

文章编号: 2096-1618(2025)01-0100-07

基于 FY-4A 气象卫星多通道数据组合的 沙尘暴识别阈值研究

范彦芳^{1,2,3}, 杨有林^{1,2,3}, 武雅珍³, 杨晓旻³, 程晓龙^{1,2,3}, 马宏^{1,2,3}

(1. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室, 宁夏 银川 750002; 2. 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 宁夏 银川 750002; 3. 宁夏气象信息中心, 宁夏 银川 750002)

摘要: 卫星遥感在沙尘气溶胶的监测中具有独特优势, 是沙尘判识研究的重要技术支撑。为提高沙尘暴识别精度, 利用 FY-4A 气象卫星 14 个通道的反射率及亮温数据, 通过目标物多通道阈值综合分析方法识别沙尘天气现象, 确立并优化沙尘暴判识阈值, 为沙尘暴天气现象智能分析判识模型提供支持。结果表明: 可见光与近红外通道在有云时变化比较明显, 在沙尘区域可见光与近红外通道和短波红外通道亮温值差距较小, 并且短波红外通道值大于可见光与近红外通道值; 中波红外通道在沙尘区表现出相同的变化趋势, 并且在沙尘区亮温值明显高。经过阈值优化, 针对大范围的沙尘天气识别结果与观测实况基本吻合, 所以多通道阈值法可以有效提升沙尘区的判识精度。

关键词: FY-4A 气象卫星; 沙尘暴; 判识阈值条件

中图分类号: P49

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2025.01.015

0 引言

沙尘天气是指地面尘土、沙粒被风卷入空中, 或被高空气流带到下游地区而导致空气混浊, 能见度下降的天气现象。沙尘暴也称沙暴或尘暴, 指的是强风将地面沙吹起使空气混浊, 水平能见度小于 1 km 的天气现象^[1-7]。春季时, 通常会出现持续的干暖天气, 从而导致土壤疏松, 因此成为沙尘暴频发的季节。全球有四大沙尘暴高发区: 中亚、北美、中非和澳大利亚。中国北方的干旱、半干旱地区是沙尘天气的易发区, 尤其西北地区为沙尘暴多发区^[8], 其中不少地区每年沙尘暴日数达 30 天以上^[9-10]。沙尘的形成与植被破坏、气候变暖、水资源短缺等有密不可分的关系, 是一种严重的自然灾害, 可能引发严重的生态环境问题^[11-16]。

中国遥感卫星的持续升空, 以及遥感技术的日益成熟且完善, 为沙尘研究提供了数据和技术的有力支撑。20 世纪 70 年代, 利用卫星遥感技术监测沙尘的研究已经出现^[17-18]。但受限于数据和技术, 导致研究深度不足, 进展缓慢。国外首先使用静止卫星数据监测并计算沙尘气溶胶的光学厚度^[19-20], 并由此提出了利用卫星单一通道的光谱资料进行沙尘气溶胶光学厚

度反演的思路^[21]。90 年代, 多通道遥感数据对沙尘进行监测的研究迅速发展, 中国开始应用卫星多通道信息判识沙尘暴发生区域^[22-23], 在沙尘监测领域也取得了丰富成果^[24-27]。

在卫星遥感监测中, 极轨卫星的光谱通道多, 空间分辨率高, 但由于沙尘暴演变快且移动迅速, 持续时间短且具有突发性, 导致极轨卫星对某一区域的观测频次少, 不能实时跟踪沙尘的移动路径。相比之下, 静止卫星一次成像范围大且观测频次高, 因此更适合监测沙尘的发生、追踪沙尘的运动轨迹以及分析沙尘的时空变化。

综上所述, 本研究将基于 FY-4A (风云四号 A 星) 静止气象卫星资料, 结合云图上沙尘暴的主要特征, 通过对沙尘光谱响应曲线进行分析, 确立沙尘暴识别的阈值条件, 为沙尘暴天气现象智能分析判识模型提供支持。

1 数据与方法

1.1 数据来源

采用了省级 FY-4A 气象卫星直收站接收的 14 个通道的数据。主要参数如下: 数据区域类型: 全圆盘;

收稿日期: 2023-07-14

基金项目: 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室开放研究资助项目 (CAMF-202304)

通信作者: 杨有林. Email: nx_yyl@163.com

卫星星下点经度位置:104.7 °E;数据级别:LI;投影方式:标称投影;空间分辨率:4000 m;数据观测起始日期:采用协调世界时(UTC)日期,符合 GB/T7408-2005 中 5.2.1.1 规定的日历日期完全表示法的基本格式。地球内的无效像素值填充为 65534,地球外无效像素值填充为 65535。FY-4A气象卫星数据为 14 个通道的反射率、亮温数据;沙尘数据采用了国家级地面气象观测站天气现象要素值。

表 1 FY-4A 卫星各通道性能参数表

通道序号	通道类型	中心波长/mm	光谱带宽/mm	灵敏度	空间分辨率/km	主要用途
1	可见光与近红外	0.47	0.45 ~ 0.49	S/N≥90@ ρ=100%	1	小粒子气溶胶,真彩色合成
2		0.65	0.55 ~ 0.75	S/N≥200@ ρ=100%	0.5 ~ 1	植被,图像导航配准,恒星观测
3		0.825	0.75 ~ 0.90	S/N≥200@ ρ=100%	1	植被,水面长空气溶胶
4	短波红外	1.375	1.36 ~ 1.39	S/N≥90@ ρ=100%	2	卷云
5		1.61	1.58 ~ 1.64	S/N≥200@ ρ=100%	2	低云/雪识别,水云/冰云判识
6		2.25	2.1 ~ 2.35	S/N≥200@ ρ=100%	2 ~ 4	卷云、气溶胶、粒子大小
7	中波红外	3.75	3.5 ~ 4.0(高)	NEΔT≤0.7K@ 300K	2	云等高反照率目标,火点
8		3.75	3.5 ~ 4.0(低)	NEΔT≤0.2K@ 300K	4	低反照率目标,地表
9	水汽	6.25	5.8 ~ 6.7	NEΔT≤0.3K@ 260K	4	高层水汽
10		7.1	6.9 ~ 7.3	NEΔT≤0.3K@ 260K	4	中层水汽
11	长波红外	8.5	8.0 ~ 9.0	NEΔT≤0.2K@ 300K	4	总水汽、云
12		10.7	10.3 ~ 11.3	NEΔT≤0.2K@ 300K	4	云、地表温度等
13		12.0	11.5 ~ 12.5	NEΔT≤0.2K@ 300K	4	云、总水汽量、地表温度
14		13.5	13.2 ~ 13.8	NEΔT≤0.5K@ 300K	4	云、水汽

1.3 分析方法

利用多通道阈值方法识别沙尘天气现象分类指标,采用FY-4A气象卫星 14 个通道的亮温数据进行分析研究和实验。通过地图上两个位置点之间直线上各个通道亮温值的变化,结合沙尘区域边界位置,统计找出发生沙尘天气时各个通道亮温变化的阈值,再根据沙尘监测结果中不会出现个别孤立的像元的特点,利用孤立点剔除技术进行过滤,最终判识沙尘区。

2 结果与分析

2.1 沙尘暴判识阈值与光谱响应曲线分析

2018 年 4 月 2-5 日,新疆南疆盆地、甘肃、内蒙古、宁夏、陕西北部、山西北部、河北北部先后出现扬沙或浮尘,其中南疆盆地、内蒙古、甘肃河西等地出现沙尘暴,影响中国北部大部分地区,给当地居民生活及出行造成一定影响。选取该次过程做为分析案例,利用 2018 年 4 月 2 日 12 时和 17 时两个时次的数据,计算

1.2 气象卫星监测沙尘的原理

卫星扫描辐射仪上的红外和可见光图像通道,可接受来自下垫面反射的太阳光的热辐射,可用来计算下垫面的亮度温度和反照率。但由于沙尘、雾霾、雾等与云系、地表等目标物在反射率和亮温上的差异,可实现从图像数据中解析沙尘、雾霾、雾天气气溶胶的光学厚度,来判断不同的天气现象。FY-4A各个通道波长和用途如表 1 所示。

解析出沙尘区上直线经纬度点所对应的各个通道的亮温值,作图分析光谱变化,监测沙尘暴,确定沙尘暴判识阈值条件。

2.1.1 2018 年 4 月 2 日 17:30 时次分析

对 2018 年 4 月 2 日 17:30 时次沙尘天气进行分析,选取起始经纬度和边界经纬度点,选取方法如图 1 所示。

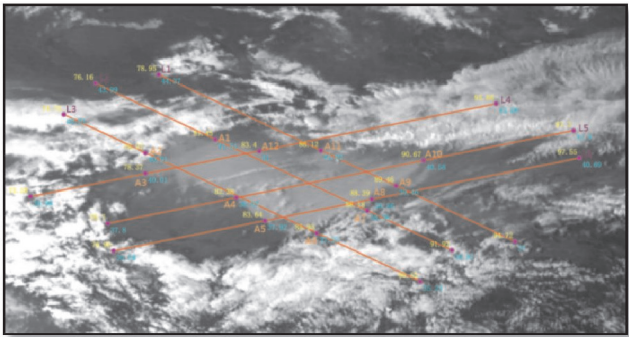


图 1 2018 年 4 月 2 日 17:30 起始经纬度和边界经纬度点选取方法示意

选取穿过沙尘区并能清晰判断沙尘边界位置的 6 条直线L1 ~ L6来做光谱分析,其中A1 ~ A12为选取的

沙尘边界点。不同位置线光谱曲线分析:对 L1 直线上每隔分辨率 0.05°取经纬度点,根据经纬度点解析出对应点各个通道的亮温值,获取 14 个通道光谱曲线图,如图 2 所示。

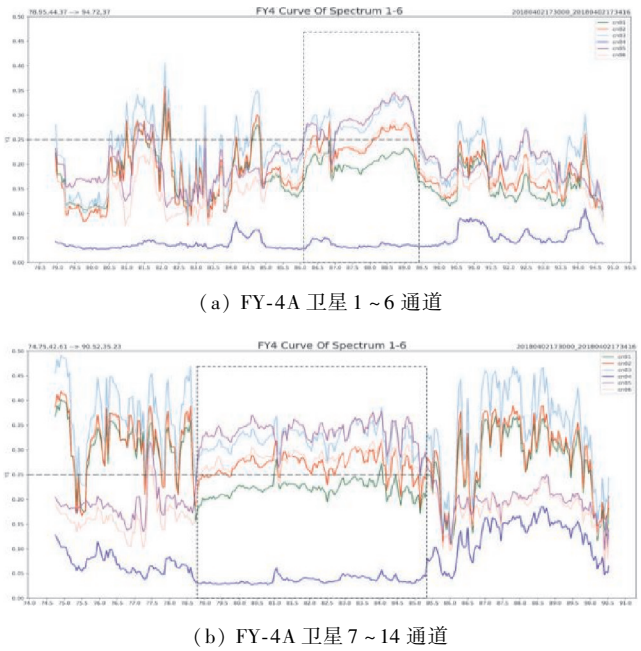


图2 2018年4月2日17:30 L1 所在直线对应通道亮温变化光谱曲线

选取 L3 直线上经纬度点(0.05°间隔),根据经纬度点解析出对应点各个通道的亮温值获取 14 个通道光谱曲线图,如图 3 所示。

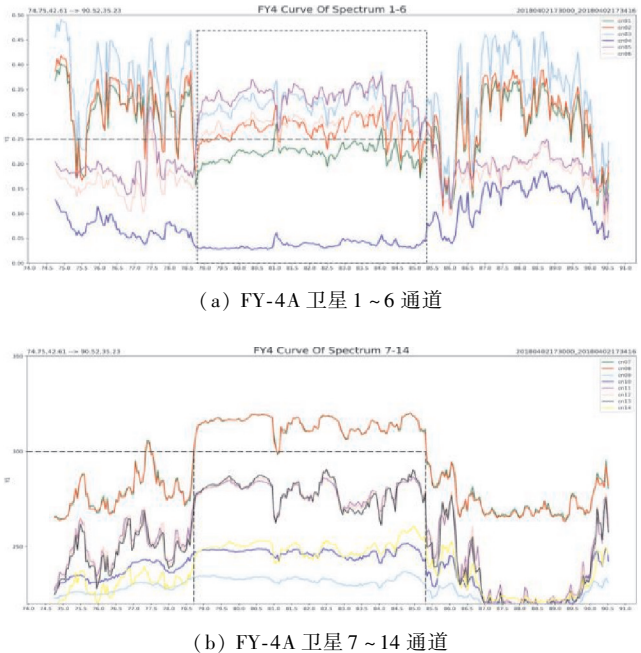


图3 2018年4月2日17:30 L3 所在直线对应通道亮温变化光谱曲线

选取 L4 直线上经纬度点(0.05°间隔),根据经纬度点解析出对应点各个通道的亮温值,并作 14 个通道光谱曲线图,如图 4 所示。

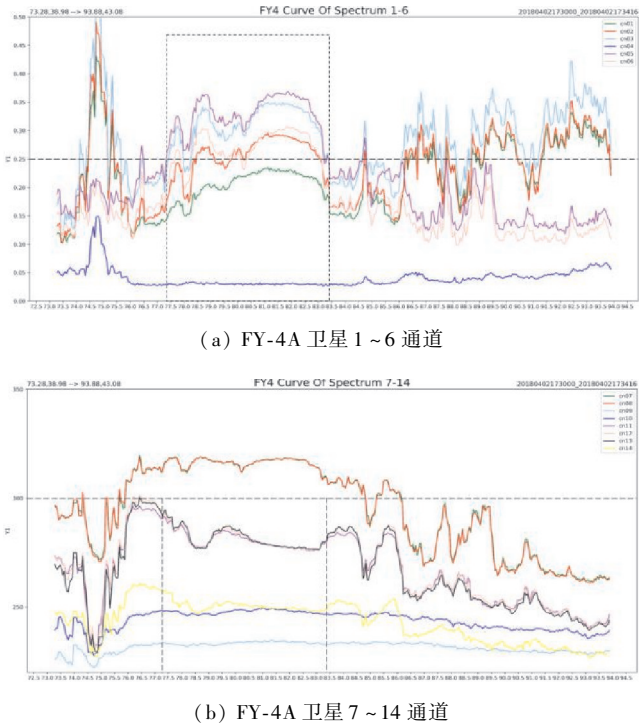


图4 2018年4月2日17:30 L4 所在直线对应通道亮温变化光谱曲线

分析 3 条线上各个通道的光谱曲线,沙尘区域各个通道亮温变化情况如下:01 通道和 04 通道在沙尘区无明显变化特征;01、02、03 通道在有云时变化比较明显,在沙尘区域 02 通道和 06 通道亮温值变化趋势比较相近,两个通道亮温值差距较小,并且 06 通道值大于 02 通道值;在沙尘区 05 通道的亮温值明显高,并且 03 通道和 05 通道亮温值变化趋势相近,两个通道亮温值差距较小,05 通道值大于 03 通道;09、10、11、12、13 和 14 通道在沙尘区亮温无明显变化;07 和 08 通道在沙尘区表现出相同的变化趋势,并且在沙尘区亮温值明显高。

2.1.2 2018 年 4 月 2 日 12:19 时次分析

运用同样的方法对 2018 年 4 月 2 日 12:19 时次沙尘天气进行观察分析,进行起始经纬度和边界经纬度点选取,如图 5 所示。

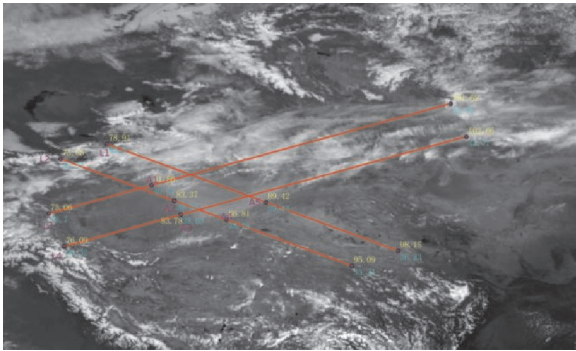


图5 2018年4月2日12:19 起始经纬度和边界经纬度点选取图

选取穿过沙尘区并能清晰判断沙尘边界位置的 4

条直线L1 ~ L4来做光谱分析,其中A1 ~ A5为选取的沙尘边界点。

对 L2 直线上每隔分辨率0.05°取经纬度点,根据经纬度点解析出对应点各个通道的亮温值,并作 14 个通道光谱曲线图,如图 6 所示。

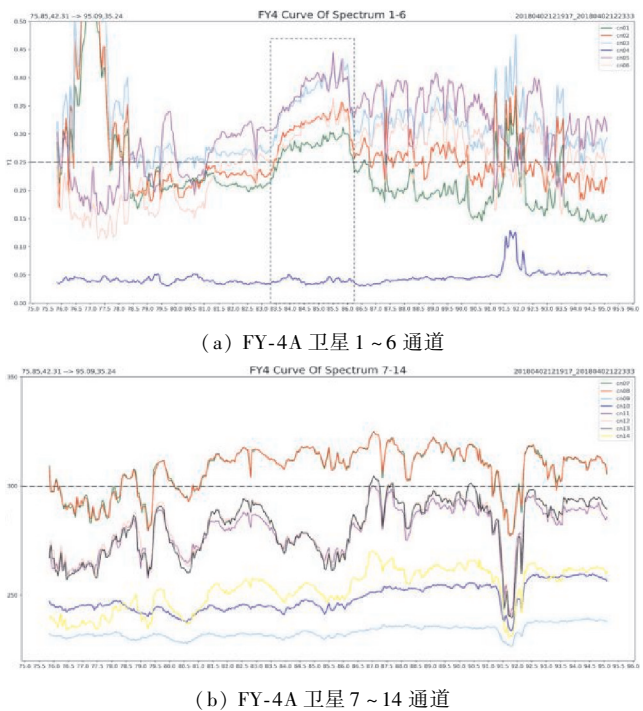


图 6 2018 年 4 月 2 日 12:19 L2 所在直线对应通道亮温变化光谱曲线

对 L4 直线上每隔分辨率 0.05°取经纬度点,根据经纬度点解析出对应点各个通道的亮温值,并作 14 个通道光谱曲线图,如图 7 所示。

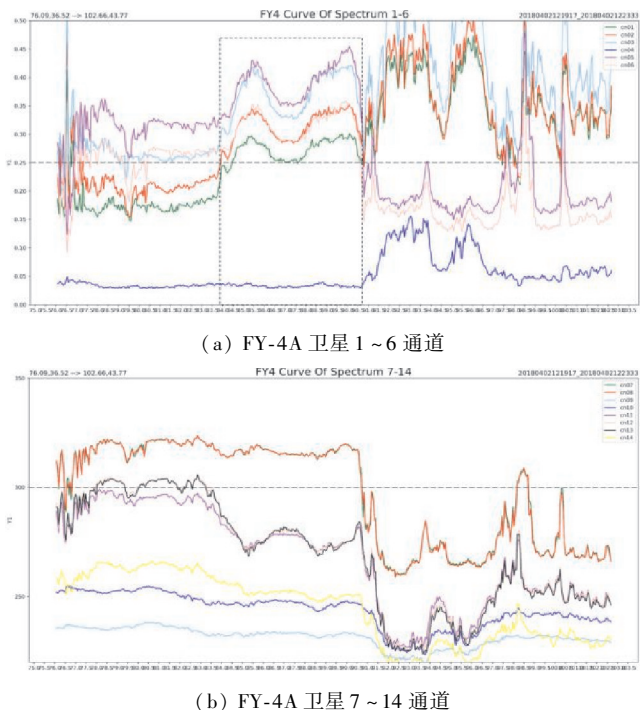


图 7 2018 年 4 月 2 日 12:19 L4 所在直线对应通道亮温变化光谱曲线

通过分析,2018 年 4 月 2 日 12:19 的光谱变化特征与 2018 年 4 月 2 日 17:30 在各个通道上的光谱特征基本相同。

2.2 沙尘暴判识指标的确定

2.2.1 沙尘暴判识阈值条件的初定

基于以上对 2018 年 4 月 2 日沙尘过程光谱曲线的分析结果,在监测沙尘暴时可用 02、03、05、06、07 和 08 通道的变化来综合监测沙尘暴,统计分析可得初定的沙尘暴判识阈值如表 2 所示。

表 2 初定的沙尘暴判识阈值条件	
沙尘暴判识阈值条件	
$IR03 \geq 0.25$, 且 $IR05 \geq 0.25$	
$-0.08 \leq IR05 \sim IR03 \leq 0.05$	
$-0.08 \leq IR06 \sim IR02 \leq 0.05$	
$IR07 \geq 300$, 且 $IR08 \geq 300$	

利用初定的沙尘暴判识阈值绘制 2018 年 4 月 2 日个例的沙尘暴判识图,如图 8 所示。

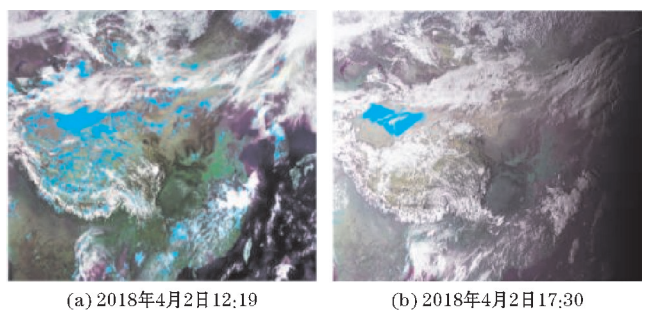


图 8 基于初定判识阈值的沙尘暴个例判识图

2.2.2 沙尘暴判识阈值条件第一次优化过程

研究中使用在原有基础上增加个例的方法对沙尘暴判识的阈值条件进行优化。引入 2019 年 5 月 16 日的沙尘过程对其光谱曲线进行分析,统计适合该个例的沙尘暴判识阈值,同时结合初定的沙尘暴判识阈值找出共同的阈值特征,得到第一次优化后的沙尘暴判识阈值如表 3 所示。

表 3 第一次优化的沙尘暴判识阈值条件	
沙尘暴判识阈值条件	
$IR05 > 0.14$	
$28 \leq IR08 \sim IR13$	
$-21 \leq IR14 \sim IR09 \leq 21$	
$-0.08 \leq IR01 \sim IR03 \leq 0.08$	

利用第一次优化的沙尘暴判识阈值绘制 2019 年 5 月 16 日个例的沙尘暴判识图,如图 9 所示。

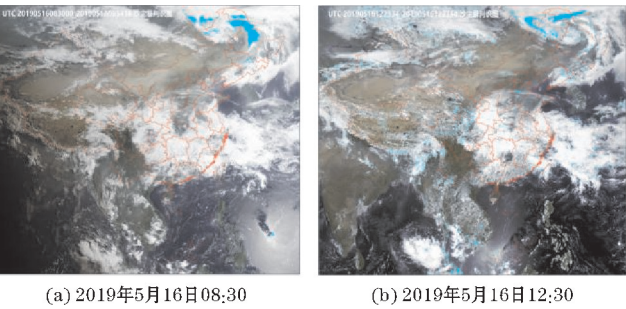


图9 基于第一次优化判识阈值的沙尘暴判识图

2.2.3 沙尘暴判识阈值条件第二次优化过程

引入 2020 年 4 月 11–12 日的个例,第二次对沙尘暴判识阈值做优化调整,第二次优化后沙尘暴判识阈值如表 4 所示。

表4 第二次优化的沙尘暴判识阈值条件

沙尘暴判识阈值条件
$IR05-IR03>-0.03$
$IR05-IR02>0.03$
$28\leq IR08\sim IR13$
$296\leq IR07\text{ and }296\leq IR08$
$-0.02\leq IR02-IR01$

利用第二次优化的沙尘暴判识阈值绘制 2020 年 4 月 11–12 日个例的沙尘暴判识图,如图 10 所示。

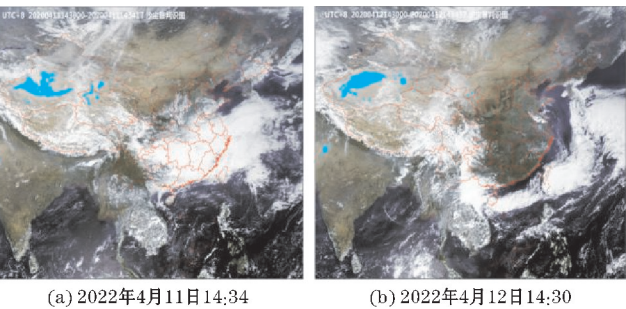


图10 基于第二次优化判识阈值的沙尘暴判识图

综合分析可知,经过多次阈值优化后,对沙尘类天气的识别效果越来越好,尤其是对大范围的沙尘天气,识别结果与观测实况基本吻合。

2.3 沙尘暴判识阈值评估验证

利用多通道指标阈值法对 2020 年 3 月 25 日、2023 年 3 月 20 日、2023 年 3 月 22 日、2023 年 4 月 10 日、2023 年 5 月 19 日发生的共 5 次沙尘过程进行判识验证评估,沙尘暴判识结果如图 11 所示。

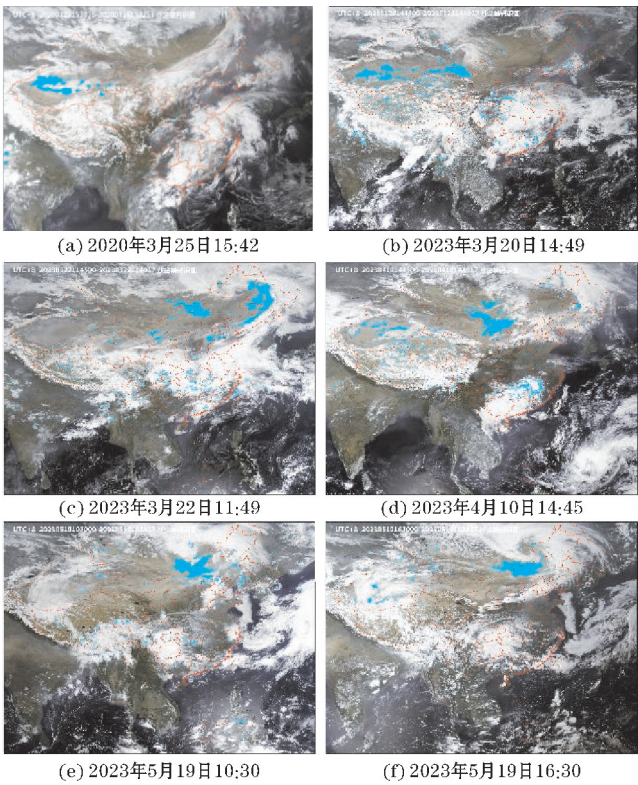


图11 沙尘暴判识阈值验证判识图

综合分析可知,经过多次个例判识验证,多通道阈值法对沙尘天气的识别效果较好,尤其是对大范围的沙尘天气,识别结果与观测实况吻合程度较高。对 2020 年 3 月 25 日及 2023 年 3 月 20 日等受西伯利亚南下强冷空气影响而出现在新疆地区的大范围沙尘天气的判识结果较准确。对 2023 年 3 月 22 日位于东北地区的大范围沙尘天气、2023 年 4 月 10 日发生在新疆内蒙古等地出现的沙尘天气及 2023 年 5 月 19 日出现在北部地区的沙尘判识结果与实况也都基本吻合。

3 结论

基于FY-4A静止气象卫星资料,通过对沙尘光谱响应曲线进行分析,确立沙尘暴判识阈值条件,得到主要结论如下:

(1)通过解析沙尘区上各个通道的亮温值,对沙尘过程的光谱曲线分析,发现可见光与近红外通道在有云时变化比较明显,在沙尘区域可见光与近红外通道和短波红外通道亮温值差距较小,且短波红外通道值大于可见光与近红外通道值;中波红外通道在沙尘区表现出相同的变化趋势,并且在沙尘区亮温值明显高,因此在监测沙尘暴时可用可见光与近红外通道、短波红外通道及中波红外通道的变化来综合分析,进行

沙尘区判识。

(2)经过多次沙尘暴判识阈值优化后,对沙尘类天气的识别效果愈发明显,尤其是对大范围的沙尘天气,识别结果与观测实况基本吻合,多通道阈值法对沙尘天气的识别效果较好,可以用于沙尘区的判识,为实际业务监测提供了重要参考。

(3)由于沙尘、雾霾、雾等与云系,地表等在反射率和亮温上均有一定的差异,多通道阈值法不仅可以用于沙尘区的判识,未来可尝试使用该方法对雾霾、雾等天气现象进行识别,从而实现FY-4A气象卫星在多领域的应用。

参考文献:

- [1] Shao Y P, Leys J F, McTainsh G H, et al. Numerical simulation of the October 2002 dust event in Australia [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112 (D8): D08207.
- [2] Shen Z, Cao J, Arimoto R, et al. Ionic composition of TSP and PM_{2.5} during dust storms and air pollution episodes at Xi'an, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43 (18): 2911-2918.
- [3] Wang Y Q, Zhang X Y, Draxler R R. TrajStat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24 (8): 938-939.
- [4] 秦豪君, 杨晓军, 马莉, 等. 2000-2020年中国西北地区区域性沙尘暴特征及成因 [J]. *中国沙漠*, 2022, 42 (6): 53-64.
- [5] 康杜娟, 王会军. 中国北方沙尘暴气候形势的年代际变化 [J]. *中国科学 (D辑: 地球科学)*, 2005, 35 (11): 1096-1102.
- [6] 张爽, 徐海, 蓝江湖, 等. 中国北方近500年沙尘暴活动及机制 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51 (5): 783-794.
- [7] 陈继革. 世界四大沙尘暴多发区 [J]. *中学地理教学参考*, 2006 (12): 15.
- [8] 祝从文, 徐康, 张书萍, 等. 中国春季沙尘暴年代际变化和季节预测 [J]. *气象科技*, 2010, 38 (2): 204-204+276-277.
- [9] 周自江, 章国材. 中国北方的典型强沙尘暴事件 (1954-2002年) [J]. *科学通报*, 2003, 48 (11): 1224-1228.
- [10] Pye K. *Aeolian Dust and Dust Deposits* [M]. London: Academic Press, 1987: 340.
- [11] 刘敬乐, 周顺武, 牛涛, 等. 基于信息扩散方法的中国西北地区春季沙尘暴灾害风险分析 [J]. *气象科技*, 2012, 40 (5): 858-864.
- [12] 地力夏提·依地力斯, 古丽扎尔·马木提. 浅谈我国沙尘暴灾害及其研究进展 [J]. *资源节约与环保*, 2013 (8): 94.
- [13] 杨晓军, 张强, 叶培龙, 等. 中国北方2021年3月中旬持续性沙尘天气的特征及其成因 [J]. *中国沙漠*, 2021, 41 (3): 245-255.
- [14] 张鹏, 王春姣, 陈林, 等. 沙尘气溶胶卫星遥感现状与需要关注的若干问题 [J]. *气象*, 2018, 44 (6): 725-736.
- [15] 朱福康, 江吉喜. 沙尘暴天气研究现状和未来 [J]. *气象科技*, 1999, 27 (4): 1-8.
- [16] 程彬彬, 林波. 遥感监测沙尘暴的研究进展及趋势 [J]. *环境科学与管理*, 2007, 32 (6): 120-122.
- [17] 石广玉, 赵思雄. 沙尘暴研究中的若干科学问题 [J]. *大气科学*, 2003, 27 (4): 591-606.
- [18] 曾庆存, 董超华, 彭公炳, 等. 沙尘暴及相关的自然灾害 [J]. *气候与环境研究*, 2007, 12 (3): 225-226.
- [19] Shenk W E, Curran R J. The detection of dust storms over land and water with satellite visible and infrared measurements [J]. *Mon Wea Rev*, 1974, 102 (12): 830-837.
- [20] Norton C C, Mosher F R, Hinton B, et al. A model for calculating desert aerosol turbidity over the oceans from geostationary satellite data [J]. *J Appl Meteor*, 1980, 19 (6): 633-644.
- [21] Ackerman S A. Using the radiative temperature difference at 3.7 and 11 mm to track dust outbreaks [J]. *Remote Sens Environ*, 1989, 27 (2): 129-133.
- [22] 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.
- [23] 方宗义, 张运刚, 郑新江, 等. 用气象卫星遥感监测沙尘暴的方法和初步结果 [J]. *第四纪研究*, 2001, 21 (1): 48-55.
- [24] Li Rong, Gong Jieping, Sun Wenyi, et al. Multi

- satellite observation or an intense dust event over Southwest China [J]. *Aerosol Air Quality Res*, 2015, 15(1): 263–270.
- [25] Zhao Suping, Yin Daiying, Qu Jianjun. Identifying sources of dust based on CALIPSO, MODIS satellite data and backward trajectory model [J]. *Atmos Pollut Res*, 2015, 6(1): 36–44.
- [26] Madhavan S, Qu J J, Hao Xianjun. Saharan dust detection using multi-sensor satellite measurement [J]. *Heliyon*, 2017, 3(2): e00241.
- [27] Mamouri R E, Ansmann A, Nisantzi A, et al. Extreme dust storm over the eastern Mediterranean in September 2015: satellite, Lidar, and surface observations in the Cyprus region [J]. *Atmos Chem Phys*, 2016, 16(21): 13711–13724.

Research on the Identification Threshold of Dust Storm based on FY-4A Meteorological Matellite Multi-channel Combination

FAN Yanfang^{1,2,3}, YANG Youlin^{1,2,3}, WU Yazhen³, YANG Xiaomin³, CHENG Xiaolong^{1,2,3}, MA Hong^{1,2,3}

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, CMA, Yinchuan 750002, China; 2. Ningxia Key Lab of Meteorological Disaster Prevention and reduction, Yinchuan 750002, China; 3. Ningxia Meteorological Information Center, Yinchuan 750002, China)

Abstract: Satellite remote sensing has unique advantages in monitoring sand and dust aerosols, and is a key technical support for identification research of sand and dust. To improve the accuracy of dust storm identification, the reflectivity and bright temperature data of 14 channels of FY-4A meteorological satellites are utilized to identify sand and dust weather phenomena through the comprehensive analysis method of multi-channel thresholds of targets, and to establish and optimize the identification thresholds of sand and dust storms, to provide support for the intelligent analysis of identification models of sand and dust storms weather phenomena. The results show that visible and near-infrared channels change significantly when there are clouds, the difference between the bright temperature values of visible and near-infrared channels and short-wave infrared channels in the dust area is small, and the value of short-wave infrared channel is greater than that of visible and near-infrared channel. The mid-wave infrared channels showed the same trend in the dust area, and the bright temperature value in the dust area was significantly higher. After multiple threshold optimizations, the recognition effect of sand and dust weather is getting better and better, especially for large-scale sand and dust weather, and the recognition results are consistent with the observation reality. The multi-channel threshold method has a good effect on the identification of sand and dust weather and can be used for the identification of sand and dust areas.

Keywords: FY-4A; dust storm; recognition threshold conditions