王威，胡秀清，张鹏，等，2019. 白天和夜间通用的卫星遥感沙尘判识算法构建与验证分析[J]. 气象，45(12)：1666-1679. Wang W，Hu X Q，Zhang P，et al，2019. Construction and validation of remote sensing dust recognition algorithm in daytime and nighttime[J]. Meteor Mon，45(12)：1666-1679(in Chinese).

白天和夜间通用的卫星遥感沙尘判识算法构建与验证分析*

王 威[1,2] 胡秀清[2] 张 鹏[2] 闵 敏[2,3]

1 中国气象科学研究院，北京 100081

2 国家卫星气象中心，北京 100081

3 中山大学大气科学学院，珠海 519082

提 要：Himawari-8 是日本发射的新一代静止气象卫星，与前一代的 MTSAT-2 相比，在时间、空间分辨率上都有了很大提升，特别是红外通道数量从 4 个增至 10 个，为红外遥感沙尘提供了新的观测数据。本研究利用 Himawari-8 的红外观测数据，发展了仅用红外通道的沙尘全天候判识算法，可以实现对白天和夜间的连续监测。算法在前人基础上去除了可见光通道，同时引入更多红外通道来进行云检测和沙尘判识。由于一日之中，地表温度发生变化，因此针对白天和夜间设置了两套不同的判别阈值，来保证算法的全天适用性。最后通过两次沙尘事件对沙尘判别结果的分析和检验表明，遥感判识结果与地面气象站和 PM_{10} 观测较为一致，说明了只用红外通道全天候判识沙尘的可行性。

关键词：沙尘暴，全天候，红外通道，Himawari-8

中图分类号：P413 **文献标志码**：A **DOI**：10.7519/j.issn.1000-0526.2019.12.004

Construction and Validation of Remote Sensing Dust Recognition Algorithm in Daytime and Nighttime

WANG Wei[1,2] HU Xiuqing[2] ZHANG Peng[2] MIN Min[2,3]

1 Chinese Academy of Meteorologicel Sciences, Beijing 100081

2 National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081

3 School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082

Abstract: Himawari-8 is a new generation of geostationary meteorological satellite launched by Japan. Compared with the previous generation of MTSAT-2, it has greatly improved its spatio-temporal resolution. The number of infrared channels of Himawari-8 is increased from 4 to 10 compared with MTSAT-2, providing new observation data for infrared remote sensing of dust. This research makes full use of Himawari-8 infrared observation data and develops an all-day dust identification algorithm using only infrared channels, which can realize continuous monitoring during the day and night. The algorithm is based on previous algorithms, and does not use visible light channels, but uses more infrared channels for cloud detection and dust recognition. As surface temperature changes during the day, two different sets of discriminant thresholds are set up for daytime and nighttime to ensure the applicability of the algorithm for the

* 国家重点研发计划(2018YFB0504900，2018YFB0504901)和国家自然科学基金项目(41871249)共同资助

2018 年 7 月 24 日收稿； 2019 年 9 月 20 日收修定稿

第一作者：王威，主要从事大气遥感相关研究. Email：18801090940@163.com

通信作者：胡秀清，主要从事星载遥感器定标技术及气象卫星工程预处理、产品算法开发和科学仿真等研究. Email：huxq@cma.gov.cn

whole day. Finally, two dust events are used to verify the results of dust discrimination. The consistency between ground-based and remote sensing results shows that it is feasible to use the infrared channel to identify sand and dust all day.

Key words: sandstorm, all day, infrared channel, Himawari-8

引　言

沙尘暴是风把地面物质吹起并卷入空中,使空气混浊的一种天气现象(翟章等,1996)。当沙尘暴发生时,浮尘迅速移动会造成农田掩埋、土壤退化、空气质量下降等危害,给社会经济、生态环境等带来负面影响(胡秀清等,2006)。

此外,沙尘对于气候系统也有影响(Haywood and Boucher,2000)。沙尘浮于空中,会吸收和散射太阳辐射,削减到达地面的辐射,使地面温度降低。同时,沙尘的吸收性会使大气增温。这两方面的作用,会使大气稳定度增加(张强和王胜,2005),降水减少。在云内液态水含量不变的前提下,沙尘也可以作为凝结核,改变云的生命期和光学性质(Ramanathan et al,2001;张喆等,2016;Huang et al,2010)。进而对辐射平衡和气候系统产生影响。因此,对沙尘发生的位置和强度进行准确监测就尤为重要(张鹏等,2018)。

沙尘观测方式可以分为地基和遥感两类。地基主要是单点观测,难以大范围监测沙尘(曹广真等,2013)。相比之下,气象卫星具有一次成像范围大,空间分布连续的特性,对于沙尘空间分布范围的确定较为有利。气象卫星可以分为极轨和静止两类。沙尘的遥感监测,初期多采用极轨卫星(Ackerman,1997),利用搭载在其上的 AVHRR 等成像仪,通过不同通道的亮温值、亮温差值等参数来进行沙尘的判识。之后 AIRS、IASI、CrIS 等红外高光谱仪器开始发展(Cuesta et al,2015;Dubuisson et al,2014),高光谱仪器有通道数量多、带宽窄的优势,可以选择对沙尘更为敏感的通道来区分沙尘和其他地物(Pierangelo et al,2004)。但高光谱传感器通常搭载在极轨卫星上,时间分辨率低,一天内的过境次数有限。而沙尘气溶胶通常寿命较短,且时空变化较大,所以通过极轨卫星难以实时捕捉沙尘的时空变化(Zhang et al,2018)。

相比之下,静止卫星具有高时间分辨率的特性,有利于捕捉沙尘随时间的变化情况,对沙尘发生范围的判定及沙尘过程的分析尤为重要。但 MTSAT-2、FY-2 等前一代的静止卫星搭载的成像仪,红外通道数量少,仅用红外通道难以实现对沙尘和云及晴空地表的准确区分,所以沙尘业务监测算法通常联合可见光和红外通道共同进行沙尘的判识。但可见光通道不能在夜间成像,所以,静止卫星的夜间沙尘判识便成为了一个难题(李彬等,2018)。另外,地表亮温的日变化(Park et al,2014;Wang and Lyu,2006)也进一步增加了沙尘全天候判识的难度。

随着静止卫星的发展,新一代静止气象卫星 Himawari-8 红外通道数量从上一代的 4 个增加至 10 个。红外通道数量的大幅增加给沙尘的夜间判识带来了新的曙光。本次研究旨在充分利用 Himawari-8 红外通道的特性,在分析沙尘、云和晴空地表在白天和夜间的光谱特征的基础上,加入新的红外通道作为判别参数,将沙尘和其他目标进行更为准确的区分。以此脱离算法对于可见光通道的依赖,实现对沙尘的全天候监测。众所周知,静止卫星有一次成像范围大、观测频次高的优势。若能实现沙尘的全天判识,那么其必将成为沙尘判识的一大利器,为沙尘追踪、沙尘过程分析等提供很好的数据支持。

1　数　据

目前新一代静止卫星 Himawari-8、FY-4 等已经开始投入应用(Min et al,2017)。此次研究选择 Himawari-8 作为数据源,一方面是由于此次研究主要应用红外通道,Himawari-8 与 FY-4 相比,红外通道的空间分辨率更高,对于沙尘空间范围的确定更有优势。另一方面,在 10～12.5 μm 的大气窗区,沙尘的光谱特征较为明显。在这一波长范围内,FY-4 包含 2 个通道,Himawari-8 包含 3 个通道。就通道数量而言,Himawari-8 数据更占优势,而且在本文方法中,Himawari-8 的这 3 个通道,在沙尘的判识中也确实起到了重要作用。所以结合上述考虑,在本文中采用了 Himawari-8 数据作为此次研究的数据源。

Himawari-8 是日本新一代静止气象卫星,于

2015年7月7日开始正式业务运行。如表1所示，Himawari-8相比上一代卫星MTSAT-2，其时间分辨率从30 min提升至10 min，红外通道空间分辨率从4 km提升至2 km，红外通道数量从4个增加至10个(Bessho et al，2016)。这说明Himawari-8较之MTSAT-2在时间、空间分辨率上都有了较大提升，这对沙尘判识非常有利。特别是红外通道数量的增加，为沙尘的全天判识提供了良好的数据支持。

表1 Himawari-8与MTSAT-2参数设置(Bessho et al，2016)

Table 1 The parameters settings of Himawari-8 and MTSAT-2 (Bessho et al, 2016)

Himawari-8			MTSAT-2		
通道号	中心波长/μm	空间分辨率/km	通道号	中心波长/μm	空间分辨率/km
1	0.47063	1	—	—	—
2	0.51000	1	—	—	—
3	0.63914	0.5	VIS	0.68	1.25～1.44
4	0.85670	1	—	—	—
5	1.6101	2	—	—	—
6	2.2568	2	—	—	—
7	3.8853	2	IR4	3.7	5～5.75
8	6.2429	2	IR3	6.8	5～5.75
9	6.9410	2	—	—	—
10	7.3467	2	—	—	—
11	8.5926	2	—	—	—
12	9.6372	2	—	—	—
13	10.4073	2	IR1	10.8	5～5.75
14	11.2395	2	—	—	—
15	12.3806	2	IR2	12.0	5～5.75
16	13.2807	2	—	—	—

2 沙尘监测原理

HITRAN数据库中AFCRL 1987 Shettle Dust Like气溶胶的复折射指数(Massie and Hervig，2013)如图1所示，从图中可以看出，在10～12.5 μm范围内，沙尘的散射和吸收作用，随波长的增加而逐渐减弱。所以在出现沙尘时，卫星观测到10.4 μm亮温值($BT_{10.4}$)、11.2 μm处的亮温值($BT_{11.2}$)、12.3 μm处亮温值($BT_{12.3}$)，会呈现出$BT_{10.4}<BT_{11.2}<BT_{12.3}$的特征。这一特殊的光谱性质，也成为了沙尘和云区、晴空地表进行区分的关键依据。

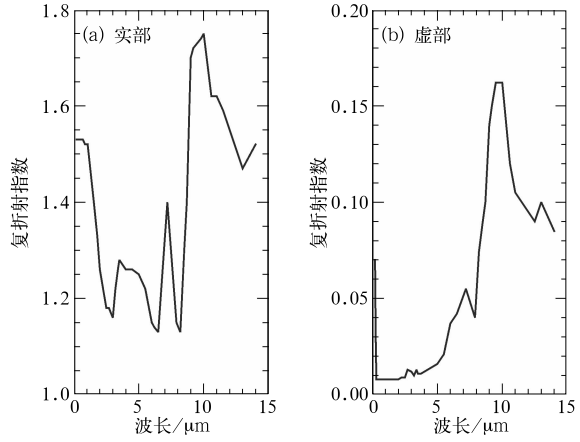

图1 HITRAN数据库中类沙尘气溶胶粒子的复折射指数

Fig. 1 Complex refraction index of HITRAN dust like aerosol

2.1 Himawari-8和MODIS通道对比

Himawari-8和MODIS的光谱响应函数如图2所示，从图中可以看出，Himawari-8和MODIS的光谱响应有一定差异。MODIS的带宽较窄，受水汽吸收影响小。而Himawari-8的12.3 μm通道带宽较宽，覆盖了12.5 μm后水汽吸收较强的区域，该通道受水汽吸收影响较大。所以在Himawari-8观测一些弱沙尘区时，11.2和12.3 μm通道的亮温差值($BT_{11.2}-BT_{12.3}$)在0附近，甚至呈现正值，此时根据$BT_{11.2}-BT_{12.3}<0$标准无法判识沙尘区。

但Himawari-8对比MODIS新增了10.4 μm通道，该通道位于红外大气窗区内，受水汽影响小。而且沙尘在10.4 μm的吸收和散射作用都大于11.2 μm处，所以沙尘区通常会呈现10.4和11.2 μm通道的亮温差值($BT_{10.4}-BT_{11.2}$)为负的特征。即

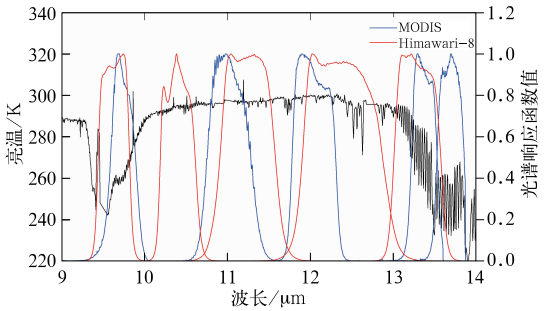

图 2　Himawari-8 和 MODIS 的光谱响应函数对比
(黑线为 AIRS 实测光谱数据)

Fig. 2　Comparison of spectral response functions of Himawari-8 and MODIS
(Black line is the measured spectral data of AIRS)

根据 $BT_{10.4}-BT_{11.2}<0$,在一定程度上也可以指示沙尘区域。

2.2　地表亮温日变化规律分析

一日中地表温度会发生变化,所以卫星观测的亮温值,以及由此计算出的沙尘判识参数的值也会随时间发生变化,这会对沙尘判识产生一定影响。为进一步评估地表亮温变化对沙尘判识的影响,首先需要对地表亮温的日变化规律进行分析。

亮温的日变化情况可以根据 Himawari-8 实测数据来进行分析。但 Himawari-8 实测的亮温数据常受云和气溶胶的影响,数据不稳定,震荡起伏大。所以通过 11.2 μm 通道 10 d 最大亮温值进行了晴空背景合成。针对合成的晴空地表数据,进行亮温变化规律分析,结果如图 3 所示。

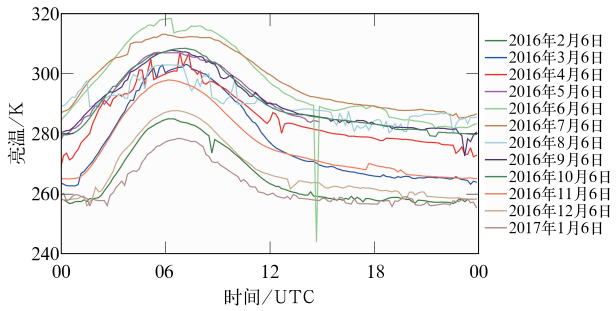

图 3　Himawari-8 合成晴空地表亮温日变化结果
(样点位于 39.18°N、85.76°E)

Fig. 3　Himawari-8 synthesis of clear sky background brightness temperature diurnal variation results
(Sample point is located at 39.18°N, 85.76°E)

首先整体上来看,地表亮温在一日之内呈现先增大再减小的特征,夜间地表亮温的变化率小于白天。从亮温变化的幅度来看,新疆地区地表亮温整体分布在 250～320 K。地表亮温的日变化幅度大致在 30 K,由于月份变化导致地表亮温差异最大在 25 K 左右。在沙尘多发的春季,地表亮温大致分布在 260～305 K。此外,在图 3 中有一个突然减小异常值,位于 2016 年 6 月 6 日 14:40,经比对发现这是由于背景合成的天数内该地都有云出现,所以背景合成图出现了云区,导致了图中异常值的出现。

2.3　地表亮温和沙尘浓度变化对亮温差的影响

为进一步定量分析地表亮温和沙尘浓度变化对亮温差值的影响,基于 MODTRAN(moderate resolution atmospheric transmission)辐射传输模式进行了模拟(Anderson et al, 1999)。模拟的气溶胶类型为沙漠型气溶胶,观测天顶角为 120°。模拟的地面气象视距为 0～5 km,地表亮温为 250～300 K,以 5 K 为分割。为了对比 Himawari-8 和 MODIS 的差异,将二者的光谱响应函数分别输入模式中进行计算,模拟结果如图 4 所示。

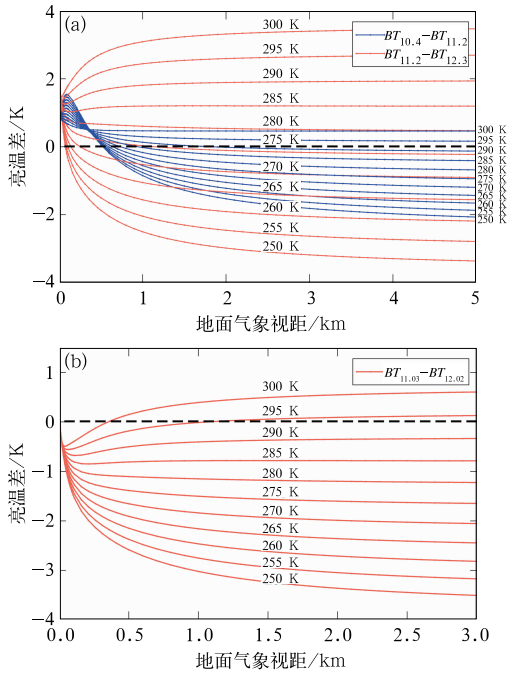

图 4　MODTRAN 模拟亮温差随地面气象视距的变化
(a)Himawari-8,(b)MODIS

Fig. 4　MODTRAN simulation of brightness temperature difference with surface meteorological range
(a)Himawari-8, (b)MODIS

从图中可以看出，MODIS 的 $BT_{11.03}-BT_{12.02}$ 和 Himawari-8 的 $BT_{11.2}-BT_{12.3}$ 整体变化趋势较为一致，并且当沙尘浓度增大到一定程度时，亮温差值会出现拐点。这是由于沙尘过于密集时，沙尘层的光学性质会越来越接近地表，所以卫星观测到的亮温差值会呈现反向变化的趋势（胡秀清等，2007）。这与 Hu et al（2008）的结果一致。从数值上来看，MODIS 的 $BT_{11.03}-BT_{12.02}$ 基本呈现负值，而 Himawari-8 的 $BT_{11.2}-BT_{12.3}$ 则有较大一部分呈现正值。由 2.1 节的分析可知，这是由于 Himawari-8 的 12.3 μm 通道受水汽吸收影响大所致。

参数 $BT_{10.4}-BT_{11.2}$ 的模拟结果如图 4a 中蓝线所示，$BT_{10.4}-BT_{11.2}$ 的变化趋势与 $BT_{11.2}-BT_{12.3}$ 有所不同。当沙尘浓度较小时，$BT_{10.4}-BT_{11.2}$ 大多为负值，随着沙尘浓度的增加，沙尘组分的影响逐渐增强（Sokolik，2002），这时 $BT_{10.4}-BT_{11.2}$ 的值开始由负转正。当沙尘浓度进一步增加时，由于沙尘过于密集，沙尘层的性质会越来越接近地表。此时随着沙尘浓度的增加，$BT_{10.4}-BT_{11.2}$ 会逐渐减小。

上文分析表明，在沙尘区，MODIS 的 $BT_{11.03}-BT_{12.02}$ 大多呈现负值（张鹏等，2007），根据 $BT_{11.03}-BT_{12.02}<0$ 可以较好地进行沙尘判识。而对于 Himawari-8 来说，在很多沙尘区，$BT_{11.2}-BT_{12.3}$ 会呈现正值。此时只根据 $BT_{11.2}-BT_{12.3}<0$ 做沙尘判识，会漏判强度小的沙尘区。而在沙尘强度较小时，参数 $BT_{10.4}-BT_{11.2}$ 基本呈现负值，此时可以根据 $BT_{10.4}-BT_{11.2}<0$ 来判识这部分沙尘区。所以在某种程度上，参数 $BT_{11.2}-BT_{12.3}$ 和 $BT_{10.4}-BT_{11.2}$ 互为补充，可以联合作为沙尘判识参数。

2.4 不同地物的红外光谱对比

上文对沙尘物理特性，以及 Himawari-8 通道设置对沙尘的影响进行了分析。并通过辐射传输模式模拟了地表亮温日变化和沙尘浓度变化对 Himawari-8 判识沙尘带来的影响。这些分析以沙尘为中心，是关键的理论基础。而在实际的沙尘判识过程中，沙尘容易和云/地表发生混淆，所以在了解沙尘特性的基础上，还要进一步了解云区的晴空地表特征，才能更为准确地判识沙尘。所以这一部分结合 Himawari-8 实测数据，分析了白天和夜间，沙尘区、云区、晴空地表的光谱特性。

2.4.1 不同区域沙尘的光谱对比

卫星自上而下进行观测，当空气中存在沙尘时，地表的辐射可以穿透沙尘层到达卫星，卫星记录到的信号包含地表和沙尘层的共同作用。而不同地区的下垫面性质有所不同，所以沙尘发生在不同地区时，卫星的观测光谱可能会有一定差异。此外，当沙尘浮于云上时，卫星观测到的信号会同时包含沙尘和云的信息，这时沙尘的光谱也会有一定变化。

为了表征不同地区沙尘的光谱差异，结合 Himawari-8 数据，在新疆、内蒙古、北京等地进行了选点，同时也在中国东北地区进行选点，来分析云上沙尘的特征，最终绘制的光谱如图 5 所示。

从图中可以看出，白天和夜间沙尘区的特征有一些相似，大部分沙尘区都有 $BT_{10.4}-BT_{11.2}<0$ 的特征，而新疆一些沙尘强度较大的沙尘区会出现 $BT_{10.4}-BT_{11.2}>0$ 和 $BT_{11.2}-BT_{12.3}<0$ 的特征，因此需要联合 $BT_{10.4}-BT_{11.2}$ 和 $BT_{11.2}-BT_{12.3}$ 共同进行沙尘的判识，这和 2.3 节中模式模拟的结论相对应。

2.4.2 不同云区的光谱对比

在沙尘判识算法中，沙尘和云的区分是较为关键的部分。为了进一步分析云区的光谱性质，与 FY-2 云类型产品进行比对后，从不同云区进行选点，针对白天和夜间分别绘制光谱图像，结果如图 6 所示。大部分云区有 $BT_{10.4}>BT_{11.2}>BT_{12.3}$ 的

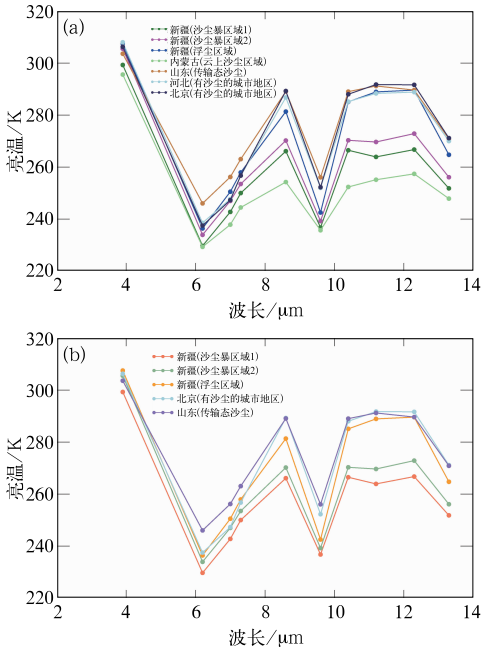

图 5 白天(a)和夜间(b)不同区域沙尘光谱对比

Fig. 5 Spectral contrast of dust in different regions in daytime (a) and nighttime (b)

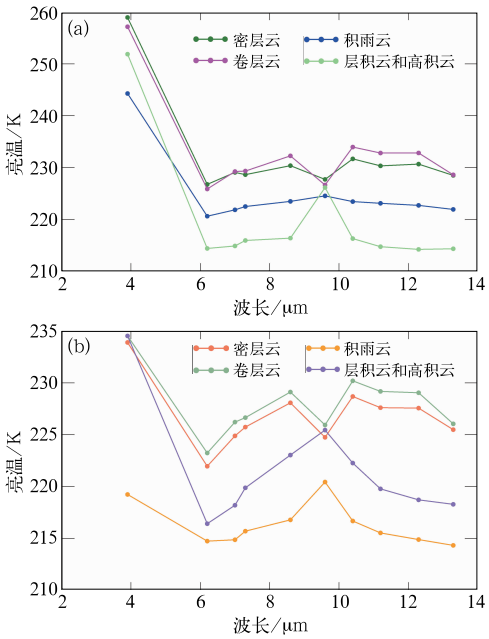

图 6　白天(a)和夜间(b)不同云区光谱对比

Fig. 6　Spectral contrast of cloud in different regions in daytime (a) and nighttime (b)

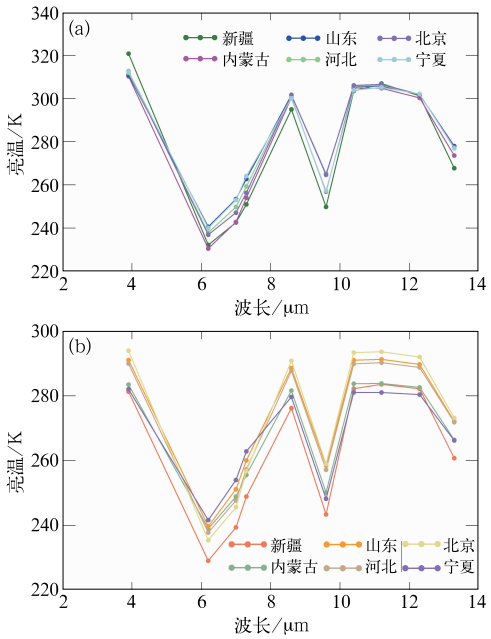

图 7　白天(a)和夜间(b)不同区域晴空地表光谱对比

Fig. 7　Spectral contrast of clear surface in different regions in daytime (a) and nighttime (b)

特征,与沙尘区的性质有明显差异。但也有一部分云区会出现 $BT_{11.2}$ 略小于 $BT_{12.3}$ 的特点,和沙尘区的特征有一些相似,如果直接根据 $BT_{11.2}-BT_{12.3}<0$ 进行判识,就会将这部分云区误判为沙尘区。所以在沙尘判识之前,需要先进行云检测。去除云区对于沙尘判识的影响,使沙尘的判识结果更为准确。

2.4.3　不同区域晴空地表的光谱对比

上文分析了沙尘区、云区的光谱性质,这一部分主要分析晴空地表的光谱性质。所用的数据为 Himawari-8 的晴空地表合成数据,从新疆沙漠地区、北京等城市地区、中国中部地区、内蒙古东北地区进行选点,分别绘制白天和夜间的光谱图像,结果如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,晴空地表大多有 $BT_{10.4}>BT_{11.2}>BT_{12.3}$ 的特征,不同通道之间的亮温差异白天大于夜间。值得注意的是,图中新疆晴空合成的地表光谱出现了 $BT_{10.4}-BT_{11.2}<0$ 的特征,与其他地区有所差异。这是因为合成背景的 10 d 数据,在该地都有云区或沙尘区出现,所以合成的背景图中出现了沙尘,导致了图中 $BT_{10.4}-BT_{11.2}<0$ 的情况。除此之外,合成的晴空地表都有 $BT_{10.4}>BT_{11.2}>BT_{12.3}$ 的特征。

3　沙尘判识方法

3.1　沙尘和云的区分

在沙尘判识过程中,一些云区和沙尘区的判别参数值较为接近。不进行云滤除而直接判识沙尘,就会将一些云区误判为沙尘区,影响沙尘判识的精度。所以在沙尘判识之前,需要先进行云滤除处理。

在晴空条件下,卫星可以观测到地表发射的辐射,但有云出现时,尤其是云层较厚的时候,地表辐射难以穿透云层到达云区。所以有云存在时,与晴空时相比,卫星观测到的亮温值会有一定差异(Legrand et al,2001),这就是红外差值沙尘指数(infrared difference dust index,IDDI),可以通过该值来进行云区的检测。除了在晴空条件下的差异,云区在不同通道间的吸收和散射特性也有一定差异,根据不同通道的亮温值可以识别云区。此外,云区也包含大量水汽,通过水汽通道的亮温值可以进行云区的识别。

以上述原理为基础,本文方法中对于冰云的识别主要应用参数包括 $BTD_{8.6,11.2}$、$BTD_{3.9,6.9}$、$IDDI_{8.6}$、$IDDI_{11.2}$ 等。对于水云的识别,红外3.9 μm

是一个重要的通道，通过 $IDDI_{3.9}$、$BTD_{3.9,11.2}$ 检测出水云的存在。此外，$BTD_{11.2,12.3}$ 的引入，是为了进一步区分云区和沙尘区，避免将沙尘区误判为云区。本文方法中云检测的判别参数设置如下：

（1）多个红外通道间的亮温差。具体判识因子如下：

$$BTD_{3.9,6.9} = BT_{3.9} - BT_{6.9} \quad (1)$$

$$BTD_{8.6,11.2} = BT_{8.6} - BT_{11.2} \quad (2)$$

$$BTD_{3.9,11.2} = BT_{3.9} - BT_{11.2} \quad (3)$$

$$BTD_{11.2,12.3} = BT_{11.2} - BT_{12.3} \quad (4)$$

式中，$BTD_{3.9,6.9}$ 的设置主要基于云在短波红外和中红外通道的光谱差异。$BTD_{8.6,11.2}$ 的设置主要是由于 8.6 μm 和大气窗区之间的亮温差异对薄冰云有很好的反映，可以以此来判别一部分云区。$BTD_{3.9,11.2}$ 是基于中红外和长波红外的差异，同时联合 $BTD_{11.2,12.3}$ 来识别云区。

（2）多个通道的 $IDDI$ 值。具体判识因子如下：

$$IDDI_{3.9} = Background_{3.9} - Project_{3.9} \quad (5)$$

$$IDDI_{8.6} = Background_{8.6} - Project_{8.6} \quad (6)$$

$$IDDI_{11.2} = Background_{11.2} - Project_{11.2} \quad (7)$$

式中，$Background$ 是对红外 11.2 μm 通道 10 d 取最大亮温值进行合成的数据，$Project$ 是实时数据。由于不同通道的 $IDDI$ 值有一定差异，为了更准确地判识云区，选择了中红外 3.9 μm 和位于大气窗区的 8.6 和 11.2 μm，共 3 个通道的 $IDDI$ 值来联合判识云区。这样设置参数，旨在通过不同波长 $IDDI$ 值的对比分析，更仔细地进行云的判识。

（3）水汽通道的亮温值。因为云区在水汽通道上有一定的吸收作用，亮温较低。所以通过水汽通道的亮温值，可以判识一部分云区。除了 7.3 μm 通道外，Himawari-8 新增的 13.3 μm 通道上也是一个水汽吸收带，可作为沙尘判识的依据。

图 8 为该方法得到的 2016 年 3 月 5 日 06 时的云检测结果。通过真彩色合成图和云区判识结果的对比可以看出，云检测结果中的云区位置和实际观测较为一致。而且，方法中考虑了沙尘和云的区分，没有将云上沙尘区划分为云区。但方法也有局限性，红外通道上冰雪和云的特征有一些类似，该算法未仔细区分云和冰雪，将二者都归为了云区。从云区判识的角度来讲，这样的划分不够精细。但对于沙尘判识来讲，这样的划分对于最后的结果几乎没有影响。

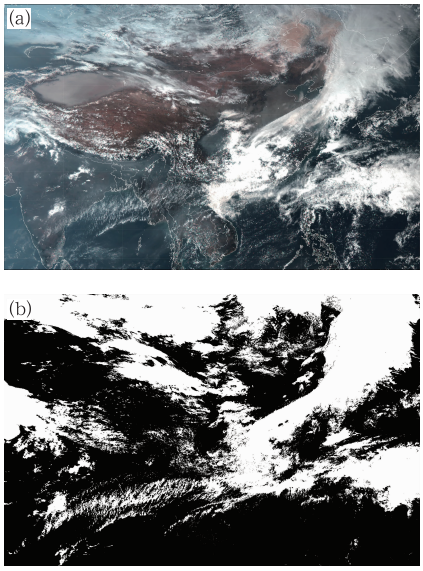

图 8 2016 年 3 月 5 日 06 时 Himawari-8 真彩色合成图像(a)及云检测结果(b)

Fig. 8 Real color image (a) and cloud detection result diagram (b) at 0600 UTC 5 March 2016

3.2 沙尘判识方法

沙尘和云、晴空地表之间容易发生混淆。前面已经做了云滤除，所以这一部分主要是区分沙尘和晴空地表。参数 $BTD_{12.3,3.9}$ 主要用来识别去除海洋区域。$BTD_{11.2,12.3}$、$BTD_{10.4,11.2}$ 以及 $IDDI$ 指数为主要的沙尘判识参数。

根据 2.4.3 节的分析可知，在 10～12.5 μm 的大气窗区，晴空地表的亮温基本上保持不变，或略微出现 $BT_{10.4} > BT_{11.2} > BT_{12.3}$ 的特性，大部分云区也有相似的特性。而对于沙尘区来讲，大部分的弱沙尘区有 $BT_{10.4} - BT_{11.2} < 0$ 的特征，当沙尘强度增加时，受沙尘组分的影响，会出现 $BT_{10.4} - BT_{11.2} > 0$ 和 $BT_{11.2} - BT_{12.3} < 0$ 的特征，这与晴空地表有着明显的区别，此外，$IDDI$ 值也是沙尘区和地表区分的重要依据，可以联合这些参数来区分沙尘和晴空地表。具体的判别参数设定如下：

（1）通过多个红外通道间的亮温差来判别云区，具体判识因子如下：

$$BTD_{11.2,12.3} = BT_{11.2} - BT_{12.3} \quad (8)$$

$$BTD_{10.4,11.2} = BT_{10.4} - BT_{11.2} \quad (9)$$

$$BTD_{12.3,3.9} = BT_{12.3} - BT_{3.9} \quad (10)$$

（2）$IDDI$ 值。具体判识因子如下：

$$IDDI_{11.2} = Background_{11.2} - Project_{11.2} \quad (11)$$

$IDDI_{11.2}$的设置是由于云的消光能力通常较强,*IDDI* 值较大。晴空地表的 *IDDI* 值则相对较小。沙尘具有一定消光能力,但其消光能力通常弱于云区,所以沙尘的 *IDDI* 值通常高于晴空地表、小于云区。因此对 $IDDI_{11.2}$设置合理的阈值,对于沙尘和地表、云的区分有一定作用。

3.3　沙尘判识阈值的设定

地表亮温有日变化的特征。在 2.3 节中,通过辐射传输模式模拟了地表温度和沙尘浓度的变化对判识参数的影响。这一部分则基于 Himawari-8 的实测数据,进一步分析沙尘判别参数的日变化情况。最后根据模拟和实测的结果,设置沙尘判识阈值。

以 2016 年 3 月 5 日的沙尘事件为例,选取沙尘强度相对较大和相对较小的两个地方,对沙尘判识参数日变化情况进行分析,结果如图9和图10所

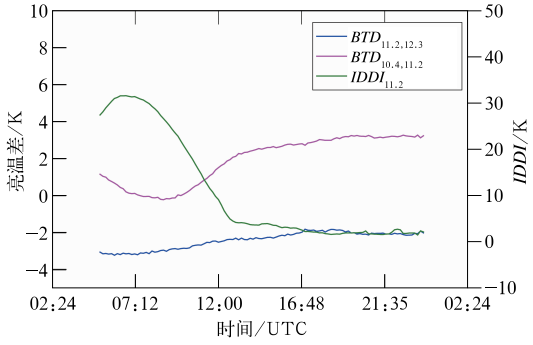

图 9　2016 年 3 月 5 日 Himawari-8 实测新疆沙尘暴地区沙尘判别参数日变化
(样点位于 38.44°N、79.96°E,取 3×3 像元均值)

Fig. 9　Diurnal variation of sand dust discrimination parameters in Xinjiang sandstorm area measured by Himawari-8 on 5 March 2016
(Sample point is located at 38.44°N, 79.96°E, and takes 3×3 pixel mean value)

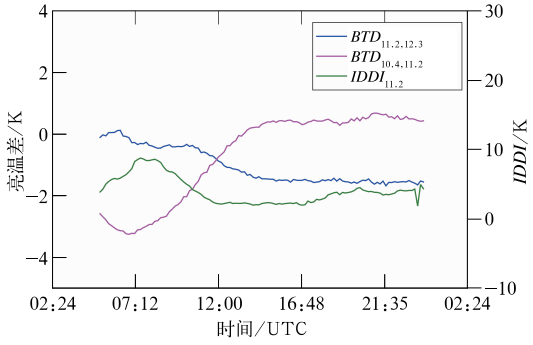

图 10　同图 9,但为浮尘区

Fig. 10　Same as Fig. 9, but in floating dust area

示。从图 9 可以看出,沙尘强度较大地区,白天 $BT_{10.4}-BT_{11.2}$的差值为正,根据 $BT_{10.4}-BT_{11.2}<0$ 无法判识出沙尘区域,而 $BT_{11.2}-BT_{12.3}$则呈现出了明显的负值,可以根据 $BT_{11.2}-BT_{12.3}<0$ 来判识沙尘。到夜间,地表亮温下降,$BT_{10.4}-BT_{11.2}$依旧为正值,对沙尘的判识没有起到明显效果,而 $BT_{11.2}-BT_{12.3}$的负值进一步增加,判识效果更好。

而在图 10 所示的沙尘强度较小的地区,白天,$BT_{10.4}-BT_{11.2}$出现了明显的负值,可以根据 $BT_{10.4}-BT_{11.2}<0$ 来判识沙尘,而 $BT_{11.2}-BT_{12.3}$的负值则不明显,难以用于沙尘的判识。到夜间,由于地表温度和沙尘浓度的变化,$BT_{10.4}-BT_{11.2}$逐渐开始变为正值,难以根据 $BT_{10.4}-BT_{11.2}<0$ 判识沙尘区域。而此时 $BT_{11.2}-BT_{12.3}$则呈现出较为明显的负值,成为沙尘判识的主导因子。

除上述的亮温差值外,从图 9 和图 10 中可以看出,*IDDI* 值也有较为明显的日变化情况。当沙尘浓度较大时,*IDDI* 值的日变化较为明显,日间最大的时候在 30 K 附近,夜间则降到了 5 K 以下。这是因为在白天,沙尘会削减到达地面的太阳辐射,导致地表增温减缓,同时沙尘也会削减地表发射到卫星的辐射,两方面的作用致使日间的 *IDDI* 值较大。而在夜间,到达地面的外界辐射较少,地表亮温呈现较为稳定的低值,此时沙尘层导致的卫星观测的亮温变化量相对较小,因而夜间的 *IDDI* 值明显小于白天。所以夜间的沙尘判识,主要依据为不同通道间的亮温差值,*IDDI* 值作为辅助参考。

结合模式模拟的结果和 Himawari-8 实测结果,本文方法针对白天和夜间设置了两套沙尘判识阈值。对主要的沙尘判识参数,判识阈值设定如下:

白天:

$$\begin{aligned}&(BT_{10.4}-BT_{11.2}\leqslant -1.5 \quad \text{or}\\ &BT_{11.2}-BT_{12.3}\leqslant -0.5) \quad \text{and}\\ &3<IDDI_{11.2}<35\end{aligned} \tag{12}$$

夜间:

$$\begin{aligned}&[(BT_{10.4}-BT_{11.2}\leqslant 0 \quad \text{and}\\ &BT_{11.2}-BT_{12.3}\leqslant 0.2) \quad \text{or}\\ &BT_{11.2}-BT_{12.3}<-0.5] \quad \text{and}\\ &0.5<IDDI_{11.2}<20\end{aligned} \tag{13}$$

上述表达式中,*IDDI* 的阈值在白天和夜间差异较大。亮温差的阈值变化幅度相对较小。参数 $BT_{11.2}-BT_{12.3}$的阈值在白天和夜间虽然在数值上相同,但从前面的辐射传输模式中可以看出,白天时

$BT_{11.2}-BT_{12.3}$对于沙尘强度较小的地区不是很适用，需要$BT_{10.4}-BT_{11.2}$做补充。而夜间，地表亮温下降时，$BT_{11.2}-BT_{12.3}$的判识效果则相对较好。所以这个参数在白天和夜间虽然设定的阈值一样，但发挥的作用是不同的。而*IDDI*值在白天和夜间的差异则相对较为明显，白天和夜间的阈值差异大。

结合上述分析，本文联合$BT_{10.4}-BT_{11.2}$、$BT_{11.2}-BT_{12.3}$、*IDDI*值进行白天的沙尘判识；夜间主要应用$BT_{10.4}-BT_{11.2}$、$BT_{11.2}-BT_{12.3}$来进行沙尘的判识，*IDDI*值则作为辅助参数，主要用以区分云区和沙尘区。除了判识阈值外，沙尘全天候判识还需要确定的一个重要问题——如何界定白天和黑夜。对于这个问题，本文方法中应用太阳天顶角作为界定依据，当太阳天顶角较小时，定义为白天，应用白天的判识阈值；当太阳天顶角较大时，定义为夜间，应用夜间的判识阈值。以此为依据，得到的沙尘判识结果在晨昏线两侧较为一致，白天和夜间的连续性相对较好。

4 个例分析及结果验证

为了对 Himawari-8 沙尘判识结果进行验证，本文中选择了三次有代表性的沙尘事件，将 Himawari-8 沙尘判识结果与地面气象站和PM_{10}数据进行比对，来验证沙尘判识的准确性。并且结合一次典型的沙尘事件，将 Himawari-8 的沙尘判识结果与 FY-2 的沙尘判识结果进行比对，以此进一步说明本文方法相较于 FY-2 沙尘判识算法的不同和改进之处。

4.1 2016 年 3 月 5 日沙尘判识结果分析

2016 年 3 月 5 日的沙尘过程由蒙古气旋导致，首先在中国新疆、甘肃、内蒙古等地出现了沙尘，而后沙尘层的高度逐渐升高，并且开始向中国东部地区输送。但沙尘的输送并不是完全连续的，由于在辽宁等地有降水出现，所以沙尘的传输存在局部中断的现象。到 3 月 5 日夜间，沙尘过程开始减弱。

这是一次典型的沙尘过程，在 3 月 5 日 06 时（世界时，下同）的数据中，同时包含了不同特征的沙尘区，包括新疆强度较大和强度相对较小的沙尘区，以及云上沙尘区。并且沙尘的覆盖范围大，包含了中国西部的新疆地区、中部的陕西地区、东部的河北地区，以及东北的云上沙尘区。这次沙尘事件包含了不同特征的沙尘，而且沙尘的覆盖范围大，是值得分析的典型个例。

4.1.1 Himawari-8 和 FY-2 判识结果比对

基于 Himawari-8 数据对这次沙尘事件进行了判识，通过 5×5 和 9×9 的滤波对结果中存在一些细碎的杂点进行了滤除，最终得到的结果如图 11b 和 11c 所示。为了进一步说明 Himawari-8 的沙尘判识结果相对前一代静止卫星的改进作用，将 Himawari-8 的判识结果与同一时刻前一代静止卫星的沙尘判识结果进行了比对。因为未找到 MTSAT-2 的沙尘判识产品，所以用了与 MTSAT-2 通道数总数和空间分辨率较为接近的FY-2的沙尘监

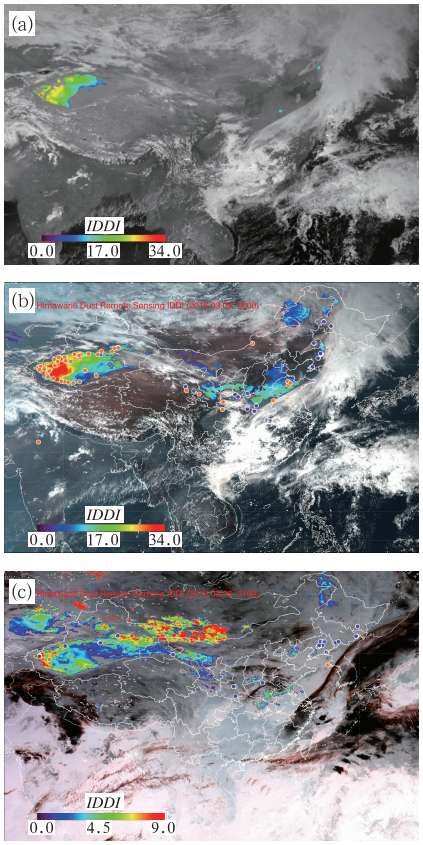

图 11 2016 年 3 月 5 日 06 时(a,b)和 21 时(c)的 FY-2(a)和 Himawari-8(b,c)沙尘监测
（橙色点为观测有沙尘出现的地面气象站点，蓝色点为$PM_{10}>500\ \mu g\cdot m^{-3}$的站点）

Fig. 11 Comparison of dust recognition results and ground-based observation by FY-2 (a) and Himawari-8 (b, c) at 0600 UTC (a, b) and 2100 UTC (c) 5 March 2016
(Orange points are the site where dust is observed at the surface meteorological station, blue points are the site with PM_{10} greater than 500 $\mu g\cdot m^{-3}$)

测产品作为比对对象。

图 11a 和 11b 分别为 FY-2、Himawari-8 的沙尘判识结果。进行比对可以发现,FY-2 的沙尘判识算法对于新疆沙尘强度稍大的地方有较好的指示作用,但其中也存在少量漏判的空洞地区,对于新疆地区沙尘强度稍低的地方,和中国东北部的云上沙尘区没有指示。造成该结果的主要原因是通道数量的限制,导致可以计算的判识参数有限,即使算法中同时应用了可见光通道和红外通道,沙尘判识的精度仍然有限。而且可见光通道只能在白天成像,可见光通道的使用,导致该算法不能判识夜间的沙尘。相比之下,Himawari-8 的沙尘判识结果和地基结果的匹配度更高,而且算法中只用了红外通道,可以进行全天候的沙尘判识。

Himawari-8 判识结果的提高,主要归功于沙尘判识参数的设置,其中最为关键的参数是 $BT_{11.2}-BT_{12.3}$ 和 $BT_{10.4}-BT_{11.2}$。图 12 为 2016 年 3 月 5 日 06 时 Himawari-8 的相关结果。从图中可以看出,$BT_{11.2}-BT_{12.3}$ 的值对于新疆地区沙尘强度较大的地区有一定反映,对强度稍小的地区反映不明显。而 $BT_{10.4}-BT_{11.2}$ 的结果则与之相反,对于沙尘强度较大的地区则反映不明显,但是对于新疆的弱沙尘地区中国中部的陕西和东部的河北等地的沙尘具有很好的指示作用。

所以 $BT_{11.2}-BT_{12.3}$ 和 $BT_{10.4}-BT_{11.2}$ 的结果在一定程度上可以互为补充。在保持其他参数的基础上,同时应用这两个参数可以更好地判识出沙尘区域。图 11 中 Himawari-8 最终的判识结果也显示出,无论在白天还是夜间,Himawari-8 的判识结果和图中橙色点的地面气象站观测结果都具有较好的一致性。

4.1.2　地基观测数据分析

对地面气象站数据进行分析时发现,夜间地面气象站显示有沙尘的站点数量明显小于白天。这可能是夜间较暗,能见度和沙尘天气难以观测所致。但沙尘发生是一个大范围连续的过程,沙尘发生的范围白天和夜间应有一定的连续性。而夜间观测有沙尘的站点则有突然大量地减少的现象,说明地面气象站的夜间观测数据可能存在一定问题,根据这样的数据不足以对 Himawari-8 夜间的沙尘判识结果进行验证。需结合其他数据共同验证 Himawari-8 的判识结果。

在沙尘发生时,空气中漂浮的沙尘粒子增加,所

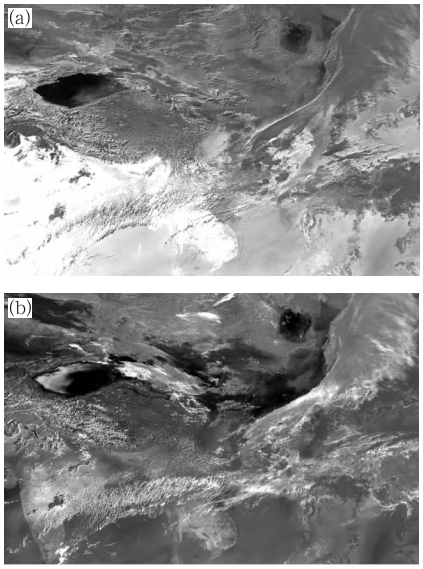

图 12　2016 年 3 月 5 日 06 时 Himawari-8 的 $BT_{11.2}-BT_{12.3}$(a)及 $BT_{10.4}-BT_{11.2}$(b)结果

Fig. 12　$BT_{11.2}-BT_{12.3}$(a) and $BT_{10.4}-BT_{11.2}$(b) results of Himawari-8 at 0600 UTC 5 March 2016

以 PM 值会出现一定变化。PM 数据通过对实际大气取样来计算浓度,与地面气象站的沙尘数据相比,PM_{10} 数据质量更为稳定,随昼夜变化幅度小。因为沙尘的粒径相对较大,所以当沙尘出现时,PM_{10} 的变化相对 $PM_{2.5}$ 更为明显。所以针对 PM_{10} 数据做进一步分析。

在没有沙尘时,同一时刻所有站点的 PM_{10} 数据大体呈现正态分布的趋势。而在沙尘出现时,PM_{10} 数据明显呈现出有偏分布的趋势,此时不能根据均值加标准差的方式筛选数据,因此通过设定阈值的方式来进行沙尘发生站点的选取。因为城市地区背景气溶胶更为复杂,可以根据城市地区的情况来设置 PM_{10} 的选取阈值。如果该阈值在复杂的气溶胶背景下,可以判断出沙尘的发生,那么对于较为干净的大气,通过同样的阈值更容易判别出沙尘区域。

因为北京地区受雾-霾影响大,气溶胶相对复杂,所以针对北京地区进行了分析,结合北京地区 2016—2018 年的 PM_{10} 数据,绘制的时间序列如图 13 所示。从图中可以看出,北京地区 PM_{10} 的值多处于 0～300 $\mu g \cdot m^{-3}$,有两次异常高值,为 2017 年 5 月 4 日和 2018 年 3 月 28 日,查询历史数据,发现这两天均有沙尘暴发生。根据图中的数据,最终确定的阈值为 500 $\mu g \cdot m^{-3}$,即将 $PM_{10}>500$ $\mu g \cdot m^{-3}$ 的站点确定为可能存在沙尘的站点。

通过 Zhao et al(2010)研究中的 PM_{10} 和能见度转化公式，将地基观测的能见度转为了 PM_{10}，并与 PM_{10} 的观测数据进行融合，得到的结果如图 11 所示，图中橙色点为观测有沙尘出现的地面气象站点，蓝色点为 $PM_{10}>500\ \mu g \cdot m^{-3}$ 的站点。

4.1.3 Himawari-8 判识结果分析

从图 11 中观测的结果可以看出，Himawari-8 判识出的沙尘区域和地基结果整体上具有较好的一致性。但也有一部分 Himawari-8 的判识结果和地基观测站点不能对应，其中有一部分是云区。这是由于 Himawari-8 的成像仪器自上而下观测，难以观测到云区下的沙尘，所以出现了漏判的现象。另外中国东侧地区，有一部分云上沙尘区。因为沙尘浓度较小，云区的辐射信号可以穿过沙尘层到达云区，所以卫星的观测信号同时记录了沙尘和云区的信息。而沙尘浓度小，对观测信号的贡献较少，卫星观测到的沙尘的光谱特性不明显，导致了这部分地区的漏判。但对于其他地区，比如中国的西部、中部地区，沙尘的判识结果和地基观测还是较为一致的。

4.2 其他两次沙尘事件分析

上文的判识结果是一个个例，为了进一步验证算法的扩展性，选取了其他沙尘案例进行分析，图 14 和图 15 展示的是 2016 年 3 月 10 日和 2017 年 5 月 4 日的沙尘判识结果。

之所以选择这两个个例，是因为这两个沙尘案例具有一定代表性。其中 2016 年 3 月 10 日的沙尘案例，在新疆西部的沙尘区被云所覆盖，所以选择这个案例是为了分析算法是否能够判识薄云覆盖下的沙尘区。而选取 2017 年 5 月 4 日的沙尘案例，主要是由于这一次沙尘过程发生在中国东部地区。前面的个例主要发生于中国西部地区，没有对中国东部地区做分析。而中国西部和东部地区下垫面有一定差异，所以沙尘发生在中国西部和东部地区时，卫星

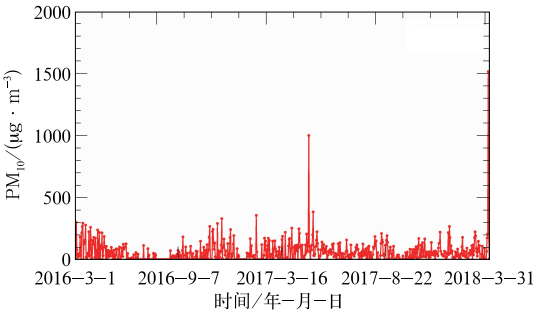

图 13 北京地区 PM_{10} 时间序列图

Fig. 13 Time series of PM_{10} in Beijing

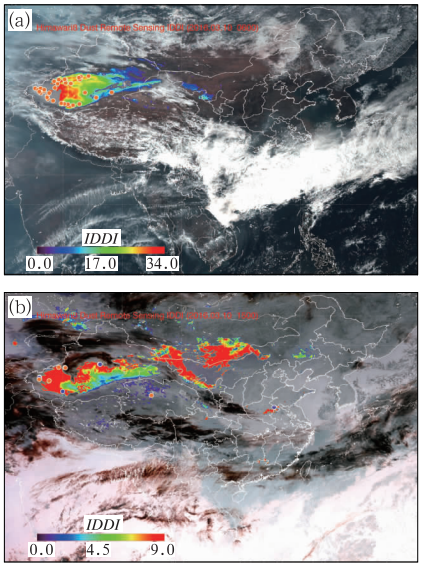

图 14 2016 年 3 月 10 日 06 时(a)和 15 时(b)的沙尘监测

(说明同图 11)

Fig. 14 Comparison of dust recognition results and ground-based observation at 0600 UTC (a) and 1500 UTC (b) 10 March 2016

(Illustration is same as Fig. 11)

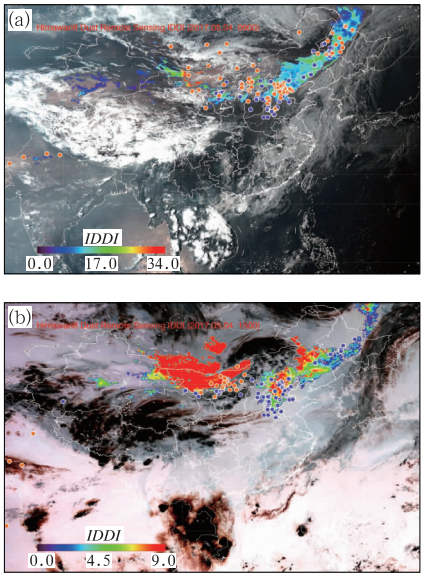

图 15 2017 年 5 月 4 日 09 时(a)和 15 时(b)的沙尘监测

(说明同图 11)

Fig. 15 Comparison of dust recognition results and ground-based observation at 0900 UTC (a) and 1500 UTC (b) 4 May 2017

(Illustration is same as Fig. 11)

观测的光谱会有一定差异,这个案例的选取主要是为了分析算法在中国东部地区的适用性。

通过 Himawari-8 和地基观测结果进行对比可以看出,对这两次沙尘事件,地基和遥感判识结果整体上较为匹配,不一致的情况主要集中在云区。图 14a 所示的白天判识结果说明,新疆西部被薄云所覆盖的沙尘区无法被算法所判识。这说明算法无法判识云下沙尘区,即使沙尘区只是被薄云所遮挡,算法依旧无法判识。而图 15 的判识结果,地基与 Himawari-8 的一致性较高,这次沙尘事件主要发生在中国东部地区,说明了算法对于中国东部地区的适用性。

总体来说,这三次沙尘事件具有一定代表性,通过这些案例的验证,说明算法具有一定普适性。其中 2016 年 3 月 5 日的沙尘个例主要说明了算法在新疆和云上沙尘区的适用性,2017 年 5 月 4 日的个例则验证了算法在中国的东部地区也具有良好的适用性。而 2016 年 3 月 10 日的个例则在一定程度上体现出了算法的局限性,被云区所覆盖的沙尘区,即使是被薄云所覆盖,依旧无法被算法所判识。

4.3　精度验证

对于上述三次沙尘事件,Himawari-8 的判识结果和地基观测结果比对如表 2 所示。Himawari-8 和地基的匹配精度大致分布在 40%～65%。其中不匹配的主要原因是由于云层在沙尘区之上,卫星难以观测沙尘信号所致。但这次研究针对整个中国区域,与提取某一地区相比,云的类型更多,覆盖范围更大,云区对精度的影响也相对更大。当云量较大时,云下沙尘的漏判对于沙尘的判识精度有很大影响,这也是卫星监测沙尘所难以规避的问题。另外,2016 年 3 月 5 日的精度出现 21.57%异常低值,除了有云覆盖沙尘区的影响,还有弱沙尘在云上的情况,因为沙尘强度较弱,云的辐射可以穿过沙尘层到达卫星,卫星同时观测到沙尘和云的信号,而沙尘的强度较弱,所以卫星观测的沙尘特征不明显,导致了沙尘的漏判。除了这些情况外,遥感的判识结果和地基的观测的匹配性较好。

总的来说,结果验证部分首先结合一次沙尘事件,将 Himawari-8 与 FY-2 的结果进行对比发现,Himawari-8 的与地基的匹配度更高,而且算法只用了红外通道,可以进行全天候的判识,这说明本文 Himawari-8 算法与前一代静止卫星 FY-2 算法相比,沙尘判识精度更高,并且解决了前一代静止卫星未能解决的夜间沙尘判识问题。而 Himawari-8 判识结果的改进,参数 $BT_{11.2}-BT_{12.3}$ 和 $BT_{10.4}-BT_{11.2}$ 在其中起到了重要作用。此外,通过地基数据对 Himawari-8 判识结果进行验证时发现,夜间地面气象站的沙尘数据存在一些问题,站点数量明显偏少,所以将地面气象站和 PM_{10} 的数据进行融合,共同验证判识结果。本文共通过三次沙尘事件对 Himawari-8 的判识结果进行验证,除去云区造成的难以避免的影响外,Himawari-8 和地基的一致性相对较高,这说明了算法不仅仅是针对个例,而是具有一定的普适性。

表 2　Himawari-8 沙尘判识和地基观测比对结果

Table 2　Comparison of Himawari-8 dust recognition results and ground-based observation

日期/年-月-日	白天/夜间	判识结果和地基都显示有沙尘的站点数/个	地基观测有沙尘的站点数/个	匹配比率/%
2016-3-5	白天	60	103	58.25
	夜间	11	51	21.57
2016-3-10	白天	24	38	63.16
	夜间	6	14	42.86
2017-5-4	白天	139	224	62.05
	夜间	78	171	45.61

5　结论与讨论

本文研究基于新一代静止气象卫星 Himawari-8 数据,根据其红外通道数量多的优势,开展了一套沙尘暴全天候监测算法。算法消除了原有沙尘算法对于可见光通道的依赖,仅使用红外通道实现了全天候沙尘判识。Himawari-8 判识结果与地面气象站数据和 PM_{10} 数据较高的一致性,说明了只用红外通道实现沙尘全天候判识的可行性。

通过前面的分析验证可知，本文算法具有普适性，可以判识新疆沙漠地区沙尘强度稍大、相对较小的沙尘区，可以判识中国中东部地区的沙尘，以及云上沙尘区，适用范围相对较广。但算法中也存在一些局限性：

（1）算法始终无法规避的云区的影响，本文算法虽然对于云上沙尘区有一定作用，但是对于云下的沙尘区则无能为力，即使是薄云覆盖下的沙尘依旧无法被算法所判识。这是卫星自上而下观测方式所导致的，是一个难以规避的问题，也是造成卫星和地基观测沙尘区差异的主要原因。

（2）算法对于强沙尘区的适用性较差，这从文中辐射传输模拟的结果中也可以看出，沙尘强度过大时，沙尘层的性质逐渐接近地表，即在沙尘强度增大到一定程度时，如果强度继续增大，卫星观测的亮温差异不仅不增大，反而呈现反向变化趋势。因此会造成强沙尘区的漏判。在后续的算法中，可以进一步对强沙尘区域的物理性质进行单独分析，查看是否可以改进目前强沙尘的漏判问题。

（3）可以进一步改进沙尘和晴空地表的区分算法。在本文算法中，沙尘和地表的区分主要通过 $IDDI$ 和 BTD 值。但在算法中发现，单纯通过设定阈值的方式，有时会难以区分沙尘区和晴空地表，尤其是青藏高原地区的晴空地表。虽然经过滤波后可以去除大部分杂点，但也有极少数难以去除的杂点。后续可以进一步分析地表和沙尘区的物理的性质，联合不同通道比值、多个通道的线性关系等其他判识参数进一步区分沙尘和地表，提升沙尘判识的精度。

（4）参数阈值的设定只考虑了白天和夜间两种情况，而一天之中，地表亮温会随时间实时发生变化，可以通过更精细的时间变化调整沙尘的判识阈值。也可以进一步分析月份变化对沙尘判识的影响，根据月份的变化调整沙尘的判识参数。

（5）本文方法中为了验证全天候观测的红外通道对于沙尘判识的作用，在白天和夜间都只用了红外通道。但在实际观测数据中，白天的观测数据同时包含可见光和红外通道。所以在实际沙尘判识过程中，对于白天的沙尘判识，可以将可见光通道引入到算法中，进一步提升沙尘判识的精度。另外，在本次研究中，主要研究了亮温差值随地表亮温和沙尘浓度的变化情况，后续可以结合更多判识参数进一步提升沙尘判识的精度。

随着 Himawari-8、FY-4、GOES-R 等新一代静止气象卫星的发展，势必会有更多分辨率高、质量好的数据应用到沙尘监测中，使沙尘监测的结果更为准确。这些判识结果，无论放在沙尘的业务预报中，还是作为辅助数据放在沙尘的科学研究中，都将发挥重要的作用。

致 谢：国家卫星中心处理后生成的 Himawari-8 L1 全圆盘数据为此次研究的数据源，在此对国家卫星气象中心提供的数据支持表示衷心的感谢！

参考文献

曹广真，张鹏，陈林，等，2013. 地面能见度观测在卫星遥感 IDDI 指数中的融合应用[J]. 遥感技术与应用，28(4)：588-593. Cao G Z，Zhang P，Chen L，et al，2013. Duststorm detection by merging meteorological visibility with remote sensing IDDI[J]. Remote Sen Technol Appl，28(4)：588-593(in Chinese).

胡秀清，卢乃锰，张鹏，2007. 利用静止气象卫星红外通道遥感监测中国沙尘暴[J]. 应用气象学报，18(3)：266-275. Hu X Q，Lu N M，Zhang P，2007. Remote sensing and detection of dust storm in China using the thermal bands of geostationary meteorological satellite[J]. J Appl Meteor Sci，18(3)：266-275(in Chinese).

李彬，卢士庆，孙小龙，等，2018. 可见光波段灰度熵和热红外亮温差的沙尘遥感判识[J]. 遥感学报，22(4)：647-657. Li B，Lu S Q，Sun X L，et al，2018. Dust detection algorithm based on the entropy of visible band brightness and brightness temperature difference[J]. J Remote Sen，22(4)：647-657(in Chinese).

翟章，许宝玉，贺慧霞，等，1996. 我国沙尘暴灾害的概况和对策[J]. 中国减灾，6(1)：23-26. Zhai Z，Xu B Y，He H X，et al，1996. General situation and countermeasures of sandstorm disasters in China[J]. Dis Reduction China，6(1)：23-26(in Chinese).

张鹏，王春姣，陈林，等，2018. 沙尘气溶胶卫星遥感现状与需要关注的若干问题[J]. 气象，44(6)：725-736. Zhang P，Wang C J，Chen L，et al，2018. Current status of satellite-based dust aerosol remote sensing and some issues to be concerned[J]. Meteor Mon，44(6)：725-736(in Chinese).

张鹏，张兴赢，胡秀清，等，2007. 2006 年一次沙尘活动的卫星定量遥感和分析研究[J]. 气候与环境研究，12(3)：302-308. Zhang P，Zhang X Y，Hu X Q，et al，2007. Satellite remote sensing and analysis of a dust event in 2006[J]. Clim Environ Res，12(3)：302-308(in Chinese).

张强，王胜，2005. 论特强沙尘暴(黑风)的物理特征及其气候效应[J]. 中国沙漠，25(5)：675-681. Zhang Q，Wang S，2005，On physical characteristics of heavy dust storm and its climatic effect[J]. J Desert Res，25(5)：675-681(in Chinese).

张喆，丁建丽，王瑾杰，等，2016. 新疆干旱区气溶胶间接效应区域性

分析[J]. 中国环境科学,36(12):3521-3530. Zhang Z, Ding J L, Wang J J, et al, 2016. Regional analysis of aerosol indirect effects in Xinjiang Region[J]. China Environ Sci, 36(12): 3521-3530(in Chinese).

Ackerman S A, 1997. Remote sensing aerosols using satellite infrared observations[J]. J Geophys Res, 102(D14): 17069-17079.

Anderson G P, Berk A, Acharya P K, et al, 1999. MODTRAN4: radiative transfer modeling for remote sensing[C]// Proceedings of SPIE 3866. Optics in Atmospheric Propagation and Adaptive Systems III. Florence, Italy: SPIE: 1029-1032.

Bessho K, Date K, Hayashi M, 2016. An introduction to himawari-8/9-Japan's new-generation geostationary meteorological satellites [J]. J Meteor Soc Jpn Ser II, 94(2): 151-183.

Cuesta J, Eremenko M, Flamant C, et al, 2015. Three-dimensional distribution of a major desert dust outbreak over East Asia in March 2008 derived from IASI satellite observations[J]. J Geophys Res, 120(14): 7099-7127.

Dubuisson P, Herbin H, Minvielle F, et al, 2014. Remote sensing of volcanic ash plumes from thermal infrared: a case study analysis from SEVIRI, MODIS and IASI instruments[J]. Atmos Meas Tech, 7(2): 359-371.

Haywood J, Boucher O, 2000. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: a review[J]. Rev Geophys, 38(4): 513-543.

Hu X Q, Lu N M, Niu T, et al, 2008. Operational retrieval of Asian sand and dust storm from FY-2C geostationary meteorological satellite and its application to real time forecast in Asia[J]. Atmos Chem Phys, 8(6): 1649-1659.

Huang J, Minnis P, Yan H, et al, 2010. Dust aerosol effect on semi-arid climate over Northwest China detected from a-train satellite measurements[J]. Atmos Chem Phys, 10(14): 6863-6872.

Legrand M, Plana-Fattori A, N'Doumé C, 2001. Satellite detection of dust using the IR imagery of Meteosat: 1. infrared difference dust index[J]. J Geophys Res, 106(D16): 18251-18274.

Massie S T, Hervig M, 2013. HITRAN 2012 refractive indices[J]. J Quant Spectrosc Radiat Transf, 130: 373-380.

Min Min, Wu Chunqiang, Li Chuan, et al, 2017. Developing the science product algorithm testbed for Chinese next-generation geostationary meteorological satellites: Fengyun-4 series[J]. J Meteor Res, 31(4): 708-719.

Park S S, Kim J, Lee J, et al, 2014. Combined dust detection algorithm by using MODIS infrared channels over East Asia[J]. Remote Sens Environ, 141: 24-39.

Pierangelo C, Chédin A, Heilliette S, et al, 2004. Dust altitude and infrared optical depth from AIRS[J]. Atmos Chem Phys, 4(7): 1813-1822.

Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al, 2001. Aerosols, climate, and the hydrological cycle[J]. Science, 294(5549): 2119-2124.

Sokolik I N, 2002. The spectral radiative signature of wind-blown mineral dust: implications for remote sensing in the thermal IR region[J]. Geophys Res Lett, 29(24): 2154.

Wang Minyan, Lyu Daren, 2006. Diurnal and seasonal variation of clear-sky land surface temperature of several representative land surface types in China retrieved by GMS-5[J]. Acta Meteor Sin, 20(4): 475-488.

Zhang Wenhao, Xu Hui, Zheng Fengjie, 2018. Aerosol optical depth retrieval over East Asia using Himawari-8/AHI data[J]. Remote Sens, 10(1): 137.

Zhao Fengsheng, Li Xiaoqing, Gai Changsong, et al, 2010. Estimation of the temporal and spatial distribution of dust concentration over China by combining PM_{10} and conventional meteorological observations[J]. Environ Monit Assess, 170(1-4): 65-72.