

文章编号: 1672-8785(2021)09-0030-12

## 红外通道空间分辨率对火点 监测应用的影响分析

李亚君 郑 伟\* 陈 洁 唐世浩 刘 诚

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

**摘 要:** 目前基于卫星遥感的火点探测主要采用千米级分辨率的中红外波段数据, 而对红外各波段火点探测灵敏度的定量研究很少, 不利于充分发挥红外波段信息在火情监测中的作用。首次利用混合像元分解方法来定量分析分辨率为 150 m、300 m 和 1 km 的各红外波段在火点监测应用中的差异。结果表明, 150 m 分辨率中红外通道比 1 km 分辨率通道的火点探测灵敏度高 30 倍左右; 300 m 分辨率远红外通道可探测百平方米量级的火点; 150 m 分辨率短波红外通道对高强度明火区反应明显。另外还将气象卫星 1 km 分辨率以及环境减灾星 150 m、300 m 分辨率红外数据用于 2009 年春季黑龙江省逊克县林火和夏季安徽省秸秆焚烧火点的监测个例, 从而验证了上述分析结论。结果表明, 通过提高红外波段的分辨率, 可以明显提升卫星遥感在微小火点探测、火场动态监测以及火势评估等方面的应用能力。

**关键词:** 卫星遥感; 红外波段; 火点探测; 灵敏度; 定量分析

中图分类号: P2 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.09.005

## Effect Analysis of Spatial Resolution of Infrared Channels on Fire Point Monitoring Application

LI Ya-jun, ZHENG Wei\*, CHEN Jie, TANG Shi-hao, LIU Cheng

(National Satellite Meteorological Satellite, Beijing 100081, China)

**Abstract:** At present, fire detection based on satellite remote sensing mainly use the mid-infrared band data with the resolution of kilometer level, but the quantitative research on the detection sensitivity of different infrared bands is very few. This is not conducive to give full play to the role of infrared band information in fire monitoring. In this paper, the mixed pixel decomposition method is used for the first time to quantitatively analyze the differences of different infrared bands with resolution of 150 m, 300 m and 1 km in the application of fire spot monitoring. The results show that the sensitivity of the mid-infrared channel with a resolution of 150 m is about 30 times higher than that of the channel with a resolution of 1 km. The far-infrared channel with the resolution of 300 m can detect the fire point of 100 square meters level and the short-wave infrared channel with a resolution of 150 m has obvious response to high intensity open fire are-

收稿日期: 2021-07-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1506500)

作者简介: 李亚君(1964-), 男, 北京人, 工程师, 主要从事卫星遥感地表灾害和生态环境监测应用研究。

\*通讯作者: E-mail: zhengw@cma.gov.cn

a. In this paper, the infrared data of meteorological satellite with a resolution of 1 km and environmental disaster mitigation satellite with a resolution of 150 m as well as 300 m are used to monitor the forest fire in Xunke County of Heilongjiang province in spring and straw burning in Anhui province in summer of 2009, so as to verify the conclusions above. The results show that improving the resolution of infrared band obviously improves the application ability of satellite remote sensing in very small fire spot detection, fire dynamic monitoring, and fire condition assessment.

**Key words:** satellite remote sensing; infrared band; fire point detection; sensitivity; quantitative analyze

## 0 引言

20 世纪 80 年代初, 国内外就开始了利用气象卫星监测森林火灾的研究和应用<sup>[1]</sup>。在 1987 年的大兴安岭特大森林火灾中, 国家卫星气象中心利用气象卫星对大火进行了全过程的监测, 在扑火战斗中发挥了重要作用<sup>[2]</sup>。这使得卫星遥感技术在森林草原火灾、秸秆焚烧监测方面的重要作用得到了广泛关注。气象卫星资料具有成像范围广、观测频次高、观测信息丰富等特点, 因此在大范围、快速探测火点以及动态监测等方面优势明显。

多年来, 国内外有许多关于利用气象卫星和 MODIS 数据判识火点的研究<sup>[3-8]</sup>。Kaufman Y J 在 MODIS 火点监测中提出上下文火点判识方法<sup>[9]</sup>, 为许多遥感应用部门提供了参考。他们在此基础上进行了相关改进<sup>[10-11]</sup>。Dozier J 提出了基于中红外和远红外波段对高温目标辐射响应差异特点的亚像元火点面积和温度估算模型<sup>[12]</sup>。刘诚等人在此基础上用牛顿迭代法估算亚像元火点面积和温度<sup>[13-14]</sup>, 并提出一种通过单通道估算亚像元火点面积的方法<sup>[15]</sup>。但是在实际应用中, 用于火情探测的千米级空间分辨率的红外通道也存在小面积明火点探测灵敏度不够、火点定位精度不高的问题。我国的 GF-4 号卫星具有分辨率为 400 m 的中红外通道, 在火情监测中发挥了重要作用。哨兵 2 号和 Landsat-8 卫星具有高分辨率的短波红外通道, 在火情监测方面也有很多应用<sup>[16]</sup>。但是它们的红外通道设置较为单一、重复周期长等问题不利于大范围、高效快速的业务化应用。

对于森林草原火灾这种影响范围大、时空与强度动态变化快的自然灾害现象, 卫星遥感不仅可以及时发现火源, 而且还可在宏

观监测火场动态变化、评估火势等方面发挥不可替代的作用。由于野火具有时空和强度发展迅速的特点, 过去关于卫星遥感火点探测的应用和研究主要基于高观测频次气象卫星的分辨率为 1 km 的红外通道数据, 且以 3.5~4  $\mu\text{m}$  波长的中红外通道为主。中红外通道虽然对高温热源敏感, 但在火情监测方面有一定的局限性。比如: 亮温容易饱和, 影响对火势的评估; 易受太阳辐射反射的干扰, 尤其在耀斑区难以使用。而远红外和短波红外通道则可在这两方面予以弥补。比如: 远红外通道的亮温饱和上限远高于中红外通道, 且不受太阳辐射影响; 根据维恩定律, 火焰火的辐射峰值波长更接近于短波红外波段, 可用于评估高强度火势。然而受空间分辨率的限制, 在分辨率为 1 km 的数据条件下, 这两个通道在野火监测方面的作用都很难体现。因此, 关于远红外和短波红外通道在火点探测方面的应用研究很少<sup>[17]</sup>。此外, 空间分辨率对红外各通道火点监测的影响研究也很少, 不利于充分发挥红外信息在卫星遥感火点监测方面的作用。

我国环境减灾星的红外通道分辨率较气象卫星明显提高。环境减灾 B 星的红外相机(HJ-1B/IRS)具有分辨率为 150 m 的中红外和短波红外通道以及分辨率为 300 m 的远红外通道<sup>[9]</sup>, 为研究空间分辨率对红外各通道火点监测的影响提供了数据条件。目前, 关于环境减灾星火点探测的应用研究仍以中红外通道为主<sup>[18]</sup>。远红外通道仅用于背景温度估算及云判识, 且短波红外通道的火点探测应用研究也未见报道。因此, 红外各通道在火点监测方面的综合应用能力没有得到较高的重视。

表 1 HJ-1B/IRS 各通道的主要参数

| 通道 | 光谱范围/ $\mu\text{m}$ | 中心波长/ $\mu\text{m}$ | 波段   | 空间分辨率/m | 幅宽/km |
|----|---------------------|---------------------|------|---------|-------|
| 1  | 0.75~1.10           | 0.9                 | 近红外  | 150     | 720   |
| 2  | 1.55~1.75           | 1.65                | 短波红外 | 150     | 720   |
| 3  | 3.50~3.90           | 3.72                | 中红外  | 150     | 720   |
| 4  | 10.5~12.5           | 11.58               | 远红外  | 300     | 720   |

本文将 HJ-1B/IRS 的 150 m、300 m 分辨率数据和气象卫星的 1 km 分辨率数据作为数据源, 通过用混合像元线性分解方法定量分析不同空间分辨率的短波红外、中红外和远红外通道对火点探测灵敏度的差异, 研究了红外通道的空间分辨率对火情监测应用的影响, 且利用气象卫星和环境减灾星 2009 年春季黑龙江省逊克县林火和夏季安徽省秸秆焚烧火点监测个例来验证分析结论。结果表明, 通过提高红外通道(包括中红外、远红外和短波红外)的空间分辨率可对卫星遥感火点探测灵敏度、火场动态监测及火势评估产生明显的改进效果。

本文首次给出了提高中红外、远红外、短波红外通道分辨率对卫星遥感火点探测灵敏度、火势评估等方面影响的定量分析, 为发展具有大范围、高频次、多波段、高空间分辨率观测能力的红外卫星遥感技术以及针对野火监测应用的卫星传感器通道设计提供了依据, 同时也为推广卫星遥感红外多波段在森林草原火灾、秸秆焚烧火点监测中的综合应用提供了参考信息。

## 1 卫星遥感火点探测原理

根据维恩位移定律,  $T \cdot \lambda_{\text{max}} = 2897.8(\text{K} \cdot \mu\text{m})$ 。黑体温度  $T$  与辐射峰值波长  $\lambda_{\text{max}}$  成反比, 即温度愈高, 辐射峰值波长愈小。常温(约 300 K)地表辐射峰值波长靠近 11  $\mu\text{m}$  左右的远红外通道。森林草原火场温度一般在 600~1200 K, 其热辐射峰值波长靠近 3.5~4.0  $\mu\text{m}$  的中红外通道。因此, 该通道对森林草原火灾及秸秆焚烧火点十分敏感。

可用于火情监测的卫星遥感仪器一般均有中红外、远红外和短波红外通道。HJ-1B/

IRS 有近红外、短波红外、中红外和远红外等四个通道, 其波长与分辨率为 1 km 的极轨气象卫星红外通道的波长相近。表 1 列出了 HJ-1B/IRS 仪器的主要参数。

图 1 所示为根据普朗克黑体辐射公式计算的不同温度黑体分谱辐射率与波长  $\lambda$  的关系曲线。可以看出, 地表常温(约 300 K)辐射峰值波长在 HJ/IRS 通道 4 的波长范围左右。当温度升高尤其是超过 500 K 后, 辐射峰值波长迅速移向通道 3 的波长范围。当温度高于 900 K 后, 辐射峰值波长靠近 HJ/IRS 通道 2 的波长范围。同时也可以看到, 当温度增高时, 随着总发射本领的增强, 各波长相应的辐射率也有所增加。

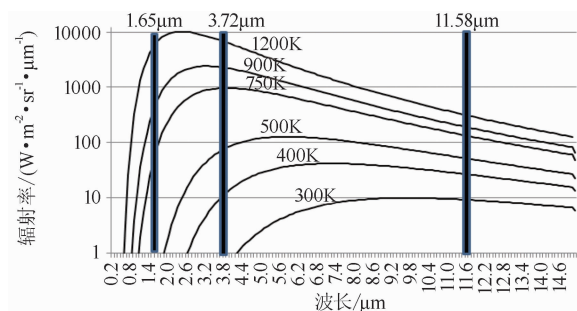


图 1 普朗克黑体辐射率曲线

即便是分辨率为 150 m 的像元, 其覆盖面积也在 22500  $\text{m}^2$  左右。而森林草原火场极少有在如此大的范围内同时燃烧的情况。因此, 覆盖火场的像元可看作含有火场的混合像元。根据混合像元线性分解方法, 在不考虑大气影响的条件下, 红外通道视场的辐射能量为像元内各部分物体辐射能量的线性组合, 即像元内各类地物辐亮度按面积占比的加权平均:

$$L_t = \left( \sum_{i=1}^n \Delta S_i L_{Ti} \right) / S \quad (1)$$

式中,  $L_i$  为卫星观测到的像元辐亮度,  $t$  为辐亮度  $L_i$  对应的等效黑体温度,  $\Delta S_i$  为像元中第  $i$  个子区的面积,  $L_{T_i}$  为该子区的辐射率(单位为  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ ),  $T_i$  为该子区的温度,  $S$  为像元总面积。

野火发生后, 火场温度一般为  $600\sim 1200\text{ K}$ (甚至更高)。从图 1 中可以看出, 火场(温度为  $600\sim 1200\text{ K}$ )在中红外波段的辐亮度高出地表常温( $300\text{ K}$ 左右)数百倍甚至上千倍。因此, 可将含有火点的像元看作仅由火区和非火区两类端元组成的混合像元。Dozier J 指出<sup>[12]</sup>, 含有火区的混合像元的辐亮度可表述为

$$L_{mix} = P \cdot L_{ft} + (1-P) \cdot L_{bg}$$

$$= P \cdot \frac{C_1 \lambda_i^{-5}}{\pi(e^{C_2/\lambda_i T_i} - 1)} + (1-P) \cdot \frac{C_1 \lambda_i^{-5}}{\pi(e^{C_2/\lambda_i T_{bg}} - 1)} \quad (2)$$

式中,  $L_{mix}$  为 HJ 红外通道混合像元的辐亮度,  $P$  为亚像元火点(即火区)面积占像元面积的百分比,  $L_{ft}$  为亚像元火点的辐射率,  $L_{bg}$  为火点周围背景的辐射率,  $T_{ft}$  为亚像元火点温度,  $T_{bg}$  为背景温度,  $\lambda_i$  为中心波长,  $C_1 = 1.191043 \times 10^8 \text{ W}\cdot\mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ ,  $C_2 = 1.438768 \times 10^4 \mu\text{m}\cdot\text{K}$ 。

判识火点像元的主要标准是被探测像元的亮温是否异常高于周边像元(假设两者具有相同的下垫面类型)。设含有火场的混合像元亮温为  $T_{mix}$ , 背景像元亮温为  $T_{bg}$ , 火场温度为  $T_{ft}$ , 通道  $i$  的混合像元与背景像元的亮温差异为  $\Delta T_i$ , 则

$$\Delta T_i = T_{mix} - T_{bg}$$

$$= \frac{C_2}{\lambda_i \ln\left(1 + \frac{C_1}{\pi \lambda_i^5 L_{mix}}\right)} - \frac{C_2}{\lambda_i \ln\left(1 + \frac{C_1}{\pi \lambda_i^5 L_{bg}}\right)} \quad (3)$$

图 2 所示为根据式(3)制作的  $3.72\ \mu\text{m}$  和  $11.58\ \mu\text{m}$  通道的混合像元亮温增量随亚像元火点面积占比的变化曲线。其中, 火点温度分别为  $750\text{ K}$ 、 $900\text{ K}$  和  $1200\text{ K}$ , 背景温度为  $300\text{ K}$ 。由图 2 可见, 即使火点面积很小,

也会引起含有火点的中红外像元亮温迅速升高。图 2 中的数据显, 当亚像元火点面积占比仅为  $0.01\%$  且火点温度分别为  $750\text{ K}$ 、 $900\text{ K}$  和  $1200\text{ K}$  时, 中红外通道的混合像元亮温增量分别为  $5\text{ K}$ 、 $11\text{ K}$  和  $25\text{ K}$ 。而  $11.58\ \mu\text{m}$  远红外通道的相应增量均不足  $1\text{ K}$ 。该现象说明, 可以利用含有火点的中红外通道像元亮温以及中、远红外亮温之差与周边像元亮温差异的特点来判识火点信息。

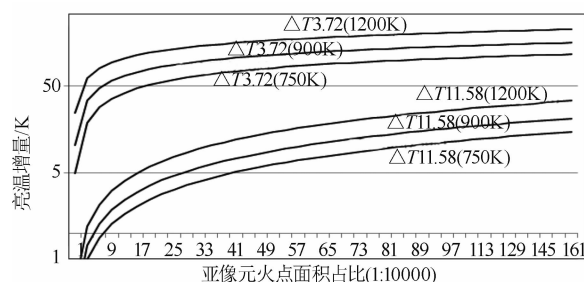


图 2  $3.72\ \mu\text{m}$  和  $11.58\ \mu\text{m}$  通道的混合像元亮温增量随亚像元火点面积占比的变化曲线

波长为  $1.65\ \mu\text{m}$  的短波红外波段主要反射太阳辐射。图 3 所示为利用普朗克公式计算的黑体在波长为  $1.65\ \mu\text{m}$ 、温度为  $300\sim 1200\text{ K}$  时的辐射出射度以及  $1.65\ \mu\text{m}$  波长处大气顶部的太阳辐照度。可以看出, 在一般的高温(如  $600\text{ K}$ )情况下,  $1.65\ \mu\text{m}$  波长处的黑体辐射出射度远低于太阳辐照度, 即  $1.65\ \mu\text{m}$  通道的反射率很低, 与地表反射率相近。当温度达到  $750\text{ K}$  时, 出射度已达到  $1.65\ \mu\text{m}$  处的太阳辐照度。当温度为  $900\text{ K}$ 、 $1000\text{ K}$  和  $1200\text{ K}$  时, 出射度分别为  $1.65\ \mu\text{m}$  处太阳辐照度的 8 倍、22 倍和 94 倍, 而明火(火焰火)的温度范围为  $800\sim 1200\text{ K}$ 。因此, 当出现较强明火时, 即使明火区仅占像元的少部分比例, 也有可能导致火点像元在  $1.65\ \mu\text{m}$  通道的反射率明显升高, 从而与周边形成明显差异。

## 2 不同分辨率红外通道对火情监测的影响分析

下面利用式(2)和式(3)来定量分析不同分辨率红外通道对火点监测的影响。



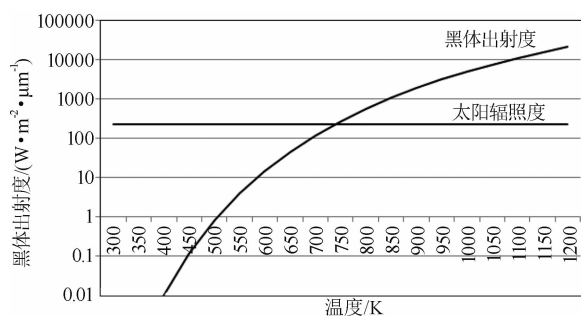


图3 1.65 μm 波长黑体辐射出射度及太阳辐照度

### 2.1 150 m 和 1 km 分辨率中红外通道的火点探测灵敏度分析

150 m 分辨率像元的覆盖面积约为 1 km 分辨率像元的四十分之一。利用式(3)分析,当火点温度为 600 K 且  $P$  为 1 km 分辨率像元覆盖面积的 0.01% 时, 150 m 分辨率混合像元的亮温增量为 34 K, 1 km 分辨率混合像元的亮温增量为 1 K; 当  $P$  为 1 km 分辨率像元覆盖面积的 0.05% 时, 前者为 79 K, 后者为 7 K。当火点温度为 800 K 且  $P$  为 1 km 分辨率像元覆盖面积的 0.01% 时, 前者为 79 K, 后者为 7 K; 当亚像元火点面积占比为 0.05% 时, 前者为 148 K, 后者为 24 K。结果表明, 对于大小相同的火点, 前者明显高于后者, 并且火点温度越高, 这一差异越大。

当火点温度为 600 K 且  $P$  为 1 km 分辨率像元覆盖面积的 0.002% 时, 150 m 分辨率混合像元的亮温增量为 11 K, 达到火点判识阈值; 而当  $P$  为 0.06% 时, 1 km 分辨率混合像元的亮温增量才达到火点判识阈值(8 K)。两者面积相差 30 倍左右。当火点温度为 750 K 且  $P$  为 1 km 分辨率像元覆盖面积的 0.0005% (约 5 m<sup>2</sup>) 时, 150 m 分辨率混合像元的亮温增量为 10 K, 达到火点判识阈值; 而当  $P$  为 0.017% 时, 1 km 分辨率混合像元的亮温增量才达到火点判识阈值(8 K)。两者面积相差 34 倍左右。由此可见, 150 m 分辨率中红外通道的火点判识灵敏度是 1 km 分辨率数据的 30 倍左右, 可以探测到平方米级面积大小的明火点。

### 2.2 300 m 和 1 km 分辨率远红外通道的火点探测灵敏度分析

300 m 分辨率像元的覆盖面积约为 1 km 分辨率像元的十分之一。利用式(3)分析, 当火点温度为 750 K 且  $P$  为 1 km 分辨率像元覆盖面积的 0.03% (约 300 m<sup>2</sup>) 时, 300 m 分辨率远红外通道混合像元的亮温增量已达 12 K, 与背景有比较明显的差异。当  $P$  为 0.08% (约 800 m<sup>2</sup>) 时, 该增量已达 30 K, 与背景有明显差异。而对于同样的  $P$  值, 1 km 分辨率远红外通道混合像元的亮温增量分别为小于 1 K 和等于 1 K。以上分析说明, 300 m 分辨率远红外通道的火点探测灵敏度较 1 km 分辨率时明显增高。尤其是远红外通道不受太阳辐射反射的影响, 可以避免太阳耀斑和云污染的干扰, 因此在耀斑区仍可监测到百平方米级面积大小(如超过 300 m<sup>2</sup>)的火点。

### 2.3 150 m 分辨率短波红外通道的火点探测灵敏度分析

#### 2.3.1 短波红外通道对高温火点的反应特点

从图 3 中可以看出, 高强度明火有可能导致短波红外通道的反射率异常升高。采用混合像元线性分解方法建立的 1.65 μm 短波红外通道火点像元反射率与背景差异的计算公式如下:

$$\begin{aligned} \Delta R_{1.65} &= R_{1.65_{\text{mix}}} - R_{1.65_{\text{bg}}} \\ &= \pi \cdot [P \cdot L_{1.65_{\text{ft}}} + (1 - P) \cdot L_{1.65_{\text{bg}}}] \cdot d^2 \\ &\quad \div (E_0 \cdot \cos \theta_s) - R_{1.65_{\text{bg}}} \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $\Delta R_{1.65}$  为该通道混合像元与背景的反射率差异;  $R_{1.65_{\text{mix}}}$  为该通道混合像元的反射率;  $R_{1.65_{\text{bg}}}$  为该通道的背景反射率(设为 0.2);  $L_{1.65_{\text{ft}}}$  为该通道的火点辐亮度(ft 表示火点温度);  $L_{1.65_{\text{bg}}}$  为背景反射率所对应的辐亮度。

将式(2)代入式(4)后可知, 当  $P$  从 0.01% 增大到 5.21% 时, 750 K 火点混合像元的反射率增量仅为 7%, 表明 1.65 μm 短波红外通道对一般温度火场反应微弱; 当  $P$  达到 3% 时, 900 K 火点混合像元的反射率增大 26% 左右, 表明该通道对较强明火有所反应, 且反射率随  $P$  的增大而增大。而 1200 K 火点

混合像元的反射率有显著变化。当  $P$  达到 0.4% 左右时, 反射率增大 40%; 当  $P$  为 0.8% 左右时, 反射率增大 80%。如果按 HJ/IRS 1.65  $\mu\text{m}$  通道 150 m 分辨率像元的覆盖面积计算, 那么当明火区温度为 1200 K 且面积为 90  $\text{m}^2$  时, 反射率增大 40% 左右(与周边像元有显著差异)。

### 2.3.2 短波红外和中红外通道对火点的反应差异

1.65  $\mu\text{m}$  短波红外通道像元的反射率增量与 3.72  $\mu\text{m}$  中红外通道像元的亮温增量涨幅不同。比如, 当火点温度从 900 K 升高到 1200 K 且  $P$  为 0.4% 时, 1.65  $\mu\text{m}$  短波红外通道像元的反射率增量从 4% 增大到 41% (约 10 倍), 而 3.72  $\mu\text{m}$  中波红外通道像元的亮温增量从 94 K 增大到 143 K (约 52%); 当  $P$  为 1% 时, 前者从 9% 增大到 100% (还是约 10 倍), 而后者从 134 K 增大到 195 K (约 46%)。结果表明, 明火火点温度越高, 前者涨幅越大, 且后者涨幅小于前者。因此, 含有火点的 1.65  $\mu\text{m}$  通道混合像元的反射率越高, 表明明火温度越高, 火场火势越强。

## 3 不同分辨率红外通道的火情监测个例分析

### 3.1 火点信息提取

#### 3.1.1 火点判别

本文使用上下文方法来判识火点<sup>[10]</sup>, 即当被探测像元满足  $T_{\text{MIR}} > T_{\text{MIR\_bg}} + a\delta T_{\text{MIR\_bg}}$  且  $T_{\text{MIR\_FIR}} > T_{\text{MIR\_FIR\_bg}} + a\delta T_{\text{MIR\_FIR\_bg}}$  或者  $T_{\text{MIR}} > 360$  K 时, 则将其判识为火点。其中,  $T_{\text{MIR}}$ 、 $T_{\text{MIR\_bg}}$  和  $a\delta T_{\text{MIR\_bg}}$  分别为探测像元中红外通道亮温、中红外通道背景亮温及其标准偏差;  $T_{\text{MIR\_FIR}}$ 、 $T_{\text{MIR\_FIR\_bg}}$  和  $a\delta T_{\text{MIR\_FIR\_bg}}$  分别为探测像元中红外与远红外通道的亮温差异、中红外与远红外通道背景亮温差异及其标准偏差;  $a$  为系数(对于 1 km 分辨率数据, 将其置为 4; 对于 150 m 分辨率数据, 将其置为 5)。

#### 3.1.2 亚像元火点面积估算

利用单通道亚像元火点面积估算方法来估算亚像元火点面积<sup>[11]</sup>:

$$S_f = P \cdot S \quad (5)$$

式中,  $S_f$  为亚像元火点面积,  $P$  为亚像元火点面积比例,  $S$  为像元面积。

当中红外通道未饱和时, 使用中红外通道来估算:

$$P = (L_{\text{MIR\_mix}}(T_{\text{MIR\_mix}}) - L_{\text{MIR\_bg}}(T_{\text{MIR\_bg}})) \div (L_{\text{MIR}}(T_f) - L_{\text{MIR\_bg}}(T_{\text{MIR\_bg}})) \quad (6)$$

当中红外通道饱和时, 使用远红外通道进行估算:

$$P = (L_{\text{FIR\_mix}}(T_{\text{FIR\_mix}}) - L_{\text{FIR\_bg}}(T_{\text{FIR\_bg}})) \div (L_{\text{FIR}}(T_f) - (L_{\text{FIR\_bg}}(T_{\text{FIR\_bg}}))) \quad (7)$$

式中,  $T_f$  为亚像元火点温度(设为 750 K);  $L_{\text{MIR\_mix}}$  和  $L_{\text{FAR\_mix}}$  分别为中红外和远红外通道混合像元的辐射率;  $L_{\text{MIR\_bg}}$  和  $L_{\text{FAR\_bg}}$  分别为两个通道背景像元的辐射率;  $T_{\text{MIR\_mix}}$  和  $T_{\text{FAR\_mix}}$  分别为两个通道混合像元的亮温;  $T_{\text{mid\_bg}}$  和  $T_{\text{far\_bg}}$  分别为两个通道背景像元的亮温。

### 3.2 安徽秸秆焚烧火点监测个例

利用 HJ/IRS (150 m) 2009 年 6 月 4 日 11 时 10 分(北京时间)和气象卫星(1 km)同日 10 时 45 分(北京时间)数据提取了安徽省局部区域的秸秆焚烧火点信息(地理范围为 116.5°E~117°E, 32.5°N~33°N)。图 4 为 HJ/IRS 通道 3、1、2 的 RGB 合成图。其中, 鲜红色为火点, 鲜绿色为植被, 白色或灰白色为云或烟雾, 暗绿色为水体。图 5 为气象卫星通道 3、2、1 的 RGB 合成图。其中, 鲜红色为火点, 绿色为植被, 白色或灰白色为云或烟雾, 深蓝色为水体。图 6 和图 7 所示分别为从图 4 和图 5 范围内提取的火点信息。

通过对比可见, 在相同的区域内, HJ/IRS 判识的火点信息明显多于气象卫星。尤其在多个 HJ/IRS 判识到小火点的区域, 气象卫星未判识到火点。表 2 列出了该区域的 HJ/IRS 和气象卫星判识火区数和火点像元数。可以看出, HJ-1B/IRS 探测到的火区数和火点像元数分别比气象卫星高出 7 倍和 11 倍, 表明 HJ-1B/IRS 在火点探测灵敏度方面有很大的优势。

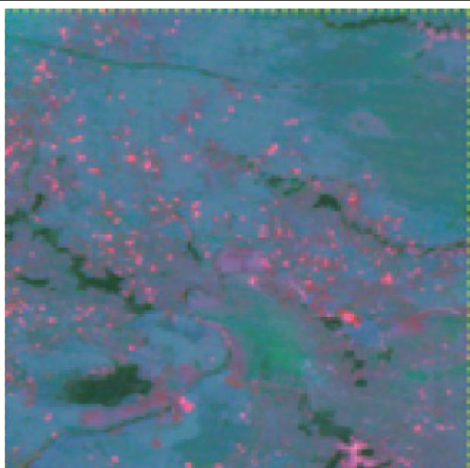


图 4 HJ/IRS 火情图

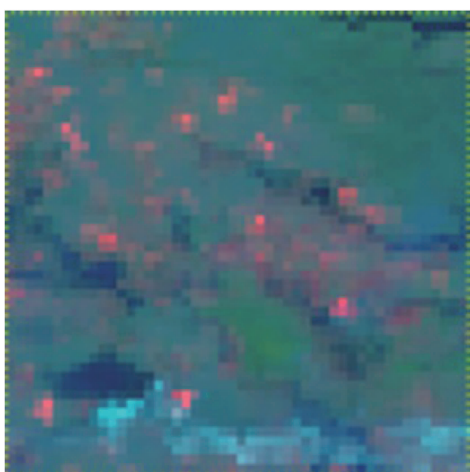


图 5 气象卫星火情图

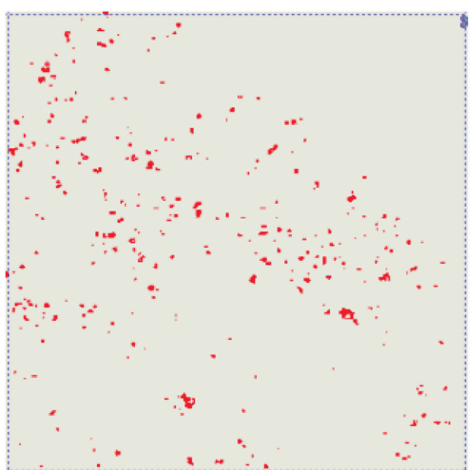


图 6 HJ/IRS 火点

表 2 HJ/IRS 和气象卫星的火点判识信息统计

| 卫星/传感器 | 火区数 | 像元数 |
|--------|-----|-----|
| HJ/IRS | 210 | 837 |
| 气象卫星   | 26  | 78  |

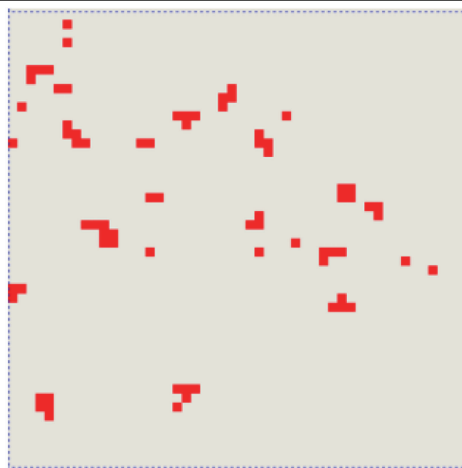


图 7 气象卫星火点

利用式(6)对上述地区进行了亚像元火点面积估算。图 8 和图 9 所示分别为 HJ/IRS 和气象卫星对上述地区的亚像元火点面积统计结果。可以看出, HJ/IRS 估算的亚像元火点面积在平方米级至接近百平方米级的范围内, 尤其有相当一部分像元的亚像元火点面积不到  $10 \text{ m}^2$ ; 而气象卫星估算的亚像元火点面积在百平方米级至千平方米级的范围内(多数为  $300 \sim 400 \text{ m}^2$ )。

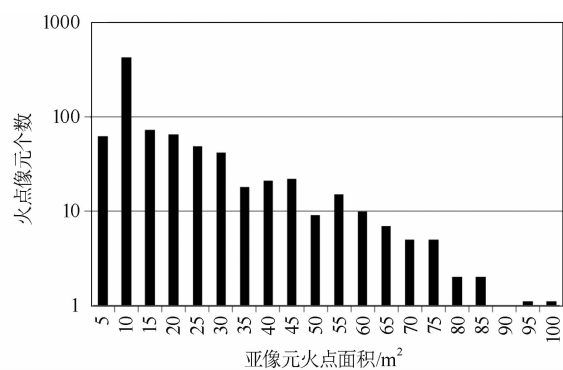


图 8 HJ/IRS 亚像元火点面积像元个数统计

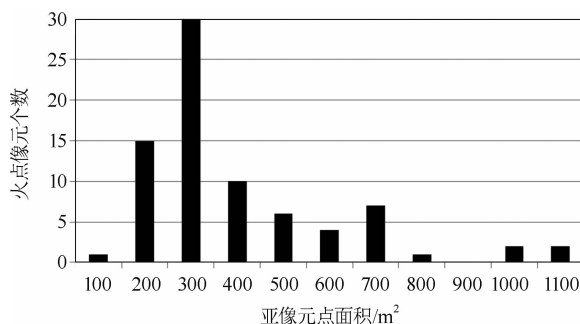


图 9 气象卫星亚像元火点面积像元个数统计

### 3.3 黑龙江省逊克县林火监测个例

2009 年 4 月下旬, 黑龙江省逊克县发生森林火灾。利用 HJ/IRS 2009 年 4 月 29 日 02 时 40 分(世界时)数据来分析火情信息, 并将其与同日气象卫星 02 时 15 分(世界时)图像进行对比, 从而分析 HJ/IRS 和气象卫星的火情监测的特点。

#### 3.3.1 HJ/IRS 各红外波段图像和气象卫星对火点的反应差异

图 10 和图 11 分别为 HJ/IRS 中红外通道(150 m)和气象卫星中红外通道(1 km)的图像。通过对比可见, 二者反映的火场外边界范围相近, 但 HJ/IRS 中红外通道反映的火点分布细节更加丰富, 且有少量火点在气象卫星图像上没有得到明显反映(如图中箭头所指处)。这表明 HJ/IRS 中红外通道具有更高的火点探测灵敏度。

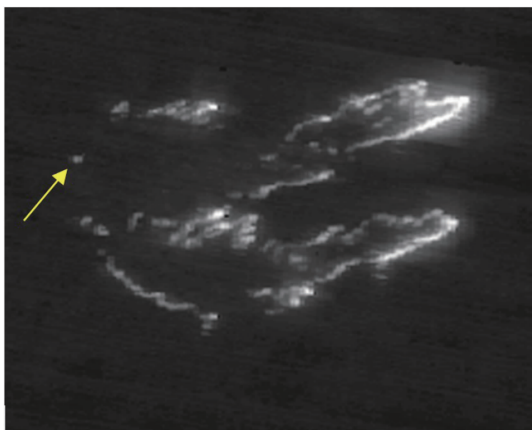


图 10 HJ-1B 中红外通道 2009/04/29/02:40(GT) 图像

图 12 和图 13 分别为 HJ/IRS 远红外通道(300 m)和气象卫星远红外通道(1 km)的图像。可以看出, HJ/IRS 远红外通道在火场中有多处火点亮斑, 而图 13 中仅有两处。这表明 HJ/IRS 远红外通道虽然不如中红外通道那样对火点敏感, 但是当亚像元火点面积增大时, 它仍会有反应。尤其是 HJ/IRS 远红外通道像元的覆盖面积为气象卫星的十分之一, 它对相同面积火点的反应灵敏度明显高于气象卫星, 因此可用于评估较大范围火场中具有较强火势的区域。

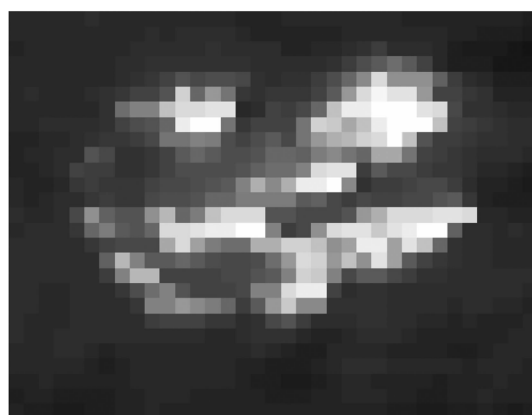


图 11 气象卫星中红外通道 2009/04/29/02:15 (GT) 图像

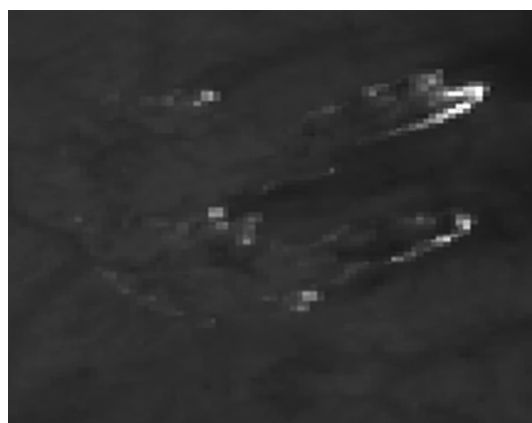


图 12 HJ-1B 远红外通道 2009/04/29/02:40(GT) 图像

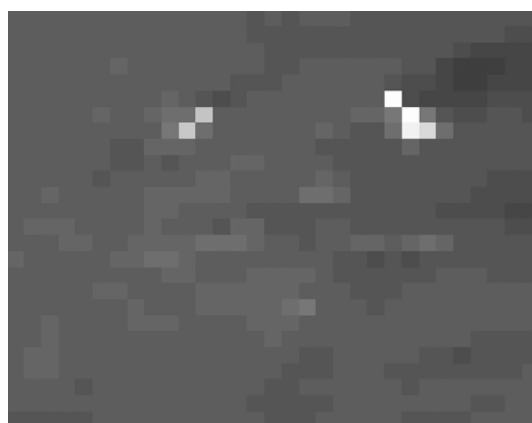


图 13 气象卫星远红外通道 2009/04/29/02:15(GT) 图像

图 14 和图 15 分别为 HJ/IRS 短波红外通道(150 m)和气象卫星短波红外通道(1 km)的图像。可以看出, 前者有多处火点亮斑或亮线, 而后者仅有两处。由于 HJ/IRS 短波红外通道



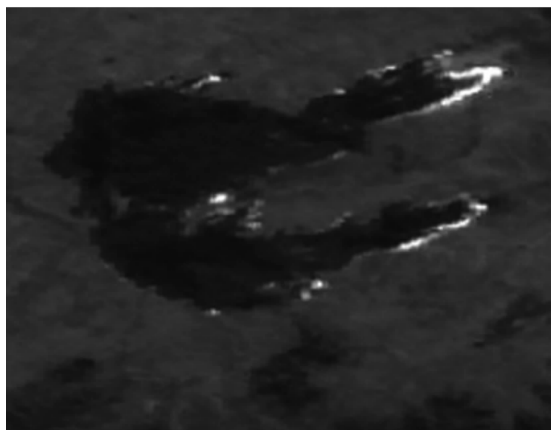


图 14 HJ-1B 短波红外通道 2009/04/29/02:40 (GT)图像

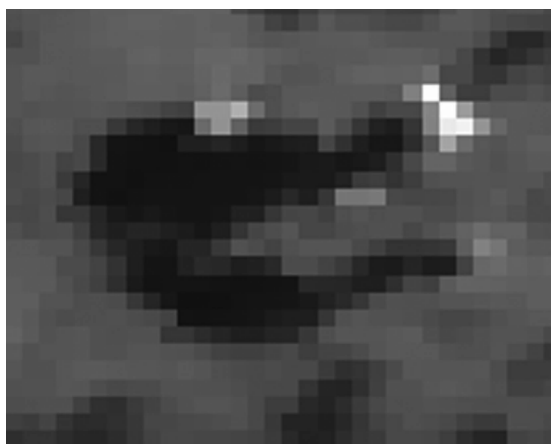


图 15 气象卫星短波红外通道 2009/04/29/02:15 (GT)图像

像元的覆盖面积仅为气象卫星的 2.3%，且反射率仅对高强度明火明显增高，因此可将其用于反映大范围火场中具有高强度明火的区域。

### 3.3.2 HJ/IRS 远红外通道(300 m)对较强火势的反应

图 16 为 HJ/IRS 黑龙江省逊克县火场 3.72  $\mu\text{m}$  (中红外)、11.58  $\mu\text{m}$  (远红外)和 11.58  $\mu\text{m}$  (远红外)通道的 RGB 合成图。其中，红色斑块为中红外通道探测的火点像元，白色线条为远红外通道探测的火点像元。可以看出，由于中红外通道对火点的敏感性远高于远红外通道，因此前者探测的大部分火点在后者中没有反映。但是在亚像元火点面积较大时，后者会有明显增温。因此它对火场中有反应的少部分局部地区的火势较强。

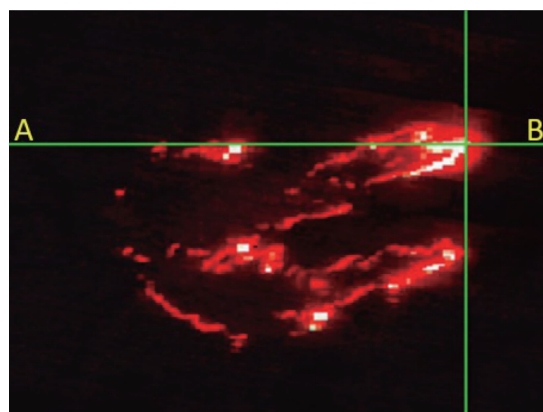


图 16 HJ/IRS 黑龙江省逊克县 2009/04/29/02:40 (GT) 3.72  $\mu\text{m}$ 、11.58  $\mu\text{m}$  和 11.58  $\mu\text{m}$  通道的 RGB 合成图

图 17 为图 16 中 A 点(128.221°E, 48.61°N)到 B 点(128.666°E, 48.61°N)的 3.72  $\mu\text{m}$  和 11.58  $\mu\text{m}$  通道的亮温廓线。可以看出，3.72  $\mu\text{m}$  通道经过火场时有明显的增温，出现了多处尖峰或高台；而 11.58  $\mu\text{m}$  通道仅在 3.72  $\mu\text{m}$  通道大幅增温时才出现较明显的增温现象。表 3 列出了图 16 中 11.58  $\mu\text{m}$  通道 4 个较明显增温处两个通道的亮温增量。可以看出，11.58  $\mu\text{m}$  通道对较强火势火点的反应并不随 3.72  $\mu\text{m}$  通道的增量而线性增大。比如：对于点 1 来说，前者增量是后者的 28%；而对于点 3 为 46%。由于较高温度火点的辐射峰值波长移向较短波长方向，因此含有较高温度火点的中红外通道辐亮度及亮温增量与远红外通道增量之比高于含有较低温度火点时的情况，导致在中红外通道亮温增量较大的地方，远红外通道的亮温增量可能十分微弱。

表 3 HJ/IRS 11.5  $\mu\text{m}$  和 3.72  $\mu\text{m}$  通道火点亮温增量

| 序号 | 11.58 $\mu\text{m}$ 亮温<br>增量/K | 3.72 $\mu\text{m}$ 亮温<br>增量/K |
|----|--------------------------------|-------------------------------|
| 1  | 34                             | 121                           |
| 2  | 21                             | 49                            |
| 3  | 54                             | 116                           |
| 4  | 59                             | 170                           |

### 3.3.3 短波红外通道(150 m)对高强度明火区的反应

图 18 为 HJ/IRS 黑龙江省逊克县火场

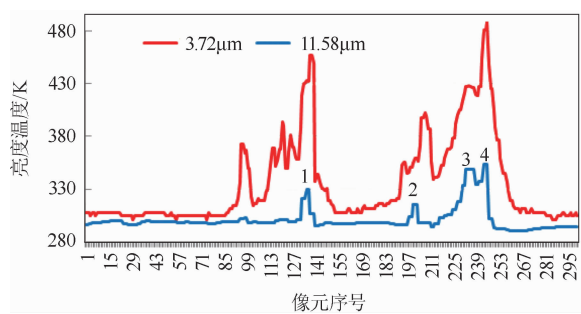


图 17 HJ/IRS 3.72 μm 与 11.58 μm 通道廓线(A: 128.221°E,48.61°N; B: 128.666°E,48.61°N)

3.72 μm (中红外)、1.65 μm (短波红外)和 1.65 μm (短波红外)通道的 RGB 合成图。其中,红色斑块为 3.72 μm 通道探测的火点像元,白色亮斑或线条为 1.65 μm 通道探测的火点像元。由于中红外通道对高温目标十分敏感,温度为 750 K 的火区即使仅占像元面积的 0.025%,也可达到火点判识阈值。而在同样情况下,1.65 μm 通道几乎没有反应。因此在 3.72 μm 通道探测的大部分火场处,1.65 μm 通道都没有明显反应。从图 18 中可以看出,1.65 μm 通道探测的火点像元一般位于火场的前沿,表明此处有高强度明火,并可能有树冠火或急进地表火。

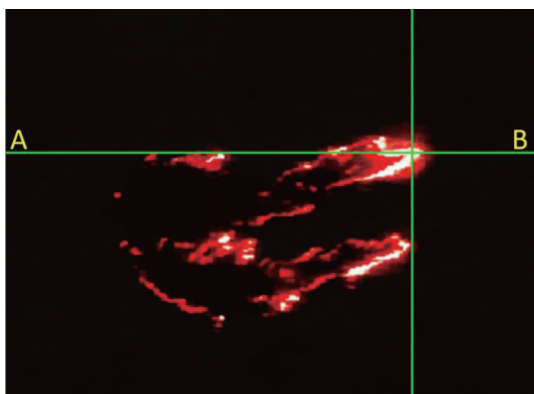


图 18 HJ/IRS 黑龙江省逊克县 2009/04/29/02:40 (GT)的 3.72 μm、1.65 μm 和 1.65 μm 通道的 RGB 合成图

图 19 所示为从图 18 中 A 点(128.221°E, 48.61°N)到 B 点(128.666°E, 48.61°N)的 3.72 μm 通道亮温和 1.65 μm 通道反射率廓线。可以看出,经过火场时 1.65 μm 通道的反射率仅在 3.72 μm 通道有较大增温幅度时

才明显增大。表 4 列出了图 18 中 4 个尖峰处 1.65 μm 通道的反射率增量和 3.72 μm 通道的亮温增量。可以看出,仅当 3.72 μm 通道的亮温增量达到上百开时,1.65 μm 通道的反射率才明显增大。这表明 1.65 μm 通道仅对高强度明火区有明显反应,因此可以反映大范围火场中火势最强的区域。另外还可以看出,1.65 μm 通道的反射率增量并不与 3.72 μm 通道的增量成线性比例关系。这是由于 3.72 μm 通道对一般火点就十分敏感。在火场温度不太高但面积较大时,也会产生较大的增温。在这种情况下,1.65 μm 通道的反射率不会产生相应的增幅。比如,点 1 和点 2 的 3.72 μm 通道亮温增量相差不大,但 1.65 μm 通道的反射率增量相差较大,表明点 1 的明火温度更高。

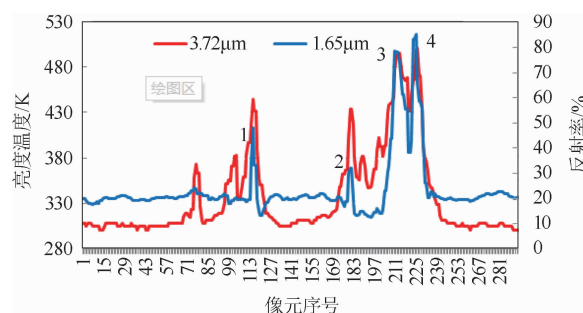


图 19 HJ/IRS 的 3.72 μm 与 1.65 μm 通道廓线(A: 128.221°E,48.61°N; B: 128.666°E,48.61°N)

表 4 HJ/IRS 的 1.65 μm 通道火点反射率和 3.72 μm 通道火点亮温增量

| 序号 | 1.65 μm 通道反射率增量/% | 3.72 μm 通道亮温增量/K |
|----|-------------------|------------------|
| 1  | 30                | 134              |
| 2  | 13                | 117              |
| 3  | 62                | 182              |
| 4  | 65                | 190              |

#### 4 结论和讨论

本文定量研究了分辨率为 150 m、300 m、1 km 的中红外、远红外以及短波红外通道对高温目标(火点)空间和温度的响应特点,并利用林火和秸秆焚烧监测个例对其进行了验证。结果表明,通过提高红外通道的分辨率可明显提

升卫星遥感在微小火点探测、火势评估等方面的应用能力。比如：150 m分辨率中红外通道可探测到平方米级大小的火点，这在森林草原火灾监测中具有重要意义；300 m分辨率远红外通道可探测到百平方米量级大小的火点，并且不受太阳辐射在云区反射干扰以及太阳耀斑区的影响，可用于评估火场中火势较强的区域；150 m分辨率短波红外通道对高强度明火区有明显反应，可为判断火场中的高强度明火（如急进地表火、树冠火等）区域提供参考。此外，对FY3D/MERSI-II的250 m分辨率远红外通道火点探测特点的研究表明<sup>[17]</sup>，提高红外通道分辨率也可以改进火点的定位精度。综上所述，提高红外通道的分辨率可以更加充分地发挥卫星遥感在森林草原火灾、秸秆焚烧监测方面的作用。

森林草原火灾具有发展迅猛，火势复杂多变的特点。林火燃烧区的温度为600~850 K，明火（火焰火）温度为800~1200 K<sup>[1]</sup>。根据维恩定律，高强度明火的辐射峰值波长已靠近短波红外的2.2 μm和1.6 μm区域，尤其2.2 μm附近的短波红外通道更加接近明火温度的辐射峰值波长。过去受分辨率的限制，大多数卫星遥感火情监测主要利用1 km分辨率中红外通道来探测火点，而极少涉及到火势程度评估等方面的应用。但在森林防火工作中，除了及时发现火源之外，还需要了解火灾的类型和程度。尤其对面积达数十甚至上百平方公里以上的大范围火场，还需要了解不同火势程度的空间分布和动态发展变化。而这只能利用卫星遥感获得大范围火场的连续观测信息。单一波段红外通道在火情监测应用方面有局限性。比如：中红外通道因亮温易饱和而较难反映火势程度，并且存在受太阳辐射反射干扰以及在耀斑区难以使用等不足；短波红外通道受太阳辐射反射影响，一般很难区分由明火辐射和太阳辐射反射导致的反射率升高。因此，利用单一短波红外通道难以判识火点；远红外通道更是无法发现小火点。只有综合应用中红外、远红

外和短波红外通道，才能较全面地反映微小火点、火势程度以及高强度明火区等多种火场信息。

根据森林草原火灾的时空变化特点，需要卫星遥感具有宽视场、高频次、多谱段、高空间分辨率的观测能力。目前可用于火情监测的卫星存在综合观测能力不足的问题。比如：有的卫星具有宽视场、高频次、多谱段观测能力，但空间分辨率不够高；有的卫星具有宽视场、多谱段、高空间分辨率观测能力，但观测频次不够；还有的卫星具有高空间分辨率，但波段单一。近年来，我国航天技术发展迅猛，星载传感器的空间分辨率和幅宽不断提高。因此，若能使已具有宽视场、高频次、多谱段观测能力的卫星载荷再兼具高空间分辨率红外通道，则可明显提高卫星遥感在森林草原火灾、秸秆焚烧监测方面的应用能力。

## 致谢

感谢环境保护部卫星环境应用中心的陈辉和张丽娟为本文提供HJ-IB/IRS预处理定标系数等方面的支持。

## 参考文献

- [1] Matson M, Schneider S R. Fire Detection Using the NOAA-Series Satellite [R]. NOAA Technical Report NESDIS 7, 1984.
- [2] Zhang J J, Zhang Q S, Dian C G, et al. Detection of forest fire in Da Hinggan Ling Region by meteorological satellite [J]. *Acta Meteorological Sinica*, 1989, **3**(4): 562-568.
- [3] 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**: 31955-31968.
- [4] 蒋岳新. 应用EOS-MODIS数据进行林火监测的初探 [J]. *森林防火*, 2002, **20**(4): 25-29.
- [5] 刘诚, 李亚军, 阎华, 等. 气象卫星火情监测判识方法改进 [J]. *气象*, 2003, **29**(S1): 35-40.
- [6] Hassini A, Benabdelouahed F. Active fire monitoring with level 1.5 MSG satellite images [J]. A-

- merican Journal of Applied Sciences*, 2009, **6** (1): 157–166.
- [7] 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 [J]. *红外与毫米波学报*, 2008, **27**(3): 185–189.
- [8] 李亚君, 郑伟, 陈洁, 等. 气象卫星遥感火情监测应用 [J]. *上海航天*, 2017, **34**(4): 62–72.
- [9] 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.
- [10] 全国卫星气象与空间天气标准化技术委员会. 卫星遥感火情监测方法 第 2 部分 火点判识: QX/T 344.2-2019 [S]. 北京: 中国气象局, 2019.
- [11] Giglio L, Descloitres J, Justice C O, et al. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **87**: 273–282.
- [12] Dozier J. A method for satellite identification of surface temperature fields of sub-pixel resolution [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1982, **11**: 221–229.
- [13] 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.
- [14] 刘诚, 李亚军, 阎华, 等. 气象卫星遥感热源点强度估算方法初探 [J]. *气象*, 2003, **29**(S1): 41–45.
- [15] 全国卫星气象与空间天气标准化技术委员会. 卫星遥感火情监测方法 第 3 部分 火点强度估算: QX/T 344.3-2020 [S]. 北京: 中国气象局, 2020.
- [16] 何阳, 杨进, 马勇, 等. 基于 Landsat-8 陆地卫星数据的火点检测方法 [J]. *红外与毫米波学报*, 2016, **35**(5): 600–608.
- [17] 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.
- [18] 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 [J]. *红外与毫米波学报*, 2011, **30**(2): 104–109.

(上接第 29 页)

- [2] 陆子凤. 红外热像仪的辐射定标和测温误差分析 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010.
- [3] 张磊, 郑小兵, 李双, 等. 高精度中远红外辐射定标技术研究 [J]. *红外技术*, 2006, **27**(3): 178–183.
- [4] 张云峰. 基于加权最小二乘法的红外辐射定标 [J]. *液晶与显示*, 2012, **27**(6): 832–836.
- [5] 李周. 地基靶场红外辐射特性测量系统宽动态辐射测量研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018.
- [6] 乔铁英, 蔡立华, 李宁, 等. 基于红外辐射特性系统实现对面对目标测量 [J]. *中国光学*, 2018, **11**(5): 804–811.
- [7] 孙志远, 常松涛, 朱玮, 等. 应用内外定标修正实现红外测量系统辐射定标 [J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(2): 356–362.
- [8] 刘莹奇, 刘祥意. 空间目标的地基红外辐射特性测量技术研究 [J]. *光学学报*, 2014, **34**(5): 123–129.
- [9] 常松涛. 红外经纬仪结构设计及提高其辐射测量精度的关键技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.
- [10] 田棋杰, 李周, 常松涛, 等. 高温小目标红外辐射特性测量方法 [J]. *光学学报*, 2017, **39**(10): 191–199.
- [11] 黄智国. 空间目标地基红外探测技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018.
- [12] Vigil M L, Witte D J, Levan P D, et al. Sensor Suite for the Advanced Electro-Optical System (AEOS) 3.6 m Telescope [C]. *SPIE*, 1996, **2819**: 151–169.
- [13] 孙航. 大口径红外辐射特性测量设备目标识别与跟踪关键技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.
- [14] Cohen M, Walker R G, Barlow M J, et al. Spectral Irradiance Calibration in the Infrared. I: Ground-based and IRAS Broadband Calibrations [J]. *The Astronomical Journal*, 1992, **104**(4): 1650–1657.