

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. 气象, 40(1): 7-17.

利用静止气象卫星监测初生对流的研究进展^{*1}

覃丹宇^{1,2} 方宗义²

1 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081

2 国家卫星气象中心, 北京 100081

提 要: 本文主要对近年来利用静止气象卫星监测、分析和研究对流初生的国内外若干研究结果和进展给予了简要综述。主要涉及对流的判识、对流的追踪技术、初生对流的多光谱云顶特征、初生对流的判据和问题与展望等方面的内容。总体而言, 利用静止气象卫星监测初生对流, 以及发展的对流, 是目前国内外研究和探索的热点之一。研究表明, 通过精心挑选对对流敏感的光谱通道、通道组合和时间演变判据, 可以对初生对流进行监测, 可比地面雷达更早地预警降雨系统的发展, 显示出在临近预报中的应用潜力。监测对流初生的算法流程大体上分为目标判识、目标追踪和初生对流判识三个部分。国际上主要的一些与对流初生相关的成熟算法各具特色, 如 RDT (Rapidly Developing Thunderstorms) 算法在对流判识中强调了垂直形态的峰值检测, 追踪对流时利用了速度外推并检测重叠面积。ForTraCC (Forecasting and Tracking the Evolution of Cloud Clusters) 算法关注活跃对流, 一定程度上考虑了对流合并和分裂的情况, 具有外推预报功能。GOES-R (The Geostationary Operational Environmental Satellite R-Series Program) 算法特点是多光谱的使用, 利用多光谱判识技术进行对流云顶检测, 是面向下一代静止气象卫星探测能力的算法。UWCI (The University of Wisconsin Convective Initiation) 构思巧妙, 所提出的 box-average 技术简单易行, 适合软件工程化。随着卫星传感器和探测能力的发展, 以及计算机技术的快速发展, 更多卫星资料将用于联合判识对流。同时, 更新的计算机视觉、计算机图像处理和模式识别技术也将用来解决追踪中的复杂问题, 进一步改进初生对流的判识准确率。

关键词: 卫星, 对流初生, 综述

中图分类号: P412

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.01.002

Research Progress of Geostationary Satellite-Based Convective Initiation

QIN Danyu^{1,2} FANG Zongyi²

1 Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, CMA, Beijing 100081

2 National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: A brief review of geostationary satellite-based convective initiation (CI) including the cloud clusters (CC) identification, the CC tracking technique, the multi-spectral cloud-top properties of CI, the determination of likelihood for CI and some conclusions are presented. Studies indicate that CI may predict the rain storms more early than ground-based radar by choosing carefully the sensitive channels, bands combinations and temporal trends, showing its application potentials for nowcasting forecasts. The knowing CI algorithms basically involve three parts: target identification, tracking technique and CI likelihood detection. The operational algorithms are similar approaches but something different. For example, the Rapidly Developing Thunderstorms algorithm (RDT) considers the vertical cross-section of cloud systems while the tracking algorithm is mainly built on the overlapping between cells according to their move and speed. The Forecasting and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC) technique concerns active convective systems, presenting the tracking situation including merges and splitting and displaing the

* 国家自然科学基金项目(40975023)、国家高技术研究发展计划(2012AA120903)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106044)共同资助
2013年1月28日收稿; 2013年6月20日收修定稿

第一作者: 覃丹宇, 主要从事卫星气象研究. Email: qindy@cma.gov.cn

ability to forecast the MCS trajectory. The GOES-R CI algorithm aims for the next generation satellite's sounding and observing, using a series of spectral and temporal thresholds to identify CI. While the University of Wisconsin Convective Initiation (UWCI) algorithm utilizes a box-averaged approach to monitor cloud-top cooling rates of CI. This approach is computationally inexpensive and easily provide to engineering. With some new payloads ongoing launch and more powerful detection abilities, more and more satellite data will be introduced to identify convective cells. Also, computer technique progress will help to solve the complicated problems which may appear in the process of convective tracking, these efforts will improve the accuracy of CI products.

Key words: geostationary satellite, convective initiation, review

引 言

众所周知,中尺度对流系统是暴雨(雪)、冰雹、大风和龙卷等灾害性天气的直接制造者,它们在一定的天气尺度环流形势背景下形成和发展,大多嵌入在天气尺度系统中或分布在其附近地区,如锋面云带内或其附近,台风的输入云带或台风眼壁云墙中,也有的呈孤立状态,如大积雨云团和飑线等。在业务临近预报中,对这些中尺度对流系统的定点预报有很大难度,数值模式的预报往往滞后,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。因此,如何在对流刚快速生成和发展的阶段捕捉到早期信息,是临近预报特别关注的问题。

目前,中尺度对流系统的预报问题多数集中在研究和分析大气对流运动形成发展的内部和外部环境条件。研究指出,动力抬升条件;下垫面特征,如热力状况、地表温度、植被状况、土壤湿度、地形等;大气稳定度的变化;低层大气水汽含量及其通量与辐合;中高层水汽边界等,是对流是否发生的基本环境条件(Lauwaet et al, 2009; Chagnon et al, 2010; Letkewicz et al, 2010; Lewis et al, 2010; 尹东屏等, 2010; 袁美英等, 2010; Adler et al, 2011; Rasmusen et al, 2011; 井喜等, 2011; 王彦等, 2011; Bentley et al, 2012; Moore et al, 2012; Zhang et al, 2012; 方翀等, 2012; 孙继松等, 2012; 王毅等, 2012; 吴芳芳等, 2012)。一旦对流启动之后,云的相态和水汽含量、水汽输送、高低层流场中的辐散辐合、对流系统之间的相互作用等则是对流活动能否持续,甚至造成灾害的关键。

利用静止气象卫星监测对流有一定的优势,表现为时间分辨率高,观测尺度跨越大。早期利用卫星对强对流的研究大多数是从云形、云的种类、云区

面积等云的外观表现来描述其演变过程。后来的研究更进一步,通过计算对流云团的云顶高度、云区范围及云区面积的时间变化、云顶温度及云顶温度的时间变化来定量地描述冰雹、暴雨等对流云团的特征和演变过程(张文建等, 2004; Fang et al, 2006)。有关这方面的综述文章也不少,如程麟生等(2002)、方宗义等(2006)、费增坪等(2008)、孙晶(2011)和王晓芳等(2011)的文章,涉及中尺度对流复合体,东亚梅雨锋暴雨云团的监测和分析,卫星资料同化和数值模拟,时空分布,平均生成环境,组织模型和逆尺度演变,与环境的相互作用,动力学和不稳定度,概念模型,结构和机制研究等各方面的内容。

对临近预报而言,需要更早识别和监测哪些对流能发展起来并最终会形成降水系统,这就涉及对流的生命史和触发问题。对流的生命史一般可划分为生成、发展、成熟和消亡阶段(Maddox, 1980)。而对流的生成,或者说触发的原因很多(尹东屏等, 2010; 袁美英等, 2010; Burrows, 2011; Wang et al, 2011; 井喜等, 2011; 王彦等, 2011),机理复杂(郑媛媛等, 2011),目前为止,对其了解仍然是不完全的。因此,许多研究的重点多放在发展和成熟阶段的对流系统,及其产生强降雨的云顶特征(卢乃锰等, 1997; Qin et al, 2004; Delgado et al, 2008)。

随着卫星遥感技术的不断发展和进步,监测初生对流已成为可能。近年来,针对强对流初生(convective initiation, 简称 CI)的研究也因此而成为新的热点。CI的定义是:卫星云图上对应多普勒天气雷达第一次检测到由对流云产生的反射率 ≥ 35 dBz的像元(Roberts et al, 2003)。CI技术的核心是分析对流运动。对流运动造成云体厚度增加,云顶温度的急剧下降,云顶相态的变化等现象,均可通过多光谱综合分析技术进行判识,从而捕捉到初生的对流。CI判识技术充分利用静止气象卫星高时间频

次的观测优势,监测快速增长的对流,可比地面雷达更早地发现降雨系统,从而达到临近预警的目的。而根据对流与闪电的统计关系,采用与 CI 相似的算法和技术思想,近年也开发出了 0~1 h 以内对初生闪电的判识产品(Harris et al, 2010; Mecikalski et al, 2010a; 2010b; 2010c; Mecikalski et al, 2012), 同样可帮助提高临近预报的能力。

本文将近年来利用静止气象卫星监测、分析和研究 CI 的国内外若干研究结果和进展进行简要综述。涉及对流目标粗判识、追踪技术、初生对流判识和国际上主要一些成熟的算法及其特点等内容。

1 对流目标粗判识

对流云的卫星识别方法主要采用阈值法。阈值法是一种最常用,同时也是最简单的图像分割方法,它特别适用于目标和背景差别明显的特征判识。

对于长波红外通道,通常采用的红外亮温阈值有:温度阈值、分裂窗差阈值(Inoue et al, 2006)、面积阈值(Maddox, 1980)和温度梯度阈值(卢乃锰等, 1997)等。其中,温度阈值由于简单而成为主要检测方法。阈值法最大的难题是如何确定一个合理的阈值。由于应用目的不同、季节和地域有差异等因素,阈值的确定往往没有统一的标准。Maddox(1980; 1981)最早提出检测 MCC 时采用 $TBB < 241$ K 标准以后,Miller 等(1991)、Mapes 等(1993)和 Laing 等(1993a; 1993b)等都采用了类似的阈值。从研究和应用情况看,多数红外亮温阈值取值在 240~250 K(Machado et al, 1998)之间,但也有的为了减少卷云的影响,将阈值定为 240 K 以下,如 Laing 等(2011)认为取 233 K 能判识活跃的对流,而 Vila 等(2008)开发的对流云预报和追踪算法 ForTraCC (The Forecasting and Tracking the Evolution of Cloud Clusters)采用了 235 K 的判识阈值。在国内,白洁等(1997)利用亮温阈值、面积阈值、边界阈值等及计算机图像学技术来实现强对流云团的识别;黄勇等(2008)通过分析卫星云图,对流云发生发展过程中云顶亮温、投影面积、几何形态等特征物理量的变化,来分析对流云特征。郑永光等(2007; 2008; 2011)和祁香香等(2009)的许多关于强对流分布的统计工作,其主要依据是用红外亮温低于 -52 °C 来识别强对流云。束宇等(2010)同样采用红外亮温低于 -52 °C 的强对流识别标准。宋娟等

(2011)采用 -32 °C 红外亮温阈值和基于 T 算法的云团边界提取来进行对流云团的识别。

除了活跃对流的红外单阈值判识方法之外,还有各种复杂的判识方法,使用了更多的卫星资料作为判识依据。如何彬方等(2008)分析 MODIS 资料对强对流云团检测的可能性时发现,MODIS 云图的云反照率、云顶亮温、两通道反照率差值、云的相态、红外亮温比值、温湿度场的结构与云的降水强度有一致的对应关系。方翔等(2008)利用 NOAA 卫星 AMSU-B 水汽通道亮温差实现了对深对流云和冲顶对流云的定量判识。李森等(2010)探讨了深对流指数和红外多光谱带差异与强对流云团的关系,通过“逆向搜索法”获取强对流云团的轮廓信息,并对轮廓线进行平滑处理,从而实现了对卫星云图强对流云团的识别。刘延安等(2012)采用亮温和面积阈值方法进行云团识别。李汇军等(2005)提出了一种应用连续小波变换从红外卫星云图中提取对流云团的处理方法。将正弦波经过 Gauss 函数调制后,得到一组满足允许条件的连续小波基函数,利用这组小波基实现了对流云团小波提取算法,得到了强对流云团边界的分割。另外,虽然闪电与对流天气间有密切的关系,但利用 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 卫星的 LIS (Lightning Imaging Sensor) 探测数据对个例的分析表明,在强对流云顶高度和云中的含冰量相差甚小的情况下,闪电发生次数、持续时间和发出的辐射能量却十分不均匀(傅云飞等, 2007),因此,闪电识别方法只能作为辅助方法。同样的,星载微波观测资料也已被证实能反映对流云顶相态的特征(Mohr et al, 1996)。Yeh 等(1990)还利用微波辐射传输模式模拟了不同频率(18~183 GHz)向上辐射亮温,结果显示,冰水的混合属性,包括相态、形态和尺度分布对高低频亮温的变化都非常重要,在 92 和 181 GHz 波段的向上辐射亮温对风暴上部的云结构非常敏感。

在强对流判识方法里,值得介绍的是法国在欧洲气象卫星开发组织 EUMETSAT (European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites) SAF (Satellite Application Facilities) 下开发的 RDT (Rapid Development Thunderstorm) 算法(Morel et al, 2000; 2002),其长波红外通道阈值选取考虑了对流云体在垂直方向上的高度变化,采用自适应阈值。图 1 是 RDT 对流判识算法的示意图。假设云顶亮温的垂直剖面如图所示,每一个

对流体对应一个低亮温极(峰)值,即图中 Tower # 1、Tower # 2、Tower # 3 和 Tower # 4,该算法通过 5 个判识要素来判识对流体:(1) T_{cold} 最冷温度阈值,常取值 -55°C ;(2) T_{warm} 为对流体的最暖温度阈值,通常取值 $-10\sim 5^{\circ}\text{C}$;(3) ΔT 为对流云体在垂直方向上的温度等值线间隔,常取为 1°C ;(4) ΔT_{tower} 为对流云体极值检测必须达到的最小温度差,一般取

3°C ;(5) A_{min} 为对流判识的最小面积阈值,一般取一个红外像元大小。满足以上 5 个条件,可判为对流体。因此,图 1 中共有 3 个对流体被判识出来,分别是 Tower # 1、Tower # 2 + # 3 和 Tower # 4。可以看出,Tower # 2 由于不满足 ΔT_{tower} 的阈值条件,被认为与 Tower # 3 合属于同一个对流体。

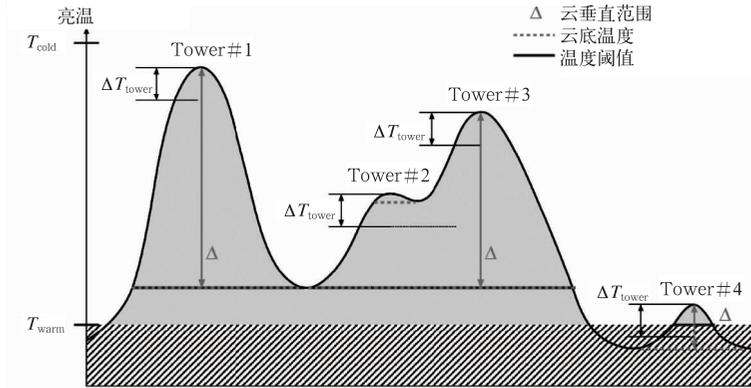


图 1 RDT 对流识别方法示意图

Fig. 1 Diagram illustration of RDT cell definition

总体而言,在对流云团的识别研究方面,红外资料判识深对流主要采用云顶亮温阈值法。需要注意的是,这些监测方法都是针对强对流体的检测。其中,单一的红外阈值可以用来识别具有冷云顶的对流云,但亮温阈值与太阳天顶角有关,是变化的;分裂窗差阈值可以用来剔除被误检的光学厚度小的薄云,但大多数的卷云砧光学厚度很大;可见光用于对流云检测仅限于白天,并且会受到云顶几何形状的影响;温度梯度的边界检测方法用于强对流检测时需要事先给定阈值;而利用微波检测强对流,降水往往已经发生。

对于初生对流,在使用阈值法识别时效果不佳的原因还可能是:(1)对流云初生阶段水平尺度小,卫星难以分辨。以单个气团雷暴为例,一般在淡积云阶段的水平尺度为几百米到 1 km ,浓积云和积雨云的水平尺度为几千米,一些降水性积雨云可以延伸到 $10\sim 20\text{ km}$ 。因此,卫星空间分辨率较低时很难看见初生阶段的对流云。(2)对流云云体厚度随纬度有变化。比如,一般中纬度地区降雨性对流云在其发展初期厚度可达 $5\sim 6\text{ km}$,而热带积云一般厚度只有 $1\sim 2\text{ km}$ 。由于云顶高度不同,也就要选择不同的亮温阈值来判识。(3)在较短的时间间隔

内,初生对流与背景云的差异不够大。

从 CI 的定义可知,其关注的对象并非深对流,或者说是已发展(成熟)的对流,因此,不能像深对流判识那样采用很低的亮温阈值。美国 GOES 卫星的 CI 产品(Mackenzie et al, 2010; Walker et al, 2011)对潜在初生对流判识依赖于云类产品,即选取水云、过冷却水云或混合云作为判识目标,在此基础上,对分割的目标云区进行极值检测和面积检测,得到目标云区。

2 追踪技术

利用连续时刻的卫星资料,在分别进行对流判识的基础上,对每一个目标云块,搜索其邻域,找到匹配的同一片目标,这就是对流的追踪。基于卫星资料的对流云团追踪技术与基于地面雷达回波的追踪技术类似(Dixon et al, 1993; 陈雷等, 2009; 陈明轩等, 2010; 王改利等, 2010; 李建通等, 2011),主要有面积重叠法(Morel et al, 2000; 2002; Vila et al, 2008)和交叉相关法(Carvalho et al, 2001; 刘延安等, 2012)。面积重叠法的关键是如何选取重叠区阈值,而交叉相关法除了最大相关值以外,还得考虑

其他大相关值的作用,并从中挑选出云团合理的移动方向,目前这些参数大多由经验获得。

随着计算机技术的发展,计算机视觉、计算机图像处理 and 模式识别技术也越来越多地应用于对流追踪算法中。束宇等(2010)使用系统查找法来实现对强对流系统的追踪,通过定义 M 因子把一个系统前后时次的轮廓连接起来。其中, M 因子考虑了系统前后两时次的轮廓形心之间的球面距离、轮廓面积、轮廓的云顶最低温度之间的连续性和相似性。

近年来,计算机硬件发展迅速,一些复杂算法重新引起人们的注意,比如,粒子滤波算法也逐渐成为一种热门技术用于目标跟踪(张诗桂等,2010;王法胜等,2011;王国良等,2011;吴刚等,2011)。粒子滤波作为一种基于贝叶斯估计的非线性滤波算法,在处理非线性运动目标跟踪问题方面有独到的优势。国家卫星气象中心利用该技术进行了 FY-2 卫星的强对流云团追踪试验(覃丹宇等,2012b),结果表明,追踪结果合理可靠(图 2)。

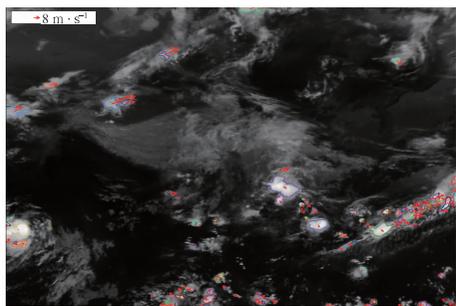


图 2 使用粒子滤波进行中尺度对流系统追踪的结果

(图中实线为判识和追踪的中尺度对流云团,云团里的箭头为移动方向,箭头长短代表移动速度大小)

Fig. 2 The tracking of MCSs by particle filtering algorithm

(Solid line for MCSs and arrow for velocity)

由于对流体在其生命史过程里可能会发生复杂演变,因此,追踪算法也必须尽可能反映出云团的各种变化情况。如 ForTraCC 算法(Vila et al,2008)分别考虑了云团追踪过程里可能会遇到的 5 种情况,即自然产生、自然消亡、连贯、分裂和合并。不得不承认,迄今为止,所有追踪算法都不能完全解决云团的生消、分裂与合并问题。其中的难点在于云团不是刚体,在其演变过程中会生长、消亡和形变,从而造成描述它的参数发生变化,并且这些变化似乎

没有规律可循。

3 初生对流的检测

3.1 与对流有关的光谱判据

利用卫星遥感检测对流,首先得了解和确定哪些光谱通道及其组合使用可以获得与对流有关的信息。研究表明,采用多光谱判识技术可以有效检测积云的生长。以下分别阐述与对流有关的光谱判据,及其物理意义。

Mackenzie 等(2005)和 Meciklaksi 等(2006)通过研究各种常用光谱通道及其组合与对流的关系,总结了多条 CI 判据的光谱阈值,这些研究提供了对对流云生长的特征信息,包括强上升气流造成的云顶温度变化、云体厚度变化和云顶相态变化等。以下将 Meciklaksi 等(2006)的算法简称为 MB06,其后发展的 GOES-R 的 CI 算法源于 MB06。

当对流产生并发展时,云顶不断升高,导致云顶温度不断降低,并且,对流越强,云顶降温率就越大。这一物理现象,可以用 $10.7 \mu\text{m}$ 温度阈值和时间变化趋势来描述和检测。另外, $6.5-10.7 \mu\text{m}$ 通道的亮温差可以为我们提供云顶高度相对于对流层顶的位置。通常其值为负,因为地表温度比其上部的对流层温度要高,而水汽通道权重函数峰值在对流层上部。正值通常意味着云位于对流层顶附近或对流层顶之上(Ackerman,1996;Schmetz et al,1997)。上述信息可以识别未达成熟期的云或发展到大气层中上部的云。另外, $6.5-10.7 \mu\text{m}$ 亮温差的时间变率可以检测积云相对于对流层顶的增长情况,给出云在对流层中以多快的速度增长的信息。值得一提的是,当对流层下部存在逆温,并且积云快速发展突破了逆温层的时候, $10.7 \mu\text{m}$ 检测到的云顶温度冷却率往往过大,而 $6.5-10.7 \mu\text{m}$ 亮温差的时间变率却变化不大,因为 $6.5 \mu\text{m}$ 通道的权重函数峰值出现在对流层顶之上。因此,联合 $10.7 \mu\text{m}$ 时间变率和 $6.5-10.7 \mu\text{m}$ 亮温差时间变率,可以剔除虚假的积云快速增长检测结果。

对于成熟积云或积雨云, $13.3-10.7 \mu\text{m}$ 通道差反映出的特征与 $6.5-10.7 \mu\text{m}$ 的通道差类似。由于 $13.3 \mu\text{m}$ 通道接收的辐射主要来自于对流层中下部,成熟积云或积雨云的云体阻隔了这些辐射,卫星只能接收到云顶的辐射,因此,对于成熟积云或

积雨云, $13.3-10.7 \mu\text{m}$ 通道差值接近于零。另外, $13.3 \mu\text{m}$ 通道对卷云比较敏感, 在有卷云的地方探测的亮温低于 $10.7 \mu\text{m}$ 通道亮温。Mecikalski 等 (2008) 使用主分量分析方法的研究表明, $13.3-10.7 \mu\text{m}$ 通道是判识成熟积云最重要的判据之一, 如果 $13.3 \mu\text{m}$ 通道饱和则很可能表明有风暴发生。

$12.0-10.7 \mu\text{m}$ 通道差称为“分裂窗”技术, 常用来探测卷云、火山灰和深对流云的存在。Inoue (1987) 研究发现, $12.0-10.7 \mu\text{m}$ 通道差值约等于 0 的时候, 可辨别对流性降水, 这是对单通道单阈值方法的改进, 可用来检测能发展产生降水的对流云团。同时, $12.0-10.7 \mu\text{m}$ 通道差的时间变率可更有效地检测对流性降水的情况。

近年来, Mecikalski 等 (2010a; 2010b; 2010c; 2012) 做了大量工作, 详细描述了多通道水汽和红外判据在检测对流云发展中的研究和应用情况。Siewert 等 (2010) 利用了 MSG (Meteosat Second Generation, 欧洲气象卫星组织的第二代气象卫星) SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager) 数据和不同的对流追踪技术检测对流初生,

同样强调了使用多种光谱信息检测 CI 的重要性。通过分析和试验在轨静止气象卫星所有可用的光谱检测对流的效果, 获得与云厚度, 云顶冻结和上升气流强度相关的光谱及其组合。这些光谱及其组合就成为了多光谱检测 CI 的主要技术方法。目前, 多光谱检测 CI 的算法已比较成熟, 形成业务能力。表 1 即当前 GOES 卫星业务 CI 算法采用的主要判据 (Walker et al, 2011)。

表 1 当前 GOES 业务 CI 采用的判据

Table 1 The criteria used by the current GOES operation CI

CI 算法的红外判据	阈值
$10.7 \mu\text{m}$ 温度	$< 0 \text{ C}$
$10.7 \mu\text{m}$ 温度的时间变化趋势	$< -4 \text{ C}/15 \text{ min}$, $\Delta T/30 \text{ min} < \Delta T/15 \text{ min}$
$6.5-10.7 \mu\text{m}$ 温度差	$-35 \sim -10 \text{ C}$
$13.3-10.7 \mu\text{m}$ 温度差	$-25 \sim -5 \text{ C}$
$12.0-10.7$ 温度差 (GOES-11)	$-3 \sim 0 \text{ C}$
$6.5-10.7 \mu\text{m}$ 变化趋势	$> 3 \text{ C}/15 \text{ min}$
$13.3-10.7 \mu\text{m}$ 变化趋势	$> 3 \text{ C}/15 \text{ min}$
$12.0-10.7 \mu\text{m}$ 变化趋势 (GOES-11)	$> 2 \text{ C}/15 \text{ min}$

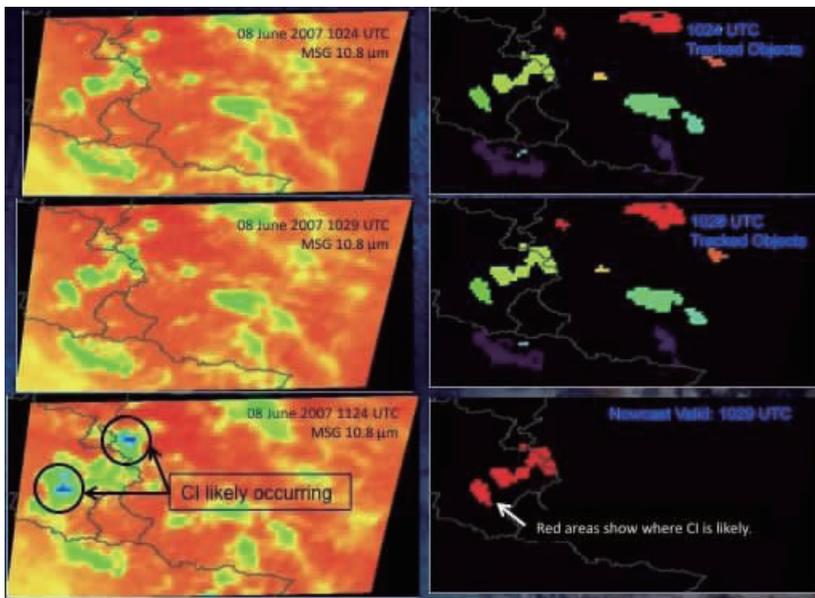


图 3 使用 MSG SEVIRI 数据得到的 CI 产品

(时间是 2007 年 6 月 8 日, 上图是前一时刻, 中间是当前时刻; 左列为 $10.8 \mu\text{m}$ 图像, 右列是目标提取结果; 右下图红色区域为判识的对流初生位置)

Fig. 3 CI Algorithm output examples from 5 minute MSG SEVIRI data on 8 June 2007 [The top two images are at time 1 (1024 UTC), the middle two images are time 2 (1029 UTC); for the top two rows, the left side is the $10.8 \mu\text{m}$ channel image and the images on the right are the defined objects; the bottom row on the right is algorithm output valid at 1029 UTC and the bottom image on the left is the actual IR image in the future at 1124 UTC]

MB06 的算法在业务中只用了当前 GOES 系列卫星的光谱通道。算法可以探测出 90% (当满足所有的判据阈值时) 的初生对流, 但同时有较高的误报率 (Mecikalski et al, 2008)。高误报率的原因之一是采用了基于单个像元的目标追踪和验证, 如果采用目标验证方法, 则可提高精度。另外, 为了限制过高的误报率, CI 算法也在探索使用其他光谱通道判据和闪电资料。

从卫星观测通道的特性来看, 尽管可见光和红外通道相比, 具有更早发现初生对流的能力, 但由于其受太阳高度角变化的影响, 以及反照率和对流增长之间的关系不明确等因素的限制, 所以, 基本不会单独使用可见光进行对流初生判识。通常情况下, 可见光云图的空间分辨率远高于红外云图, 因此, 其潜在作用是作为辅助数据对红外部分有云像元进行分析, 从而剔除非对流目标像元。

3.2 确定初生对流的原则

在 RDT 算法里, 快速发展的对流主要依据 2 个原则: (1) 对流体要有较大的温度梯度, 其中心亮温与外围亮温相比足够大; (2) 要有较大的降温率。这 2 个原则分别描述了云团的空间特性和时间演变特性。RDT 通过一个参数调整, 可以监测到 90% 的快速发展对流体, 而误测率只有 15% (Morel et al, 2000; 2002)。

GOES-R 的 CI 算法里, 由于使用了多光谱判识方法, 需要对多条判据组合取最优值。通过对 2007 年欧洲地区 213 例对流初生事件的验证分析, 在 12 条光谱检测判据中, 当满足 7 或 7 条以上判据条件时能够得到最优的统计结果, 准确率为 80.75%, 并可提前 30~45 min 预警积云发展成为对流降水风暴。

刘京华等 (2012) 利用日本 MTSAT 卫星数据, 对京津地区的一次 CI 个例进行预警试验, 检验 MB06 提出的 8 个指标统计方法效果, 认为经过阈值的适当修改, 可以有效地对京津地区的强对流初生提前 30 min 进行预警。同时, 使用主成分分析 (PCA) 方法, 验证了 8 个指标中的每一个指标对于预警 CI 都有重要的作用。

4 国际研究对流的成熟算法

从公开文献看, 国际上基于卫星资料研究对流

的主要算法有以下几种。

(1) RDT 算法。该算法是在 EUMESAT SAF 组织结构下由法国气象局开发的, 可提供每 15 min 一次欧洲地区的对流监测分析产品用于临近预报, 包括强对流识别、追踪和监测, 以及监测快速发展的对流体, 目前的版本是 v2.3 (Meteo-France, 2012)。当前的 RDT 算法主要使用 MSG 的 5 个通道数据, 分别是: IR 10.8 μm 、IR 8.7 μm 、IR 12.0 μm 、WV 6.2 μm 和 WV 7.3 μm 。RDT 算法特点是考虑了对流云体的垂直形态, 业务算法结合了多种资料, 比如数值预报产品和其他相关卫星反演产品。最终提供的产品包含了强对流系统的面积、云顶最低温度、移向移速、云顶降温率和云顶面积变化率等描述强对流的重要参数。

(2) ForTraCC 算法 (Vila et al, 2008)。这是美国马里兰大学开发的基于 GOES 卫星 30 min 时间间隔 IR 10.8 μm 单通道的对流云团追踪和外推预报算法, 包含 4 个模块, 分别是 (1) 基于面积和温度阈值的 MCS 判识, (2) 基于冷云顶的 MCS 物理特征分析, (3) 基于面积重叠法的追踪模块和 (4) 预报模块。该算法的主要特色是具有外推预报的功能, 其中的预报技术包括两方面考虑: 中尺度对流系统中心位置估计和生命史的生消估计 (面积预报)。外推预报中尺度对流系统中心位置时, 利用前 2 个时刻外推中心与当前时刻追踪的中心之间的偏差来调整当前时刻外推未来时刻中心的位置。而中尺度对流系统生消估计主要根据其面积变化来确定, 在不考虑合并与分裂的情况下, 由经验公式得到 MCS 的面积预报。算法经验证在 30 min 时效内具有较高的精度, POD (probability of detection) 可达 0.77。

(3) GOES-R 的 CI 算法。这是美国阿拉巴马大学 (University of Alabama in Huntsville) 开发的多光谱检测算法, 用来监测未来 2 h 内可能发展成为回波强度 ≥ 35 dBz 强对流系统的发生, 目前的版本是 v2.0。图 3 是 GOES-R 的 CI 产品样例。该 CI 算法主要分为对流体判识、对流体追踪和多光谱 CI 判识三大部分。其中, 多光谱判识 CI 是算法的核心, 用到 GOES-R ABI (Advanced Baseline Imager) 仪器的 6 个通道数据, 分别是 6.15、7.0、7.4、8.5、9.7、11.2、12.3 和 13.3 μm 。主要判据为 12 条。利用 MSG 资料进行的算法验证结果表明, 产品精度为 80.75%。GOES-R CI 算法的核心来自于 SATCAST (SATellite Convection AnalySis and

Tracking)(Walker et al, 2012),这是从 2002 年开始研发的算法,由 NASA(National Aeronautics and Space Administration)、NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)和 NSF(National Science Foundation)共同资助,业务应用于美国飞控中心、一些国家天气预报服务部门、GOES-R 测试平台、航空预报中心和海洋预报中心,目前版本是 v2.0。

美国威斯康辛大学的 UWCI(University of Wisconsin Convective Initiation)算法(Sieglaff et al, 2011)。这个算法的物理基础是:快速发展的对流因为云顶升高而导致云顶温度下降,因此具有较大的云顶降温率。在技术方法上,该算法提出了块平均(box-average)概念,利用当前时刻的块平均云顶亮温与前一时刻的块平均亮温差来粗判对流,通过 7 条判据,进一步剔除因平流、薄卷云等影响的非对流像元,最后符合云顶降温率的像元即 CI。该算法采用单通道数据和云类型产品作为辅助数据,因此简单、快速和高效,但缺点是在有云水平移动、薄卷云移动和复杂多层云的情况下,会产生误判。

其他还有一些算法,但不是主流。如巴西里约热内卢大学开发的 MASCOTTE(the Satellite Maximum Spatial Correlation Tracking Technique)算法(Carvalho et al, 2001),使用 GOES 卫星 1 h 时间间隔 IR 10.8 μm 单通道数据,对流判识采用云顶亮温 ≤ 235 K 和半径 ≥ 100 km 的简单阈值,而追踪算法采用最大空间相关法。与前几个算法相比,该算法并不适合用于实时业务。

国内相关研究和算法研发刚刚开始,国家卫星气象中心针对 FY-4 卫星的产品研发计划里有中国区域的 CI 产品研发(覃丹宇等, 2012a)。FY-4 的算法流程与 GOES-R CI 类似,但阈值选取不尽相同,目标选取算法部分借鉴了 UWCI 的技术。FY-4 卫星计划 2015—2016 年间发射。目前, FY-4 CI 产品算法仍有阈值优选、检验验证等大量工作要做。

5 结论和展望

通过对近年来利用静止气象卫星监测、分析和研究对流初生的国内外若干研究结果的归纳总结,可以得到以下一些结论:

(1) 通过精心挑选对流敏感的光谱通道、通道组合和时间演变判据,可以获得 CI 监测结果。CI

及其类似产品可比地面雷达更早地预警降雨系统的发展,对于一般的对流系统,可以比多普勒雷达探测到 >35 dBz 回波提前 30 min 以上(目标是 2 h 以内)。目前看, CI 算法在晴空或部分有云情况下检测对流初生比较有效,准确率较高,但在卷云覆盖区和积云砧区发展的初生对流,以及快速移动的初生对流判识率较低。

(2) 国际上主要的对流初生算法流程相似,但又各具特色。RDT 算法在对流判识中强调了垂直形态的峰值检测,追踪对流时利用了速度外推并检测重叠面积。ForTraCC 算法关注活跃对流,一定程度上考虑了对流合并和分裂的情况,具有外推预报功能。GOES-R 算法特点是多光谱的使用,利用多光谱判识技术进行对流云顶检测,是面向下一代静止气象卫星探测能力的算法。UWCI 构思巧妙,所提出的 box-average 技术简单易行,适合软件工程化。

(3) 利用静止卫星监测初生对流的技术基础是对流的判识和追踪。随着卫星传感器和探测能力的发展,更多卫星资料将被引入来联合判识对流,比如闪电探测数据、高光谱探测数据和微波数据等,这些数据的加入,可以进一步改进对流的判识准确率。在对流的追踪技术方面,一些新的计算机视觉、计算机图像处理和模式识别技术同样可用来解决追踪中的复杂问题,但在算法复杂性和计算效率之间需要进行权衡和取舍。总体来看,云团生消演变的精确追踪仍是未解决的难题,但随着卫星观测时间分辨率的提高,比如 GOES-R 的区域观测时间分辨率为 5 min,云团追踪的精度也自然提高了,原因是时间间隔短了,云团生消演变造成的形变的程度也就大大减小。

从以上内容看, CI 产品在未来临近预报业务中应能发挥作用。但在当前,由于卫星探测技术和成本的限制,卫星资料距离用户“所见即所得”的需求仍有差距。下一代静止气象卫星通过提高时间分辨率的办法应当可以较好地解决这一问题。同时,应用中需要根据不同对象考虑其时效性。比如,对组织的对流系统而言,其生命史可达几小时以上, CI 产品是可以发挥作用的;而对于生命史在 1 h 以内的雷暴单体,通常其水平尺度也很小,与红外通道 4~5 km 水平分辨率相比,并不是主要捕捉的对象,同理也不是 CI 产品主要关注的目标。

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. 热带气象学报, 13(2):63-72.
- 陈雷,戴建华,陶岚. 2009. 一种改进后的交叉相关法(COTREC)在降水临近预报中的应用. 热带气象学报, 25(1):117-122.
- 陈明轩,高峰,孔荣,等. 2010. 自动临近预报系统及其在北京奥运会期间的应用. 应用气象学报, 21(4):395-404.
- 程麟生,冯伍虎. 2002. 中纬度中尺度对流系统研究的若干进展. 高原气象, 21(4):337-347.
- 方勋,毛冬艳,张小雯,等. 2012. 2012 年 7 月 21 日北京地区特大暴雨中尺度对流条件和特征初步分析. 气象, 38(10):1278-1287.
- 方翔,邱红,曹志强,等. 2008. 应用 AMSU-B 微波资料识别强对流云区的研究. 气象, 34(3):22-29.
- 方宗义,覃丹宇. 2006. 暴雨云团的卫星监测和研究进展. 应用气象学报, 17(5):583-593.
- 费增坪,郑永光,张焱,等. 2008. 基于静止卫星红外云图的 MCS 普查研究进展及标准修订. 应用气象学报, 19(1):82-90.
- 傅云飞,李宏图,自勇,等. 2007. TRMM 卫星探测青藏高原谷地的降水云结构个例分析. 高原气象, 26(1):98-106.
- 何彬方,黄勇,冯妍,等. 2008. 基于 MODIS 资料的强对流云团通道特征分析. 大气与环境光学学报, 3(3):203-211.
- 黄勇,胡雯,何永健,等. 2008. 安徽省副高控制下对流云特征分析. 安徽师范大学学报(自然科学版), 31(5):479-482.
- 井喜,李社宏,屠妮妮,等. 2011. 黄河中下游一次 MCC 和中- β 尺度强对流云团相互作用暴雨过程综合分析. 高原气象, 30(4):913-928.
- 李汇军,孔玉寿. 2005. 应用连续小波变换提取对流云团. 解放军理工大学学报(自然科学版), 6(2):181-186.
- 李建通,高守亭,郭林,等. 2011. 基于雷达回波最大重叠率的一种临近降水预报方法. 大气科学, 35(3):519-530.
- 李森,刘健文,刘玉玲. 2010. 基于 FY2D 静止卫星云图的强对流云团识别. 气象水文海洋仪器, 27(2):72-78.
- 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. 北京大学学报(自然科学版), 48(1):42-46.
- 刘延安,魏鸣,高炜,等. 2012. FY-2 红外云图中强对流云团的短时自动预报算法. 遥感学报, 16(1):79-92.
- 卢乃锰,吴蓉璋. 1997. 强对流降水云团的云图特征分析. 应用气象学报, 8(3):14-20.
- 祁秀香,郑永光. 2009. 2007 年夏季我国深对流活动时空分布特征. 应用气象学报, 20(3):286-294.
- 束宇,潘益农. 2010. 红外云图上中尺度对流系统的自动识别. 南京大学学报(自然科学版), 46(3):337-348.
- 宋娟,黄勇,冯妍. 2011. 基于相关匹配与面积重叠度的对流云跟踪方法. 计算机工程, 37(Supplementary Issue):336-337,340.
- 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. 气象, 38(2):164-173.
- 孙晶. 2011. 梅雨锋暴雨中尺度对流系统研究若干进展. 气象科技, 39(3):257-265.
- 覃丹宇,李博. 2012a. FY-4 对流初生产品算法理论基本文档. 国家卫星气象中心,技术文档:1-21.
- 覃丹宇,瞿芳. 2012b. 基于粒子滤波技术的对流云团追踪算法. 国家卫星气象中心,技术文档:1-20.
- 王法胜,郭权. 2011. 视觉跟踪中的粒子滤波算法研究进展. 山西大学学报(自然科学版), 34(4):528-533.
- 王改利,刘黎平,阮征,等. 2010. 基于雷达回波拼图资料的风暴识别、跟踪及临近预报技术. 高原气象, 29(6):1546-1555.
- 王国良,刘金国. 2011. 基于粒子滤波的多自由度运动目标跟踪. 光学精密工程, 19(4):864-869.
- 王晓芳,崔春光. 2011. 暴雨中尺度对流系统研究的若干进展. 暴雨灾害, 30(2):97-106.
- 王彦,于莉莉,李艳伟,等. 2011. 边界层辐合线对强对流系统形成和发展的作用. 应用气象学报, 22(6):724-731.
- 王毅,郑媛媛,张晓美,等. 2012. 夏季安徽槽前形势下龙卷和非龙卷型强对流天气的环境条件对比研究. 气象, 38(12):1473-1481.
- 吴芳芳,俞小鼎,张志刚,等. 2012. 对流风暴内中气旋特征与强烈天气. 气象, 38(11):1330-1338.
- 吴刚,唐振民,杨静宇. 2011. 融合典型纹理特征的粒子滤波目标跟踪方法. 计算机工程与应用, 47(34):21-25.
- 尹东屏,吴海英,张备,等. 2010. 一次海风锋触发的强对流天气分析. 高原气象, 29(5):1261-1269.
- 袁美英,李泽椿,张小玲. 2010. 东北地区一次短时大暴雨 β 中尺度对流系统分析. 气象学报, 68(1):125-136.
- 张诗桂,朱立新,赵义正,等. 2010. 粒子滤波算法研究进展与展望. 自动化技术与应用, 29(6):1-9,16.
- 张文建,许健民,方宗义,等. 2004. 暴雨系统的卫星遥感理论和方法. 北京:气象出版社,243-287.
- 郑永光,陈炯,费增坪,等. 2007. 2003 年淮河流域持续暴雨的云系特征及环境条件. 北京大学学报(自然科学版)网络版(预印本), 43(2):15-23.
- 郑永光,陈炯,朱佩君,等. 2008. 中国及周边地区夏季中尺度对流系统分布及其日变化特征. 科学通报, 53(4):471-481.
- 郑永光,陈炯,朱佩君. 2011. 华南及邻近海域夏季深对流活动气候特征. 热带气象学报, 27(4):495-508.
- 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. 气象, 37(7):795-801.
- Ackerman S A. 1996. Global satellite observations of negative brightness temperature differences between 11 and 6.7 mm. Journal of the Atmospheric Sciences, 53(19):2803-2812.
- Adler B, Kalthoff N, Gantner L, et al. 2011. Initiation of deep convection caused by land-surface inhomogeneities in West Africa: A modelled case study. Meteorology and Atmospheric Physics, 112(1):15-27.
- Bentley M L, Stallins J A, Ashley W S, et al. 2012. Synoptic environments favourable for urban convection in Atlanta, Georgia. International Journal of Climatology, 32(8):1287-1294.
- Burrows W R. 2011. On the surface-convection feedback during drought periods on the Canadian Prairies. Earth Interactions, 15(21):1-26.
- Carvalho L M V, Jones C. 2001. A satellite method to identify structural properties of mesoscale convective systems based on

- the maximum spatial correlation tracking technique (Mascotte). *Journal of Applied Meteorology*, 40(10):1683-1701.
- Chagnon J M, Gray S L. 2010. A comparison of stratosphere-troposphere transport in convection-permitting and convection-parameterizing simulations of three mesoscale convective systems. *Journal of Geophysical Research, Atmospheres*, 115 (24): D24318.
- Delgado G, Machado L A T, Angelis C F, et al. 2008. Basis for a rainfall estimation technique using Ir-Vis cloud classification and parameters over the life cycle of mesoscale convective systems. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(5):1500-1517.
- Dixon M, Wiener G. 1993. Titan; Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting—A radar-based methodology. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 10:785.
- Fang Zongyi, Xu Jianmin, Zhao Fengsheng, et al. 2006. Review and development on the studies of Chinese meteorological satellite and satellite meteorology. *Acta Meteorologica Sinica*, (3): 259-274.
- Harris R J, Mecikalski J R, Mackenzie W M Jr, et al. 2010. The definition of goes infrared lightning initiation interest fields. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(12):2527-2543.
- Inoue T. 1987. An instantaneous delineation of convective rainfall areas using split window data of NOAA-7 Avhrr. *Meteorological Society of Japan, Journal*, 65:469-481.
- 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. *SOLA*, 2:41-44.
- Laing A G, Carbone R E, Lerizzani V. 2011. Cycles and propagation of deep convection over equatorial Africa. *Monthly Weather Review*, 139(9):2832-2853
- Laing A G, Fritsch J M. 1993a. Mesoscale convective complexes over the indian monsoon region. *Journal of climate*, 6(5):911-919.
- Laing A G, Fritsch J M. 1993b. Mesoscale convective complexes in Africa. *Monthly Weather Review*, 121(8):2254-2263.
- Lauwaet D, van Lipzig N P M, Ridder K D. 2009. The effect of vegetation changes on precipitation and mesoscale convective systems in the Sahel. *Climate Dynamics*, 33(4):521-534.
- Letkewicz C E, Parker M D. 2010. Forecasting the maintenance of mesoscale convective systems crossing the Appalachian Mountains. *Weather and Forecasting*, 25(4):1179-1195.
- Lewis M W, Gray S L. 2010. Categorisation of synoptic environments associated with mesoscale convective systems over the UK. *Atmospheric Research*, 97(1):194-213.
- Machado L A T, Rossow W B, Guedes R L, et al. 1998. Life cycle variations of mesoscale convective systems over the Americas. *Monthly Weather Review*, 126(6):1630-1654.
- Mackenzie W M, Mecikalski J R, Bedka K M. 2005. Using multi-spectral satellite remote sensing techniques to nowcast Nocturnal Convection Initiation.
- Mackenzie W M, Walker J R, et al. 2010. Convective Initiation Algorithm for Goes-R, NOAA NESDIS Algorithm Theoretical Basis Document, 1-24.
- Maddox R A. 1980. Mesoscale convective complexes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 61(11):1374-1387.
- Maddox R A. 1981. The Structure and life-cycle of midlatitude mesoscale convective complexes. Colorado State University.
- Mapes B, Houze R A Jr. 1993. An integrated view of the 1987 Australian monsoon and its mesoscale convective systems. II: Vertical Structure. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 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. *Monthly Weather Review*, 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. *Monthly Weather Review*, 136(12):4899-4914.
- Mecikalski J R, Li X, Lawrence D C, et al. 2012. Regional comparison of goes cloud-top properties and radar characteristics in advance of first-flash lightning initiation. *Monthly Weather Review*, 141(1):55-74.
- Mecikalski J R, Harris R, Mackenzie W, et al. 2010a. Goes infrared and reflectance 0—1 hour lightning initiation indicators; development and initial testing within a convective nowcasting system. American Geophysical Union, Fall Meeting 2010, abstract # AE21A-0259.
- 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. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(12):2544-2558.
- Mecikalski J R, Mackenzie W M Jr, Koenig M, et al. 2010c. Use of meteosat second generation infrared data in 0—1 hour convective initiation nowcasting. Part 1. Infrared fields. *J Appl Meteorol Climate*, 49:521-534.
- Meteo-France. 2012. Rapid development thunderstorm (Pge11 V2. 3) V2012, NWC SAF, <http://www.nwcsaf.org/HD/MainNS.jsp>:1-69.
- Miller D, Fritsch J M. 1991. Mesoscale convective complexes in the Western Pacific Region. *Monthly Weather Review*, 119(12): 2978-2992.
- Mohr K I, Zipser E J. 1996. Defining mesoscale convective systems by their 85-GHZ ice-scattering signatures. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(6):1179-1189.
- Moore B J, Neiman P J, Ralph F M, et al. 2012. Physical processes associated with heavy flooding rainfall in Nashville, Tennessee, and Vicinity during 1—2 May 2010: The role of an atmospheric river and mesoscale convective systems. *Monthly Weather Review*, 140(2):358-378.
- Morel C, Senesi S, et al. 2000. The rapid developing thunderstorms

- (Rdt) product of the nowcasting Saf. Prototyping activities and quality assessment using goes images.
- Morel C, Senesi S, et al. 2002. Building upon Saf-Nwc Products: Use of the rapid developing thunderstorms (Rdt) product in Météo-France Nowcasting Tools.
- Qin Danyu, Jixi J, et al. 2004. Analysis of mesoscale convective systems during 20–23 June 2002 by satellite observation. *Acta Meteorologica Sinica*, 18(1):1-16.
- Rasmussen K L, Houze R A. 2011. Orographic convection in subtropical South America as seen by the Trmm Satellite. *Monthly Weather Review*, 139(8):2399-2420.
- Roberts R D, Rutledge S. 2003. Nowcasting storm initiation and growth using GOES-8 and Wsr-88D Data. *Weather and Forecasting*, 18(4):562-584.
- Schmetz J, Tjemkes S A, Gube M, et al. 1997. Monitoring deep convection and convective overshooting with Meteosat. *Advances in Space Research*, 19(3):433-441.
- Sieglaff 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. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(1):110-126.
- Siewert C W, Koenig M, Mecikalski J R. 2010. Application of meteosat second generation data towards improving the nowcasting of convective initiation. *Meteorological Applications*, 17(4):442-451.
- Vila D A, Machado L A T, Laurent H, et al. 2008. Forecast and tracking the evolution of cloud clusters (Fortrace) using satellite infrared imagery: Methodology and validation. *Weather and Forecasting*, 23(2):233-245.
- Walker J R, MacKenzie W, Mecikalski J R, et al. 2012. An enhanced geostationary satellite-based convective initiation algorithm for 0–2 hour nowcasting with object tracking. *J Appl Meteor Climatol*, 51(11):1931-1949.
- Walker J R, Mecikalski J R. 2011. Convective initiation, version 2.0. NOAA NESDIS algorithm theoretical basis document: 1-40.
- Wang C, Chen G T, et al. 2011. Remote trigger of deep convection by cold outflow over the Taiwan Strait in the Meiyu season: A modeling study of the 8 June 2007 case. *Monthly Weather Review*, 139(9):2854-2875.
- Yeh H Y M, Prasad N, Adler R F, et al. 1990. Tabulation of Mie properties for an effective microwave radiative model. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 42(2):105-112.
- Zhang M, Zhang D L. 2012. Subkilometer simulation of a torrential-rain-producing mesoscale convective system in East China. Part I: Model verification and convective organization. *Monthly Weather Review*, 140(1):184-201.