基于 FY-4A 卫星的四川盆地 MCC 初生和成熟阶段特征分析

张琪^{1,2} 任景轩³ 肖红茹^{1,2} 王佳津^{1,2} 肖递祥^{1,2}

- 1 四川省气象台,成都 610071
- 2 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室,成都 610071
- 3 中国人民解放军 78127 部队,成都 610031

摘要 利用高频次 FY-4A 数据资料,研究了四川盆地 2018 年 MCC 初生和成熟阶段的卫星云图特征。结果表明,中尺 度对流复合体 MCC (mesoscale convective complex)对流云团面积在初生阶段和成熟阶段分别以 0~50 个象元 /15min 和 150~200 个象元/15min 的速率增长,最强可达 7000~10000 个象元左右。亮温梯度大值区位于初生阶段的低 空入流区一侧,集中在云顶纹理最为丰富的 240K 等值线附近,最大值为 30~40℃,基本消失于成熟阶段。云顶红外 IR1 (infrared radiation 1 channel)和水汽 IR3 (water vapor channel)最低亮温值在初生和成熟阶段变化趋势一致, 均为初生阶段迅速下降至 190K 左右的最低谷,而成熟阶段维持最低值基本无变化。初生和成熟阶段的 IR1 和 IR3 降温率 CTC(cloud top cooling rate)分布形态相似,初始阶段低空入流区一侧的 240K 等值线附近的降温率达-40K/15min,为显著降温区,成熟阶段的降温幅度普遍升至-25~-10 K/15min。MCC 主体云区初生和成熟阶段的 BTD (brightness temperature difference) 正负值区分界线基本与 221K 等值线重合,最大值分别为 6~10K 和 0~6K,且初始阶段低层入流区的降温最为剧烈,达 15~20K/15min 之多,而成熟阶段基本无变化。

关键词 中尺度对流辐合体 初生阶段 成熟阶段 FY-4A 通道亮温差

中图分类号

文章编号

文献标志码

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

Characteristics of MCC from Convective Initiation to Mature Stage

over Sichuan Basin based on FY-4A data

ZHANG Qi^{1, 2}, Ren Jingxuan³, XIAO Hongru^{1, 2}, WANG Jiajin^{1, 2}, and XIAO Dixiang^{1, 2}

1 Meteorological Observatory in Sichuan Province, Chengdu 610071

2 Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610071

3 Chinese People's Liberation Army 78127 Unit, Chengdu 610031

Abstract The characteristics of MCC(mesoscale convective complex) from convective initiation to mature stage over Sichuan Basin in 2018, were analyzed by the high-frequency FY-4A data. The results indicated that

收稿日期 2020-04-14; 网络预出版日期

- 作者简介 张琪,女,1985年出生,高级工程师,主要从事短时临近天气预报。 Email:zhangqikm@126.com 资助项目 国家自然科学基金重大研究计划集成项目 91937301,中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) XDA23090103
- **Funded by** Integration project of major Research projects of National Natural Science Foundation (Grant 91937301), Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences(Grant XDA23090103)

the area of MCC convective cloud increased at a rate of $0\sim50$ pixels per 15min at the convective-initiation stage and $150\sim200$ pixels per 15min at the mature stage respectively, and finally reached about 7,000 \sim 10,000 pixels. The maximum area of temperature gradient is located on the side of the low-level inflow zone at the convective-initiation stage, which concentrated near the 240K contour with the most abundant texture in the cloud top, with the maximum value of $30\sim40$, and it basically disappears at the mature stage. The variation of the minimum IR1(infrared radiation 1 channel) and IR3 (water vapor channel) at the convective-initiation stage, while the minimum value remains basically unchanged at the mature stage. The distribution patterns of CTC (IR1) (cloud top cooling rate) and CTC (IR3) are also similar. The significant CTC , which is closed the 240K on the side of the low-level inflow zone, reaches -40K/15min at the convective-initiation stage, but it remain stable from -25K to -10K per 15min at the mature stage. The maximum BTD(brightness temperature difference) is $6\sim10$ K at the convective-initiation stage and $0\sim6$ K at the mature stage. Additional, CTC(BTD) in the low-level inflow zone is the most drastic at the convective-initiation stage, while it is remain steady at the mature stage.

Keywords MCC, Convective Initiation, Mature Stage, FY-4A, BTD



1 引言

中尺度对流复合体(mesoscale convective complex, MCC)是发生在中纬度地区的主要强对流天气 系统,往往引发暴雨、龙卷、冰雹和大风等剧烈天气(Maddox et al., 1986)。陶祖钰(1998)、杨本湘(2005)、 江吉喜等(1996)研究均指出,处于青藏高原背风侧的四川盆地是MCC的活跃区,其可能与夏季风及西太 平洋副热带高压移动有关。从环流场看,MCC易发生在西南季风北端、准静止型东西向切变线或锋面的 西端以及 500hPa 西风槽线南端三者的交汇处(Fang,1985; Laing and Fritsch,2000),且高温、高湿与水 汽输送条件较为重要(吕艳彬等,2002)。此外,对流层顶附近的冷中心辐散反气旋、边界层内的辐散中 尺度高压和中层的暖中心气旋性涡旋,三者的高低层配置可产生伴随有凝结的深厚上升运动,利于MCC 的发生发展(许健民等,1998; Miller and Fritsch, 1991)。在移向上,MCC 主要沿 700-500hPa 平均 气流的右侧运动,是假相当位高值的源区方向。

新一代静止气象卫星具有高时空分辨率、连续观测、范围大等优点,是研究中尺度对流系统的新途 径(Durkee et al, 2009;蒋建莹和汪悦国, 2014;张琪等, 2018)。覃丹宇等(2014)总结了对流判识、对流 追踪、初生对流的多光谱云顶特征以及初生对流判据等技术方法,提升了应用理论水平。赵文化等(2018) 将卫星与雷达数据结合使用,在利用红外亮温识别对流云团的基础上,进一步量化了对流云团强度。周 鑫等(2019)利用温度阈值法识别出深、浅对流后,分析比较了两者在对流初生阶段的云顶物理量变化特 征,即云顶高度均在短时间内快速上升、云顶降温率先减小后增大,且深对流云顶上升高度能超越水汽 层高度,深对流降温率最低值比浅对流更低。汪柏洋等(2015)指出中尺度对流系统的初生和成熟阶段均 有快速发展对流 RDC(Rapid Developing Convection),其位于对流云团中对流活动最活跃的部位,可 为单个对流云团,也可为对流体,主要特点是发展时间短、云顶降温率大,表现为云体厚度增加、云顶 亮温急剧下降及云顶相态变化等。

以往大多数学者研究 MCC 侧重分析其生命史、源地、移动路径、强降水及环流背景场等,也有学者 分析过云顶最低黑体温度(Black Body Temperature,TBB)的演变特征,同时业务工作中对卫星云图的 应用分析仍以主观判断和定性外推估算为主,对雷达、卫星联合监测技术及中尺度对流复合体的演变规 律和内部结构的认识还十分有限(Vadas and Fritts, 2004; Gourley et al, 2010)。四川盆地灾害性天气频发, 而影响系统中 MCC 占有较大比例(康岚等,2016),因此本文利用新一代 FY-4A 静止卫星资料,通过研究 MCC 初生和成熟阶段的云团面积、亮温梯度、多个单通道阈值、云顶降温率及通道差等特征,分析不同 阶段、不同强度的物理量特征和阈值量,进而提前判断中尺度对流云团的移向、发展变化,为天气分析 和预报提供高价值线索,提升预警预报的准确率。

2 资料与方法

本文主要使用时间间隔为 4min、空间分辨率为 4km 的 FY-4A 气象卫星资料 (http://satellite.nsmc.org.cn/PortalSite/Default.aspx)进行研究分析,其星下点是(35°N,105° E),全圆盘扫描时间是 15min,具体使用了 FY-4A 多通道扫描成像辐射计(AGRI)的第 10 通道 7.2µm (记为 IR3) 和第 13 通道 12µm(记为 IR1)的亮温数据。

在 Maddox (1980) 对 MCC 定义基础上,参考我国有关研究成果(杨本湘等,2005;康岚等,2016), 结合实际业务工作中的发现,对判断标准做了合理的修订。文中四川盆地 MCC 的判据定为:(1) <221K 冷云区面积≥5×10⁴km²;(2)持续时间≥6h;(3)冷云区的椭圆率≥0.7。以<221K 冷云罩面积≥5×10⁴km² 作为标准来划分初生和成熟阶段,从出现β 尺度云团至达到标准为初生阶段、自满足标准至 221K 冷云 罩面积最大时为成熟阶段。另外,参考卓鸿(2012)识别中尺度对流系统的方法对云团进行自动追踪, 并客观分析四川盆地 MCC 的演变特征。具体做法为:根据 2018 年四川区域暴雨过程(前日 20:00~当日 20:00;四川省气象局,2014;本文均为北京时)获取其对应的卫星资料,然后客观计算<221K 冷云区 的象元数,并依据单位象元面积计算整个冷云区面积;再对≥5×10⁴km²冷云罩面积进行时间序列追踪, 得到目标云团的维持时长;最后根据维持时长≥6h 的目标云团的最大经纬向象元数求得椭圆率。

根据卫星红外通道的透射和吸收特性可知,不同通道的卫星云图所代表的物理意义是不同的。水汽通道与红外通道亮温差反映了对流层上层与近地表层之间的相对距离,赵文化等(2018)定义层差 BTD(brightness temperature difference)为:

3

通常情况下,两通道权重落差导致 BTD 呈明显负值。但在深对流云团(冲顶对流云团)中,由于强 对流云团中水滴和冰晶增多,液态水含量和冰水含量较大,对流云团顶部密实,云顶发射率接近于黑体, 导致红外通道辐射权重高度等于云顶高度,而由于上冲水汽进入逆温区,水汽通道权重高度大于云顶高 度,此时 BTD 逆转为正值。因此,根据此特点不仅可以识别对流云团,还可以设置多个阈值识别对流云 团的强度,此方法称为 BTD 阈值法。

云顶亮温梯度是除云顶亮温之外的另一个云团特征量。云顶亮温梯度越大,表明云顶的纹理越丰富、 起伏越剧烈,即云团内部的对流越活跃。本文使用 3×3 窗口计算云顶亮温梯度,其梯度的计算表达式 为:

 $G = \{ [T(i+1,j) - T(i-1,j)]^2 + [T(i,j+1) - T(i,j-1)]^2 \}^{1/2}$ (2)

其中,T为云顶亮温(单位:℃),i、j为像素点坐标。

另外,云顶降温率 CTC(cloud top cooling rate)的定义为:

$$CTC = IR_{t+1} - IR_t$$

即 t+1 时刻的亮温减去 t 时刻的亮温,当 CTC 为负值时,云顶亮温下降,对流发展。本文主要研究 IR1、 IR3 及 BTD 的降温率。

此外,本地对流云团的形成主要是由云的垂直上升运动和水平移动产生,因此本文使用云像素滤波 方法(汪柏阳等,2015)剔除第二类云团,进而分析 MCC 初生和成熟阶段的卫星云图特征。

3 MCC 初生和成熟阶段的面积变化

采用阈值法定量估算 MCC 面积必须能够满足准确完整描述强对流云团面积变化的要求。若选择的阈 值过高,不但会增加卷云等其他云系的影响,也会导致 MCC 面积偏大,降低强对流云团与环境场的区分 度,影响分析结果;若选择的阈值过低,则会忽略 MCC 初生阶段的面积变化特征,也会导致对流面积偏 小。因此,本研究充分考虑强对流云团各阶段的面积变化特征,选取 221K 为 MCC 面积阈值标准,进行 后续分析研究。

3.1 MCC 面积变化特征

初生阶段, MCC 在云图上主要表现 2 种发展方式:一是多个对流云团合并发展,二是主体云系前端 卷云羽附近对流发展。本文 4 个个例均为多个独立对流云团合并发展而成,其初生和成熟阶段的时间如 表 1 所示。

> 表 1 2018 年 4 次 MCC 个例的初生和成熟阶段 Table 1 The convective initiation and mature stage of the 2018 MCC cases

序号	编号	对流初生的中心位置	中心移向	日期	初生阶段	成熟阶段
1	0521	27.8° N 、104.5° E	北	5月21日	21 日 18:00-21:30	21日21:30-22日03:45
2	0726	28.3° N 、103.5° E	西北	7月26日	26日22:00-27日03:00	27 日 03:00-06:00
3	0801	29.3° N 、107.1° E	西南	8月1日	1 日 16:00-22:00	1 日 22:00-2 日 03:15
4	0802	28.8° N 、105.7° E	稳定	8月2日	2 日 15:00-20:45	2日20:45-3日01:45

云团冷层面积的增减是描述云团发展进程的有效判据。一般而言,最低红外云项亮温不断降低、对流云团面积持续增大,则 MCC 在发展,反之在消亡。由于本文所用卫星数据均为分辨率(4km×4km)相同的格点场,相邻四个格点构成的象元面积是固定的(16km²)。所以,本文使用象元数间接代表 MCC 的面积。图 1(a) 是 MCC 面积时间变化图,就整体而言,MCC 云团面积普遍较大,基本可达 7000 象元,个别可超过 10000 象元,与四川盆地 MCC 发展旺盛的特点相对应(康岚等,2016)。从阶段变化看,个例 1 的对流云团在初生和成熟两阶段的面积均增长迅速,带来的短时强降水站数和小时雨强也随之不断增多(大)(图 1c),而另外 3 个个例的面积变化基本可分为初生阶段缓慢增长和成熟阶段快速增长两个阶段,这种不同程度的增长速率是与对流云团的发生发展相对应的,即初生阶段的对流云团主要以垂直上升运动为主,面积变化相对缓慢,而当云项高度发展到一定高度进入成熟阶段后,对流云团的主要发展

为进一步定量说明 MCC 对流云团的变化特征,本文分析了 MCC 云团面积 15min 变率变化特征(见图 1 (b))。从图中可以看出,初生和成熟阶段的面积变率基本为正值,表明云团持续增大。初生阶段的 MCC 面积基本以小于 50 个象元/15min 的速率增长,而成熟阶段初期的增速可达 150~200 象元/15min,明显高于初生阶段,表明成熟阶段 MCC 面积增大最为明显。随后,MCC 面积变率逐渐减小至 0 附近,此阶段造成的短时强降水面积和小时雨强达最大。

图 1 MCC (a) 面积及其 (b) 变率的时间变化图(竖直线为两阶段分界线)、强降水站数(c,箭头为两阶段分界线) Fig.1 The temporal variation of MCC area (a) and its variability (b), heavy rainfall stations (c). The vertical line is the dividing time between convection initiation and mature stages

3.2 MCC 面积拟合预报方程

鉴于 MCC 对流云团不同阶段面积变化特征规律,通过拟合 MCC 面积-时间函数可有助于判断 MCC 发展的不同阶段。图 2 是 MCC 云团面积随时间变化的拟合曲线(横坐标时间以出现β 尺度对流云团时记为 0min),从图中可看出,四川盆地 MCC 初生和成熟阶段共维持 7h 左右,对流云团面积随时间变化呈准线性增长趋势,但初生阶段呈缓慢增长,而成熟阶段呈快速增大,并最终增长至 8000 象元左右。同时,拟合函数 y =2.6x² +72.6x +721.1 通过了 95%的信度检验,与对流云团面积变化较为一致,能准确的描述 MCC 初生阶段和成熟阶段的对流云团面积变化特征,可为预报四川盆地 MCC 对流云团面积随时间变化及

图 2 MCC 云团面积随时间变化的拟合曲线(竖直线为两阶段分界线) Fig.2 The fitting curve of the cloud area of MCC.

4 MCC 初生和成熟阶段亮温梯度的变化特征



从图 3 可看出,MCC 初生阶段的亮温梯度大值区主要位于对流云团移动方向一侧,可达 30~40℃。 结合环流场看,其主要位于低空(850hPa)入流区和锲状云团的前沿,表明此阶段对流活动较活跃;结 合红外云顶亮温看,其范围主要位于 240K 附近,基本全包或半包于对流云团边缘的 221K 等值线区,说 明 221K 云区云顶纹理最为丰富、起伏也最为剧烈。成熟阶段的红外云顶亮温梯度普遍偏小,个例 1 的 最大亮温梯度也低于 20℃,个例 4 亮温梯度稍强,但仍较初生阶段有明显减弱,这主要是由于成熟阶 段卷云砧的覆盖使得云团云顶纹理平淡,云顶亮温梯度迅速减小,且基本小于 20℃。通过与云顶低亮 温区对比分析还发现,最冷云顶亮温区的云顶亮温梯度较小,一方面是发展旺盛的对流云团云顶高度已 接近对流层顶,本身比较平坦;另一方面,红外云顶亮温低值区会被发散的卷云羽覆盖,而卷云的出现 会进一步削弱对流云体的纹理。

图 3 MCC 个例 (个例 1 (a1、a2), 个例 2 (b1、b2), 个例 3 (c1、c2), 个例 4 (d1、d2)) 初生阶段和成熟阶段的红外 云顶亮温 (阴影,单位: K)、亮温梯度分布 (等值线, 蓝线 30, 红线 40, 单位: \mathbb{C})和 850hPa 风场 Fig.3 The cloud top brightness temperature (shades area, unit: K), temperature gradient (contour line, blue line is 30, red line is 40, unit: \mathbb{C}) and 850hPa wind in the convective initiation and mature stage. case 1(a1、a2), case 2(b1、b2), case 3(c1、c2), case 4(d1、d2)

5 MCC 初生和成熟阶段云顶物理量的变化特征

对流单体发展时,云顶不断升高,导致云顶亮温不断降低,且对流越强,云顶降温率越大,这一特征可以用红外通道亮温、水汽通道亮温阈值及时间变化趋势来描述和检测。探究初生阶段对流云团的云顶物理量特征,可剔除不能强烈发展的局地对流云团,进而了解成熟阶段的云顶物理量特征,准确判断出云团持续时间,对于提高对流性天气预警水平非常关键(马芳等,2007)。

5.1 云顶红外(IR1)最低亮温和水汽(IR3)最低亮温的变化特征

云顶红外亮温是反映云团发展强弱的重要特征量之一,而水汽亮温代表具有一定含量的水汽所能达 到的最高高度。图 4 为 2018 年 4 个 MCC 个例云顶 IR1 和 IR3 最低亮温值时间变化曲线。与对流云垂直 向上延伸发展过程中云顶快速升高相对应,初生阶段 IR1 最低亮温值下降迅速,在几小时内降至最低 (190K 左右)并逐渐稳定。在对流向上发展的卷挟下,水汽层高度快速抬升,表现为初生阶段 IR3 最 低亮温值快速降低,与 IR1 变化一致。总的来看,对流初生阶段云顶高度快速上升、亮温迅速下降,也 是 MCC 出现前期的一种特定状态。

进入成熟阶段, IR1 和 IR3 最低亮温有 2 个显著的变化形态:前期为准稳定下的波动变化、后期为 显著升高变化。前期稳定维持的原因可能是此时云顶高度和水汽高度已达最高,云团发展方向变为水平 扩散,对流云团内部甚至开始出现下沉气流,故 IR1 和 IR3 最低亮温值无明显变化,对应此阶段的短时 强降水范围和小时雨强在整个 MCC 生命史中达到最强。另外, IR1 值普遍比 IR3 值小,对流云团水汽层 权重高度基本都高于云顶高度,上冲水汽进入逆温区,意味着研究的对流云团顶部位于对流层附近或对 流层顶之上。

图 4 MCC 个例(个例 1 (a), 个例 2 (b), 个例 3 (c), 个例 4 (d)) 云顶最低 IR1 和 IR3 随时间的变化 (竖直线为两阶段分界线, 单位: *k*)

Fig.4 The variation of cloud top minimum IR1 and IR3 (unit: K) over time in MCC cases. The vertical line is the dividing line between convection initiation and mature stages. case 1(a), case 2(b), case 3(c), case 4(d)

5.2 IR1 和 IR3 亮温降温率(CTC)

降温率(CTC)是有效代表云团发展剧烈程度的特征量之一,当CTC(IR1)《OK/15min时,表明红 外云顶亮温下降,对流发展。从CTC(IR1)分布图可看出(图5),初生阶段MCC云团CTC(IR1)均为 负值,且普遍小于-15K/15min,而在对流云团发展移动方向前沿的221K等值线附近,CTC(IR1)达到 -40K/15min以上,是对流发展最剧烈、云顶降温最快区域,也是亮温梯度极大值区,主要原因是此区 域对应低空的暖湿空气入流区,是最强上升气流核的前沿,而强烈的上升运动挟卷低层暖湿空气以很陡 的角度上升,一部分向后斜升,一部分直升云顶,加之凝结潜热释放作用,致使红外云顶亮温迅速下降, 且降温更为剧烈。成熟阶段,CTC(IR1)明显减小,数值基本大于-15 K/15min,且在部分区域出现正 变温,表现为正负相间的分布形态。从区域来看,负降温区也逐渐远离240K线附近。

此外,MCC 初始阶段的云团顶部(198K 线)总是偏向强降温率一侧,并且靠近亮温梯度大值区;而 成熟阶段其位置基本处于云团中央位置,但受云团面积、强度发展变化影响,逐渐偏离强降温区且区域 亮温梯度变小。因此,当云团顶部位于强降温区和亮温梯度大值区附近时,预示着对流云团处于初始阶 段,具有较强的上升气流,未来发展旺盛。

图 5 MCC 个例 (个例 1 (a1、a2), 个例 2 (b1、b2), 个例 3 (c1、c2), 个例 4 (d1、d2)) 初生阶段和成熟阶段红外云 顶亮温 IR1 (等值线, 单位: *K*) 其降温率 (阴影, 单位: *K/15min*) 分布 Fig.5 The cloud top brightness temperature (contour line, unit: *K*) and cooling rate (shades area, units: *K/15min*) in the convective initiation and mature stage. case 1(a1、a2), case 2(b1、b2), case 3(c1、c2), case 4(d1、d2)

CTC(IR3)在 MCC 初生和成熟阶段的分布形态与 CTC(IR1)较相似,大值区分布一致性较好(见 图 6)。初始阶段的 240K 等值线附近为显著降温区,CTC(IR3)普遍介于-25~-15 K/15min之间,最低

可达-35 K/15min,降温幅度明显低于 IR1,即初始阶段,IR1 比 IR3 亮温下降更显著,表明对流云团云 顶高度上升速度较水汽层高度上升速度更快。而成熟阶段,CTC(IR3)较初生阶段降低明显,最大仅达 -15 K/15min,小于同时期的 CTC(IR1);从位置来看,伴随降温幅度减小的同时,负降温区也逐渐远

离主体云团。

图 6 同图 5,但为 IR3 Fig.6 Same as Fig.5, but for IR3



总体而言,可发展为 MCC 的对流云团红外云顶亮温和水汽亮温变化较快,初始阶段和成熟阶段的 CTC (IR1、IR3) 均为负值,并以初始阶段下降最为明显,且最明显区域为初始阶段低层入流区一侧。 5.3 IR3 与 IR1 亮温差 BTD

卫星观测资料和辐射传输分析表明,对流云团水汽与红外窗区通道亮温差 BTD 具有显著特征,其可提供云顶高度相对于对流云顶的位置,通常其值为负,BTD 的时间变率可检测积云相对对流云顶的增长情况,直接体现云团在对流层中的增长速度。

5.3.1 空间分布

从 MCC 个例初始、成熟阶段的 IR1 云顶亮温和 BTD 分布图可看出(图7), BTD 正负值区分界线基本 与 221K 等值线重合,低于 221K 区域为 BTD 正值区、高于 221K 区域为 BTD 负值区。初生阶段,正值区 BTD 主要介于 0~3K之间,最高可达 12K,表明云顶发展最高的部分位于云团的主体附近,此时已是发 展至对流层顶或是对流层之上的强对流云团。由于 MCC 系统中上升运动强弱分布不均,BTD 空间分布也 不均,如个例 1、3、4 的 BTD 大值区主要出现在亮温梯度的大值区,而个例 2 则表现不明显。成熟阶段, 个例 1、2、3 的 BTD 主要介于 0~3K 之间,大值不超过 6K,由于个例 4 MCC 为原地生消,且不断有新 对流单体生成、发展,BTD 值略大于其它个例,但整体大值范围较初始阶段明显减小,这也说明,初始 阶段的云团增长速度要大于成熟阶段。总的来看,BTD 极大值出现在初始阶段,集中在 203K 等值线附 近,最大值范围为 6~10K,有的甚至超过 12K,为云团发展增长最为迅速时段。成熟阶段 BTD 减小至 0~ 6K。

图 7 MCC 个例 (个例 1 (a1、a2), 个例 2 (b1、b2), 个例 3 (c1、c2), 个例 4 (d1、d2)) 初生阶段和成熟阶段 IR1 云 顶亮温 (等值线, 单位: *K*) 和 BTD (阴影, 单位: *K*) 分布 Fig.7 The cloud top brightness temperature (contour line, unit: *K*) and BTD (shades area, units: *K*) in the convective initiation and mature stage. case 1(a1、a2), case 2(b1、b2), case 3(c1、c2), case 4(d1、d2)

5.3.2 时间序列变化

BTD 虽不能直接量化对流云团的对流强度,但可以量化其强度等级。图 8 为 MCC 个例中任意点从无

云发展至主云体的 BTD 值随时间的变化。从图中可看出,BTD 的时间变率分布较一致,且变化特征明显, 即缓慢增长(相对稳定)-极速增长-稳定维持的三阶段变化形式。缓慢增长阶段,BTD 起始数值基本保 持在-40~-30K 之间;极速增长阶段,BTD 在 30~60min 时间内陡增至零值附近,最强的时间变化率达 15K/min 之多;稳定维持阶段,BTD 基本在 0~5K 之间波动变化。通过对比分析发现,极速增长阶段属 初始阶段后期,即对流云团在初始阶段已经出现上冲云顶现象,云顶已发展至对流层顶附近;稳定维持 阶段,代表已经进入成熟阶段。

图 8 MCC 个例 (个例 1 (a), 个例 2 (b), 个例 3 (c), 个例 4 (d))的 BTD (单位: K)时间变化图 Fig.8 The temporal variation of BTD (unit: K) in MCC cases. case 1(a),case 2(b), case 3(c), case 4(d)

5.3.3 BTD 的降温率

BTD 值随时间的变率可检测积云相对于对流层项的增长情况,并能反映云在对流层中的增长速度信息。初始阶段(图9),CTC(BTD)与CTC(IR1)分布形态基本一致,较大的正值区出现在对流云团发展移动方向前沿的221K等值线附近,属对流云团的低层入流区,此区域上升速度最大、对流活动最为剧烈,CTC(BTD)值均可达到20K/15min以上;成熟阶段,CTC(BTD)强度减弱,基本保持在0K,个别区域可达10~15K/15min左右。对比来看,CTC(BTD)变化与云团任意一点BTD值的时间序列变化一致,表现为:初始阶段为发展最为强烈、增长最为迅速,而成熟阶段的云团已发展到顶盛,基本保持稳定、不会继续增长。

Fig.9 同图 5,但为 BTD Fig.9 Same as Fig.5, but for BTD

6 结论与讨论

使用高频次的 FY-4A 卫星资料,通过研究四川盆地 2018 年 4 个 MCC 个例的初生和成熟阶段的卫星 云图特征,初步得出特征较显著的多个物理量特征及其阈值,主要结论如下:

(1) MCC 对流云团面积在初生和成熟两阶段均呈不同速度的增长,分别为初生阶段 0~50 个象元/15min 左右的缓慢增长和成熟阶段 150~200 个象元/15min 的快速增加,最大可增长至 7000~10000 个象元左右。

(2)亮温梯度大值区在初生阶段位于低空入流区一侧,集中在云顶纹理最为丰富的 240K 等值线附近,最大为 30~40℃;成熟阶段时云顶纹理平淡,亮温梯度迅速减小至 20℃以下。

(3) IR1 和 IR3 云顶最低亮温值在初生和成熟两阶段的变化趋势较一致,均为初生阶段迅速下降, 于几小时内下降至最低(约 190K)后进入准稳定的波动变化和显著升高变化的成熟阶段。 (4)初始阶段和成熟阶段的 CTC (IR1、IR3)均为负值,初始阶段下降最为明显,最显著区域位 于低层入流区一侧,降温率达-40K/15min;成熟阶段降温区远离 240K 等值线,降温幅度较小,CTC 值 普遍升至-25~-10 K/15min。

(5) MCC 主体云区初生和成熟阶段的 BTD 正负值区分界线基本与 221K 等值线重合,最大值分别为 6~10K 和 0~6K。初始阶段低层入流区的 CTC (BTD) 变化最剧烈,达 15~20K/15min 之多。

本文在前人研究的基础上,增加了 MCC 云顶亮温梯度、单通道和通道差以及云顶降温率等物理量的分析,一定程度上明晰了其量化特征,在业务实践中具有现实指导意义。但由于静止卫星扫描区域受限、个例资料缺测,对流发展过程数据不完整,导致入选研究的个例减少,部分结论还有待更多个例验证及完善。

参考文献(Reference)

- Durkee J D, Mote T L, Shepherd J M. 2009. The contribution of mesoscale convective complexes to rainfall across subtropical South America [J].Journal of Climate, 22(17):4590-4605.
- Fang Zongyi.1985. The preliminary study of medium-scale cloud clusters over the Changjiang basin in summer [J].Advances in Atmospheric Sciences, 2(3):334-340.

Gourley J J, Hong Y, Flamig Z L, et al. 2009. Intercomparison of rainfall estimates from radar, satellite, gauge, and combinations for a season of record rainfall[J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology, 49(3):437-452.

- 江吉喜,项续康,范梅珠. 1996. 青藏高原夏季中尺度强对流系统的时空分布[J]. 应用气象学报,7(4):473-478. Jiang Jixi, Xiang Xukang, Fan Meizhu. 1996. Spatial and temporal distributions of serve convective system on Tibetan Plateau in summer [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 7(4):474-478
- 蒋建莹, 汪悦国. 2014. 卫星水汽图像上两次暴雨过程的干、湿特征对比分析[J]. 气象, 40(6):706-714. Jiang Jianying, Wang Yueguo.2014.Comparative analysis of two severe rainfall events with different dry moist characteristics on satellite water vapor imagery[J].Meteor Mon,40(6):706-714.
- 康岚, 龙柯吉, 黄楚惠, 等.2016.四川中尺度对流复合体特征分析[J]. 西南大学学报, 38(11): 1-7. Kang Lan, Long Keji, Huang Chuhui, et al.2016.The characteristic analysis of mesoscale convective complex over Sichuan regional [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 38(11):1-7.
- Laing A G, Fritsch J M. 2000. The large-scale environments of the global populations of mesoscale convective complexes [J]. Monthly Weather Review, 128 (8):2756-2776

吕艳彬,郑永光,李亚萍,等. 2002. 华北平原中尺对对流复合体发生的环境和条件[J]. 应用气象学报, 13(4):406-412.
Lu Yanbin, Zheng Yongguang, Li Yaping, et al.2002. Environment and conditions of mesoscale convective complex development in north China plain[J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13(4):406-412.

马芳,张强,郭铌,等. 2007. 多通道卫星云图云检测方法的研究[J]. 大气科学, 31(1):119-128. Ma Fang, Zhang Qiang, Guo Ni et al. 2007.The Study of cloud detection with Multi-Channel data of satellite [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31(1):119-128.

Maddox R A. 1980, Mesoscale convective complexes [J]. Bull Amer Meteor Soc, 61:1374-1387.

Weather Forecast Manual[M]. Southwest Jiaotong University Press, 66-74,

- Maddox R A, Howard K W, Bartels D L, et al.1986, Mesoscale convective complexes in the middle latitudes[M]//Mesoscale meteorology and forecasting. American Meteorological Society, 390-413.
- Miller D, Fritsch J M 1991. Mesoseale convective complexes in the Western Pacific region[J]. Monthly Weather Review, 119(12):2978-2992.
- 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. Qin Danyu, Fang Zongyi.2014.Research progress of geostationary satellite-based convective initiation[J].Meteor Mon, 40(1):7-17.
- 四川省气象局. 2014. 四川省天气预报手册[M].西南交通大学出版社,66-74. Sichuan Meteorological Bureau.2014. Sichuan
- 陶祖钰, 王洪庆, 王旭, 等. 1998. 1995 年中国的中 a 尺度对流系统[J]. 气象学报, 56(2):166-177. Tao Zuyu, Wang Hongqing, Wang Xu, et al. 1998. A survey of meso-T-scale convective systems over China during 1995[J]. Acta Meteorologica Sinica(in Chinese), 56(2):166-177.
- Vadas S L, Fritts D C.2004.Thermospheric responses to gravity waves arising from mesoscale convective complexes [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 66(6):781-804.
- 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. Wang Bai yang, Qin Danyu, Liu Chuancai.2015.Detection of rapidly developing convection using FY-2F satellite data[J].Journal of Remote Sensing, 19(5):836-843.
- 许健民,方宗义,卢乃锰,等. 1998. 卫星与雷达图象在天气预报中的应用[M]. 北京:科学出版社, 307-343. Xu Jianmin, Fang Zongyi, Lu Naimeng, et al.1998.Images in weather forecasting-A practical guide for interpreting satellite and radar imagery [M]. Beijing: Science Press, 307-343.
- 杨本湘, 陶祖钰. 2005. 青藏高原东南部 MCC 的地域特点分析[J]. 气象学报, 63(2):236-241. Yang Benxiang, Tao Zuyu.2005. The analysis of local features of MCC on southeast Tibetan Plateau[J]. Acta Meteorologica Sinica(in Chinese), 63(2):236-241.
- 张琪,任景轩,肖递祥,等. 2018. 青藏高原东部初生雷暴云图特征及成因[J]. 气象科技,46(5):943-950. Zhang Qi, Ren Jingxuan, Xiao Dixiang, et al.2018.Satellite image characteristic and formation mechanisms of newborn thunderstorms in eastern Qinghai-Xizang Plateau[J].Meteorological Science and technology, 46(5):943-950.
- 赵文化,单海滨. 2018. 基于红外窗区与水汽通道对流云团识别方法研究[J]. 气象,44(6):814-824. Zhao Wenhua, Shan Haibin.2018.Study of convective cloud identification based on H₂O/IRW observation[J]. Meteor Mon, 44(6):814-824.
- 周鑫,周顺武,覃丹宇,等. 2019. 利用 FY-2F 快速扫描资料分析对流初生阶段的云顶物理量特征[J]. 气象,45(2):216-227. Zhou Xin, Zhou Shunwu, Qin Danyu, et al.2019. Analysis of cloud top features during convective initiation using FY-2F satellite scan data[J]. Meteor Mon, 45(2):216-227.
- 卓鸿,赵平,李春虎,等.2012. 夏季黄河下游地区中尺度对流系统的气候特征分布[J]. 大气科学,36(6):1112-1122. Zhuo Hong, Zhao Ping, Li Chunhu, et al. 2012. Analysis of climatic characteristics of mesoscale convective system over the lower reaches of the Yellow River during summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36(6): 1112-1122.



图 1 MCC (a) 面积及其 (b) 变率的时间变化图(竖直线为两阶段分界线)、强降水站数(c,箭头为两阶段分界线) Fig.1 The temporal variation of MCC area (a) and its variability (b), heavy rainfall stations (c). The vertical line is the dividing time between convection initiation and mature stages



图 2 MCC 云团面积随时间变化的拟合曲线(竖直线为两阶段分界线)





图 3 MCC 个例 (个例 1 (a1、a2), 个例 2 (b1、b2), 个例 3 (c1、c2), 个例 4 (d1、d2)) 初生阶段和成熟阶段的红外 云顶亮温 (阴影, 单位: *K*)、亮温梯度分布 (等值线, 蓝线 30, 红线 40, 单位: ℃)和 850hPa 风场 Fig.3 The cloud top brightness temperature (shades area, unit: *K*), temperature gradient (contour line, blue line is 30, red line is 40, unit: ℃) and 850hPa wind in the convective initiation and mature stage. case 1(a1、a2), case 2(b1、b2), case 3(c1、c2), case 4(d1、d2)



图 4 MCC 个例 (个例 1 (a), 个例 2 (b), 个例 3 (c), 个例 4 (d))云顶最低 IR1 和 IR3 随时间的变化(竖直线为两阶段 分界线, 单位: *k*)

Fig.4 The variation of cloud top minimum IR1 and IR3 (unit: K) over time in MCC cases. The vertical line is the dividing line between convection initiation and mature stages. case 1(a), case 2(b), case 3(c), case 4(d)



图 5 MCC 个例 (个例 1 (a1、a2), 个例 2 (b1、b2), 个例 3 (c1、c2), 个例 4 (d1、d2)) 初生阶段和成熟阶段红外云 顶亮温 IR1 (等值线, 单位: K) 其降温率 (阴影, 单位: K/15min) 分布

Fig.5 The cloud top brightness temperature (contour line, unit: K) and cooling rate (shades area, units: K/15min) in the convective initiation and mature stage. case 1(a1, a2), case 2(b1, b2), case 3(c1, c2), case 4(d1, d2)



图 6 同图 5,但为 IR3 Fig.6 Same as Fig.5, but for IR3







图 7 MCC 个例 (个例 1 (a1、a2), 个例 2 (b1、b2), 个例 3 (c1、c2), 个例 4 (d1、d2)) 初生阶段和成熟阶段 IR1 云 顶亮温 (等值线,单位: K) 和 BTD (阴影,单位: K) 分布

Fig.7 The cloud top brightness temperature (contour line, unit: K) and BTD (shades area, units: K) in the convective initiation and mature stage. case 1(a1, a2), case 2(b1, b2), case 3(c1, c2), case 4(d1, d2)



图 8 MCC 个例 (个例 1 (a), 个例 2 (b), 个例 3 (c), 个例 4 (d))的 BTD (单位: K)时间变化图 Fig.8 The temporal variation of BTD (unit: K) in MCC cases. case 1(a),case 2(b), case 3(c), case 4(d)



Fig.9 同图 5,但为 BTD Fig.9 Same as Fig.5, but for BTD



