

张夕迪,孙军,2018. 葵花 8 号卫星在暴雨对流云团监测中的应用分析[J]. 气象,44(10):1245-1254.

# 葵花 8 号卫星在暴雨对流云团 监测中的应用分析\*

张夕迪 孙 军

国家气象中心,北京 100081

**提 要:** 高时空分辨率的葵花 8 号卫星(简称 H8 卫星)2016 年在我国得到应用,而该年是我国暴雨过程频繁、极端性强的一年,H8 卫星到底在暴雨对流云团监测方面有何优势也是预报员所关心的。目前的业务中 H8、FY-2 卫星和雷达资料到达业务平台的平均延迟时间分别为 15、35、6 min 左右。本文利用 H8 卫星红外云图结合地面降水,在 2016 年汛期 27 次暴雨过程中每个过程选定一个主要的目标对流云团分析其初生情况,并与 FY-2 卫星和雷达探测的情况进行对比,结果表明:H8 和 FY-2 卫星在同时刻云顶黑体亮温(TBB)观测数值上差别不大,时间变化趋势也基本一致,但 H8 卫星由于高频次观测的优势对暴雨对流强弱的变化刻画得更加细致,在监测暴雨对流云团方面具有明显时间上的优势,即 H8 卫星较 FY-2 卫星平均提前 23 min 发现对流云团,较雷达平均提前达 33 min。通过结合地面小时和 10 min 降水量对 2016 年华北“7·20”极端暴雨过程进行分析,发现 TBB 与地面降水量之间有很好的反相关关系,同时降水量的变化幅度明显大于 TBB 的变化;当 TBB 峰值向低温一侧移动时,与之对应的地面降水量级也增大,降水逐渐转为冷云降水为主。

**关键词:** 葵花 8 号卫星(H8 卫星),暴雨对流云团监测,黑体亮度温度

**中图分类号:** P412

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.10.001

## Application Analysis of Himawari-8 in Monitoring Heavy Rain Convective Clouds

ZHANG Xidi SUN Jun

National Meteorological Centre, Beijing 100081

**Abstract:** High resolution data of Himawari-8 (H8 for short) have been used in China since 2016, and forecasters have been concerning for its superiority in monitoring convective clouds because heavy and extreme rain processes occurred frequently in 2016. In the current forecasting operation, the delay time of acquiring H8, FY-2 and radar data are 15 min, 35 min and 6 min, respectively. In this article, the H8 infrared data and surface precipitation are used to analyze the initiation of each target convective clouds of 27 heavy rain processes in the 2016 flood season. By comparing with FY-2 satellite and radar observations, we conclude that the observation data of H8 and FY-2 at the same moment have little difference, and their time variation trends are almost the same. However, H8 depicts convection strength more detailedly due to its higher resolution, and it has obvious superiority in monitoring heavy rain convective clouds. It can find the initiation convective clouds 23 min earlier than FY-2 averagely, and 33 min earlier than radar. Combined with hourly and 10 min precipitation data, the 20 July 2016 extreme heavy rain event in North China is analyzed in detail. It is found that there is a remarkable negative correlation between temperature

\* 国家气象中心青年基金(Q201606)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306011)共同资助

2017 年 5 月 15 日收稿; 2018 年 8 月 11 日收修定稿

第一作者:张夕迪,主要从事灾害性天气预报研究. Email: zhangxd@cma.gov.cn

通信作者:孙军,主要从事灾害性天气的预报研究. Email: sunjun@cma.gov.cn

of brightness blackbody (TBB) and surface precipitation, and the amplitude of precipitation varies much larger than TBB. When the peak of TBB moves towards the colder side, the corresponding precipitation magnitude increases, and the type of precipitation turns to cold-cloud precipitation gradually.

**Key words:** Himawari-8 (H8), convective cloud monitoring of heavy rain, temperature of brightness blackbody (TBB)

## 引 言

我国是暴雨灾害多发国家,而暴雨往往是由中小尺度对流系统造成的。在实际业务中,预报这些中小尺度对流系统的难度很大,数值预报模式往往不能很好地对其预报,而业务雷达多是捕捉到大的水滴(降雨)回波,这时候降水已经发生(覃丹宇和方宗义,2014)。静止气象卫星能够提供大范围、全天候的云图信息,是中小尺度对流天气的重要监测工具,利用卫星资料对对流云团活动进行监测和预测有助于客观实时地追踪预警暴雨、强对流等灾害性天气,而对流初生监测对提前预警这类灾害性天气尤为重要。

对流初生(convective initiation, CI)一般是指积云从非成熟的晴好天气状态演变为成熟积雨云的过程,在被雷达观测到之前往往在卫星云图上先有所体现。目前对 CI 的识别主要基于卫星和雷达观测,由于天气雷达要观测到云内有大的降水粒子或降水达到一定强度时才能产生明显回波,而此时对流云团已经发展到一定高度,因此理想情况下卫星应该早于雷达发现暴雨对流云团,但卫星观测到的暴雨对流云团也要达到一定强度时才有天气意义。

近年来,随着卫星遥感技术的不断发展和进步,利用静止卫星监测对流云团的发生和发展已经取得明显进展,可以检测小到单个对流云团、大到行星尺度天气系统的发生、发展和演变(方宗义和覃丹宇,2006)。CI 的产生主要表现为云体厚度增加、云顶温度急剧下降、云顶相态变化等过程,快速发展对流是强天气的直接制造者(汪柏阳等,2015)。对流云的卫星识别方法主要采用阈值法,对于长波红外通道,通常采用的阈值类型有:云顶相当黑体亮温(Black Body Temperature, TBB)阈值、分裂窗亮温差阈值(Inoue et al, 2006)、云顶面积阈值(Maddox, 1980)和亮温梯度阈值(卢乃锰和吴蓉璋,1997)。但由于季节、区域的差异,选定一个确定的阈值并非易事。Miller and Fritsch(1990)、Mapes

and Houze (1993) 和 Laing and Fritsch (1993a; 1993b)采用  $TBB < 241 \text{ K} (-32^\circ\text{C})$  的标准来识别对流云,国家气象中心业务上监测深对流云 TBB 阈值的下限也为  $-32^\circ\text{C}$  (郑永光等,2013)。Machado et al (1998)选取了  $240 \sim 250 \text{ K}$  作为标准,而 Vila et al (2008)开发的对流云预报和追踪算法 For-TraCC (The Forecasting and Tracking the Evolution of Cloud Clusters)则采用  $235 \text{ K}$  的判别阈值。目前,国内外的学者已经开发了一系列较为成熟的对流初生和快速发展检测算法,如美国阿拉巴马大学的 GOES-R 的 CI 算法(Mecikalski and Bedka, 2006)、美国威斯康辛大学提出了 UWCI 算法(Sieglaff et al, 2011)等,国家卫星气象中心借鉴了 GOES-R 的 CI 算法流程以及 UWCI 的目标选取算法提出了 FY 卫星中国区域的 CI 产品算法(覃丹宇和李博,2012)。以上这些算法所考虑的判别条件各有不同,但都能高效且较准确地识别出对流的初生。

雷达也是监测对流初生的一个很好的工具,国内外很多研究都将雷达反射率因子达  $35 \text{ dBz}$  作为判别 CI 的标准,如 Roberts and Rutledge (2003)认为这是区分弱降水风暴和强对流风暴的重要标准,认为  $35 \text{ dBz}$  与成熟积雨云的降雨强度有很好的相关关系,而  $35 \text{ dBz}$  又与成熟的积雨中闪电的发展有很好的对应关系(Dye et al, 1989; Gremillion and Orville, 1999),  $30 \sim 35 \text{ dBz}$  一般也是雷达开始识别和追踪雷暴算法所选的阈值。许锐(2009)、徐慧(2013)、潘留杰等(2015)均利用雷达反射率因子首次大于  $35 \text{ dBz}$  这一标准对中国区域 CI 进行研究,证明了该标准在中国的适用性。Mecikalski and Bedka (2006)结合雷达和卫星资料明确提出 CI 的判定标准是:多普勒天气雷达第一次检测到由对流云产生的反射率  $\geq 35 \text{ dBz}$  的像元,并基于 GOES 卫星资料提出了临近时效内 CI 预报的 8 个指标,包括了红外云顶亮温、红外多通道差、红外云顶亮温时间变化趋势等,并随后进一步对该工作进行了拓展(Mecikalski et al, 2008),该判定标准和预报指标在国内也得到应用和修订(刘京华等,2012;李五生等,

2014)。

对流云团发展到一定程度往往会产生较强降水,许多研究都用降雨强度来描述对流发展的强弱程度(Xu and Zipser, 2011; Feng et al, 2012; Goyens et al, 2012; Xu, 2013),短时间内对流云团降水强度的变化对临近预报对流天气有重要作用(Migliorini et al, 2011; Kolios and Feidas, 2013)。由于对流系统的内部结构较为相似,因此单独利用云顶特征无法有效地区分不同云团的特征,有必要将云顶特征和云团所产生降水共同考虑。Goyens et al(2012)指出小时雨量达  $5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  即为中等强度降水事件,而超过  $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  则为强降水事件。Ai et al(2016)进一步指出对中国中东部地区而言小时雨量超过  $5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  即存在中尺度对流系统。刘健和蒋建莹(2013)利用 FY-2C 的 10 min 间隔区域加密观测数据对 2011 年 6 月 28—29 日发生的一次强对流过程的云团特征进行分析,发现当小时雨强达到  $5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  时 TBB 呈现一致的冷云顶特征,且 TBB 持续降低或维持。因此,小时雨强达到  $5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  可看作暴雨对流云团已进入发展阶段的标志。目前在国内实际预报业务中,可以获取的风云二号系列静止卫星(简称 FY-2 卫星)红外通道的空间分辨率为  $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ ,延迟时间约 35 min;而多普勒雷达探测分辨率一般为  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ ,延迟时间约 6 min。按 CI 标准,在雷达上已发现有对流初生,但静止卫星云图上的像元往往反映不出来。同时,由于获取的 FY-2 卫星时间分辨率不够精细(一般为 30 min,汛期启用双星观测可达 15 min 以内),无法对暴雨对流云团的初生和演变过程进行细致有效的监测。

日本“葵花 8 号”静止气象卫星(简称 H8 卫星)于 2014 年 10 月发射,2015 年 7 月开始业务应用,是目前业务上亚洲区域时空分辨率最高的卫星,它的时间分辨率达 10 min,红外通道空间分辨率可达 2 km,业务上获取资料的延迟时间约为 15 min。我国于 2016 年 12 月成功发射了风云四号静止气象卫星(FY-4 卫星),它的时间分辨率为 15 min,红外通道空间分辨率  $2 \sim 4 \text{ km}$ ,已在 2017 年汛期开展天气预报试验试用。气象卫星向高时空分辨率发展是未来趋势,高时空分辨率气象卫星相比于以前的卫星在暴雨、强对流云团的监测上到底有何优势也是业务预报人员一直关心的。2016 年汛期我国暴雨过

程频繁,极端性强,而 H8 卫星于 2016 年汛期在我国天气预报业务中得到应用,它不仅能够观测到更为细致的云团结构演变特征,更可较 FY-2 卫星提前观测到暴雨对流云团的初生,这对业务预警有重要意义。同时,利用高时空分辨率的卫星资料结合降水数据能够更进一步地研究降水强度和对流系统发展状态之间的关系。本文就利用 H8 卫星红外通道数据,结合地面小时降水、雷达反射率资料,对我国 2016 年汛期的暴雨过程对流云团的初生情况进行分析,总结 H8 卫星相对于雷达和 FY-2 卫星在探测时间上的优势,在此基础上以华北“7·20”极端暴雨过程为例进行详细分析,探讨暴雨对流云团的初生和演变特征,揭示 H8 卫星在监测对流云发展过程中的作用,从而对对流发生发展提供进一步认识,也为我国 FY-4 卫星天气预报业务应用打下基础。

## 1 数据和方法

本文中采用的是国家卫星气象中心提供的 FY-2G 和 FY-2E 观测的 TBB 产品,空间分辨率 5 km,时间分辨率 15 min。H8 卫星采用的是葵花标准数据格式(HSD)第 13 通道第 1~5 段数据,空间分辨率 2 km,时间分辨率 10 min。降水量采用 MICAPS 第 3 类数据格式地面 1 h 加密降水量和第 1 类数据格式地面自动站观测数据。

目前的业务中 H8、FY-2 和雷达资料到达业务平台的平均延迟时间分别为 15、35、6 min 左右,但延迟时间不固定,为了便于比对,这里提到的提前时间均以观测仪器探测时间为准。

本文主要针对 2016 年 4—8 月发生在我国的暴雨过程进行分析,根据国家气象中心记录的“2016 年暴雨天气过程纪要表”共选取了 27 个暴雨过程,其中已剔除受台风影响和对流性较弱的暴雨过程。本文不是对所有对流云团全面判识,主要针对每次过程中能够演变成较强降水的一个主要对流云团进行识别,综合考虑了卫星、雷达、小时降水的监测,将暴雨对流云团定义为云顶最低 TBB 首次达  $-32^\circ\text{C}$ 、小时雨强达  $5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,以此判定各个暴雨过程在 H8 卫星和 FY 卫星监测下的对流判识情况,并与雷达 CI 进行对比,对于区域降雨过程有多个对流系统的情况,只监测最初始最主要的降雨云团。

## 2 H8 和 FY-2 卫星在监测华北“7·20”暴雨过程中的对比分析

2016年7月18—22日江汉、黄淮、华北地区出现一次强降水过程,本次过程的强降水主要集中在19日00时至21日08时(北京时,下同),华北多地日降水量突破历史极值。华北降水可以分为两个阶段:19日凌晨至白天高空槽前偏东风导致的地形强降水,19日夜间至20日黄淮气旋系统北侧螺旋雨带造成的强降水。由于第一阶段的对流性相对较强,且第二阶段降水主要是气旋的螺旋云带向北推进引起的,不易区分新生对流及其后续的变化过程,因此本文以第一阶段的对流发生发展过程为例进行说明。从图1中可以看出,19日08:40在红圈范围内H8卫星首次探测到 $TBB < -32^{\circ}\text{C}$ 的云团(图1a),该云团在东移过程中快速增长并于11:10与其北部的大片对流云团即将合并(图1b),此后该云团向东快速发展。18—20时,云团发展最为强盛,占据河南东部地区(图1c)。此后该对流云团迅速减弱,而位于其南部的云团仍在迅速发展,23:40北部云团衰减为带状并逐渐与其南部的螺旋云带合并(图1d)。

由H8卫星观测的对流云团云顶 $TBB < -32^{\circ}\text{C}$ 区域的平均值随时间的演变(图2)可以看出,对流云团经历了三个主要阶段:第一阶段是09:00—11:30的快速发展阶段,H8的 $TBB$ 值从 $-25^{\circ}\text{C}$ 下降到 $-57.1^{\circ}\text{C}$ ,平均每10 min下降 $2.14^{\circ}\text{C}$ ;第二阶段是11:30—18:30的缓慢增强阶段,H8的 $TBB$ 值从 $-57.1^{\circ}\text{C}$ 下降到 $-70.6^{\circ}\text{C}$ ,平均每10 min下降 $0.3^{\circ}\text{C}$ 。期间有几次强弱的变化,其中17:00—18:30有个短暂再次快速增强的阶段;第三阶段是18:30后的先缓慢然后快速减弱阶段, $TBB$ 由18:30的 $-70.6^{\circ}\text{C}$ 上升到23:30的 $-42.2^{\circ}\text{C}$ ,平均每10 min上升 $0.9^{\circ}\text{C}$ 。可以看到,对流云团在发展阶段 $TBB$ 下降得非常快,一两个小时就可以有二三十摄氏度的下降,表示云内上升气流非常强盛。

进一步对比两颗卫星的观测情况可以看出(图2),虽然部分观测数据之间有微小差异,但总体而言差异不大,两者差异最大出现在阶段二,即对流云缓慢增强阶段,FY-2卫星观测的 $TBB$ 平均要低 $1.4^{\circ}\text{C}$ 。虽然是缓慢增强,但还是存在一些小的波

动,由于时间分辨率的差异,H8卫星对 $TBB$ 强弱变化刻画得更加细致些,在两者同时进行观测的半点和整点之间,如12:20、13:10等, $TBB$ 的下降从FY-2卫星反映不出来,两者在15:00—15:30阶段观测的 $TBB$ 出现的差异最大,FY-2观测的 $TBB$ 要低 $3^{\circ}\text{C}$ 左右。其他两个阶段两者差异不大,平均不超过 $0.5^{\circ}\text{C}$ ,整个阶段差别就更小,FY-2观测的 $TBB$ 平均要比H8低 $0.2^{\circ}\text{C}$ 。尽管H8卫星和FY-2卫星在具体观测数值上有细微的差别,但两者观测的 $TBB$ 的时间变化趋势基本一致,两者存在可比性。

## 3 整个汛期内对流云团监测情况对比分析

根据观测,H8卫星在19日08:40首次探测到 $TBB < -32^{\circ}\text{C}$ 的云团,此时刻所在的1 h内目标云团所对应的地面降水最大已达 $12\text{ mm}$ ,超过 $5\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ (图3a),达到本文设定的暴雨对流云团判识标准。对比雷达回波可以发现,7月19日08:40在豫陕交界处首次出现反射率因子达 $35\text{ dBz}$ 的像元(图3b),此时满足雷达判定CI的标准,且与H8卫星判识对流云团的时刻相同。09:15,FY-2E红外云图上首次出现 $TBB < -32^{\circ}\text{C}$ 的像元,即此时为FY卫星判识对流云团的时刻,较H8卫星晚了35 min;而09:10的H8红外云图(图3c)已在相同位置呈现出较FY卫星明显且清晰的对流云团,由此可见H8卫星监测对流的能力明显优于FY卫星。

按照上述监测方法,在27次暴雨过程中每次过程选定一个主要目标对流云团,并统计每个目标的H8卫星、FY-2卫星和雷达观测的暴雨对流云团CI时刻,以及CI时刻目标云团的位置,详见如表2。

从表2可以看出27次暴雨过程对流云团初生位置分布较广,涉及11个省,但主要集中在西南和长江中下游及以南地区,其中贵州、湖南、江西等8个省份首次出现暴雨对流云团共占有24次,北方地区本身暴雨过程较少,只有个别省份首次出现暴雨对流云团。对流云团初生最多的地区是贵州,有8次,其次是湖南和江西,各有4次。从H8卫星判识对流云团的日变化来看(图4),对流生成时间呈双峰形式分布。对流主要出现在中午到傍晚,12—20时共有17次过程的对流初生发生在这段时间内,占比63%,其中又以12—15时最为集中,有10次过程,占比37%,另一段对流出现时间分布在凌晨至

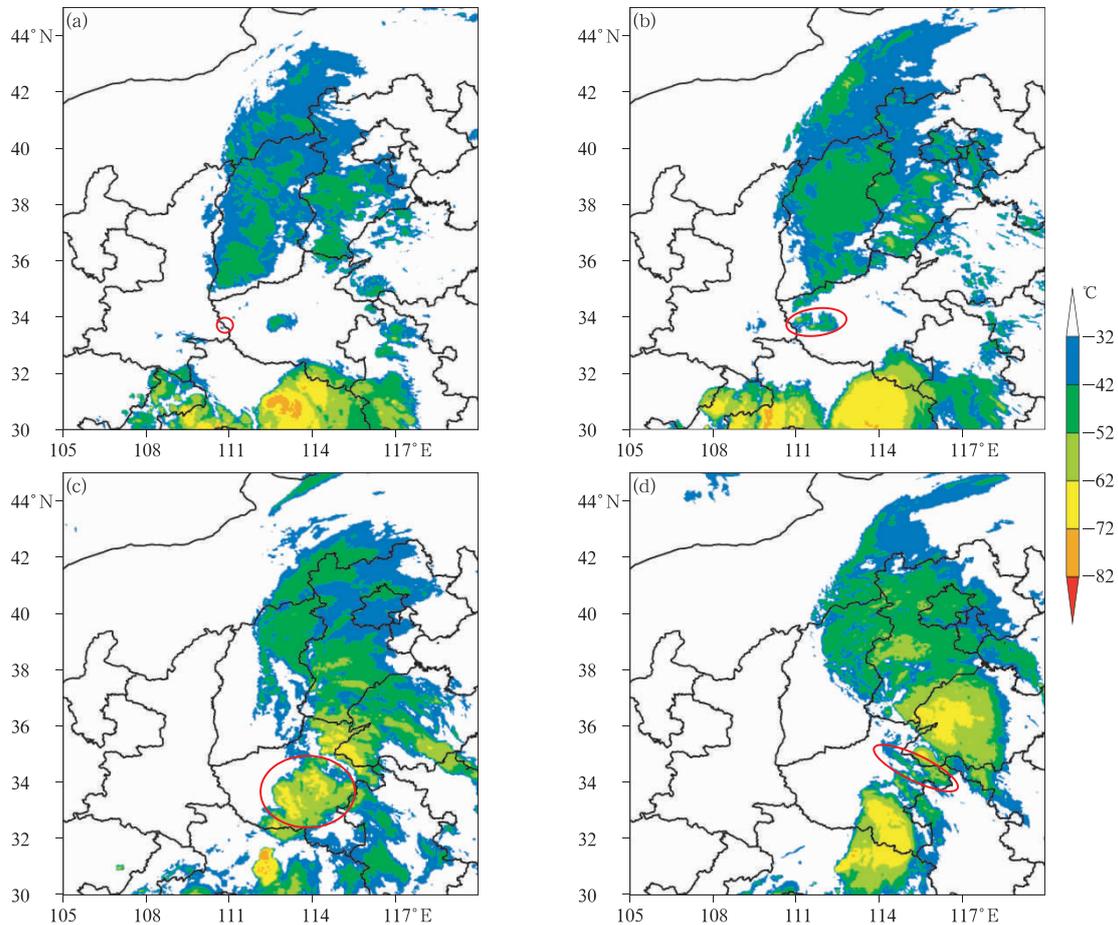


图 1 2016 年 7 月 19 日 (a)08:40, (b)11:10, (c)20:00, (d)23:40 H8 卫星 TBB 演变

Fig. 1 TBB time variation of H8 at (a) 08:40 BT, (b) 11:10 BT, (c) 20:00 BT, (d) 23:40 BT 19 July 2016

早晨这段时间内,该结果与 Zheng et al(2008)以及 Meng et al(2013)的研究结论一致。进一步将每次过程中 H8 与 FY-2 卫星在相同观测时刻所测得的  $TBB < -32^{\circ}\text{C}$  区域的平均值进行对比可知(图 5),在对流云团整个生命史过程中,两者相差最大的时刻为 7 月 1 日 08:30(201626 号过程),FY-2 比 H8 偏低  $3.2^{\circ}\text{C}$ ,该时刻为对流云团的稳定维持阶段,平均而言 FY-2 仅比 H8 偏低  $0.34^{\circ}\text{C}$ ,其 75% 百分位的值为  $1.2^{\circ}\text{C}$ ,表明两者在大多数时刻偏差较小;而在对流初生及快速发展阶段,两者相差最大约为  $1.9^{\circ}\text{C}$  (6 月 11 日 19:00),平均相差约  $0.47^{\circ}\text{C}$ 。从 TBB 的变化趋势同样可以得到第二节中的结论,

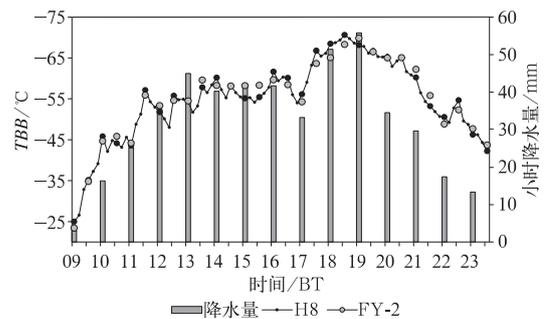


图 2 2016 年 7 月 19 日小时降水量、H8 卫星和 FY-2 卫星 TBB 随时间的演变

Fig. 2 Time variation of hourly precipitation and TBB of H8 and FY-2 on 19 July 2016

表 1 H8 和 FY-2 三个阶段  $TBB < -32^{\circ}\text{C}$  区域的平均值对比(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )  
Table 1 Area averages of  $TBB < -32^{\circ}\text{C}$  of H8 and FY-2 in three phases (unit:  $^{\circ}\text{C}$ )

| 卫星      | 阶段一:09:00—11:30 | 阶段二:11:30—18:30 | 阶段三:18:30—23:30 | 整个时段:09:00—23:30 |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| H8      | -41.4           | -58.0           | -58.1           | -52.5            |
| FY-2    | -40.9           | -59.4           | -57.7           | -52.7            |
| H8-FY-2 | -0.5            | 1.4             | -0.4            | 0.2              |

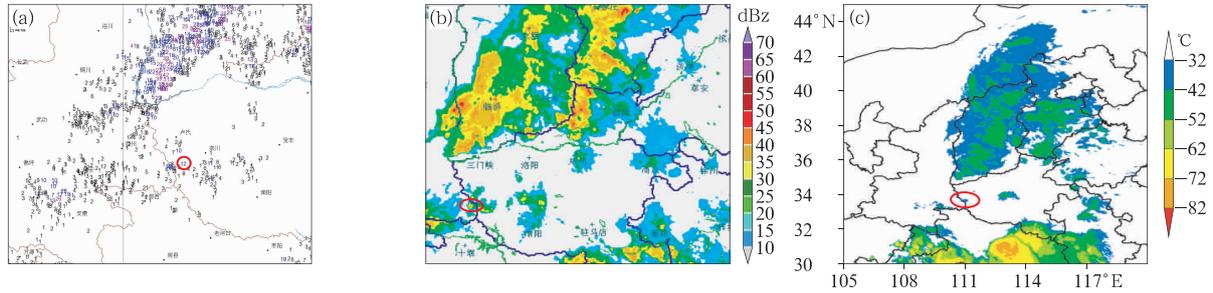


图 3 2016 年 7 月 19 日 (a)09:00 小时降雨量(单位:mm)、(b)08:40 雷达拼图和(c)09:10 H8 红外云图

Fig. 3 Hourly precipitation at 09:00 BT (a), radar mosaic at 08:40 BT (b), infrared cloud picture of H8 at 09:10 BT (c) 19 July 2016

表 2 不同监测手段对流初生时刻对比

Table 2 CI moment of different detection means

| 过程编号   | 起止时间/月日    | H8/日时    | FY-2/日时  | 雷达/日时    | 目标云团 |
|--------|------------|----------|----------|----------|------|
| 201605 | 4月2—4日     | 2日12:40  | 2日1:00   | 2日01:30  | 湖北鄂州 |
| 201606 | 4月5—7日     | 5日18:20  | 5日19:00  | 5日18:50  | 贵州大方 |
| 201607 | 4月9—11日    | 9日17:20  | 9日18:00  | 9日18:10  | 贵州花溪 |
| 201608 | 4月12—13日   | 12日14:30 | 12日15:00 | 12日15:00 | 贵州水城 |
| 201609 | 4月17—18日   | 17日10:30 | 17日10:30 | 17日11:40 | 贵州紫云 |
| 201610 | 4月19—21日   | 19日19:30 | 19日20:00 | 19日20:40 | 湖南醴陵 |
| 201611 | 4月23—24日   | 23日12:20 | 23日12:30 | 23日13:00 | 福建南靖 |
| 201612 | 4月26—27日   | 25日18:10 | 25日19:00 | 25日19:30 | 贵州水城 |
| 201613 | 4月30日至5月1日 | 30日02:40 | 30日03:00 | 30日03:10 | 贵州长顺 |
| 201616 | 5月18—22日   | 19日00:40 | 19日01:00 | 19日01:10 | 四川广元 |
| 201617 | 5月27—29日   | 26日16:50 | 26日17:00 | 26日17:20 | 贵州望谟 |
| 201618 | 6月1日—5日    | 31日13:30 | 31日14:00 | 31日14:10 | 江西安福 |
| 201619 | 6月11—13日   | 11日17:40 | 11日18:00 | 11日18:00 | 湖南永兴 |
| 201620 | 6月14—16日   | 14日13:00 | 14日13:30 | 14日13:20 | 贵州织金 |
| 201621 | 6月17—18日   | 17日06:20 | 17日07:00 | 17日06:40 | 福建宁化 |
| 201622 | 6月18—20日   | 18日15:20 | 18日15:30 | 18日15:50 | 江西万载 |
| 201623 | 6月21—22日   | 21日13:10 | 21日13:30 | 21日13:30 | 江苏邳州 |
| 201624 | 6月23—24日   | 23日07:40 | 23日08:15 | 23日08:10 | 安徽涡阳 |
| 201625 | 6月26—29日   | 27日14:20 | 27日14:30 | 27日14:50 | 江西永新 |
| 201626 | 6月30日至7月5日 | 30日14:10 | 30日14:30 | 30日14:30 | 湖南岳阳 |
| 201627 | 7月5日—7日    | 5日13:30  | 5日14:00  | 5日14:10  | 湖南靖州 |
| 201629 | 7月14—15日   | 14日05:30 | 14日05:45 | 14日06:00 | 安徽安庆 |
| 201630 | 7月15—16日   | 15日04:40 | 15日05:00 | 15日05:10 | 湖北荆州 |
| 201631 | 7月17—18日   | 17日03:30 | 17日03:45 | 17日03:50 | 江西黎川 |
| 201632 | 7月18—22日   | 19日08:40 | 19日09:15 | 19日08:40 | 河南栾川 |
| 201633 | 7月25—26日   | 24日13:10 | 24日13:30 | 24日13:40 | 河北保定 |
| 201638 | 8月17—19日   | 17日01:10 | 17日01:30 | 17日01:20 | 甘肃敦煌 |

注:过程编号按中央气象台当年暴雨过程编号,201605表示2016年第5次暴雨过程,201605之前的编号为4月之前发生的暴雨过程,不在本文分析的主要时间段。

Note: The process number is from the National Meteorological Centre (NMC) heavy rain record and 201605 means the 5th heavy rain process in 2016. The number less than 201605 represents the rainfall process occurred earlier than April, which is not considered in this article.

即尽管两者在具体观测数值上有细微的差别,但时间变化趋势基本一致,且整体来看两颗卫星对同一目标的探测数值始终差别较小,两者存在较强的可比性。在同一时间观测数值上的微小差异可能和星下点位置、分辨率、红外通道波段选定以及星载观测

仪器的不同有关。

以表2中每一次过程的雷达CI时刻作为基准,将H8和FY卫星判识对流出现时刻相对于雷达的时间差列于图6,取分钟为单位,其中正值表示落后于雷达时间,负值代表领先于雷达。

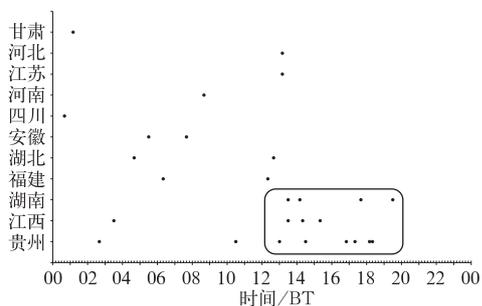


图 4 H8 卫星暴雨对流云团初生地点和时间分布图

Fig. 4 Distribution of CI location and moment of H8

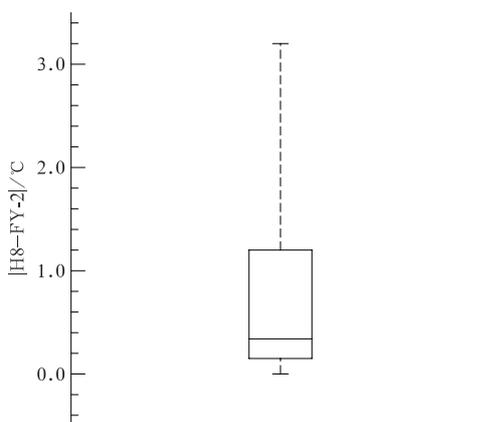


图 5 H8 与 FY-2 卫星观测偏差百分位图 (由上到下五条横线分别代表最大值、第 75 百分位、中位数、第 25 百分位和最小值)

Fig. 5 Boxplot of deviation between H8 and FY-2 (Five lines from top to bottom represent maximum, 75th percentile, median, 25th percentile and minimum, respectively)

对比发现,对于绝大部分降水过程 H8 卫星均能较 FY 卫星提前发现对流,平均提前量达 23 min,其中提前量最大的为 201612 号过程达 50 min;两者差异最小的是 201609 号过程,两者同时监测到暴雨对流云团生成,这是由于该云团正好在两颗星同时观测时刻达到判识标准。对比雷达 CI 的时刻可以看出,除了 201606、201620、201621、201624、201632、201638 号过程外其他过程 FY 卫星发现对流的时间提前于雷达,这六次例外过程主要是由于对流云团在 FY 卫星的探测间隙内发展较快且 FY 卫星的时空分辨率不够精细导致的。计算可知,FY 卫星发现暴雨对流云团的时间平均较雷达提前 10 min,而 H8 卫星由于时空分辨率较 FY 卫星有所提高,其发现对流的时间均较雷达有所提前,平均达 33 min。由此可见,H8 卫星在监测暴雨对流云团方面较 FY 卫星和雷达具有明显时间上的优势。

#### 4 对流云团的演变特征及其与地面降水的关系

由地面逐小时降水量可知,图 1 中目标云团的首次短时强降水开始于 7 月 19 日 09:00—10:00,图 7 是该时段内 H8 卫星的 10 min 间隔 6 次扫描的第 13 通道红外亮温图,以该云团的初生时段为例展示 10 min 观测间隔下 TBB 的变化情况,也就是对流快速发展阶段(阶段一)  $TBB < -32^{\circ}\text{C}$  区域平均值的演变情况。09:10 TBB 为  $-26.6^{\circ}\text{C}$ ,09:20 为  $-32.8^{\circ}\text{C}$ ,10 min 内下降大约  $6^{\circ}\text{C}$ ;09:30 TBB 为  $-35.1^{\circ}\text{C}$ ,09:40 为  $-37.3^{\circ}\text{C}$ ,TBB 持续缓慢降低;

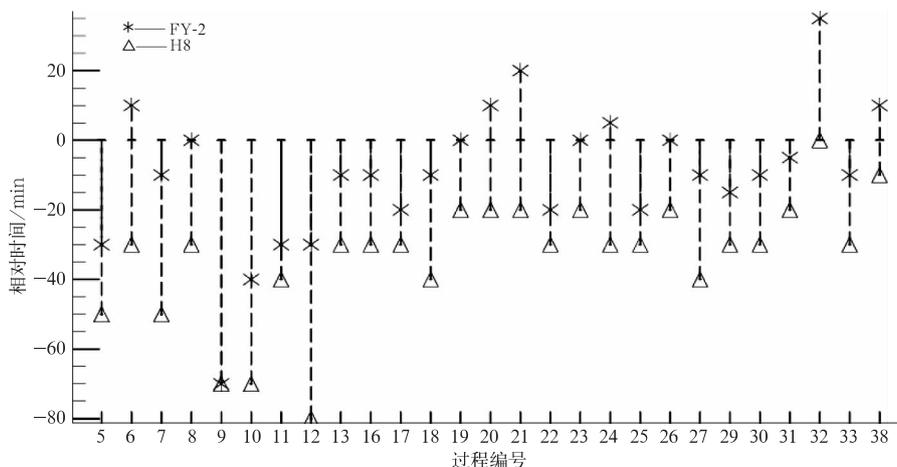


图 6 H8 和 FY 卫星的 CI 时刻相对于雷达的时间差

Fig. 6 Time difference of H8 and FY CI moment relative to radar observations

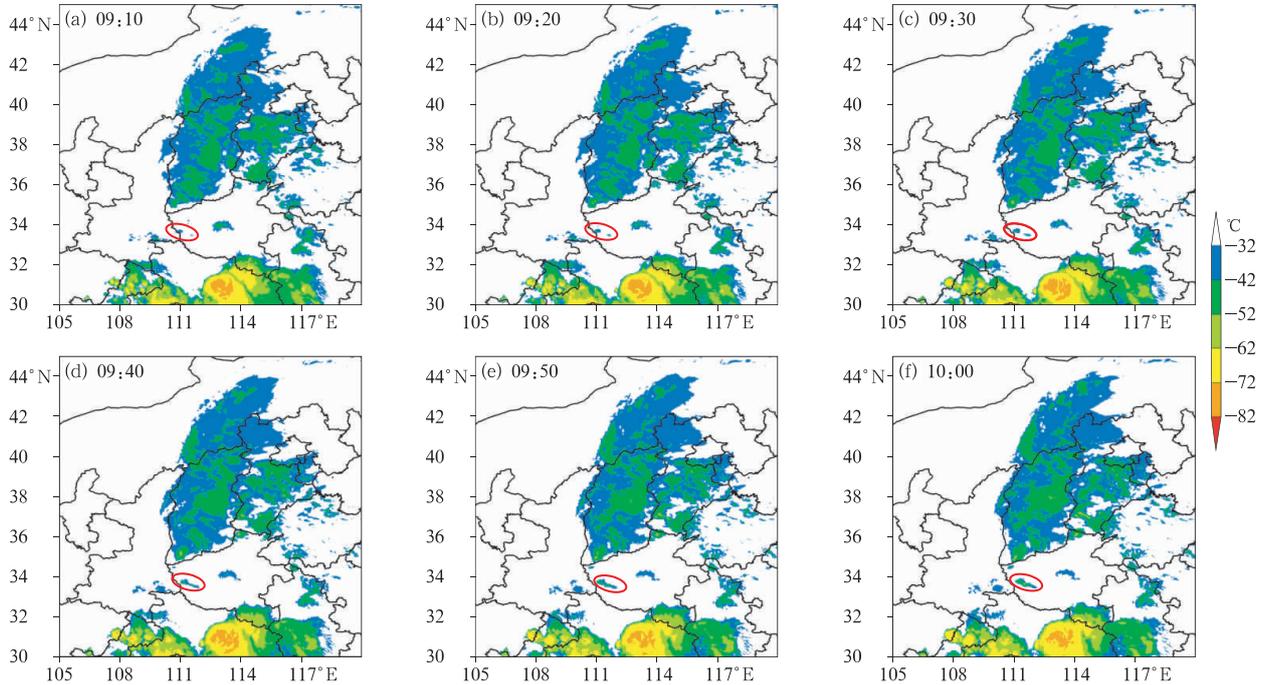


图 7 2016 年 7 月 19 日 09:10—10:00 TBB 演变

Fig. 7 TBB time variation from 09:10 BT to 10:00 BT 19 July 2016

09:50 TBB 为  $-39.1^{\circ}\text{C}$ , 10:00 为  $-45.8^{\circ}\text{C}$ , 10 min 内下降大约  $6^{\circ}\text{C}$ 。TBB 在 1 h 内下降了近  $20^{\circ}\text{C}$ , 且云团中温度低于  $-32^{\circ}\text{C}$  的像元个数从 09:20 的 25 个增加到 09:40 的 85 个再增加到 10:00 的 158 个, 表明目标云团的云顶最低亮温持续降低且范围不断扩大, 对流在快速发展中。10 min 间隔的观测资料表明, TBB 的明显变化主要分为两个阶段, 第一次发生于 09:10—09:20, 第二次发生于 09:50—10:00, 两次均为 10 min 内降温  $6^{\circ}\text{C}$ , 可以说 TBB 迅速下降是该过程对流初生阶段的一个主要特点, 短时间内的降温幅度较大表明可能会形成有组织化的对流系统。

首先说明阶段一地面降水和 TBB 的对应关系。选取 2016 年 7 月 19—20 日过程地面降水量数据与 H8 卫星 TBB 数据匹配, 由于地面两个观测站之间的距离很少有小于 2 km 的情况, 因此可将每个地面观测站点对应卫星图像上的一个像元, 取  $\text{TBB} < -32^{\circ}\text{C}$  区域的平均, 若出现多个站点对应一个像元的情况, 则将该多个站点雨量取平均计算。选取 09—11 时每 10 min 间隔的 TBB 和地面降水量数据进行匹配(图 8), 进一步详细分析短时强降水发生前后两者的变化特征。从图 8 可知, 09—10 时短时强降水发生期间, TBB 快速下降而降水量迅速增

加; 10 时 TBB 首次达到最低, 而其后 10 min, 降水量也达最大, 这与 Ai et al(2016)得到的最强降水出现早于最低亮温的结果相反, 而与 Houze(2004)的观测结果一致, 表明该云团的特征与对流单体的特征相类似; 10 时后两者变化幅度减小, TBB 和降水量均维持稳定波动状态, 经计算, 两者相关系数达  $-0.95$ , 通过 0.01 的显著性水平检验, 负相关关系非常明显。另外还可看出, 在云团发展期间降水量的变化幅度明显大于 TBB 的变化。

从整个阶段小时雨量和 TBB 的变化来看(图 2),

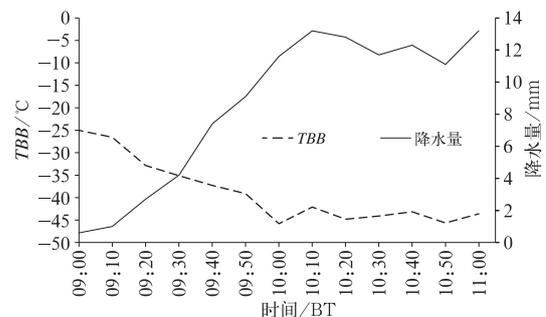


图 8 2016 年 7 月 19 日 09—11 时 10 min 间隔 TBB 与降水量的对应关系

Fig. 8 Correlations between 10 min TBB and precipitation from 09:00 BT to 11:00 BT 19 July 2016

暴雨对流云团云顶 TBB 先后经历了快速下降、波动性稳定维持、快速升高三个阶段,对应地面小时雨量也表现为快速上升、波动性稳定维持、快速下降几个阶段,小时雨峰一般出现在 TBB 波动峰值出现的时段内。在对流云团发展的初期,云团发展较快且降水量增长较快,从 09 时的平均 3 mm 增加到 12 时的平均 35.4 mm,其中 09—10 时区域内已有 2 个站点降水量超过 20 mm,最大达 52 mm;当云团的发展处于波动稳定时期,地面降水量也相对稳定,当云团 TBB 在该阶段内再次有小幅快速下降时降水量也随之快速增长,从 17 时的 33.2 mm 增加到 19 时的 55.8 mm;而当云团快速减弱时降水量迅速下降,到 23 时小时雨量已下降到 13.3 mm。总体来说,地面小时降水量与 TBB 之间存在明显的反相关关系:TBB 低,小时雨量大;TBB 高,小时雨量小,变化趋势和出现峰值也较为一致,这与前面的分析结论是一致的。

其次选取 2016 年 7 月 19 日 09—20 时的地面逐小时降水量数据与 H8 卫星 TBB 数据匹配,分析在本次降水过程云顶亮温变化与地面 1 h 降水之间的关系,为了分析方便,将小时雨量划分为  $< 20$  mm、 $20\sim 50$  mm 和  $> 50$  mm 三个等级。将上述时段内每 1 h 内的 6 次 TBB 观测值计算平均,并取每  $5^{\circ}\text{C}$  一个区间与三个等级的小时降水量进行匹配(图 9)。可以发现,当地面小时降水量低于 20 mm 时,TBB 的值分布范围较广,分布区间为  $-44^{\circ}\text{C}\sim -3^{\circ}\text{C}$ 。其中,TBB 占比峰值分布在  $-35\sim -30^{\circ}\text{C}$ ,低于该温度区间的占比分布相对均衡,但高于该温度区间的占比分布迅速减小,表明在该降雨等级内,云顶以冷云特征为主,同时也存在部分相对暖性特征。当小时降水量达到  $20\sim 50$  mm 时,TBB 占比向低温一侧聚集,其峰值在  $-50\sim -40^{\circ}\text{C}$  分布。当小时雨量进一步扩大到 50 mm 以上时,TBB 较为

均匀地分布在低温端一侧,高温端基本没有分布,表现为一致的冷云特征。小时降水量从  $< 20$  mm 到  $> 50$  mm 变化时,TBB 峰值从  $-30^{\circ}\text{C}$  左右变化到  $-65^{\circ}\text{C}$  左右。以上分析表明:当 TBB 峰值向低温一侧移动时,与之对应的地面降水量级也增大,降水性质逐渐转为冷云降水为主。

## 5 结论与讨论

通过 H8 卫星 10 min 观测间隔的红外通道数据和 FY-2 卫星数据对 2016 年汛期主要暴雨过程进行对比分析,发现 H8 卫星在监测暴雨对流方面优势明显,同时,可以捕捉到华北“7·20”极端暴雨过程中对流初生及演变过程的细节特征:

(1) 华北“7·20”极端暴雨过程暴雨对流云团演变过程 TBB 对比分析表明,H8 卫星和 FY-2 卫星在具体观测数值上有细微的差别,但两者在 TBB 的时间变化趋势上基本一致,两者存在可比性。两者都一致地反映出了对流云团经历的快速发展阶段、缓慢增强阶段、先缓慢然后快速减弱阶段。

(2) 通过对 2016 年发生的历次暴雨过程共 27 个主要目标对流云团的对流初生监测情况分析可知,暴雨对流云团主要出现地点集中在西南和长江中下游及以南地区,时间主要出现在中午到傍晚,以 12—15 时最为集中;大部分降水过程 H8 卫星均能较 FY-2 卫星提前发现暴雨对流云团,平均提前 23 min,最大提前 50 min,较雷达平均提前达 33 min。目前的业务中 H8、FY-2 和雷达资料到达业务平台的平均延迟时间分别为 15、35、6 min 左右,但延迟时间不固定。H8 卫星在监测对流方面具有明显时间上的优势。

(3) 对华北“7·20”极端暴雨过程分析发现,TBB 迅速下降是对流初生阶段的一个主要特点,该

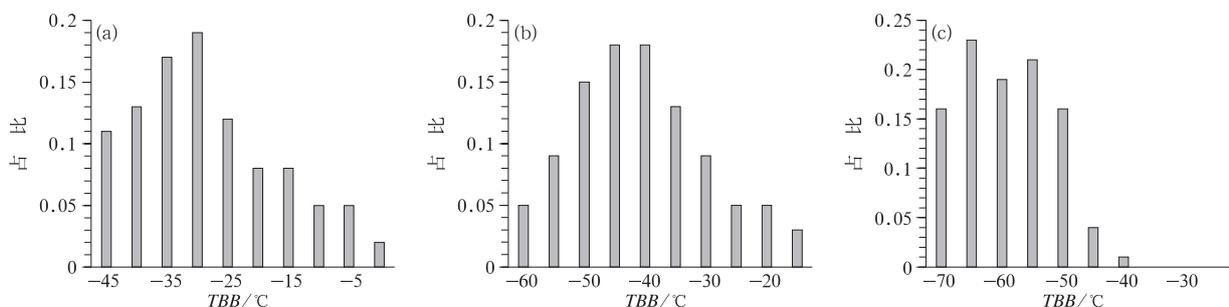


图 9 与小时降水量(a) $< 20$  mm,(b) $20\sim 50$  mm,(c) $> 50$  mm 三个等级对应的 TBB 分布

Fig. 9 TBB distribution corresponding to three different levels of hourly precipitation (a)  $< 20$  mm, (b)  $20\sim 50$  mm, (c)  $> 50$  mm

阶段 TBB 和地面降水量之间存在明显的反相关关系,同时降水量的变化幅度明显大于 TBB 的变化;当 TBB 峰值向低温一侧移动时,与之对应的地面降水量级也增大,降水逐渐转为冷云降水为主。

**致谢:**本文得到中国气象局暴雨预报专家创新团队(CMACXTD002-3)的支持。

## 参考文献

- 方宗义,覃丹宇,2006.暴雨云团的卫星监测和研究进展[J].应用气象学报,17(5):583-593.
- 李五生,王洪庆,王玉,等,2014.基于卫星资料的对流初生预报及效果评估[J].北京大学学报(自然科学版),50(5):819-824.
- 刘健,蒋建莹,2013.FY-2C高时间分辨率扫描数据在强对流云团监测中的应用研究[J].大气科学,37(4):873-880.
- 刘京华,王彬,韩雷,等,2012.京津地区一次强对流天气的初生预警技术研究[J].北京大学学报(自然科学版),48(1):42-46.
- 卢乃锰,吴蓉璋,1997.强对流降水云团的云图特征分析[J].应用气象学报,8(3):269-275.
- 潘留杰,张宏芳,侯建忠,等,2015.弱天气系统强迫下黄土高原强对流云的初生及演变[J].高原气象,34(4):982-990.
- 覃丹宇,方宗义,2014.利用静止气象卫星监测初生对流的研究进展[J].气象,40(1):7-17.
- 覃丹宇,李博,2012.FY-4对流初生产品算法理论基本文档[Z].国家卫星气象中心,技术文档:1-21.
- 汪柏阳,覃丹宇,刘传才,2015.利用FY-2F数据检测快速发展对流[J].遥感学报,19(5):836-843.
- 徐慧,2013.基于Box-averaged方法的CI预警方法研究[D].青岛:中国海洋大学.
- 许锐,2009.基于卫星数据的对流初生自动识别研究[D].青岛:中国海洋大学.
- 郑永光,林隐静,朱文剑,等,2013.强对流天气综合监测业务系统建设[J].气象,39(2):234-240.
- Ai Y F, Li W B, Meng Z Y, et al, 2016. Life cycle characteristics of MCSs in Middle East China tracked by geostationary satellite and precipitation estimates[J]. Mon Wea Rev, 144(7): 2517-2530.
- Dye J E, Winn W P, Jones J J, et al, 1989. The electrification of New Mexico thunderstorms: 1. Relationship between precipitation development and the onset of electrification[J]. J Geophys Res, 94(D6): 8643-8656.
- Feng Z, Dong X Q, Xi B K, et al, 2012. Life cycle of midlatitude deep convective systems in a lagrangian framework[J]. J Geophys Res, 117(D23): D23201.
- Goyens C, Lauwaet D, Schröder M, et al, 2012. Tracking mesoscale convective systems in the Sahel: relation between cloud parameters and precipitation[J]. Int J Climatol, 32(12): 1921-1934.
- Gremillion M S, Orville R E, 1999. Thunderstorm characteristics of cloud-to-ground lightning at the Kennedy space center, Florida: a study of lightning initiation signatures as indicated by the WSR-88D[J]. Wea Forecasting, 14(5): 640-649.
- Houze R A, 2004. Mesoscale convective systems[J]. Rev Geophys, 42(4): RG4003.
- Inoue T, Ueda H, Inoue T, 2006. Cloud properties over the bay of Bengal derived from NOAA-9 split window data and the TRMM PR product[J]. SOLA, 2: 41-44.
- Kolios S, Feidas H, 2013. An automated nowcasting system of mesoscale convective systems for the Mediterranean basin using Meteosat imagery. Part I: system description[J]. Meteor Appl, 20(3): 287-295.
- Laing A G, Fritsch J M, 1993a. Mesoscale convective complexes over the Indian monsoon region[J]. J Climate, 6(5): 911-919.
- Laing A G, Fritsch J M, 1993b. Mesoscale convective complexes in Africa[J]. Mon Wea Rev, 121(8): 2254-2263.
- Machado L A T, Rossow W B, Guedes R L, et al, 1998. Life cycle variations of mesoscale convective systems over the Americas [J]. Mon Wea Rev, 126(6): 1630-1654.
- Maddox R A, 1980. Mesoscale convective complexes[J]. Bull Amer Meteor Soc, 61(11): 1374-1387.
- Mapes B, Houze Jr R A, 1993. An integrated view of the 1987 Australin monsoon and its mesoscale convective systems. II: vertical structure[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 119(512): 733-754.
- Mecikalski J R, Bedka K M, 2006. Forecasting convective initiation by monitoring the evolution of moving cumulus in daytime GOES imagery[J]. Mon Wea Rev, 134(1): 49-78.
- Mecikalski J R, Bedka K M, Paech S J, et al, 2008. A statistical evaluation of GOES cloud-top properties for nowcasting convective initiation[J]. Mon Wea Rev, 136(12): 4899-4914.
- Meng Z Y, Yan D C, Zhang Y J, 2013. General features of squall lines in East China[J]. Mon Wea Rev, 141(5): 1629-1647.
- Migliorini S, Dixon M, Bannister R, et al, 2011. Ensemble prediction for nowcasting with a convection-permitting model-I: description of the system and the impact of radar-derived surface precipitation rates[J]. Tellus A, 63(3): 468-496.
- Miller D, Fritsch J M, 1990. Mesoscale convective complexes in the western pacific region[J]. Mon Wea Rev, 119(12): 2978-2992.
- Roberts R D, Rutledge S, 2003. Nowcasting storm initiation and growth using GOES-8 and WSR-88D data[J]. Wea Forecasting, 18(4): 562-584.
- Sieglauff J M, Cronce L M, Feltz W F, et al, 2011. Nowcasting convective storm initiation using satellite-based box-averaged cloud-top cooling and cloud-type trends[J]. J Appl Meteor Climatol, 50(1): 110-126.
- Vila D A, Machado L A T, Laurent H, et al, 2008. Forecast and tracking the evolution of cloud clusters (ForTraCC) using satellite infrared imagery: methodology and validation[J]. Wea Forecasting, 23(2): 233-245.
- Xu W X, 2013. Precipitation and convective characteristics of summer deep convection over east Asia observed by TRMM[J]. Mon Wea Rev, 141(5): 1577-1592.
- Xu W X, Zipser E J, 2011. Diurnal variations of precipitation, deep convection, and lightning over and east of the Eastern Tibetan plateau[J]. J Climate, 24(2): 448-465.
- Zheng Y G, Chen J, Zhu P J, 2008. Climatological distribution and diurnal variation of mesoscale convective systems over China and its vicinity during summer[J]. Chin Sci Bull, 53(10): 1574-1586.