

一次川渝大暴雨的中尺度分析

康 岚¹ 冯汉中¹ 屠妮妮² 肖红茹¹ 张利红²

(1. 四川省气象台, 成都 610072; 2. 成都高原气象研究所)

提 要: 利用逐时 FY-2CTBB 资料、闪电资料、自动站雨量资料和经过再分析的中尺度格点分析场资料, 分析 2007 年 7 月 16—20 日发生在川渝地区的暴雨天气过程中尺度特征, 为评估、预报此类暴雨天气过程提供有价值的信息。分析结果表明: 本次降水过程是高原涡和西南涡两个中尺度系统逐步耦合的结果, 与上升气流相伴的强而深厚的正涡度柱是造成对流辐合体反复在相近区域生、消和暴雨反复在临近区域发生的重要因素之一; 西南低涡环流中的三个中尺度云团系统(MCS)直接产生了本次暴雨过程的强降水, MCS 的生消和青藏高原东部的对流云系具有翘翘板效应; 对卫星云图 T_{bb} 值、闪电资料和强降水的综合分析表明闪电发生于降水之前约 1~3 小时, 强降水基本出现在闪电密集区和低 T_{bb} 值重合区; 闪电的移动方向基本可以代表对流旺盛区的移动方向, 也就是未来可能出现强降水的方向。闪电突然增强或减弱对于追踪对流降水的发生和移向、判断强降水的增强或减弱、强降水出现时间、位置、变化趋势具有一定的指示意义。

关键词: 暴雨 西南涡 中尺度特征

Mesoscale Analysis of a Torrential Rain in Sichuan and Chongqing

Kang Lan¹ Feng Hanzhong¹ Tu Nini² Xiao Hongru¹ Zhang Lihong²

(1. Sichuan Provincial Meteorological Observatory, CMA, Chengdu 610072;
2. Chengdu Institute of Plateau Meteorology)

Abstract: By using hourly Tbb data, lightning data, rainfall observations from automatic weather stations, the mesoscale characteristic of a torrential rain in Sichuan and Chongqing during July 16—20, 2007 was analyzed in order to obtain valuable information on evaluating and predicting such case of torrential rain. The study shows that this case was a coupling result of two mesoscale systems which are Plateau Vortex and Southwestern Vortex. The strong and thick positive vortex column and the accompanying updraft are the main factors, which cause the convection bodies generate and eliminate in turn and lead to torrential rain to

occur repeatedly in the nearby area. Three mesoscale cloud systems (MCS) in the southwestern vortex initiate the heavy rain directly. In this case, generation and elimination of the MCS and the convective clouds in the western Tibetan plateau performed in a way of seesaw. The movement direction of lightning can represent the direction of movement in strong convection zone, which is also the direction of movement of heavy rainfall in the future. The emergence of lightning is before the precipitation, a sudden increase or decrease of lightning have a certain significance to the increase or decrease of precipitation in the future.

Key Words: torrential rain southwestern low vortex Mesoscale feature

引 言

暴雨是四川和重庆夏季的主要灾害性天气过程。对于发生在夏季川渝地区的暴雨天气过程,过去已有较多的研究。这些研究揭示了川渝暴雨的主要特征和天气系统^[1-8],认为大暴雨天气的出现往往都同高能、西南低涡发展密切相关^[2-3,7-8],虽然每次强降雨过程的降水强度、落区、时间等细节各不相同,但其天气尺度系统却表现相似,即大多数此类强降雨过程都与西南低涡的发生、发展和演变有关。2007年7月16—20日发生在四川盆地东部和重庆的大暴雨天气过程就是许多此类强降水过程中的一个典型个例。

数值预报是当代天气预报的基础,已成为预报员制作天气预报的重要依据。在实际应用过程中,不仅需要预报员对数值产品有全面了解,还需要预报员对本地天气系统的模式预报能力和特性有足够的认识。就大尺度环流背景的数值预报能力而言,数值预报已超过预报员,但降水的发生发展是多种尺度天气系统相互作用的结果,强降水过程通常与中尺度系统发生发展密切相关,过去较少分析模式(特别是多种模式)的中尺度天气系统特征预报能力,而这对提高强降水灾害性天气预报能力和预报准确率又具有重要意义。本工作就这一目的,对这次降水过程的

中尺度特征进行详细分析,为评估多模式中尺度系统预报能力提供基础。

1 暴雨过程概况

2007年7月16—20日,川渝区域自西向东出现了一次暴雨天气过程,图1是本次过程累积雨量图,从图1可以看出,本次过程共有47个观测站的累积降雨量超过100mm,6个观测站超过250mm。过程从盆地西部开始,逐渐东移,最后停滞在盆地东北部的达州、广安、南充、巴中、遂宁五市和重庆地区,主要降水时段集中在17日和18日,重庆、璧山、武胜三县市的日雨量分别达到

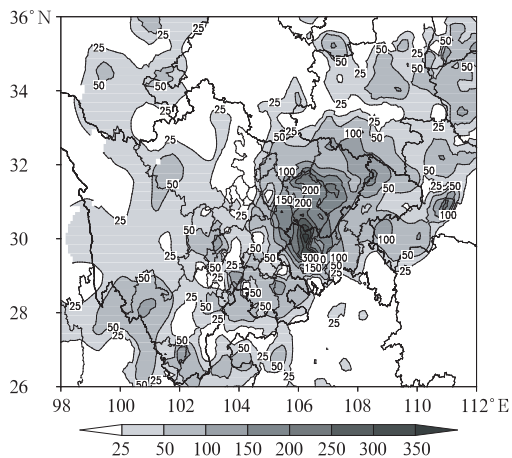


图 1 2007年7月16日08时至20日08时累积雨量图(单位:mm)

280.2mm、263.8mm、236.9mm。19 日以后,降水逐渐减弱、东移。本次过程的主要特点是降水时间长,雨量大,强降水范围集中,部分县(市)重复遭受暴雨袭击,给当地人民生命财产和经济带来了严重损失。

2 环流背景

过程前期,500hPa 环流形势是欧亚大陆中高纬度上空为一槽一脊型,乌拉尔山地区为东北—西南向高压脊,乌拉尔山以东为宽广的低压槽区,巴尔喀什湖地区维持一切断低压,从 7 月 15 日 20 时 500hPa 天气图上可以看到,在青藏高原地区有一个高原低涡,低涡中心位于青藏高原托托河地区。15—16 日,北支乌拉尔山高压脊东移崩溃,推动巴尔喀什湖低槽东移,随着巴尔喀什湖低槽东移,推动高原低涡东移,16 日 08 时低涡中心位于青海东南部,16 日 20 时位于四川盆地上空,槽底锋区随之南压,将巴尔喀什湖地区冷空气带到川渝地区。在此期间,西太平洋副热带高压脊线偏南且稳定,高原东部与川渝地区受暖湿的西南季风控制,这样,巴湖冷平流与暖湿的西南季风在川渝地区上空交绥,产生大尺度的辐合区。以上表明本次过程是由南北两支大尺度环流形势调整过程相互作用而致,西太平洋副热带高压的相对稳定是川渝地区反复出现暴雨的重要条件。

充沛的水汽是产生暴雨的基本条件之一。从 700hPa 水汽通量图(图略)显示,暴雨临近时,由孟加拉湾经云南、贵州到重庆维持一条水汽通量大值区,四川盆地处于水汽通量大值区的西侧;在暴雨持续期,水汽通量大值区一直维持,只是位置有所东移,并且在川渝地区出现了明显的水汽辐合。正是这种源源不断的水汽输送,一方面使川渝地区维持高能的状态,具备了对流发展的必然条件,另一方面提供了暴雨所需的水汽,对云团的

形成、维持起着很重要的作用。

3 中尺度特征分析

图 2 是 2007 年 7 月 15—17 日 500 和 700 hPa 环流形势(a—f)与降水过程期间的洪雅、遂宁、武胜、广安四个自动站分钟降水合成图,这四个站分别位于四川盆地西部、中部和东北部。从图 2 可见,本次过程从 16 日 00 时始于盆地西部,中午前后移动到盆地中部,17—18 日停滞在盆地东北部到重庆一带。在 17 日 06 时前后武胜站的分钟降雨量达到 $1\sim 2\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$,雨强非常强。这次降水的演变也可从图 5 的中尺度对流云团系统(Mesoscale Cloud System,以下简称 MCS)的云顶相当黑体亮度温度(Black Body Temperature,以下简称 T_{bb})和逐时雨量合成图中看出,在时间上,降水是不连续的,具有间歇性,在空间分布上,降水雨带有多个强降水中心,时间和空间上具有明显的中尺度特征(这将在 5.2 中详细描述)。

以下我们将利用 PSU/NCAR 的 MM5 中尺度模式分析系统,以国家气象中心全球模式 T213 分析场为背景场,对东亚地区常规地面资料和探空资料进行再分析获得中尺度格点资料,在此基础上分析这次过程的中尺度特征。

3.1 高原涡与西南涡耦合

与这次降水过程密切相关的中尺度系统是两个中尺度低涡(图 2),一个是 500hPa 的高原低涡,一个是 700hPa 的西南低涡。高原涡是夏半年发生在青藏高原主体上的一种次天气尺度低压涡旋^[9],西南低涡是在我国青藏高原地形下产生的中间尺度天气系统^[10]。本次过程高原低涡形成于 15 日 20 时(图 2a),低涡中心位于青藏高原的托托河地区。在高原涡形成之初,周围空气向低涡

中心辐合,低涡前部的上升气流离盆地尚远。此时,700hPa 为一致的偏南气流。由于乌拉尔山高脊推动巴尔喀什湖低槽东移,高原低涡于 16 日 08 时随之减弱东移至青海东部,其前部的上升气流也逐渐移向盆地,与此同时,位于 100hPa 的南亚高压中心也逐渐从青藏高原中部的改则附近东移到青海南部的玉树附近,盆地西部的降水就在系统东移的过程中开始产生。16 日 20 时(图 2b,e),高原涡进一步东移到盆地上空。由于与高原涡相伴的正涡度的输送有利于低层正涡度发展,形成气旋性闭合环流,与此相对应,盆地的成都、达县、宜宾、重庆四个探空站的 700hPa,24 小时变高下降了 2d gpm,在

700hPa 上形成了西南低涡环流。16 日 20 时,南亚高压中心也东移至川西高原北部边缘地区,川渝地区位于南亚高压环流高层辐散区的下方。17 日 20 时(图 2c,f),500hPa 高原低涡与 700hPa 西南低涡进一步耦合在一起,中低层系统近于垂直叠加,高原涡前的上升气流叠置在西南涡的上升运动区之上,盆地西部的降水也随之东移并得到加强。在降水过程中,由于凝结潜热的释放有利于低层涡旋的发展,而低层涡旋的发展又有利于降水的维持,二者互为正反馈,西南低涡进一步加强,并一直维持到 19 日。直到这种正反馈的机制遭到某种因素的破坏,19 日 20 时,降水逐渐减弱。

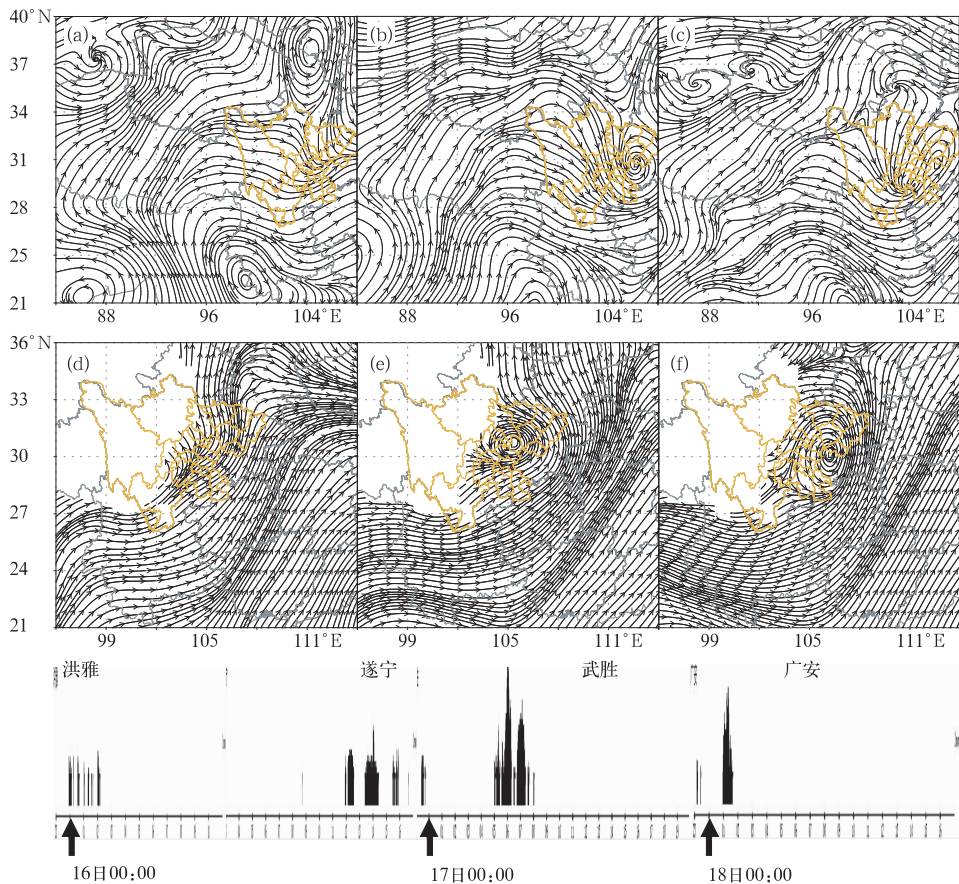


图 2 2007 年 7 月 15—17 日 500hPa(a,b,c)和 700 hPa(d,e,f) 环流形势与过程自动站分钟降水合成图

从上分析可以看出,在这次降水过程中,高原涡东移触发西南低涡发展,西南低涡的发展与演变对降水的发生发展具有重要作用。16日08时至17日08时是这次降水过程的开始期,17日08时至18日20时是降水强盛期,19日08至20日08时是降水消亡期,分别与西南低涡的发生、发展、消亡相对应,而高原低涡东移是西南低涡发生发展的一个重要因素。

3.2 动力条件分析

西南低涡是川渝暴雨非常重要的一个中尺度系统,而本次过程又和西南低涡密切相关。这里以接近降水开始时刻的16日08时代表过程的开始期,以临近降水集中时段的

18日08时代表过程的发展期,以降水趋于东移、减弱时段的20日08时代表过程的消亡期,沿西南涡中心 30°N 作垂直剖面,分析在本次过程的开始期、发展期和消亡期西南低涡的水平结构和垂直结构特征。

图3是过程开始期、发展期、消亡期西南涡水平结构和垂直结构图。从图3可以看出,在过程开始期(图3a),虽然西南低涡还未形成,但川渝一带基本上为正涡度区,最大正涡度中心位于盆地西部边缘,达 $12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,盆地中部到重庆西部为 $0 \sim 6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,大于 $6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的正涡度区范围比较窄。垂直剖面图(图3d)显示, 104°E 以西的四川盆地西部与青藏高原东部陡峭地形边缘,从低层975hPa到高层400hPa左右均为

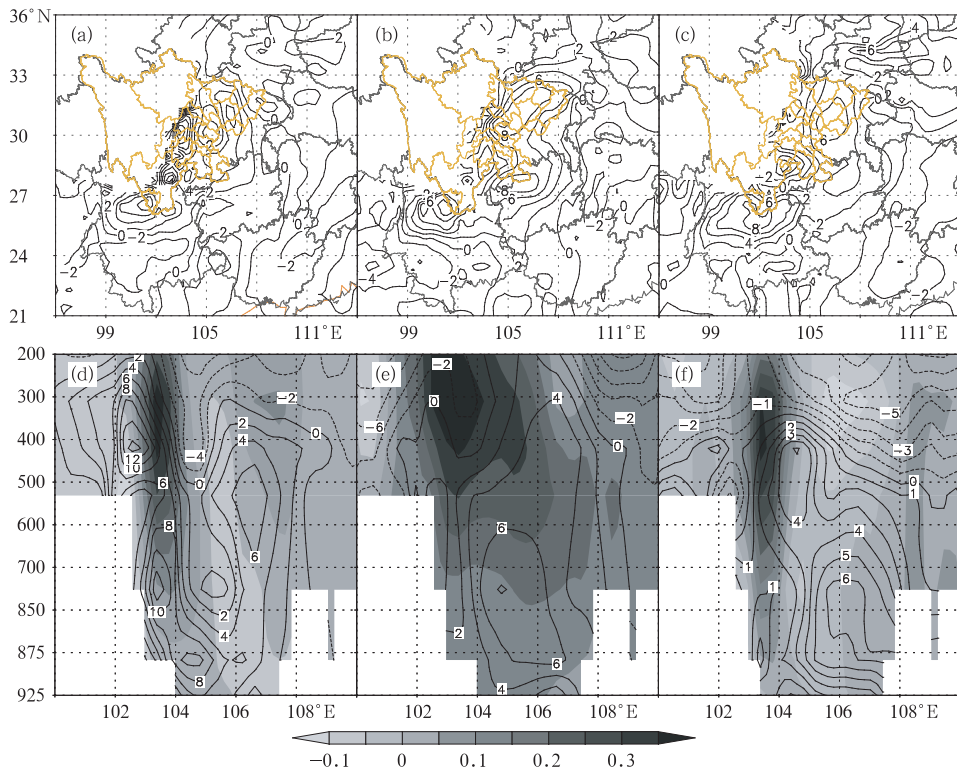


图3 西南涡水平结构(上)与垂直结构(下)

(a)、(b)、(c)分别为16日08时、18日08时、20日08时700hPa涡度 (d)、(e)、(f)分别为

16日08时、18日08时、20日08时沿 30°N 涡度和垂直速度经向垂直剖面

(涡度:等值线 单位: 10^{-5} s^{-1} 垂直速度:填色 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

正涡度柱并且伴有一致的上升气流;而在 $104\sim 108^{\circ}\text{E}$ 范围内,尽管 500hPa 以下层次也为正涡度柱,但正涡度值明显小于盆地西部,与之相伴的基本为下沉气流,抑制了低层对流的发展,因而这一时段的降水主要出现在盆地西部。

在过程发展期,西南低涡已经形成并维持,从水平结构图上可以看出(图 3b),盆地西部边缘的正涡度值明显减小,而盆地中部到重庆西部的正涡度值明显增大,基本大于 $4\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$,在盆地东北部和南部分别有一块大于 $8\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 的正涡度区;在垂直剖面图上(图 3e), 104°E 以西仍为上升气流,但整层的正涡度值明显减小;在 $104\sim 108^{\circ}\text{E}$ 范围内, 200hPa 以下层基本上为正涡度柱,其两侧高层分别有负涡度区,大于 $4\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 的正涡度值范围较过程开始期有了明显的增大。同时,与正涡度柱相伴的是比较宽广的上升气流区。正是由于发展的正涡度柱并伴有宽广上升气流导致了这一强降水时段。

在过程消亡期,水平结构图上(图 3c)表现为大于 $4\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 的涡度大值区东移,范围减小,涡度中心值减小 $4\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 左右;垂直剖面图上(图 3f),盆地西部仍然维持强的上升气流,这可能是气流沿盆地到高原的陡峭地形爬升所制。在 $104\sim 108^{\circ}\text{E}$ 范围内,正涡度柱厚度比过程发展期要浅薄一些,基本维持在 350hPa 以下层,正涡度值也较过程发展期减小了,与之相伴的气流基本转为下沉气流,上升气流东移到 108°E 以东。正是由于正涡度柱减弱变薄、上升气流东移造成了降水减弱、东移。由此可见,与上升气流相伴的强而深厚的正涡度柱是产生本次强降水过程的重要因素之一。

3.3 热力条件分析

图 4 是沿西南涡中心 30°N 假相当位温、位涡经向剖面图,从图中可以看出,过程开始

期的 16 日 20 时, 600hPa 以下层从盆地东部到重庆西部为高能舌,其上空为高能不稳定区,为对流扰动提供了充足的热力条件。同时暴雨区上空从 600hPa 到 300hPa 为位涡大值区,中心位于 500hPa 左右,说明高层有动量下传,有利于低层涡旋的维持和发展。由于位涡可以用于追踪冷空气的活动,因而该大值区也代表高层有冷平流下传。在暴雨持续期,对流层中上层高位涡(图略)的这种特点得以维持。在高层冷平流的触发下,对流得以旺盛发展,低层高能不稳定能量被抬升释放,诱发了这一时段的强降水。19 日 20 时,位涡大值区明显减弱下降,位涡中心下降到 700hPa 层,一方面低层涡旋发展的机制遭到破坏,另一方面,由于高层冷平流侵入低

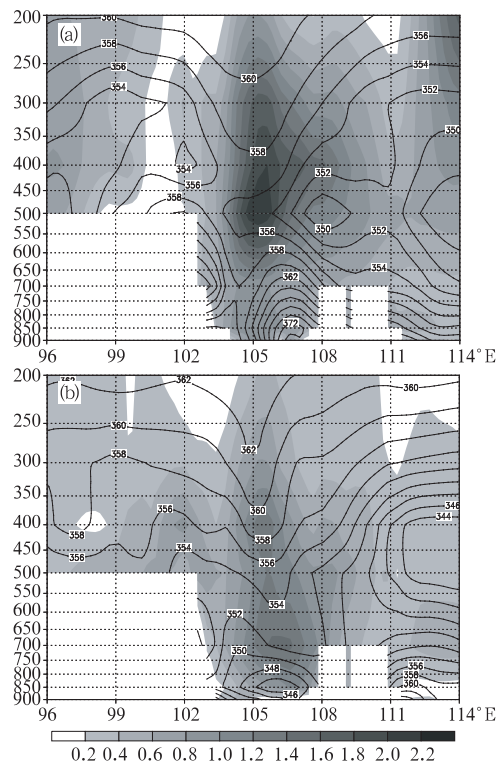


图 4 假相当位温(等值线)和位涡(填色)沿 30°N 经向剖面 (a) 16 日 20 时; (b) 19 日 20 时

层,低层能量迅速下降,位势层结由不稳定转为稳定,暴雨强度趋于减弱。

3.4 中尺度云团分析

3.4.1 中尺度云团演变特征

MCS 是暴雨的直接影响系统,引起强降水的 MCS 大多数是多单体的对流系统^[11]。在云区, T_{bb} 温度越低,表明云顶越高,对流越旺盛^[11]。对于盆地中部到重庆的强降水时段,从逐时的 FY-2CT_{bb} 图上可以看出,由于西南低涡的持续维持,在西南低涡东侧的盆地东部到重庆先后有三个 MCS 生消,第一个 MCS(以下简称 MCS1)发生于 16 日 2 时至 16 日 19 时,第二个 MCS(以下简称 MCS2)发生于 17 日 00 时至 17 日 16 时,第三个 MCS(以下简称 MCS3)发生于 18 日 0 时至 18 日 16 时。由其出现时间可见,每个 MCS 维持 16 个小时以上,分别对应三个强降水集中时段;每个 MCS 都是凌晨前后生成,傍晚前后结束。进一步分析发现,这三个 MCS 的演变特征比较相似,其对流单体均是从滞留于盆地的母体云团的东北面开始生成,在发展过程中或和母体云团合并,或独立于母体云团发展, MCS1 和 MCS2 在发展强盛时期形状接近圆形,发展成了 MCC,最强降水时段达到 $40\sim 50\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$,而 MCS3 的对流单体和其母体对流云团合并后发展形成东北-西南向的带状云系,其最强降水强度弱于 MCS1 和 MCS2。在三个 MCS 发展旺盛期,都可以看到其中镶嵌有若干个尺度更小的对流最旺盛期,说明 MCS 是由若干个尺度更小、对流更旺盛、云顶温度更低的中尺度云团组成,使得降水具有明显的中尺度特征。下面以 MCS2 为例,分析造成第二个强降水时段的 MCS2 的发生发展特征。

图 5 是逐时 T_{bb} 和自动站小时雨量合成图。从图 5 可以看出: MCS2 的对流单体于 17 日 01 时生成于滞留在盆地南部的对流云

团前部边界处,在 $30\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $90\sim 103^{\circ}\text{E}$ 范围内(以下简称青藏高原东部)的对流云系和滞留于盆地南部的对流云团母体逐渐减弱的过程中, MCS2 面积迅速膨胀, T_{bb} 值逐渐降低。17 日 04 时 MCS2 与母体分离,此时,云团 $T_{bb}\leq -32^{\circ}\text{C}$ 的面积接近 $2\times 10^5\text{km}^2$, $T_{bb}\leq -52^{\circ}\text{C}$ 的面积接近 10^5km^2 ,中心 $T_{bb}< -80^{\circ}\text{C}$; 17 日 06 时 MCS2 云团形状接近圆形,发展成了中尺度对流辐合体(以下简称 MCC),该 MCC 持续时间超过 9 小时。在 MCC 维持期, T_{bb} 等值线梯度在云团西侧比较大,东部比较小稀疏,降水大值区基本位于云团西部 T_{bb} 梯度大值区,最强降水时段达到 $50\sim 60\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$,在此期间青藏高原东部的对流云系几近消失。在对流云团发展旺盛期,可以看到其中镶嵌有若干个尺度更小的对流云团。当青藏高原东部的对流云系重新开始活跃时, MCS2 则逐渐减弱,该时段的强降水也逐渐趋于结束。

从 MCS1、MCS2 和 MCS3 的演变中均可发现:当盆地内 MCS 开始生成、云团范围逐渐扩大, T_{bb} 值逐渐降低时,青藏高原东部的对流云系逐渐减弱、消散, MCS 发展到旺盛期,高原东部基本不存在对流云系;当高原东部的对流云系重新开始发展时,盆地内 MCS 无论是范围还是亮温都呈减弱趋势。由此可见,青藏高原东部对流云系和盆地 MCS 生消存在翘翘板效应,可以从青藏高原东部对流云系的发展趋势判断 MCS 未来的强弱变化。

3.4.2 对流云团的 T_{bb} 和闪电资料综合分析

由于川渝地区的夏季强降水大部分属于对流性降水,与对流云系的发展密切相关,而形成闪电的积雨云特征就是旺盛的对流和活跃的冰相发展^[12],因而我们试图结合通过闪电定位网获得的比较密集的闪电资料探讨对流云团 T_{bb} 、闪电和降水的关系。

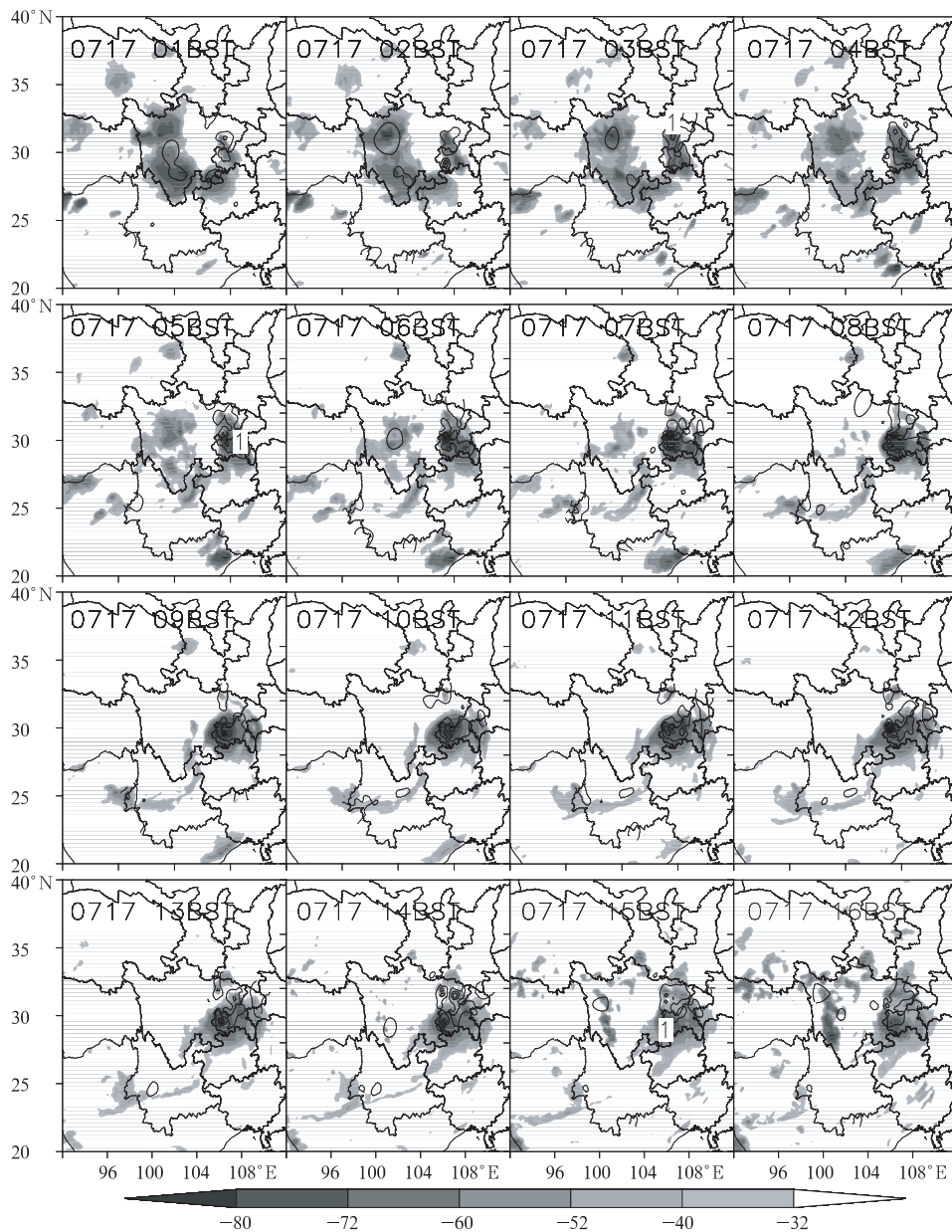


图 5 MCS2(2007 年 7 月 17 日 01—16 时)的 T_{bb} (阴影)和自动站
每小时雨量(等值线间隔 1、15、30、50、60mm)

图 6 是云团 T_{bb} 、闪电和自动站小时雨量时间演变图,从图 6 可以看出:16 日 02 时, A、B、C 区同时出现了闪电和对流云团,虽然 D 区也出现了对流云团并有较低的 T_{bb} 值,但并未出现闪电,闪电有向 B、C 方向移动的趋势,

降水主要出现在范围较大的低 T_{bb} 值和密集闪电重合的 A 区,最大小时雨量达到 $10\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上。16 日 04 时,密集闪电区移动到 B、C 区域,强对流云团向 02 时已经出现闪电的 B、C 方向移动、发展,D 区的对

流云团没有继续发展,而是原地减弱并和 A 区云团合并,B、C 区的小时雨量较 02 时呈增大趋势,B 区的最大小时雨量达 $7 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上,A 区域的密集闪电区变的比较稀疏,小时雨量也呈减小趋势。16 日 06 时,强对流云团继续移动、发展,闪电密集区仍然维持在 B、C 区域,B、C 区域无论是小时雨量还是降水范围都明显增大,小时雨量达 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$

以上,此时 A 区只有零星的闪电存在, T_{bb} 值也明显减小,降水随之明显减弱,只有 $2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右。另外,B、C 区在 16 日 02 时已经出现闪电,16 日 04 和 06 时雨量逐渐增大,可见,强降水的出现时间滞后于闪电出现时间,并且 B、C 区闪电的出现位置与强降水发生位置趋于一致。

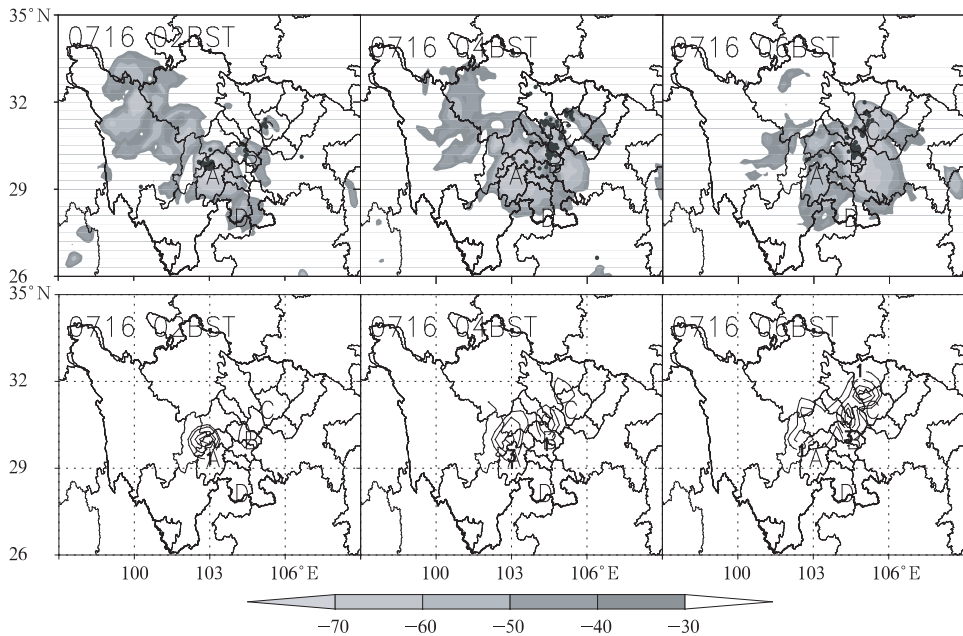


图 6 2007 年 7 月 16 日 02、04、06 时 T_{bb} (阴影) 闪电 (圆点) 和小时雨量 (等值线间隔 1、3、7、10、15mm)

由此可见,并不是所有低的 T_{bb} 值都和强降水一一对应,闪电密集区基本出现在低 T_{bb} 值区域,但低 T_{bb} 值区域并不总是和闪电相伴出现。对对流性降水而言,闪电的移动方向基本可以代表对流旺盛区的移动方向,也就是未来可能出现强降水的方向。闪电的出现先于降水,降水大概滞后闪电出现时间 1~3 小时,强降水基本出现在闪电密集区和低 T_{bb} 值重合区。闪电突然增强或减弱对未来降水的增强或减弱具有一定的指示意义。因此,综合分析卫星云图 T_{bb} 值、闪电资料对

于追踪对流降水的发生、移向以及判断强降水的出现时间、位置、变化趋势具有一定的指示意义。

4 结论

本文利用常规观测、卫星遥感、闪电定位仪和中尺度格点分析等多种资料,分析了 2007 年 7 月 16—20 日发生在川渝地区的暴雨天气过程的中尺度特征,得到以下结论:

(1) 本次过程是由南北两支大尺度环流

形势调整过程的相互作用而致。西太平洋副热带高压的相对稳定是川渝地区反复出现暴雨的重要条件。

(2) 与这次降水过程密切相关的中尺度系统是两个中尺度低涡,一个是 500hPa 的高原低涡,一个是 700hPa 的西南低涡。本次过程是这两个中尺度系统逐步耦合的结果。

(3) 与上升气流相伴的强而深厚的正涡度柱是造成这次强降水对流辐合体反复在相近区域生、消,暴雨反复在临近区域出现的重要因素之一。

(4) 三个 MCS 是本次暴雨过程的直接影响系统,MCS 发生于西南低涡东侧,由若干个尺度更小、对流更旺盛、云顶温度更低的中尺度云团组成。MCS 的生消和青藏高原东部的对流云系具有翘翘板效应。当盆地内 MCS 开始发生、发展,云团范围逐渐扩大,青藏高原东部的对流云系逐渐减弱、消散;MCS 发展到旺盛期,高原东部基本不存在对流云系;当高原东部的对流云系重新开始发展时,盆地内 MCS 范围和强度都呈减弱趋势,可以从青藏高原东部对流云系的发展趋势判断西南低涡东侧 MCS 未来强弱变化。

(5) 对卫星云图 T_{bb} 值、闪电资料和强降水的综合分析表明:闪电发生在降水之前,降水滞后闪电时间约 1~3 小时,而强降水基本出现在闪电密集区和低 T_{bb} 值重合区;闪电的移动方向基本可以代表对流旺盛区的移动方向,也就是未来可能出现强降水的方向。闪电

突然增强或减弱对于追踪对流降水的发生和移向、判断强降水的增强或减弱、强降水出现时间、位置、变化趋势具有一定的指示意义。

参考文献

- [1] 卢敬华. 西南低涡概论[M]. 北京:气象出版社, 1986:1-170.
- [2] 钱正安,顾弘道,颜宏,等. 四川“87.7”特大暴雨和西南涡数值模拟[J]. 气象学报,1990,48(4):415-423.
- [3] 黄福均. 西南低涡的合成分析[J]. 大气科学,1986, 10:402-408.
- [4] 陈忠明. 四川盆地西南低涡形成的天气动力学模型[J]. 低纬高原天气,1991,4:47-54.
- [5] 陈静,李川,谌贵卿. 低空急流在四川“9.18”大暴雨中的触发作用分析[J]. 气象,2002,28(8):24-29.
- [6] 陈静,矫梅燕,李川. 青藏高原东侧一次 β 中尺度对流系统的数值模拟[J]. 高原气象,2003,22(增):90-101.
- [7] 项续康. 1989年7月川东大暴雨中尺度对流系统分析[J]. 气象,1995,21(3):30-34.
- [8] 刘国忠,丁治英,贾显锋,等. 影响华南地区西南低涡及致洪低涡活动的统计研究[J]. 气象,2007,33(1):45-50.
- [9] 刘晓冉,李国平. 青藏高原低涡研究的回顾与展望[J]. 干旱气象,2006,24(1):60-66.
- [10] 高由禧,赵恕,曹恩爵,等. 青藏高原气象论文集[J]. 兰州:中国科学院兰州高原大气物理研究所,1977:291-316.
- [11] 陶诗言,倪允琪,赵思雄,等. 1998 夏季中国暴雨的形成机理与预报研究[M]. 北京:气象出版社,2001:89-101.
- [12] 章国材,矫梅燕,李延香,等. 现代天气预报技术和方法[M]. 北京:气象出版社,2007:100-112.