

基于 FY-3D/MERSI-II 远红外数据的火情监测研究

郑伟, 陈洁, 唐世浩, 胡秀清, 刘诚

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要:风云三号 D 极轨气象卫星中分辨率成像光谱仪(FY-3D/MERSI-II)具有 250 m 分辨率的 10.8 μm 和 12 μm 波长的远红外通道,为气象卫星遥感火情应用提供更为丰富的数据源。文章研究了 FY-3D/MERSI-II 的 10.8 μm 远红外通道监测火情的特点,10.8 μm 远红外通道虽在光谱方面对高温热源探测灵敏度不如 FY-3D/MERSI-II 的 3.8 μm 中红外通道,但由于空间分辨率较 1 km 分辨率的中红外通道高 4 倍,因而对较大的火点有明显反映,火点探测能力较 1 km 分辨率远红外通道有明显提高。利用混合像元线性波谱分离方法计算,对于平均温度为 750 K,面积 400 m^2 的明火区,在 1 km 分辨率远红外通道像元引起的亮温增量约 0.47 K,而在 250 m 分辨率远红外通道像元引起的亮温增量约为 7.30 K,可与周边背景像元亮温形成较明显差异。利用 1 km 分辨率的中红外通道辨识火点范围,利用 250 m 分辨率的远红外通道进一步确定明火区位置,可将火点定位精度从公里级提高到百米级。利用该方法开展了森林草原火灾应用实例分析,基于 250 m 分辨率远红外通道确定的火点位置与实地考察信息吻合较好,说明了提出方法的有效性。多个应用实例表明,在反映大范围火场中较强火势区域位置和草原火灾明火线分布等方面,FY-3D/MERSI-II 远红外通道较中红外通道具有明显优势,可以更加精细化和准确的反映火情的空间分布,在火情监测方面具有实际应用价值。

关键词:风云气象卫星;远红外通道;中红外通道;火情监测

中图分类号:P2 **文献标识码:**A

Fire monitoring based on FY-3D/MERSI-II far-infrared data

ZHENG Wei, CHEN Jie, TANG Shi-Hao, HU Xiu-Qing, LIU Cheng
(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract: FY-3D/MERSI-II polar orbiting meteorological satellite has 250 m resolution in 10.8 and 12 μm wavelengths of far-infrared channels, which provide more abundant data sources for fire monitoring. The characteristics of fire monitoring in FY-3D/MERSI-II 10.8 μm far-infrared channel were studied. Although 10.8 μm far-infrared channel is far less sensitive than FY-3D/MERSI-II's 3.8 μm mid-infrared channel in the spectral aspect to high-temperature heat source detection, its spatial resolution is 4 times higher than that of 1 km mid-infrared channel, so it can clearly reflect larger fire points, and its fire detection ability is better than that of 1 km resolution far-infrared channel. There has been a marked improvement. Using mixed pixel linear spectral separation method, the brightness temperature increment caused by the open fire area with an average temperature of 750 K and an area of 400 m^2 in far infrared channel pixels at 1 km resolution is about 0.47 K, while that caused by the same fire condition in far infrared channel pixels at 250 m resolution is about 7.30 K, which is quite different from the brightness temperature of surrounding background pixels. The fire location accuracy can be improved from kilometer level to hundreds meter level by using 1 km resolution mid-infrared channel to identify the fire range and 250 m resolution far-infrared channel to further determine the open fire area. Based on the method proposed in this paper, an example of forest and grassland fire application is analyzed. The location of fire point determined by 250 m resolution far-infrared channel is in good agreement

收稿日期:2019-06-08,修回日期:2019-11-22

Received date:2019-06-08, Revised date:2019-11-22

基金项目:国家重点研发计划:全球气象卫星遥感动态监测、分析技术及定量应用方法及平台研究(2018YFC1506500)

Foundation items: National Key Research and Development Program of China "Development of Meteorological Satellite Remote Sensing Technology and Platform for Global Monitoring, Assessments and Applications"(2018YFC1506500)

作者简介(Biography):郑伟(1981—),男,蒙古族,内蒙古赤峰人,博士,正高级工程师。主要从事卫星遥感生态环境与灾害监测评估应用研究。E-mail:zhengw@ema.gov.cn

with the field investigation information, which shows the effectiveness of the proposed method. Several application examples showed that the FY-3D/MERSI far-infrared channel has obvious advantages over the mid-infrared channel in reflecting the location of the intense fire area and the distribution of the open fire line of grassland fire in large-scale fire field. It can reflect the spatial distribution of wild-fire more accurately, so it has application value in fire monitoring.

Key words: FengyYun meteorological satellite, far-infrared channel, mid-infrared channel, fire monitoring

PACS:93. 85. Pq, 89. 60. Gg, 07. 05. Pj

引言

森林草原火灾是破坏森林草原资源的重要灾害,具有突发性强、影响范围大、损失严重等特点,也会造成严重的空气污染,产生大量的有害气体,危害人类健康^[1]。气象卫星观测范围宽广、频次密,探测信息丰富,是监测森林草原火灾的重要手段。上世纪八十年代初,国内外即开始了利用气象卫星监测森林火灾的研究和应用^[2]。研发了多种火点自动判识方法,主要有多波段阈值法、上下文法(Contextual)等。多波段法主要根据野火发生时造成火点所在像元中红外通道温度升高,同时中红外与远红外通道亮温差异增大现象,设立阈值^[3]。多波段法不能适用不同季节、不同地区的环境条件,Contextual方法基于野火发生时,所在像元的中红外亮温及中红外与远红外波段亮温差异将高于邻近像元。Kaufman等在MODIS火点判识算法中提出contextual方法的主要条件^[4-5]。由于MODIS的林火探测算法在区域级应用中适应性差的问题,研究者根据东南亚热带雨林地区森林火灾特点,提出了基于烟羽掩膜的自适应窗口调节技术的火点探测改进算法^[6]。在建立长序列卫星遥感火点信息数据集中,通过对比多波段阈值法和contextual方法判识火点的精度统计,研究人员认为contextual方法的精度明显高于多波段阈值法,一定程度上解决了周边像元下垫面类型、植被覆盖度等与探测像元的差异对估算背景温度的影响^[3],在实际应用中,仍会出现太阳光反射等原因造成的误判和漏判问题。针对这些问题,在火点检测算法中增加了对云污染、荒漠区边界、海岸边界、太阳耀斑等的判识,以及对非火点像元的判断等条件^[7]。

由于气象卫星中红外通道对明火的高灵敏特点,以及远红外通道对明火灵敏度较中红外通道的显著差异,已有的气象卫星火情探测主要使用中红外通道,而与中红外通道相同分辨率的远红外通道主要作为背景温度计算参考以及过火区判识等使

用。利用中红外通道判识火点可以判断在该像元覆盖范围内有明火,但无法确定明火位于像元覆盖范围内的哪一位置。而极轨气象卫星空间分辨率为1公里,覆盖范围较大,在实际应用中,常需要了解更为精确的火点位置,即明火区位于中红外通道火点像元覆盖范围的哪一部分。新一代风云极轨气象卫星的发射为改善这一情况提供了可能。风云三号D星中分辨率成像光谱仪(FY-3D/MERSI-II)具有两个分辨率为250 m的远红外通道,波长分别为10.8 μm 和12 μm 。250 m分辨率远红外通道虽然在光谱方面对高温热源探测灵敏度远不如FY-3D/MERSI-II的3.8 μm 和4.05 μm 中红外通道,但由于空间分辨率较中红外通道高4倍,因而对较大的火点有明显反映,火点探测能力较1 km分辨率远红外通道明显提高。本文提出综合应用FY-3D/MERSI-II中红外和远红外通道判识火点方法,即:利用中红外通道(1 km)对高温热源的敏感特点判识火点范围,利用远红外通道(250 m)确定中红外通道火点像元覆盖范围中的明火区位置,可在一定条件下,将气象卫星遥感火点定位精度从公里级提高到百米级。同时,给出该方法的精度验证和应用实例。

1 方法

1.1 红外波段火点判识原理

FY-3D/MERSI-II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,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原理。

由于明火与其他地物的温度和辐射率相差数十倍甚至数百倍,因而可将含有明火的像元辐亮度看作是由明火区和非明火区的线性组合^[8-9]。

$$N_{mix} = P * N_{ih} + (1 - P) * N_{ibg} \quad , \quad (1)$$

式中 N_{mix} 为火点像元通道*i*辐亮度。 N_{ih} 、 N_{ibg} 分别为

明火区辐亮度和非明火区辐亮度。 P 为像元中的亚像元明火区面积占像元面积比例。

利用普朗克公式,对含有火点像元与非火点像元的亮温差异 ΔT 可由式(2)表述^[8]:

$$\Delta T_i = T_{imix} - T_{ib} = \frac{C_2 V_i}{\ln(1 + \frac{C_1 V_i^3}{N_{imix}})} - \frac{C_2 V_i}{\ln(1 + \frac{C_1 V_i^3}{N_{ib}})}, \quad (2)$$

式中 $\Delta T_i, T_{imix}, T_{ib}$ 分别为火点像元与背景亮温差异、通道 i 亮温、通道 i 背景亮温, N_{imix}, N_{ib} 分别为火点像元通道 i 辐亮度、背景辐亮度, V_i 为通道 i 的中心波数, $C_1=1.191\ 065\ 9 \times 10^{-5}\ \text{mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-4})$, $C_2=1.438\ 833\ \text{K}/\text{cm}^{-1}$ 。

基于FY-3D/MERSI-II的 $3.8\ \mu\text{m}$ 通道中心波数(2631.579)和 $10.8\ \mu\text{m}$ 通道中心波数(925.9259),假设背景温度290 K,亚像元明火区温度750 K,亚像元火点面积占像元面积比例从0.0001变化到0.005,将以上参数代入式(2),得到FY-3D/MIRSII-2中红外通道和远红外通道含有明火像元的亮温增量随亚像元火点面积增大变化曲线图1。图中可见,在相同空间分辨率条件下,明火区在中红外和远红外通道引起的亮温增量有显著差异。当亚像元火点面积比例为0.005时,在中红外通道引起的亮温增量约78.4K,而在远红外通道引起的亮温增量仅5.75 K,相差一个数量级。

由于FY-3D/MERSI-II $10.8\ \mu\text{m}$ 通道分辨率是 $3.8\ \mu\text{m}$ 通道的4倍,对于相同亚像元火点面积在 $10.8\ \mu\text{m}$ 通道像元的面积比例是 $3.8\ \mu\text{m}$ 通道的16倍,因而 $10.8\ \mu\text{m}$ 通道混合像元亮温增量与 $3.8\ \mu\text{m}$ 通道的差异明显缩小。将式(2)中远红外通道亚像元火点面积比例乘以16,使得相同的亚像元火点面积在中红外和远红外通道像元中具有相应的空间比例。将亚像元明火区温度750 K代入式(2),可得在明火区面积比例为0.0001时, $3.8\ \mu\text{m}$ 中红外通道的亮温增量约5.98 K, $10.8\ \mu\text{m}$ 远红外通道亮温增量约1.88 K。当明火区面积比例为0.0004, $3.8\ \mu\text{m}$ 中红外通道的亮温增量约18.72 K, $10.8\ \mu\text{m}$ 远红外通道亮温增量约7.32 K,此时远红外通道混合像元亮温将明显高于周围非火点像元。而当明火区面积比例为0.005,温度750K时, $3.8\ \mu\text{m}$ 中红外通道的亮温增量约78.4 K, $10.8\ \mu\text{m}$ 远红外通道亮温增量约71.37 K,与中红外通道的增量很接近。

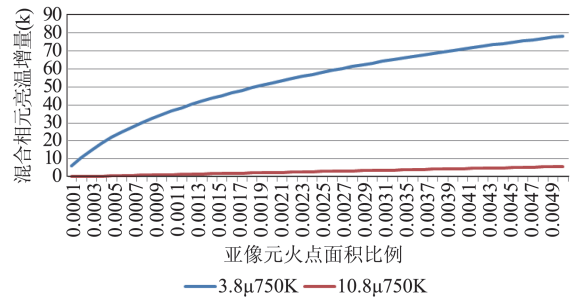


图1 FY-3D/MIRSII-2中红外通道(1km)和相同分辨率远红外通道混合像元亮温增量随亚像元火点面积增大变化曲线

Fig. 1 Brightness temperature increment of mixed pixels in FY-3D/MIRSII-2 mid-infrared channel (1km) and far-infrared channel (1km) variation curve with the increase of sub-pixel fire area

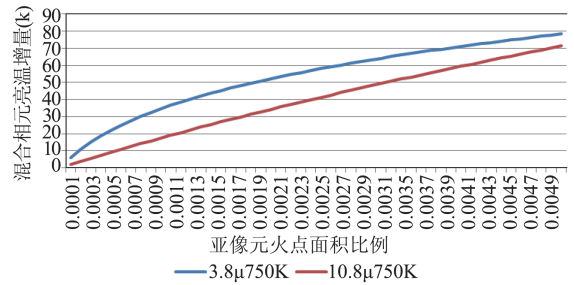


图2 FY3D/MIRSII-2中红外通道(1 km)和远红外通道(250 m)混合像元亮温增量随亚像元火点面积增大变化曲线

Fig. 2 Brightness temperature increment curve of FY-3D/MIRSII-2 mid-infrared channel (1km) and far-infrared channel (250m) mixed pixels with increasing sub-pixel fire area

1.2 中红外火点判识

利用中红外通道逐像元判识局域图像中的火点像元,当中红外通道满足以下条件时,判识并标记为火点像元,即:

$$T_{3.8\mu} \geq (T_{3.8\mu\text{BG}} + 4\delta T_{3.8\mu\text{BG}}) \text{ 且}$$

$$T_{3.8\mu-10.8\mu} \geq (T_{3.8\mu-10.8\mu\text{BG}} + 4\delta T_{3.8\mu-10.8\mu\text{BG}}) \quad (3)$$

式中: $T_{3.8\mu}$ 为中红外通道混合像元亮温, $T_{3.8\mu\text{BG}}$ 为中红外通道背景温度, $\delta T_{3.8\mu\text{BG}}$ 为中红外通道背景温度标准偏差; $T_{3.8\mu-10.8\mu}$ 为中红外通道和远红外通道亮温, $T_{3.8\mu-10.8\mu\text{BG}}$ 为中红外和远红外背景亮温差, $\delta T_{3.8\mu-10.8\mu\text{BG}}$ 为中红外和远红外背景亮温差的标准差。背景温度为探测像元未发生明火之前的温度,当探测像元覆盖范围内有明火发生后,卫星观测该像元的辐射率已含有明火信息,无法反映背景温度,因此背景温度由探测像元周边像元的平均值替代。计算背景温度选取的像元应尽量与探测像元的下垫面类型和植被覆盖度相同。对背景温度计算影响的主要因素是云区、太阳耀斑、疑似火点像元、水

体、荒漠区、不同植被覆盖度混杂区域等情况。在背景温度计算中,需要将这些因素去除,以获得最接近监测像元下垫面情况的邻域像元计算背景温度。云区像元判断可使用云检测产品;水体、荒漠区判断可使用土地利用数据;太阳耀斑区可使用耀斑角值,当耀斑角小于10度时,不做计算;疑似火点判断使用以下方法:

若探测像元周边邻域内的晴空植被像元满足以下条件,将其作为疑似高温像元:

$$T_{\text{MIR}} > (T_{\text{MIR_AVG}} + \Delta T_{\text{MIR}}) \text{ 且 } T_{\text{M-F}} > (T_{\text{M-F_AVG}} + 8 \text{ K}),$$

$$\text{或 } T_{\text{MIR}} > T_{\text{MIR_WM}}, \quad (4)$$

式中: $T_{\text{MIR_AVG}}$ 为探测像元中红外通道周边7×7像元中晴空指被像元亮度温度平均值, $T_{\text{M-F_AVG}}$ 为探测像元周边7×7像元中晴空植被像元中红外通道与远红外通道亮度温度差异平均值, ΔT_{MIR} 参考值为10 K, $T_{\text{MIR_WM}}$ 参考值为330 K。

1.3 远红外通道火点判识和精细化定位

FY-3D/MERSI-II 250 m 远红外通道对野火反映明显高于1 km分辨率远红外通道。使用远红外通道判识火点需结合中红外通道火点判识信息。在远红外通道判识火点的背景温度估算中,250 m分辨率远红外通道邻近像元亮温差异较1 km分辨率图像的邻近像元亮温差异明显增大,若使用中红外通道的背景像元选取方法,即统计远红外邻域内7×7像元亮温平均值估算背景温度,容易造成背景温度估算值偏大。本文提出远红外通道判识火点的背景温度估算方法,使用中红外通道火点像元覆盖范围内的远红外通道像元即可。

1 km分辨率的中红外通道判识并标记为火点的像元,火点的定位精度为公里级。中红外通道判识的火点信息为判识中红外通道覆盖范围内的远红外通道火点像元提供了必要条件,即在中红外火点像元覆盖范围内的16个远红外火点像元中,必定有一个或数个像元含有明火。以中红外通道判识的火点像元覆盖范围,作为250 m分辨率的远红外通道火点判识和背景温度统计计算的区域,逐像元判识区域内的远红外通道像元是否为火点。远红外通道火点判识条件为:

$$T_{10.8\mu} \geq T_{10.8\mu\text{BG}} + k_{10.8\mu} * \delta T_{10.8\mu\text{BG}}, \quad (5)$$

式中: $T_{10.8\mu}$ 为远红外通道混合像元亮温, $T_{10.8\mu\text{BG}}$ 为远红外通道背景温度的平均值,背景温度统计的区域为中红外通道判识的火点像元覆盖范围; $\delta T_{10.8\mu\text{BG}}$ 为远红外通道背景温度标准偏差,当 $\delta T_{10.8\mu\text{BG}}$ 小于1

K时取值为1 K。 $k_{10.8\mu}$ 为温度阈值系数,根据图2 FY-3D/MERSI-II 中红外通道(1 km)和远红外通道(250 m)混合像元亮温增量随亚像元火点面积增大变化曲线可知,达到1 km中红外火点判识阈值时,250 m分辨率远红外通道的增温幅度约为2 k,考虑到10.8 μm 通道受太阳辐射反射的影响很小,但由于其空间分辨率较高,对于不同类型下垫面混杂区,在太阳辐射照射下,相邻像元亮温仍可能有不同程度的差异,而夜间没有太阳辐射加热增温的影响。因此给出k的参考值,白天时 $k_{10.8\mu}=3$,夜间时 $k_{10.8\mu}=2$ 。

2 应用分析

2.1 远红外通道火点判识验证

2019年3月26日12时至15时期间,河南省鹤壁市发生一起山火,利用FY-3D/MERSI-II红外多光谱数据监测到这起山火,并利用火场实地考察确定的起燃位置信息,验证了远红外通道判识火点的精度。统计分析表明,结合中红外通道的火点覆盖范围信息,利用FY-3D/MERSI-II远红外通道监测火点空间范围精度明显高于仅使用中红外通道的监测精度。

在FY-3D/MERSI-II 2019年03月26日05:35的河南省鹤壁市山火监测图中可见(图3),中红外通道监测到2个像元(图3a,中红外、近红外和可见光火情监测合成图),远红外通道监测到4个像元(图3b,远红外、近红外和可见光火情监测合成图),占中红外火点像元覆盖范围(16*2个像元)的1/8,远红外火点像元位于两个中红外通道火点像元之间。远红外通道火点像元的位置和亮温见表1所示,其中火点像元编号从火点像元下行右端像元开始为1号,至左端像元为3号,上面的单独像元为4号。表1中还列出对该处山火起燃位置的实地考察信息。表1反映出,远红外通道判识的1号火点像元距实地考察起燃位置最近,距离约200 m,且该像元亮温较其他像元亮温不同程度偏低。3号火点像元亮温最高,较1号火点像元亮温偏高12 K,距1号火点像元距离约500 m。根据山火蔓延特点,3号火点像元应为卫星观测时火场蔓延前沿,为火势最强处,1号火点像元已处于火势减弱处,同时距实地考察起燃位置最近,因而起燃处位于1号火点像元覆盖范围内。1号火点像元亮温为313 K,较周边邻近非火点像元亮温偏高约8 K,达到火点判识阈值,由此验证了远红外通道判识火点的精度。另外,中红

外通道 2 个火点像元覆盖范围约 2 km^2 , 远红外 4 个火点像元的覆盖面积约 0.25 km^2 , 对比中红外和远红外火点像元面积可见, 结合中红外通道火点范围信息, 利用远红外通道监测火点空间范围精度明显高于仅使用中红外通道的监测精度。

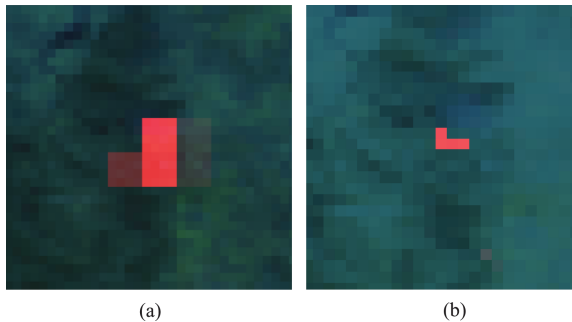


图3 FY3-D/MERSI-II 河南省鹤壁市山火监测图 2019年03月26日05:35(a)中红外、近红外和可见光合成图(b)远红外、近红外和可见光合成图

Fig.3 FY-3D/MERSI-II Mountain Fire Monitoring in Hebi City of Henan Province at 05:35 of March 26, 2019 (a) Mid-infrared, near-infrared and visible composite image (b) Far-infrared, near-infrared and visible composite image

2.2 火场明火区精细化定位

图4为FY-3D/MERSI-II 2019年4月30日18:30俄罗斯远东地区局部火情监测图,图4.a为FY-3D/MERSI-II 中红外、远红外和可见光RGB合成。图中红色为中红外通道判识的火点像元,图中间的白点为远红外通道判识的火点像元,图4.b为远红

外通道图像,图中白点为火点像元。图4.a中,达到判识阈值的中红外通道火点像元共有5个,面积约 3.854 km^2 , 经度范围: $116.27^\circ \sim 116.30^\circ$, 纬度范围: $51.37^\circ \sim 51.35^\circ$ 。而远红外通道仅一个火点像元,面积约 0.048 km^2 。位于东经 116.29° , 北纬 51.36° , 通过远红外通道的判断,可以使得明火区的定位精度达到 250 m , 较仅用中红外判断定位精度提高了4倍。

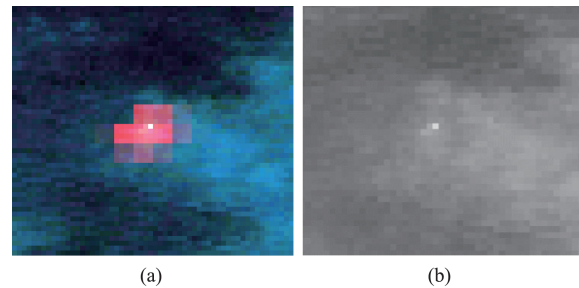


图4 FY-3D/MERSI-II 俄罗斯远东地区局部火情监测图 2019年4月30日18:30(a)中红外、远红外和可见光合成图(b)远红外通道图

Fig.4 Local fire monitoring in Russian Far East Region based on FY-3D/MERSI-II at 18:30 of April 30, 2019 (a) Mid-infrared, far-infrared and visible composite image (b) Far-infrared image

表2列出中红外和远红外通道火区范围、面积、距离长度等信息,可直观看出远红外通道在较强火点定位精度明显高于中红外通道。

2.3 大范围火区中火势较强区域的精细化定位

在较大火点时,仅用中红外通道监测火点,会

表1 FY-3D/MERSI-II 远红外通道河南省鹤壁市山火监测和火场实地考察起燃位置信息表

Table 1 FY-3D/MERSI-II far-infrared channel fire monitoring and field investigation location information of Hebi City, Henan Province

火点编号	卫星监测火点位置		卫星火点温度(K)	与实测起燃点1距离		与实测起燃点2距离	
	经度	纬度		经度距离	纬度距离	经度距离	纬度距离
1	114.0995°	35.9765°	313	0.0024°	0.0008°	0.0024°	0.0008°
2	114.097°	35.9765°	323	0.0024°	0.0033°	0.0024°	0.0033°
3	114.0945°	35.9765°	325	0.0024°	0.0058°	0.0024°	0.0058°
4	114.0945°	35.9790°	315	0.0049°	0.0058°	0.0049°	0.0058°

实地考察起燃位置1经度: 114.1003° , 纬度: 35.9741° 。实地考察起燃位置2经度: 114.1004° , 纬度: 35.9741° 。

表2 FY3D/MERSI-II(2019年4月30日18:30)俄罗斯远东地区火点中红外、远红外火点信息统计

Table 2 Local fire statistics in Russian Far East Region based on FY-3D/MERSI-II at 18:30 of April 30, 2019

通道	像元个数	面积(km^2)	东西范围	东西距离(km)	南北范围	南北距离(km)
中红外火点	5	3.854	$116.27^\circ \sim 116.30^\circ$	2.081	$51.37^\circ \sim 51.35^\circ$	2.223
远红外火点	1	0.048	$116.29^\circ \sim 116.2925^\circ$	0.175	$51.36^\circ \sim 51.3625^\circ$	0.277

出现很多像元达到火点判识阈值。从火情多通道合成图显示效果上,以及给出的火点定位经纬度信息上,都会出现明显大于实际火灾发生区域的卫星遥感监测结果,明显高估了火场范围,影响了火点监测精度。通过远红外通道信息的加入,可以明显改善火情多通道合成图显示效果,进一步突出大范围火场中火势较强区域的相对精确位置。图5为FY-3D/MERSI-II 2019年4月30日18:30俄罗斯远东地区局部火情监测图。对比图5. a和图5. b可见,中红外和远红外显示的火点像元空间范围有很大差异。在图5. a中红外通道判识的A火区中,远红外通道显示火势较强的火区集中在中红外通道大片火点像元的中部及西北部(图中1,2,3标记处)。中红外通道判识的火点像元约80个,覆盖范围约61.671 km²,经度范围为116.06°~116.2°,距离约9.712 km;纬度范围为51.26°~51.2°,距离约6.668 km。而远红外通道反映较强的明火区集中在约10个中红外火点像元内,三个火点经纬度范围分别为:火点1经度范围:116.12°~116.1425°,距离约1.561 km,纬度范围:51.23°~51.2425°,距离约1.389 km;火点2经度范围:116.155°~116.1725°,距离约1.213 km,纬度范围:51.22°~51.23°,距离约1.111 km;火点3经度范围:116.0725°~116.0825°,距离约0.673 km,纬度范围:51.25°~51.2525°,距离约0.277 km。三个火点面积分别为1.06 km²,0.723 km²,0.241 km²。

在中红外通道判识的B火区中,远红外通道显示火势较强的火区集中在中红外通道火点像元群的中部(图中标记4)。中红外通道判识的火点像元约22个,覆盖范围约16.96 km²,经度范围:116.06°~116.11°,距离约3.468 km,纬度范围:51.28°~

51.32°,距离约4.445 km。而远红外通道反映较强的明火区有9个像元集中在约3个中红外火点像元内,火点经度范围:116.0725°~116.09°,距离约1.214 km,纬度范围:51.2975°~51.305°,距离约0.825 km;火点面积为0.434 km²。

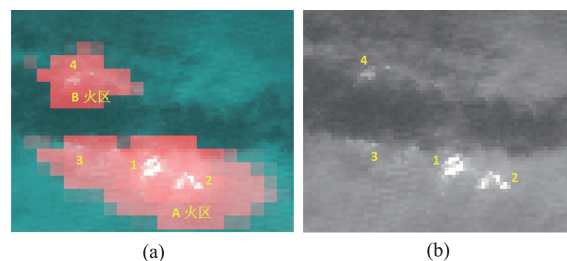


图5 FY-3D/MERSI-II俄罗斯远东地区火情监测图2019年4月30日18:30(a)中红外、远红外和可见光合成图(b)远红外通道图

Fig. 5 Fire monitoring in Russian Far East Region Figure based on FY-3D/MERSI-II at 18:30 of April 30, 2019(a)Mid-infrared, near-infrared and visible composite image (b)far-infrared image

表3和表4分别列出火区A和火区B的中红外和远红外通道火区范围、面积、距离长度等信息,对比可见,远红外通道在较强火点定位和面积估算方面精度明显高于中红外通道。

2.4 草原火灾明火线分布的精细化定位与显示

草原火的火线宽度一般仅数米至数十米。1 km分辨率中红外通道很难反映草原火线的较精确位置。利用250 m分辨率的FY-3D/MERSI-II远红外通道监测草原火线位置精度较使用中红外通道明显提高。

在利用FY-3D/MERSI-II 2019年4月20日4:25分资料对境外草原火监测中,远红外通道显示的草

表3 火区A中红外、远红外通道火点信息统计

Table 3 Mid-infrared and far-infrared fire information statistics in fire area A

通道	像元个数	面积(km ²)	东西范围	东西距离(km)	南北范围	南北距离(km)
中红外	80	61.671	116.06°~116.2°E	9.712	51.2°~51.26°N	6.668
远红外火点1	22	1.06	116.12°~116.1425°E	1.561	51.23°~51.2425°N	1.389
远红外火点2	15	0.723	116.155°~116.1725°E	1.213	51.22°~51.23°N	1.111
远红外火点3	5	0.241	116.07°~116.0825°E	0.693	51.25°~51.2525°N	0.277

表4 火区B中红外、远红外火点通道火点信息统计

Table 4 Mid-infrared and far-infrared fire information statistics in fire area B

通道	像元个数	面积(km ²)	东西范围	东西距离(km)	南北范围	南北距离(km)
中红外火点	22	16.96	116.06°~116.11°	3.468	51.28°~51.32°	4.445
远红外火点	9	0.434	116.0725°~116.09°	1.214	51.2975°~51.305°	0.825

原火场明火线宽度一般仅1到2个像元(250 m)(图6中箭头所指处),仅最右面箭头所指火线宽度达3个像元(可能是由于当地风速较大以及草场覆盖密度较高所致)。而在中红外通道图像上火线有2个以上像元(1 km),宽度约2公里以上,最右面火线达4个像元(图7)。由于草原上可燃物载量较低,草原火灾的明火线一般仅数米或数十米宽(草原火线宽度一般受风速影响较大),草原火场的燃烧区(即炭火区)范围较小且维持时间短,卫星观测的草原火主要是火线信息,因而远红外通道监测的草原火信息更加符合草原火场的实际特点。对比FY-3D/MERSI-II远红外、近红外和可见光合成图(图8),中红外、近红外和可见光合成图(图9)可见,远红外通道反映的草原火线空间分布较中红外通道更加精细和准确。

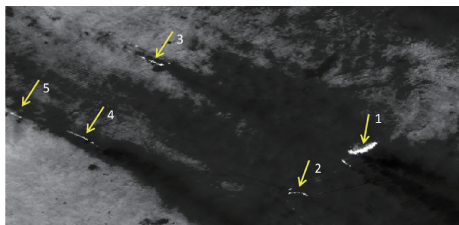


图6 FY-3D/MERSI-II 10.8 μm 草原火图像 2019年04月20日04:25

Fig. 6 FY-3D/MERSI-II 10.8 μm grassland fire image at 04:25 of April 20, 2019

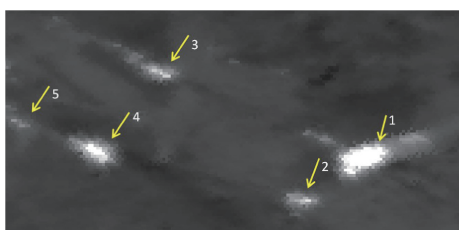


图7 FY-3D/MERSI-II 3.8 μm 草原火图像 2019年04月20日04:25

Fig. 7 FY-3D/MERSI-II 3.8 μm grassland fire image at 04:25 of April 20, 2019

表5列出对图6~9中各火区火线宽度估算值,对比可见,远红外通道对草原明火火线宽度估算精

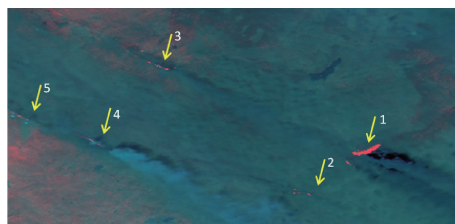


图8 FY-3D/MERSI-II 10.8 μm , 0.86 μm 和 0.65 μm 合成图 2019年04月20日04:25

Fig. 8 FY-3D/MERSI-II 10.8 μm , 0.86 μm and 0.65 μm composite image at 04:25 of April 20, 2019

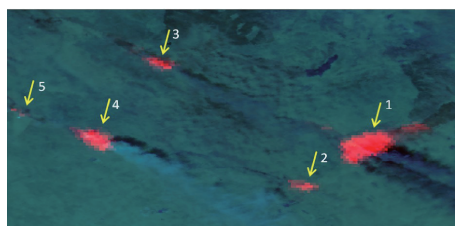


图9 FY-3D/MERSI-II 3.8 μm , 0.86 μm 和 0.65 μm 合成图 2019年04月20日04:25

Fig. 9 FY-3D/MERSI-II 3.8 μm , 0.86 μm and 0.65 μm composite image at 04:25 of April 20, 2019

度较中红外通道高3~4倍以上。

3 讨论与总结

以往气象卫星火情监测主要使用1 km分辨率的中红外通道探测火点。在日常气象卫星火情监测业务中,探测的火点经常包含数个或数十个甚至成百个像元,覆盖范围达数平方公里、或数十平方公里,甚至上百平方公里。而实际的明火区面积远小于像元的覆盖范围。虽然利用亚像元火点面积估算方法可以估算在火点像元中的明火区面积,但无法估测在1 km分辨率像元中的具体位置。在地形较复杂地区,1 km距离有可能遮挡视线,影响查找火场。尤其对于数十或上百平方公里的较大范围火场,火势较强处一般仅在火场的局部,1 km分辨率很难反映较强火势的具体位置。通过本文提出的FY-3D/MERSI-II红外多光谱火点探测方法,可利用远红外通道进一步确定火点的较精确位置,火点定位精度可达250 m像元量级,因而可将气象

表5 FY3D/MERSI-II (2019年04月20日04:25)中红外和远红外通道草原火线宽度估算信息统计

Table 5 FY-3D/MERSI-II mid-infrared and far-infrared fire line estimation information statistics at 04:25 of April 20, 2019

火线宽度(m)	火线1	火线2	火线3	火线4	火线5
中红外通道	3 000-4 000 m	1 000 m	1 000 m	1 000-2 000 m	1 000 m
远红外通道	250-500 m	250 m	250 m	250 m	250 m

卫星火点探测定位精度从公里级提高到百米级。同时,远红外通道基本不受太阳辐射反射干扰,可以较好反映相邻火点像元火势强弱的差异,因而在一定条件下(卫星在火灾发生后较短时间内观测),可用于判断火灾的起燃位置。

值得注意的是,由于白天太阳辐射加热增温和夜间水体温度高于陆地等现象,单独使用远红外通道判识火点,有可能出现误判。通过参考中红外通道的亮温增量信息,可有效避免对温度较高区当成火点的误判。另外,虽然FY-3D/MERSI-II的250 m分辨率远红外通道由于分辨率提高可探测到较小火点,但由于在中红外像元内的明火区在远红外通道图像中有可能在跨像元位置,造成远红外通道火点像元与周边像元的亮温差异降低,达不到火点判识阈值,因此中红外通道探测到的微小火点(刚达到火点判识阈值),远红外通道可能反应并不明显。

总体而言,FY-3D/MERSI-II的250 m分辨率远红外通道为改进1 km分辨率数据难以确定火点像元内火场具体位置的问题提供了有效的支持。

References

- [1] HE Bao-Hua, CHEN Liang-Fu, TAO Jin-Hua et al. A contextual fire detection algorithm based on observation geometry for HJ-1B-IRS[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (贺宝华, 陈良富, 陶金花, 等. 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*.) 2011, **30**(2): 104-109.
- [2] MATSON M, SCHNEIDER S R. Fire detection using the NOAA-Series satellite[R]. NOAA Technical Report NESDIS 7, 1984.
- [3] Fuchs E. M. Fire monitoring—the uses of medium resolution satellites (AVHRR, MODIS, TET) for long time series processing and the implementation in user driven application and services[R]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015, XL-7/W3 (7): 797-804
- [4] KAUFMAN Y J, Kleidman R, King M D. SCAR-B. Fires in the Tropics: properties and remote sensing from EOS-MODIS [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**: 893-02. (DOI: 10.1029/98jd02460)
- [5] LIU Yu-Jie, YANG Zhong-Dong. *The principle and arithmetic of MODIS data* [M]. Beijing: Science Press. 2001. (刘玉洁 杨忠东. MODIS 遥感信息处理原理与算法. 科学出版社, 北京. 2001)
- [6] PENG Guang-Xiong, SHENG Wei, HU De-Yong, et al. Method to identify forest fire based on smoke plumes mask by using MODIS data [J]. *J. Infrared Millim. Waves*. (彭光雄, 沈蔚, 胡德勇, 等. 基于烟羽掩膜的森林火点 MODIS 探测方法研究. *红外与毫米波学报*) 2008, **27** (3): 185-189.
- [7] LOUIS Giglio, JACQUES Desclotres, CHRISTOPHER O. JUSTICE, et al. An Enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*. 2003, **87**: 273 - 282. (DOI: 10.1016/s0034-4257(03)00184-6)
- [8] DOZIER, J. A method for satellite identification of surface temperature fields of sub-pixel resolution [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1982, **11**: 221-229.
- [9] LIU Cheng, LI Ya-jun, ZHAO Chang-Hai, et al. The method of evaluating sub-pixel size and temperature of fire spot in AVHRR data [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, (刘诚, 李亚君, 赵长海, 等. 气象卫星亚像元火点面积和亮温估算方法. *应用气象学报*) 2004, **15** (3): 273-280.