

陈贵川, 谌芸, 张勇, 等. 2013. “12. 7. 21”西南涡极端强降雨的成因分析. 气象, 39(12): 1529-1541.

“12. 7. 21”西南涡极端强降雨的成因分析^{*}

陈贵川¹ 谌芸² 张勇¹ 陈鹏¹ 王欢¹
黎中菊¹ 刘念¹ 翟丹华¹ 龙美希¹

1 重庆市气象台, 重庆 401147
2 国家气象中心, 北京 100081

提 要: 利用常规观测资料、ECMWF 分析场、区域自动站、多普勒雷达及 SWAN 系统产品等资料对 2012 年 7 月 21 日西南涡暴雨过程及盘龙极端强降雨进行分析。分析发现:此次过程是“北槽南涡”形势下,地面冷空气触发西南涡其东侧辐合上升运动强烈发展,高层强辐散,因而产生了对流性暴雨天气过程;冷空气从西侧侵入西南涡是 925 hPa “S”形冷锋形成的直接原因,也是地面辐合线形成的重要因素;极端短时强降雨就发生在西南涡东侧中尺度雨带的中部偏北区域,有地面辐合线相配合,降雨最强时 MCC 冷云中心 TBB 达最低值。雷达回波表明:西南涡两侧冷暖空气的交汇促进了 β 中尺度气旋式环流的形成;偏南风低空急流为强降雨提供了充足的水汽,增强了中低层的垂直风切变,有利于强降水超级单体风暴的发展和维持;盘龙的极端短时强降雨是 β 中尺度气旋式环流中,伴随有深厚中气旋的强降水超级单体风暴在环流中心附近持续发展的结果。

关键词: 西南涡, 极端强降雨, 中气旋, 强降水超级单体风暴

中图分类号: P458 **文献标志码:** A **doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2013. 12. 001

Causes Analysis of the Southwest Vortex Extremely
Heavy Rainfall on 21 July 2012

CHEN Guichuan¹ CHEN Yun² ZHANG Yong¹ CHEN Peng¹
WANG Huan¹ LI Zhongju¹ LIU Nian¹ ZHAI Danhua¹ LONG Meixi¹

1 Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147
2 National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on conventional observation data, ECMWF analysis field data, regional automatic station data, Doppler radar data, and the products of SWAN etc. the southwest vortex rainstorm process on 21 July 2012 and extreme short-time severe rainfall observed at Panlong Station in the process are analyzed. The results indicate that: the rainstorm is triggered by surface cold air which contributes to the development of convergence ascent movement in the east of the southwest vortex and upper-level divergence with the backgroud of northern trough and southern vortex. The intrusion of cold air from the west of the southwest vortex, which is also the important factor for the formation of surface convergence line, is the direct cause of the formation of 925 hPa cold front with “S” pattern. Extreme short-time severe rainfall occurs in the north to the middle part of mesoscale rainbelt that is in the east of southwest vortex combining with surface convergence line, and meanwhile, TBB reaches the lowest in the center of MCC when the rainfall is the most intensive. The radar echoes show that the intersection of air in the two sides of south-

^{*} 国家自然科学基金面上项目(41175048),公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206004),中国气象局预报员专项(CMAYBY2013-055)共同资助
2012 年 12 月 7 日收稿; 2013 年 3 月 8 日收修定稿
第一作者:陈贵川,主要从事天气预报等方向研究. Email:cgccq@163. com
通信作者:谌芸,主要从事中尺度天气研究. Email:chenyun@cma. gov. cn

west vortex advances the formation of β meso-scale cyclonic circulation. The low-level jet stream provides plenty of water vapor and energy conditions for the severe precipitation and reinforces vertical wind shear between middle and lower levels, contributing to the development and sustainment of heavy precipitation supercell storm. The extreme short-time precipitation of Panlong Station results from the sustainable development of meso- β scale cyclonic circulation associated with deep meso-cyclone near the center of meso- β scale cyclonic circulation in southwest vortex.

Key words: southwest vortex, extremely severe rainfall, meso-cyclone, heavy precipitation supercell storm

引 言

西南涡是四川盆地暴雨的主要影响系统。1981 年“81.7”四川盆地特大暴雨(钱正安等,1990)、2004 年“9.4”渝东北特大暴雨(周国兵等,2006)、2007 年“7.17”渝西大暴雨(康岚等,2008)等暴雨天气都受西南涡的重要作用并产生了严重洪涝灾害。据统计,重庆大范围暴雨中有近 87% 与西南涡相关(江玉华等,2009)。

关于西南涡暴雨,国内外许多学者在西南涡的结构、机制和大气不平衡态等方面做过大量研究工作(卢敬华,1986;高守亭,1987;李国平等,1991;吴国雄等,1999),同时也研究过一些暴雨个例(卢敬华,1988;钱正安等,1990;宗志平等,2005;2013;周国兵等,2006;康岚等,2008;陈永仁等,2013;顾清源等,2008;2009;杜倩等,2013),这些个例的降雨主要表现为较大范围持续性强降雨,小时雨强都在 $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以内。而此次过程中暴雨范围大,而同时又伴有极端强降雨,其形成原因是什么呢? 由于盘龙 21 日 23 时的小时强降雨占其 24 小时降雨量的 55%,下面主要从环流演变、水汽与对流不稳定条件、中尺度雨带、中尺度对流复合体(MCC)以及多普勒雷达回波来分析暴雨成因并研究极端短时强降雨的中小尺度特征。

1 环流形势演变特征

2012 年 7 月 21—22 日,四川东南部与重庆西部地区出现了一次西南涡暴雨过程,100 mm 以上的降雨区域达 2 万 km^2 左右(图 1a),21 日 23 时重庆荣昌盘龙的小时雨强达到 $180.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,仁义达 $122.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$;22 日 14 时荣昌盘龙 24 h 降雨量达到 327.5 mm,仁义 265.3 mm。盘龙 24 h 降雨量和 1 h 降雨量分别为重庆有气象记录以来的极

值。盘龙的小时雨量在四川盆地乃至全国都是罕见的(陶诗言等,1980;王家祁,2002)。此次过程造成重庆西部偏西地区 5 人死亡,长江上游于 24 日形成三峡工程建成以来最大洪水,寸滩洪峰水位达 186.79 m,流量达 $7.12 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,给沿江的江津至巴南等地造成严重损失。

2012 年 7 月 18 日 08 时至 20 日 20 时(图略),200 hPa 南亚高压一直控制青藏高原和四川盆地的大部地区;500 hPa 亚洲中高纬为明显的阻塞型经向环流,乌拉尔山东部的阻塞高压和贝加尔湖低压都稳定少动,阻高东部偏北气流中的波动携带冷空气沿贝加尔湖低压的底部逐渐加深发展,青藏高原北部的高原切变线与贝加尔湖低压底部的波动结合形成南北向低槽并向东发展,西太平洋副高(简称副高)588 线西伸到重庆东部;700 hPa,东亚季风爆发,昆明—重庆—安康—太原的西南风风速逐步增大形成西南风低空急流,西南涡在四川盆地西北部形成。地面冷空气从新疆北部进入河西走廊。

21 日 08—20 时,高空形势发生了较大的调整(图 2a 和 2b)。重庆西部处于 200 hPa 南亚高压脊线南侧附近,形成高层有利的辐散条件。500 hPa,副高略东退,低槽主体向华北移动,低槽南端形成高原涡并向南掉,“北槽南涡”形成。高原涡为 700 hPa 西南涡的发展提供了动力作用并促使其南移。850 hPa,西南涡中心比 700 hPa 偏东偏南,并伴有明显的偏南风急流。过程中,西南涡从低层到高层向西北方向倾斜,西南涡东南侧的偏南暖湿气流流向四川盆地提供了充足的水汽,并促使大气不稳定性迅速增强。地面冷空气主体向华北移动(在向华北地区移动过程中形成华北大暴雨天气),部分冷空气越过甘肃东南部和四川西北部较低的山地进入四川盆地。21 日 20 时至 22 日 08 时,受冷空气触发,西南涡东侧中低层辐合上升运动强烈发展,高层辐散,产生对流性暴雨天气,强降雨区就发生在 500 hPa 高原涡与 700 hPa 西南涡东侧、850 hPa 倒槽与地面

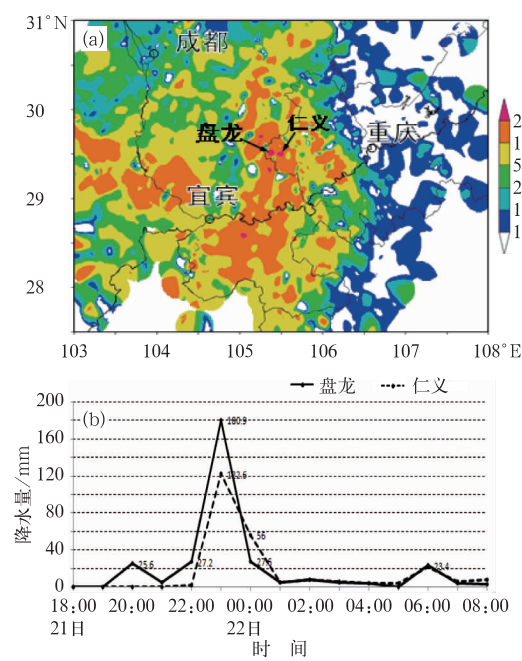


图 1 (a) 2012 年 7 月 21 日 14 时至 22 日 14 时 24 h 雨量图, (b) 重庆荣昌两区域站 21 日 18 时至 22 日 08 时逐小时降雨量 (单位: mm)

Fig. 1 (a) Distribution of heavy rainfall from 14:00 BT 21 to 14:00 BT 22 July 2012; (b) hourly rainfall of Panlong and Renyi Stations from 18:00 BT 21 to 08:00 BT 22 July 2012 (unit: mm)

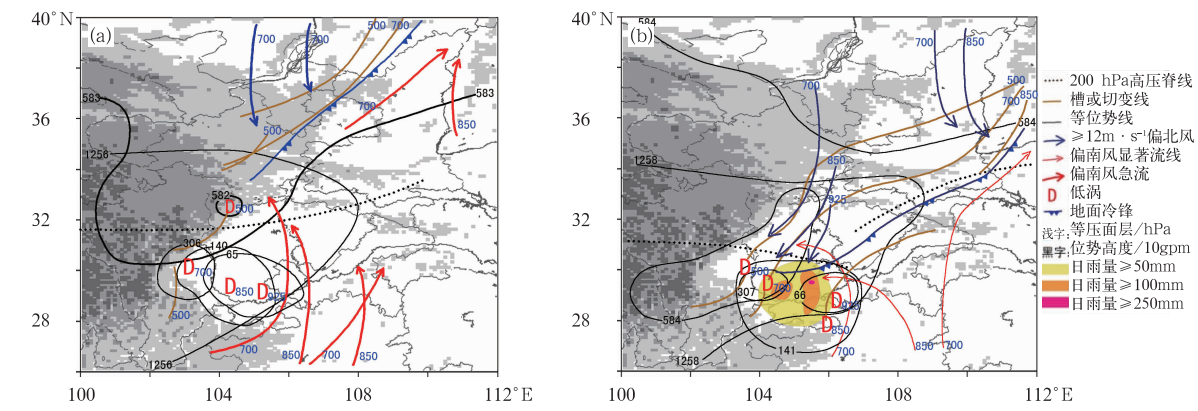


图 2 2012 年 7 月 21 日 08 时 (a) 和 20 时 (b) 综合分析图
(浅灰色阴影区: 海拔高度 >1500 m; 中灰色阴影区: 海拔高度 >3000 m; 深灰色阴影区: 海拔高度 >4500 m)

Fig. 2 Comprehensive analysis (a) at 08:00 BT and (b) at 20:00 BT
(light gray shaded area: plateau over 1500 m altitude; mild gray shaded area: plateau over 3000 m altitude; dark gray shaded area: plateau over 4500 m altitude)

峙,有利于锋生,925 hPa 在四川盆地中部形成 θ_{se} 密集带。17 时左右,冷空气主体从四川盆地西北部侵入,由于受 700 hPa 西南涡西侧气流引导的作用,冷空气部分以图 3a 中箭头方式逐渐侵入低层西南涡

冷锋配置上相交的区域。

由于北方冷空气较弱,副高在长江中下游形成阻塞,22 日 08—20 时,“北槽南涡”断开,槽向东北方向收缩,西南涡移动路径为比较少见的南移路径,南移过程中很快减弱,暴雨过程结束。

2 水汽条件与大气层结的分析

应用 ECMWF 细网格预报场的零场资料和常规探空资料来分析过程中的水汽和大气层结。

暴雨开始前一天,20 日 08—20 时,西南暖湿急流已经建立,水汽从孟加拉湾经过云贵高原东侧主要向河套—华北地区输送,四川盆地中低层的比湿并不高(图略)。21 日 08—20 时,随着西南涡加强并南掉,西南暖湿气流向四川盆地辐合,西南涡中心附近形成水汽辐合中心。到 20 时,850 hPa 重庆西部附近比湿达 $18\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上的区域面积达 5 万 km^2 左右,700 hPa $13\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上的区域达 9 万 km^2 左右,925 hPa 高湿区更大(图 3a)。大范围深厚的高湿区为强对流暴雨提供了充足的水汽。

由于 21 日白天四川盆地西部有对流性降雨,云层较多,为温度相对低的冷气团,而东部为副高控制,气温升高快,为温度相对高的暖气团,两气团对

中心区域,侵入过程中增强了对流活动,进一步促进了锋生作用。这样,925 hPa 重庆西部 θ_{se} 密集带形成“S”形,密集带附近温度差异较大,比湿差异小,形成明显的冷锋。K 指数分布(图 3b)与 925 hPa

θ_{se} 类似,重庆西部处于大值区,荣昌附近 K 指数达 44,大值区靠西一侧也形成一个“S”形的等 K 指数密集带,对流不稳定性大大增强。极端强降雨就发生在这个“S”形冷锋的北侧。

对离荣昌较近的重庆探空资料的物理量分析。从 21 日 08—20 时(图 4a 和 4b),由于中低层偏南

暖湿气流输送和西南低涡的辐合作用,中低层气温上升,湿度增高。 SI (沙氏指数)由 0.58 降到-2(表 1)、 $CAPE$ (湿对流有效位能)由 $496\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 迅速上升到 $3202\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,指示大气向强对流不稳定发展, PWV (大气可降水量)由 46 mm 上升到 57 mm显示水汽充沛,从 $T\text{-log}p$ 图上也可以看到:重

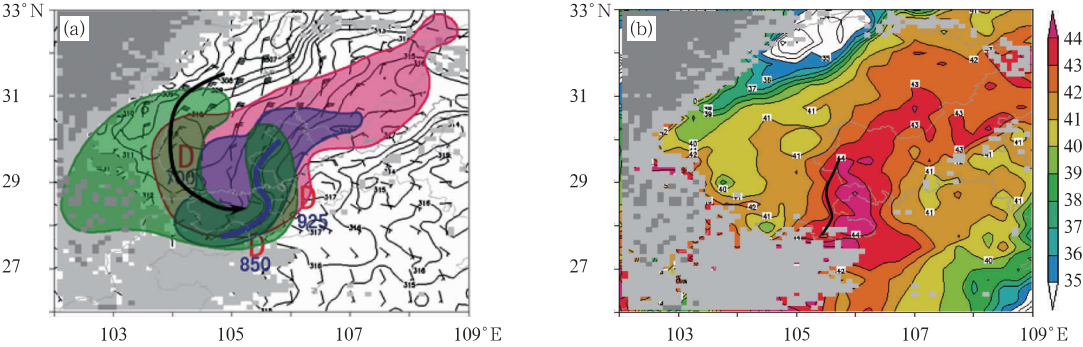


图 3 2012 年 7 月 21 日 20 时 ECMWF 细网格预报场的零场资料分析

(a) 水汽和锋生分析图(绿色阴影区:700 hPa 比湿 $q\geq 13\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;蓝色阴影区:850 hPa 比湿 $q\geq 18\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;红色阴影区:925 hPa 比湿 $q\geq 19\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;黑线:等 θ_{se} 线,单位:K;粗蓝线:等 θ_{se} 线密集带;风场:925 hPa;浅灰色阴影区:海拔高度 $>1500\text{ m}$;中灰色阴影区:海拔高度 $>3000\text{ m}$);
(b) K 指数分析图(粗黑线:暖区等 K 指数线密集带)

Fig. 3 Initial fields analysis of ECMWF thin grids at 20:00 BT 21 July 2012

(a) analysis of water vapor and frontogenesis [green shaded: 700 hPa specific humidity equal to or greater than $13\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; blue shaded: 850 hPa specific humidity equal to or greater than $18\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; red shaded: 925 hPa specific humidity equal to or greater than $19\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; black line: potential pseudo-equivalent temperature (unit: K); bold blue line: intensive belt of potential pseudo-equivalent temperature (unit: K); winds: 925 hPa; light gray shaded area: plateau over 1500 m altitude; mild gray shaded area: plateau over 3000 m altitude];
(b) K index (bold black line:intensive belt of K index in warm region)

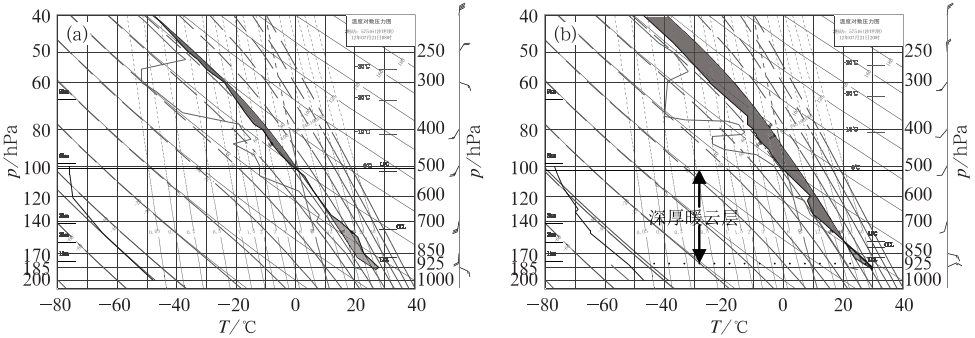


图 4 2012 年 7 月 21 日 08 时(a)和 20 时(b)重庆探空图

Fig. 4 $T\text{-log}p$ diagram in Chongqing (a) 08:00 BT 21 July, and (b) 20:00 BT on 21 July 2012

表 1 2012 年 7 月 21 日 08 时和 20 时重庆的几种物理量变化

Table 1 Changes of several physical quantities in Chongqing at 08:00 and 20:00 BT 21 July 2012

时间	SI	$CAPE/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	$w_{cape}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$CIN/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	LFC_P/hPa	PWV/mm
08 时	0.58	496.2	31.5	311.3	517.1	46
20 时	-2	3202	80	73.6	789.5	57

庆暖云层深厚,有利于高效率强降雨的形成。与历史上其他大范围西南涡暴雨比较(钱正安等,1990;宗志平等,2005;周国兵等,2006;康岚等,2008;刘健文等,2005),水汽和能量等方面都表明重庆西部已经具备强降雨发生的有利条件。

3 中尺度和极端强降雨形成的原因

3.1 中尺度系统与强降雨

荣昌盘龙的极端短时强降雨与暴雨过程初期西南涡暖区中的中尺度强对流雨带联系紧密。21日白天,四川盆地大部天气晴好,重庆处于副高的边缘,大部地区最高气温上升到 $33\sim 37^{\circ}\text{C}$,地面热低压发展,其中心位于重庆西部璧山附近。下午,冷空气开始侵入四川盆地。受700 hPa西南涡西侧偏北气流引导的作用以及重庆西部西南—东北向山系的地形作用,21日20时左右,地面冷空气分两支侵入重庆西部,一支正北方向,另一支西北偏北方向,同时,在重庆西南部有一只偏南风气流,这三支主要的气流在重庆西部热低压的西侧形成南北向 β 中尺度地面辐合线。辐合线西侧,冷空气在四川遂宁和泸州触发伴随强雷电的对流天气,形成两个带状雨区(图5a)。由于雨带形成在500 hPa高原涡和700 hPa西南涡的东侧,副高有明显阻塞,导致中高层风的偏西分量弱,雨带移动缓慢。21—22时,两个带状雨区在荣昌西部连成中尺度雨带(图5b),降雨迅速增强,热低压略东移,地面辐合线维持,雨带中南部的强雷暴天气导致地面形成弱的小高压。22时(图5c),雨带中部区域降雨明显增强,雨强 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上的区域南北长200 km左右,宽20~50 km,最强雨强 $99\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。23时,中尺度雨带向东移动速度约 $10\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,雨带主体仍在重庆西部辐合线内(图5d),雨带范围扩大,雨强 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上的区域南北长150 km左右,宽20~50 km,荣昌盘龙出现此过程中最强雨强 $180.9\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,另一区域站仁义也出现 $122.6\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的短时强降雨, $50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上的区域达 1000 km^2 左右。22日00—04时,受后续冷空气主体的影响,地面辐合线向西移动,重庆西部强降雨雨带强度逐渐减小,四川西南部的降雨逐渐增强(图5e和5f),降雨由对流云和层云混合形成,范围迅速扩大成团状。西南涡暴雨过程的降雨就来源于开始时强对流性的中尺

度雨带以及中后期西南涡大部区域形成的混合性降水。

总的来看,地面辐合线与地面热低压发展和冷空气侵入都有关系,是冷暖空气在地面热低压西侧交汇的结果。地面辐合线对中尺度雨带有一定的指示性:降雨前期,辐合线比雨带偏东,最强降雨阶段雨带与辐合线吻合较好。副高阻塞,中高层风的偏西分量弱,雨带移动缓慢,是中尺度雨带形成极端短时强降雨的重要原因。

3.2 MCC的云图特征

MCC是 α 中尺度(200~2000 km)的系统,是大范围强降水在卫星云图上的重要特征,与中尺度雨带联系紧密,其冷云核心区对降水中心有一定指示性。西南地区的MCC通常都与西南涡的雨带有关(周国兵等,2006;康岚等,2008;顾清源等,2008;马红等,2010)。

21日重庆西部MCC由西南涡暖区中的中尺度雨带发展而来。21日20—22时是MCC的形成阶段(图6a~6c),重庆西部的中尺度雨带缓慢东移并向雨带中部强烈发展,TBB分析图上先呈现为南北带状云区,然后其中部偏北区域迅速发展为椭圆形。22时,冷云中心位于盘龙附近,内部形成 $TBB\leq -82^{\circ}\text{C}$ 的 β 中尺度冷云核心区,中心 TBB 达 -85°C , $TBB\leq -52^{\circ}\text{C}$ 冷云罩面积达到 200000 km^2 以上,云团主体呈椭圆状。由于云团处于南亚高压南侧,高空辐散运动强烈,其南侧有长长的由高空流出卷云砧组成的南北走向卷云带。根据Maddox(1980;1983)概括出的MCC的定义和物理特征,MCC形成。23时,重庆荣昌 TBB 达 -86°C (图略),云团偏心率接近1.0,这也是重庆荣昌盘龙极端小时强降雨出现的时段,表明对流发展最为旺盛。21日23时至22日04时,中尺度雨带的强降雨逐渐减弱,西南涡控制区域形成的混合性降水占据主导地位,降雨范围扩大,近似呈圆形,MCC持续发展(图6d~6f),冷云体逐渐发展成巨大的圆形,MCC进入持续阶段。22日05—08时,西南涡减弱南移,MCC中冷云区面积逐步缩小,偏心率低于0.7,整个云团南移,云型变得比较松散,强降雨逐步减弱(图略)。总体上,MCC在过程初期由西南涡暖区中的中尺度强对流雨带发展起来,中后期为西南涡控制区域的混合性降水所形成和持续,重庆盘龙的TBB在极端小时强降雨出现的时段达最低值。

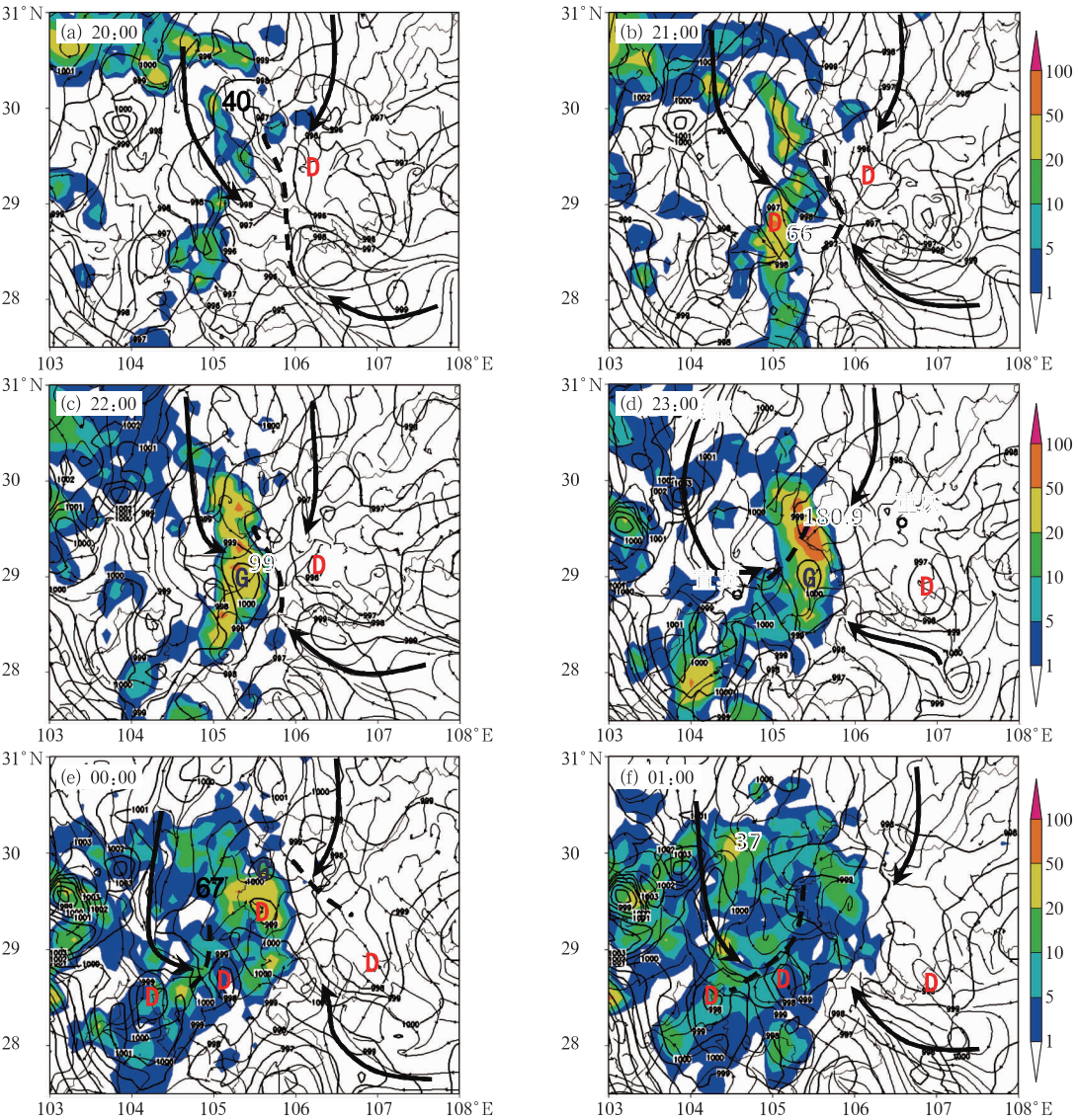


图 5 2012 年 7 月 21 日 20 时至 22 日 01 时地面辐合线与小时雨量分析图

(阴影:小时降雨量,单位:mm;粗点划线:辐合线;粗黑箭头:主要气流方向;
黑色等值线:海平面气压,单位:hPa;大黑字:小时雨强中心值)

Fig. 5 Surface convergence line and hourly rainfall analysis from 20:00 BT 21
to 01:00 BT 22 July 2012

(color shaded: hourly rainfall, unit: mm; bold dot dashes: surface convergence line;
thick black arrows: main direction of stream; black contours: sea level pressure, unit: hPa;
bold black words: rainfall center)

3.3 极端小时强降雨与雷达回波分析

目前,多普勒雷达个例研究多集中在龙卷、冰雹和大风类灾害性天气(俞小鼎等,2006a;2006b;2006c;廖晓农等,2008;余蓉等,2012;陈贵川等,2011;吴芳芳等,2012),暴雨个例研究相对较少(俞小鼎,2012;湛芸等,2012;孙军等,2012)。短时暴雨是由相对较高的降水率和相对较长的降水持续时间而造成的

(Maddox,1983)。通常大的累计降水量由“列车效应”产生,即降水系统尽可能长时间通过同一个地方,实际上还可以在降水系统移动缓慢或静止不动的情形下出现。盘龙在短短 1 h 内形成 180.9 mm 的极端小时强降雨,2 mm · min⁻¹ 以上雨强接近 1 h,最强雨强 5 mm · min⁻¹ (图 7a),过程中,中小尺度系统是如何演变呢? 相互又是如何作用呢? 下面分别从 SWAN 拼图和单部雷达资料来详细分析其演变和结构。

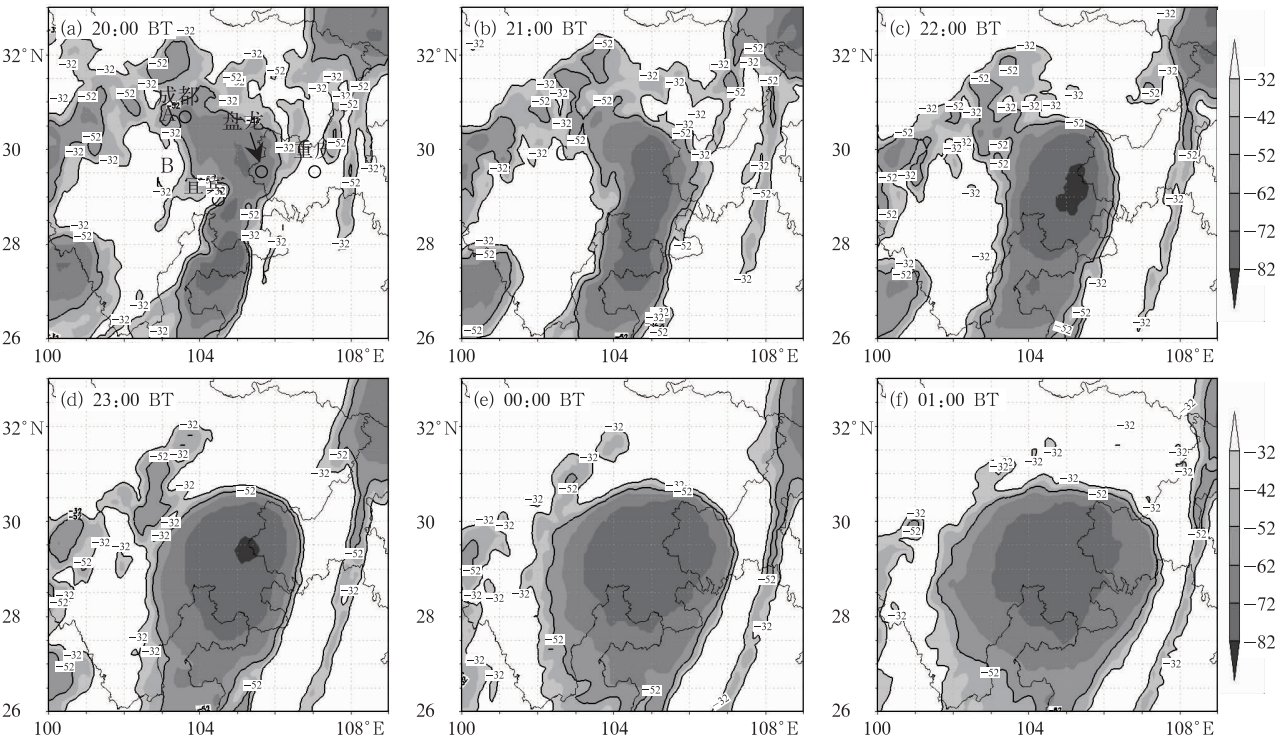


图 6 2012 年 7 月 21 日 20 时至 22 日 01 时卫星资料的 TBB 分析图
Fig. 6 TBB fields from 20:00 BT 21 to 01:00 BT 22 July 2012 (unit: $^{\circ}\text{C}$)

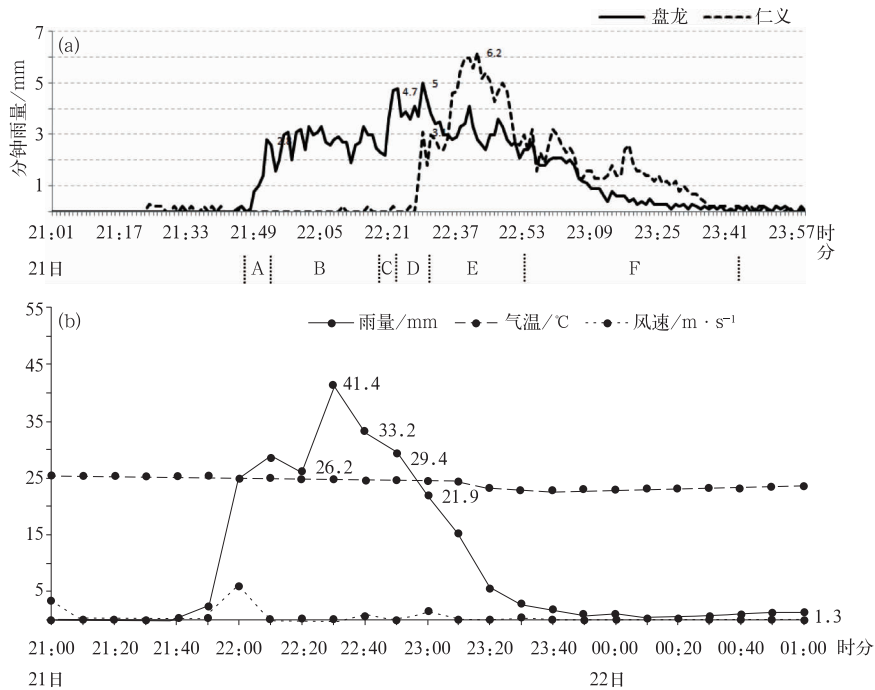


图 7 (a) 重庆荣昌两区域站分钟雨量时序图(A—F 表示影响盘龙的强降水多单体发展的 6 个阶段); (b) 重庆荣昌盘龙 10 min 雨量(实线)、气温(虚线)、风速(点线)时序图
Fig. 7 (a) Rainfall in minute of Panlong and Renyi Stations during 21:00 BT 21 to 00:00 BT 22 July 2012 (A to F denote 6 stages mainly affecting short-time extremely heavy rainfall at Panlong Station); (b) the time evolution of rainfall (solid line), surface temperature (dashed line) and wind speed (dotted line) in ten minutes at Panlong Station

3.3.1 SWAN 拼图-极端小时强降雨与西南涡的关系分析

利用四川盆地内多部雷达的 SWAN 拼图(含:重庆、成都、宜宾、达州、南充、万州、黔江共 7 部雷达)资料来分析强降雨雨带与西南涡的关系。

从 3 km 高度的反射率因子和 COTREC 风场分析序列图可以看到(图 8a~8h):21 日 22—23 时,与 700 hPa 西南涡环流相对应,四川盆地主要由两支气流控制,北支气流位于西南涡的西北侧,携带冷空气从四川盆地北部沿东北—西南向发展,这支气流上对流性弱,反射率因子较低,降水弱;南支气流位于西南涡的东南侧,伴随有偏南风低空急流,对流发展旺盛,回波强,降水强度大。低空急流的形成增强了中低层的垂直风切变,有利于强降雨多单体的发展和维持。22:06,增强的低空急流头部与北支偏北风相切的区域形成一个清楚的 β 中尺度气旋性环流,此环流移动缓慢,一直持续到 22:54 左右,盘龙的极端小时强降雨就发生在这个 β 中尺度环流的中心附近。从南北两支气流的强弱变化来看,两支气流都有脉动的现象,北支气流在 22:30—22:42 较强,南支气流缓慢向东扩展;23:48,北支气流再次增强,重庆西部的环流减弱,强降水也随之减弱。

以上分析表明:西南涡在结构上并不是一个均匀或者规则的系统,其中存在 β 中尺度环流; β 中尺度环流形成在西南涡暖区一侧,伴随有偏南风低空急流;极端小时强降雨出现在低空急流头部(β 中尺度环流中心附近)。

3.3.2 强降雨多单体的组织发展历程与结构

从 10 min 气象要素变化来看(图 7b),整个强降雨过程中,盘龙的温度场和风场的变化幅度都较小。强降雨期间(21 日 22—23 时)气温的变化幅度在 1°C 左右;瞬时风速最强出现在 22:26,只有 $13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。同时,雷达资料显示盘龙附近有持续的中气旋,而没有观测到龙卷、冰雹或大风的强对流性天气特征。超级单体风暴与其他强风暴的本质区别在于超级单体风暴含有一个持久深厚的中气旋(俞小鼎等,2006a)。因此,此过程中的回波体在组织形态上属于带状多单体结构,其中镶嵌有强降雨超级单体风暴,带有中气旋。根据盘龙分钟雨强及带中气旋的强降雨超级单体风暴的演变情况将影响盘龙的强降雨多单体发展历程分为强降雨多单体风暴形成、强降雨多单体风暴持续、单强降雨超级单体风暴形成、强降雨超级单体风暴持续、多强降雨超级单体持续

发展、强降水多单体缓慢减弱等六个阶段。下面为了更清楚地展现盘龙极端强降水形成的过程,利用每 6 分钟一次的回波资料详细分析。

第一阶段,21:42—21:54,强降水多单体风暴形成。21:42 组合反射率(图 9a)显示荣昌西部有 A、B、C 三个带状回波(A、B 为 β 中尺度,C 为 γ 中尺度),A、C 向东北偏北方向缓慢移动,B 主体稳定,盘龙位于 A 与 B 中间的间隙处。21:42—21:54(图 9b),B 南端(盘龙西部)诱生新的多单体并发展,21:48,盘龙出现降雨,很快 4 min 后盘龙分钟雨强达到 $2.8\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ (图 7a),强降雨开始。

第二阶段,21:54—22:12,强降水多单体风暴持续。22:06 组合反射率(图 9c)显示盘龙附近的对流单体迅速发展,A、B 带状回波连成一个“S”形带状回波(仍标识为 A)，“S”形回波整体以盘龙为中心呈气旋式旋转。

第三阶段,22:12—22:18,强降水超级单体风暴形成。22:18 组合反射率(图 9d)显示带状回波 C 也和 A 相连形成了一个更大的“S”形带状回波(仍标识为 A),合并的“S”形带状回波北端略有减弱,南端增强并缓慢向北发展,盘龙附近的中心回波显著增强,同时,在径向速度图上可看到中气旋 mA(图 10a)。

对中气旋 mA 中心做沿雷达径向和切向的剖面分析可见:45 dBz 以上的强中心上升到 9 km 左右高度(图 11a 和 11c),6 km 高度处 45 dBz 以上的区域直径达 20 km 左右;与雷达径向相切方向的径向速度剖面(图 11b),中气旋从 3.4 km 发展 7.2 km 高度(由于地形对雷达回波的遮挡,低于 3.4 km 的低层探测不到,因此实际情况中气旋可能向下发展到 3.4 km 以下),相当深厚,从低到高的旋转中心几乎垂直,径向和方位角方向的直径分别为 7.8 和 10.5 km,转动速度达 $17.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,达到中等强度中气旋的标准(俞小鼎等,2006a);沿雷达径向的径向速度剖面(图 11d)显示 7 km 以下有强烈的径向速度辐合,同时 9 km 以上高空伴随有强辐散。22:15,分钟雨强达 $3.3\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。显然,伴随有深厚中气旋的缓慢移动的强降水超级单体风暴是形成极端短时强降雨的重要因素。

第四阶段,22:18—22:35,强降水超级单体持续发展。组合反射率(图 9d~9g)显示“S”形回波仍围绕盘龙附近呈气旋式旋转,其北段缓慢减弱,中南段持续发展并缓慢向东北偏北移动。在径向速度图上

可看到此期间中气旋 mA 在盘龙附近稳定少动(图 10a~10d)。COTREC 风场显示偏南风急流持续并略向西北偏北移(图 8c~8d)。由于偏南风急流提供了源源不断的水汽,中气旋提供了强烈的动力上升运动,同时,超级单体风暴处于 β 中尺度环流的中心附近,稳定少动,这些因素共同促使盘龙强烈降雨。这期间盘龙的大部分分钟雨强都在 $4\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 左右,最强分钟雨强出现在 22:29,达 $5.0\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ (图 7a)。

第五阶段,22:35—22:53,强降雨超级单体风暴持续发展。组合反射率(图 9d~9g)显示“S”形回波在气旋式旋转中逐渐发生分裂。在 22:47 形成围绕中心缓慢旋转的 A、D、E 三个带状回波(形似于台风的螺旋云带),D 较弱,逐渐消亡,而 A、E 较强,向东北偏北移动。径向速度图上除了盘龙附近的中气旋 mA 外还新生了 mB 和 mC 两个中气旋(图 10e~

10g),表明又有两个强降雨超级单体风暴形成。

新中气旋的出现减弱了 mA 的强度。从 22:47 中气旋 mA 的剖面图分析,强反射率因子中心下降到 5 km 左右(图 12),中气旋 mA 伸展高度降低,中层径向辐合明显减弱。22:54 盘龙分钟雨强降为 $2.4\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。但是,带有中气旋 mB 的强降雨超级单体风暴靠近仁义,直接导致了仁义的强降雨,仁义在 22:42 出现最强分钟雨强 $6.2\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

第六阶段,22:53—23:40,强降雨多单体缓慢减弱。径向速度图上三个中气旋先后消失(图略),强降雨超级单体风暴减弱为多单体风暴。组合反射率(图 9d~9g)显示 A、D、E 三个带状回波随着气旋式旋转逐渐散开,盘龙的分钟雨强减弱,23:09 降到 $1\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,之后带状回波 A 离开盘龙,23:40 左右形成间断性降雨。COTREC 风场显示(图 8g~8h) 23:06—23:48 川西北的冷空气增强,川东南的偏南

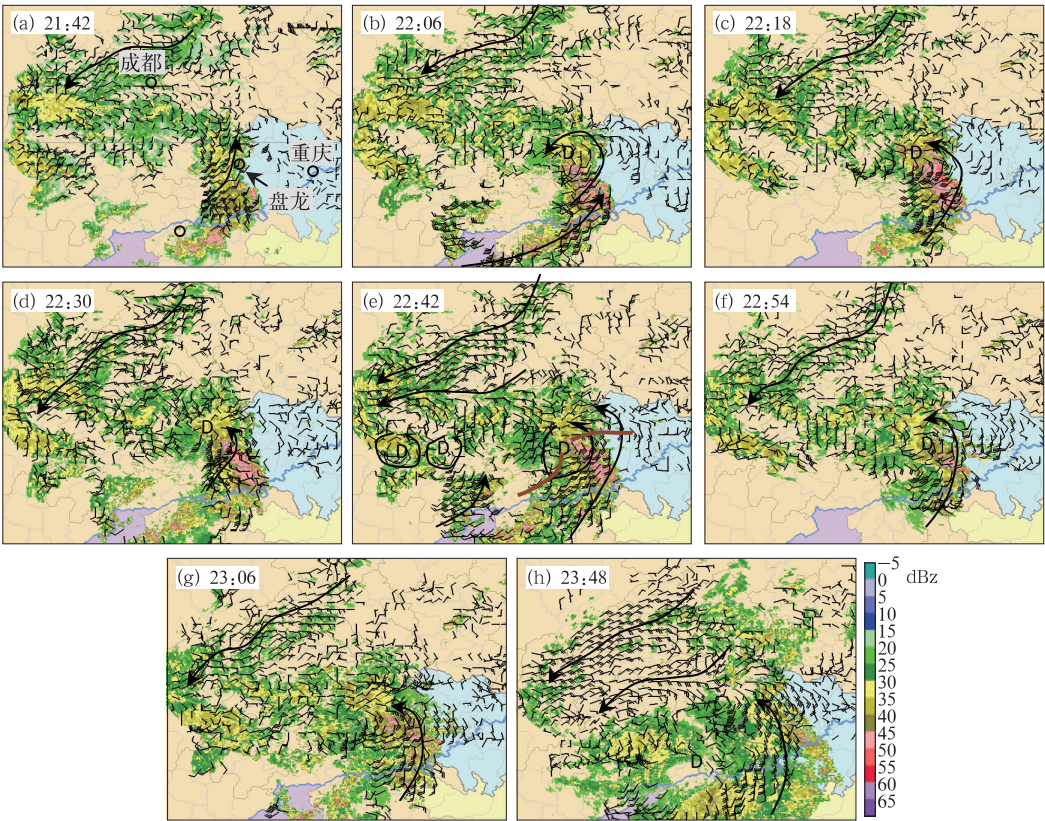


图 8 2012 年 21 日 21:42—23:48 时雷达 SWAN 拼图 3 km 高度的反射率因子
和 COTREC 风场分析序列图
(带箭头的黑线:显著流线;棕色线:槽线或切变线)

Fig. 8 Mosaic reflectivity of CAPPI and COTREC wind barb display at the height 3 km, and products of SWAN, in 21:42–23:48 BT 21 July 2012 including Chongqing, Chengdu, Yibin, Dazhou, Nanchong, Wanzhou and Qianjiang radar stations
(black arrow lines: significant streamline; brown lines: inverted trough or shear line)

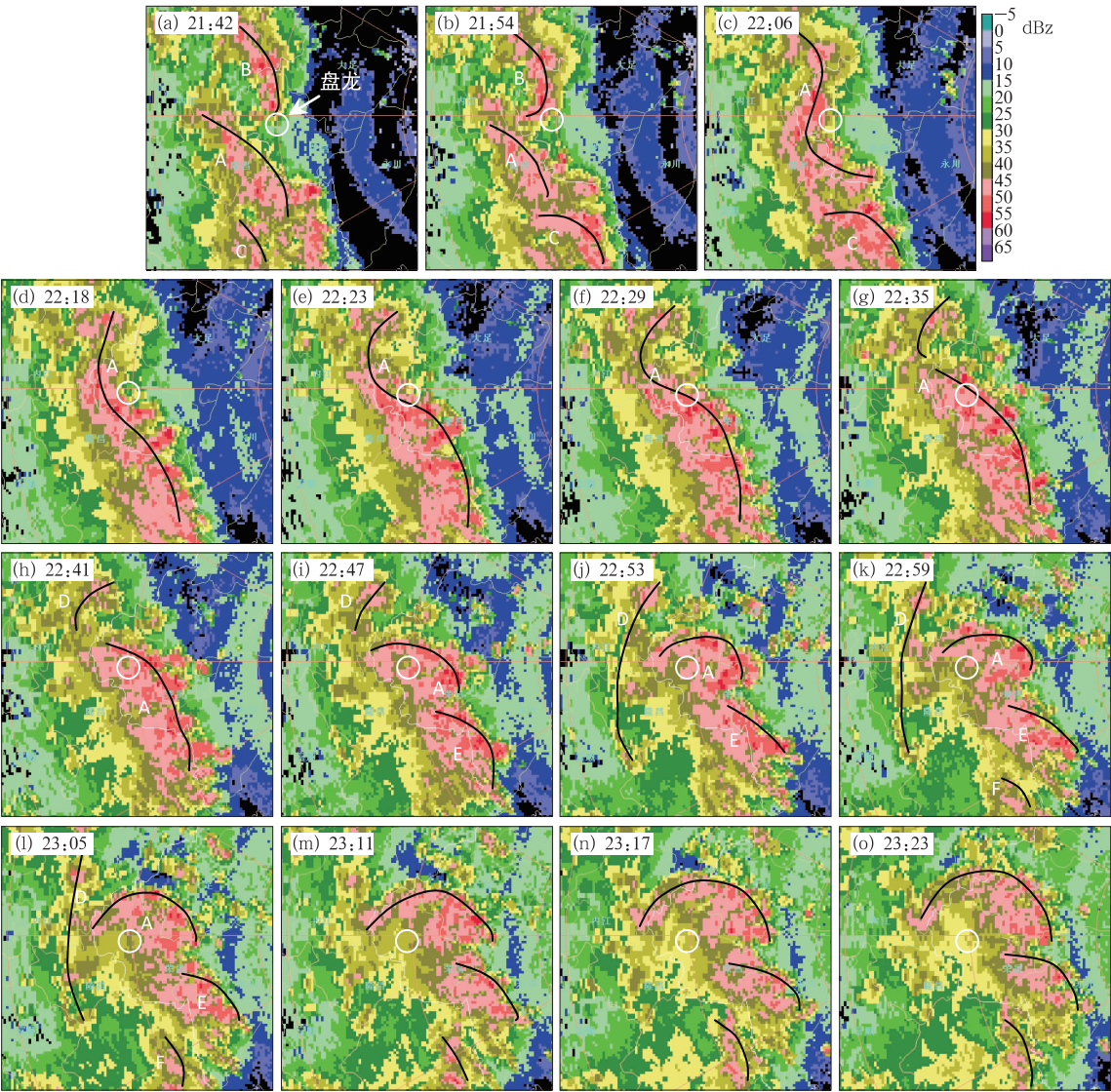


图 9 2012 年 7 月 21 日 21:42—23:23 时重庆雷达(CINRAD-SA)组合反射率因子序列图
(白圈中心:盘龙;黑线:带状回波)

Fig. 9 Time series of composite reflectivity images of Chongqing CINRAD-SA
in 21:42—23:23 BT 21 July 2012
(white circle: location of Panlong, black line: bow echo)

急流减弱,荣昌附近的 β 中尺度环流消失,盘龙附近的强降雨结束。

从盘龙极端强降雨发展的六个阶段来看,强降雨与西南涡以及其中的 β 中尺度气旋式环流的生消密切相关,这两个系统分别提供了 α 中尺度和 β 中尺度的环流背景。西南涡南侧的暖湿气流提供了充足的水汽,北侧的冷空气对强对流发展起到触发作用,南北冷暖空气的交绥促进了 β 中尺度气旋式环流的形成,冷空气增强南压则导致 β 中尺度气旋式环流减弱消失。 β 中尺度或 γ 中尺度的带状回波在 β 中尺度环流的影响下呈气旋式缓慢旋转,强降水

多单体稳定维持在环流中心附近的区域。伴随有深厚中气旋的强降水超级单体风暴上升运动强烈,具有很高的降水效率,尤其是接近 β 中尺度气旋式环流中心的区域。盘龙的极端强降雨就是在西南涡中的 β 中尺度气旋式环流下,伴随有单个或多个深厚中气旋的强降水超级单体风暴在气旋式环流中心附近持续发展而形成的。

3.4 中小尺度系统结构分析

综合分析此次过程中西南涡的中小尺度系统结构(图 13),可以看出: β 中尺度对流强降水系统发生

在西南涡东侧的暖区中,呈带状;MCC 与 β 中尺度对流系统位置相对应,是对流系统强烈发展过程中在卫星云图上的反应; β 中尺度对流系统头部为 β 中尺度气旋式环流,南侧伴有低空急流;镶嵌有强降

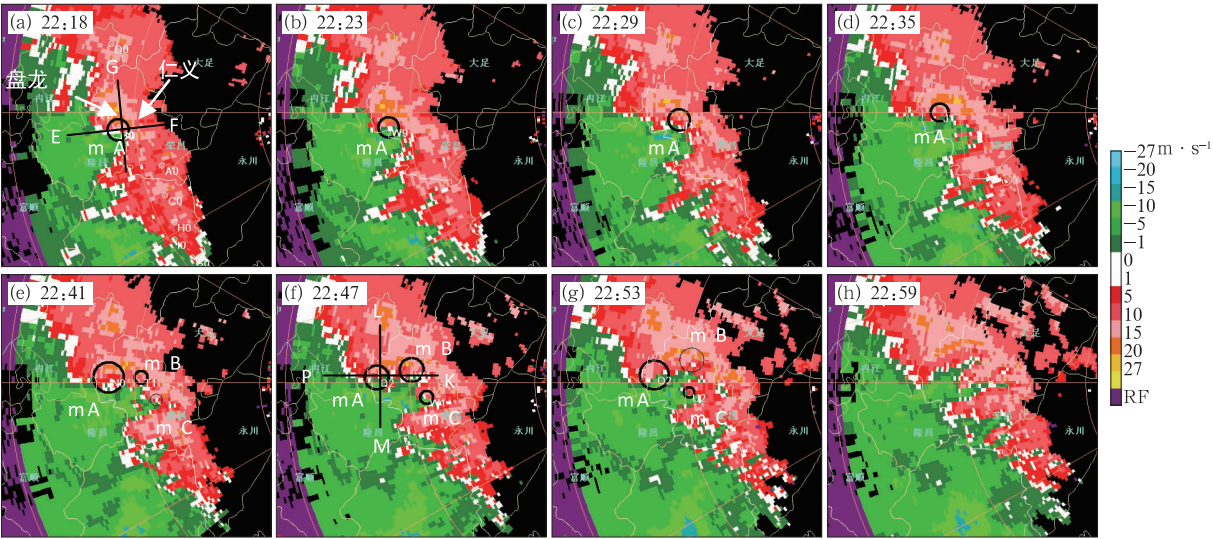


图 10 2012 年 7 月 21 日 22:18—22:59 重庆雷达径向速度
(仰角:2.4°;粗线圆圈:中气旋;细线圆圈:三维相关切变;EF、GH 连线为图 11 的剖面路径、LM、PK 连线为图 12 的剖面路径)
Fig. 10 Chongqing radar PPI images of Doppler velocity at 2.4° elevations in 22:18—22:59 BT 21 July 2012
(thick circles: meso-cyclone, thin circle: shear related three dimensions according to WSR-88D algorithm, and black line of EF and GH, LM and PK are tracks of the cross-sections in Fig. 11 and Fig. 12 respectively)

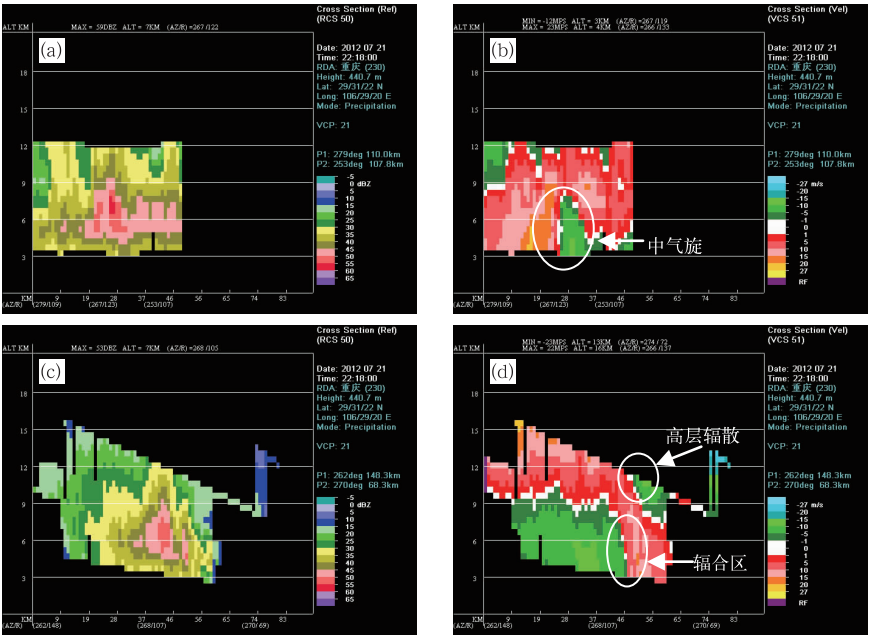


图 11 2012 年 7 月 21 日 22:18 重庆雷达剖面图(剖面路径见图 10a)
(a) GH 连线的反射率因子剖面, (b) GH 连线的径向速度剖面,
(c) EF 连线的反射率因子剖面, (d) EF 连线的径向速度剖面
Fig. 11 Vertical cross sections of Chongqing radar along lines of GH
and EF in Fig. 10a at 22:18 BT 21 July 2012
(a, c) reflectivity cross section, (b, d) radial velocity cross section

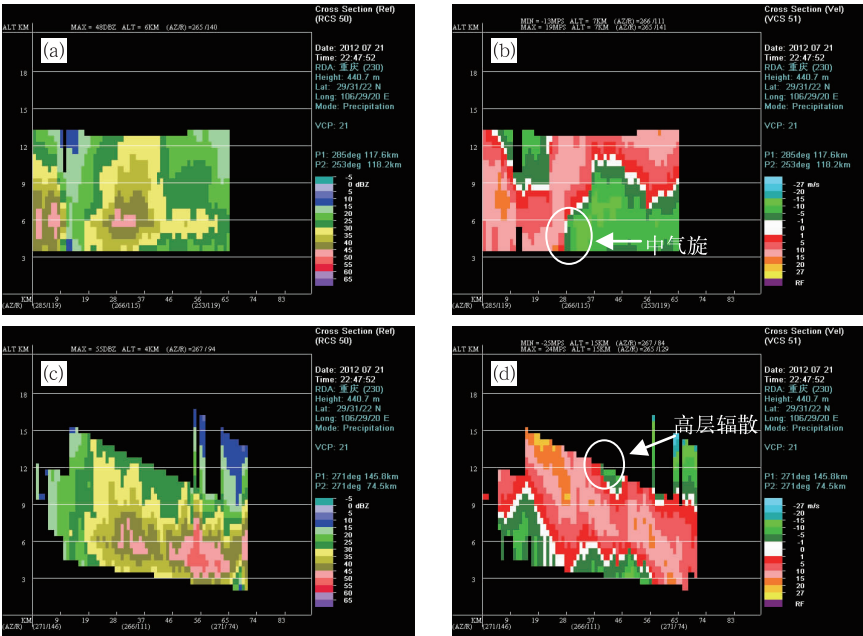


图 12 2012 年 7 月 21 日 22:47 重庆雷达剖面图(剖面路径见图 10f)
(a) LM 连线的反射率因子剖面, (b) LM 连线的径向速度剖面,
(c) PK 连线的反射率因子剖面, (d) PK 连线的径向速度剖面
Fig. 12 As in Fig. 10, but along the lines of LM and PK
in Fig. 10f at 22:47 BT 21 July 2012
(a, c) reflectivity cross section, (b, d) radial velocity cross section

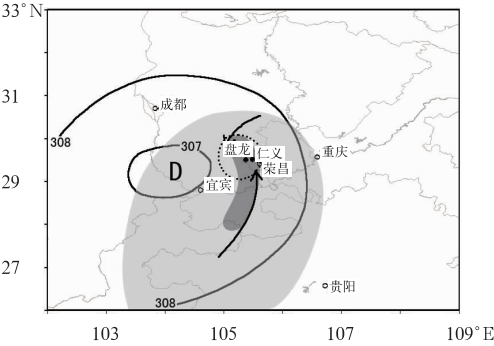


图 13 西南涡的中小尺度系统结构图
(D:西南涡;浅灰色阴影区:MCC;灰色阴影区: β 中尺度对流系统;箭头:700 hPa 流线,南侧为低空急流;点线: β 中尺度气旋式环流中心区;黑点:强降水超级单体风暴)

Fig. 13 Mesoscale system structure of southwest vortex

(D: southwest vortex; light gray shaded area; MCC; gray shaded area: meso- β scale convection system; arrows: 700 hPa streamline; low level jet stream on the south side of it; dotted line: the central area of meso- β scale cyclonic circulation; dark point: heavy precipitation supercell storm)

水超级单体风暴的带状多单体对流风暴是 β 中尺度对流系统的具体组织形态。

4 结论与讨论

(1) “12. 7. 21”西南涡暴雨过程是“北槽南涡”形势下,地面冷空气触发,西南涡东侧辐合上升运动强烈发展,高层强辐散,产生的对流性暴雨天气过程。暴雨开始前,川东大部地区天气晴好,气温上升快,偏南风低空急流促使四川盆地中南部水汽陡增,对流不稳定性快速增强,为强降雨的发生提供了重要的水汽条件和层结不稳定条件。地面冷空气受 700 hPa 西南涡西侧气流作用,缓慢侵入西南涡,在重庆西部附近形成“S”形冷锋,极端强降雨就发生在其北侧。

(2) 中尺度雨带与地面辐合线以及 MCC 的分析表明,地面辐合线对中尺度雨带有一定的指示性:降雨前期,辐合线比雨带偏东,最强降雨阶段雨带与辐合线吻合较好;副高阻塞,中高层风的偏西分量弱,雨带移动缓慢,是中尺度雨带形成极端短时强降雨的重要原因;MCC 在过程初期由西南涡暖区中的

中尺度强对流雨带发展起来,中后期为西南涡控制区域的混合性降水所形成和持续,极端小时强降雨发生时 MCC 中心 TBB 达最低值。

(3) 西南涡南北两侧冷暖空气的交绥促进了重庆西部 β 中尺度气旋式环流的形成。 β 中尺度气旋式环流南侧伴随有偏南风低空急流,低空急流增强了中低层的垂直风切变,有利于强降水多单体的发展和维持,极端小时强降雨出现在 β 中尺度环流中心附近。盘龙的极端强降雨是 β 中尺度气旋式环流中,伴随有深厚中气旋的强降水超级单体在气旋式环流中心附近持续发展的结果。

(4) 此次过程中西南涡的中小尺度系统结构: β 中尺度对流系统发生在西南涡的东侧,MCC 是强对流系统在卫星云图上的反映, β 中尺度对流系统含有 β 中尺度气旋式环流、低空急流等组织结构,镶嵌有强降水超级单体风暴的带状多单体对流风暴是 β 中尺度对流系统的具体组织形态。

(5) 西南涡中的 β 中尺度气旋式环流、带状回波以及中气旋的具体相互作用机制还需要深入的探讨和数值模拟研究。同时,在此过程开始前(21 日 20 时)重庆与宜宾探空资料的中低层都没有明显低空急流,垂直风切变都较小,但是从反演的 3 km COTRE 风场,可以分析出重庆与宜宾之间的区域有明显的低空急流,西南涡南侧这支中尺度低空急流还需要其他个例佐证并深入研究。

致谢:衷心感谢国家气象中心周军提供的全国区域站小时加密资料。

参考文献

- 陈贵川,谌芸,乔林,等. 2011. 重庆“5.6”强风雹天气过程成因分析. 气象, 37(7): 871-879.
- 陈永仁,李跃清. 2013. “12.7.22”四川暴雨的 MCS 特征及对短时强降雨的影响. 气象, 39(7): 848-860.
- 谌芸,孙军,徐珺,等. 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考 (一)观测分析及思考. 气象, 38(10): 1255-1266
- 杜倩,覃丹宇,张鹏. 2013. 一次西南低涡造成华南暴雨过程的 FY-2 卫星观测分析. 气象, 39(7): 821-831.
- 高守亭. 1987. 流场配置及地形对西南低涡形成的动力作用. 大气科学, 11(3): 263-271.
- 顾清源,肖逸祥,黄楚惠,等. 2009. 低空急流在副高西北侧连续性暴雨中的触发作用. 气象, 35(4): 59-67.
- 顾清源,周春花,青泉,等. 2008. 一次西南低涡特大暴雨过程的中尺

- 度特征分析. 气象, 34(4): 39-47.
- 江玉华,何跃,邓承之,等. 2009. 重庆市大范围暴雨与西南低涡. 第 26 届中国气象学会年会论文集. 2441-2447.
- 康岚,冯汉中,屠妮妮. 2008. 一次川渝大暴雨的中尺度分析. 气象, 34(10): 40-49.
- 廖晓农,俞小鼎,王迎春,等. 2008. 北京地区一次罕见的雷暴大风过程特征分析. 高原气象, 27(6): 1354-1361.
- 李国平,万军,卢敬华. 1991. 暖性西南低涡生成的一种可能机制. 应用气象学报, 2(1): 91-99.
- 刘健文,郭虎,李耀东,等. 2005. 天气分析预报物理量计算基础. 北京: 气象出版社, 221-225.
- 卢敬华. 1986. 西南低涡概论. 北京: 气象出版社, 129-146.
- 卢敬华. 1988. 利用热成风适应原理对暖性西南低涡生成机制的再分析. 高原气象, 7(4): 345-356.
- 马红,郑翔飏,胡勇,等. 2010. 一次西南涡引发 MCC 暴雨的卫星云图和多普勒雷达特征分析. 大气科学学报, 33(6): 688-696.
- 钱正安,顾弘道,颜宏,等. 1990. 四川“81.7”特大暴雨和西南涡的数值模拟. 气象学报, 48(4): 415-423.
- 孙军,谌芸,杨舒楠,等. 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考 (二)极端性降水成因初探及思考. 气象, 2012, 38(10): 1267-1277.
- 陶诗言,等. 1980. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1-7.
- 王家祁. 2002. 中国暴雨. 北京: 中国水利水电出版社, 89-121.
- 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.
- 吴国雄,刘还珠. 1999. 全型垂直涡度倾向方程和倾斜涡度发展. 气象学报, 57(1): 2-16.
- 余蓉,张小玲,李国平,等. 2012. 1971—2000 年我国东部地区雷暴、冰雹、雷暴大风发生频率的变化. 气象, 38(10): 1207-1216.
- 俞小鼎. 2012. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨成因分析. 气象, 38(11): 1313-1329.
- 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 2006a. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京: 气象出版社, 116-118, 130-163, 172-174, 208.
- 俞小鼎,张爱民,郑媛媛,等. 2006b. 一次系列下击暴流事件的多普勒天气雷达分析. 应用气象学报, 17(4): 385-393.
- 俞小鼎,郑媛媛,张爱民,等. 2006c. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析. 高原气象, 25(5): 914-924.
- 宗志平,陈涛,徐珺,等. 2013. 2012 年初秋四川盆地两次西南涡暴雨过程的对比分析与预报检验. 气象, 39(5): 567-576.
- 宗志平,张小玲. 2005. 2004 年 9 月 2—6 日川渝持续性暴雨过程初步分析. 气象, 31(5): 37-41.
- 周国兵,沈桐立,韩余. 2006. 重庆“9.4”特大暴雨天气过程数值模拟分析. 气象科学, 26(5): 572-577.
- Maddox R A. 1980. Mesoscale convective complexes. Bull Amer Meteor Soc, 61: 1374-1387.
- Maddox R A. 1983. Large-scale meteorological conditions associated with midlatitude mesoscale convective complexes. Mon Wea Rev, 111: 1475-1493.