

FY4A卫星遥感资料在乌鲁木齐机场一次强对流天气中的应用初探

胡建军

民航新疆空中交通管理局, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2022年4月19日; 录用日期: 2022年5月18日; 发布日期: 2022年5月26日

摘要

本文使用FY2G、FY4A卫星、HTG-3微波辐射计等资料对乌鲁木齐机场2017年初夏一次强对流天气进行遥感探测分析, 针对新型遥感侧资料在对航空飞行安全有重要影响的强对流天气的应用效果进行评估, 结果表明: 1) FY2G、FY4A卫星资料对强对流的监视有较好的效果, FY4A卫星的TBB产品能定量地分析、显示对流云团的初生、发展、演变, 强对流天气发生时, 云顶温度梯度的移动方向能较好地解释系统移动、强度变化。2) 微波辐射计资料能够较好地监测雷暴强对流天气的发生、发展。微波辐射计的相对湿度、整层水汽含量和液态水含量资料能够很好地揭示冰雹、降水来临时空中水汽分布及层结。冰雹发生时, 空中水汽接近饱和。而CAPE、Ki指数跃变的时间段与实况中雷暴发生的时间较为吻合。液态水含量的伸展高度与雷暴云的高度有较好的对应关系。而微波辐射计自带的气象站温度和相对湿度场能够大体反应出雷暴天气时气象要素的变化, 但是略有滞后, 而降水率方面, 出现时间与实况较符合, 但强度与实况有偏差。微波辐射计在雷暴天气应用中具有较好的监视效果, 预报员可以根据实时探测资料了解雷暴的伸展高度、强度, 有利于提供更好的航空气象服务。

关键词

雷暴, 强对流, 微波辐射计, 液态含水量

Preliminary Application of FY4A Satellite Remote Sensing Data in a Severe Convective Weather at Urumqi Airport

Jianjun Hu

Xinjiang Air Traffic Management Bureau, CAAC, Urumqi Xinjiang

Received: Apr. 19th, 2022; accepted: May 18th, 2022; published: May 26th, 2022

Abstract

Using FY2G and FY4A satellite and HTG-3 microwave radiometer data are used to detect and analyze a severe convective weather in Urumqi Airport in early summer of 2017. The application effect of new remote sensing side data in severe convective weather which has an important impact on aviation flight safety is evaluated. Results show that FY2G and FY4A satellites data have a good effect on the monitoring of convection storm. The TBB product of FY4A satellite can quantitatively analyze and display the birth, development and evolution of convective clouds. When strong convective weather occurs, the moving direction of cloud top temperature gradient can better explain the movement and intensity change of the system. The microwave radiometer data can better monitor the occurrence and development of thunderstorm severe convective weather. The data of relative humidity, whole layer water vapor content and liquid water content of microwave radiometer can well reveal the water vapor distribution and stratification in the coming time and space of hail and precipitation. When hail occurs, the water vapor in the air is close to saturation. The time period of CAPE and Ki index jump is consistent with the time of thunderstorm in reality. The extension height of liquid water content has a good corresponding relationship with the height of thunderstorm cloud. The temperature and relative humidity field of the meteorological station equipped with the microwave radiometer can generally reflect the changes of meteorological elements during thunderstorm weather, but it lags slightly. In terms of precipitation rate, the occurrence time is more consistent with the actual situation, but the intensity is deviated from the actual situation. Microwave radiometer has good monitoring effect in thunderstorm weather application. Forecasters can understand the extension height and intensity of thunderstorm according to real-time detection data, which is conducive to providing better aviation meteorological services.

Keywords

Thunderstorm, Convection, Microwave Radiometer, Liquid Water Content

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

强对流天气是指出现短时强降水、雷雨、大风、龙卷风、冰雹等现象的灾害性天气，它通常发生在对流云系中或单体对流云团中，尺度上属于中小尺度，持续的时间较短，大尺度的天气图中是无法探测出，主要使用卫星、雷达、自动站等探测手段，对强对流天气使用卫星、雷达等探测手段分析的研究有很多[1] [2] [3]。例如：陈英英等[4]利用 FY-2D 静止卫星和 CINRAD/SA 雷达对湖北一次强天气进行研究，吴芳芳等[5]使用雷达资料研究了苏北地区一次超级单体风暴环境条件与雷达回波特征。但是西北地区使用风廓线雷达、微波辐射计等新型探测资料对强对流天气进行监测的研究还是较为少见的，尤其是在民航业内，则更是罕见。

2016 年 12 月，我国自主研发的新一代静止气象卫星发射升空，该卫星姿态由以往的自旋转变为三轴稳定，使得其卫星产品的时间、空间精度更好，在业务中有更好的应用。其产品通道由 FY2 卫星的 5 个通道提升至 14 个通道，产品通道的丰富对于强对流天气的监视也有较好的帮助[6]。

微波辐射计是一种被动式的微波遥感仪器，它是利用大气本身自然辐射的微波信号遥感大气信息，近年来，对微波辐射计资料的准确性研究也有一些，张文刚等[7]利用武汉站高时空的探测资料与同址的MP-3000A型地基微波辐射计资料，进行对比分析，发现微波辐射计对大气要素的探测具有较高的探测准确度，但仍存在一定的偏差。而卢会国等[8]以阳江第八届国际探空比对试验资料为基础，对比分析了GPS/MET探空仪和微波辐射计资料，指出微波辐射计在天气较好时，测量精度较高，基本上与3个国内探空仪数据相当，但微波辐射计在雨天受罩子上的雨水影响，误差较大。

随着地基微波辐射计的安装、应用，近几年，使用微波辐射计资料在短时强降水、暴雨、冰雹、强对流天气的研究逐渐增多，但多数研究微波辐射计型号为美国产的MP-3000A型[9][10][11]，崔雅琴等[12]利用德国RPG-HATPRO-G3型14通道并行地基微波辐射计资料对济南一次短时强降水进行分析研究。

乌鲁木齐机场于2016年10月安装Airda HTG3微波辐射计，经过近五年的使用，该微波辐射计在对乌鲁木齐机场的冬季大雾、降雪及夏季的降水、强对流天气有较好的监测，但是由于冰雹概率较小，其对冰雹天气的监测应用研究相对较少。经统计，近40年乌鲁木齐机场冰雹发生的概率极低，近40年来共出现4天，分别出现在1986年4月23日、1988年5月10日、1995年4月13日、2017年5月2日。本文通过使用该微波辐射计所探测的液态含水量、温度、湿度等资料对2017年5月2日乌鲁木齐国际机场冰雹等强对流天气进行分析研究，以期望提升卫星遥感、微波辐射计等新型探测资料在强对流天气监视中的应用。

2. 天气概况及环流形势

2017年5月2日18:15(北京时，下同)~19:00乌鲁木齐国际机场出现雷暴、大风、冰雹等强对流天气，瞬时风速达到 $35.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，突破乌鲁木齐机场大风观测历史极值。此次强对流天气虽然持续时间较短，但由于乌鲁木齐机场航班量较大，对飞行影响较大。因本场雷暴天气延误35班(延误两小时以上1班)，备降5班，返航2班，取消4班。

雷暴天气发生前的4月29日~5月1日，机场受低槽东移影响，出现了一次中到大量降水天气过程。5月2日08时(图1(a))新疆区域处于槽后的西北气流控制，北疆上空出现急流，地面形势图(图1(b))中北疆地区处于冷高压前沿，变压梯度较为明显。5月2日20时500 hPa西北气流加大，乌鲁木齐上空达到 $36\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，温度槽落后高度槽，700 hPa为一致西北气流，塔城-克拉玛依-乌市有明显急流，乌鲁木齐上空 $32\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，500~700 hPa乌鲁木齐上空为急流轴控制。

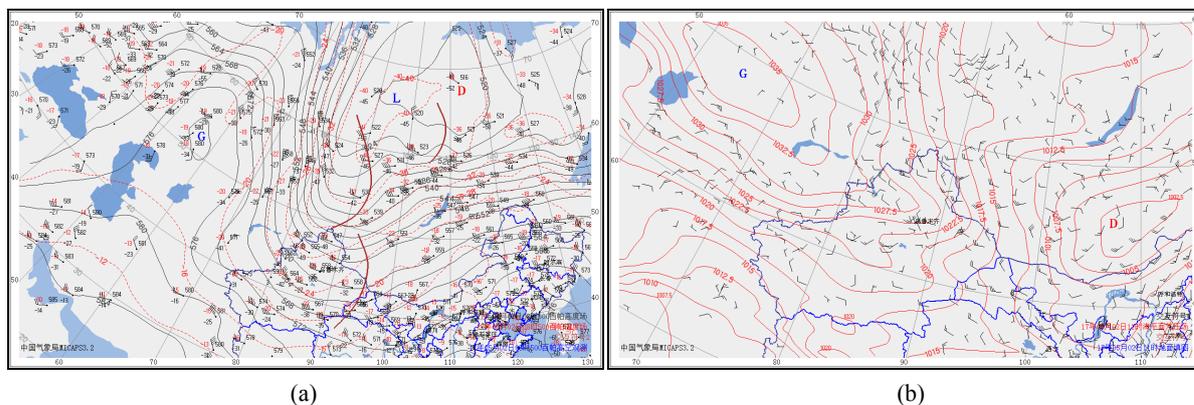


Figure 1. The 500 hPa circle pattern and surface pattern at 08:00 2nd May, 2017

图 1. 2017 年 5 月 2 日 08 时 500 hPa 形势和地面图

3. 卫星遥感资料分析

随着探测水平的提高,卫星监测强对流天气的优势也越来越明显,尤其是在广袤的沙漠、无人区等地,而新疆区域地域广阔,自动气象站较为稀疏,因此应用风云系列卫星监测强对流的发生、发展演变具有非常好的作用,本文利用 FY4A 卫星资料分析此次强对流天气发生、发展、演变过程中的云系发展。5月2日10时,随着前日降水云系的东移,东疆地区吐鲁番-哈密一线为槽前多层云,红外云图云顶可以看到云顶亮温不均匀,由其形状可看出,上空有少量卷云。北疆盆地上空有少量低云,云系色调呈“灰色”,上游哈萨克斯坦境内有少量分散的卷云线,14时,东疆地区系统性云系移出新疆区域,在哈密附近有对流云团生成,北疆西部塔城、喀纳斯、阿勒泰等地开始出现弱对流泡,随着西部国境线西北气流下短波东南下,16:30开始在博乐、克拉玛依、阿勒泰一线对流云团逐渐快速发展,阿勒泰-克拉玛依一线呈现“月牙形”对流云团,由可见光云图动画可以看出,高空引导气流为西北气流,在西北气流作用对流云团进一步发展,云团东南移动,边缘进入石河子、呼图壁北侧,温度梯度较大,从FY4A卫星TBB图2中可以看到,云团中心TBB值 $< -32^{\circ}\text{C}$ 。17:30,云团分裂为两个中心,一个位于石河子-呼图壁,另一个为五家渠附近,其温度梯度边缘逐渐靠近机场。18:30,呼图壁北侧的中心移向东北方向,而石河子-呼图壁一线的中心向东南移动,位于机场上空,此时机场出现极端大风天气。并伴有软雹。19:30, FY4A 卫星TBB显示, TBB中心已移动至市区,机场TBB快速升高,云团色调快速变暗,说明云顶快速下降、升温。

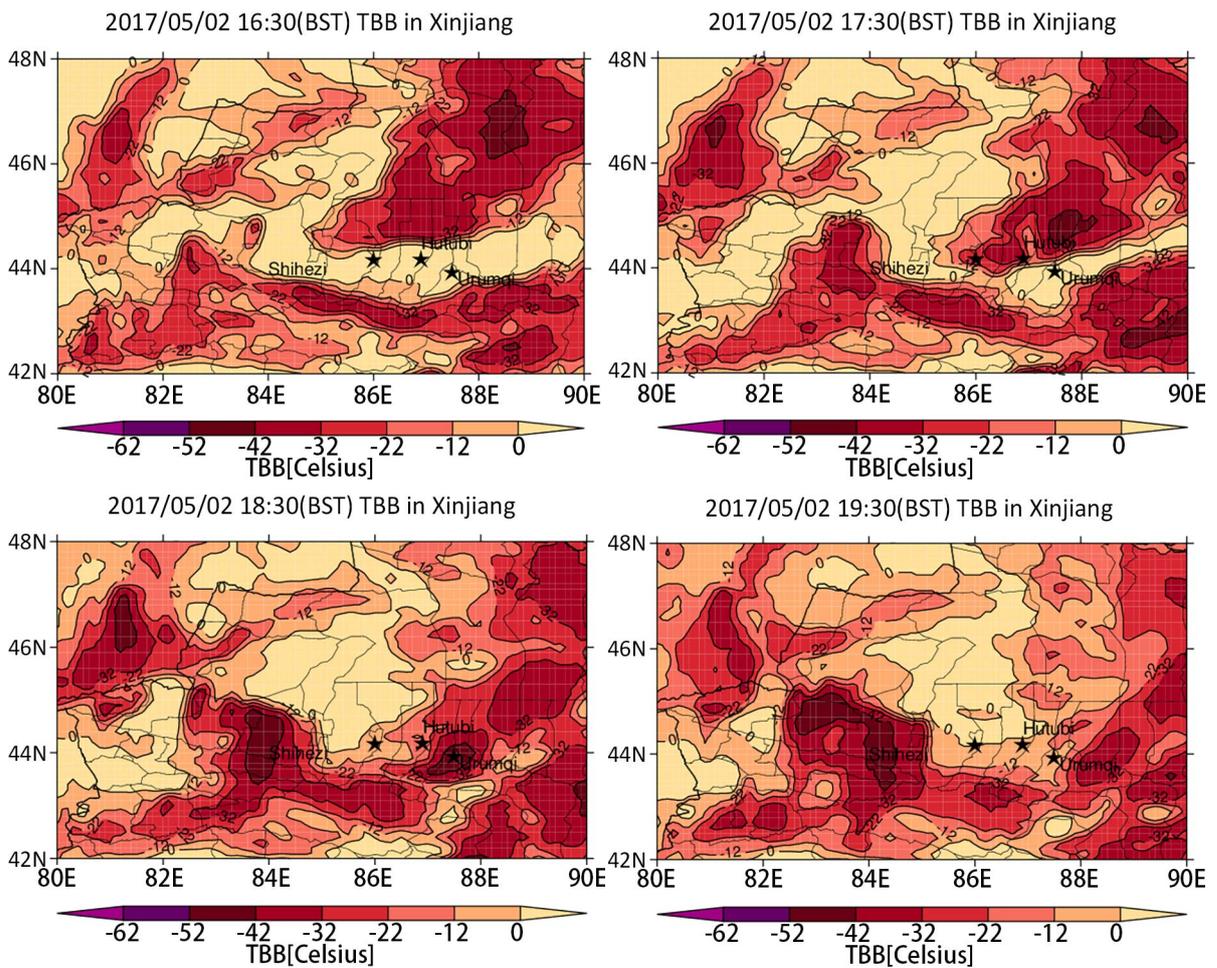


Figure 2. The evolution of TBB of FY4A Geostationary meteorological satellite
图 2. FY4A 静止气象卫星 TBB 演变

4. 微波辐射计探测资料分析

2016年中国民用航空局在昆明、乌鲁木齐、成都三个机场安装了 Airda HTG3 型微波辐射计, 该微波辐射计的仪器探测传感器为德国公司引进, HTG3 微波辐射计是基于大气微波遥感技术的气象观测设备, 可实现对中尺度强天气系统大气层结的监测和预警、云物理特征的监测和人工影响天气科研及业务的应用、雾霾天气等边界层大气环境质量的监测。其在典型的微波 V 波段大气氧气窗口(51~59 GHz)和微波 K 波段大气水汽窗口(22~31 GHz)内选择合适的频率(在寒冷干旱的低水汽密度条件下也可选用微波 183 GHz 的水汽窗口反演水汽), 通过对大气微波辐射的遥感测量, 反演获得对流层大气温度、湿度廓线、大气柱积分水汽量、大气柱积分云水含量等信息。下文将分析微波辐射计资料在强对流天气中的特征。

4.1. 相对湿度和大气水汽含量演变特征

从图 3, 相对湿度廓线可以看出, 18:00 以前, 空中 1000~4000 米高度相对湿度集中在 50%~70%, 1000 米以下, 4000 米以上均为 < 50% 的干层, 大气层结处于“中间湿、上下干”, 18:00 以后相对湿度迅速增大, 大值区的厚度也明显加强, 18:25 开始相对湿度大于 80% 的高度集中在地面至 4500 米高度, 且 3000 米以下达到了 100%, 0~5 km 层变为饱和状态, 5 km 以上层相对湿度为 50%~80%, 而此时机场出现雷暴、冰雹, 并伴有降水, 这种饱和状态持续至 18:40 左右, 从图 3 整层水汽含量图中可以看出, 18:20 以前, 大气中的整层水汽含量维持在 $8\sim 10\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。18:21 开始, 整层水汽含量快速增加, 18:25 分整层水汽含量突然增至 $33\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 短暂维持后迅速下降, 19:00 以后整层水汽含量维持在 $10\sim 15\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。从图 3 分析液态水含量演变, 18:15 以前, 机场上空晴朗少云天气, 空中相对湿度较低, 整层液态含水量为 0。18:15 分以后液态水迅速激增, 18:25 液态水含量达到 $3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。此时空中水汽饱和, 机场出现冰雹、降水。分析发现, 相对湿度、整层水汽含量和液态水含量和很好的揭示冰雹、降水来临时空中水汽分布及层结。冰雹发生时, 空中水汽接近饱和。

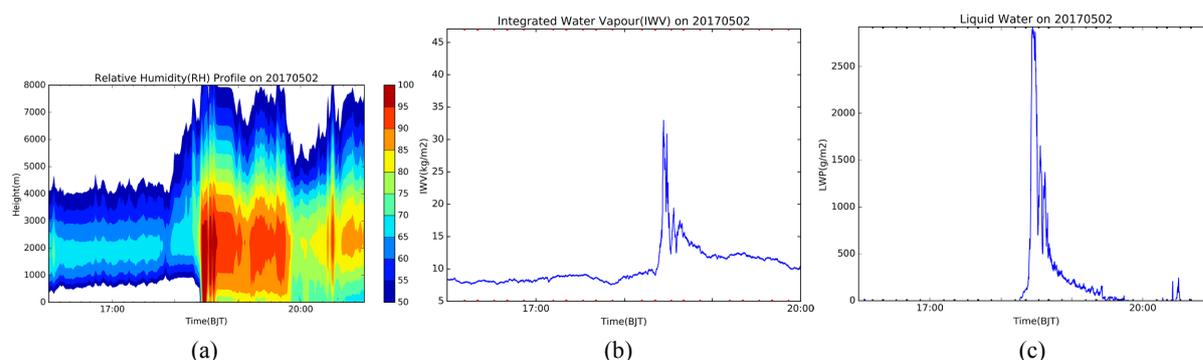


Figure 3. The image of Micro Radiometer. (a) Relative humidity profile; (b) Integrated water vapor content; (c) Liquid water content

图 3. 微波辐射计图表。(a) 相对湿度廓线图; (b) 整层水汽含量; (c) 液态水含量

4.2. 不稳定特征分析

强对流的发生需要较大的不稳定能量, 由图 4 CAPE 值图分析微波辐射计的不稳定指数资料可看出, CAPE 值在 18:23 维持为 0 J/kg, 但是从 18:23 分开始急剧增大, 最大值在 18:26 达到 2034.4 J/kg, 随后快速减弱, 18:36 分之后减弱为 0 J/kg; Ki 指数显示, 18:23 前均在 20℃ 以下, 18:23 开始迅速增加 18:26 分时达到 33.3℃, 18:33 分以后逐渐下降至雷暴发生前的 20℃ 以下。而 CAPE、Ki 指数跃变的时间段与实况中雷暴发生的时间较为吻合。

4.3. 液态水含量分布

微波辐射计中的液态含水量资料可以清楚的看出雷暴云中的水汽垂直结构分布，从图 5 液态水廓线看出此次天气中，18:17 之前，整层液态水为 0，18:17 开始近地层 200 米以下有少量液态水，0~200 米最大液态含水量为 $0.244 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，随后含水量高度逐渐增加，18:27 分液态水含量的分布高度最高达到 8400 米，说明雷暴云的伸展高度很高，达到 8000 米以上，且雷暴云中液态含水量的大值区主要集中在 6000 米左右，最大液态含水量为 $0.561 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。此后液态含水量高度明显下降，主要集中在 5000 米以下，18:35 以后液态含水量的高度逐渐降低至 2000 米以下，此时雷暴天气已结束，从液态水含量可看出，液态水含量的伸展高度与雷暴云的高度有较好的对应关系。

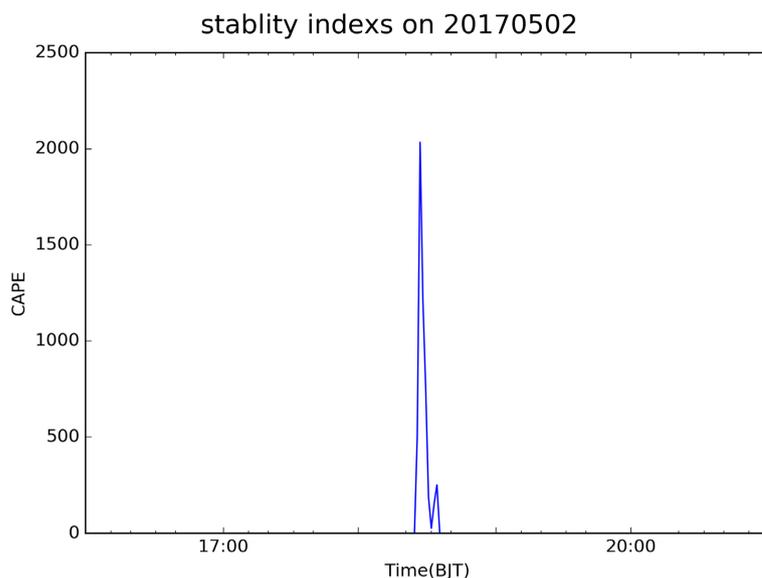


Figure 4. CAPE image retrieved by microwave radiometer
图 4. 微波辐射计反演的 CAPE 图

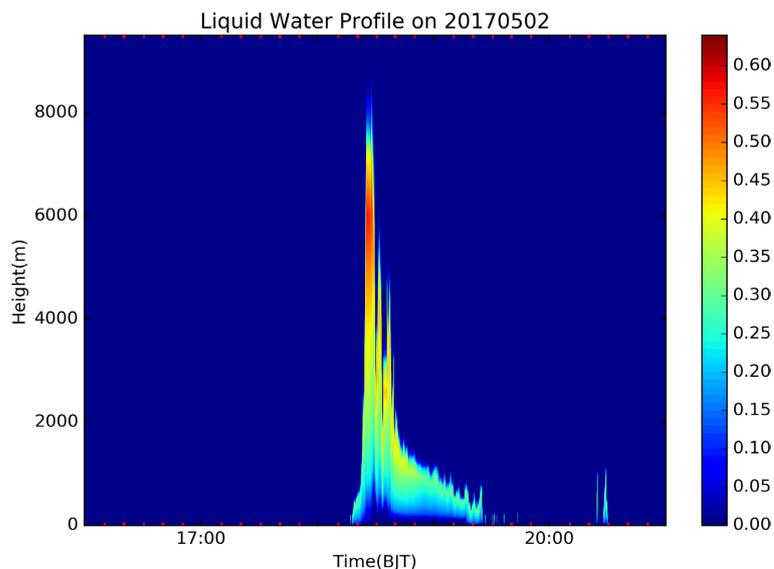


Figure 5. Time evolution of liquid water profile of microwave radiometer
图 5. 微波辐射计液态水廓线时间演变

4.4. 微波辐射计观测的气象要素分析

微波辐射计自带有小型气象站,可观测风向、风速、温度、气压、相对湿度、降水率,分析雷暴过程的温度、相对湿度和降水率,由图6气象要素变化图可以看出,18:26前,相对湿度维持在35%~40%,18:26开始逐渐上升,19:00最大值达到81%,这与实况相比略有滞后;温度资料显示,18:26前,温度维持在13℃~15℃,18:26开始温度迅速下降,18:46下降至最低6℃;降水率方面,18:25出现降水率0.2 mm/h,18:26~18:27降水率测量为2.7 mm/h,18:33~18:34降水率为6.9 mm/h,18:40~18:41降水率为7.7 mm/h。分析微波辐射计自带的气象站要素场变化,温度和相对湿度场能够大体反应出雷暴天气时气象要素的变化,但是略有滞后,而降水率方面,出现时间与实况较符合,但强度与实况有偏差。

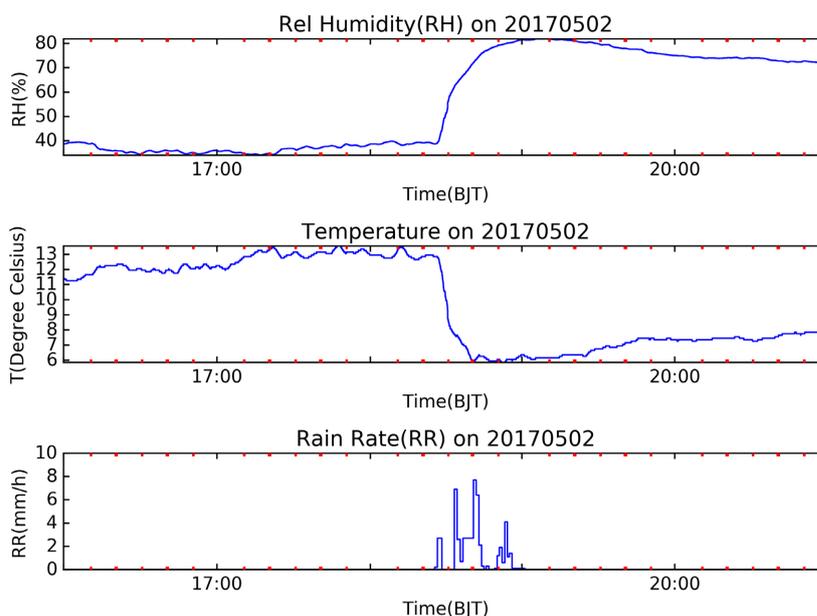


Figure 6. Changes of meteorological elements of automatic weather station in microwave radiometer

图6. 微波辐射计中自动气象站气象要素变化

5. 结论

通过分析FY2G可见光云图、FY4A卫星TBB、微波辐射计的相对湿度、整层水汽含量、整层液态水、液态水廓线及微波辐射计携带的自动气象站资料,我们得到以下结论:

1) FY2G、FY4A卫星资料对强对流的监视有较好的效果,FY4A卫星的TBB产品能定量地分析、显示对流云团的初生、发展、演变,强对流天气发生时,云顶温度梯度的移动方向能较好地解释系统移动、强队变化。

2) 相对湿度、整层水汽含量和液态水含量能够很好地揭示冰雹、降水来临时空中水汽分布及层结。冰雹发生时,空中水汽接近饱和。而CAPE、Ki指数跃变的时间段与实况中雷暴发生的时间较为吻合。从液态水含量可看出,液态水含量的伸展高度与雷暴云的高度有较好的对应关系。分析微波辐射计自带的气象站要素场变化,温度和相对湿度场能够大体反应出雷暴天气时气象要素的变化,但是略有滞后,而降水率方面,出现时间与实况较符合,但强度与实况有偏差。

3) 微波辐射计资料的应用有了初步进展,下一步将开展微波辐射计与探空、雷达、风廓线等设备对比验证,进一步了解该资料的优势与劣势。

参考文献

- [1] 崔春光, 王晓芳, 付志康. 多源探测资料在一次非线性 MCS 分析中的综合应用[J]. 气象, 2013, 39(5): 556-566.
- [2] 郑丽娜, 刁秀广. 一次华北飑线的阵风锋天气过程分析[J]. 气象, 2016, 42(2): 175-182.
- [3] 马中元, 苏俐敏, 谌芸, 等. 一次强飑线及飑前中小尺度系统特征分析[J]. 气象, 2014, 40(8): 917-929.
- [4] 陈英英, 唐仁茂, 李德俊, 等. 利用雷达和卫星资料对一次强对流天气过程的云结构特征分析[J]. 高原气象, 2013, 32(4): 1148-1156.
- [5] 吴芳芳, 俞小鼎, 张志刚, 等. 苏北地区超级单体风暴环境条件与雷达回波特征[J]. 气象学报, 2013, 71(2): 209-227.
- [6] 陆风, 张晓虎, 陈博洋, 等. 风云四号气象卫星成像特征及其应用前景[J]. 海洋气象学报, 2017, 37(2): 1-12.
- [7] 张文刚, 徐桂荣, 颜国跑, 等. 微波辐射计与探空仪测值对比分析[J]. 气象科技, 2014, 42(5): 737-741.
- [8] 卢会国, 李国平, 蒋娟萍. 阳江国际探空试验的 GPS、探空、微波辐射计水汽资料对比分析[J]. 气象科技, 2014, 42(1): 158-163.
- [9] 黄治勇, 徐桂荣, 王晓芳, 等. 基于地基微波辐射计资料对咸宁两次冰雹天气的观测分析[J]. 气象科技, 2014, 40(2): 216-222.
- [10] 董保举, 高月忠, 张丽芬. 新型探测资料在滇西北高原一次暴雨过程监测中的应用[J]. 气象科技, 2014, 42(6): 1078-1082.
- [11] 郑祚芳, 刘红燕, 张秀丽. 局地强对流天气分析中非常规探测资料应用[J]. 气象科技, 2009, 37(2): 244-247.
- [12] 崔雅琴, 张佃国, 龚佃利, 等. 新型探测仪器资料在短时强降水过程中的应用[J]. 气象科技, 2016, 44(6): 876-881.