨卫星数据,空间分辨率从 250 m 到 1000 m。FY3 系列卫星可精细化和准确反映火情空间分布,在林火监测方面具有实际应用价值[10]。FY-3C 的 VIRR 传感器具有常规林火监测通道,包括位于 800K 目标物辐射峰值区的专为探测高温火点而设置的 4 μm 通道,以及位于地物常温(约 300 K)辐射峰值的用于辅助火点检测的 11 μm 热红外分裂窗通道[11]。FY-3D/MERSI 可用于判识火点的中红外通道有 1 km 分辨率的 3.8 μm 和 4.05 μm 两个通道,250 m 分辨率的远红外通道有 10.8 μm 和 12 μm 两个通道,可使用 3.8 μm 中红外通道和 10.8 μm 远红外通道分析红外通道的火点判识[12]。FY-3E 与在轨的 FY3C 和 FY3D 组网运行,我国成为国际上唯一同时拥有上午、下午、晨昏三条轨道气象卫星组网观测能力的国家。MODIS (中分辨率成像光谱仪)数据具有 250 m 分辨率的可见光通道 1 (0.62~0.67 μm)和通道 2 (0.84~0.88 μm),处在红外和近红外波段范围内,可以提取植被生长或林火烟云等地面细节[13],同时上、下午双星实现同一地点 4 次/d 观测,可提高火灾的动态监测能力。美国 NPP 卫星搭载的可见光红外成像辐射仪(VIIRS)对地观测仪器,也可进行 2 次/d 的火点监测[4]。NOAA 系列极轨气象卫星,由于其同步观测范围广、探测波段宽、采样时间短,一直以来成为卫星林火监测主要数据源[3]。

2.2. 静止卫星

系统选用 FY4A、FY4B、Himawari9 和 GK-2A 4 颗静止卫星,空间分辨率从 500 m 到 2000 m。FY4、Himawari9 和 GK-2A 作为新一代静止气象卫星,其观测覆盖范围广、频次多,时效性强、性价比高,波段范围覆盖可见光至远红外。FY4A AGRI 成像仪和 Himawari9 号的 AHI 具有观测频次高、覆盖范围广的特点,波段范围覆盖可见光至远红外,在林火观测上具有巨大的优势[14]。基于 GK-2A 遥感影像的亮温差火点提取方法也得到广泛应用,且星下点位置距离中国最近,监测位置最精确。

3. 系统总体功能

秦岭多源卫星森林火情监测预警系统基于多光谱遥感、AI 识别、深度学习等技术[15],构建了基于多源卫星影像的智能火点识别算法,可实现秦岭火情网格化、全天时、全覆盖的精细化监测、预警;利用气象模式数值预报产品研发火险气象指数,采用层次分析法计算各要素权重,制作发布秦岭森林火险等级预报;利用高分辨率多源卫星数据资源,对灾中、灾后火情蔓延情况进行精细化评估。

3.1. 森林火情监测告警

基于非结构化、半结构化及结构化数据特征分析以及不同技术手段设备的火情监测数据类型,进行异源异构数据统一语义描述,建立面向森林火情监测的多源异构数据融合模型,采用多层级森林火情监测的异源异构数据融合方法。实现逐 10 分钟/次对区域范围内的火情实时监测及报警服务,图 1 为火点判识处理流程。

如图 2 所示,森林火情监测告警功能采用插件式、模块化架构实时采集卫星数据,实现卫星火情数据的实时处理和报警。基于采集到的多源卫星数据火情产品,制作生成秦岭火情信息及火情监测产品,包括火点经纬度、焚烧时间段、火点像元面积、所属辖区、火情监测图像、火点信息列表及监测报告等。

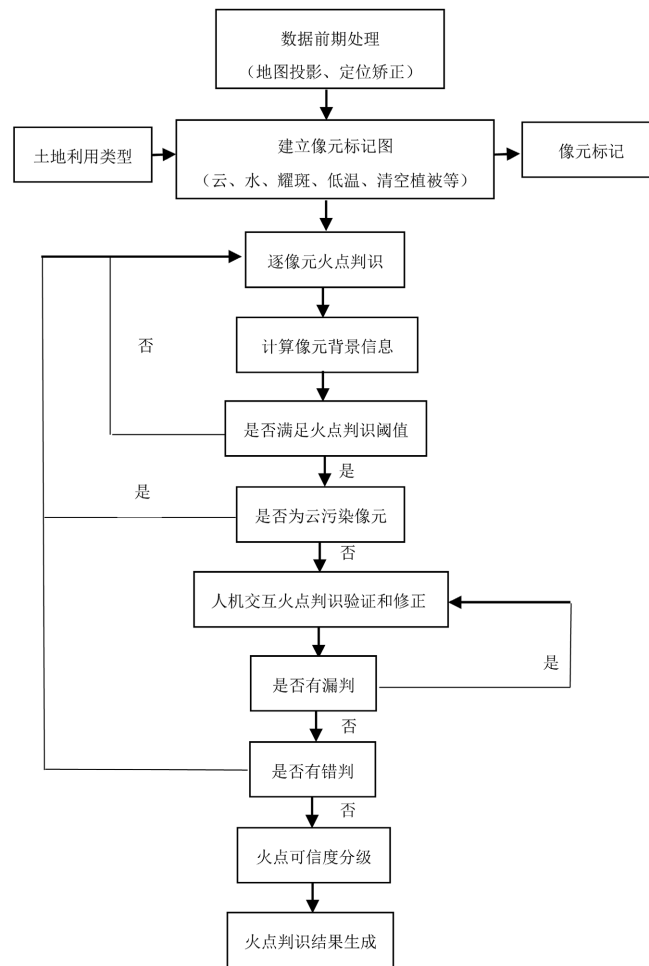


Figure 1. Flow chart of fire point identification processing
图 1. 火点判识处理流程图



Figure 2. Forest fire monitoring alarm function
图 2. 森林火情监测告警功能

3.2. 森林火情风险等级预报

基于气象数值模式提供的降水量、气温、相对湿度、风速等网格气象数据要素计算火险气象指数，结合卫星遥感数据、林区基本数据等计算秦岭地区归一化植被指数，根据历史火情数据统计火情发生频次，最终利用层次分析法计算各要素的权重，分析秦岭森林火险等级预报，制作发布森林火险等级预报，并实现预报信息可视化推送，为森林防火救火提供辅助资料。

如图 3 所示，森林火情风险等级预报功能利用近 10 年秦岭森林火险资料和秦岭地区气象资料，分析秦岭森林火险与气象条件关系，根据实际情况调整森林火险等级相关气象要素阈值；利用卫星遥感数据反演秦岭地区归一化植被指数，本地化配置森林火险等级参数；结合数值模式预报产品，生成森林火险等级精细化预报及色斑图。通过 WebGIS 方式，将气象实况监测、气象预报数据、森林火险等级预报产品等在进行可视化展示，直观的为决策服务提供及时准确的信息。



Figure 3. Forest fire risk level prediction function

图 3. 森林火情风险等级预报功能

3.3. 森林火情分析评估

集成多源卫星的历史火情数据，建立数据库，实现火点地理信息、明火面积、下垫面类型、观测卫星数据源等精细化信息的快速检索、分析、展示功能，实现森林火情信息实时汇总分析，为森林火情监测管理、统计分析提供技术支撑。利用高分辨率卫星数据，针对重大火情开展评估、分析过火区面积及路径等。

4. 系统关键技术

4.1. 动态火点识别阈值调整技术

因同一地理位置不同季节或者同一时期不同地理位置的背景亮温值均不同，且不同的下垫面类型、植被指数以及可燃物载量的多少，对应不同的燃点温度值和热点强度。

根据气象数据和热点数据的相关统计分析研究，热点发生的概率与地理环境和气候因素有关。故开展本地化秦岭区域的热点识别研究，对秦岭区域多年卫星遥感监测到的热点信息进行收集，统计多年热点信息中的亮温值与其对应时间、地理位置、云覆盖度等因素的关系，分析热点判识阈值与相关参数的

关系,得到更符合秦岭地区热点判识标准的阈值,再采用动态的热点识别阈值及自动调整技术,进一步精确提取秦岭区域的热点信息。

利用多源卫星数据,对近 10 年秦岭(西安段)森林热点进行了持续监测和数据分析发现(见图 4):近 10 年来,秦岭(西安段)森林热点共计 82 处,其中 2013 年、2014 年、2019 年为高发年份,分别达到 31 处、23 处、18 处;热点主要分布于秦岭北麓 4 个区县,蓝田县是森林热点高发区域,达到 60 处;周至县 11 处,长安区 8 处,鄠邑区 3 处。

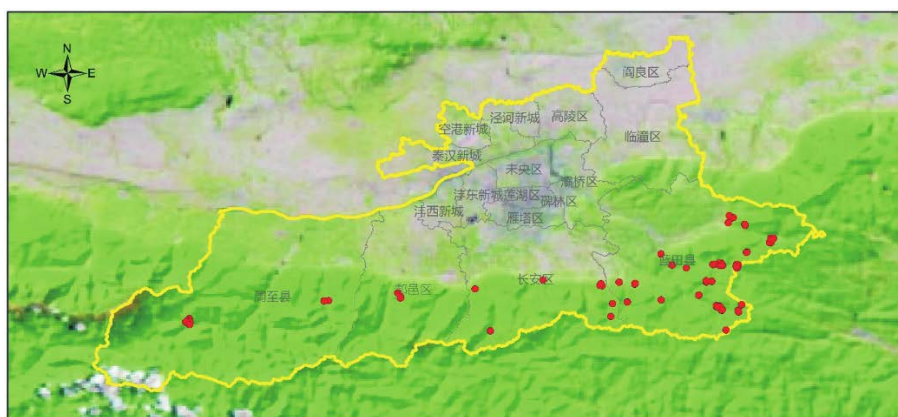


Figure 4. Distribution diagram of satellite monitoring results of forest hotspots in Qinling (Xi'an section) in the past 10 years
图 4. 近 10 年来秦岭(西安段)森林热点卫星监测结果分布示意图

4.2. 火险因子评估模型

森林火险等级预报是依据各类气象要素及森林可燃物信息建立的预报模型。气象要素包括气温、降水、相对湿度、风速等,为火险天气量化表征的参数,本系统气象数据的获取,主要来源为陕西省格点预报数据,可燃物信息包括可燃物载量、可燃物湿度等,植被是森林火灾可燃物的主要承载体,通过卫星遥感数据和抽样地面样地信息利用算法模型实现可燃物载量定量估测。火源表征参数分别为自然火源和人为火源,据了解,秦岭西安段区域未发生过自然火源,历史火灾均为人为火源引起,故使用历史火情发生频次间接反应人为火源的影响因子。

通过对各类影响因子数据的整理、质控,并根据大数据分析和神经网络算法建模,构建火险评估模型。

火险评估模型如下公式所示:

$$g = \sum_{n=1}^m C_n P_n \quad \text{公式(1)}$$

式中:

g 为火险指数, g 越大越容易发生火情;

C_n 为各类火险影响因子, P 为各影响因子对应的权重;

m 为参与模型计算的影响因子个数。

评估模型能够同时结合各类火险影响因子数据,开展火险评估,对不同区域的火险因子进行量化计算。其中,气象因子权重最高,可燃物因子权重为中,历史火点因子权重最低。

4.3. 气象火险指数计算

选取与高火险密切相关的气象因子,如气温(T)、降水(r)、风速(v)、相对湿度(u)等,再确定各个单因

子所对应的火险指数 $I_T(T)$ 、 $I_r(r)$ 、 $I_v(v)$ 和 $I_u(u)$ ，然后将各因子对应的火险指数求和得到总的火险气象指数。

$$I = I_T(T) + I_r(r) + I_v(v) + I_u(u) \quad \text{公式(2)}$$

结合目前全国森林火险天气预报所使用的改进布龙 - 戴维斯模型(公式(3))采用指数查对法，利用特大火灾历史数据库验证研制出修正的布龙 - 戴维斯方案(公式(4))，将他们加权平均并经地表状况及降水量系数订正后得出适用于本区域的森林火险气象指数(公式(5))。

$$U = I_v(v) + I_T(t) + I_f(f) + I_m(m) \quad \text{公式(3)}$$

$$U' = I'_v(v) + I'_T(t) + I'_f(f) + I'_m(m) \quad \text{公式(4)}$$

$$I_{FMI} = (0.3 * U + 0.7 * U') \times C_s \times C_r \quad \text{公式(5)}$$

式中：

v 为日最大风速(m/s)， T 为日最高气温(°C)， f 为日最小相对湿度(%)， m 为连续无雨日数， C_s 为地表状况修正系数， C_r 为降水量修正系数。

4.4. 过火区判识

过火区提取主要是利用同一地区林火发生前、后光谱特征的变化，或过火区与背景区域地表光谱特征差异来提取面积。林火会导致具有光合作用的植被叶绿素被完全破坏，引起近红外波段的光谱反射率急剧下降，且火灾后碳物质的大量沉积及土壤水分的减少，会导致过火区在中红外波段呈现出较高的反射率。因此通过火灾发生前后 NDVI 值的变化判断该区域是否为过火区。

$$NDVI_{\text{Before}} - NDVI_{\text{After}} > NDVI_{\text{BA_th}} \quad \text{公式(6)}$$

式中：

$NDVI_{\text{Before}}$ ——火灾前 NDVI 值。

$NDVI_{\text{After}}$ ——火灾后 NDVI 值。

$NDVI_{\text{BA_th}}$ ——基于火灾前后两景影像判识过火区的 NDVI 阈值。可由过火区附近 10 个像元以内、与过火区具有相同土地覆盖类型区域的两景影像 NDVI 差值的平均值作为参考阈值。

5. 系统应用

5.1. 火点判识

秦岭多源卫星森林火情监测预警系统界面简捷(见图 5)，采用深度学习、决策树等人工智能技术，调整火情识别算法阈值参数，有效提高了火点判识的灵敏度，结合自动更新的异常火点库，剔除非火情点干扰，进一步提高了火点判识的准确率。

5.2. 评估个例

2023 年 3 月 3 日 15:40 多源静止气象卫星监测到陕西省西安市蓝田县(109.338E, 34.144N)周围区域出现火情(见图 6)。利用哨兵 2 号高分辨率极轨卫星，对此次火情的过火区范围、过火程度等进行了相应分析。

利用高分辨率卫星数据 Sentinel-2 (以下简称 S2)，对比火前 2023 年 2 月 27 日，和火后 2023 年 3 月 4 日火后，火情影响区域多通道合成图，可以看出黑褐色过火区域明显(见图 7)。



Figure 5. Qinling multi-source satellite forest fire monitoring and warning system interface
图 5. 秦岭多源卫星森林火情监测预警系统界面

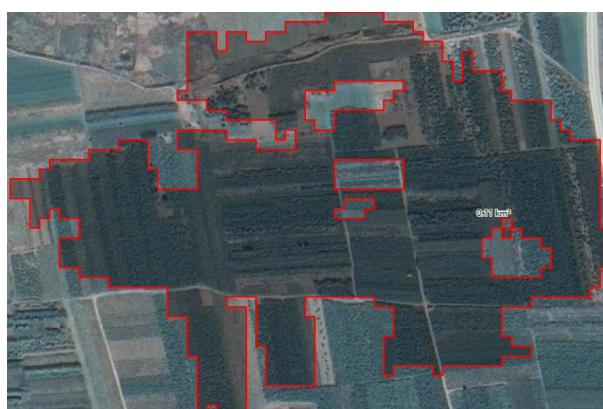


Figure 6. Fire Monitoring and Analysis of Lantian County, Xi'an City, Shaanxi Province on March 3, 2023 Assessment of the Area of the Overfire Area

图 6. 2023 年 3 月 3 日陕西省西安市蓝田县火情监测分析过火区面积评估图

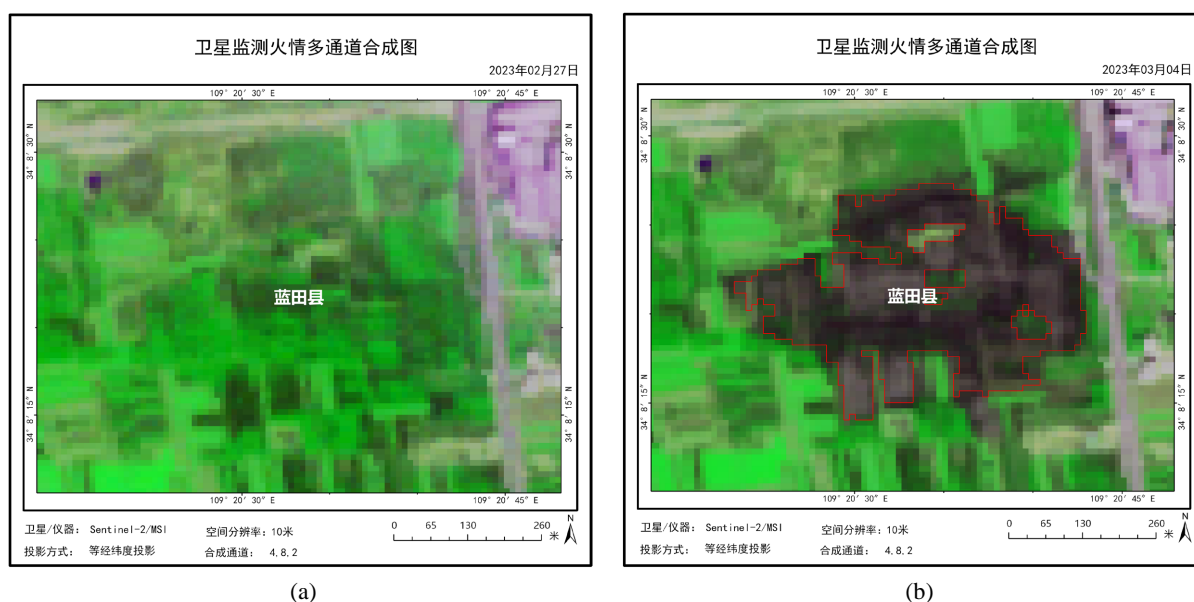


Figure 7. Multi channel composite map of fire monitoring in Lantian County, Xi'an City, Shaanxi Province on February 27 (left) and March 4 (right), 2023

图 7. 2023 年 2 月 27 日(a)、3 月 4 日(b)陕西省西安市蓝田县火情监测多通道合成图

对火灾前、后的两景 S2 数据进行处理分析,可以看出过火前后过火区域植被指数存在较大差异,3月4日较2月27日植被指数显著降低,火灾显著降低了植被覆盖(见图 8(a)、图 8(b))。通过叠加分析过火前后植被指数变化情况,精细化评估火灾影像程度,过火影响面积约 10.8705 平方千米(163.0569 亩)(见图 8(c))。

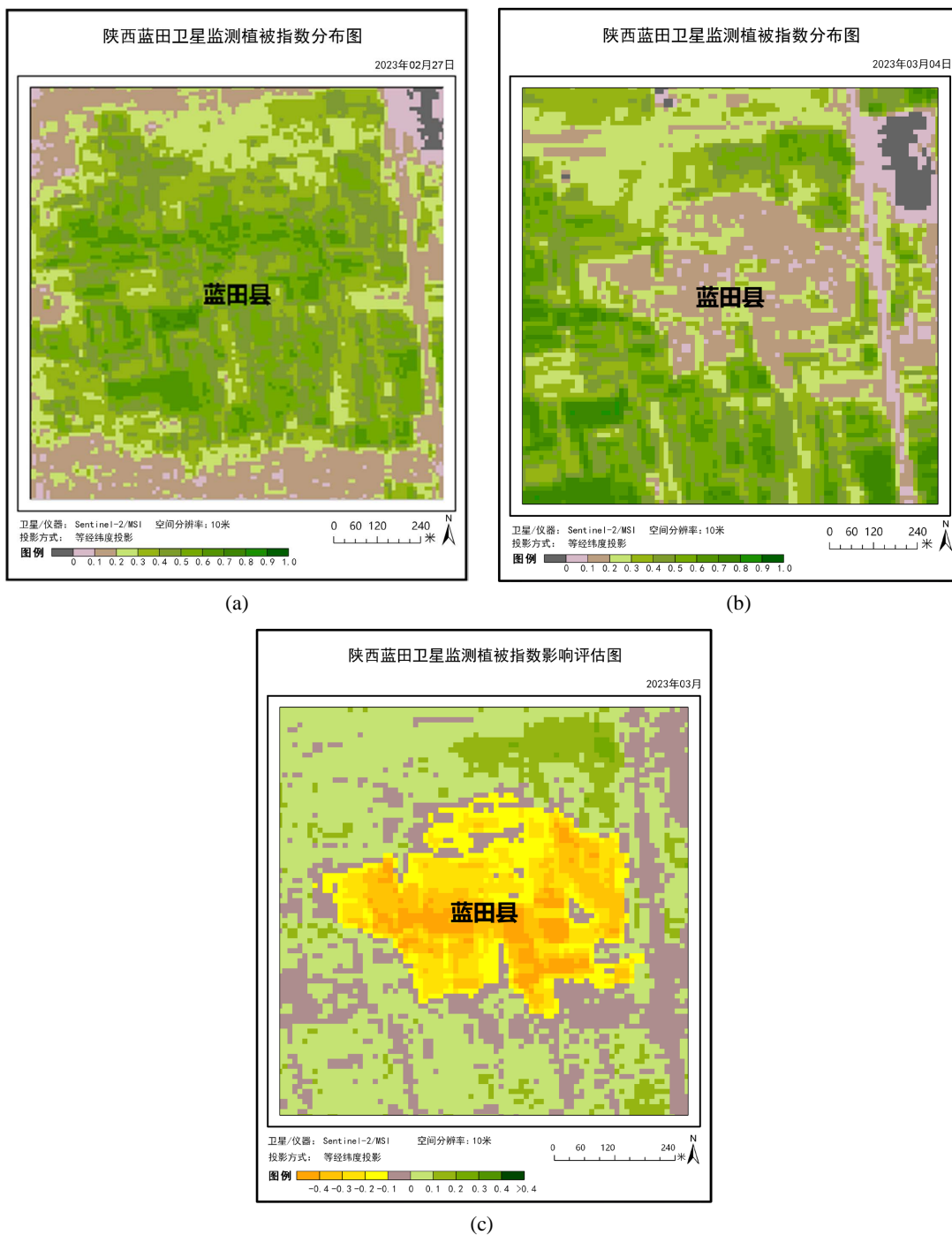


Figure 8. Satellite monitoring vegetation index distribution map and vegetation index impact assessment map before (a) and after (b) disasters (c)

图 8. 灾前(a)、灾后(b)卫星监测植被指数分布图及植被指数影响评估图(c)

5.3. 系统特征

1) 系统实现全天时、全覆盖的精准快速监测和报警。利用多源融合的静止卫星高时间分辨率观测频次, 实现小于 10 分钟的高频监测, 最大数据时延 10 分钟, 经过处理分析, 卫星过境后最快 20 分钟计算推送出监测结果, 并进行报警; 火点判识精度较高, 系统通过业务化应用, 在 2022 年 11 月~2023 年 3 月期间, 西安市区域共监测到 45 个热点信息, 经调查验证, 热点信息监测结果准确率为 85%。

2) 智能化程度高, 业务操作简捷。系统实现 24 h 不间断业务化运行, 自动筛选非火点的热源信息、对疑似火点进行可信度分级, 生成监测报告; 火险等级预报等关键技术均通过后台处理完成, 业务人员只需要根据系统运算结果, 制作相对应的决策服务材料。

3) 多角色用户, 安全性较高。系统提供基于监测区域的角色和权限, 分别为西安市、秦岭西安段、秦岭区域, 通过平台用户验证与信息绑定, 确保数据的安全性和完整性, 且可以准确、及时、方便、直观地满足各类用户全面了解管辖区域内的火点情况。

6. 结论与讨论

1) 本系统基于卫星遥感技术, 利用多源卫星资源, 实现了对秦岭疑似火点的快速定位、连续监测, 与应急局、资源局、秦保局建立及时反馈机制, 确认火点真实性, 为制定合理林火扑救方案, 实施扑火最优配置, 提高扑火效率提供更加准确的信息支撑; 基于高分卫星的过火面积计算为灾后损失评估提供了有效的卫星监测依据; 本地化的森林火险气象等级预报, 严把气象防灾减灾关。

2) 森林火灾的防治需要采取多部门协作, 逐渐形成一套科学完整的防治体系, 以全面提升森林火情灾前、灾中、灾后的整体服务能力。秦岭多源卫星森林火情监测预警系统, 可与航空监测、近地面观测和地面巡逻火情监测技术系统协作配合, 构建立体的森林火情监测体系, 为各级防火部门实现“打早、打小、打了”提供有力支撑, 为提高秦岭防火能力发挥积极作用。

3) 受多种因素影响, 系统的监测精度验证主要通过重特大火灾来实现, 针对“早”火、“小”火点验证存在一定困难, 且误差相对较高。需要加强方法验证, 充分利用各种手段的监测优势, 实现重特大灾害应急期间的互补协作, 针对平时“小”火开展验证, 逐渐完善监测与验证方法体系, 进一步提升火灾监测精度。

参考文献

- [1] 吕爱锋, 田汉勤, 刘永强. 火干扰与生态系统的碳循环[J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2734-2743.
- [2] 赵文化, 单海滨, 钟儒祥. 基于 MODIS 火点指数监测森林火灾[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(3): 152-157.
- [3] 赵彬, 赵文吉, 潘军, 等. NOAA-AVHRR 数据在吉林省东部林火信息提取中的应用[J]. 国土资源遥感, 2010, 83(1): 77-80.
- [4] 罗晓霞, 齐中孝, 陈宪冬. S-NPP 及 VIIRS 在林火监测中的应用[J]. 地理空间信息, 2016, 14(11): 78-81.
- [5] 李亚君, 郑伟, 陈洁, 等. 红外通道空间分辨率对火点监测应用的影响分析[J]. 红外, 2021, 42(9): 30-41.
- [6] 徐拥军. 基于 FY3A/VIRR 数据火情监测系统的设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2012.
- [7] 郭捷, 张月维, 赵文化, 等. 风云三号 C 星 VIRR 数据的林火监测研究[J]. 森林防火, 2015(1): 45-48.
- [8] 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.
- [9] 张鹏, 郭强, 陈博洋, 等. 我国风云四号气象卫星与日本 Himawari-8/9 卫星比较分析[J]. 气象科技进展, 2016, 6(1): 72-75.
- [10] 董晓锐. 基于 FY3 遥感影像的森林火灾监测系统的研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [11] 杨军, 董超华. 新一代风云极轨气象卫星业务产品及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

- [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.
- [13] 段卫虎, 黄诚, 王皓, 等. MODIS 数据在森林火点识别中的应用研究[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(28): 9800-9803.
- [14] 陈洁, 郑伟, 刘诚. Himawari-8 静止气象卫星草原火监测分析[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(4): 197-204.
- [15] 赵兵兵. 基于深度学习的火情检测技术与系统实现[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.