

重庆2008年7月21日强对流 天气成因及其特征

牟 容¹ 余 君² 刘 德¹

(1. 重庆市气象台, 401147; 2. 重庆市气象信息与技术保障中心)

提 要: 对2008年7月21日重庆市一次强对流天气过程进行诊断分析, 通过分析天气背景, 雷达回波, 并应用四维变分同化方法反演风场, 研究了强对流天气的发展机制。结果表明: 高层冷空气入侵和中低层低涡系统强盛的暖湿气流形成的辐合切变是发生强对流的主要原因。雷达观测具有明显的弱回波区和“逆风区”; 反演水平风场表现为低层强回波前部有一条辐合上升带, 到中层辐合上升带与强回波区重合, 高层则对应辐散区; 从风场的垂直剖面来看, 强对流后部为入流区, 到达中部后, 形成强烈的上升气流, 低层辐合带和强烈的上升气流形成强回波。在前部弱回波区处存在强降水下落形成的出流, 该气流与暖湿气流辐合造成了浅薄的出流边界。

关键词: 低涡 辐合 列车效应 逆风区 四维变分同化 出流边界

Analysis on Causation and Character of a Strong Convection Event on 21 July 2008 in Chongqing City

Mu Rong¹ Yu Jun² Liu De¹

(1. Chongqing Meteorological Observatory, 401147;

2. Chongqing Meteorological Information Center)

Abstract: A strong convection event on 21 July 2008 in Chongqing City was diagnosed. The developing mechanism of the strong convection weather was studied with the background of weather, the echoes of radar and the wind field computed by 4D-VAR technique. The results indicate that the strong storm was caused by atmospheric convergence, which was brought by upper cold air inrush and lower warm-wet airflow intersection. Observation of radar shows that there were a weak echo field and “adverse wind region”. Low level wind field computed by 4D-VAR shows that there was a convergence band before strong echoes. The convergence band is superposed with strong echoes in the middle-level. And the upper-level

is divergence field. At the vertical section, there was an inflow at the rear of strong convection area. In the middle of squall line there was a strong rising motion, which produced strong echoes. The strong rainfall in the front of weak echo produced the outflow, which converged with warm and wet air and formed a thin outflow border line.

Key Words: low vortex convergence train effect adverse wind region 4D-VAR out-flow border

引 言

强对流天气发生的特点是空间尺度小,一般水平范围大约在十几千米至二三百千米,有的水平范围只有几十米至十几千米;生命史短,并带有明显的突发性,约为一小时至十几小时,较短的仅有几分钟至一小时;致灾重,强对流天气来临时,经常伴随着电闪雷鸣、风大雨急等,具有局地性和突发性强,破坏性大等特点,因此国内外专家一直致力于对其的发生背景,内部结构等方面的研究。

由于常规探测网的时空分辨率较低,很难对局地强对流天气作出定时、定点的预报,而多普勒天气雷达具有常规气象观测资料无可比拟的时间和空间的高分辨率,其距离分辨率可达几百米,5~6 分钟即可完成一次体积扫描,是研究中小尺度天气系统的主要手段之一。通过雷达资料对强对流天气的识别和发展演变的分析研究越来越多,但是多普勒雷达观测到的是径向速度和反射率因子,对中尺度强对流天气的动力结构研究还不够深入。过去几十年里国内外研究发展了许多多普勒雷达风场反演的方法^[1-3]来分析风暴内部动力结构。通过反演风场能直观地分析中小尺度天气的动力结构,并结合常规探测资料等深入了解强对流天气的内部结构和影响因子,更有利于分析研究和预报强对流天气的发生发展。

1 资料与方法介绍

本文所用的多普勒天气雷达资料四维变

分同化方法,国内外的研究都证明其在理论上的先进性和合理性。它是由 Sun 等^[3]建立,并在原方法的基础上经过一定的简化和改进^[4-5]。这里仅对其作一简要介绍,详细可查阅文献^[3]。同化模式为一个三维云模式,云模式建立在笛卡儿坐标系中,采用滞弹性近似,包含 6 个预报方程,它们是 3 个动量方程、热力方程、雨水方程和总水方程。数值模式以无量纲变量形式编程,这样可以平衡不同变量量级的差异,使得在同化过程中每个变量有相似的权重从而得到更好的收敛率。四维变分同化的基本思想就是找模式变量的最优初始场,使得模式输出结果在一定的时间域和空间域上与相应的观测结果尽可能接近^[1]。为此单部雷达价值函数 J 为

$$J = J_b + \sum_{\sigma, \tau} [\eta_v (V_r - V_r^\phi)^2 + \eta_z (Z - Z^\phi)^2] + J_p$$

其中求和针对空间区域 σ 、同化窗 τ 而言, η_v 和 η_z 分别是径向速度和反射率的权重系数, V_r^ϕ 和 Z^ϕ 是雷达观测的径向速度和反射率。 V_r 和 Z 表示模式输出的径向速度和反射率。本文采用时间间隔 6 分钟的相邻两次体扫资料进行同化,得到后一体扫所在时刻各高度上的风场。考虑到地面观测资料和探空资料的时空分辨率较低,利用前一体扫资料计算出的 VAD (Velocity-Azimuth Display) 风作为初始场,前一循环同化所得结果作为背景场,引入同化系统。

2008 年 7 月 21—23 日重庆市自西向东普降大到暴雨,中西部的部分区县达暴雨。其中,21 日 22 时到 22 日 04 时,重庆市中西部遭受集中强降水袭击,其中 6 小时降水量

最大达73.0mm。由于此次降水时间集中,强度大,影响范围较广,11个区县灾情比较严重,暴雨造成了大量房屋、部分城镇的工厂和公共设施的损坏;大面积的农作物减产或者绝收。本文分析了此次强降水过程的天气背景、探空资料,以及集中降水的时段的雷达资料;并利用雷达资料进行了四维变分同化风场反演分析。

2 分析结果

2.1 天气背景分析

7月19日20时500hPa上青藏高原西部低槽新生,此时川东地区受西北气流控制,天气晴好,20日开始低槽东移加深,形成高原低涡,低涡中心位于四川、青海、甘肃三省交界一带,四川、重庆大部转为偏南暖湿气流控制,低涡中心东南侧自500hPa以下均为强盛的偏南暖湿气流,500hPa风速最大达 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;到21日20时,500hPa上高原低涡(如图1细虚线圈)东移同时形成一条西南—东北向的切变(如图1细实线),切变线从甘肃经四川压过重庆中部到贵州,重庆西部沙坪坝探空站转为西北气流控制,高层冷空气(粗虚箭头)入侵重庆西部,而此时,低层仍为低涡系统控制,暖湿气流(实箭头)强盛,700hPa上风速为 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。冷暖气流交汇在重庆西部,形成切变线辐合上升区;切变线下部的地面上正好为低压槽区,低压槽区的辐合上升与低层切变线附近的辐合上升相叠加,增强了触发对流的动力。辐合上升运动触发对流不稳定能量释放,产生中尺度对流云团,对流云团在高空西北气流引导下东南向移动并发展,形成强对流天气。到22日08时,随着500hPa低涡和切变线的东移,低层也逐渐转为西北气流控制,降水东移,重庆西部的降水逐渐减弱。

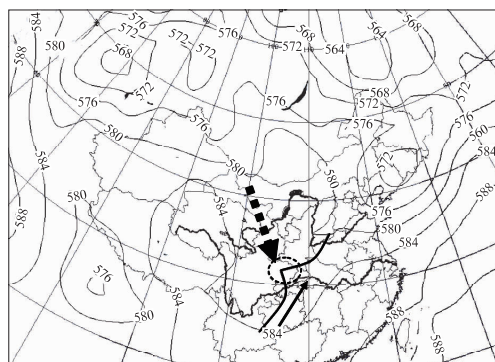


图1 2008年7月21日20时天气系统综合配置图

2.2 探空站上空温、湿、风的垂直分布

分析强对流活动区附近沙坪坝探空站上空21日20时的温、湿、风的特征并计算各种强对流参数(图2),湿对流有效位能 $864.5\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, K 指数 39°C ,沙氏指数 -2.11°C ,层结不稳定;而850与500hPa的温度差达到了 24°C , θ_{se} 之差达到了 17.51°C ,大气上冷下暖的结构非常明显;在中低层风随高度顺转,有暖平流活动,高层西北风输送的干冷空气与低层偏南暖湿气流在重庆市西部叠加,大气层结不稳定加剧,为强对流天气的发生发展提供了较大的不稳定能量、水汽条件和触发条件。

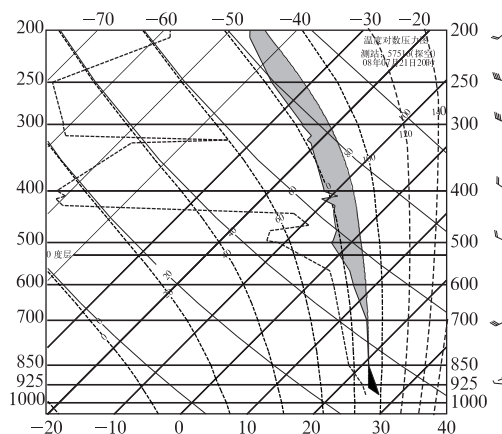


图2 2008年7月21日20时沙坪坝探空站 $T-\log p$ 图分析

2.3 雷达观测及产品分析

21日下午16时强回波区主要位于四川广安、华蓥、邻水一带,受高原低涡控制,重庆西部地区从低层到高层均以西南风为主,从大范围的径向速度正负区分布(图略)来看,回波整体也表现为西南风,回波本应随着环境风向东北方向移动,但是从反射率因子PPI图上看,20时开始不断有新生的对流泡在重庆的渝北、长寿、巴南、南川、涪陵等地发展,即:回波移动方向的后部。从而形成“列车效应”,使得回波的移动方向表现为东南向移动。同时这些分布呈带状的对流泡合并形成了一个强回波带在重庆西部发展。所以我们针对重庆西部主要降水时段在21日21时到22日04时,提取这一时段的雷达观测结果进行详细分析。

21日21时左右,强回波带附近的 0.5° 仰角层径向速度图(图3a,见彩页)上除了虚线椭圆范围有一个较弱的负速度区外,均为较一致的正速度区,并未看出有明显辐合存在,但是去除环境风,考察相对风暴平均径向速度图(图3b,见彩页),可以看到对应强回波区附近(两个椭圆位置),正的径向速度区内有一个明显的负速度区,在其南部还有一个气旋性的中尺度流场存在。可以看出,气流在此处辐合上升,对流加强。这个辐合带不断加强并向偏南方向发展。

到23:32时,最大反射率因子达到62dBz,如图4(见彩页),最强回波位于重庆渝北,从中尺度自动站的雨量记录来看,渝北石船自动站记录在23:00—23:30这半个小时内就降雨达42.9mm。从对应时刻的径向速度来看(图略),在2~3km高度上,径向速度有一个突变,径向速度在很短的距离内直接从 $-15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 变为 $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在4km高度处,西北风强度达到最大,形成的近150km的辐合带最为明显。“逆风区”(大片

正速度区内的负速度区)在 2.4° 仰角上都存在,垂直高度接近3km,此时强回波中心的回波顶高度达到18km,已到对流层顶,对流发展到最旺盛。如图4(见彩页)中不同高度的反射率因子和径向速度图,各图中箭头指向同一个位置,箭头所指之处,低仰角 0.5° 、 1.5° 的PPI上反射率因子均在30dBz以下,在 3.4° 仰角PPI上对应强回波区,反射率因子大于55dBz,有明显的弱回波区;从图中径向速度图来看,此弱回波区正好是“逆风区”位置,即:辐合上升区。与之对应,此后降水达到最大,在23:30—23:40仅10分钟内石船的降水量达21.2mm。

随后这个辐合区逐渐减弱,同时在雷达站的东南部,已发展起来一片明显的气流辐合区(图略),而此处目前还没有降水回波产生,从径向速度看,这片的辐合不断加强,到00:15左右,回波已发展比较旺盛了,并在00:20左右达到最大,并与北面的回波合成一块,形成一个东北—西南向的带状回波,图5b(见彩页)是沿着带状回波AB线段的反射率因子垂直剖面图,回波顶高大约12km,强回波主要位于低层,并已基本及地,说明此时地面降水强度也较大。

虽然地面降水强度较大,有较大的拖曳下沉作用,但是从径向速度图上看(如图6b,见彩页椭圆范围),到22日00:47时,在靠近雷达一侧为离开雷达的正速度区,而远离雷达一侧为朝向雷达的负速度区,辐合仍然非常明显,上升运动强盛,回波仍将继续发展,对流旺盛;在这个辐合区(对应图5a强回波带)的前部,有一条明显的细长弱回波带,这就是由强降水的拖曳下沉运动和前部的暖湿气流相遇辐合上升形成的出流边界,它与北面强降水前部下沉气流形成的出流边界合成一条,一起牵引后部的强回波带向偏东方向移动。

对比图6a和6b,雷达的正北方向是负

速度区,而偏南方向是正速度区,零速度线沿东北—西南走向,正好和850hPa高度场上的低涡非常吻合,说明此时低涡正在通过雷达站点附近,雷达站的东南部仍受低涡前的暖湿气流影响,图6b椭圆区的辐合仍然在加强。

2.4 风场反演结果分析

利用上面分析的雷达体扫资料,对其进行四维变分同化反演,以雷达站点为坐标原点,(40,30)为反演中心, $2\text{km} \times 2\text{km} \times 1\text{km}$ 的分辨率,对 $100\text{km} \times 100\text{km} \times 15\text{km}$ 的区域进行反演,配合风场反演结果和径向速度进行分析。

21时左右(图7a,见彩页)风场较为一致,以西南风为主;半小时后(图7b,见彩页)风场在低层开始出现辐合,辐合主要位于强回波区的前部,回波进一步增强,并逐渐形成西南—东北向的带状强回波带。而其他较高高度的风场仍维持均匀的西南风为主(图略)。

到了23:01时在1km高度上(图8a,见彩页),该强对流回波的西南—东北取向对应北部偏西气流和南部偏南气流形成一条狭长的切变线和辐合线,主要辐合区在强回波带的稍前部,这和雷达观测径向速度非常一致,辐合上升区仍位于低层强回波区的前部,在中高层5km高度(图8b,见彩页)上,已经发展成较强的辐合,而且辐合区正好位于强回波中心,而到13km高度(图8c,见彩页)风场以辐散为主,这种高层辐散,低层辐合的配置,有利于深对流的发展。同时,从垂直结构(图8d,见彩页)来看,强回波后部为入流区,到达顶部后,形成强烈的上升气流,低层辐合带和强烈的上升气流使得小水滴不断累积增大,形成强回波带。此时,降水主要位于低层强回波带前部的弱回波区,降水下落形成的出流与移动方向前部的暖湿气流辐合形成了浅薄的出流边界。

22日00:03时,1km上的水平风场(如图9a,见彩页)北部切变线位置与强回波带重合,而在南部切变线位置仍在强回波区的前部,辐合在偏南的位置仍将继续发展,而偏北的辐合将随着降水的拖曳作用而减弱,随之回波也减弱;中高层(图略)和1小时前23:01时的风场区别不大;从垂直结构来看,后部已转为下沉气流为主,同时强回波对应位置的上层已经由下沉气流代替了之前的上升气流,这是由于小水滴累积到一定程度就直接在辐合上升区降落形成拖曳下沉作用,在强回波上部造成了下沉气流。

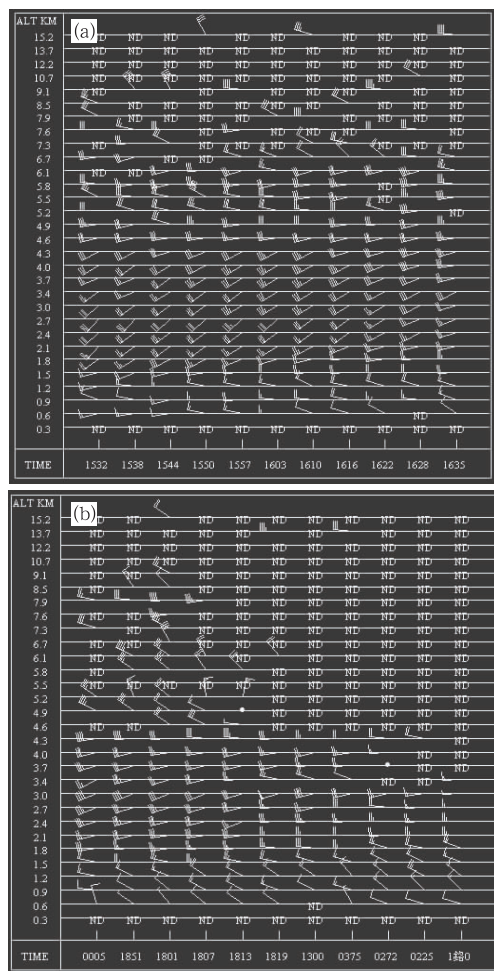


图11 2008年7月22日00:30(a)和02:40(b)的风廓线

随着降水拖曳和其他作用的影响,辐合上升区逐渐减弱,强回波带向东南方向移动,反演区域的水平风场转为偏北风为主,从图 10(见彩页)中我们也可以看到在反演区域的左上角,有一个气旋式的流场,尤其是图 10b(见彩页)比较明显,对比图 6 的两幅图,这个涡旋应该对应天气尺度的低涡中心。

同时利用 VAD 方法所得的风廓线分布(图 11)来看,重庆雷达本站在 22 日 00:30 左右近地面已转为偏北风控制,中低层仍然是偏南暖湿气流控制,到 02:40,本站上空已基本转为偏北偏西气流控制。此后雷达站附近的强对流系统逐渐减弱,到 04 时,重庆西部的强降水基本结束。

3 结论

(1) 强对流天气发生在低层对流性不稳定大气中,低层暖湿,高层干冷。低层切变线和地面低压槽区的辐合上升运动触发对流不稳定能量释放,产生中尺度对流云团,在高层西北气流引导下东移南下,在重庆市西部上空低涡中心区强烈发展,是这次强对流发展的主要原因。

(2) 雷达观测的强对流回波发展具有“列车效应”,在云团向东北方向移动的同时,新生回波在移动方向的后部生成,使得回波的移动方向表现为东南向移动;反射率因子有明显的弱回波区,径向速度图上有辐合区和“逆风区”存在。

(3) 西南—东北取向的强回波区对应北

部偏西气流和南部偏南气流形成一条狭长的切变线和辐合线;辐合上升区正好位于低层弱回波区的前部,在中高层辐合区正好位于强回波中心,而高层风场就是以辐散为主。在弱回波区处存在强降水下落形成的出流,该气流与强回波前部的暖湿气流辐合造成了浅薄的出流边界。

参考文献

- [1] 许小永,郑国光.多普勒雷达反演技术及雷达资料在数值模式中的应用[J].气象,2005,31(3):7-11.
- [2] 周海光,张沛源.多种单多普勒雷达风场反演方法对比试验[J].气象,2004,30(5):13-16.
- [3] Sun J, Crook A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint, Part I: Model development and simulated data experiments[J]. J Atmos Sci, 1997, 54(12): 1642—1661.
- [4] 牟容.利用四维变分同化技术反演低层风场的准业务应用研究[D].中国气象科学研究院硕士学位论文,2007.4.
- [5] 牟容,刘黎平,许小永,等.四维变分同化方法反演低层风场能力研究[J].气象,2007,33(1):11-18.
- [6] 杨晓霞,李春虎,杨成芳,等.山东省 2006 年 4 月 28 日飏线天气过程分析[J].气象,2007,33(1):74-80.
- [7] 吴海英,裴海瑛,沈树勤,等.飏线传播与发展及其引发地面强风过程个例分析[J].气象科技,2007,35(5):677-680.
- [8] 谢健标,林良勋,颜文胜,等.广东 2005 年“3.22”强飏线天气过程分析[J].应用气象学报,2007,18(3):321-329.
- [9] 郭艳,应冬梅,刘冬梅.江西“4.12”降雹过程的多普勒雷达资料分析[J].气象,2005,31(11):47-51.
- [10] 王莉萍,崔晓东,常英,等.一次飏线天气的非常规气象资料特征分析[J].气象,2006,32(10):88-93.

牟容等：重庆2008年7月21日强对流天气成因及其特征

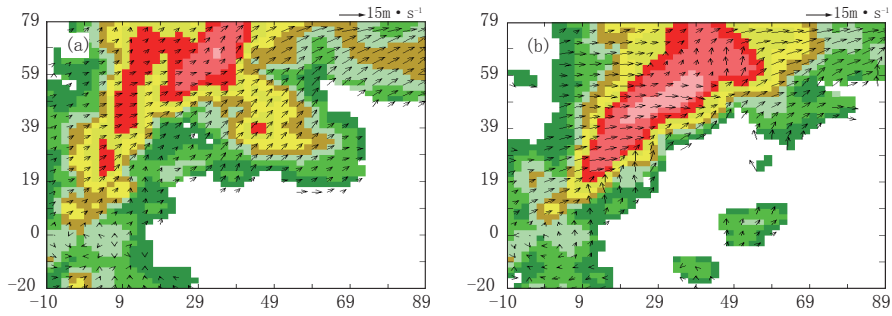


图 7 2008年7月21日21:29(a)和22:06(b)时1km高度上反射率因子与水平风场叠加

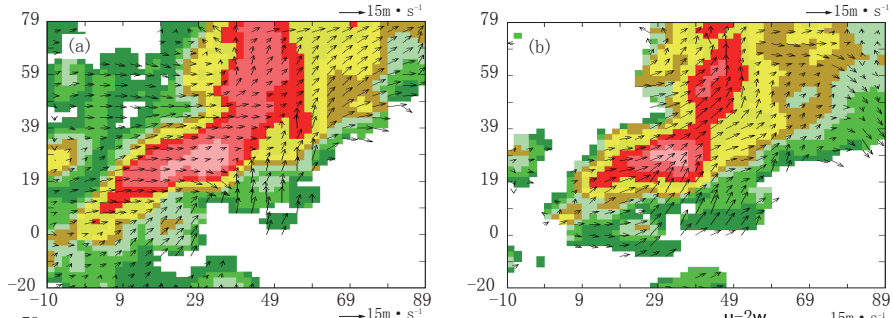


图 8 2008年7月21日23:01时1km(a)、5km(b)、13km(c)高度的反射率与水平风场叠加图

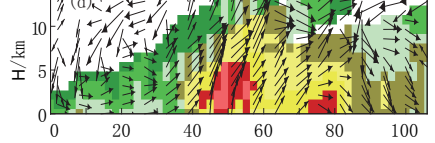


图 8 2008年7月21日23:01时1km(a)、5km(b)、13km(c)高度的反射率与水平风场叠加图和(0,-10)-(80,60)垂直剖面图(d)

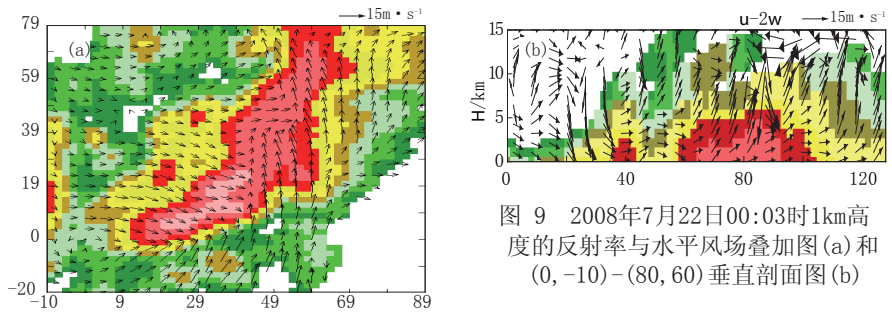


图 9 2008年7月22日00:03时1km高度的反射率与水平风场叠加图(a)和(0,-10)-(80,60)垂直剖面图(b)

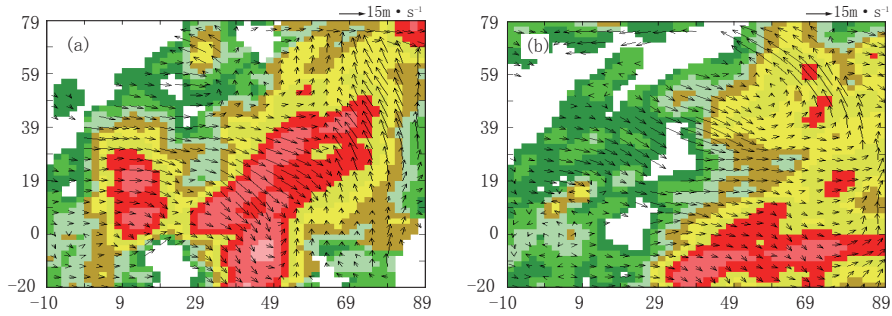


图 10 2008年7月22日00:59(a)和02:38(b)时1km高度的水平风场与反射率因子叠加

牟容等：重庆2008年7月21日强对流天气成因及其特征

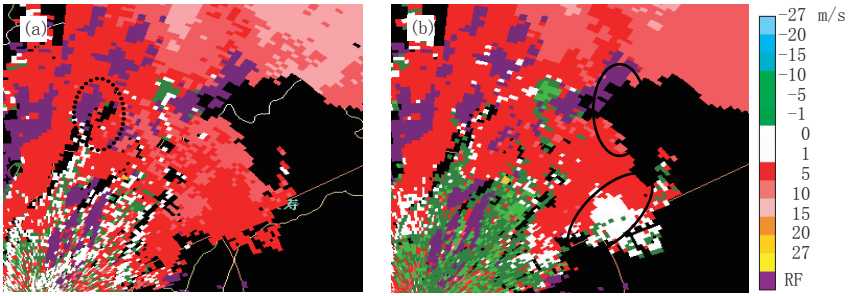


图 3 21:04径向速度(a)和相对风暴平均径向速度(b)

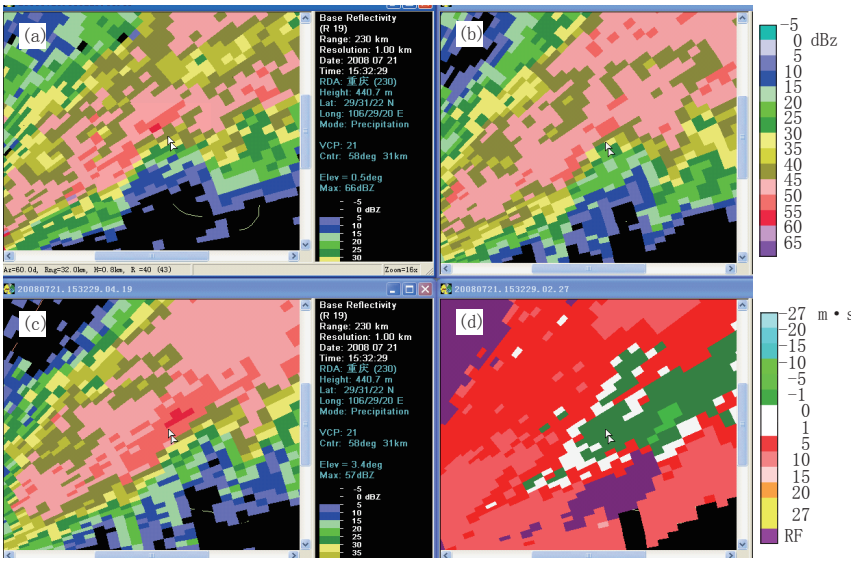


图 4 不同高度反射率因子和径向速度图
(a)0.5°R; (b)1.5°R; (c)3.4°R; (d)1.5°Vr

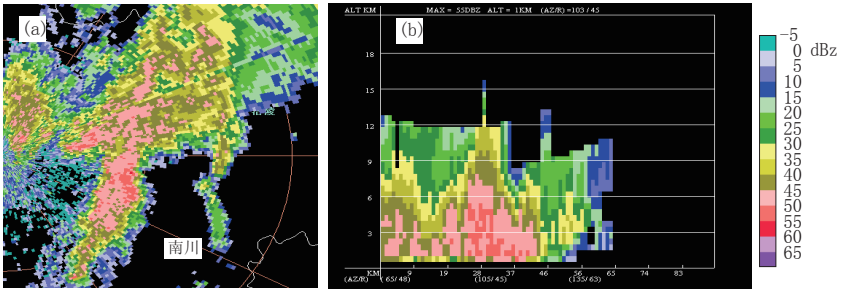


图 5 2008年7月22日00:20 1.5°仰角PPI图(a)和反射率因子剖面图(b)

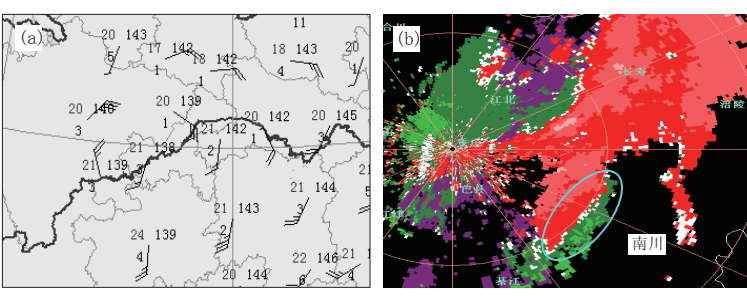


图 6 850hPa高度场和雷达观察径向速度场对比
(a)7月21日20时850hPa高度场; (b)7月22日00:47时1.5°径向速度图