

2007年夏季川渝与江淮流域 MCS分布与日变化特征

祁秀香^{1,2,3,4} 郑永光^{2,3}

(1. 广州市南沙区气象局, 广州 511458; 2. 国家气象中心;
3. 中国气象局武汉暴雨研究所; 4. 南京信息工程大学 江苏省气象灾害重点实验室)

提 要: 2007年夏季川渝地区及江淮流域持续性降水、极端强降水和强对流事件频发。利用强暴雨发生时段2007年6月28日至7月26日逐时FY-2C红外TBB资料对这两个地区及周边区域(25°~38°N、100°~130°E)进行普查,共获得570个生命史 ≥ 3 小时的中尺度对流系统(MCS)。MCS的定义为 -52°C TBB闭合等值线内 $\text{TBB} \leq -52^{\circ}\text{C}$ 的面积 $\geq 400\text{km}^2$,不区分形状与生命史。MCS识别由计算机自动完成,MCS追踪由人工完成。普查结果发现,云南西北部至四川西部、四川东部与重庆、云贵高原东部和广西北部山区至洞庭湖、淮河流域四个区域是MCS活跃区,但淮河流域又有三个波动状MCS活跃中心。普查区域内总体MCS和川渝地区活动最频繁的MCS持续时间为3~7小时,但江淮流域活动最频繁的MCS生命史为4~9小时。按时间尺度将570个MCS分成三类,第一类MCS生命史3~5小时,第二类MCS生命史6~11小时,第三类MCS生命史 ≥ 12 小时。三类MCS的地理分布特征及触发机制各不相同:第一、二类MCS在西太平洋副高平均位置的内、外侧都有发生,它们的发生、发展及移动受中尺度因素影响明显,可能与地形、中尺度辐合线等有关;第三类MCS发生在西太平洋副热带高压平均位置的外侧,其发生、发展及移动路径受天气尺度环境控制因素显著。三类MCS日变化具有明显不同的日变化特征。三类MCS的形成高峰都出现在午后。第一类MCS无显著的夜发性特征,第二、三类MCS有较显著的夜发性特征。第一、二类MCS在午后最活跃,但第三类MCS活动最活跃时段在下半夜(18UTC)。川渝地区和江淮流域的MCS都具有多峰型日变化特征,但二者的活跃时段有所不同。本文还给出了2个引发强降水的MCS典型个例及1个长生命史MCS演变特征。

关键词: 中尺度对流系统 地理分布 移动路径 日变化

项目资助: 国家重点基础研究 973 项目(编号: 2004CB418300)、武汉暴雨研究所暴雨研究开放基金项目 IHR2008K02、国家自然科学基金项目 40875019 共同资助

收稿日期: 2008年12月31日; 修定稿日期: 2009年8月17日

Distribution and Diurnal Variations of the MCS over Sichuan-Chongqing Area and Yangtze-Huaihe River Basin During the Summer of 2007

Qi Xiuxiang^{1,2,3,4} Zheng Yongguang^{2,3}

(1. Nansha Meteorological Office of Guangzhou, Guangzhou 511458;

2. National Meteorological Center; 3. Wuhan Institute of Heavy Rain of China Meteorological Administration;

4. KLME, Nanjing University of Information Science and Technology)

Abstract: The extremely heavy rainfall, persistent rainfall and severe convective weather events occurred frequently over Sichuan-Chongqing Area and Yangtze-Huaihe River Basin during the summer of 2007. Based on the FY-2C TBB (equivalent temperature of black body) dataset during 28 June—26 July 2007, the 570 MCSs (mesoscale convective systems) with life-cycle greater than 3 hours were investigated over the former two areas and adjacent areas ($25^{\circ}\sim 38^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$). There were four active-MCS areas; the area from the western Sichuan Province to northwestern Yunnan Province, the eastern Sichuan Province and Chongqing City, the eastern Yunnan-Guizhou Plateau and the area from northern Guangxi Zhuang Autonomous Region to Dongting Lake and the Yangtze-Huaihe River Basin (YHRB), and there were three minor active-MCS areas over the YHRB active-MCS area. The modal duration of the total MCSs and those over Sichuan-Chongqing Area were approximately 3~5 hours, but the modal duration of the MCSs over Yangtze-Huaihe River Basin was about 5~8 hours. The MCSs were classified as three types by the time scale of MCS; the first type of MCS has a life cycle of 3~5 hours, the life cycle of the second MCS type is 6~11 hours and the life cycle of the third MCS type ≥ 12 hours. The trigger mechanisms of the three MCS types were different; the first and second MCS type could occur inside and outside the mean location of the West Pacific subtropical high, and their occurrence, development and movement were obviously influenced by the mesoscale weather systems and may be related to the factors such as topography and mesoscale convergence lines; the third MCS type occurred outside the mean location of the West Pacific subtropical high, and its occurrence, development and movement were obviously influenced by the large-scale synoptic systems. The diurnal variations of the three MCS types were also obviously different. The peaks of the three MCS types all occurred in the afternoon. However, the first MCS type had no obviously nocturnal occurrence, but the second and third MCS type had a nocturnal occurrence characteristic. The most active peak of the first and second MCS type was both in the afternoon, but the most active peak of the third MCS type was after midnight (about 18UTC). Both the MCSs over Sichuan-Chongqing Area and Yangtze-Huaihe River Basin had multiple active periods in a whole day, but the active periods of the MCSs over two areas were different. Finally, two typical MCSs causing heavy rainfall and one long-duration MCS were presented.

Key Words: mesoscale convective system (MCS) geographical distribution tracks diurnal variations

引 言

暴雨、洪涝、雷暴和龙卷等经常由中尺度对流系统(简称 MCS, Mesoscale Convective Systems)造成^[1-3]。Velasco 等^[4]、Miller 等^[5]、Laing 等^[6]对南美洲,西太平洋和非洲的 MCC(Mesoscale Convective Complexes, 中尺度对流复合体)进行了普查,发现中纬度地区的 MCC 几乎全部发生于大陆地区,特别是大地形的下风方,而很少生成于临近大陆的温带洋面。方宗义^[7]、李玉兰等^[8]和项续康等^[9]普查了我国西南、华南等地的 MCC;尹承美等使用常规观测资料、地面加密资料和 FY-2 产品对济南市“7. 18”大暴雨的天气形势、云图演变特征及中尺度系统发生、发展和移动的情况进行了分析^[10],郑媛媛等利用雷达、卫星、闪电定位仪及 NCEP 资料分析了 2007 年 7 月 8 日在安徽沿淮西部出现的特大暴雨过程的中尺度特征^[11],易笑园等分析了华北飚线系统中地闪活动与雷达回波顶高的关系及预警指标^[12],钱传海等利用多种观测资料和数值模拟,对 0604 号强热带风暴碧利斯登陆后在湖南、广东等地引发强降水的中尺度对流系统活动特征进行了分析^[13]。马禹等^[14]统计普查了 1993—1995 年夏季中国及其邻域的 MCS,共得到 234 个 α 中尺度(简称 M_{α} CS)和 585 个 β 中尺度的(M_{β} CS)的对流系统,青藏高原下风方的中国西南部及其毗邻的越南北部、黄河中下游地区、渤海以及朝鲜半岛、日本都是 MCS 的多发区。郑永光等^[15-16]发现黄海及周边地区是一个 MCS 的多发区。费增坪等^[17-18]发现 2003 年淮河大水期间有相当比例的 MCS 出现在凌晨。

2007 年夏季我国暴雨和强对流事件频发,淮河流域发生超过 2003 年仅次于 1954 年的大洪水,多个城市和地区(例如济南、重

庆等)遭遇历史罕见暴雨袭击。我们曾利用逐时 FY-2C(风云 2 号 C 星)TBB 对 2007 年 6—8 月我国深对流活动的时空演变特征进行了分析^[19],但并未进行 MCS 的识别与追踪分析研究,因此本文使用逐时 FY-2C TBB 资料进一步对 2007 年夏季川渝和淮河流域地区 MCS 进行识别与追踪,以分析 MCS 的移动路径、生命史长度、空间分布以及日变化特征,从而为该区域强对流和暴雨天气的临近预报提供一定参考。

1 资料、普查区域和方法

本文所用资料为国家卫星气象中心中国遥感数据网提供的 2007 年 6 月 28 日至 7 月 26 日 FY-2C 地球静止卫星 TBB 资料,资料时间分辨率为 1 小时,水平分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 。

本文的普查区域为 $25^{\circ} \sim 38^{\circ}N$ 、 $100^{\circ} \sim 130^{\circ}E$,包括川渝地区、江淮流域、云贵地区及我国东部海域,其中本文所称的川渝地区为 $26^{\circ} \sim 33^{\circ}N$ 、 $100^{\circ} \sim 109^{\circ}E$ 地理范围,包含了四川省和重庆市;江淮流域的经纬度范围为 $30^{\circ} \sim 35^{\circ}N$ 、 $110^{\circ} \sim 122^{\circ}E$ 。普查的对象是在此期间发生、成熟和消亡过程中经过该区域、生命史 ≥ 3 小时的 MCS。

根据 Augustine 等^[20]、Jirak 等^[21]提出的使用 $-52^{\circ}C$ TBB 来识别 MCC 标准,本文利用 $TBB = -52^{\circ}C$ 的闭合等值线来识别 MCS。如果 $-52^{\circ}C$ TBB 闭合等值线内 $TBB \leq -52^{\circ}C$ 的面积 $\geq 400km^2$ 则识别为一个 MCS,不区分形状与生命史,这样普查得到的 MCS 包含了 M_{α} CS 和较大尺度的 M_{β} CS。本文中的 MCS 识别由计算机自动完成, MCS 的追踪由人工完成。由于 2007 年 6 月 28 日至 7 月 26 日生命史 < 3 小时的 MCS 数量较多,因此本文仅对生命史 ≥ 3 小时的 MCS 进行了普查分析,总共得到 570 个生命

史 ≥ 3 小时 MCS。根据 Maddox^[1]、Augustine 等和 Anderson 等^[20,22]对 MCC 的判断标准,本文获得的 570 个 MCS 中有 20 个 MCS 符合 MCC 尺寸及生命史标准。

为了分析不同尺度 MCS 时空尺度分布特征,根据尺度分析的理论,水平尺度大的 MCS 其时间尺度也比较长^[23],因此我们按时间尺度将 MCS 分为三类:第一类 MCS 生命史为 3~5 小时;第二类 MCS 生命史为 6~11 小时;第三类 MCS 生命史 ≥ 12 小时。Miller 等^[5]分析西太平洋地区 MCC 的平均持续时间约为 11 小时,活动最频繁的 MCC 生命史为 9 小时,因此本文中生命史 ≥ 12 小时第三类 MCS 代表的是水平尺度较大的 M_{α} CS;其它两类 MCS 基本代表的是不同水平尺度的 M_{β} CS,也包含少量时间尺度较短的 M_{α} CS。

本文对 MCS 日变化特征的分析方法是分别分析 MCS 的形成、成熟及总体数目日变化特征。MCS 形成日变化特征分析是把普查得到的 MCS 形成时刻按每个时次(00—23UTC 共 24 个时次)分别统计 MCS 数目,得到 MCS 形成日变化曲线。MCS 成熟日变化特征分析是把普查得到的 MCS 成熟时刻按每个时次分别统计 MCS 数目,得到 MCS 成熟日变化曲线。MCS 总体数目日变化特征分析是把普查得到的 MCS 按每个时次分别统计 MCS 数目,得到 MCS 总体数目日变化曲线。

MCS 形成日变化特征可以揭示 MCS 的形成高峰时次以及 MCS 的生成是具有单峰型还是多峰型特征;MCS 成熟日变化特征可以揭示 MCS 的成熟高峰时次以及 MCS 成熟的日变化曲线特征;MCS 总体数目日变化特征可以揭示 MCS 在哪些时段较为活跃、哪些时段较不活跃。

2 MCS 的总体分布特征

2.1 MCS 地理分布

2007 年 6 月 28 日至 7 月 26 日 25°~38°N、100°~130°E 区域内 570 个生命史 ≥ 3 小时的 MCS 移动路径见图 1a(见彩页)。图 1a(见彩页)中 MCS 的起始位置都是从其达到 MCS 普查的面积标准(TBB $\leq -52^{\circ}\text{C}$ 的连续冷云盖面积 $\geq 400\text{km}^2$)开始,路径中的实心圆点是 MCS 形成位置,箭头代表 MCS 移动方向,终止位置为 MCS 消亡位置。

从 MCS 的移动路径来看,形成于川渝地区的 MCS 大多在源地消亡,只有极少数移出该区域,并在长江上游地区消亡。形成于云贵高原东部和广西北部山区至洞庭湖的 MCS 大多沿对流层中低层引导气流向东北方向移动至江淮流域,极少数向南移动,在我国云贵高原南部消亡。形成于淮河流域的 MCS 大多沿对流层中低层引导气流东移,并在源地附近消亡,只有少数东移入海,这与文献^[17~18]结果一致。

图 1a(见彩页)与图 1b(见彩页)都表明四川西部至云南西北部、四川东部与重庆、云贵高原东部和广西北部山区至洞庭湖、淮河流域四个区域是 MCS 活跃区,这与文献^[19]结果一致。但需要指出的是,MCS 的成熟位置分布表明淮河流域又呈现出三个 MCS 活跃中心,并呈波动状分布特征^[28],这可能与该区域内的地势分布有关。对比 2007 年 6 月 28 日至 7 月 26 日期间 500hPa 平均位势高度场(图 1b,见彩页)可见 MCS 活跃区域都在平均 586dagpm 等值线外围,这表明副热带高压的稳定维持对 MCS 的发生、发展提供了重要的天气尺度环境条件;但需要指出的是,湖北中西部虽然位于副高平均位置的外围但并不是 MCS 活跃区,这可能与该区域的地势分布及大尺度天气环流有

关,不过这有待于进一步分析。

项续康等^[9]曾指出,强降水主要产生于 MCC 的成熟阶段。费增坪等^[17]也认为 MCS 成熟位置的主要降水时段位于淮河流域及其邻近地区是引发淮河大水的重要原因。2007 年 7 月淮河的流域性大洪水,四川、重庆也遭受强暴雨袭击,因此, MCS 的成熟位置集中在这两个区域是该区域强降水产生的直接原因。

2.2 MCS 持续时间及最大冷云盖面积分布特征

Miller 等^[5]分析了西太平洋地区 MCC 的持续时间及最大冷云盖面积分布特征。为

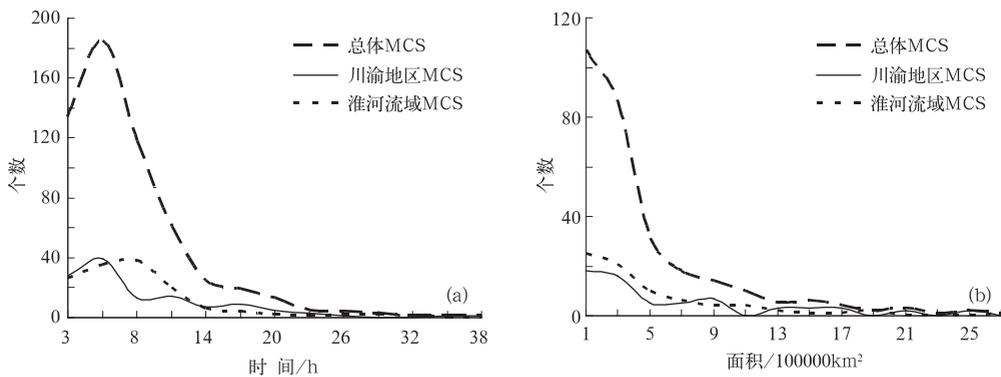


图 2 2007 年 6 月 28 日至 7 月 26 日 MCS 持续时间与最大冷云盖面积分布分布
(a)持续时间分布;(b)最大冷云盖面积分布

图 2b 显示,本文普查区内总体 MCS、川渝地区 MCS 及淮河地区 MCS 最大冷云盖面积分布具有相似的特征,活动最频繁的 MCS 的最大冷云盖面积主要在 $1 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5 \text{ km}^2$ 范围内,最大冷云盖面积超过 $5 \times 10^5 \text{ km}^2$ 的 MCS 数目较少。

3 三类 MCS 地理分布

不同尺度的大气环流对不同尺度 MCS 发生发展具有不同的影响,本部分将分别讨论三类不同时间尺度 MCS 地理分布特征的

了解 2007 年夏季本文普查区域内 MCS 的上述两类特征,我们也给出了普查区域内总体 MCS 及两个 MCS 活跃区域川渝地区和江淮流域的 MCS 持续时间和最大冷云盖面积分布特征,这可为该区域内 MCS 的临近和短时预报提供一定参考。

图 2a 表明本文普查区域内总体 MCS 和川渝地区 MCS 有类似的持续时间分布特征,两者活动最频繁的 MCS 持续时间为 3~7 小时。但江淮流域活动最频繁的 MCS 生命史为 4~9 小时,这表明 2007 年夏季江淮流域大多数 MCS 持续时间相对偏长是导致该区域暴雨频繁发生的重要原因。

异同,并结合 500hPa 平均位势高度场分布进行分析。

第一类 MCS 生命史为 3~5 小时,共发生 318 个,占 MCS 总数的 56%,是发生最多的 MCS。这符合对流系统尺度越小、发生频率越高的一般规律。图 3a 表明 2007 年普查区域的第一类 MCS 具有几个活跃中心,分别为四川西部、重庆、云贵高原南部和广西北部交界山区及淮河流域。另外,浙江、福建以及黄海也有较多此类 MCS 发生,但东海海域 MCS 发生数目较少。此类 MCS 由于生命史短,大多在源地附近消亡,只有形成于

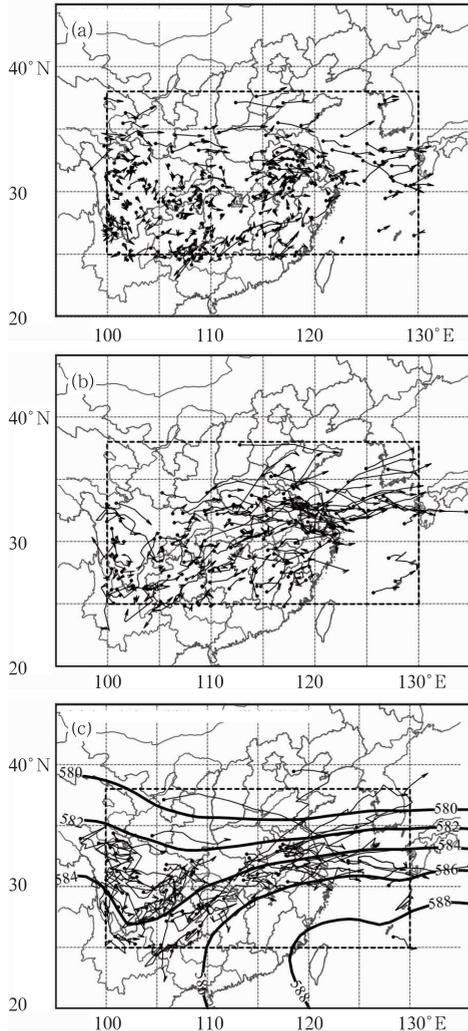


图 3 2007 年 6 月 28 至 7 月 26 日普查区域(粗划线矩形)内三类 MCS 移动路径
(a)第一类 MCS(生命史 3~5 小时)移动路径;
(b)第二类 MCS(生命史 6~11 小时)移动路径;
(c)第三类 MCS(生命史 ≥ 12 小时)移动路径
(粗实线为 500hPa 平均位势高度场,单位:10gpm)

黄海的此类 MCS 具有明显的东移特征。

第二类 MCS 生命史为 6~11 小时,共发生 176 个。由图 3b 可见,此类 MCS 多集中在淮河流域下游,其次是四川盆地西部及贵州东、南部至洞庭湖。另外,江南丘陵及黄海也有一定数量第二类 MCS 发生。形成于淮河流域的此类 MCS 大多在源地附近消

亡,部分东移入海;形成于四川盆地的此类 MCS 大多在源地附近消亡,少数向南传播并在云南消亡;形成于贵州东部和南部至洞庭湖及江南丘陵的此类 MCS 沿对流层中低层引导气流向东北方向移动。

第三类 MCS 尺度较大,生命史 ≥ 12 小时,总共发生 73 个,是三类 MCS 中发生数目最少的一类。由图 3c 可见,此类 MCS 大多集中在四川盆地西部、重庆和淮河流域,其中发生在四川盆地和重庆的约占该类 MCS 的 50%(36 个)。其次,淮河流域是此类 MCS 的第二高发区,发生在该区域的 MCS 约占该类 MCS 的 23%(17 个)。另外,云贵高原东部向东北方向沿山脉(武陵山和雪峰山)走向至洞庭湖也有较多此类 MCS 发生,约占此类 MCS 的 15%(11 个)。形成于四川盆地西部和重庆的此类 MCS 移动路径较短、大多在源地附近消亡。形成于云贵高原东部—洞庭湖的 MCS 大多沿西太平洋副高西北侧的西南引导气流移动,移动过程中消亡于江淮流域。形成于淮河流域的此类 MCS 大多沿西太平洋副高北侧的引导气流东移入海。

对比 MCS 移动路径与 500hPa 平均高度场可以看到,第一、二类 MCS 在西太平洋副高平均位置的内、外侧都有发生,它们的发生、发展及移动受中尺度因素影响明显,可能与地形、中尺度辐合线等有关。105°E 以东的第三类 MCS 主要发生在西太平洋副热带高压平均位置的外围,与高空槽的平均位置关系密切,其移动方向受副高西北侧的西南引导气流引导;这说明第三类 MCS 的发生发展及移动路径主要受大尺度大气环流系统控制。

4 MCS 日变化特征

4.1 普查区域 MCS 的总体日变化特征

MCS 活动具有明显的日变化特征^[20-24]。

图 4 为 2007 年 6 月 28 日至 7 月 26 日普查区的 MCS 形成、成熟及总体数目的日变化特征曲线。图 4 表明 MCS 大多数形成于午后(06—08UTC)。另外,在夜间有三个较小的 MCS 形成峰值,分别出现在 14UTC、17UTC、21UTC。午后形成的 MCS 在形成后 2~3 小时成熟。MCS 最活跃的时段在 08—09UTC。另外,在凌晨也有一个 MCS 的活跃次峰值(21—22UTC)。

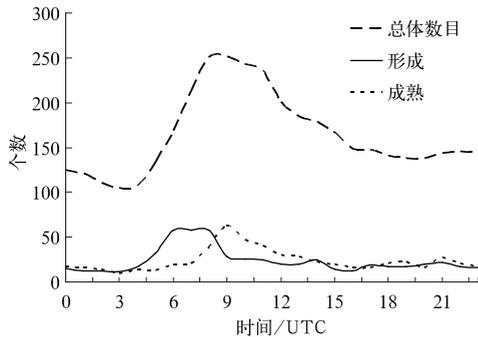


图 4 2007 年 6 月 28 至 7 月 26 日普查区域内 MCS 形成、成熟及总体个数的日变化曲线

4.2 三类 MCS 的日变化特征

图 5 为第一、二、三类 MCS 的日变化特征曲线图。

第一类 MCS(生命史为 3~5 小时)的形成、成熟及总体数目具有显著的日变化特征。由图 5a 可见,此类 MCS 多数在午后(06—08UTC)形成。午后形成的此类 MCS 在生成后 2~3 小时成熟,夜间形成的 1~2 小时成熟。第一类 MCS 在午后(08—09UTC)活动旺盛,尤其在 09UTC 该普查区内此类 MCS 最为活跃。另外,在夜间和凌晨此类 MCS 的形成、活动、成熟峰值比第二、三类 MCS 要小得多,可见此类 MCS 主要在午后发生发展,夜发性特征不显著。因此这类 MCS 可归类为热对流^[28]天气系统。

第二类 MCS(生命史为 6~11 小时)形成、成熟及总体数目都具有显著的日变化特征。由图 5b 可见,这类 MCS 的形成具有多

峰特征,其中最显著的形成峰值出现在午后(7UTC)。另外,傍晚(12—14UTC)、午夜(17UTC)及凌晨(22UTC)也有较明显的小峰值,表明此类 MCS 的多发时段为午后,同时具有夜发性和凌晨形成的特点。午后形成的这类 MCS 在生成后 3 小时达到成熟,在夜间生成的 MCS 要 5~8 小时才能成熟,并且大多成熟于凌晨(21—22UTC)。第二类 MCS 在午后(08—09UTC)活动最旺盛,同时

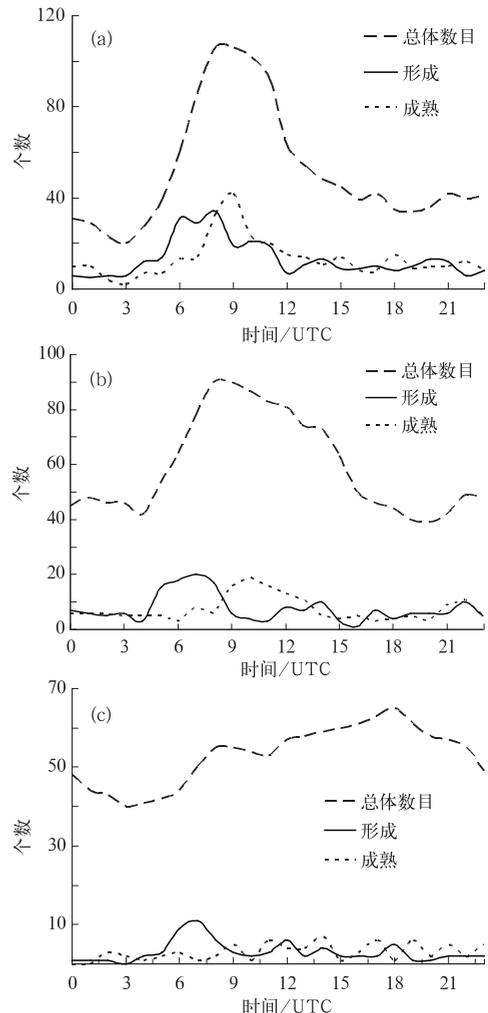


图 5 2007 年 6 月 28 日至 7 月 26 日普查区域内三类 MCS 的形成、成熟及其总体数目日变化特征曲线

(a) 生命史 3~5 小时 MCS; (b) 生命史 6~11 小时 MCS; (c) 生命史 ≥ 12 小时 MCS

在凌晨也有一个较明显的 MCS 活动的小峰值。这表明该类 MCS 具有一定的夜间活跃特征。

第三类 MCS(生命史 ≥ 12 小时)形成和总体数目具有明显的日变化特征,而此类 MCS 的成熟日变化特征并不明显。由图 5c 可见,这类 MCS 在午后(07UTC)形成最多,在日落后和夜间也有明显的 MCS 形成峰值,分别出现在 12UTC、14UTC、18UTC,表明这类 MCS 主要形成在太阳辐射最强的午后,且有一定的夜发性。第三类 MCS 成熟时刻无显著的日变化特征。该类 MCS 的总体数目日变化表现出明显双峰特征,两个峰值分别出现在日落前(08—09UTC)和夜间(18UTC),其中 18UTC 该类 MCS 活动最活跃,说明该类 MCS 具有夜间比较活跃的特征。

4.3 川渝地区 MCS 日变化特征

下垫面不同,MCS 的日变化特征也有所不同^[27-28]。2007 年川渝地区和江淮流域暴雨洪涝灾害严重,但这两个地区具有不同的

地理环境条件,因此本部分将分别讨论这两个地区的 MCS 的发生、成熟及总体数目的日变化特征,以便了解这两个区域 MCS 的日变化特征的异同。

图 6a 是川渝地区 MCS 的形成、成熟及总体数目的日变化特征曲线。图 6a 表明,川渝地区 MCS 在午后 07—08UTC 存在一个明显的多发时段,但在日落后(12UTC)还有一个更明显的形成高峰。另外,该区域在夜间也出现了多个 MCS 形成次峰,分别为 15UTC、17UTC 及 21UTC,表明该区域 MCS 大多形成于午后和日落后,尤其是日落后是 MCS 的高发时段,上午 MCS 发生的频率最小,并具有一定的夜间和凌晨发生的特点。该地区午后形成的 MCS,大多在形成后 2 小时达到成熟,而在日落后形成的 MCS 大多成熟于夜间、凌晨及清晨,上午达到成熟的最少。日落前后(09—10UTC)是该区域 MCS 活动最旺盛的时段,夜间和凌晨也有较明显的 MCS 活动,上午时段该区域 MCS 最不活跃,这与文献[28]的研究结果一致。

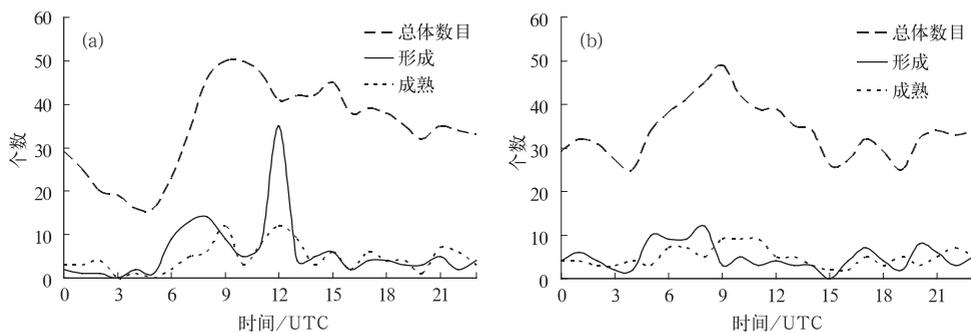


图 6 2007 年 6 月 28 日至 7 月 26 日两个区域(a)川渝地区;(b)江淮流域的 MCS 的形成、成熟及总体数目日变化特征曲线

4.4 江淮流域 MCS 日变化特征

图 6b 为江淮地区 MCS 日变化特征曲线图。淮河流域的 MCS 大多产生于午后到

傍晚(05—09UTC),而在下半夜(17UTC)、凌晨(20—21UTC)和上午(01UTC)也有明显的 MCS 形成峰值。这表明该区域 MCS 具有较明显的夜间、凌晨及上午发生特征。

该区域上午形成的 MCS 在形成后约 3 小时成熟,午后形成的 MCS 大多在形成后约 1~3 小时成熟,而夜间形成在形成后约 2~5 小时成熟。淮河流域 MCS 活动在日落前(09UTC)最旺盛,另外在午夜(17UTC)和凌晨(21UTC)及上午(01UTC)都有明显活跃时段。

川渝地区和江淮流域的 MCS 的日变化特征表明两个区域 MCS 活跃时段都具有多峰型特征,这种 MCS 日变化特征与文献[28]分析结果类似。但两个区域 MCS 发生发展时段有所不同。川渝地区 MCS 的形成高峰时段在日落后,午后也有较明显的 MCS 形成峰值,上午 MCS 形成的频率最低,具有一定的夜间和凌晨形成的特征;日落前后(09—10UTC)是 MCS 最活跃的时段。淮河流域的 MCS 大多形成于午后到傍晚,上午也有较明显的形成峰值,夜间和凌晨形成特征比川渝地区更加显著;MCS 在 09UTC 最活跃,另外在午夜和凌晨及上午时段都有较明显活跃时段。需要指出的是,江淮流域和川渝地区 MCS 最活跃时段相差约 1 个小时(江淮流域为 09UTC,川渝地区为 09—10UTC),这与两地的地方时约有 1 个小时时差有一定关系。

5 三个典型 MCS 个例

5.1 2007 年 7 月 7—9 日南京大暴雨个例

2007 年 7 月 7—9 日,南京地区出现强降水过程,降水主要集中在江宁、南京和江浦。7 日 09—10UTC 江浦站的 1 小时降水达到 70.6mm,为建站以来 1 小时降水量历史最高值。江宁、江浦和南京市 48 小时的降水量就已经超过了梅雨量的常年平均值(南京地区梅雨平均值在 250mm 左右)。这

次过程降水主要集中在 7 日 08—14UTC 及 7 日 23UTC 至 8 日 05UTC 两个时段,FY-2C 红外云图表明这次强降水过程的两个阶段是由江淮梅雨锋上两次 M_a CS 引发,本文给出第一次 M_a CS 发展演变过程(图 7a,见彩页)。

2007 年 7 月 7 日 07UTC 南京及其上游(安徽东部)分别形成 1 个 M_b CS(图 7a,见彩页),7 日 08UTC 安徽境内的 MCS 东移入南京上空,并与南京较强的 MCS 合并,之后在南京上空继续发展。7 日 10UTC 南京的上游区域安徽中部再次形成一个 M_b CS 并向东移动。7 日 11UTC 安徽 M_b CS 并入在南京上空不断发展旺盛的 MCS 并形成 M_a CS,其 -52°C 冷云盖面积由 07UTC 的 10528km^2 增长至 76879km^2 ,云顶最低亮温也从 -67.6°C 降低至 -77.3°C 。7 日 12UTC 该 MCS 云顶亮温达到最低,为 -79.5°C ;7 日 14UTC(图 7a,见彩页) -52°C 冷云盖面积达到最大,为 113301km^2 。7 日 19UTC 该 MCS 东移入海,南京地区该次暴雨过程的第一阶段强降水结束。

5.2 2007 年 7 月 17—18 日重庆大暴雨个例

2007 年 7 月 17—18 日,重庆遭受暴雨袭击,铜梁、璧山、沙坪坝 17 日降水量分别达到 179.5mm、258.0mm 和 262.8mm,为有气象记录以来日降雨量的最大值,其中沙坪坝为 1892 年以来的最大值。这次大暴雨过程降水主要集中在 7 月 16 日 19UTC 至 17 日 09UTC 及 17 日 20UTC 至 18 日 07UTC 两个时段,FY-2C 红外云图表明此次过程是两个阶段由两次 M_a CS 长时间在重庆上空维持引起的,本文给出第一次 M_a CS 发展演变过程(图 7b,见彩页)。

16 日 16UTC 重庆西部形成一个 M_b CS

(图 7b, 见彩页), 其 -52°C 冷云盖面积为 14858.1km^2 , 云顶最低亮温为 -69.4°C , 此 MCS 不断发展增强并稍微向东南方向移动, 3 小时后 (19UTC) 重庆西部暴雨开始。16 日 23UTC 该 MCS 的云顶亮温达最低, 为 -93.2°C , 17 日 04UTC 其 -52°C 冷云盖面积达到最大(图 7b, 见彩页), 为 137981km^2 , 之后此 MCS 逐渐减弱, 17 日 10UTC 分裂减弱消亡, 重庆第一阶段大暴雨结束。虽然该 MCS 生命史长达 19 小时, 但由其移动路径来看其移动距离短、在重庆上空稳定维持以及较强的上升运动 (TBB 最低达 -93.2°C) 是导致重庆 17 日降水量创历史纪录的直接原因。

5.3 一个长时间维持的 MCS 个例

2007 年 6 月 28—29 日发生在川渝地区的一个 MCS, 其持续时间长达 38 小时, 整个生命史期间两次改变移动方向, 并伴随两次发展过程。图 7c 与图 7d 是该 MCS 的发展演变过程。

6 月 28 日 09UTC 在四川盆地中南部形成 5 个 M_{β} CS(图 7c, 见彩页), 并向东南偏东方向移动, 28 日 11UTC 4 个 MCS 在四川盆地东南部合并为一个 M_{α} CS, -52°C 冷云盖面积达到 54284km^2 , 云顶最低亮温达 -83.9°C , 之后在缓慢东移的过程中迅速发展; 至 28 日 15UTC 该 MCS 冷云盖形状近似圆形, 其面积增大至 116431km^2 , 云顶最低亮温为 -89.9°C ; 28 日 16UTC 该云团的传播方向由自西向东转变为向东北方向移动并继续发展; 28 日 19UTC 此 MCS 位于重庆上空, 其形状也从近似圆形变为东北—西南向的椭圆形, -52°C 冷云盖面积达到 226673km^2 , 云顶最低亮温为 -93.2°C ; 之后 11 小时 (28 日 20UTC 至 29 日 06UTC) 该

MCS 一直维持在重庆及贵州东北部, 但 -52°C 冷云盖面积逐渐减小, 对流活跃性减弱。29 日 06UTC (图 7d, 见彩页) 冷云盖形状由椭圆形变为带状, 此带状 MCS 轴线与下垫面山脉走向一致, 呈东北—西南向, 冷云盖面积减小为 65852km^2 , 云顶最低亮温为 -81.2°C 。29 日 07UTC 此 MCS 再一次改变移动方向, 由向东北方向移动转变为向南移动, 并且在向南移动的过程中再次发展, 29 日 18UTC (图 7d, 见彩页) 此 MCS 南移至云南、贵州、广西及越南交界处, 冷云盖面积达到最大, 为 244085km^2 , 云顶最低亮温为 -93.2°C , 此后继续向南移动, 5 小时之后 (6 月 30 日 00UTC) 在越南北部分裂消亡。

如本文第三部分所述, 长生命史 MCS (≥ 12 小时) 的演变主要受大尺度环流背景控制, 因此该长生命史 MCS 的演变过程表明 MCS 在大尺度环流背景控制下可以呈现为发展、减弱、再重新发展的生命史特征。

6 结论与讨论

本文利用 2007 年 6 月 28 日至 7 月 26 日川渝地区与江淮流域持续暴雨期间 FY-2C TBB 资料, 对 $25^{\circ}\sim 38^{\circ}\text{N}$ 、 $100^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$ 内的 MCS 进行普查分析, 得到如下几点结论。

(1) 普查区域内 MCS 存在多个呈波动状分布的活跃中心, 主要位于四川西部至云南西北部、四川东部与重庆、云贵高原东部和广西北部山区至洞庭湖、淮河流域, 这种波动分布特征可能与地势分布及大尺度天气环流背景有关。

(2) 按时间尺度将普查区内的 MCS 分成三类: 第一类 MCS 生命史 3~5 小时, 第二类 MCS 生命史 6~11 小时, 第三类 MCS 生命史 ≥ 12 小时。第一、二类 MCS 在西太

平洋热带高压平均位置(500hPa 平均位势高度场 586dagpm 等值线)的内、外侧都有发生。第三类 MCS 发生在西太平洋热带高压平均位置的外侧,沿副高西北侧的引导气流移动;该类 MCS 的发生、发展及移动路径主要受天气尺度环境场控制。

(3) MCS 的形成、成熟及总体数目具有明显的日变化特征。三类 MCS 的形成高峰都出现在午后。第一类 MCS 的夜发性或凌晨发生特征相对较弱,第二、三类 MCS 有显著的夜发性或凌晨发生特征。第一、二类 MCS 在午后最活跃,第三类 MCS 活动最活跃时段在下半夜(18UTC)。

(4) 川渝地区与淮河流域 MCS 的形成、成熟及总体活动日变化特征有所不同。川渝地区 MCS 形成峰值出现在日落后(12UTC),上午 MCS 形成频率最低;川渝地区日落前后(09—10UTC) MCS 最活跃, MCS 的夜间活跃性比淮河流域显著。淮河流域的 MCS 大多形成于午后到傍晚,夜间和凌晨形成 MCS 的特征比川渝地区更加显著;淮河流域 MCS 活动在 09UTC 最活跃,在午夜和凌晨及上午时段也较活跃。这种日变化特征可为 MCS 的临近及短时预报提供一定参考。

(5) 2007 年 7 月 7—9 日南京地区大暴雨和 7 月 17—18 日重庆大暴雨均由两次 M_{α} CS 活动引发。2007 年 6 月 28—29 日发生在川渝地区持续时间较长的 MCS,在其生命史期间两次改变移动方向并呈现为发展、减弱、再重新发展的特征。

致谢:感谢中国气象局国家卫星气象中心的中国遥感数据网(网址: <http://satellite.cma.gov.cn/>)提供 FY-2C TBB 资料。

参考文献

[1] Maddox R A Mesoscale convective complexes[J].

- Bull Amer Meteor Soc, 1980, 61(11): 1374-1387.
- [2] Shibagki Y, Yabanaka M D. Meso- β to meso- γ -scale wind circulation associated with precipitating clouds near Baiu front observed by the MU and meteorological radar[J]. J Meteor Soc Japan, 2000, 78: 69-91.
- [3] Olanski L. A rational subdivision of scales for atmospheric process [J]. Bull Amer Meteor Soc, 1975, 56:527-530.
- [4] Velasco L, Fritsch J M. Mesoscale convective complexes in the Americas[J]. J Geophys Res, 1987, 192(8): 591-613.
- [5] Miller D, Fritsch J M. Mesoscale convective complexes in the western Pacific region[J]. Mon Wea Rev, 1991, 119(12): 2978-2992.
- [6] Laing A, Fritsch J M. Mesoscale convective complexes in Africa[J]. Mon Wea Rev, 1993, 121(8): 2254-2263.
- [7] Fang Zongyi. The preliminary study of medium-scale cloud clusters over the Changjiang basin in summer [J]. Adv Atmos Sci, 1985, 2(3): 334-340.
- [8] 李玉兰,王倩熔,郑新江. 中国西南-华南地区中尺度对流复合体(MCC)的研究[J]. 大气科学, 1989, 13(4):417-422.
- [9] 项续康,江吉喜. 中国南方地区的中尺度对流复合体[J]. 应用气象学报, 1995, 6(1):1-17.
- [10] 尹承美,卓鸿,胡鹏,等. FY-2 产品在济南“7. 18”大暴雨临近预报中的应用[J]. 气象, 2008, 34(1):27-34.
- [11] 郑媛媛,张小玲,朱红芳,等. 2007 年 7 月 8 日特大暴雨过程的中尺度特征[J]. 气象, 2009, 35(2):1-7.
- [12] 易笑园,宫全胜,李培彦,等. 华北飊线系统中地闪活动与雷达回波顶高的关系及预警指标[J]. 气象, 2009, 35(2):34-40.
- [13] 钱传海,路秀娟,陈涛. 引起“碧利斯”强降水的 MCS 数值模拟研究[J]. 气象, 2009, 35(4):11-19.
- [14] 马禹,王旭,陶祖钰. 中国及其邻近地区中尺度对流系统的普查和时空分布特征[J]. 自然科学进展, 1997, 7(6):701-706.
- [15] Zheng Y G, Tao Z Y, Wang H Q, et al. Environment of meso- α scale convective system development in Yellow Sea region[J]. Prog Nat Sci, 1999,

- 9(7), 842-848.
- [16] 郑永光, 朱佩君, 陈敏, 等. 1993—1996 黄海及其周边地区 $M_{\alpha}CS$ 的普查分析[J]. 北京大学学报, 2004, 40(1):66-72.
- [17] 费增坪, 郑永光, 王洪庆, 等. 2003 年淮河大水期间 MCS 的普查分析[J]. 气象, 31(12):18-22.
- [18] 郑永光, 陈炯, 费增坪, 等. 2003 淮河流域持续暴雨的云系特征及环境条件[J]. 北京大学学报, 2007, 43(2):157-165.
- [19] 祁秀香, 郑永光. 2007 年夏季我国深对流活动时空分布特征[J]. 应用气象学报, 2009, 20(3):286-294.
- [20] Augustine J A, and Howard K W. Mesoscale convective complexes over the United States during 1986 and 1987[J]. Mon Wea Rev, 1991, 119(7):1575-1589.
- [21] Jirak I L, Cotton W R, and Mcanelly R L. Satellite and radar survey of mesoscale convective system development[J]. Mon Wea Rev, 2003, 131(10):2428-2449.
- [22] Anderson C J, Arritt R W. Mesoscale convective complexes and persistent elongated convective systems over the United States during 1992 and 1993 [J]. Mon Wea Rev, 1998, 126: 578-599.
- [23] Bluestein H B. Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes[M]. Volume I, Principles of kinematics and dynamics. New York Oxford: Oxford University Press, 1992. 5-7.
- [24] 陶祖钰, 王洪庆, 王旭, 等. 1995 年中国的中- α 尺度对流系统[J]. 气象学报, 1998, 56(2):166-177.
- [25] 贺新强, 陈受钧, 郑永光. 东亚夏季对流云顶黑体辐射温度的频率分布及其日变化[J]. 热带气象学报, 2003, 19(1):53-60.
- [26] Wang C C, G T-J Chen and R E Carbone. A climatology of warm season cloud patterns over East Asia based on GMS infrared brightness temperature observations[J]. Mon Wea Rev, 2004, 132(7), 1606-1629.
- [27] 郑永光, 陈炯, 陈明轩, 等. 北京及周边地区 5—8 月红外云图亮温的统计学特征及其天气学意义[J]. 科学通报, 2007, 52(14):1700-1706.
- [28] 郑永光, 陈炯, 朱佩君. 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[J]. 科学通报, 2008, 53(4):471-481.

祁秀香等:2007年夏季川渝与江淮流域MCS分布与日变化特征

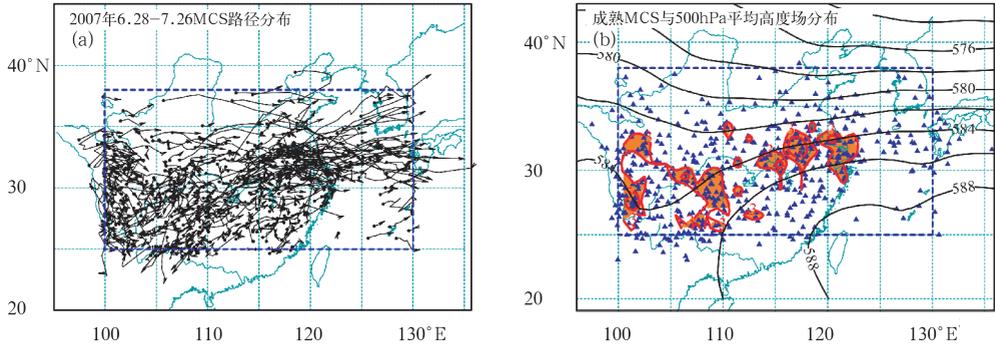


图 1 长图1 2007年6月28至7月26日25°~38°N、100°~130°E区域
 (图中粗划线矩形区域)内MCS分布 (a) MCS移动路径图
 (实心圆点是MCS形成的位置, 箭头代表MCS移动方向, 终止位置为MCS 的消亡位置);
 (b) MCS成熟位置分布及500hPa平均位势高度场 (粗实线及填充?灰度区为1°×1°
 网格内成熟MCS个数等值线, 细实线为500hPa平均位势高度场, 单位:10gpm)

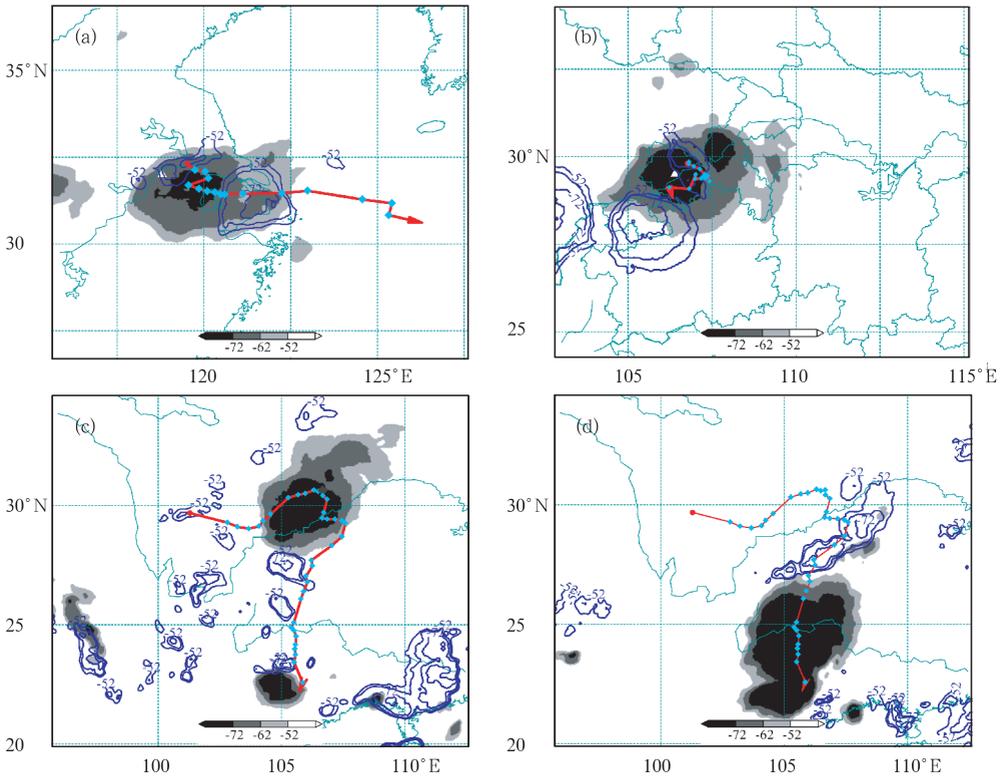


图 7 三个典型MCS移动路径及FY-2CTBB分布(单位: °C)

(a) 2007年7月7日南京地区MCS, 其中填充灰度为7日14UTC FY-2C TBB分布, 黑色等值线为7日07 UTC FY-2C TBB分布, 灰色粗实线为MCS移动路径, 白色三角为南京; (b) 2007年7月16日重庆MCS, 其中填充灰度为17日04UTC FY-2C TBB分布, 黑色等值线为16日16UTC FY-2C TBB分布, 白色实线为MCS移动路径, 白色三角为重庆; (c) 2007年6月28—29日川渝地区长生命史MCS, 其中填充灰度为28日21UTC FY-2C TBB分布, 灰色等值线为28日09UTC FY-2C TBB分布, 黑色粗实线为MCS移动路径; (d)同(c), 但填充灰度为29日18UTC FY-2C TBB分布, 灰色等值线为29日06UTC FY-2CTBB分布(MCS移动路径中, 圆点为MCS形成位置, 实心菱形为各个时刻MCS形心位置, 箭头为移动方向和消亡位置)