

森林火灾微光遥感识别新指数—增强夜光火灾扰动指数

武晋雯^{1,2}, 纪瑞鹏^{1,2}, 张玉书^{1,2}, 孙龙或³, 于文颖^{1,2}, 冯锐^{1,2*}, 幸芳⁴

(1. 中国气象局沈阳大气环境研究所, 辽宁 沈阳 110166;

2. 辽宁省农业气象灾害重点实验室, 辽宁 沈阳 110166;

3. 沈阳市气象局, 辽宁 沈阳 110168;

4. 沈阳城市建设学院, 辽宁 沈阳 110167)

摘要:随着光电技术的发展,低照度条件下的微光成像技术及其应用成为近年来的研究热点之一。在微光遥感影像上,很难单纯依靠辐射亮度或温度,将森林火灾与工业燃烧、城市等热源充分地分离,同时由于频繁的数据饱和和问题,目前NPP火灾产品仅提供探测位置信息。因此,为了在各种高亮度异质热源中实现森林火灾识别,进一步推进火灾探测产品像素级表征,基于地表温度通过潜热传递随植被密度的增加而降低的原理,提出了一种新的光谱指数—增强夜光火灾扰动指数(ENFDI),并与传统的中红外波段(Tmir)火灾识别方法进行对比分析。结果表明,ENFDI可以增强森林火灾与城市热源之间的光谱差异,提高微光条件下森林火灾识别能力,森林火灾ENFDI明显高于城市热源区;ENFDI能够有效缓解微光波段易饱和的影响,ENFDI不仅可以明显地分辨出潜在饱和区内火光亮度的差异,增强火灾像元的可区分性,而且与中远红外亮温差的相关性 R 高达0.94~0.97,明显高于微光波段亮度(NTL)与中远红外亮温差的相关性(0.82~0.83);ENFDI具有一定的稳定性,它不受月相变化的影响,在有无月光情况下夜间森林火灾均被识别;ENFDI森林火灾识别精度(87.66%)高于传统中红外波段(Tmir)火灾识别精度(83.91%),与NPP/VIIRS主动火灾产品(VNP14IMG)具有良好的总体对应关系,定位偏差在628 m以内。因此,ENFDI指数对森林火灾的识别具有敏感性、稳定性和准确性,为进一步实现火灾像素级表征提供可行性参考。

关键词:增强夜光火灾扰动指数;火灾遥感识别;微光;红外;植被指数;饱和

中图分类号: TP79 文献标识码: A

A new index for low-light-level remote sensing identification of forest fires: the enhanced noctilucous fire disturbance index

WU Jin-Wen^{1,2}, JI Rui-Peng^{1,2}, ZHANG Yu-Shu^{1,2}, SUN Long-Yu³, YU Wen-Ying^{1,2},
FENG Rui^{1,2*}, XING Fang⁴

(1. Shenyang Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110166, China;

2. Key Laboratory of Agricultural Meteorological Disasters in Liaoning Province, Shenyang 110166, China;

3. Meteorological bureau of Shenyang, Shenyang 110168, China;

4. Shenyang Urban Construction University, Shenyang 110167, China)

Abstract: With the development of optoelectronic technology, low-light-level (LLL) imaging technology and its application have recently become a research focus. In LLL remote sensing images, it is difficult to completely separate forest fires from industrial combustion and urban heat sources based on radiance or temperature alone. Meanwhile, because of frequent data saturation in the low-light band, the existing fire detection products only provide detection information. To identify forest fires among various heterogeneous heat sources with high brightness and further improve the pixel-level

收稿日期: 2022-08-21, 修回日期: 2022-12-29

Received date: 2022-08-21, revised date: 2022-12-29

基金项目: 沈阳市中青年科技创新人才支持计划(RC210431), 风云卫星应用先行计划二期(FY-APP-2021.0302)

Foundation items: Supported by the Shenyang young and middle-aged scientific and technological innovation talents support program (RC210431), and Fengyun satellite application advance plan (FY-APP-2021.0302)

作者简介(Biography): 武晋雯(1980-), 女, 山西陵川人, 研究员, 硕士学位, 主要研究遥感定量监测指标构建及应用。E-mail: wujimwen@iaesy.com

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: fengrui_k@iaesy.com

characterization of fire detection products, a new spectral index, the enhanced noctilucous fire disturbance index (ENFDI), is proposed based on the principle that surface temperature decreases with the increasing vegetation density by Latent heat transfer. According to the results, ENFDI enhances the differences in spectral characteristics between forest fires and city lights and improves the ability of forest fire identification under low-light conditions. The forest fires' ENFDI are significantly higher than those of urban heat sources. Moreover, ENFDI can also effectively relieve the impact caused by LLL band's proneness to saturation. Not only can ENFDI clearly distinguish flame glow differences within potential saturation zones and enhance the distinguishability of forest fire's pixels, but the correlation (R) between ENFDI and the mid-and far-infrared brightness temperature difference is as high as 0.94 - 0.97, which is considerably higher than that of NTL (0.82-0.83). Furthermore, ENFDI is relatively stable—it is not affected by lunar phases in that forest fires at night are identified with or without moonlight. ENFDI recorded an 87.66% forest fire identification accuracy in this study, which is higher than the 83.91% accuracy of the conventional TMIR method. The forest fires identified using the ENFDI show a good overall correspondence with the NPP/VIIRS active fire product (VNP14IMG), with a positional tolerance within 628 m. Therefore, ENFDI is sensitive, stable and accurate for identifying forest fires. Further, it may serve as a feasible reference for achieving further pixel-level characterization of fires.

Key words: enhanced noctilucous fire disturbance index, remote sensing identification of fire, low light, infrared, vegetation index, saturation

引言

在全球气候变暖的背景下,森林火灾危害程度不断加大,对全球的生态环境和社会经济产生重大影响^[1],2021年北美、西伯利亚、地中海等地经历了异常炎热和干燥天气,爆发大规模森林火灾,燃烧释放 343 Mt 碳比历史纪录高出约五分之一^[2];2022年,葡萄牙、西班牙、法国等欧洲国家,部分地区的最高气温超过了 40 °C,同样爆发了大规模森林火灾^[3],由森林火灾引发的问题日益凸显。自 1980s 以来,近 30 年的火灾遥感研究主要是围绕热红外传感器对异常高温的特殊敏感性展开^[4-6],根据普朗克定律和维恩位移定律,Dozier^[7]开创了双光谱亚像素高温测量技术,即与 11 μm 的局部背景相比,火点在 4 μm 附近的波段上具有更高的亮度温度,这奠定了火灾遥感的理论基础。在此基础上,逐渐发展形成了阈值法^[8]、上下文法^[9-10]等多种火灾识别方法。

随着光电技术的发展,低照度条件下的微光成像技术及其应用成为近年来的研究热点之一^[11-12]。微光成像能够获取大范围夜间亮度信息,不仅可以进行夜间灯光遥感,分析城市空间结构及演化规律,探寻夜间灯光遥感与城市问题^[13],还可以探测到其他来自地球表面的光,如森林火灾、天然气燃烧以及夜间渔船灯光等,广泛地应用于生态环境问题、社会经济价值估算等研究^[14]。目前世界上广泛应用的微光探测有效载荷,包括美国国防气象卫星(DMSP)上的业务线扫描系统(OLS)、美国联合极轨卫星系统(JPSS)NPP 卫星上的可见光红外成像仪/

辐射计组(VIIRS)^[15]。2021年,新增一微光探测有效载荷,即我国自主研发的风云三号E星(FY-3E),搭载的中分辨率光谱成像仪-微光型(MERSI-LL),能够实现微光和红外波段多光谱连续综合观测^[16]。

以目前国际上最具代表性的微光成像载荷 VIIRS/DNB 为例,VIIRS 除了具备火灾探测波段外,还包含昼/夜波段(DNB),它可以在夜间低照度条件下获取“可见”光图像^[17],增强了夜间火灾的识别能力。目前,不少学者对星载微光探测技术在城市灯光遥感方面进行了探究^[13],但在火灾遥感方面鲜有研究。Elvidge 等人(2013年)^[18]采用双波段检测法,利用 VIIRS 短波红外(1.61 μm)波段和 DNB 波段,探测夜间气体耀斑和其他高温异常,并生成了一种新的数据产品(Nightfire)。Liu 等人(2017年)^[19]开发了一种面向对象的方法,从 VIIRS Nightfire 产品的时间序列中(<http://www.ngdc.noaa.gov/eog/viirs/>, 2019年10月15日起停止下发),稳健地分割和准确地分类各种夜间工业热源点,总体分类精度为 77%。Zhizhin 等人(2021年)^[20]基于 NPP-VIIRS 和 NOAA-20 气象卫星,采用 VIIRS Nightfire(VNF)算法识别夜间天然气燃烧。由此可见,DNB 数据目前只作为一种火灾判识条件简单地叠加使用。而且,NPP/VIIRS 主动火灾产品 VNP14 和 VNP14IMG,均以 MODIS 火灾和热异常算法为基础进行识别,并没有采用微光数据。同时,由于频繁的数据饱和问题,目前的火灾产品仅提供探测信息,并无像素级火灾表征^[21-22]。

随着星载微光探测技术的发展,针对高亮度异

质热源混淆以及微光波段频繁的数据饱和问题,基于地表温度通过潜热传递随植被密度的增加而降低的原理,本文提出了一种新的光谱指数—增强夜光火灾扰动指数(Enhanced Noctilucent Fire Disturbance Index, ENFDI),它能够增强森林火灾与城市热源之间的光谱特征差异,提高微光条件下森林火灾识别能力,以及有效降低NTL易饱和的影响,为进一步实现火灾像素级表征提供可行性参考。

1 研究资料

本文采用的遥感数据来自辽宁省气象卫星直收站实时接收的NPP/VIIRS数据产品(表1)。选取2019年4月14日葫芦岛小虹螺山、4月17日沈阳棋盘山、5月8日锦州医巫闾山森林火灾为研究对象,为与火灾持续时段相对应,筛选影像日期分别为:4月14日、4月15日、4月17日、4月18日、5月7日、5月8日,统一采用等经纬度投影、中心点分辨率为 0.0075° ,用于ENFDI构建。选用2019年4月15日01时、4月18日00时、5月8日01时的NPP/VIIRS(375 m)主动火灾产品(VNP14IMG, <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/>)验证ENFDI火灾遥感识别定位效果。同时,基于4月14日、4月16日、4月21日、5月11日火灾发生前后的高分一号(GF-1)卫星数据(空间分辨率16 m),采用基于样本的面向对象分类方法,提取其与火点定位信息相对应的火烧迹地面积,作为燃烧时的过火面积,用于验证ENFDI火灾遥感识别精度。

表1 研究所涉及的VIIRS相关波段及参数

Table 1 Characteristics of channels and parameters of VIIRS applied in this study

波段	空间分辨率/m	中心波长/ μm	主要用途
I1	375	0.640	植被指数
I2	375	0.865	植被指数
I4	375	3.740	火灾遥感
I5	375	11.450	火灾遥感
DNB	750	0.700	夜间可见光成像

2 研究方法

2.1 理论基础

在微光遥感图像上,森林火灾表现为微光波段亮度(NTL)增高、 $4\mu\text{m}$ 中红外波段温度(T_{mir})增高,但森林火灾与工业燃烧和城市热岛等热源,存在辐射亮度和温度混淆情况,很难单纯依靠NTL或者 T_{mir} ,将森林火灾与其他热源充分地分离^[19]。微光

数据可以提供更多的空间细节,在考虑植被影响后,不仅可以缓解微光数据易饱和问题^[23],还可以提升微光数据对森林火灾识别作用。

考虑到植被与人类活动的关系,植被密度随城市开发密度的增加而降低,即城市中心区通常随着建筑密度增高而植被覆盖偏少(城市热岛效应产生的主要原因)、而在远离城市的郊区随着建筑密度减少而植被覆盖增多^[24],那么森林覆盖与城市热源的地表覆盖不同,火灾发生前的归一化植被指数(NDVI_{pre})在森林覆盖处具有高密度特征,而在城市热源处具有稀疏植被的特征。虽然森林火灾和城市热源NTL都具有高亮度特征,但考虑植被影响后,即 NDVI_{pre} 与NTL相乘后,修正后高亮度特征在城市中心变小,在火灾中心变大。因此,利用NTL与 NDVI_{pre} 乘积的算数形式,一方面可以有效缓解微光数据的饱和度,另一方面可以增强森林火灾与城市热源的光谱差异。

利用 $4\mu\text{m}$ 通道对火灾热发射信号异常敏感的特点,当发生火灾扰动时,亮度温度(T_{mir})会出现异常增高,同时植被指数减小,导致 T_{mir} 与植被指数比值偏离自然变化范围。因此,基于地表温度通过潜热传递随植被密度的增加而降低的原理^[25],采用亮度温度与植被指数比值形式,构建新的火灾扰动指数—增强夜光火灾扰动指数(图1),其中,植被指数由NTL与 NDVI_{pre} 组合($1-\text{NTL}\times\text{NDVI}_{\text{pre}}$)而成,用来刻画森林燃烧导致植被指数减小的过程。

2.2 增强夜光火灾扰动指数的构建

基于上述原理,本文提出了一种新的光谱指数—增强夜光火灾扰动指数,计算式如下:

$$\text{ENFDI} = T_{\text{mir}_{\text{norm}}} / (1 - \text{NTL}_{\text{norm}} \times \text{NDVI}_{\text{pre}}), \quad (1)$$

式中, $T_{\text{mir}_{\text{norm}}}$ 为归一化 T_{mir} ; NTL_{norm} 为归一化NTL; NDVI_{pre} 为火灾发生前的NDVI。

为了与NDVI匹配, T_{mir} 、NTL均进行线性函数归一化处理^[26],使其值域在0和1之间,计算方法如下:

$$T_{\text{mir}_{\text{norm}}} = (T_{\text{mir}} - T_{\text{mir}_{\text{min}}}) / (T_{\text{mir}_{\text{max}}} - T_{\text{mir}_{\text{min}}}), \quad (2)$$

$$\text{NTL}_{\text{norm}} = (\text{NTL} - \text{NTL}_{\text{min}}) / (\text{NTL}_{\text{max}} - \text{NTL}_{\text{min}}), \quad (3)$$

式中, T_{mir} 为NPP-VIIRS $4\mu\text{m}$ 中红外波段亮温; NTL为DNB波段的辐射亮度; $T_{\text{mir}_{\text{min}}}$ 、 NTL_{min} 为NTL、 T_{mir} 波段的最小值, $T_{\text{mir}_{\text{max}}}$ 、 NTL_{max} 为NTL、 T_{mir} 波段的最大值。

2019年,辽宁火场总面积达到有完整数据记录以来的最大值,为 2023 hm^2 ^[27]。因此,对2019年4

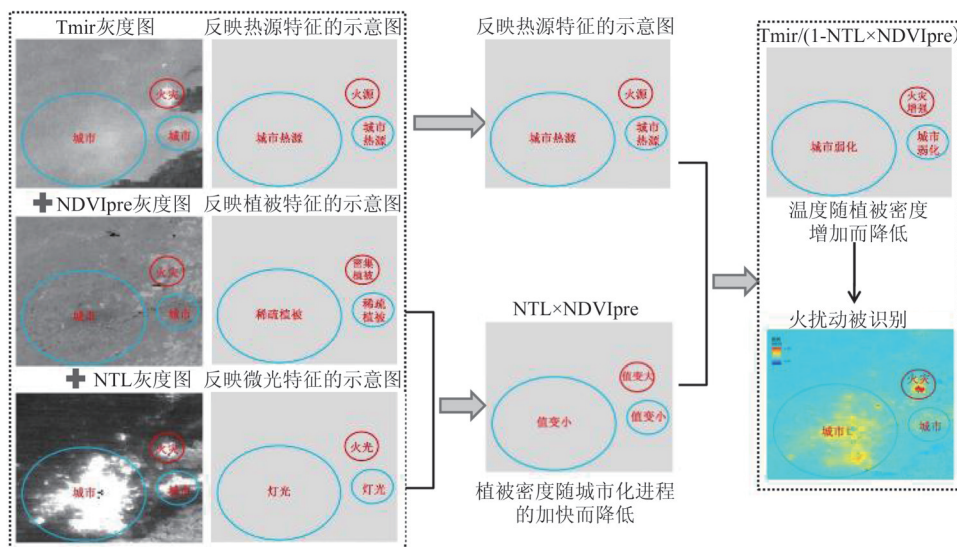


图1 增强夜光火灾扰动指数构建的理论基础示意图
Fig. 1 Schematic of the theoretical basis for constructing ENFDI

月-5月 NPP/VIIRS 卫星相关波段的特征研究发现, ENFDI可以提高微光下火灾识别能力。以2019年4月18日00时48分森林火灾为例,以火灾中心燃点为中轴,提取了NTL、Tmir以及火灾前2019年4月14日11时47分NDVIpre纬度样带,并计算ENFDI(图2)。可以看出,不考虑云污染影响,Tmir值在火灾中心偏高,NTL值沿着纬度样带向城市中心和火灾中心的方向逐渐增加,而NDVIpre值在远离城市中心的郊区较高。NDVIpre和NTL之间的反比关系在城市中心最为明显,NDVIpre与NTL乘积在城市中心偏小;而NDVIpre和NTL之间的正比关系在火灾中心最为明显,NDVIpre与NTL乘积在火灾中心偏大。因此,ENFDI在火灾中心异常偏高,在城市

中心出现小波峰。

3 结果与分析

3.1 增强夜光火灾扰动指数的应用

对比2019年4月17日(火灾前)、4月18日(火灾时)的微光影像发现,在火灾前的影像上并没有此处NTL高值区(图3(a),圆形标记),因此火灾发生时突增的NTL高值区(图3(b))应该是着火点,而不是城市热源。基于NTL、Tmir和NDVIpre参数,根据ENFDI的计算公式(式(1)-(3)),计算得到2019年4月18日00时48分辽宁省ENFDI分布图(图3(c))。从图3(c)可以看出,ENFDI低值区为云区,中值区为非城市、无照明区域(通常是植被覆盖区),高值区为城市和森林火灾等热源区域。森林

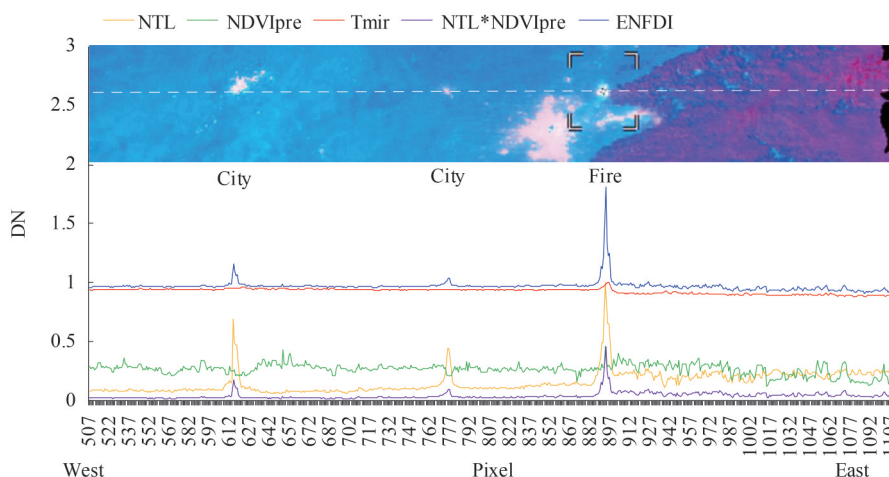


图2 增强夜光火灾扰动指数(ENFDI)反演参数的纬度样带
Fig. 2 Latitude transects of the inversion parameters of ENFDI

火灾 ENFDI 值明显高于城市,均在 1.073 以上,城市 ENFDI 值在 0.840~1.073 之间,有一定程度降低且呈现明显的块状聚集分布(图 3(d)),ENFDI 高值对森林火灾具有明显表征。

为了探究 ENFDI 指数在低照度条件下对城市与火灾差异的增强效果,进一步对 ENFDI 高值区的空间细节进行了分析(图 3(e-f))。在微光遥感图像上,由于火光和灯光使得两个异质热源均获得很高的亮度,从 NTL 密度分割图(图 3(e))可以看出,森林火灾与城市热源之间存在混淆,但 ENFDI 指数可增强森林火灾与城市热源的光谱差异,提高微光下火灾识别能力(图 3(f))。

3.2 基于 ENFDI 的森林火灾遥感识别及对比验证

证

为了评估 ENFDI 森林火灾识别能力,从视觉效果、识别精度、定位信息和月相变化等方面,与传统的中红外波段火灾识别方法进行对比分析。首先,从视觉效果来看,NTL 图像中(图 4(a1-c1))森林火灾以及城市热源混淆在一起难以区分,但是通过 ENFDI 的反演结果(图 4(a3-c3)),可直接利用阈值法识别出火灾像元,进一步证明了 ENFDI 指数能够提高微光下火灾识别能力;其次,从火灾识别精度来看,除 5 月 8 日锦州火灾识别结果一致外(图 4(c2-c3)),沈阳、葫芦岛火灾 Tmir 识别的范围偏小(图 4(a2-b2)),ENFDI 能够更清晰地识别出火灾像元、火灾范围更大(图 4(a3-b3)),以燃烧时的过火

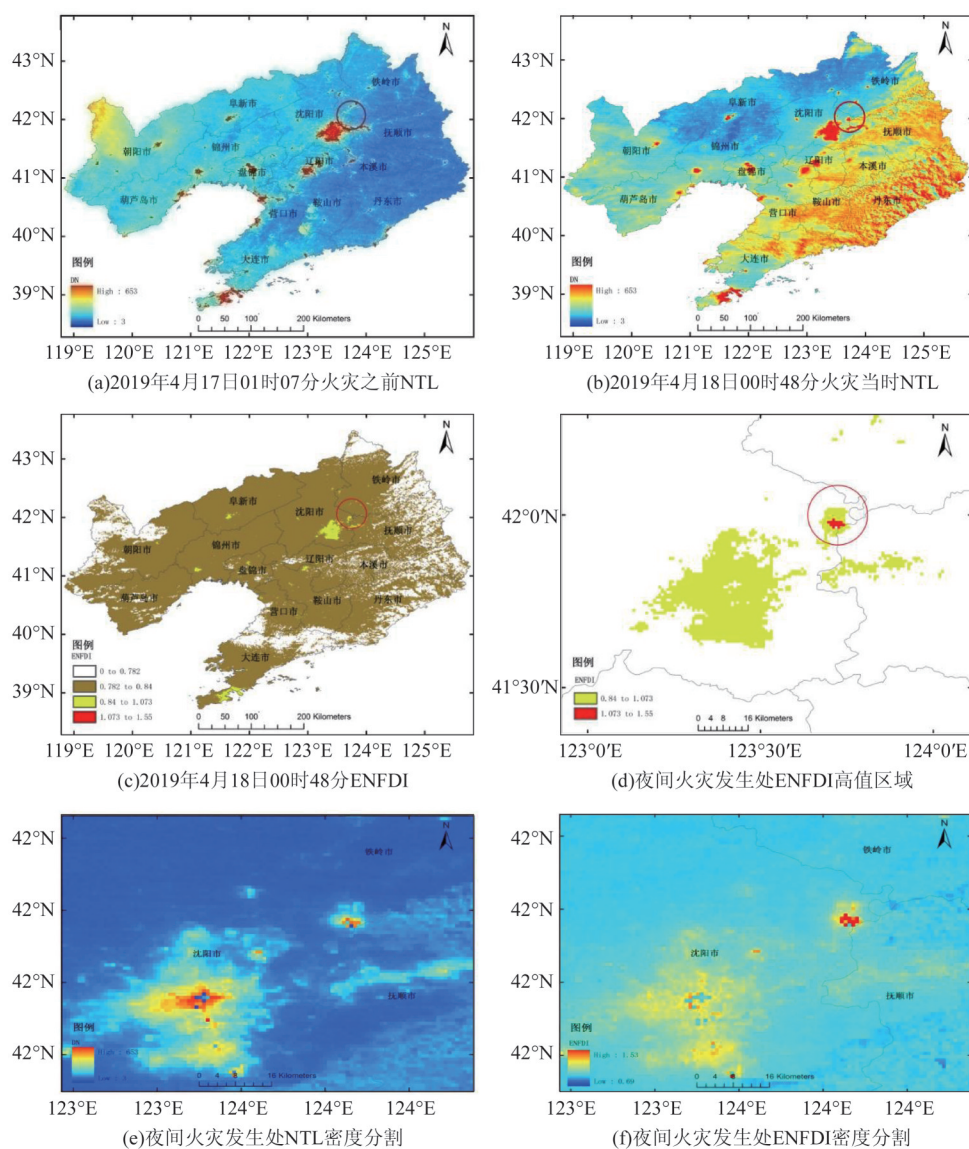


图3 森林火灾过程NTL及ENFDI反演结果对比

Fig. 3 Comparison of the NTL and ENFDI inversion results for forest fires

面积为参 考验证了二者火灾像元识别精度(Tmir 为 83.91%, ENFDI 为 87.66%), ENFDI 识别结果更接 近真实火灾情况(图 5), 进一步说明 ENFDI 增强了 夜间火灾的识别能力; 再次, 由于 VNP14IMG 仅提供 火灾发生位置信息, 无像素级火灾表征, 因此从定 位角度对比了 VNP14IMG(图 4(a3-c3))和 ENFDI 反 演结果, 发现二者具有良好的总体对应关系, 为进 一步实现 NPP 火灾像素级表征提供可行性参考; 最 后, 从月相变化角度验证了 ENFDI 森林火灾遥感识 别适用性, 图 4(a)(月相角为 61.33°)、4(b)(月相 角为 19.35°)为有月光图像, 图 4(c)(月相角为 141.83°、月球天顶角为 95.71°)为无月光图像, 从图中可以看出, 2019 年 4 月 15 日、4 月 18 日以及 5

月 8 日, 发生在葫芦岛小虹螺山、沈阳棋盘山以及锦 州义县的夜间森林火灾均被识别, 这说明无论有 无月光影响, ENFDI 在火灾遥感识别方面均具有 一定的稳定性。

3.3 ENFDI 缓解微光饱和的修正效果

为验证 ENFDI 缓解微光饱和的修正效果, 将 ENFDI 与 NTL 从以下两方面进行比较: 一是潜在饱 和区内火光亮度差异的可区分性, 选择影响范围较 大的葫芦岛、沈阳火灾, 提取火灾中心纬度样带数 据, 绘制 ENFDI、NTL 火光亮度变化曲线(图 6(a)), 可以看出 NTL 曲线亮度值的变化不明显, 但 ENFDI 能够明显的分辨出潜在饱和区内火光亮度的 差异, 增加了火灾像元的可区分性; 二是与火灾热异常的

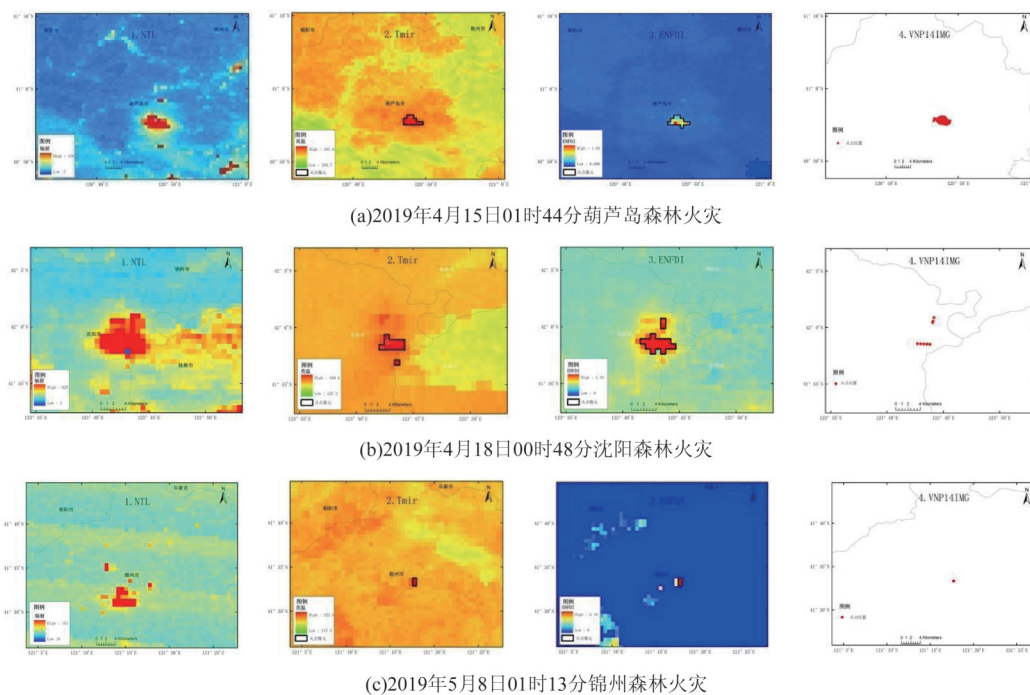


图 4 NTL、Tmir、ENFDI 和 VNP14IMG 火灾识别对比

Fig. 4 Comparison of fire identification based on NTL, Tmir, ENFDI and VNP14IMG

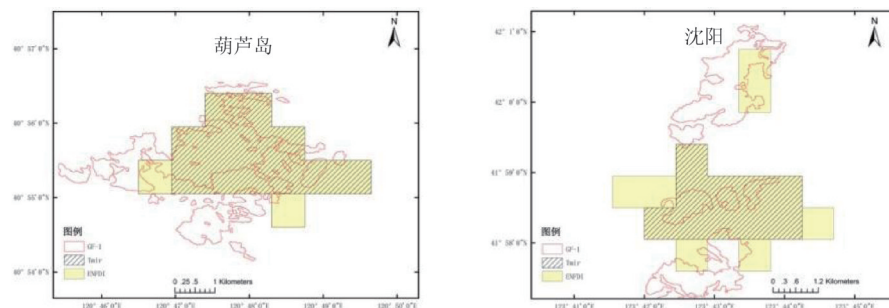


图 5 基于 GF-1 过火面积验证 ENFDI 和 Tmir 火灾识别精度

Fig. 5 Verification of ENFDI's and TMIR's forest fires identification accuracies based on the burned area calculated from GF-1's imaging

拟合程度,火灾遥感常用中红外波段($4\ \mu\text{m}$)、远红外波段($11\ \mu\text{m}$)光谱带进行处理,可以识别从中等到粗空间分辨率传感器的热异常^[6,18],分别利用ENFDI、NTL与VIIRS中红外波段(14)、远红外波段(15)的亮温差进行相关性分析(图6(b)),研究发现ENFDI指数与中远红外亮温差的相关性 R 高达0.94~0.97,明显高于NTL与中远红外亮温差的相关性(0.82~0.83),进一步验证了ENFDI指数不仅可以有效缓解夜间NTL数据饱和问题,还可以提高对火灾识别的准确性。

4 结果与讨论

微光遥感可提供夜间亮度信息,在微光遥感影像上森林火灾不仅显现异常高温、还具有高亮度特征^[11]。如何在夜间各种高亮度异质热源中识别出森林火灾?首先,是解决微光数据频繁的饱和问题。由于植被密度随城市化进程的加快而降低,因此常用植被指数进行NTL去饱和处理,例如植被修正夜光城市指数(Vegetation Adjusted NTL Urban Index, VANUI)^[24]、人类居住指数(Human settlement Index, HSI)^[28]。其次,是火扰动目标区域的识别。基于地表温度随植被密度的增加而降低的原理,在植被覆盖度高的区域出现异常高温,这种偏离自然变化范围的异常现象被识别为火扰动,例如全球扰动指数(The MODIS Global Disturbance Index, MGDI)。因此,在上述指数构建的理论基础上,本文提

出了一种利用微光与红外波段组合构建的新指数—增强夜光火灾扰动指数(ENFDI),它可在夜间低照度条件下进行森林火灾遥感识别。

(1)ENFDI指数能增强森林火灾与城市灯光的光谱差异,提高微光遥感火灾识别能力。在微光波段NTL影像上,森林火灾与城市灯光像元之间难以区分。但在ENFDI反演结果上,森林火灾ENFDI明显高于城市热源区,且城市热源呈现明显的块状聚集分布。

(2)ENFDI指数能够有效降低NTL易饱和的影响。从潜在饱和区内火光亮度的差异性以及与森林火灾热异常识别的相关性两方面进行了对比分析,当火灾发生时,NTL曲线亮度值的变化不明显,而ENFDI能够明显的分辨出潜在饱和区内火光亮度的差异,增加了火灾像元的可区分性;ENFDI指数与中远红外亮温差的相关性 R 高达0.94~0.97,明显高于NTL与中远红外亮温差的相关性(0.82~0.83)。

(3)ENFDI不受月相变化的影响,在有无月光情况下均可进行夜间森林火灾遥感识别,该指数具有一定的稳定性。以2019年夜间燃烧的森林火灾为例,在有月光的条件下,基于ENFDI可识别出4月15日、4月18日发生在葫芦岛小虹螺山、沈阳棋盘山的森林火灾;在无月光的条件下,基于ENFDI反演结果锦州医巫闾山的森林火灾同样被识别。

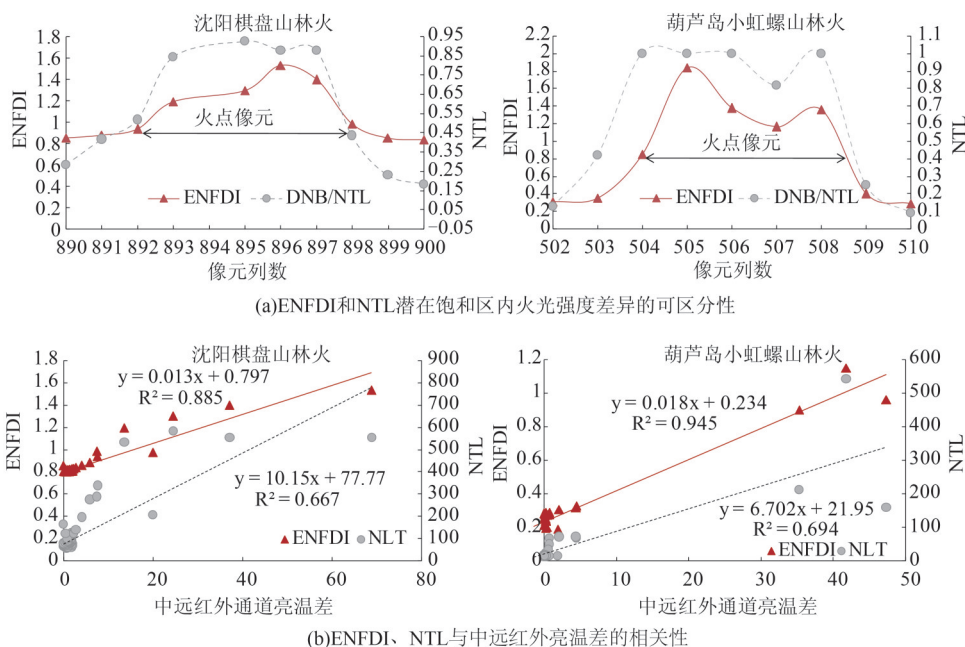


图6 沈阳、葫芦岛森林火灾ENFDI有效缓解NTL饱和性的比较

Fig. 6 Comparison of ENFDI's efficacies in mitigating NTL saturation across the Shenyang's and Huludao's forest fires

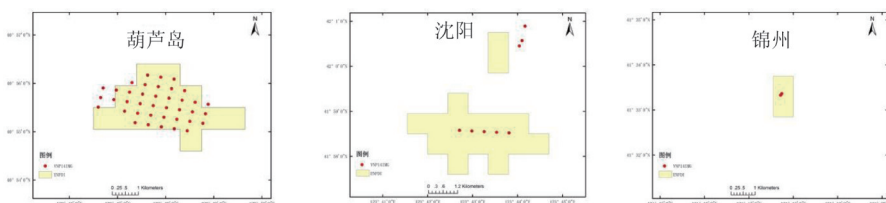


图7 ENFDI和VNP14IMG火灾定位对比

Fig. 7 Comparison of ENFDI and VNP14IMG in fire identification

(4)ENFDI识别的森林火灾与传统中红外波段相比精度更高。以燃烧时的过火面积为参考验证了二者火点像元识别精度,Tmir识别的范围偏小,精度为83.91%;ENFDI能够更清晰地识别出火点像元,精度为87.66%,ENFDI识别结果更接近真实火灾情况。

(5)ENFDI识别的森林火灾定位与VNP14IMG主动火灾产品基本吻合,定位偏差在628 m以内(图7),为进一步实现火灾像素级表征提供可行性参考。通过ENFDI提取的火灾像元(像元大小约 $628 \times 628 \text{ m}^2$)与空间分辨率为375 m的VNP14IMG火灾产品信息粗略地对比分析发现,二者定位误差在1个像元以内。这种误差产生的原因不单是识别方法的影响,而是由空间分辨率、投影方式等综合作用结果。

5 结论

综上所述,ENFDI指数对森林火灾的识别具有敏感性、稳定性和准确性。但是在火灾边缘,微光波段的辐射亮度和红外波段的亮度温度都有所降低,边缘疑似火灾像元与城市中心像元易出现混淆,ENFDI还存在很多改进空间。首先,ENFDI基于对火灾异常敏感的 $4 \mu\text{m}$ 中红外波段建立,如果利用火灾与背景像元($11 \mu\text{m}$)的亮温差构建,是否能够进一步提高ENFDI火灾识别能力,仍需进一步研究;其次,NDVI与NTL一样也存在易饱和的问题,而且森林火灾多发生在山区,未来可以研究将地形因素影响的植被指数代替NDVI,如地形调节植被指数(TAVI)、增强型植被指数(EVI)以及修正归一化植被指数(MNDVI)等^[29]。如何利用微光和红外波段获得更加可靠的森林火灾遥感识别结果,后期研究仍需继续完善。

References

[1] WU Jin-Wen, SUN Long-Yu, JI Rui-Peng, *et al.* Research progress and prospect of remote sensing on extracting burned areas information [J]. *Journal of Catastrophology* (武晋雯,孙龙彧,纪瑞鹏,等。火烧迹地信息遥感提取研究进展与展望灾害学),2020,**35**(04):151-156.

[2] BAI Ye, WANG Bo, WU Ying-Da, *et al.* A review of global forest fires in 2021 [J]. *Fire Science and Technology* (白夜,王博,武英达,等。2021年全球森林火灾综述.消防科学与技术),2022,**41**(05):705-709.

[3] LIU Ling-Ling. Heat wave swept across Europe, forest fires spread in many countries [N]. *China Coal News* (刘玲玲.热浪横扫欧洲多国林火蔓延.中国煤炭报),2022-07-26(007).

[4] Ichoku C, Kahn R, Chin M. Satellite contributions to the quantitative characterization of biomass burning for climate modeling [J]. *Atmospheric Research*, 2012, **111**(7):1-28.

[5] RAO Yue-Ming. Study on forest fire monitoring based on multi-source remote sensing data and inversion of canopy water content in fire scars [D]. Beijing Forestry University (饶月明.基于多源遥感数据的森林火灾监测及火烧迹地冠层含水量反演方法研究.北京林业大学),2020.

[6] Csiszar 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.

[7] Dozier J. A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1981, **11**(none):221-229.

[8] Flannigan M D, Haar T H. Forest fire monitoring using NOAA satellite AVHRR [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1986, **16**(5):975-982.

[9] Lee T F, Tag P M. Improved detection of hotspots using the AVHRR 3.7- μm Channel [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1990, **71**(12):1722-1730.

[10] 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.

[11] HU Shen-Sen, MA Shuo, JIANG Jun, *et al.* Research progress on radiation calibration and data application of spaceborne low-light imager [J]. *Acta Optics* (胡申森,马烁,江军,等。星载微光成像仪辐射定标与资料应用研究进展.光学学报),2021,**41**(15):9-23.

[12] LI Hai, LI Yang, ZUO Zheng-Rong. Detection of building area with complex background by night light remote sensing [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (李海,李洋,左峥嵘.复杂背景的夜晚遥感建筑区检测.红外与毫米波学报),2021,**40**(03):369-380.

[13] YU Bo-Lang, WANG Cong-Xiao, Gong Wen-kang, *et al.* Nighttime light remote sensing and urban studies: Data, methods, applications, and prospects [J]. *National Re-*

- mote Sensing Bulletin*(余柏菡,王丛笑,官文康,等。夜间灯光遥感与城市问题研究:数据、方法、应用和展望。*遥感学报*),2021,**25**(01):342-364.
- [14] LI De-Ren, LI Xi. An overview on data mining of nighttime light remote sensing [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*(李德仁,李熙。论夜光遥感数据挖掘。*测绘学报*),2015,**44**(06):591-601.
- [15] HU Xiao-Hua, LIU Song-Tao, PAN Zhen-Dong, *et al.* Progress in spaceborne shimmer detector and data application[J]. *Chinese Optics*(胡晓华,刘松涛,潘振东,等。星载微光探测仪器的发展及其数据应用。*中国光学*),2015,**8**(03):350-359.
- [16] National Satellite Meteorological Center. FY-3E Satellite. National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration[OL].(国家卫星气象中心。风云三号E星。中国气象局国家卫星气象中心).<http://www.nsmc.org.cn/nsmc/cn/satellite/FY3E.html>.
- [17] YU Yue, HU Xiu-Qing, MIN Min, *et al.* NPP/Visible-infrared image radiometer suite low-light image fusion algorithm for city lights in Mid-Eastern China[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*(余越,胡秀清,闵敏,等。NPP/VIIRS微光图像融合中国中东部城市灯光算法。*激光与光电子学进展*),2018,**55**(10):372-379.
- [18] Elvidge C, Zhizhin M, Hsu F C, *et al.* VIIRS nightfire: Satellite pyrometry at night[J]. *Remote Sensing*, 2013, **5**(9):4423-4449.
- [19] Liu Y, Hu C, Zhan W, *et al.* Identifying industrial heat sources using time-series of the VIIRS Nightfire product with an object-oriented approach[J]. *Remote Sensing of Environment*. 2018(none):347-365.
- [20] Zhizhin M, Matveev A, Ghosh T, *et al.* Measuring gas flaring in Russia with multispectral VIIRS nightfire[J]. *Remote Sensing*, 2021, **13**(16):3078-4007.
- [21] NASA. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) 750 m Active Fire Detection and Characterization Algorithm Theoretical Basis Document 1.0[R]. U.S.:2017
- [22] NASA. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) 375 m Active Fire Detection and Characterization Algorithm Theoretical Basis Document 1.0[R]. U.S.:2016
- [23] ZHENG Zi-Hao, CHEN Ying-Biao, WU Zhi-Feng, *et al.* Method to reduce saturation of DMSP/OLS nighttime light data based on UNL[J]. *Journal of Remote Sensing*(郑子豪,陈颖彪,吴志峰,等。单元路网长度的DMSP/OLS夜间灯光数据去饱和方法。*遥感学报*),2018,**22**(01):161-173.
- [24] Zhang Q, Schaaf C, Seto K C. The vegetation adjusted NTL urban index: A new approach to reduce saturation and increase variation in nighttime luminosity[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **129**(2):32-41.
- [25] Mildrexler D J, Zhao M, Running S W. Testing a MODIS Global Disturbance index across North America[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**(10):2103-2117.
- [26] ZHUO Li, ZHANG Xiao-Fan, ZHENG Jing, *et al.* An EVI-based method to reduce saturation of DMSP/OLS nighttime light data[J]. *Acta Geographica Sinica*(卓莉,张晓帆,郑璟,等。基于EVI指数的DMSP/OLS夜间灯光数据去饱和方法。*地理学报*),2015,**70**(08):1339-1350.
- [27] JIA Bin-Ying. Research on the spatiotemporal characteristics of forest fires in Liaoning Province from 2010 to 2019 [J]. *Liaoning Forestry Technology*(贾斌英。辽宁省2010-2019年森林火灾时空特征研究。*辽宁林业科技*),2021, **03**:35-38.
- [28] Lu D, Tian H, Zhou G, *et al.* Regional mapping of human settlements in southeastern China with multisensor remotely sensed data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **112**(9):3668-3679.
- [29] ZHANG Hui, ZHANG Ping-Heng, ZHOU Guo-Mo, *et al.* Advances in the studies on topographic effects of vegetation indices[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(张慧,李平衡,周国模,等。植被指数的地形效应研究进展。*应用生态学报*),2018,**29**(02):669-677.