

引用格式:刘方伟,苏庆华,孙林,等.基于Himawari-8卫星的沙尘监测[J].山东科技大学学报(自然科学版),2018,37(3):11-19.

LIU Fangwei, SU Qinghua, SUN Lin, et al. Dust monitoring with the Himawari-8 satellite[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2018, 37(3):11-19.

基于Himawari-8卫星的沙尘监测

刘方伟¹,苏庆华¹,孙林¹,夹尚丰¹,田信鹏²,周雪莹¹

(1. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 北京师范大学 全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875)

摘要: Himawari-8卫星宽波段覆盖、高频次观测的特点可以在沙尘暴动态监测中发挥重要作用。基于Himawari-8卫星的可见光红外辐射计(advanced himawari image,AHI)的波段设计,通过对典型地物以及多类型沙尘光谱特性和多波段亮温差均值单倍标准差的分析,提出中红外和热红外通道亮度温度差值的组合阈值法进行沙尘遥感监测。运用多个区域多个时相的Himawari-8卫星数据开展了沙尘监测试验,使用臭氧探测仪(ozone monitoring instrument,OMI)监测的结果进行验证分析。结果表明,沙尘监测结果与臭氧监测仪监测的紫外气溶胶指数产品空间分布基本一致,可以达到较高的精度。

关键词: Himawari-8卫星; 沙尘; 光谱分析; 亮度温度差; 沙尘监测

中图分类号:P407

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2018)03-0011-09

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2018.03.002

Dust Monitoring with the Himawari-8 Satellite

LIU Fangwei¹, SU Qinghua¹, SUN Lin¹, JIA Shangfeng¹, TIAN Xinpeng², ZHOU Xueying¹

(1. College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Himawari-8 satellite is characterized by wide-band coverage and high-frequency observations, which would play an important role in the monitoring of dust-storm dynamics. Based on the band design of advanced himawari imager (AHI) of Himawari-8 satellite, this paper analyzed the spectral characteristics and one standard deviation away from the means of brightness temperature differences of typical terrain and multi-type dust, and proposed a combined threshold method of temperature difference between infrared and thermal infrared channels for remote sensing dust monitoring. The dust monitoring test was conducted by using multi-temporal images of Himawari-8 satellite at multiple regions, and the results were validated by using ozone monitoring instrument(OMI). The results show that with an agreement with OMI aerosol index(AI) dust products in spatial distribution, the proposed dust monitoring is able to achieve reasonable accuracy.

Key words: Himawari-8 satellite; dust; spectral analysis; brightness temperature difference; dust monitoring

收稿日期:2017-09-21

基金项目:国家自然科学基金项目(41771408);山东省自然科学基金项目(2017F011303)

作者简介:刘方伟(1989—),男,山东青岛人,硕士研究生,主要从事大气遥感研究. E-mail:lfw595047418@126.com

孙林(1975—),男,山东枣庄人,教授,博士,主要从事大气探测方面的研究,本文通信作者.

E-mail:sunlin6@126.com

沙尘暴是在特定的地理环境和下垫面条件下,由特殊的气象条件形成的一种较为常见的自然现象^[1]。世界沙尘暴多发区主要分布于北非、中东、中亚及东南亚、北美及澳大利亚,我国新疆、甘肃等西北部地区属于中亚沙尘暴区,华北北部地区属于东亚沙尘暴区。沙尘暴发生时常伴有大风,可造成交通受阻、供电中断、埋压农田,严重时可导致房屋倒塌、引发火灾、人畜伤亡等,沙尘暴中产生的沙尘还会造成空气和水源污染,引起呼吸系统疾病。沙尘灾害所造成的生态环境和间接经济损失难以估量^[2]。开展沙尘监测不仅对沙尘灾害预警和生态环境影响评价具有重要意义,而且对人类社会生活和全球气候变化产生深远影响。

沙尘暴的遥感监测多指利用卫星数据分析判识沙尘暴的起源、传输路径、影响范围和强度变化,并对沙尘暴的形成、发展、扩散进行动态监测。目前,用于沙尘灾害监测的手段有地面定点观测和卫星遥感监测,而沙尘暴常发生在人迹罕至的沙漠及其临近的干旱和半干旱地区,常规的地面观测站点受自然环境条件影响,难以实现对沙尘暴的长期监测和预报^[3];由于人力、物力、财力和技术等诸多因素的限制,很难通过大规模构建地面观测站实现沙尘暴的监测。近几十年来,具有高时空分辨率和高光谱分辨率的新型传感器不断服务于人类,使得运用遥感技术监测沙尘灾害成为可能。静止气象卫星由于其高时间分辨率的特点,在沙尘动态监测中具有无可比拟的优势,同时还可与地面观测数据在精度上相互验证,深化了沙尘监测的量化研究^[4]。

国内外专家针对沙尘暴的遥感监测方法进行过大量研究,主要涉及气象学、地质学、地理学、灾害预报、数值模拟等多个领域,在沙尘暴的遥感监测方法上已取得一些关键性进展。Shenk 和 Curran^[5], Carlson^[6]、Griggs^[7]利用气象卫星单通道(可见光或红外通道)进行沙尘监测,由于沙尘暴发生时复杂的大气环境,单一通道对于沙尘和云的区分很困难,存在一定局限性;Ackerman^[8]针对中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)数据,最早提出分裂窗亮温差值算法,利用 8.5、11、12 μm 三个热红外波段综合提取沙尘的思路,对后续多通道沙尘监测的研究提供重要参考;郑新江等^[9]根据 3.75 μm 和 11 μm 波段的反射辐射特性,与可见光 1.06 μm 反射率之间建立统计关系,提出了沙尘识别的新方法;范一大等^[10]针对改进型甚高分辨率辐射仪(advanced very high resolution radiometer, NOAA/AVHRR)数据,提出基于查找表变换和经验模型的两种沙尘暴信息提取新方法,并通过多光谱合成影像分别对沙尘暴的信息提取和强度监测进行探讨;罗敬宁等^[11]利用美国第五代极轨气象卫星 NOAA KLM 系列卫星和“风云一号”(FY-1)C/D 数据,根据近红外 1.6 μm 波段特性,设计出沙尘强度定量描述的新方法,为多源遥感数据沙尘监测结果的对比提供了重要思路;Huang 等^[12]利用 MODIS 和被动微波辐射计(advanced microwave scanning radiometer-EOS, AMSR-E)数据,基于 11、12 μm 热红外辐射亮温差与微波波段 89 和 23.8 GHz 的极化辐射亮温差,协同完成沙尘遥感识别,为后续微波数据在沙尘遥感监测中的应用提供了指导;刘三超等^[13]基于 MODIS Terra 和 Aqua 数据,白天采用热红外亮温差与多光谱组合阈值法提取沙尘信息,夜晚则仅用红外波段亮温差值法提取沙尘信息,MODIS 数据在沙尘监测中表现出巨大潜力;罗敬宁等^[14]利用风云三号卫星数据,综合考虑不同波段的反射辐射特性,提出全球沙尘遥感识别方法和 DDI 沙尘强度指数,为定量分析全球沙尘强度提供依据。此外,通过不同天气沙漠地表辐射收支特征^[15]和沙尘气溶胶垂直廓线^[16]提取沙尘,为沙尘监测拓展了新思路。

常用于沙尘监测的卫星以极轨卫星为主,由于重访周期较长,图像获取时间间隔较大,沙尘暴的动态监测受到很大限制。Himawari-8 卫星是下一代地球同步气象卫星的先驱,其携带的 AHI 传感器有 16 个波段,观测频率为每 10 min 一次,可以提高对沙尘暴的监测、预测精度。本研究基于日本新一代静止气象卫星 Himawari-8 的超高时间分辨率以及足以媲美极轨卫星空间分辨率的优异特性,运用 Himawari-8 卫星主载荷 AHI 传感器数据对沙尘进行了遥感监测。基于 Himawari-8 AHI 的波段设计,分析多类型沙尘光谱特性,结合沙尘监测的物理原理,提出中红外和热红外通道亮度温度差值的组合阈值法对沙尘动态监测,并以一个典型沙尘天气的实例,对方法的可行性进行了验证。

1 沙尘遥感反演原理与方法

1.1 沙尘遥感原理

沙尘中包含大量矿物质,沙尘粒子本身能发射长波辐射,也能吸收地面向上的长波辐射,同时还能通过对太阳辐射的吸收和散射共同影响地球辐射收支和能量平衡,表现出光谱特征的差异性^[9]。空中悬浮的沙尘粒子的辐射特性与粒子的大小、形状、质地和浓度密切相关,其中粒径大小是决定沙尘散射特性的重要因素^[17]。不同强度的沙尘天气,沙尘粒径差异较大,其粒径范围为 0.01~100 μm。随着沙尘粒径的增大,在前向方向集中的散射能量越多,同时吸收消光也逐渐增加,从而散射比下降^[9]。沙尘遥感监测主要依据沙尘层与其他地物(云、地表)在散射和辐射特性上的差异来提取沙尘信息^[18]。

根据沙尘遥感的基本原理和反射辐射特性,对 Himawari-8 卫星的 AHI 载荷数据多光谱通道进行综合分析,能较好地识别下垫面的沙尘信息。

表 1 为 Himawari-8 AHI 的主要技术参数。共有 16 个波段,包括 3 个可见光波段、3 个近红外波段和 10 个红外波段。与 Himawari-7 相比,其频段数目大幅度增加,不仅大幅提高观测性能,还提高了空间分辨率。如 Himawari-7 可见光波段的空间分辨率仅为 1 km,而 Himawari-8 则达 0.5 km; Himawari-7 近红外波段的空间分辨率仅为 4 km,而 Himawari-8 红外波段达 1 km。中红外通道(3.9 μm)主要包含了地物的辐射和反射信息,测量发现,该通道叠加了更多的沙尘反射信息^[14],对沙尘有明显反映,因此可用作沙尘反演中沙尘判识的主要依据。Ackerman 等^[19]发现热红外大气窗口区 8~12 μm 的亮度温度差可减小地面影响,可用来较好地研究沙尘暴。对提取的典型地物进行统计分析,采用 3.9 μm 波段与热红外各波段分别进行差值计算,分析发现沙尘在第 7 波段亮度温度(用 BT_7 表示,后面依此递推)与 11、12、13、14 波段亮度温度的差值与其他地物有明显差别,可将其作为判识依据。如图 1 所示。

从图 2 可以看出,虽然第 7 波段与 11、12、13、14 波段的亮度温度差值明显高于其他地物,但与沙漠类型非常接近,因此单独分析沙尘和沙漠在第 7 波段与 11、12、13、14 波段亮度差(图 2),发现 BT_7 与 BT_{13} 的差异明

表 1 Himawari-8 AHI 主要技术参数

Tab. 1 The main technical parameters of Himawari-8 AHI

通道标识	光谱属性	中心波长/μm	分辨率/km
1	可见光	0.47	1.0
2	VIS	0.51	1.0
3		0.64	0.5
4	近红外	0.86	1.0
5	NIR	1.60	2.0
6		2.30	2.0
7		3.90	2.0
8		6.20	2.0
9		6.90	2.0
10		7.30	2.0
11	红外	8.60	2.0
12	IR	9.60	2.0
13		10.40	2.0
14		11.20	2.0
15		12.40	2.0
16		13.30	2.0

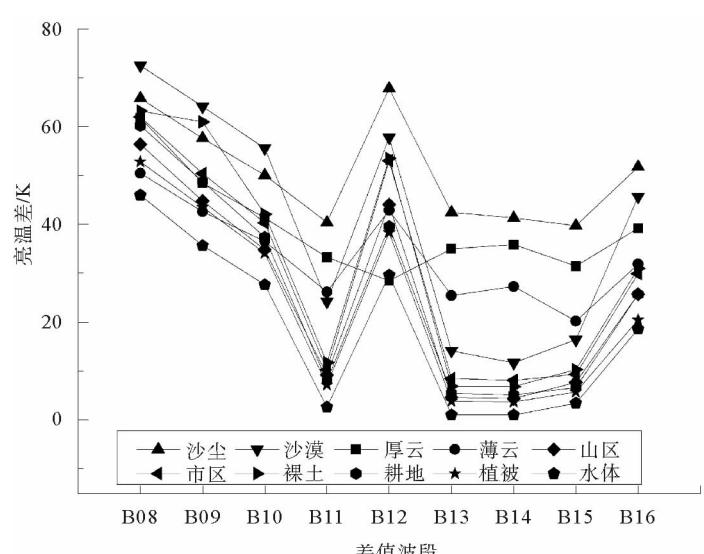


图 1 第 7 波段与红外各波段亮温差

Fig. 1 The brightness temperature difference of the seventh band and the infrared band

显。因此,可利用 BT_7 与 BT_{13} 的差值作为沙尘与沙漠区分的依据。

当沙漠、云、裸土、植被等干扰类别存在时,为了验证提取算法的有效性,从 2016—2017 年几次典型沙尘天气的 Himawari-8 影像中,用图像处理软件提取各种地物类型的纯净像元值,统计分析不同地物类型在第 7 波段与 11、12、13、14 波段的亮度温度差值,并计算其均值与标准差,如图 2、图 3 所示。发现 BT_7 与 BT_{13} 的差值可以很好地地区分沙尘与沙漠; BT_7 与 BT_{11} 、 BT_{12} 、 BT_{14} 的差值可以将沙尘与其他地物类型相区分。

1.2 沙尘识别算法

由于 Himawari-8 卫星的时间分辨率高,且为静止卫星,幅宽较大,同一景图像上,相同地物的亮度温度也存在差异,导致不同时间的沙尘监测效果不同。若对所有时刻的影像都采用同一种方法,精度无法达到要求。因此以当地时间 16 时($UTC = 8$)为时间节点,分别进行分析,具体的技术路线详见图 4。

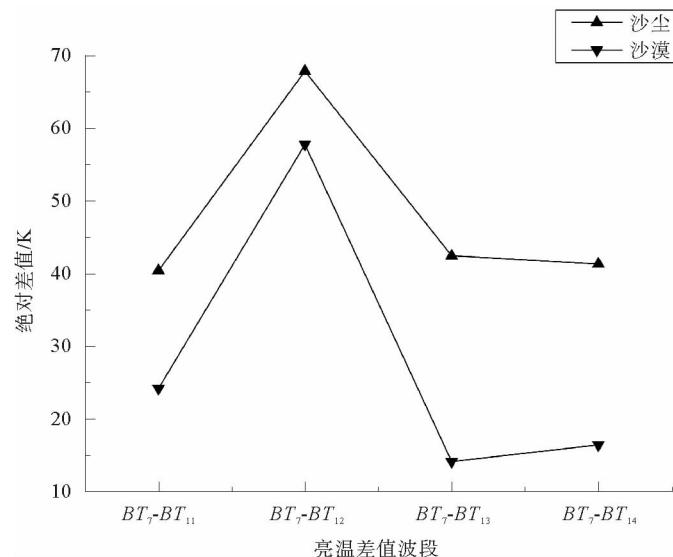


图 2 沙尘与沙漠亮温差对比

Fig. 2 Comparison of brightness temperature difference between dust and desert

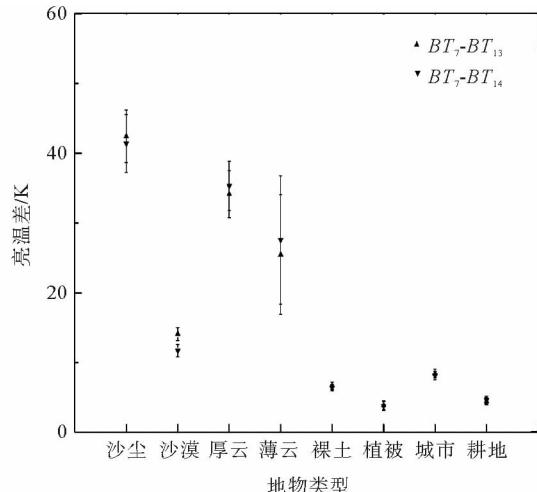
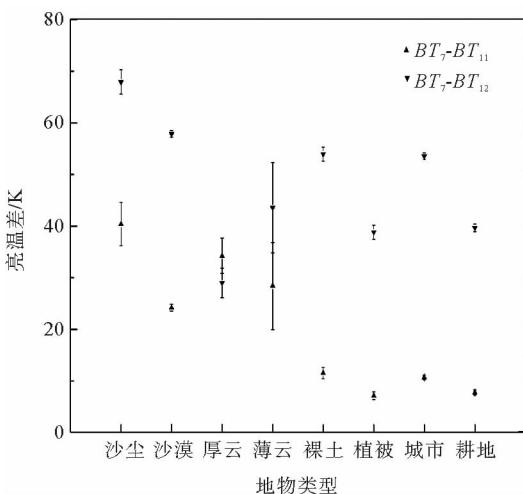


图 3 不同波段不同地物亮温差均值的单倍标准差

Fig. 3 One standard deviation away from the means of brightness temperature differences between the different objects in different bands

首先,对影像进行云检测,剔除云对沙尘识别的影响;其次,对识别沙尘的阈值进行分析,确定合适的沙尘提取阈值;最后,根据沙尘阈值进行沙尘提取,下面对流程图中的关键技术进行逐个介绍。

1.2.1 云检测

与下垫面相比,云一般有很高的反射率,同时其温度又相对较低^[19]。利用蓝光通道的表观反射率大于阈值和热红外 15 通道的亮度温度小于阈值可以很好地把云检测出来。判识条件:

$$\rho_{\text{Blue}} > T_{\text{Blue_Cloud}}, \quad (1)$$

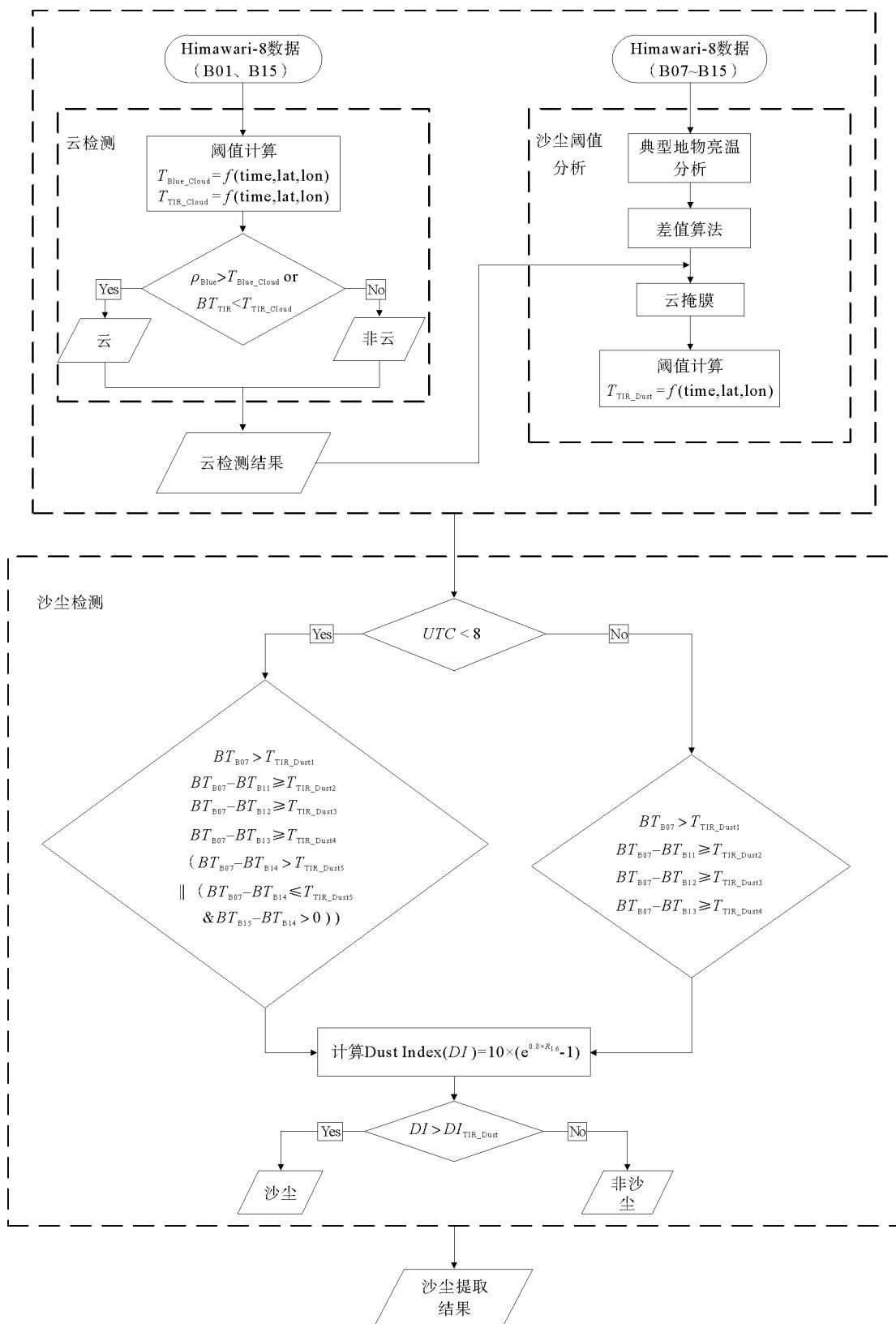


图 4 沙尘反演技术流程图

Fig. 4 The technical flow chart of dust inversion

$$BT_{\text{TIR}} < T_{\text{TIR_Cloud}} \quad (2)$$

其中: ρ_{Blue} 为蓝光通道表观反射率; $T_{\text{Blue_Cloud}}$ 为蓝光通道表观反射率度阈值; BT_{TIR} 为热红外 15 通道亮度温度; $T_{\text{TIR_Cloud}}$ 为热红外 15 通道亮度温度阈值。

1.2.2 沙尘阈值判识

1.2.2.1 基本阈值判识

中红外 $3.9 \mu\text{m}$ 通道对沙尘有明显的反映,采用 $3.9 \mu\text{m}$ 通道作为主要判识依据,判识条件为:

$$BT_{\text{B07}} > T_{\text{TIR_Dust 1}} \quad (3)$$

其中: BT_{B07} 为 $3.9 \mu\text{m}$ 通道的亮度温度; $T_{\text{TIR_Dust 1}}$ 为 $3.9 \mu\text{m}$ 通道亮度温度阈值。这里采用经验阈值法 ($T_{\text{TIR_Dust 1}}$ 约 300 K 左右),以此作为沙尘判识首要条件。

1.2.2.2 中红外与热红外通道差值

通过对沙尘与其他地物的遥感光谱特性分析发现,中红外 $3.9 \mu\text{m}$ 通道与热红外通道的差值具有明显差异。在实际应用中,采用 $3.9 \mu\text{m}$ 与 $8.6、9.6、10.4、11.2 \mu\text{m}$ 通道之间的差值(brightness temperature differenec, BTD)组合作为沙尘判识的主要依据,计算公式为:

$$BTD_i = BT_{3.9} - BT_i \quad (4)$$

其中: $i = 11、12、13、14$; $BT_{3.9}$ 为 $3.9 \mu\text{m}$ 通道的亮度温度; $BT_{11}、BT_{12}、BT_{13}、BT_{14}$ 分别为 $8.6、9.6、10.4、11.2 \mu\text{m}$ 通道的亮度温度。采用经验阈值法 (BTD_i 一般取值为 $20 \sim 60 \text{ K}$),可作为沙尘识别的主要条件。

1.2.3 沙尘强度指数

$1.6 \mu\text{m}$ 近红外波段对沙尘反映明显,可以较好地描述沙尘暴特征^[11]。与可见光波段相比,该波段受到大气分子和微粒气溶胶干扰较小,在沙尘监测中具有较高的稳定性,对多颗卫星资料研究发现,沙尘强度与 $1.6 \mu\text{m}$ 反射率之间存在线性一致关系,可以很好解决沙尘监测的标准同一化^[11]。沙尘强度(dust index, DI)计算公式:

$$DI = 10 \times (e^{0.8 \times R_{1.6}} - 1) \quad (5)$$

其中: $R_{1.6}$ 为近红外 $1.6 \mu\text{m}$ 波段测得的反射率。

研究发现,北京时间 16 时之后,采用上述方法可以较好地对沙尘进行识别。但北京时间 16 时之前,沙尘漏判误判较多,针对这一情况,增加 BT_7 与 BT_{14} 的差值加以判断:当 $BT_7 - BT_{14}$ 大于阈值,虽然沙尘误判问题得到解决,但是仍有严重漏判;Himawari-8 卫星数据包含 $11、12 \mu\text{m}$ 波段附近的热红外分裂窗通道,干燥沙尘对 $11、12 \mu\text{m}$ 的辐射有不同的吸收衰减^[11],因此,当 $BT_7 - BT_{14}$ 小于阈值时结合 $BT_{14} - BT_{15}$ 大于 0 作为识别沙尘的条件。改进以后,北京时间 16 时之前沙尘监测结果的漏判和误判问题得以解决。

2 实例分析

本研究选取 Himawari-8 卫星 2016 年 5 月 5 日 UTC 2:00~9:00 的数据,为便于观察沙尘的时空变化,选择每小时 1 景影像,经过预处理后得到研究区域的 16 个波段的影像,利用真彩色合成影像可以从目视解译的角度对沙尘进行判识,如图 5 所示,上图为 Himawari-8 真彩色影像图,下图为沙尘反演结果。可以看出,这次沙尘天气从上午 10 点已经在内蒙古中部地区形成,逐渐向东北方向传输扩散,持续时间长,而且影响范围较广。

为了验证沙尘识别算法的可行性,以 OMI 反演的紫外气溶胶指数(aerosol index, AI)产品为参考,对反演结果进行了验证。AI 指数是识别沙尘气溶胶的关键参数,在东亚大陆具有很好的一致性,其分辨率较高为 $13 \text{ km} \times 24 \text{ km}$,每天提供的数据几乎可以覆盖全球^[20]。AI 指数主要通过对比观测到的两个紫外线波段($354、388 \text{ nm}$)的反射辐射,来提取沙尘气溶胶含量,云和其他非吸收性气溶胶 AI 指数的数值非常小,接近于零;而对沙尘等吸收性气溶胶,AI 指数为正值,且数值相对较大^[21]。图 6 为 2016 年 5 月 5 日北京时间 13 时沙尘监测结果与 OMI 沙尘结果的对比,表明该算法能够有效地提取出沙尘区域,提取结果与 OMI AI 产品具有较好的时空一致性。

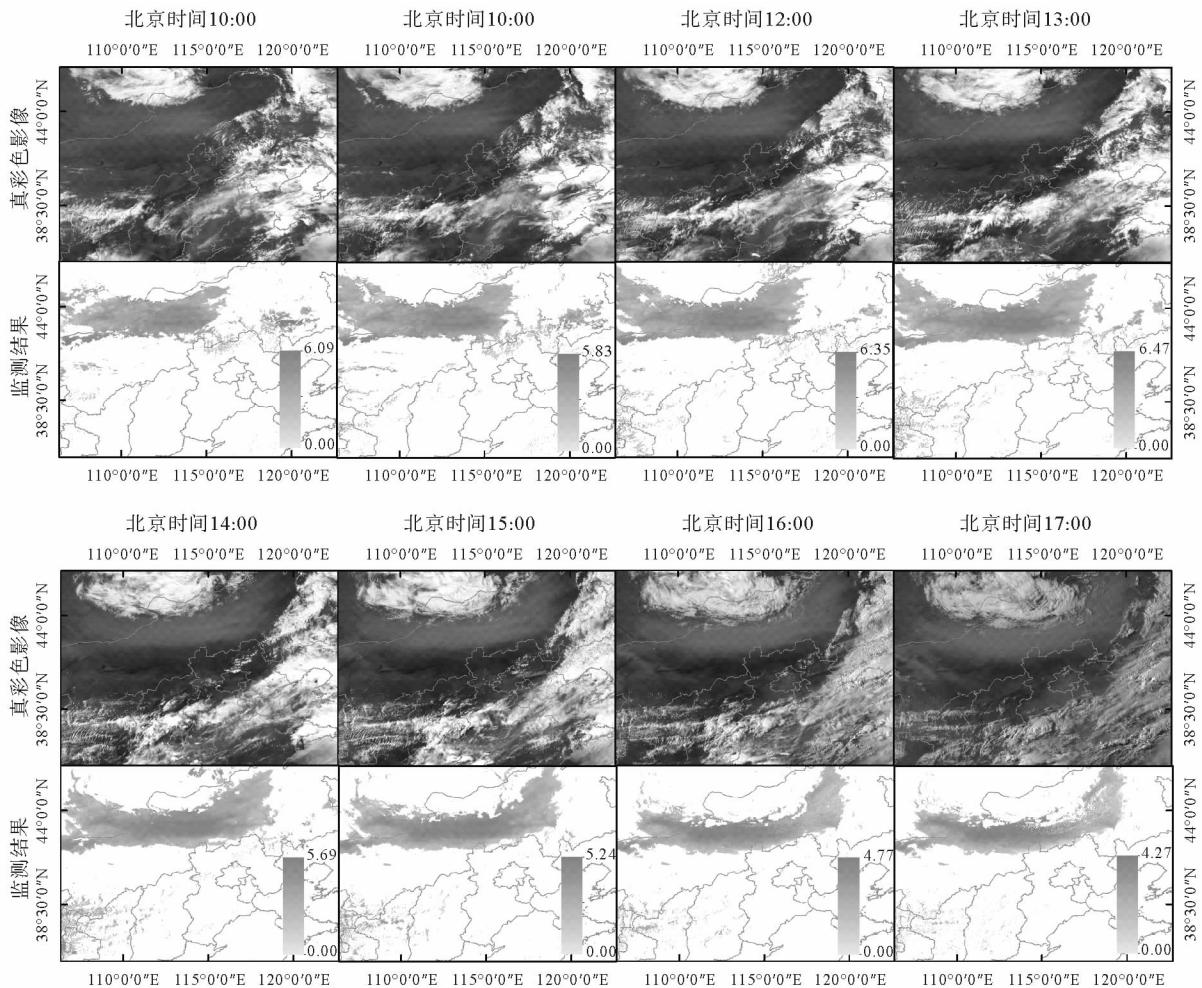


图 5 2016 年 5 月 5 日真彩色合成影像与沙尘监测结果图

Fig. 5 True color synthesis images and dust monitoring results on May 5, 2016

3 结论

Himawari-8 卫星的超高时间分辨率极大地改善了沙尘监测研究的时效性,为持续动态追踪、定位沙尘暴的起源、传输和扩散奠定了基础,其携带的 AHI 传感器可以获取多个沙尘敏感波段数据,可有效分析和监测沙尘信息。

考虑中红外 $3.9 \mu\text{m}$ 通道和多个热红外等通道的反射辐射特性,提出中红外和热红外通道亮度温度差值的组合阈值法,可准确判别沙尘的发生情况。本方法简单可靠,白天和夜晚都适用。通过对长时间序列影像沙尘监测结果之间的对比分析,可以实时、准确地捕捉沙尘的影响范围和强度,用 OMI AI 产品验证分析 Himawari-8 卫星沙尘提取结果,沙尘范围与强度基本一致,可以满足业务化监测的需求。

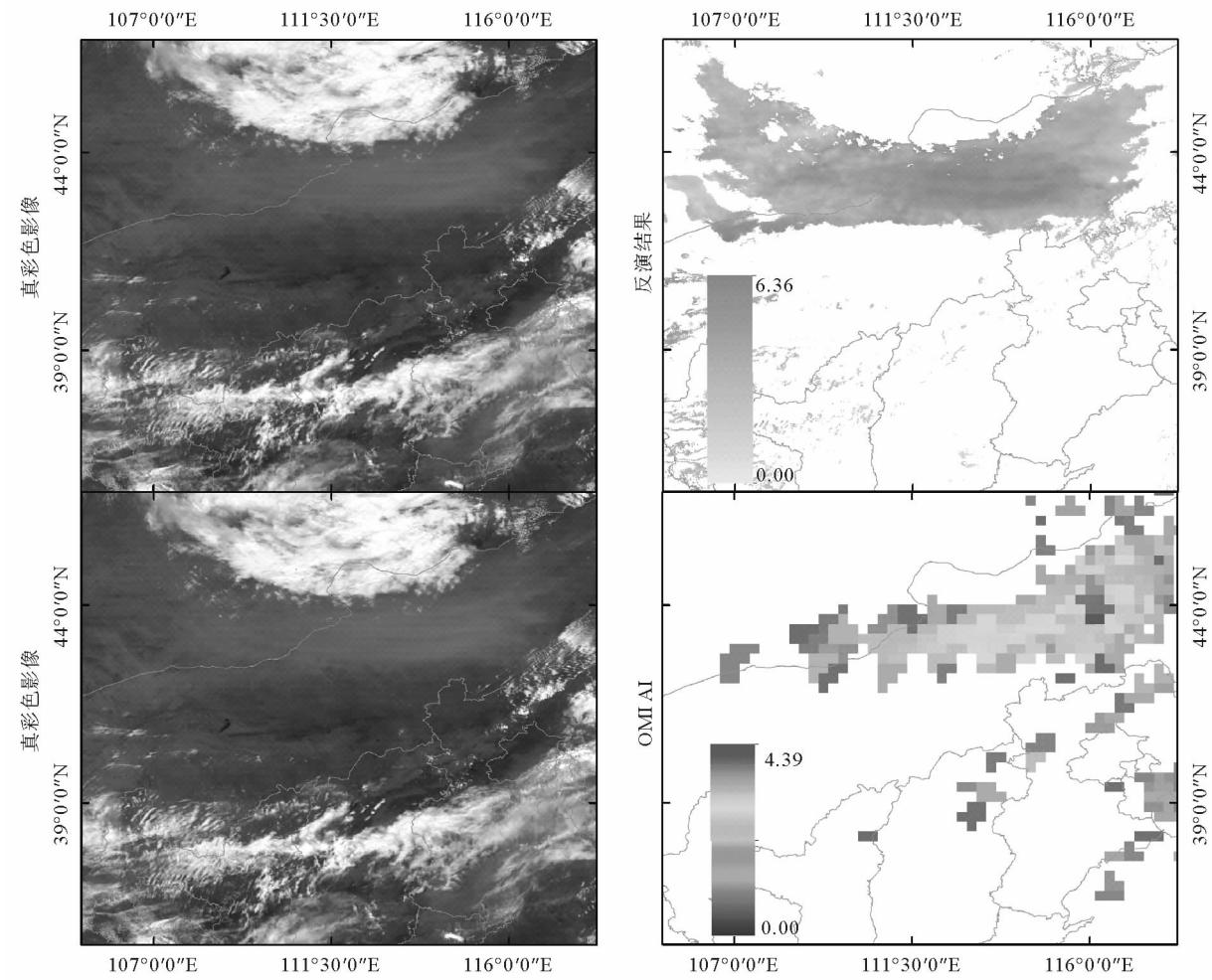


图 6 OMI 气溶胶指数与沙尘监测结果对比图

Fig. 6 Comparison of OMI aerosol index and dust monitoring results

参考文献：

- [1]潘耀忠,范一大,史培军,等.近 50 年来中国沙尘暴空间分异格局及季相分布-初步研究[J].自然灾害学报,2003,12(1):1-8.
PAN Yaozhong, FAN Yida, SHI Peijun, et al. Spatial variation and seasonal distribution of dust-storm in China in resent 50 years: A preliminary study[J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(1): 1-8.
- [2]赵仕伟,胥永文,史荟燕,等.我国沙尘灾害遥感监测研究与展望[J].气象与环境科学,2009,32(4):65-68.
ZHAO Shiwei, XU Yongwen, SHI Huiyan, et al. Research and prospect of remote sensing monitoring on Chinese sand-dust disaster[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2009, 32(4): 65-68.
- [3]史培军,严平,高尚玉,等.我国沙尘暴灾害及其研究进展与展望[J].自然灾害学报,2000,9(3):71-77.
SHI Peijun, YAN Ping, GAO Shangyu, et al. The duststorm disaster in China and its research progress[J]. Journal of Natural Disasters, 2000, 9(3): 71-77.
- [4]范一大,史培军,王秀山,等.中国北方典型沙尘暴的遥感分析[J].地球科学进展,2002,17(2):289-294.
FAN Yida, SHI Peijun, WANG Xiushan, et al. The analysis of typical dust storm in northern China by remote sensing[J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(2): 289-294.
- [5]SHENK W E,CURIAN R J. The detection of dust storms over land and water with satellite visible and infrared measurements[J]. Monthly Weather Review, 1974, 102:830-837.
- [6]CARLSON T N. Atmospheric turbidities in Saharan dust outbreaks as determined by analysis of satellite brightness data [J]. Monthly Weather Review, 1979, 107:322-335.

- [7] GRIGGS M. Measurements of atmospheric aerosol optical thickness over water using ERTS-1 data[J]. Journal of the Air Pollution Control Association, 1975, 25(6): 622-626.
- [8] ACKERMAN S A. Remote sensing aerosols using satellite infrared observation[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(D14): 17069-17079.
- [9] 郑新江, 陆文杰, 罗敬宁. 气象卫星多通道信息监测沙尘暴的研究[J]. 遥感学报, 2001, 5(4): 300-305.
ZHENG Xinjiang, LU Wenjie, LUO Jingning. Research on the duststorm monitoring using multi-channel meteorological satellite data[J]. Journal of Remote Sensing, 2001, 5(4): 300-305.
- [10] 范一大, 史培军, 潘耀忠, 等. 基于 NOAA/AVHRR 数据的区域沙尘暴强度监测[J]. 自然灾害学报, 2001, 10(4): 46-51.
FAN Yida, SHI Peijun, PAN Yaozhong, et al. Monitoring the intensity of regional dust storm using NOAA/AVHRR data [J]. Journal of Natural Disasters, 2001, 10(4): 46-51.
- [11] 罗敬宁, 范一大, 史培军, 等. 多源遥感数据沙尘暴强度监测信息可比方法[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(2): 28-34.
LUO Jingning, FAN Yida, SHI Peijun, et al. Information-comparable method of monitoring the intensity of dust storm by multisource data of remote sensing[J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(2): 28-34.
- [12] HUANG J P, GE J M, WENG F Z, et al. Detection of Asia dust storms using multisensory satellite measurements[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 110(2): 186-191.
- [13] 刘三超, 柳钦火, 高懋芳. 利用 Terra 和 Aqua 双星 MODIS 数据协同研究沙尘暴[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 31(12): 1051-1054.
LIU Sanchao, LIU Qinhuo, GAO Maofang. On Asian dust storm in China by combining daytime and nighttime Terra and Aqua MODIS data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(12): 1051-1054.
- [14] 罗敬宁, 徐喆, 亓永刚. 基于风云三号卫星的全球沙尘遥感方法[J]. 中国沙漠, 2015, 35(3): 690-698.
LUO Jingning, XU Zhe, QI Yonggang. Global dust remote sensing with the FengYun-3 satellite[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(3): 690-698.
- [15] 李帅, 胡列群, 何清, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地地表辐射收支特征研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(4): 1035-1044.
LI Shuai, HU Liequn, HE Qing, et al. Surface radiation budget in hinterland of the Taklimakan desert[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(4): 1035-1044.
- [16] 郑有飞, 刘贞, 刘建军, 等. 中国北部一次沙尘过程中沙尘气溶胶的时空分布及输送特性[J]. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1440-1452.
ZHENG Youfei, LIU Zhen, LIU Jianjun, et al. The Spatio-temporal distribution and transport behavior of a dust event in north China[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(5): 1440-1452.
- [17] LU H Y, SUN D H. Pathway of dust input to the Chinese Loess plateau during the last glacial and interglacial periods[J]. Catena, 2000, 40(3): 251-261.
- [18] 张树誉, 梁生俊, 卢西顺. 卫星遥感在陕西沙尘天气监测中的应用[J]. 陕西气象, 2001(6): 31-32.
ZHANG Shuyu, LIANG Shengjun, LU Xishun. Application of satellite remote sensing in monitoring dust weather in Shaanxi province[J]. Shaanxi Meteorology, 2001(6): 31-32.
- [19] ACKERMAN S A, STRABALA K I, MENEEL W P, et al. Discriminating clear sky from clouds with MODIS[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1998, 103(D24): 32141-32157.
- [20] YANG Y K, SUN L, ZHU J S, et al. A simplified Suomi NPP VIIRS dust detection algorithm[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2017, 164: 314-323.
- [21] 刘贞, 张雪姣, 郑有飞, 等. 基于 CALIPSO 对中国春季一次沙尘暴的研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(12): 4315-4327.
LIU Zhen, ZHANG Xuejiao, ZHENG Youfei, et al. Spatio-temporal distribution and transport behavior of a dust event based on the CALIPSO in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(12): 4315-4327.

(责任编辑:高丽华)