

郭巍,崔林丽,顾问,等,2018.基于葵花8卫星的上海市夏季对流初生预报研究[J].气象,44(9):1229-1236.

基于葵花8卫星的上海市夏季对流初生预报研究^{*}

郭巍^{1,2} 崔林丽^{1,2} 顾问^{1,2} 王超^{1,2} 麻炳欣^{1,2}

1 上海市气象科学研究所,上海 200030

2 上海市卫星气象遥感应用中心,上海 200030

提 要: 参考 Mecikalski et al(2010a;2010b)提出的基于 GOES 系列卫星的对流初生预报方法,针对上海市夏季对流天气特征建立了基于高时空分辨率的静止气象卫星数据的上海市对流初生判识及预报方法。利用该方法对上海市的一次对流初生个例进行了分析,并对 2016 年 7—8 月的 12 次对流初生事件进行了预报试验,结果表明:方法提取的各个指标能够很好地体现对流初生过程中云团的发展变化特征并能剔除掉成熟对流云团边缘像元的干扰;在 12 次对流初生事件中,成功地预报了其 11 次,预报时间较对流初生时间平均提前了约 30 min,但是对于局地弱对流过程该方法仍有一定的缺陷。

关键词: 葵花-8,对流初生,MB06 算法,上海

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.09.011

Summer Convective Initiation Forecasting in Shanghai Based on Himawari-8 Satellite

GUO Wei^{1,2} CUI Linli^{1,2} GU Wen^{1,2} WANG Chao^{1,2} MA Bingxin^{1,2}

1 Shanghai Institute of Meteorological Science, Shanghai 200030

2 Shanghai Satellite Remote-Sensing and Application Centre, Shanghai 200030

Abstract: Referring to the method presented by Mecikalski et al (2010a; 2010b), which was based on GOES satellite data to forecast convective initiation (CI), this paper proposes a method for forecasting summer CI by using Himawari-8 satellite data in Shanghai. By this method, a specific convective weather event, which occurred in Shanghai on 28 July 2016, is analyzed. Moreover, an experiment for forecasting 12 CI events in Shanghai during July—August of 2016 is implemented to validate the proposed method. The results show that the development of convective cloud cluster can be well reflected by the indicators in the method, and the interference caused by the edges of mature convective clouds can be eliminated. Of the 12 CI events, 11 are forecasted and the average lead time can be about 30 min. However, CI forecasting may be missed by this method if convection is weak.

Key words: Himawari-8, convective initiation (CI), MB06, Shanghai

引 言

近年来短时强对流天气发生次数和强度都在逐

年上升,长三角地区表现得尤为明显(顾问等,2015;尹红萍和曹晓岗,2010)。由于雷达观测到的是降水粒子,因此时效性较对流云开始形成的时刻有所延迟(王改利和刘黎平,2005)。高时空分辨率静止气

^{*} 上海市自然科学基金(18ZR1434100)、华东区域气象科技协同创新基金合作项目(QYHZ201611)和上海市气象局团队培养项目(TD201803)共同资助

2017年8月7日收稿; 2018年4月13日收修定稿

第一作者:郭巍,主要从事气象卫星遥感应用研究. Email:guowei_0425@163.com

象卫星资料可以有效弥补常规观测资料在短时对流监测中的不足。中尺度对流复合体(mesoscale convective complex, MCC)的生命史一般可以划分为生成、发展、成熟和消亡阶段(Maddox, 1981),但是由于对流生成的机理复杂性(郑媛媛等, 2011; 孙继松和陶祖钰, 2012; 茅懋等, 2016; 郑永光等, 2017)以及卫星遥感载荷和技术的局限性, 基于卫星的对流监测往往集中于对流的发展和成熟阶段, 对流检测的方法主要采用红外亮温和面积阈值的方法(Maddox, 1981; Velasco and Fritsch, 1987; Machado et al, 1998; 白洁等, 1997; 束宇和潘益农, 2010; 刘延安等, 2012; 王新等, 2016)。这其中 Maddox 最早提出 MCC 的亮温和面积阈值标准, 此后的研究表明在不同的季节和地区, 阈值的标准也会有所差别。不仅如此, 传统的对流判识方法主要监测的是已发展(成熟)的对流, 无法检测到尺度小、时间间隔短的初生对流(convective initiation, CI), 往往导致卫星监测到对流之前, 降水已经发生(覃丹宇和方宗义, 2014)。

随着气象卫星时空分辨率的提高、光谱通道的增加, 使得利用静止气象卫星观测 CI 成为可能。CI 的定义为: 多普勒天气雷达第一次检测到由对流云产生的反射率因子 ≥ 35 dBz (Roberts and Rutledge, 2003)。Mecikalski and Bedka (2006), Mecikalski et al (2010a; 2010b) 通过研究 GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) 的不同通道的光谱特征及其与对流云的关系, 总结出了多条 CI 的判识关系, 并将其算法(以下简称 MB06)应用于 GOES 的业务中。美国威斯康辛大学设计了 UWCI (The University of Wisconsin Convective Initiation) 算法, 该算法利用块平均(box-average)概念, 把时间间隔为 15 min 的两幅亮温图像依次通过 7 条测试, 最后全部符合测试条件的确定为候选 CI (Sieglaff et al, 2011)。法国气象局开发的 RDT (rapidly developing thunderstorms) 算法采用 MSG (Meteosat Second Generation) 卫星的 5 个通道数据, 根据对流体较大的降温率和较大的温度梯度两个原则, 每 15 min 就能提供一次欧洲地区的对流监测数据和分析产品用于临近预报 (Morel et al, 2002)。国内的对流初生监测主要基于 FY-2 系列和 MTSAT 系列卫星。刘京华等 (2012) 利用 MTSAT 卫星数据, 采用基于 GOES 卫星的 MB06 算法对京津冀地区的一次对流过程进行

试验, 结果表明经过阈值的适当修改, MB06 的方法也适用于京津地区的强对流初生的预警。刘健和蒋建莹 (2013) 利用 FY-2C 区域扫描取得的平均 10 min 观测间隔的探测数据对一次强对流天气过程进行分析, 表明快速区域扫描的高时间分辨率观测模式可以更好地捕捉到对流云团发展变化的特征。李五生等 (2014) 利用 MTSAT 资料结合京津地区的实际情况对 MB06 算法的 8 个指标进行修改, 并对 2006—2007 年京津地区的 17 日次的对流初生预报试验, 结果表明该预报方法能够对 1 h 内的对流初生现象进行有效预报。徐慧 (2012) 基于 FY-2C 卫星数据, 在 UWCI 算法基础上, 对京津地区的一次强对流天气的初生进行预警试验, 结果表明该方法可以有效地对京津地区的强对流形成提前 30 min 预警。

新一代的静止气象卫星——葵花 8 号 (Himawari-8, H8) 搭载的先进葵花成像仪 (Advanced Himawari Imager, AHI) 具有高时间频次全盘和区域扫描的特点 (张鹏等, 2016; 2018), 能够在 10 min 内完成全盘扫描, 非常有利于捕捉对流系统的发展。H8/AHI 传感器的主要通道包含从 $0.46 \sim 13.3 \mu\text{m}$ 的 16 个通道, 其中可见光和近红外通道分辨率通道可以达到 $0.5 \sim 1 \text{ km}$, 红外通道的分辨率也可以达到 2 km , 可以大大提高对 CI 的观测和预报能力。本文参考 MB06 算法, 建立适用于上海地区的对流初生判定阈值, 并通过 2016 年 7—8 月上海市本地 CI 个例判断该方法在上海的适用性。

1 资料及方法

1.1 卫星和雷达资料

本文中的 H8 卫星数据来源于中国气象局国家气象信息中心下发的 H8 原始分辨率的标称圆盘数据。将研究需要的通道经过重采样至 $0.02^\circ \times 0.02^\circ$, 并选取长三角区域进行数据的拼接和裁剪。所用到的通道波长和分辨率等参数如表 1 所示。

为了验证对流初生预报的准确性, 本文使用上海市南汇多普勒天气雷达 (31.00702°N , 121.8825°E) 的组合反射率因子资料确定 CI 发生的时间和位置。为了便于雷达和卫星资料的匹配, 将径向分辨率为 1 km 的雷达组合反射率资料经过插值重采样后得到 $0.02^\circ \times 0.02^\circ$ 等经纬度的数据, 并进行简单的地

物杂波处理。姚学祥(2011)指出对流性降水的雷达回波强度一般大于 40 dBz,但是在实际业务中预报员多采用 30~35 dBz 作为局地对流的判识条件(漆梁波和陈雷,2009;林隐静等,2011),本文中采用 35 dBz 作为对流初生的判识条件。

表 1 H8/AHI 传感器通道设置
Table 1 Spectral region and spatial resolution of H8/AHI

波段编号	中心波长/ μm	分辨率/km
1	0.46	1
2	0.51	1
3	0.64	0.5
4	0.86	1
5	1.6	2
6	2.3	2
7	3.9	2
8	6.2	2
9	7.0	2
10	7.3	2
11	8.6	2
12	9.6	2
13	10.4	2
14	11.2	2
15	12.3	2
16	13.3	2

1.2 方法原理

本文借鉴 Meciklaksi et al(2010a;2010b)针对 GOES 卫星的对流初生判识方法(MB06),该方法的原理是提取气象卫星不同光谱通道及相关通道的组合数据获得与对流有关的信息,从而对对流初生进行有效的预报。在实际业务中,通过 GOES 卫星获取 6.7,10.7 和 13.3 μm 三个通道的红外亮温值,并通过它们之间的组合和临近时间变化值构建了 8 个有关 CI 的对流指标,当卫星某个像元满足 8 个指标中的 7 个时,则认为在当前时刻的未来 0~1 h 内该像元所在区域会发生对流初生。其中 10.7 μm 通道的红外亮温可以很好地体现出云顶温度及云顶高度的变化,当 10.7 μm 红外亮温迅速减小时预示着云团的迅速抬升。6.7 μm 通道是典型的水汽通道,其权重函数的峰值在对流层的上部,因此利用 6.7 和 10.7 μm 的亮温差可以描述云顶高度与对流层上部的相对位置,并剔除逆温层下虚假积云的影响。13.3 μm 通道的权重函数峰值在对流层下部,利用 13.3 和 10.7 μm 的亮温差可以检验出云顶高度相对对流层下部的位置。而不同红外通道的亮温

或者亮温差的时间变化值则很好地体现了云团在过去一段时间内的垂直运动情况。同时通过 10.7 μm 亮温低于 0℃的时间判定对流是否为本地初生的对流。由于 H8 卫星的通道设置和 GOES 卫星略有差别,因此首先需要从 H8 卫星 16 通道中选取与 GOES 卫星权重函数分布类似的通道。本文通过利用快速辐射传输模式(Radiative Transfer for TOVS,RTTOV)模拟中纬度夏季廓线下 H8 通道与 MB06 算法中使用的 GOES 卫星通道的权重函数(图 1),最终选择 H8 卫星的 7.0,11.2 和 13.3 μm 通道进行对流初生预报的研究。

由于 H8 卫星的通道设置、时间分辨率等与 GOES 卫星有一定差别,而且长三角地区的气候特点也与美国不同,因此在选取对应的通道后通过统计夏季上海市对流云团的光谱特征对原算法中的阈值做了部分调整(表 2)。如上海所处的纬度要低于美国大部分地区,因此调整后的 11.2 μm 的亮温阈值(S1),11.2 和 6.7 μm 的亮温差阈值(S5)的绝对值都要高于原算法中的阈值。但是考虑到,云团的上升运动所导致的温度变化应该较为一致,因此对于时间变化的阈值(S2、S7、S8)本文仅在原算法的基础上进行了时间上的数值压缩。此外由于本研究的区域较小,因此阈值选取的范围也较原算法更为集中(S6)。同时为了满足原算法中过去 30 min 内云团亮温始终递减(S3)和过去 30 min 内未出现亮温低于 0℃云团(S4),未对上述两个阈值作出修改。

MB06算法在实际的对流初生预报中果往往会

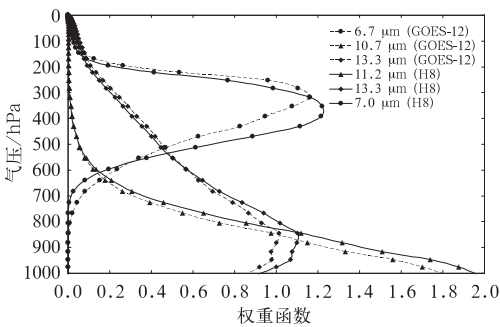


图 1 用于对流初生预报的 H8 与 GOES 红外通道的权重函数对比
(基于中纬度夏季大气廓线和 RTTOV 模拟)
Fig. 1 Comparison of weighting functions of IR channel for CI forecasting between H8 and GOES satellites
(simulated by RTTOV and mid-latitude summer atmospheric profile)

表 2 本文采用的 CI 判定阈值与 MB06 算法的 CI 判定阈值对比

Table 2 Summary of CI features

编号	CI 指标说明 (括号内为 GOES 卫星波长)	MB06 算法阈值	本文算法阈值
S1	11.2 μm (10.7 μm)亮温	$<0^{\circ}\text{C}$	$<10^{\circ}\text{C}$
S2		$<-4^{\circ}\text{C} \cdot (15 \text{ min})^{-1}$	$<-3^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$
S3	11.2 μm (10.7 μm)亮温变化率	$\Delta T_B(30 \text{ min})^{-1} < \Delta T_B(15 \text{ min})^{-1}$	$\Delta T_B(20 \text{ min})^{-1} < \Delta T_B(10 \text{ min})^{-1}$
S4	11.2 μm (10.7 μm)亮温小于 0°C 时间	30 min 以内	30 min 以内
S5	7.0 μm (6.7 μm)与 11.2 μm (10.7 μm)亮温差	$-35 \sim -10^{\circ}\text{C}$	$-40 \sim -20^{\circ}\text{C}$
S6	13.3 μm 与 11.2 μm (10.7 μm)亮温差	$-25 \sim -5^{\circ}\text{C}$	$-20 \sim -10^{\circ}\text{C}$
S7	7.0 μm (6.7 μm)与 11.2 μm (10.7 μm)亮温差变化率	$>3^{\circ}\text{C} \cdot (15 \text{ min})^{-1}$	$>2^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$
S8	13.3 μm 与 11.2 μm (10.7 μm)亮温差变化率	$>3^{\circ}\text{C} \cdot (15 \text{ min})^{-1}$	$>2^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$

导致成熟对流云团周边的像元被判识为 CI 云团。这其中主要原因是在成熟对流云团的云砧区继续发展或快速移动导致其边缘像元被判识为新的 CI 云团,因此需要将这种情况剔除。对于云团边缘的像元,本文采用 Prewitt 边缘检测的方法:计算 11.2 μm 红外亮温图像的 Prewitt 二阶导数的大小,并采用相对的阈值确定像元是否为对流云团边缘的像素,如果是则不认为该像元是对流初生像元。

2 阈值调整前后 CI 判识结果的比较分析

为了对比本文算法在阈值调整以及边缘检测上与 MB06 算法的对流初生识别的差异,选取了 2016 年 7 月发生在上海本地的 3 次对流初生过程进行对比(图 2~4)。

图 2 为两种算法对 2016 年 7 月 28 日午后发生在上海宝山长江口附近的对流初生预警对比。由雷达的实况图像可以看出在 04:00(UTC,下同)雷达反射率图像上只有浙江部分地区有大于 35 dBz 的回波,表明这些地区已经出现了较强的对流天气,上海本地无明显的降水回波。利用本文的算法和 MB06 算法可以在卫星图像上进行 CI 的识别和预报。但是利用 MB06 算法得到的结果表明在浙江东部地区也有对流初生预报的结果,而且通过雷达图像可以发现对流初生的预报位置多是在原有对流云团的边缘部分,其预报结果的可靠性值得商榷。对比 04:30 的雷达图像发现上海宝山及苏州等地的确有大于 35 dBz 的对流回波相继生成,但是位置较

04:00 的卫星预报位置略微偏东(约 5 km),考虑到对流发生时刻的风向(西风为主)和卫星观测本身的系统性误差,这种位置差异是合理的。同时浙江东部地区并无新的对流发生,只是原有对流云团的进一步发展,因此如果不进行对流云团的边缘检测可能会导致预报的误判。此外两种算法在 7 月 22 日(图 3)和 13 日(图 4)的对流初生判识中的差异也比较大,主要表现为基于本文算法的对流初生判识结果会大大减少基于 MB06 算法阈值的对流初生判识的误判。

为了更好地分析 CI 指标在对流发展过程中的指示意义和阈值调整的合理性,以 2018 年 7 月 28 日对流过程为例,提取上海本地(宝山)的对流云团在对流开始前后不同 CI 指标的变化时序图(图 5)。由于指标 S3 和 S4 不是量化类指标,因此图中只给了其他 6 个指标变化的时序图。

由图 5 可见该次对流初生的预报时间为 04:00,当时 11.2 μm 通道的亮温(S1)大约为 9°C ,而红外水汽通道亮温差(S5)的阈值大约为 -36°C ,说明针对原算法中 S1 和 S5 的阈值调整是合理的;但是从 03:40 开始红外通道的亮温就开始逐渐降低,预示着云团快速上升和发展,但是其温度递减率(S2)远小于 04:20 之后的对流迅速发展阶段;水汽和红外通道的亮温差(S5)的绝对值在整个对流发展过程中始终在逐渐减小,其中二者亮温差的变化率(S7)最大值同样发生在 04:20 之后,但是随着对流发展至对流层顶,二者之间的差异不再明显;由于 13.3 μm 通道的权重函数主要在对流层下部,因此 13.3 与 11.2 μm 通道的亮温差(S6)相比水汽通道

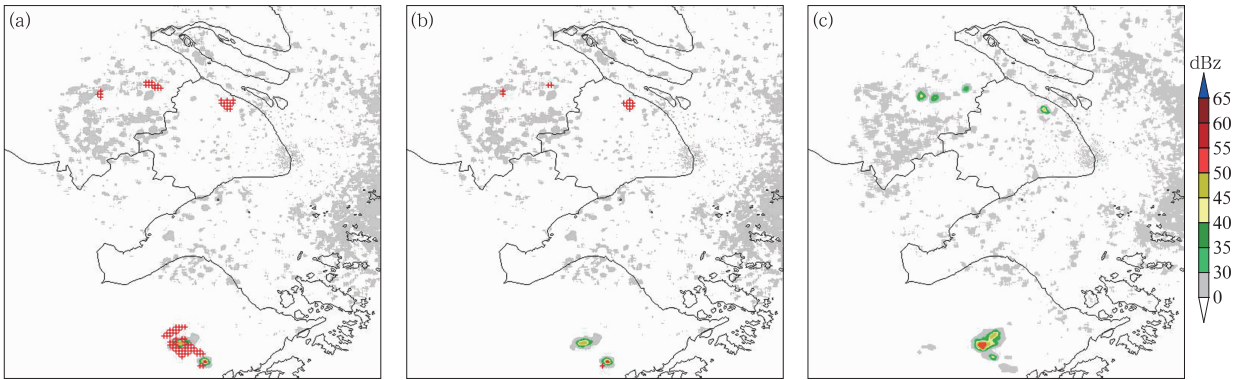


图 2 2016 年 7 月 28 日 04:00 UTC(a)MB06 算法,(b)本文算法的
对流初生预报结果及(c)04:30 UTC 雷达反射率因子
(图 2a 为基于 MB06 算法的预报结果叠加当前时次的雷达图像,
图 2b 为基于本文算法的预报结果叠加当前时次的雷达图像,
图 2c 为对流初生发生时的雷达图像)

Fig. 2 The CI results of MB06 algorithm (a) and the proposed algorithm in this paper (b)
at 04:00 UTC and radar reflectivity at 04:30 UTC (c) 28 July 2016
(Fig. 2a CI results based on MB06 algorithm overlaying radar image, Fig. 2b CI results based
on proposed algorithm overlaying radar image, Fig. 2c radar image when CI events occur)

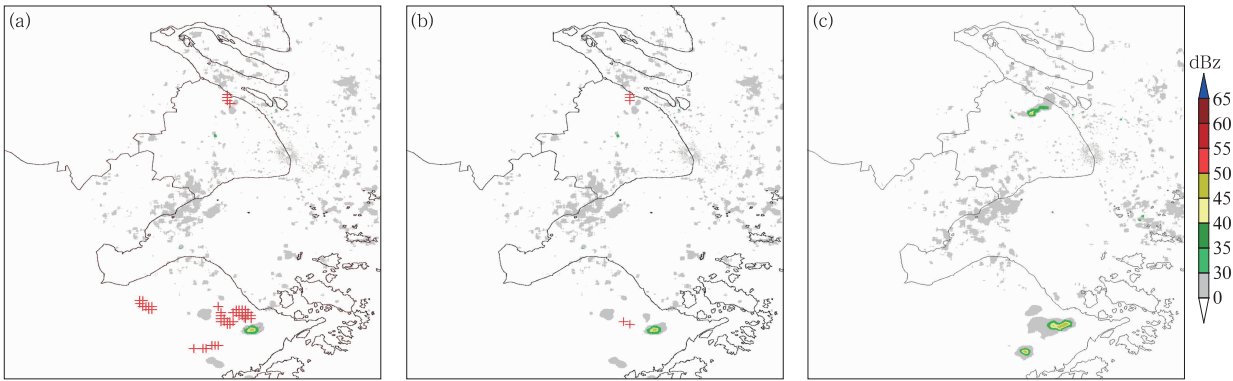


图 3 同图 2,但为 7 月 22 日 06:30 UTC 预报结果及(c)07:03 UTC 雷达反射率因子
Fig. 3 Same as Fig. 2, but for the forecasting result at 06:30 UTC and
radar reflectivity at 07:03 UTC 22 July 2016

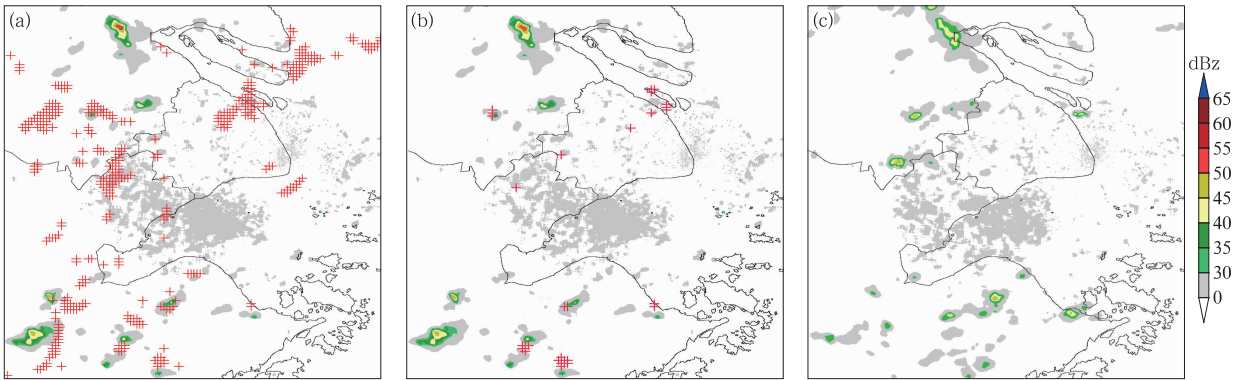


图 4 同图 2,但为 7 月 13 日 04:30 UTC 预报结果及(c)05:04 UTC 雷达反射率因子
Fig. 4 Same as Fig. 2, but for the forecasting result at 04:30 UTC and
radar reflectivity at 05:04 UTC 13 July 2016

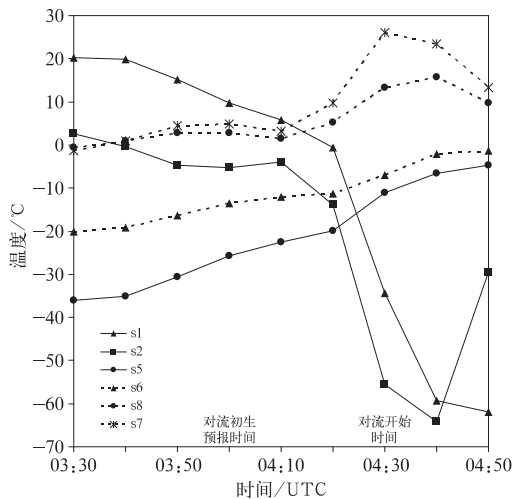


图5 2016年7月28日上海本地的一次对流过程中不同对流初生指标变化时序图

Fig. 5 Sequence chart of different CI indicators during one convective weather event in Shanghai on 28 July 2016

与 $11.2 \mu\text{m}$ 通道的亮温差(S5)在开始阶段相对较大,但是随着对流的发展,二者之间的差距也在逐渐减小。

3 卫星对流初生预报同雷达监测结果的对比分析

整理2016年7—8月上海南汇雷达资料的组合反射率数据,将雷达图像上第一次出现反射率因子大于 35 dBz 的时刻定义为对流开始时刻,并查找该时刻前1 h内的葵花卫星对流初生判识结果。考虑到对流云团的快速移动,在实际统计中若对流初生判识结果的位置与雷达判识对流的位置距离不超过3个像元(5 km)则认为对流初生判识结果正确,并记录对流初生判识正确的时刻。最终统计得到的结果如表3所示。

表3统计结果显示,2016年7—8月上海市本地有12日次发生了对流初生事件,其中利用H8卫星的对流初生算法提前识别了11次对流初生,平均提前时间约30 min。针对2016年8月23日的对流初生时间漏报的情况,查阅当天的雷达资料发现对流开始时间为05:45,发生地点为上海市金山区,结束时间为07:07,全过程持续时间约为1.5 h。图6为07时上海市自动站3 h累计降水的分布图,如图6和图7可见降水主要发生在上海市金山区,但是

表3 2016年7—8月上海市对流初生判识结果统计
Table 3 Statistics of CI forecasting in Shanghai from July to August 2016

雷达监测对流 时间/UTC	卫星对流初生 预报时间/UTC	预报提前 时间/min
7月13日05:04	7月13日04:30	34
7月22日07:03	7月22日06:30	33
7月24日06:55	7月24日06:40	15
7月24日07:34	7月24日07:10	24
7月26日07:24	7月26日07:10	14
7月27日05:30	7月27日04:40	50
7月28日04:35	7月28日03:50	45
7月29日04:59	7月29日04:30	29
8月2日04:56	8月2日04:20	36
8月19日04:36	8月19日04:00	36
8月20日03:57	8月20日03:40	17
8月23日05:45	漏报	—

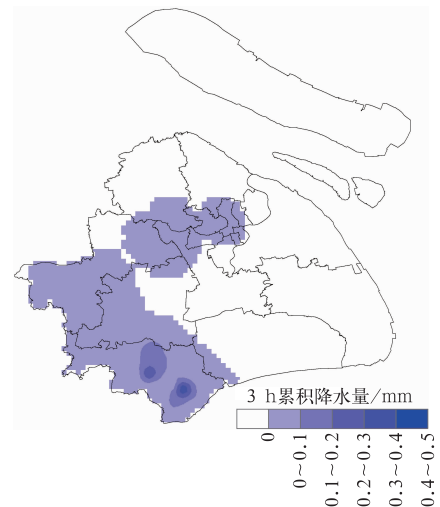


图6 2016年8月23日07:00 UTC上海市自动站3 h累计降水量分布图

Fig. 6 Distribution of 3 h total precipitation in Shanghai at 07:00 UTC 23 August 2016

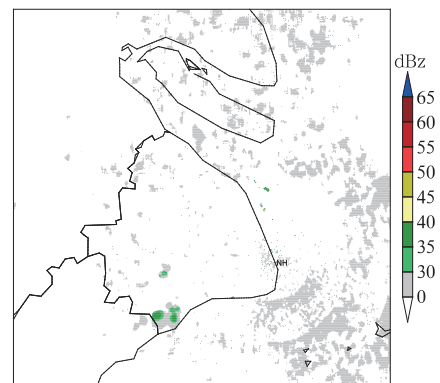


图7 2016年8月23日05:45 UTC上海南汇雷达组合反射率因子

Fig. 7 Distribution of radar composite reflectivity at Nanhui Site at 05:45 UTC 23 August 2016

过程雨量最大不超过 0.5 mm。根据地面雨量站的资料查得,当天 05:00—07:00 金山区各雨量站中只有干巷(0.1 mm)、松隐(0.1 mm)和体育场(0.4 mm)3个雨量站有明显的降水发生,且降水强度都不大,表明该算法对这种局地弱对流的初生识别有一定的局限性。

4 结 论

本文使用 H8/AHI 高时空分辨率特性传感器资料,参考基于 GOES 系列卫星的 MB06 算法,在对阈值的适应性进行分析评估的基础上建立了一套适用于上海地区夏季的对流初生算法标准。首先利用该算法研究了 2016 年 7 月 28 日上海本地的一次对流个例,结果表明算法提取的 8 个指标通过阈值本地化修改可以很好地体现出 CI 的发生和发展过程,利用红外亮温图像的 Prewitt 二阶导数图像可以很好地剔除掉成熟对流云团边缘的干扰,该算法得到的对流初生预报时间较实际对流发生时间提前了 30 min;随后统计了 2016 年 7—8 月上海市 12 次的对流初生事件的预报结果,其中成功预报了 11 次,漏报 1 次,平均预报时效性较对流发生时间提前 30 min 左右。另外针对漏报的个例研究发现,该方法对于局地的弱对流该方法具有一定的局限性。此外,由于卫星观测容易受到云的影响,当实况中存在较为浓密的高云或者在对流云的云砧区有新的对流生成的情况时,由于无法及时获取积云的光谱信息,会造成该方法预报结果的失真。

由于地理位置的差异和气候特点,本文设计的预报方法目前只针对于上海地区夏季的对流初生预报。此外,在对流初生预报的过程中仅考虑到了卫星亮温的变化特点,忽略了地面气象要素如风场、温度的变化,因此有必要在下一步的研究过程中考虑到地面观测资料同卫星资料的联合应用(郑永光等, 2015)。目前我国自主研发的 FY-4 静止气象卫星搭载的多通道扫描成像辐射计具有和 H8/AHI 传感器类似的光谱通道和探测能力,而其特有的干涉式大气垂直探测仪更是可以获取晴空状态下的三维大气垂直结构特征,进而通过计算相关对流参数进行对流潜势预报,闪电成像仪也将实现闪电成像观测,通过获取卫星观测覆盖区内的闪电分布图为灾害性强对流天气预警提供服务(曹冬杰, 2016)。因此如何使用综合使用 FY-4 静止卫星的各传感器进

行局地对流初生预报也是下一步研究工作的重点。

参考文献

- 白洁,王洪庆,陶祖钰,1997. GMS 卫星红外云图强对流云团的识别与追踪[J]. 热带气象学报,13(2):158-167.
- 曹冬杰,2016. 风云四号静止卫星闪电成像仪监测原理和产品算法研究进展[J]. 气象科技进展,6(1):94-98.
- 顾问,谈建国,常远勇,2015. 1981—2013 年上海地区强降水事件特征分析[J]. 气象与环境学报,31(6):107-114.
- 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价[J]. 北京大学学报(自然科学版),50(5):819-824.
- 林隐静,王洪庆,韩雷,等,2011. 京津地区对流性/层状降水回波的特征分析[J]. 北京大学学报(自然科学版),47(2):40-44.
- 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.
- 刘延安,魏鸣,高伟,等,2012. FY2 红外云图中强对流云团的短时自动预报算法[J]. 遥感学报,16(1):79-92.
- 茅懋,戴建华,李佰平,等,2016. 不同类型强对流预报产品的目标对象检验与分析评价[J]. 气象,42(4):389-397.
- 漆梁波,陈雷,2009. 上海局地强对流天气及临近预报要点[J]. 气象,35(9):11-17.
- 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.
- 束宇,潘益农,2010. 红外云图上中尺度对流系统的自动识别[J]. 南京大学学报(自然科学版),46(3):337-348.
- 孙继松,陶祖钰,2012. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J]. 气象,38(2):164-173.
- 王改利,刘黎平,2005. 多普勒雷达资料在暴雨临近预报中的应用[J]. 气象,31(10):12-15.
- 王新,郭强,陈怡羽,2016. FY-2E 资料空间响应订正及对强对流监测改进[J]. 应用气象学报,27(1):102-111.
- 徐慧,2012. 基于 FY2C 数据的平均 box 方法预报对流初生[J]. 电子设计工程,20(21):40-42.
- 姚学祥,2011. 天气预报技术与方法[M]. 北京:气象出版社:23.
- 尹红萍,曹晓岗,2010. 盛夏上海地区副热带高压型强对流特点分析[J]. 气象,36(8):19-25.
- 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.
- 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.
- 郑永光,陶祖钰,俞小鼎,2017. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. 气象,43(6):641-652.
- 郑永光,周康辉,盛杰,等,2015. 强对流天气监测预报预警技术进展[J]. 应用气象学报,26(6):641-657.
- 郑媛媛,姚晨,郝莹,等,2011. 不同类型大尺度环流背景下强对流天气的短时临近预报预警研究[J]. 气象,37(7):795-801.
- 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, 1981. The Structure and life-cycle of midlatitude mesoscale convective complexes[D]. Colorado: Colorado State University.
- 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, Mackenzie W M Jr, Koenig M, et al, 2010a. Cloud-top properties of growing cumulus prior to convective initiation as measured by meteosat second generation. Part I: infrared fields [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 49(3):521-534.
- Mecikalski J R, Mackenzie W M Jr, Koenig M, et al, 2010b. Cloud-top properties of growing cumulus prior to convective initiation as measured by meteosat second generation. Part II: use of visible reflectance[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 49(12):2544-2558.
- Morel C, Senesi S, Autones F, 2002. Building upon Saf-Nwc Products; Use of the rapid developing thunderstorms (RDT) product in Météo-France nowcasting tools[C]// Proceedings of the 2002 Meteorological Satellite Data Users' Conference. Dublin, Ireland: EUMETSAT and Met Eirean:248-255.
- 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.
- Sieglaff J M, Cronic 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.
- Velasco I, Fritsch J M, 1987. Mesoscale convective complexes in the Americas[J]. *J Geophys Res Atmos*, 92(D8):9591-9613.