

王清平,朱雯娜,王勇,等,2021. FY-4A 资料在乌鲁木齐机场浓雾天气监测中的初步应用[J]. 气象,47(5):627-637. Wang Q P,Zhu W N,Wang Y,et al,2021. Preliminary application of FY-4A satellite data in dense fog weather events at Urumqi international Airport[J]. Meteor Mon,47(5):627-637(in Chinese).

## FY-4A 资料在乌鲁木齐机场浓雾天气 监测中的初步应用\*

王清平<sup>1</sup> 朱雯娜<sup>1</sup> 王 勇<sup>2</sup> 陈阳权<sup>1</sup> 韩 磊<sup>1</sup>  
王春红<sup>1</sup> 谭艳梅<sup>1</sup> 张利平<sup>3</sup>

1 民航新疆空中交通管理局气象中心,乌鲁木齐 830016

2 新疆生态气象与卫星遥感中心,乌鲁木齐 830002

3 民航新疆空中交通管理局气象部,乌鲁木齐 830016

**提 要:** 利用 FY-4A 多通道扫描成像辐射计(AGRI)所生成的多通道图像及 L2 级卫星云产品数据,结合地面观测实况资料,对 2019 年 1 月 25—26 日和 3 月 17—18 日发生于乌鲁木齐国际机场的两次持续性浓雾天气进行分析,结果表明:对于浓雾的监测,白天综合使用通道 3(BD<sub>0.83 μm</sub>)、通道 6(BD<sub>2.2 μm</sub>)、通道 8(BD<sub>3.725 μm</sub>)和通道 12(BD<sub>10.8 μm</sub>)能很好地显示雾区范围、雾顶云结构、雾区温度等特征,且云图能很好地表现雾的消散。夜间可以结合 BD<sub>10.8 μm</sub> 和 BD<sub>3.725 μm</sub> 的差(以下简称为 BTD<sub>10.8 μm-3.725 μm</sub>)和 BD<sub>10.8 μm</sub> 图像,用于识别夜间雾区,BTD<sub>10.8 μm-3.725 μm</sub> 通道亮温差越大说明雾的浓度越强。FY-4A 卫星云顶高度和云分类产品对雾的微物理特征结构反应更为细致,对于夜间大雾监测有较好的效果,能够弥补可见光通道 1~通道 3、短波红外通道(BD<sub>2.2 μm</sub>)和中波红外通道(BD<sub>3.725 μm</sub>)仅能在白天使用的不足。

**关键词:** FY-4A,云相态,云分类,云顶高度,多通道扫描成像辐射计

**中图分类号:** P412

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.05.011

## Preliminary Application of FY-4A Satellite Data in Dense Fog Weather Events at Urumqi International Airport

WANG Qingping<sup>1</sup> ZHU Wenna<sup>1</sup> WANG Yong<sup>2</sup> CHEN Yangquan<sup>1</sup> HAN Lei<sup>1</sup>  
WANG Chunhong<sup>1</sup> TAN Yanmei<sup>1</sup> ZHANG Liping<sup>3</sup>

1 Meteorological Center of Xinjiang Air Traffic Management Bureau, CAAC, Urumqi 830016

2 Xinjiang Ecological Meteorology and Satellite Remote Sensing Center, Urumqi 830002

3 Meteorological Department of Xinjiang Air Traffic Management Bureau, CAAC, Urumqi 830016

**Abstract:** Using FY-4A images generated by advanced geosynchronous radiation imager (ARGI) and level 2 satellite cloud product data and surface observation data, this paper analyzes two dense fog weather events that happened in 25—26 January 2019 and in 17—18 March 2019 at Urumqi International Airport. The results show that we can use Channel 3 (BD<sub>0.83 μm</sub>), Channel 6 (BD<sub>2.2 μm</sub>) Channel 8 (BD<sub>3.725 μm</sub>) and Channel 12 (BD<sub>10.8 μm</sub>) to monitoring the range of dense fog and the cloud structure features of fog top and the temperature of fog area during the daytime. Dissipation of fog has a good reflection on satellite images.

\* 新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2020D01A99)和国家重点研发计划(2018YFC1507103)共同资助

2020 年 1 月 23 日收稿; 2021 年 3 月 17 日收修定稿

第一作者:王清平,主要从事航空气象预报及卫星资料应用研究. E-mail:wqp1001@163.com

通讯作者:王勇,主要从事气象卫星及遥感应用研究. E-mail:443409880@qq.com

At night, the difference between  $BD_{10.8 \mu\text{m}}$  and  $BD_{3.725 \mu\text{m}}$  ( $BTD_{10.8 \mu\text{m}-3.725 \mu\text{m}}$ ) and images of  $BD_{10.8 \mu\text{m}}$  can be combined to identify the night foggy area, and the greater the bright temperature difference in the  $BTD_{10.8 \mu\text{m}-3.725 \mu\text{m}}$  channels, the denser the fog. FY-4A satellite cloud top height and cloud classification products have more meticulous features on microphysical characteristics of dense fog. It is very effective in monitoring night dense fog and it also can make up for the deficiency of visible channels such as from Channel 1 to Channel 3, Channel 6 and Channel 8, which can only be used in the daytime.

**Key words:** FY-4A, cloud phase, cloud type, cloud top height, advanced geosynchronous radiation imager (AGRI)

## 引 言

雾是悬浮于近地层大气中的大量微小水滴或冰晶的可见集合体,其能见度小于 1 000 m,当能见度为 200~500 m 时为浓雾,能见度为 50~200 m 时为强浓雾,能见度小于 50 m 时为特强浓雾。持续性浓雾天气给人民出行、生活带来较大的影响,特别是在民航、地面交通等方面(赵玉广等,2015;黄政等,2016;胡跃文等,2019)。林建等(2008)统计分析了 1971—2005 年我国陆地大雾的时空分布特征,发现大雾主要集中在四川盆地、重庆、云南南部、湖南和江南东部,西北地区较少。王旭等(2002)统计新疆地区雾的分布,指出雾主要出现在北疆地区,尤其是以天山山区居多。乌鲁木齐国际机场位于天山山区北侧的乌鲁木齐市西北侧,海拔为 647.7 m,比东南方向的乌鲁木齐市站海拔低 300 m 左右,冬季机场受浓雾影响非常大,经常出现机场能见度不足百米的特强浓雾而市区却晴空万里的情况,天气现象差别较大(朱雯娜等,2018)。由于雾的形成受热、动力、辐射、气溶胶、微物理过程以及地表状况等多个边界层内的复杂物理过程影响,因此雾成为较难预报的灾害性天气之一(王宏斌等,2018)。

20 世纪 70 年代国外已开始利用气象卫星对大雾天气进行监测,Gurka and Oliver(1978)用美国 SMS-1 成像仪可见光通道图像分析雾的消散过程,表明可见光通道反射率可以较好地表明雾消散。Eyre et al(1984)和 Lee et al(1997)应用美国 NOAA 和 GOES-8/9 气象卫星搭载的甚高分辨率辐射计(AVHRR)近红外通道和红外通道差值的方法判识雾,取得较好成果。Bendix et al(2005)利用 AVHRR 成像仪开发雾判识流程并用不同算法反演白天和夜间大雾区地面能见度。Yoo et al(2006; 2010)利用 MTSAT-1R 和 EOS/MODIS 数据对朝鲜半岛上空雾进行监测研究,并利用地面气象站的

观测数据对大雾识别结果进行验证。王宏斌等(2018)利用中波红外  $3.9 \mu\text{m}$  和长波红外  $11.2 \mu\text{m}$  通道亮温差和  $3.9 \mu\text{m}$  伪比辐射率法开展中国地区夜间不同等级雾的识别,并找出了不同等级雾的参数最优阈值,取得较好效果,并应用于气象业务中。

中国利用卫星遥感监测雾的研究起步较国外晚,始于 20 世纪 90 年代,随着中国气象卫星的发射,近 30 年来国内有不少学者开展了大量的卫星遥感监测大雾的研究工作。李亚春等(2000;2001)研究了气象卫星云图在大雾消散过程中的纹理特征、运动规律和消散规律。沙依然等(2008)、吴晓京等(2005)、吴晓京和张苏平(2008)应用 EOS-MODIS 卫星资料研究了北疆、陕西等地的大雾,吴晓京和张苏平(2008)改进算法对大雾临近预报进行研究并对大雾消散进行分型。张文刚和魏鸣(2011)、李文娟等(2017)应用 FY-2 资料算法来识别、监测大雾,取得较好效果。吴晓等(2016)利用 MODIS 云顶高度、云相态产品与地面站云类观测对比,达到 60% 的一致性。刘一玮等(2016)利用 FY-2 云分类产品对天津地区的云状识别进行研究取得不错效果。张春桂和林炳青(2018)利用 FY-2E 的可见光、热红外和中红外通道并应用中红外和热红外通道的归一化插值指标实现对夜间海雾的自动识别,并利用地面自动站进行经度验证,发现海雾监测平均准确率超过 70%。

FY-4A 于 2016 年 12 月 11 日在西昌卫星发射中心发射,是我国新一代静止气象卫星,装载多种观测仪器,包括多通道扫描成像辐射计(AGRI)、干涉式大气垂直探测仪(GIIRS)、闪电成像仪(LMI)和空间环境监测仪器(SEM)等(张鹏等,2016)。对于大雾的监测,FY-4A 的 AGRI 载荷拥有明显多于 FY-2 的通道,可以更好地监测大雾。刘清华等(2018)利用 FY-4A 成像仪数据对大雾进行监测,发现新一代静止气象卫星的高时空分辨率可以有效监测大雾的生消发展。

以上研究多基于上一代中国静止气象卫星或国外静止、极轨气象卫星,对于应用 FY-4A 对大雾监测应用相关研究较少,且新疆位于中国西部,处于日本 Himawari-8 的边缘, Himawari-8 对新疆区域的监测效果较差, FY-4A 的发射对新疆地区大雾监测有非常好的帮助。本文尝试使用 FY-4A 的 AGRI L1 级数据和 L2 级产品,如云顶高度、云相态、云分类等产品对发生在乌鲁木齐机场的两次持续性浓雾的微物理结构进行分析,以期提高对浓雾的监测能力,为航空气象预报和服务提供较好支撑。

## 1 数据与方法介绍

### 1.1 FY-4A 数据

文中所用的 FY-4A 数据全部来自国家卫星气象中心 (<http://satellite.nsmc.org.cn/PortalSite/Default.aspx>),包括 FY-4A 的 AGRI 载荷 L1 级数据 2000 m 分辨率(通道 1~通道 7)和 4000 m 分辨率数据(通道 1~通道 14),以及 L2 级云类型、云相

态和云顶高度产品。L1 级数据格式为. HDF, L2 级产品数据格式为. NC。使用 Python 语言进行数据可视化绘图。

AGRI 是 FY-4 静止气象卫星的主要载荷之一,通过精密的双扫描镜机构实现精确和灵活的二维指向,可实现分钟级的区域快速扫描;其采用离轴三反主光学系统,高频次获取 14 个波段的地球云图,并利用星上黑体进行高频次红外定标,以确保观测数据的精度。气象预报业务实时应用的主要为 AGRI,该仪器有 14 个通道,其中通道 1(中心波长为  $0.65 \mu\text{m}$ )最高分辨达到 500 m,具体各通道指标见表 1。

FY-4A 搭载的 AGRI 性能较 FY-2 有很大提升,由 FY-2 的 5 个通道扩展到 14 个通道,具体参数见表 2,本文主要使用可见光通道 1~通道 3、通道 6 和红外通道 8、通道 12 对大雾进行研究,其中可见光通道 1~通道 3、通道 6 由于受太阳短波辐射影响,数据时段为每日 10:30—19:30,红外通道 8、通道 12 数据为全天候, L2 级产品基于红外通道,数据时段为全天候。

表 1 FY-4A 的 AGRI 通道参数

Table 1 Channel parameters of FY-4A

通道	中心波长/ $\mu\text{m}$	分辨率/km	通道	中心波长/ $\mu\text{m}$	分辨率/km
1	0.47	1	8	3.725	4
2	0.65	0.5	9	6.25	4
3	0.825	1	10	7.1	4
4	1.37	2	11	8.5	4
5	1.61	2	12	10.8	4
6	2.225	2	13	12.0	4
7	3.725	2	14	13.5	4

表 2 FY-4A AGRI 与 FY-2 VISSR 指标比较

Table 2 Index comparison of FY-4A AGRI and FY-2 VISSR

通道	通道号	FY-2F/G/H VISSR		FY-4A AGRI	
		波段/ $\mu\text{m}$	空间分辨率/km	波段/ $\mu\text{m}$	空间分辨率/km
可见光与近红外	1	—	—	0.45~0.49	1
	2	0.55~0.75	1.25	0.55~0.75	0.5~1
	3	—	—	0.75~0.90	1
短波红外	4	—	—	1.36~1.39	2
	5	—	—	1.58~1.64	2
	6	—	—	2.10~2.35	2~4
中波红外	7	—	—	3.5~4.0(高)	2
	8	3.5~4.0	5	3.5~4.0(低)	4
水汽	9	—	—	5.8~6.7	4
	10	6.3~7.6	5	6.9~7.3	4
	11	—	—	8.0~9.0	4
长波红外	12	10.3~11.3	5	10.3~11.3	4
	13	11.5~12.5	5	11.5~12.5	4
	14	—	—	13.2~13.8	4

## 1.2 地面数据

文中地面数据基于新疆区域国家基本站的气温、湿度、人工观测能见度资料和机场人工观测的云、能见度、天气现象等实况资料。其中机场人工观测能见度为每半小时一次,准确度较高。国家基本站的湿度、人工观测能见度主要用于验证卫星图像中的大雾区。

## 1.3 方法

雾滴主要由液态水滴粒子组成,比一般云中水滴粒子小得多,平均半径不到  $10 \mu\text{m}$ ,在雾形成或消散期间,半径可小于  $1 \mu\text{m}$ 。大雾发展过程中大气层结绝对稳定,雾顶很均匀,大雾特殊的物理特性导致其具有特殊光谱和结构特性。白天,大雾在可见光波段的反射率高于下垫面,低于中高云和厚云,略高于薄云,可见光通道反射率主要反映雾的光学厚度,雾光学厚度越大反射率越高。FY-4A 的 AGRI 载荷可见光通道 1~通道 3 可以较好分析大雾区域纹理,估算雾光学厚度,且可见光通道 2(中心波长为  $0.65 \mu\text{m}$ ,  $\text{BD}_{0.65 \mu\text{m}}$ ) 反射率与雾的光学厚度成正比;可见光通道 6(中心波长为  $2.2 \mu\text{m}$ ,  $\text{BD}_{2.2 \mu\text{m}}$ ),对于雾滴的小粒子,反射辐射比云大,因此可以较好地区分云;中波红外通道 8(中心波长为  $3.725 \mu\text{m}$ ,  $\text{BD}_{3.725 \mu\text{m}}$ ) 反射率主要反映粒子有效半径,有效粒子越小、反射率越大,雾滴在该通道的反射率大于其他云粒子,白天该通道既包含雾滴的红外发射也包含了雾滴对太阳光的反射,所以日间可以通过计算  $3.725 \mu\text{m}$  反射率来区分大雾。长波红外通道 12(中心波长为  $10.8 \mu\text{m}$ ,  $\text{BD}_{10.8 \mu\text{m}}$ ) 主要用于测量雾顶温度信息。对于夜间大雾观测,使用  $10.8$  和  $3.725 \mu\text{m}$  的通道亮温差 ( $\text{BTD}_{10.8 \mu\text{m}-3.725 \mu\text{m}}$ ) 有较好表现。本文应用以上雾的特性和卫星各通道综合判断大雾的生消。

## 2 两次持续强浓雾过程概况

2019 年 1 月 25—26 日,北疆沿天山一带的乌鲁木齐机场出现持续 36 h 的能见度为  $500 \sim 1000 \text{ m}$  的大雾天气,其中 25 日 06:00—09:30、18:00—20:00、26 日 02:30—13:30 出现能见度为  $200 \sim 500 \text{ m}$  浓雾,

25 日 04:00—06:00、09:30—18:00 更是出现能见度为  $200 \text{ m}$  以下的强浓雾(图 1a)。此次大雾天气对机场运行造成较大影响。

2019 年 3 月 17—18 日,北疆沿天山一带出现大范围大雾天气。乌鲁木齐机场 3 月 16 日 23:08 至 17 日 14:17、17 日 23:48 至 18 日 18:00 出现两个阶段且持续时长达 34 h 的大雾天气(图 1b)。18 日,乌鲁木齐国际机场多趟进出港航班延误、备降或取消,机场启动大面积航班延误应急响应,滞留旅客达 5400 人。

## 3 2019 年 1 月 25—26 日连续浓雾分析

### 3.1 各通道图像分析

#### 3.1.1 大雾发生前

1 月 25 日 00:30 大雾发生前,沿天山一带为轻雾,能见度在  $1000 \text{ m}$  以上。 $\text{BTD}_{10.8 \mu\text{m}-3.725 \mu\text{m}}$  通道图像(图 2a)中乌苏(W)附近有小范围雾区, $\text{BTD}_{10.8 \mu\text{m}-3.725 \mu\text{m}}$  为  $2 \sim 8 \text{ K}$ 。乌鲁木齐机场上空有卷云, $\text{BTD}_{10.8 \mu\text{m}-3.725 \mu\text{m}} < 0 \text{ K}$ , $10.8 \mu\text{m}$  红外通道呈现浅白色(图略)。26 日 02:30 机场实况由轻雾转为能见度在  $1000 \text{ m}$  以下的大雾,红外云图中沿天山一带呈现中等灰度(图略),自动气象站实况显示北疆沿天山的石河子(S)—乌鲁木齐机场(Z)一带均维持大雾,个别站点出现能见度为  $200 \sim 500 \text{ m}$  浓雾。26 日 04:30 的 Z 处已出现能见度为  $200 \text{ m}$  以下强浓雾, $\text{BTD}_{10.8 \mu\text{m}-3.725 \mu\text{m}}$  通道图像(图 2b)中 W—S—Z 一线为大雾, $\text{BTD}_{10.8 \mu\text{m}-3.725 \mu\text{m}}$  为  $4 \sim 8 \text{ K}$ 。

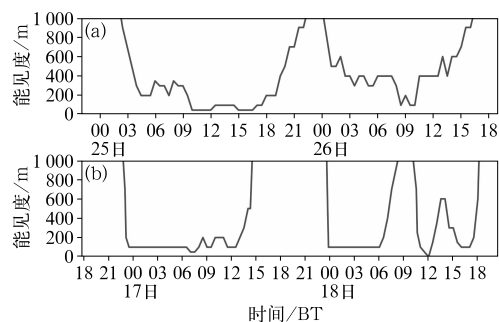


图 1 2019 年 1 月 25—26 日(a)和 3 月 17—18 日(b)两次持续浓雾过程能见度的演变

Fig. 1 The evolution of visibility in 25—26 January (a) and in 17—18 March (b) 2019

3.1.2 大雾维持期间

1月25日14:30大雾维持期间,  $BD_{0.47\mu m}$  (通道1)、 $BD_{0.65\mu m}$  (通道2)、 $BD_{0.83\mu m}$  (通道3) 图像较一致,  $BD_{0.83\mu m}$  通道(图2c)对地面植被、山脉分布显示效果清晰, 均显示北疆盆地大部有积雪和云, 但无法分辨低云雾, 沿天山一带看不出云顶凸起。在  $BD_{2.2\mu m}$  通道(图2d)中 W—S—Z 色调明显较周围亮, 这是因为雾区中的雾滴粒子在该通道反射率较周围高。在  $BD_{3.725\mu m}$  通道(图2e)中 W—S—Z 一线为“黑云”边缘, 雾区与周围云系对比度较明显, 这是由于日间雾区温度较周围更暖所造成。地面实况显示 S—Z 附近为能见度在 500~1000 m 的大雾。在  $BD_{10.8\mu m}$  通道(图2f) J—W—S 和 Z—Q 一线温度较一致, S—Z 一带云顶温度略低。在 26 日 11:30 的  $BD_{0.83\mu m}$  可见光通道(图2g)中 J—W—S—Z—Q 反射率较周围非雾区高, 图中色调略微更亮, 在西部国境线附近有东北—西南向纤维状少量卷云。在短波红外  $BD_{3.725\mu m}$  通道(图2i)中可以明显看到北疆的

“黑云”范围较 25 日有明显扩大, 边界光滑, 地面实况显示 26 日大雾范围明显加大, J—W—S—Z—Q 一线出现能见度为 200~500 m 的浓雾。W 附近“黑云”中出现色调较白的冷云, 说明有冷空气进入大雾区, 有利于大雾消散, 在长波红外云图(图2j)中云顶温度在 225~235 K。

3.1.3 大雾消散阶段

1月26日14:30地面大雾范围明显减小,  $BD_{2.2\mu m}$  通道(图2k)中乌鲁木齐机场 Z 处出现反射率小的暗区, Q 处大雾已经消失,  $BD_{3.725\mu m}$  通道(图2l)沿天山一带呈现狭长“黑云”带, 云顶温度逐渐降低(图略), 说明雾层有所抬升, 机场能见度由 200~500 m(浓雾)转为 500~900 m(大雾), 16:00 以后能见度转为 1 km 以上(轻雾), 此次大雾天气过程结束。

3.2 卫星云产品分析

FY-4A 的 L2 级云产品基于 4000 m 分辨率 L1

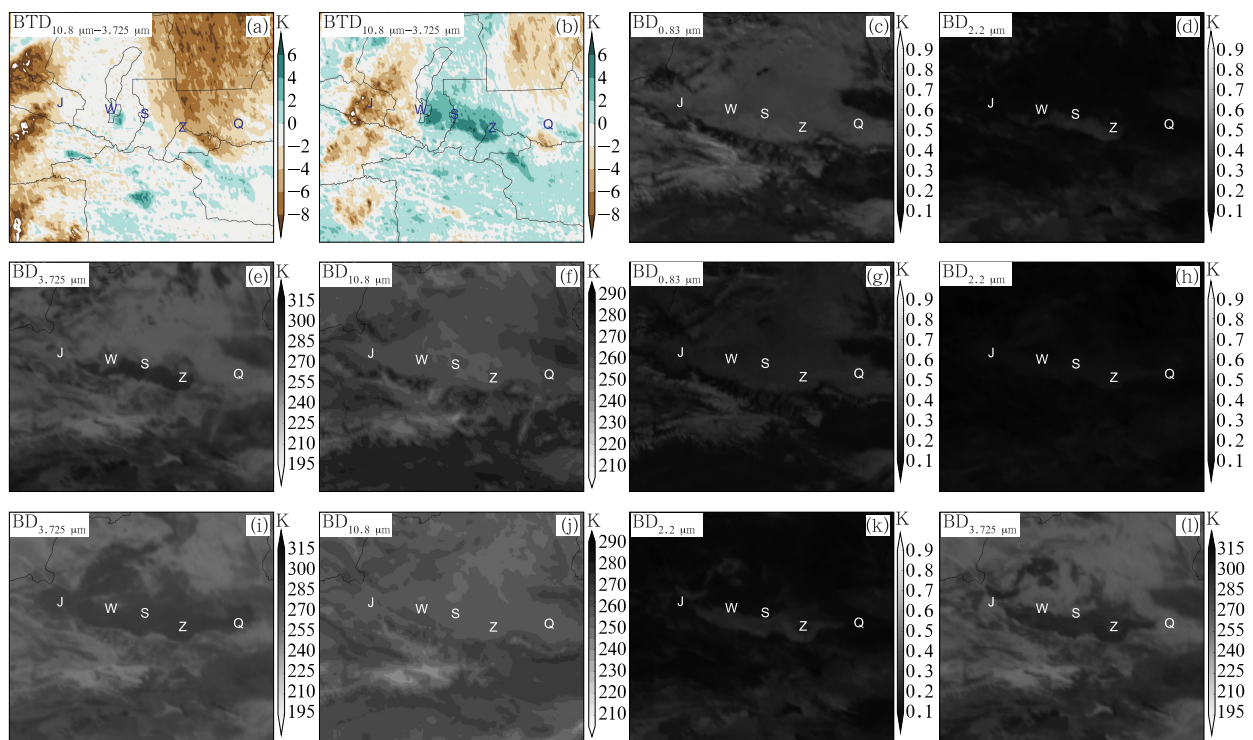


图 2 2019 年 1 月 25—26 日持续浓雾过程中, 25 日 00:30(a)、04:30(b)、14:30(c~f), 26 日 11:30(g~i)、14:30(k~l)FY-4A 的 AGRI 各通道图像 (“J”“W”“S”“Z”“Q”分别为精河、乌苏、石河子、乌鲁木齐机场、奇台站位置, 下同)

Fig. 2 FY-4A channel images in dense fog process at 00:30 BT 25 (a), 04:30 BT 25 (b), 14:30 BT 25 (c~f), 11:30 BT 26 (g~j), 14:30 BT 26 (k~l) January 2019 (“J”“W”“S”“Z”“Q” represent Jinghe, Wusu, Shihezi, Urumqi Airport and Qitai stations, respectively)

级红外通道数据反演,因此该产品全天可用。1月25日02:30沿天山一带开始出现大雾,云顶高度大约为1000~3000 m(图略)。14:30云顶高度(图3a)显示,北疆沿天山一带有小范围低云,云顶高度大约为1000~3000 m,在云分类产品(图3b)中沿天山一带主要为暖液态水云和过冷水云,这与3.1节中沿天山一带云顶不均匀,顶部有凸起较对应。夜间,北疆沿天山云顶高度维持在1000~3000 m,主要以暖液态水云为主伴随少量过冷水云(图

略)。26日11:30(图3c)沿天山一带1000~3000 m云顶高度和范围明显较25日加大,云相态与云分类均为暖液态水云,在S北侧有过冷水云(图3d),Z处云顶高度略高于其他地区,对应时次的乌鲁木齐机场实况显示出现能见度为200~500 m的浓雾。26日14:30沿天山一带大雾范围有所减小,云顶高度产品中边界不平滑(图3e),云顶高度为2000~3000 m,较大雾维持时段有所抬升,云分类产品图(图3f)显示W、S附近的过冷水云消失。

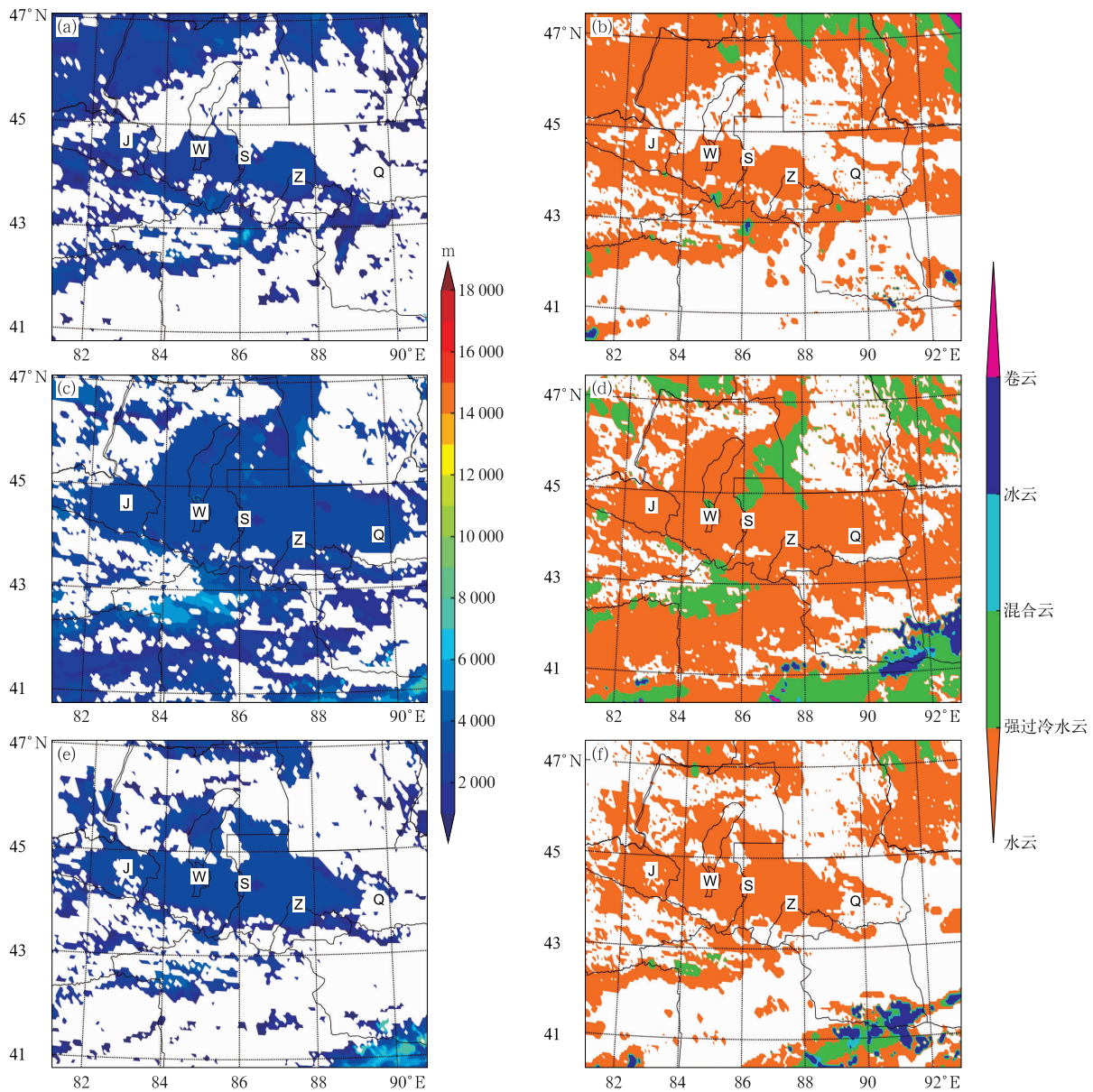


图3 2019年1月25日14:30(a,b),26日11:30(c,d)和14:30(e,f)大雾天气FY-4A云产品

(a,c,e)云顶高度,(b,d,f)云分类

Fig. 2 FY-4A satellite cloud products at 14:30 BT 25 (a, b), 11:30 BT 26 (c, d) and 14:30 BT 26 (e, f) January 2019

(a, c, e) cloud top height, (b, d, f) cloud classification

综上所述,对于日间雾的监测,可以选择  $BD_{0.83\ \mu\text{m}}$ 、 $BD_{2.2\ \mu\text{m}}$ 、 $BD_{3.725\ \mu\text{m}}$  和  $BD_{10.8\ \mu\text{m}}$  通道,但是对夜间雾的监测比较困难,可以使用  $BTD_{10.8\ \mu\text{m}-3.725\ \mu\text{m}}$  通道差图像进行监测,同时 FY-4A 的云顶高度和云产品分类也可以作为夜间雾监测的辅助手段。其中  $BD_{0.83\ \mu\text{m}}$ 、 $BD_{2.2\ \mu\text{m}}$ 、 $BD_{3.725\ \mu\text{m}}$  通道均为 FY-4A 新增通道,与 FY-2 系列卫星相比具有更丰富的通道信息,更有利于对大雾的监测。

## 4 2019年3月17—18日连续浓雾分析

### 4.1 各通道图像分析

#### 4.1.1 第一阶段

2019年进入3月以后,北疆地表温度升温明显,地面几乎无积雪,因此卫星探测低云/雾效果更好。3月16日白天,北疆沿天山一带主要为轻雾天气,自动气象站能见度为1~3 km,温度为-2~2℃,夜间温度开始下降,沿天山一带能见度略有下降。16日23时,乌鲁木齐机场周边的米泉、昌吉、五家渠三站出现能见度在1000 m以下大雾。

3月17日大雾维持期间,在10:30卫星云图  $BD_{0.83\ \mu\text{m}}$  通道图像(图4a)上,J—W—S—Z—Q一带上空有色调较亮的低云雾,低云反射率大约为0.5~0.7,J—W—S云顶不光滑,有不均匀凸起,说明雾顶上空有扰动云系,S—Z—Q一线云顶较为光滑均匀,边界清晰,地面自动气象站实况显示S—Z—Q一线出现能见度为200~500 m的浓雾,而J—W—S出现能见度为2~4 km的轻雾。 $BD_{0.47\ \mu\text{m}}$ 、 $BD_{0.65\ \mu\text{m}}$ 通道图像(图略)差别不大,但  $BD_{0.83\ \mu\text{m}}$  图像对比度稍高,对地表监测效果更好,更容易观察沿天山一带雾区,其色调较  $BD_{0.47\ \mu\text{m}}$  更亮一点。在  $BD_{2.2\ \mu\text{m}}$  中波红外通道图像(图4b)中J—W—S—Z—Q一带雾区色调明显较周围亮,轮廓很清晰,但J—W—S色调较S—Z—Q暗,这是由于J—W—S一线雾区上空的中低层扰动云系中含有半径较大的雨滴粒子,其反射率小于雾区的半径较小的雨滴粒子。在  $BD_{3.725\ \mu\text{m}}$  通道图像(图4c)中Z—Q一线温度较高,能表现出“黑云”特征,且“黑云”轮廓与  $BD_{0.83\ \mu\text{m}}$  通道沿天山一带中东部轮廓一致,云顶亮温在270~300 K。在  $BD_{10.8\ \mu\text{m}}$  通道长波红外图(图4d)中北疆盆地雾区温度分布很不均匀,这说明云顶

温度差别较大,S—Z—Q温度相对较高,约为240~260 K,而J—W—S温度最低达到200~230 K,这可反映出云顶高度不均匀,与  $BD_{0.83\ \mu\text{m}}$ 、 $BD_{2.2\ \mu\text{m}}$  通道反映出的雾顶之上有中低扰动云系较对应。随着J—W—S一带的中低扰动云系的移动,北疆盆地雾区东部边缘开始向西消散,边缘开始模糊,而雾区西部无明显变化,此时地面实况中W—S能见度上升至1~2 km,说明中高云带来了扰动,使得地面静稳条件略有减弱。

在17日14:30可见光  $BD_{0.8\ \mu\text{m}}$  通道图像(图4e)中S—Z—Q一线色调较S以西地区亮且可清晰看出云顶不均匀的凸起,盆地东部雾边缘进一步变得模糊,而西部边界仍然很光滑,云层厚度有所减小,  $BD_{3.725\ \mu\text{m}}$  通道(图4g)中盆地雾区轮廓仍然清晰可见,其反射率明显大于周围非雾区,但S—Z上空反照率相对雾区其余部分要暗,说明  $BD_{0.83\ \mu\text{m}}$  中显示的乌鲁木齐上空中高云的反射率较雾区的层云暗一些。在  $BD_{3.725\ \mu\text{m}}$  (图4g)中波红外图像中J—W—S由于雾区温度相对较高,显示为“黑云”,而S—Z—Q区域色调呈灰白至白色,说明云顶相对较冷,且雾层相对较薄。而长波红外  $BD_{10.8\ \mu\text{m}}$  通道图像(图4h)显示与  $BD_{3.725\ \mu\text{m}}$  一致,说明此时S—Z上空有中高云扰动云系,对应地面实况中S—Z—Q一线能见度均上升至1~2 km。此后雾区范围维持缓慢减小,而S—Z一线受中高云影响,实况一致为轻雾,能见度为1~2 km。乌鲁木齐机场第一阶段大雾结束。

#### 4.1.2 第二阶段

3月18日00:00开始,S—Z一带轻雾再次转为大雾,个别站点出现能见度为200~500 m浓雾。在17日23:30红外  $BTD_{10.8\ \mu\text{m}-3.725\ \mu\text{m}}$  图像(图4i)中开始北疆盆地雾区范围再次扩大,18日03:30(图4j)雾区范围最大,地面实况中W—S—Z—Q一线为能见度在0~100 m特强浓雾。05:30(图4k)开始高空波动云系进入新疆西部地区,并向东北移动。07:30(图4l)雾区上空出现结构较为松散的波动云系,仅对Z及附近的阜康、天池站的大雾消散起到一定作用,W—S一带出现大雾并仍维持能见度为100~200 m的特强浓雾。

18日14:30云系大范围影响北疆地区,沿天山一带大部分站点浓雾消散转为轻雾,能见度为1~5 km,可见光  $BD_{0.8\ \mu\text{m}}$  图像(图4m)沿天山一带呈东西向云带,且反照率较强,可明显看出云层较厚,云顶出现纤维状卷云,反射率为0.5~0.7。在

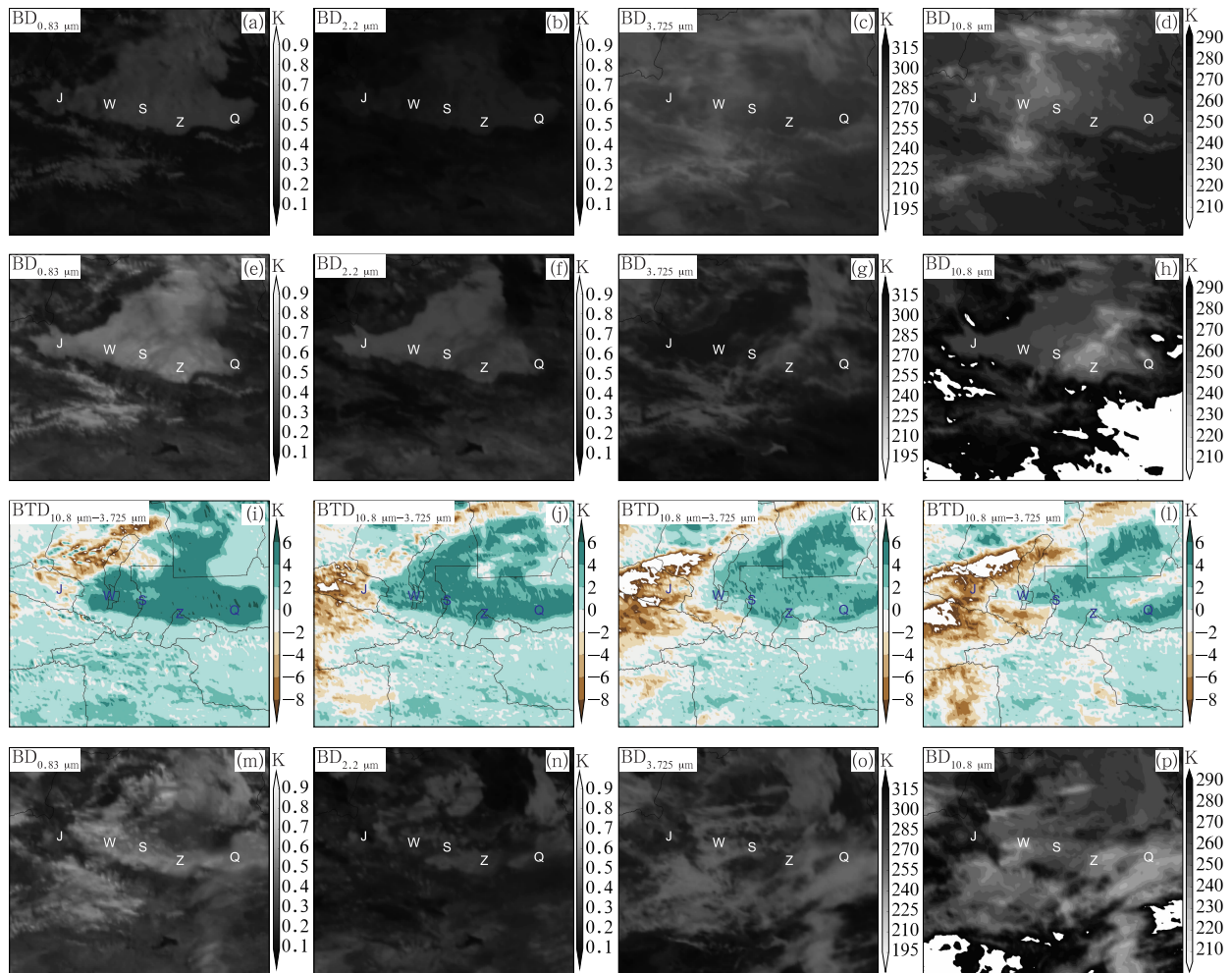


图 4 2019 年 3 月 17—18 日大雾天气过程中,17 日 10:30(a~d)、14:30(e~h)、23:30(i),  
18 日 03:30(j)、05:30(k)、07:30(l)、14:30(m~p)FY-4A 的 AGRI 各通道图像

Fig. 4 FY-4A channel images in dense fog process at 10:30 BT 17 (a~d), 14:30 BT 17 (e~h), 23:30 BT 17 (i),  
03:30 BT 18 (j), 05:30 BT 18 (k), 07:30 BT 18 (l) and 14:30 BT 18 (m~p) March 2019

BD<sub>2.2 μm</sub>短波红外图像(图 4n)中沿天山一带出现反射率较亮的东西向云系,但范围较 17 日明显减小,主要集中在 S—Z 和 Z—Q 一带,反射率约为 0.5~0.7。在 BD<sub>3.725 μm</sub>中波红外图(图 4o)中 Z 上空云系温度较低,呈灰色,黑云形状不明显。在 BD<sub>10.8 μm</sub>长波红外通道图像(图 4p)中沿天山一带云系色调较亮,Z 以东区域上空云顶温度为 210~230 K,说明受中高云影响。随着冷空气主力进入新疆地区,沿天山一带大雾消散,乌鲁木齐机场大雾于 18 时消散转为能见度在 1 km 以上的轻雾,此次大雾过程结束。

#### 4.2 卫星云产品分析

3 月 16 日 23:00 北疆沿天山一带出现云顶高

度为 1000~3000 m 的低云雾区(图 5a),云分类产品(图 5b)显示为暖液态水云,地面实况显示 W—S—Z—Q 一带出现能见度<1 km 的大雾天气,局地出现浓雾和特强浓雾。17 日 10:30(图 5c),大雾区域范围较夜间加大,且在 J—W—S 一线上空出现 4000~8000 m 的中高层云系,云分类图中(图 5d)对应 J—W—S 一线出现过冷水云及冰水混合云,W 南部天山山区出现了卷云。17 日 14:30 云顶高度(图 5e)为 4000~8000 m 的中高云东移进入乌鲁木齐地区,大部分为不透明卷云伴随少量过冷水云(图 5f)。受扰动云系影响,15:00—23:00 沿天山一带地面实况显示为能见度为 1~2 km 的轻雾天气,乌鲁木齐机场第一阶段大雾结束。随着扰动云系的远离,静稳形势再次加强,17 日 23:00 地面实况显示



北疆沿天山一带大雾再次生成, 从 23:30 云顶高度产品(图 5g)中也可看出北疆盆地云层高度较为一致, 约为 1 000~3 000 m, 主要为暖液态水云(图 5h)。18 日 10:30(图略), J—W 及其南部山区出现 4 000~8 000 m 的中高层云, S—Z—Q 一线仍以云顶高度为 1 000~3 000 m 的低云雾为主, 云产品分类产品中 J—W 及南部山区主要为过冷水云, S—Z—Q

为暖水云。14:00 实况显示 S—Z 一线大部分站点能见度上升至 1 km 以上, 对应时次的 14:30(图 5i)天山山区、伊犁河谷中高云向东北移动, 云系影响沿天山一带, 云类型(图 5j)主要为过冷水云、不透明冰云、冰云和卷云, 过冷水云较零散, 乌鲁木齐大雾于 18 时地面冷空气进入后好转。

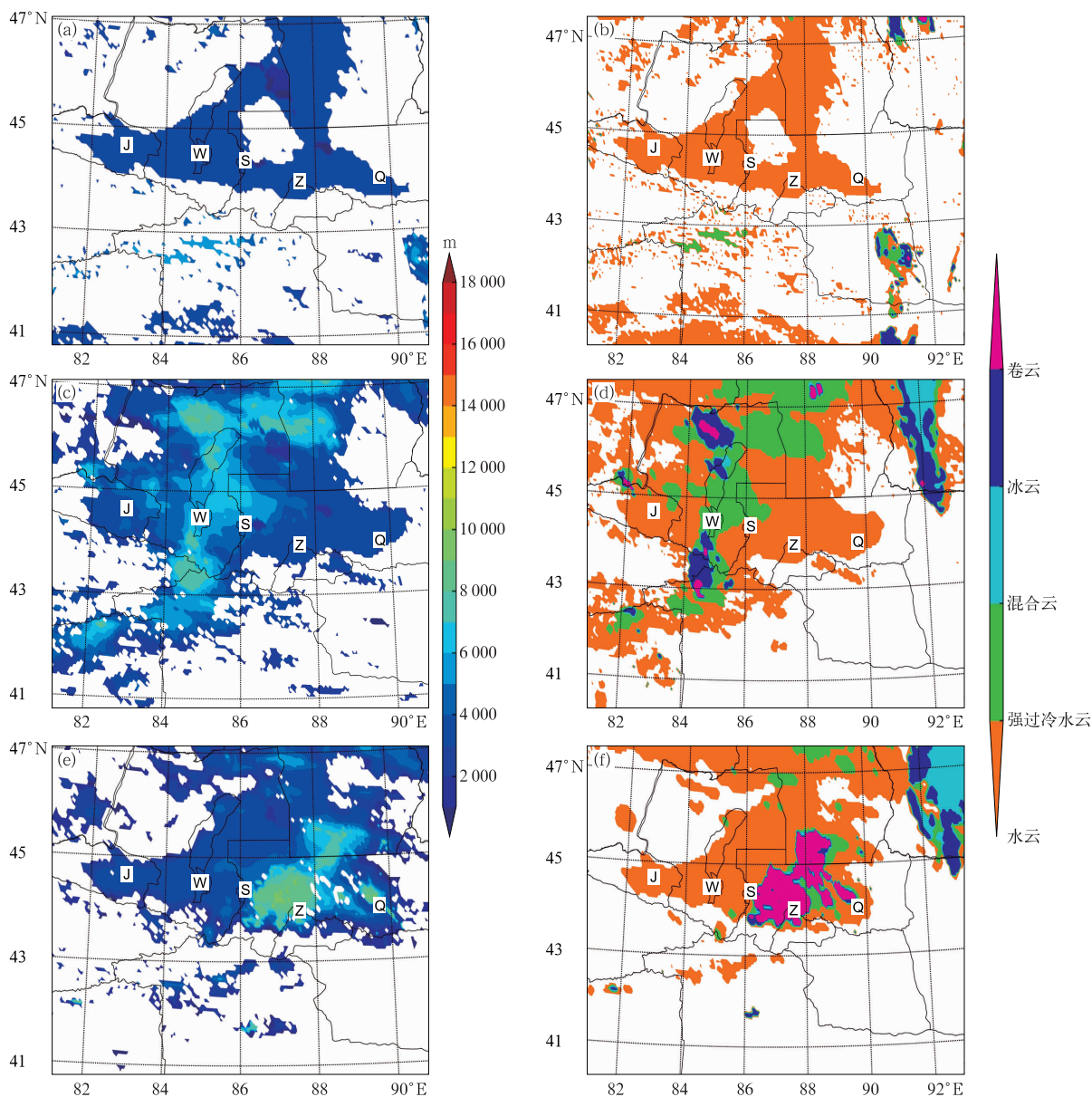
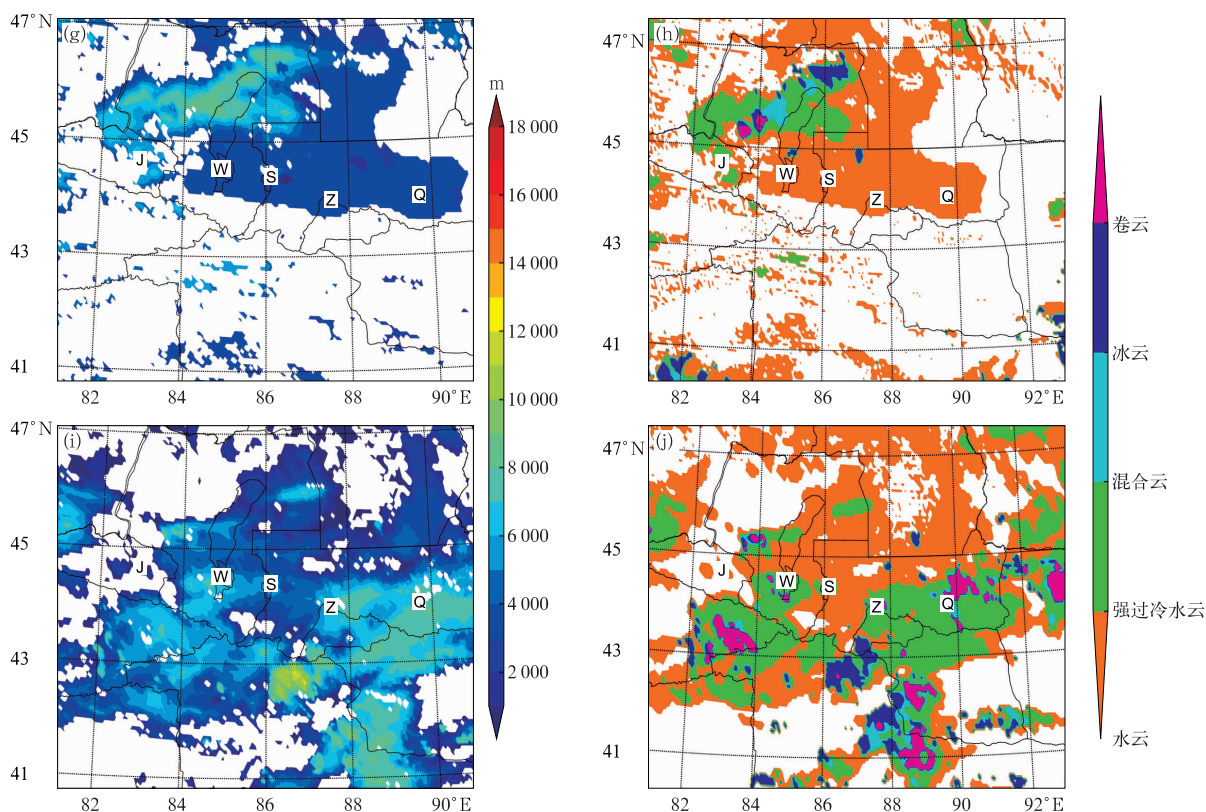


图 5 2019 年 3 月 16 日 23:30(a,b), 17 日 10:30(c,d)、14:30(e,f)、23:30(g,h), 18 日 14:30(i,j)大雾天气 FY-4A 云产品  
(a,c,e,g,i)云顶高度, (b,d,f,h,j)云分类

Fig. 5 FY-4A satellite cloud product at 23:30 BT 16 (a, b), 10:30 BT 17 (c, d), 14:30 BT 17 (e, f), 23:30 BT 17 (g, h), 14:30 BT 18 (i, j) March 2019  
(a, c, e, g, i) cloud top height, (b, d, f, h, j) cloud classification



续图 5

continued Fig. 5

综上所述,通过使用 FY-4A 的云顶高度和云分类产品能够更加清晰了解雾的范围、雾顶高度和云的微物理结构,对雾的生消有更好的认识,弥补了夜间雾的监测劣势。

## 5 结 论

通过对两次持续性强浓雾天气的分析,得到以下结论:

(1) FY-4A 可见光通道对于白天大雾监测有较好的效果,其中  $BD_{0.83 \mu m}$  通道对云和地表监测效果较  $BD_{0.47 \mu m}$ 、 $BD_{0.65 \mu m}$  通道更好, $BD_{2.2 \mu m}$  通道对大雾反应效果更好,由于  $BD_{2.2 \mu m}$  通道中心波长为  $2.2 \mu m$ ,属于短波红外通道,其接收到的辐射有太阳短波辐射和地球长波辐射,因此该通道受可见光影响,在白天使用效果较好,夜间图像很暗,无法使用。 $BD_{3.725 \mu m}$  通道中心波长为  $3.725 \mu m$ ,与 FY-2 系列卫星的 IR4 通道较一致,对于大雾,由于其白天接收太阳短波辐射,温度相对周围较高,在图像中表现为“黑云”,但夜间由于接收不到太阳辐射,其使用与长波红外通道类似,但其接收的红外辐射小于

$BD_{10.8 \mu m}$  通道,因此可以用  $BTD_{10.8 \mu m-3.725 \mu m}$  通道差图像对夜间雾进行识别。业务上常用的长波红外  $BD_{10.8 \mu m}$  通道图像全天可用,但对于上层有云的雾区监测效果不好,但是可用其来判别扰动云系的移动,这对于夜间大雾消散还是有较好效果。

(2) FY-4A 的云顶高度和云分类产品在这两次大雾中有较好表现。对于低云和雾区,其云顶高度为  $1000 \sim 2000 \text{ m}$ ,当高度变化为  $2000 \sim 3000 \text{ m}$  时,地面雾层有所抬升,能见度好转,云分类产品可以较好地判断云的种类,对于低云雾,主要为暖液态水云,而对于中高云,主要为过冷水云、混合不透明冰云、透明冰云和卷云。当大范围过冷水云覆盖雾区时,有助于补充水汽,不利于大雾消散,而出现大范围混合不透明冰云、透明冰云和卷云时,有利于大雾消散。

## 参考文献

- 胡跃文,秦杰,苏静文,等,2019. 2016—2017 年贵州大雾时空分布及气象要素演变分析[J]. 气象,45(5):659-666. Hu Y W, Qin J, Su J W, et al, 2019. Analysis of heavy fog spatio-temporal distribution and meteorological element evolution in Guizhou from 2016 to 2017[J]. Meteor Mon, 45(5): 659-666 (in Chinese).

- 黄政,袁成松,包云轩,等,2016.基于不同参数化方案的高速公路大雾过程的数值模拟试验[J].气象,42(8):944-953. Huang Z, Yuan C S, Bao Y X, et al, 2016. Numerical simulations of heavy fog processes on expressways based on different parameterization schemes[J]. Meteor Mon, 42(8):944-953(in Chinese).
- 李文娟,彭霞云,酆敏杰,2017.浙江省静止卫星白天大雾识别方法研究与检验[J].气象与环境科学,40(1):95-101. Li W J, Peng X Y, Li M J, 2017. Research and test on distinguish daytime fog using geostationary satellite in Zhejiang Province[J]. Meteor Environ Sci, 40(1):95-101(in Chinese).
- 李亚春,孙涵,李湘阁,等,2001.用GMS-5气象卫星资料遥感监测白天雾的研究[J].南京气象学院学报,24(3):343-349. Li Y C, Sun H, Li X G, et al, 2001. Study on detection of daytime fog using GMS-5 weather satellite data[J]. J Nanjing Inst Meteor, 24(3):343-349(in Chinese).
- 李亚春,孙涵,徐萌,2000.气象卫星在雾的遥感监测中的应用与存在的问题[J].遥感技术与应用,15(4):223-227. Li Y C, Sun H, Xu M, 2000. The present situation and problems on detecting fog by remote sensing with meteorological satellite[J]. Remote Sens Technol Appl, 15(4):223-227(in Chinese).
- 林建,杨贵名,毛冬艳,2008.我国大雾的时空分布特征及其发生的环流形势[J].气候与环境研究,13(2):171-181. Lin J, Yang G M, Mao D Y, 2008. Spatial and temporal characteristics of fog in China and associated circulation patterns[J]. Climatic Environ Res, 13(2):171-181(in Chinese).
- 刘清华,2018.风云四号卫星成像仪数据在大雾监测中的应用[J].卫星应用,8(11):29-33. Liu Q H, 2018. Application of monitoring dense fog using FY4A AGRI[J]. Sat Application, 8(11):29-33(in Chinese).
- 刘一玮,孙建元,王颖,等,2016.卫星遥感云分类和TBB产品在天津地区云状识别的应用分析[J].气象,42(8):980-986. Liu Y W, Sun J Y, Wang Y, et al, 2016. Analysis of satellite products in recognition of the cloud classification and TBB in Tianjin Area[J]. Meteor Mon, 42(8):980-986(in Chinese).
- 沙依然,丁林,镡拉提,等,2008. EOS-MODIS 卫星资料在北疆大雾监测中的应用分析[J].沙漠与绿洲气象,2(6):30-33. Sha Y R, Ding L, Pu L T, et al, 2008. Analyze on monitoring heavy fog in northern Xinjiang with MODIS data[J]. Desert Oasis Meteor, 2(6):30-33(in Chinese).
- 王宏斌,张志薇,刘端阳,等,2018.基于葵花8号新一代静止气象卫星的夜间雾识别[J].高原气象,37(6):1749-1764. Wang H B, Zhang Z W, Liu D Y, et al, 2018. Detection of fog at night by using the new geostationary satellite Himawari-8[J]. Plateau Meteor, 37(6):1749-1764(in Chinese).
- 王旭,马禹,冯志敏,2002.新疆雾的时空统计特征[J].新疆气象,25(1):6-8. Wang X, Ma Y, Feng Z M, 2002. Spatial and temporal statistical character of fog in Xinjiang[J]. Xinjiang Meteor, 25(1):6-8(in Chinese).
- 吴晓,游然,王旻燕,等,2016.基于MODIS云宏观特性的卫星云分类方法[J].应用气象学报,27(2):201-208. Wu X, You R, Wang M Y, et al, 2016. Cloud type identification based on macro and micro properties of clouds from MODIS[J]. J Appl Meteor Sci, 27(2):201-208(in Chinese).
- 吴晓京,陈云浩,李三妹,2005.应用MODIS数据对新疆北部大雾地面能见度和微物理参数的反演[J].遥感学报,9(6):688-696. Wu X J, Chen Y H, Li S M, 2005. Utilizing MODIS data to retrieve the visibility and microphysical properties of fog happens in the Northwest China[J]. J Remote Sens, 9(6):688-696(in Chinese).
- 吴晓京,张苏平,2008.大雾消散卫星遥感临近预报及消散型分类——我国中东部案例研究[J].自然灾害学报,17(6):134-138. Wu X J, Zhang S P, 2008. Imminent forecast of fog dissipation using satellite remote sensing and its dissipation type: a case study of Middle—East China[J]. J Nat Dis, 17(6):134-138(in Chinese).
- 张春桂,林炳青,2018.基于FY-2E卫星数据的福建沿海海雾遥感监测[J].国土资源遥感,30(1):7-13. Zhang C G, Lin B Q, 2018. Application of FY-2E data to remote sensing monitoring of sea fog in Fujian coastal region[J]. Remote Sens Land Res, 30(1):7-13(in Chinese).
- 张鹏,郭强,陈博洋,等,2016.我国风云四号气象卫星与日本 Himawari-8/9 卫星比较分析[J].气象科技进展,6(1):72-75. Zhang P, Guo Q, Chen B Y, et al, 2016. The Chinese next-generation geostationary meteorological satellite FY-4 compared with the Japanese Himawari-8/9 satellites[J]. Adv Meteor Sci Technol, 6(1):72-75(in Chinese).
- 张文刚,魏鸣,2011. FY-2 静止卫星监测雾的方法研究[J].自然灾害学报,20(5):176-180. Zhang W G, Wei M, 2011. Research on method for monitoring fog using FY-2 geostationary satellite[J]. J Nat Dis, 20(5):176-180(in Chinese).
- 赵玉广,李江波,李青春,2015.华北平原3次持续性大雾过程的特征及成因分析[J].气象,41(4):427-437. Zhao Y G, Li J B, Li Q C, 2015. Characteristics of three sustained dense fog events across the North China Plain[J]. Meteor Mon, 41(4):427-437(in Chinese).
- 朱雯娜,张利平,黄海波,等,2018.乌鲁木齐国际机场航空气候志(1986—2015)[A]. Zhu W N, Zhang L P, Huang H B, et al, 2018. Aviation Climatology of Urumqi International Airport (1986—2015)[A](in Chinese).
- Bendix J, Thies B, Cermak J, et al, 2005. Ground fog detection from space based on MODIS daytime data—a feasibility study[J]. Wea Forecasting, 20(6):989-1005.
- Eyre J R, Brownscombe J L, Allam R J, 1984. Detection of fog at night using AVHRR imagery[J]. Meteor Mag, 113:266-271.
- Gurka J J, Oliver VJ, 1978. The role of inward mixing in the dissipation of fog and stratus[J]. Mon Wea Rev, 106(11):1633-1635.
- Lee T F, Turk F J, Richardson K, 1997. Stratus and fog products using GOES-8-9 3.9 um data[J]. Wea Forecasting, 12(3):664-677.
- Yoo J M, Jeong M J, Hur Y M, et al, 2010. Improved fog detection from satellite in the presence of Clouds[J]. Asia-Pacific J Atmos Sci, 46(1):29-40.
- Yoo J M, Jeong M J, Yun M Y, 2006. Optical properties of fog from satellite observation (MODIS) and numerical simulation[J]. Asia-Pacific J Atmos Sci, 42(5):291-305.