

刘婷婷, 苗春生, 张亚萍, 等. 2014. 多普勒雷达风场反演技术在西南涡暴雨过程中的应用. 气象, 40(12): 1530-1538.

# 多普勒雷达风场反演技术在西南涡暴雨过程中的应用<sup>\*1</sup>

刘婷婷<sup>1,2</sup> 苗春生<sup>1</sup> 张亚萍<sup>2</sup> 翟丹华<sup>2</sup> 邓承之<sup>2</sup> 牟 容<sup>2</sup>

1 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

2 重庆市气象台, 重庆 401147

**提 要:** 利用多普勒天气雷达四维变分同化方法反演了 2010 和 2013 年重庆市两次西南涡内的局地强降水不同高度水平风场, 分析了易发生局地强降水区域的局地环流特征。结果表明: 风场反演能较准确地给出低空急流、低层辐合和局地气旋性涡旋的位置及演变情况, 辐合线演变及低空急流的强度和移向对强降水有指示意义; 局地气旋性涡旋越深厚, 局地强降水的强度和范围越大; 不同高度的气旋性涡旋耦合, 可能有利于急流的加强和水汽输送。

**关键词:** 多普勒天气雷达, 四维变分同化, 风场反演, 西南涡, 局地强降水, 局地环流特征

**中图分类号:** P412

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.12.012

## Application of Doppler Radar Wind Field Retrieval Technique to Southwest Vortex Rainstorm Process

LIU Tingting<sup>1,2</sup> MIAO Chunsheng<sup>1</sup> ZHANG Yaping<sup>2</sup> ZHAI Danhua<sup>2</sup>

DENG Chengzhi<sup>2</sup> MU Rong<sup>2</sup>

1 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147

**Abstract:** Horizontal wind fields in different heights were retrieved for two local severe rainfall processes within the southwest vortexes which occurred in Chongqing in 2010 and 2013, respectively, using Doppler weather radar 4DVar (four-dimensional variation) assimilation technique. Local circulation patterns which are prone to local intense rainfalls are also analyzed. The results show that the position and evolution of low-level jet streams, low-level convergence lines and local cyclonic vortexes can be accurately denoted by retrieved wind fields. The evolution of convergence lines and the intensity and transfer of low-level jet streams are indicative of heavy precipitation. The deeper the local cyclonic vortex is, the greater the intensity and extension of local intense rainfall become. Coupling in cyclonic vortexes of different heights can be prone to intensification of low-level jet stream and transportation of moisture.

**Key words:** Doppler weather radar, four-dimensional variation (4DVar) assimilation, wind field retrieval, southwest vortex, local severe rainfall, local circulation

\* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206028)和中国气象局预报员专项(CMAYBY2014-058)共同资助

2014 年 4 月 27 日收稿; 2014 年 11 月 21 日收修定稿

第一作者: 刘婷婷, 主要从事天气预报技术研究. Email: waterlitt@163.com

## 引 言

西南低涡是造成我国夏半年暴雨的重要天气系统之一(陶诗言,1980),同时也是重庆中西部暴雨最主要的影响系统之一(翟丹华等,2014)。研究人员(顾清源等,2008;2010;潘旻等,2011;王新敏等,2009;王中等,2004;周国兵等,2006;赵玉春等,2010)运用诊断分析、数值模拟等方法分析研究西南低涡的演变特征、结构及形成、发展和维持机理,加深了对西南低涡的理解和认识。在对引发西南低涡暴雨的中尺度对流系统的分析方面,周森等(2014)利用新一代天气雷达三维组网数据分析了四川盆地的强降水过程,发现西南涡对应的对流系统在时间和空间的变化都与涡高度一致,强降水主要是由西南涡对应的中尺度对流系统活动造成的。顾清源等(2008)、陈贵川等(2013)对西南低涡诱发的大暴雨过程进行分析发现西南低涡内存在着一个深厚的 $\beta$ 中尺度低涡。宗志平等(2005)通过研究川渝地区持续性暴雨过程,认为中尺度对流系统合并发展为 $\alpha$ 中尺度低涡,为暴雨的持续发展提供了持续的上升运动和有利的中尺度环境场。于波等(2008)重点利用高时空分辨率的模式输出资料对西南低涡的三维结构、演变特征及其东侧暖切变线上对流活动的可能触发机制进行了研究。西南低涡研究进展的系统回顾和总结可参见何光碧(2012),同时,文中还提出西南低涡研究在雷达回波特征的认识等方面仍然存在不足。

长期以来,由于西南低涡及其相伴的低空急流尺度小,演变复杂,产生的暴雨又多具有突发性,常规资料难以捕捉其详细结构和演变机理,增加了预报和研究的难度。多普勒天气雷达四维变分(four-dimensional variation, 4DVar)同化方法反演风场,能较好地反映强对流系统不同发展阶段的流场特征和对流单体内部流场结构(牟容等,2012)。本文拟利用多普勒天气雷达四维变分同化方法反演西南涡内的两次局地强降水不同层次水平风场,分析易发生局地强降水区域的局地环流特征,为降水位置和持续时间的估计提供参考,以提高局地定量降水临近预报能力。

## 1 四维变分同化方法简介

通过反演风场能较直观地分析中小尺度天气的

动力结构,结合常规探测等资料深入了解强对流天气的内部结构和影响因子,更好地研究强对流天气的发生发展,提高预报准确率。研究所用多普勒天气雷达资料四维变分同化方法由 Sun 等(1997)建立,并在原方法的基础上经过一定的简化和改进(牟容等,2007)。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,即 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。4DVar 资料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。为此单部雷达价值函数  $J$  为

$$J = J_b + \sum_{\sigma, \tau} [\eta_v (V_r - V_r^{\text{ob}})^2 + \eta_z (Z - Z^{\text{ob}})^2] + J_p \quad (1)$$

式中,求和针对空间区域 $\sigma$ 、同化窗 $\tau$ 而言, $\eta_v$ 和 $\eta_z$ 分别是径向速度和反射率因子的权重系数, $V_r^{\text{ob}}$ 和 $Z^{\text{ob}}$ 分别是雷达观测的径向速度和反射率因子。 $V_r$ 和 $Z$ 分别表示模式输出的径向速度和反射率因子。这里采用时间间隔 6 min 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 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。

## 2 两次西南涡内局地强降水实况

2010 年 6 月 22—23 日(简称“6·23”)和 2013 年 6 月 30 日至 7 月 1 日(简称“6·30”)重庆均出现了西南涡暴雨天气过程。“6·23”暴雨发生在重庆南部,102 个雨量站累计雨量超过 50 mm,最大雨量为 152.0 mm。23 日 06—09 时重庆西南部发生了局地强降水(图 1a,本文仅研究该过程重庆西南部的局地强降水),强降水雨带呈东西向,江津区永兴站 3 h 累积雨量为 117.0 mm。“6·30”暴雨发生在重庆西部,暴雨发生的地区相对更加集中,强度更大,353 个雨量站累计雨量超过 50 mm,最大雨量为 408.5 mm。此次过程的局地强降水发生在 30 日 22 时至 7 月 1 日 01 时(图 1b),重庆西北部,强降水雨带呈东北—西南向,其范围及强度都大于“6·23”,

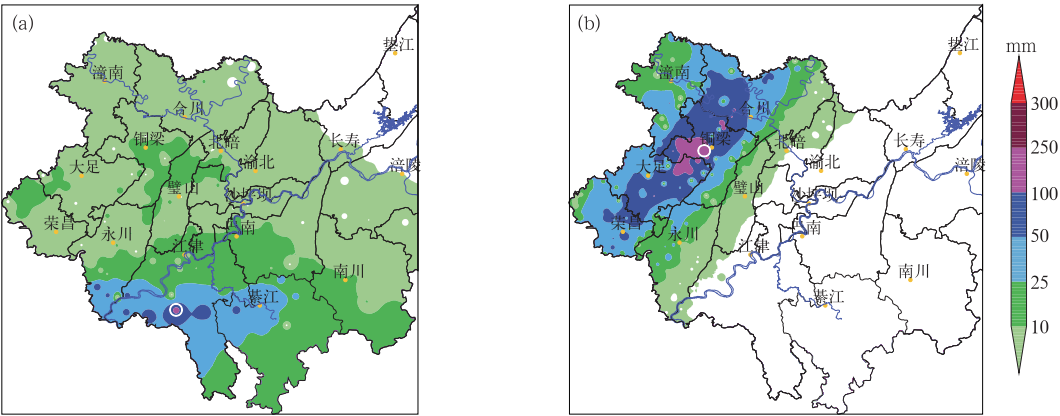


图 1 两次西南涡暴雨天气过程 3 h 累积雨量分布(单位:mm)

(a)2010 年 6 月 23 日 06:00—09:00, (b)2013 年 6 月 30 日 22:00 至 7 月 1 日 01:00

(图 a 和 b 中白色圆圈分别表示江津区永兴站和铜梁县侣俸站位置)

Fig. 1 3 h cumulative rainfall in two Southwest vortex rainstorm processes during 06:00—09:00 BT 23 June 2010 (a) and 22:00 BT 30 June—01:00 BT 1 July 2013 (b) [The locations of Yongxing Station (a) and Lüfeng Station (b) are denoted with white open circles]

20 个雨量站 3 h 累积雨量超过 100 mm,最大雨量为铜梁县侣俸站(158.6 mm)。

图 2 给出永兴站和侣俸站在局地强降水发生前后的地面雨量计分钟测值,两个站的分钟雨量都并非单纯的线性增长或减弱。“6·23”江津永兴站(图 2a)分钟雨量在 23 日 06:00—08:59 有 3 个较稳定的时段和 1 个波动时段,总体变化较小。3 个较稳定的时段持续时间最长约 1 h。“6·30”铜梁

侣俸站(图 2b)的分钟雨量在 30 日 21:00 至 7 月 1 日 00:59 呈现出多峰型特征,有 3 个明显波动时段,波动周期无规律,最长周期约 100 min。从第 35 分钟开始,分钟雨量急剧增大,30 min 后增加到最强( $2.2\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ),然后迅速减小至  $0.0\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,雨势呈现骤下急停特点。之后侣俸站的分钟雨量又出现两次周期约 45 min 的波动。与“6·23”江津永兴站相比,铜梁侣俸站的分钟雨量没

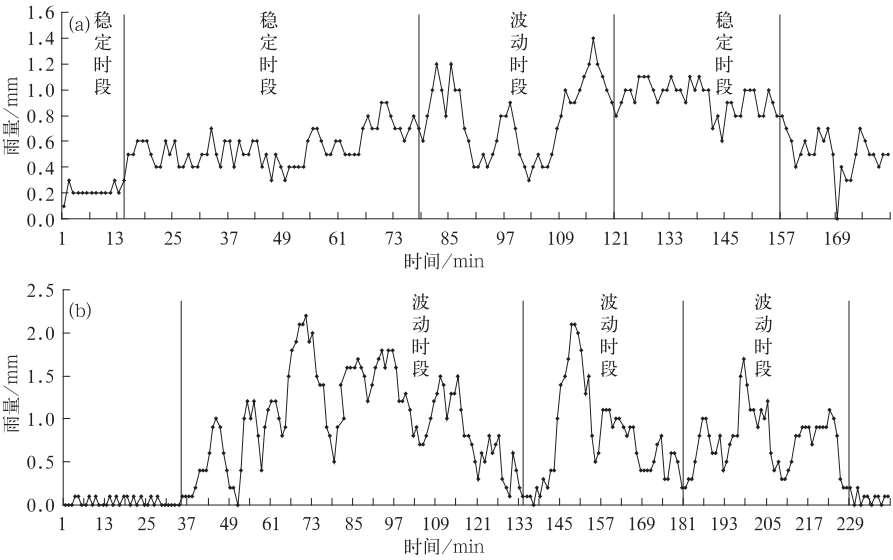


图 2 两次西南涡暴雨天气过程地面雨量计分钟测值

(a)2010 年 6 月 23 日 06:00—08:59 永兴站雨量, (b)2013 年 6 月 30 日 21:00 至 7 月 1 日 00:59 侣俸站雨量

Fig. 2 Raingauge observations of two southwest vortex rainstorm processes from Yongxing Station during 06:00—08:59 BT 23 June 2010 (a) and Lüfeng Station from 21:00 BT 30 June to 00:59 BT 1 July 2013 (b)

有相对稳定的时段,分钟雨量和雨势变化更大。

3 两次局地强降水的中尺度环境条件分析

分析两次过程的天气形势发现,500 hPa 上(图略),副热带高压(以下简称副高)稳定,“6·23”暴雨期间副高脊线位置位于 19°~20°N 附近,“6·30”脊线位于 23°N 附近,脊线位置不同导致“6·23”雨带位置较“6·30”偏南。副高西侧为显著低压槽。两次强降水过程中,700 和 850 hPa 低涡东南侧均为西南低空急流,“6·23”暴雨期间(图 3a),

850 hPa 低涡中心位于重庆西南部,局地强降水发生区域附近,低涡南部风速虽然随着低涡的发展有所增强,但在低涡发展最强的时期,仅有 6~8 m·s<sup>-1</sup>。700 和 850 hPa 的低空急流在强降水区域汇合。重庆南部处于高湿区,而北部 500 hPa 有干舌。“6·30”暴雨(图 3b)的低涡系统较“6·23”更加深厚,在 850、700 和 500 hPa 都能看到显著的低涡中心,且 700 和 850 hPa 的低涡中心位于重庆西北部局地强降水发生的区域。700 和 850 hPa 均存在 12 m·s<sup>-1</sup> 以上的低空急流,并维持 12 h 以上,这两层的急流也在强降水区域汇合。“6·30”的湿层更深厚,水汽条件更充沛。

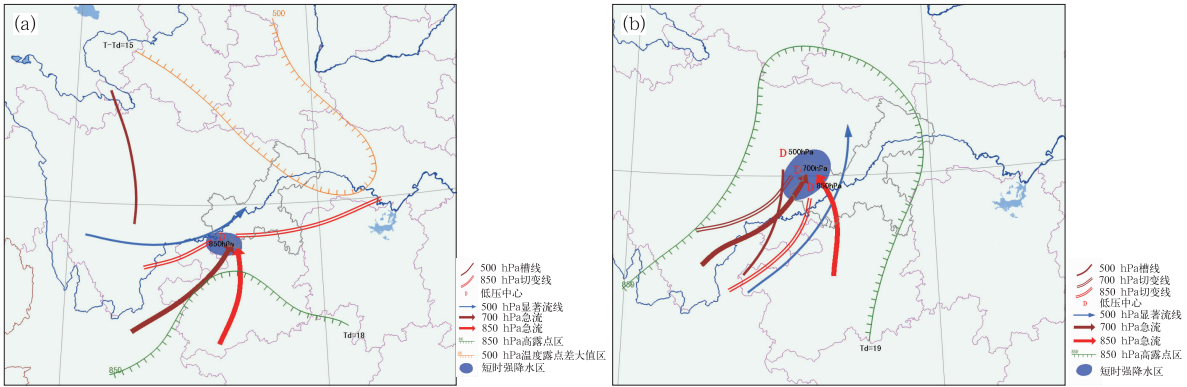


图 3 两次西南涡暴雨天气过程中尺度环境条件分析  
(a)2010 年 6 月 23 日 08:00, (b) 2013 年 6 月 30 日 20:00

Fig. 3 Mesoscale environmental condition analyses of two southwest vortex rainstorm processes at 08:00 BT 23 June 2010 (a) and 20:00 BT 30 June 2013 (b)

总体看来,这两次过程的局地强降水发生在低空急流与西南涡共同影响区域,不同的是“6·30”的低涡更深厚,水汽条件更充足,因此“6·30”强降水的范围和雨强都要大于“6·23”。

4 基于雷达反演风场的中尺度分析

为了比较反演风场与多普勒天气雷达径向速度的一致性,需要选取与反演高度基本相同的径向速度。图 4 为两次局地强降水发生时雷达平均径向速度与雷达反演水平风场叠加图,反演的水平风场高度为 3 km,选取 2.4°仰角的雷达径向速度,使得发生强降水的站点处径向速度也大约在 3 km 高度。同时,风场反演与雷达观测的径向速度的比较也只能在站点附近进行。从图 4a 可见,在永兴站附近,反演风场上站点南面有较强西南风,与径向速度

—17 m·s<sup>-1</sup> 左右较一致,反演风场上站点东北面到西北面从偏东风转为北风,也与根据径向速度场上的零速度线判断的风向较一致。在图 4b 上,侣俸站附近有一个正的径向速度中心(约 17 m·s<sup>-1</sup>),与反演的强偏东南风吻合,其余部分风场反演的径向分量也与平均径向速度的方向较统一。因此,用反演风场分析局地强降水区域的局地环流特征是可行的。

“6·23”局地强降水期间,永兴站附近组合反射率因子维持在 40 dBz 以上,强回波区呈东西向,移动缓慢。图 5a~5c 为永兴站出现短时强降水前约 1 h 的组合反射率因子与雷达反演 1.5、3.0 和 5.5 km 水平风场(重庆雷达站海拔高度以上)叠加图,图 5d 是根据图 5a~5c 得到的中尺度分析图,主要进行了辐合线、急流、气旋性涡旋等中尺度动力条件分析。需要注意的是,雷达附近,即图中坐标(0,0)



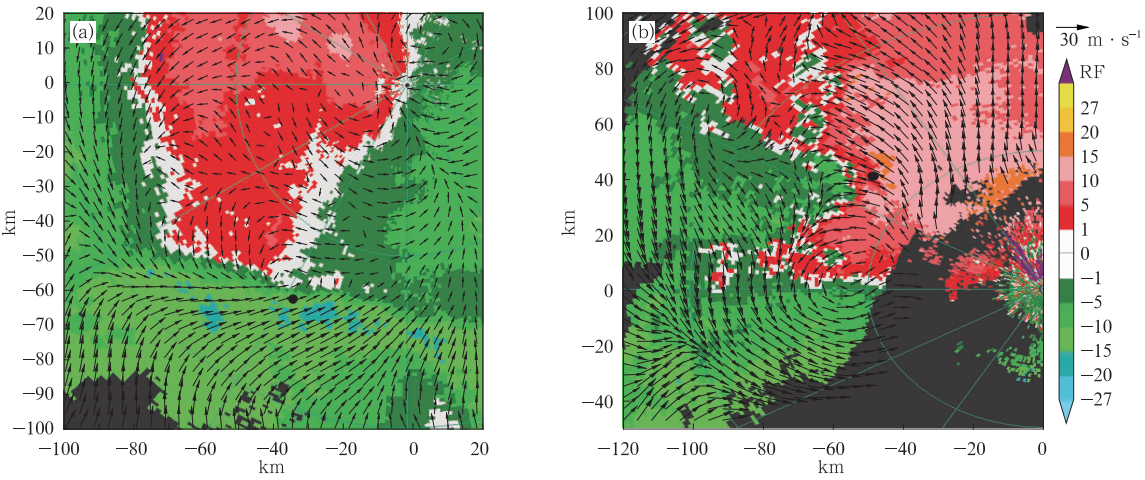


图 4 2010 年 6 月 23 日 06:53(a)和 2013 年 6 月 30 日 22:02(b)重庆 CINRAD/SA 雷达  $2.4^{\circ}$  仰角  
平均径向速度与雷达反演 3 km 水平风场叠加图 (单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
[图 a 和 b 中黑色圆点表示永兴站和侣俸站位置,图中雷达位于坐标(0,0)]

Fig. 4 The Chongqing CINRAD/SA radial velocity and 3 km height horizontal wind fields retrieved from radar observations for 06:53 BT 23 June 2010 (a) and 22:02 BT 30 June 2013 (unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
[Black solid circles denote the location of Yongxing (a) and Lüfeng (b) (0,0) is the radar location site]

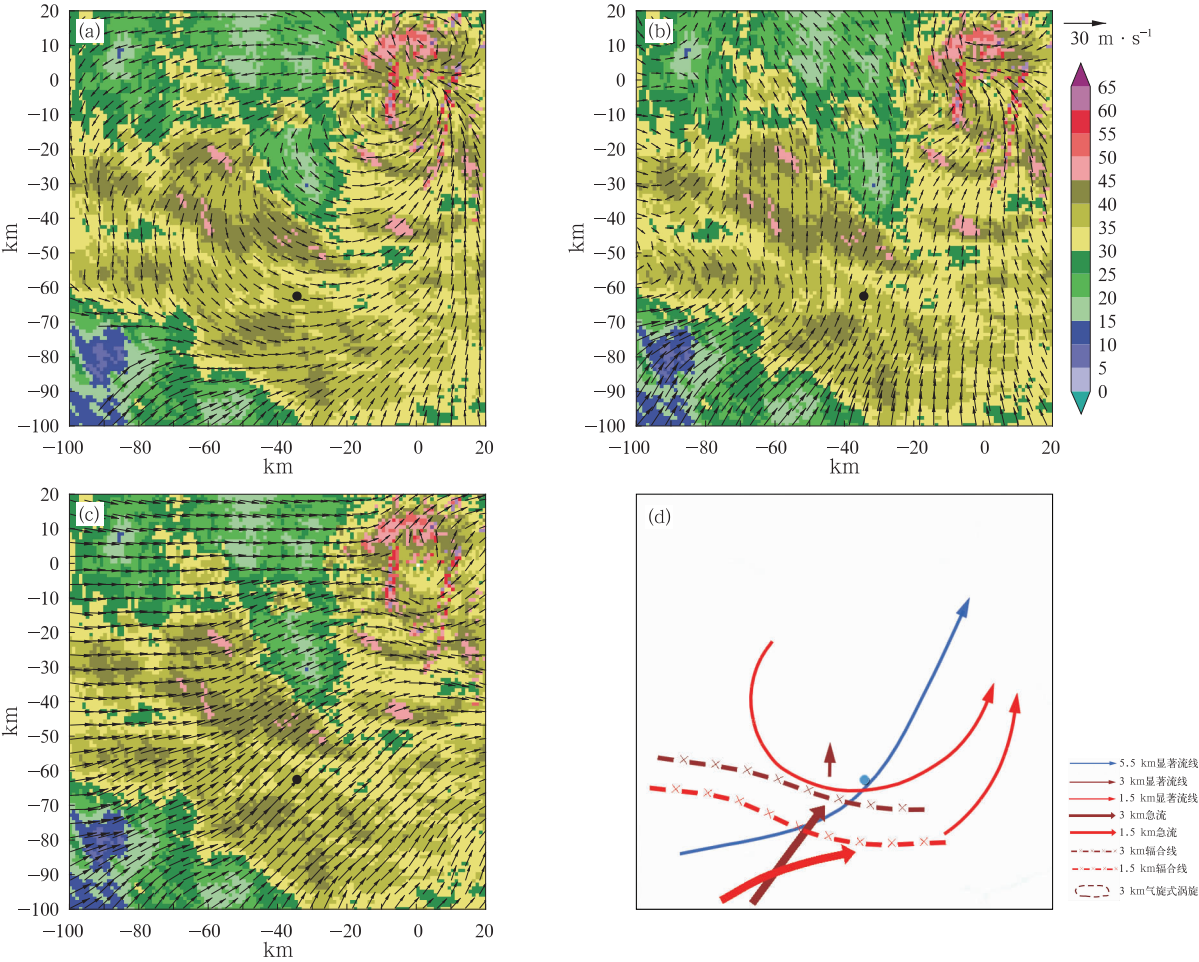


图 5 2010 年 6 月 23 日 05:35 重庆 CINRAD/SA 雷达组合反射率因子与雷达反演水平  
风场叠加图(a, 1.5 km; b, 3 km; c, 5.5 km; 单位: dBz)和中尺度分析图(d)  
[黑色圆点表示永兴站的位置,图 5a~5c 中雷达位于坐标(0,0)]

Fig. 5 The Chongqing CINRAD/SA composite reflectivity and 1.5 km (a), 3 km (b) and 5.5 km (c) height horizontal  
wind fields retrieved from radar observations and mesoscale analysis (d) for 05:35 BT 23 June 2010  
[Black solid circles denote the location of Yongxing Station, in Figs. 5a~5c, (0, 0) is the radar location]

附近的风场反演由于受到地物回波影响,一般不可靠。1.5 km(图 5a 和 5d)高度上,永兴站南侧为辐合线,其西南侧存在西南低空急流,3 km(图 5b 和 5d)高度上,永兴站附近及其以北为偏南气流,其南侧则为西南低空急流,在永兴站附近存在显著的西南风风速辐合,而 5.5 km 为一致的西南气流(图 5c 和 5d),此时永兴站附近的组合反射率因子强度在 35~40 dBz。之后,1.5 和 3 km(图略)高度上的低空急流向偏北和偏东方向伸展并增强,尤其是 1.5 km 上西南低空急流增强和伸展的更显著,使得 1.5 km 上的辐合线位置稍有北抬,永兴站附近的辐合上升运动更显著,到 06:53(图 6),1.5 km(图 6a 和 6d)的辐合线位置北抬至永兴站附近,组合反射率因子强度增长至 45~50 dBz,3 km(图 6b 和 6d)上最显著的特征是在辐合线上反演出了小的气旋性涡旋(Brandes et al,1993)。在涡旋中心及其东侧的辐合线附近,组合反射率因子的强度达 50 dBz 以

上,永兴站的地面分钟雨量基本在 0.6~0.8 mm,表明涡旋中心及其东侧的辐合区与强降水落区有很好的对应关系。此后,1.5 和 3 km(图略)上的西南低空急流继续向偏东方向伸展,尤其是 3 km 上,强度进一步增强,涡旋发展的更加完整,对应 45~50 dBz 组合反射率因子的范围有所扩大,永兴站的分钟雨量增大至 0.8~1.0 mm。以上分析表明,强降水出现在 1.5 km 的辐合线、3 km 的涡旋附近,风场反演的低空急流的强度和移向对强降水有指示意义。

“6·30”局地强降水期间,侣俸站附近组合反射率因子维持在 45 dBz 以上,强回波区呈东北—西南向,移动缓慢。侣俸站出现短时强降水前约半小时(图 7),1.5 km(图 7a)和 3.0 km(图 7b)上均存在偏东风和偏北风形成的辐合线,强回波区主要位于辐合线附近的偏东气流中,呈弓型,此时,侣俸站的分钟雨量(图 2b)在 0.2 mm 以下。“6·30”局地环

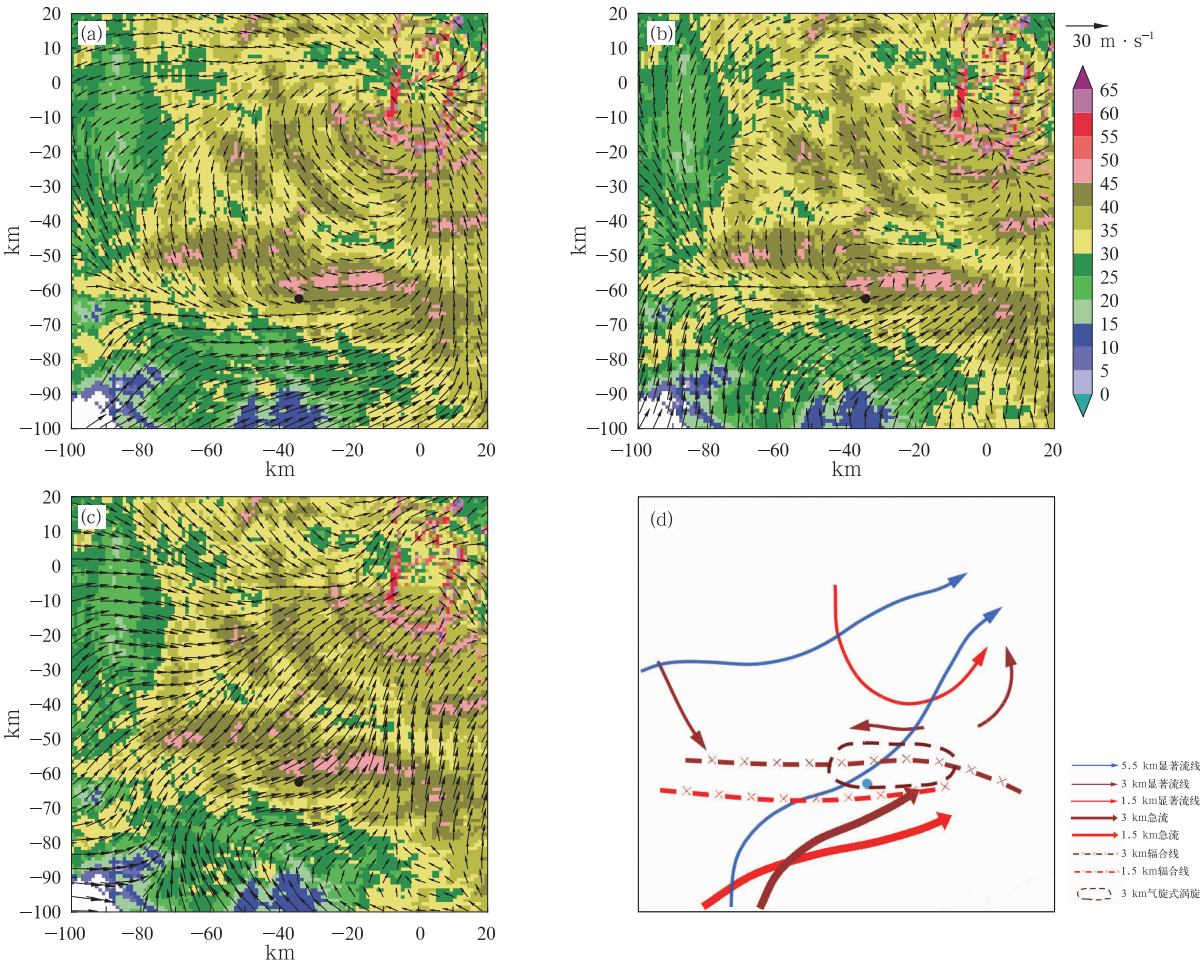


图 6 同图 5,但为 2010 年 6 月 23 日 06:53  
Fig. 6 The same as Fig. 5, but for 06:53 BT 23 June 2010



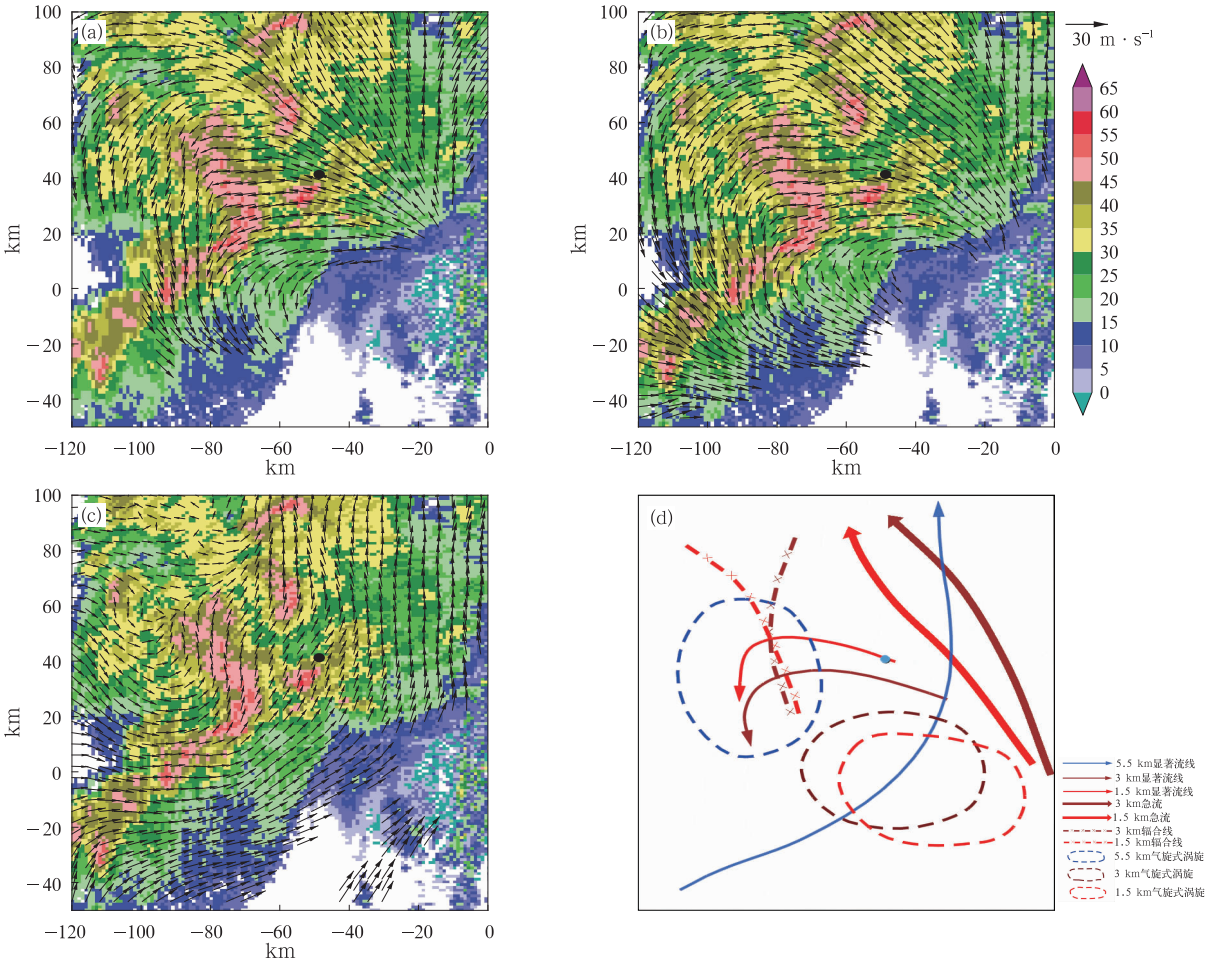


图 7 同图 5, 但为 2013 年 6 月 30 日 21:26 侣俸站

Fig. 7 Same as Fig. 5, but for Lüfeng station at 21:26 BT 30 June 2013

流系统比“6·23”更为深厚,在 1.5、3.0 和 5.5 km (图 7c)都反演出气旋性涡旋。1.5 和 3.0 km 的涡旋位于侣俸南侧,5.5 km 的涡旋位于侣俸的西侧,3 km 涡旋中心与 5.5 km 涡旋中心相距 60 km (图 7d)左右,强回波区位于低层涡旋中心东南侧的偏南气流中,在 1.5 和 3.0 km 上,除了涡旋东北侧显著的东南风低空急流外,西侧还存在明显的偏北气流。之后,5.5 km 上(图略)的涡旋中心逐渐向东南方向移动,1.5 和 3.0 km (图略)上,偏北风进一步增强,并逐渐向东扩展,使得偏北风与偏东风形成的辐合线向东移动,辐合强度加强,45 dBz 以上的强回波区相应东移,范围扩大,在此过程中,侣俸站的降水强度显著增强(图 2b),分钟雨量 0.4~0.9 mm。侣俸站短时强降水发生期间(图 8),45 dBz 以上的强回波区主要位于 1.5 km (图 8a)上强偏东气流与强偏北气流形成的辐合线附近,3.0 km (图 8b)上有完

整的气旋性涡旋,这两个高度的偏南风急流和偏北风急流也较强降水开始前(图 7a 和 7b)增强,5.5 km 上的涡旋中心进一步东南移,与 3 km 涡旋中心仅相距 20 km,表明不同高度气旋性涡旋的耦合使得涡旋加深,急流加强,为强降水的维持提供了更充足的动力和水汽条件。22:02 以后,分钟雨量仍有两次明显波动(图 2b),从间隔 6 min 的风场反演序列(图略)可以看出,有辐合线不断从强降水区西侧新生,然后东移减弱,辐合线的生消可能是侣俸站的分钟雨量呈波动变化的原因。

表 1 比较了这两次过程的探空参数及气旋性涡旋和低空急流。两次过程开始前均具备较高的对流有效位能(CAPE),但是水汽条件和热力条件有大差别。2010 年 6 月 22 日 20 时至 23 日 08 时沙坪坝的探空资料演变显示,重庆西部上空的大气层结条件迅速向有利于强降水天气转变,低层增湿显著,

850 hPa  $T_d$  由  $12^{\circ}\text{C}$  增至  $14^{\circ}\text{C}$ , 700 hPa  $T_d$  由  $-5^{\circ}\text{C}$  增至  $8^{\circ}\text{C}$ ,  $K$  指数由  $23^{\circ}\text{C}$  增至  $32^{\circ}\text{C}$ ; 23 日 08 时沙坪坝上空中层的风速显著增强, 有强的暖平流输送。2013 年 6 月 30 日 20 时的大气层结条件更加有利于强降水天气产生。近饱和层结从地面伸展到 300 hPa 以上, 有强的暖平流输送,  $K$  指数 ( $43^{\circ}\text{C}$ )、850 和 700 hPa 的  $T_d$  分别为 19 和  $12^{\circ}\text{C}$  均较“6·23”过程要高。可见, “6·30”暴雨过程前重庆西部地区具备更强的热力不稳定和水汽条件。两次过程都有气

旋性涡旋出现, 但是“6·30”暴雨过程中雷达风场反演的气旋性涡旋出现在  $1.5\sim5.5\text{ km}$  高度, 持续长达 5 h, 而“6·23”暴雨过程的气旋性涡旋仅出现在 3.0 km 高度上, 持续时间只有 3.5 h, 涡旋发展的厚度和持续时间均显著弱于“6·30”。同时, “6·30”暴雨过程的东南低空急流在 1.5 和 3 km 高度上持续了 5 h, 而“6·23”暴雨的西南低空急流仅在 3 km 高度上持续了 3 h。

表 1 两次个例的探空参数及中尺度特征对比

Table 1 Comparison of sounding parameters and mesoscale features for the two cases

个例日期	时间	$T_d/^{\circ}\text{C}$		$K$ 指数 $/^{\circ}\text{C}$	$CAPE$ $/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	气旋性涡旋存在时间/h			低空急流持续时间/h	
		700 hPa	850 hPa			1.5 km	3 km	5.5 km	1.5 km	3 km
6·23	22 日 20 时	-5	12	23	1572	无	3.5	无	无	3
	23 日 08 时	8	14	32	55					
6·30	30 日 20 时	12	19	43	1328	5	5	5	5	5

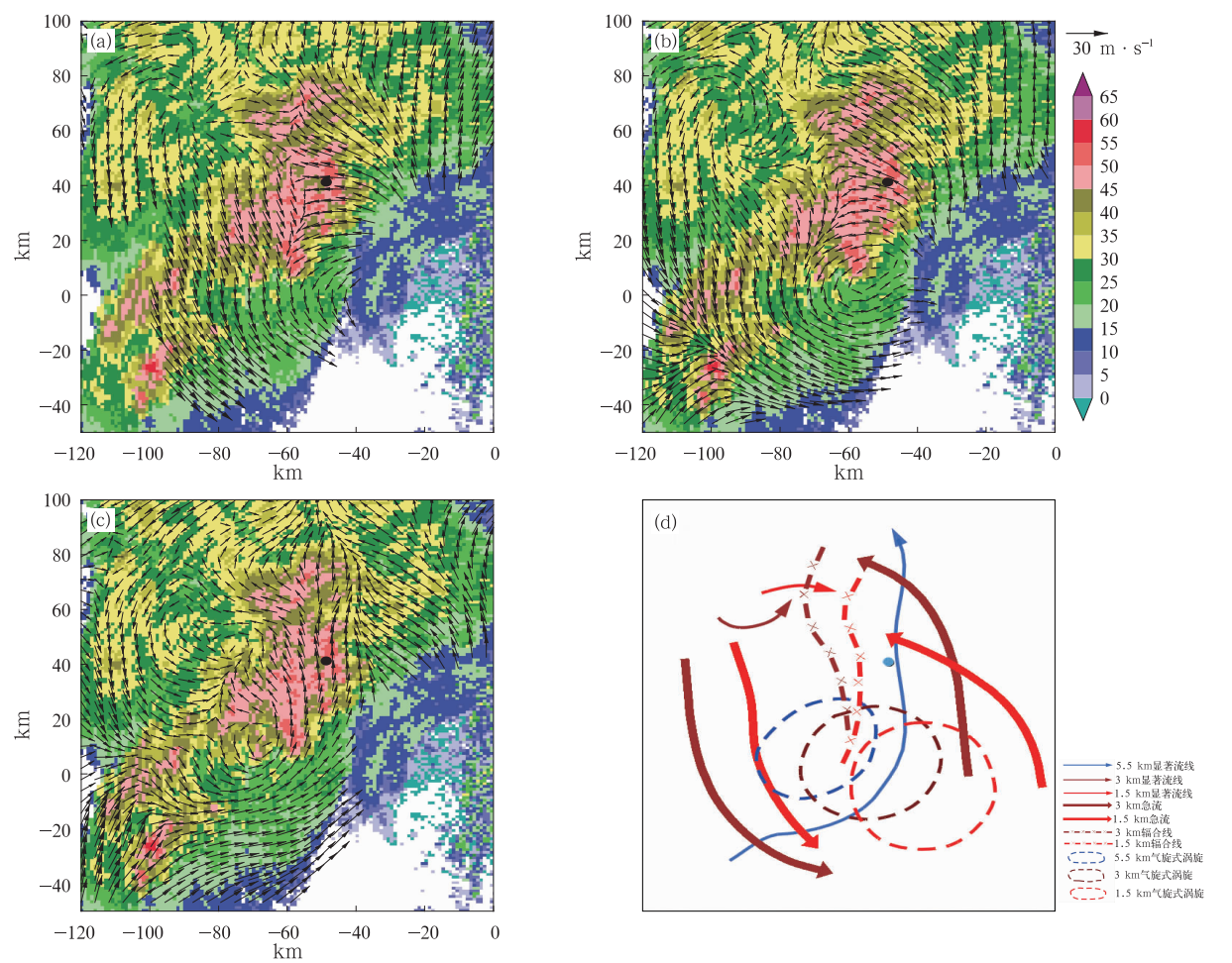


图 8 同图 7, 但为 2013 年 6 月 30 日 22:02

Fig. 8 The same as Fig. 7, but for 22:02 BT 30 June 2013



## 5 结论与讨论

本文利用多普勒天气雷达四维变分同化方法反演 2010 年 6 月 23 日和 2013 年 6 月 30 日重庆市两次西南涡内的局地强降水不同层次水平风场,分析了易发生局地强降水区域的局地环流特征。得到如下主要结论:

(1) “6·23”是在带状副高北侧,配合高原槽和西南涡共同影响形成的,“6·30”是在副高西北侧,由深厚的西南涡造成的;两次过程中低涡东部和南部都伴有显著的低空急流,而“6·30”急流的强度更强,伸展范围更偏北;探空资料表明,“6·30”水汽条件和大气层结条件更加有利于强降水的发生。

(2) 天气雷达风场反演表明,两次强降水的局地环流形势都有低空急流和低层辐合的特点,辐合线演变及低空急流的强度和移向对强降水有指示意义;降水强度的波动可能与辐合线的生消有关。

(3) 天气雷达风场反演可以提供西南涡内局地气旋性涡旋的演变特征。不同高度的气旋性涡旋耦合可能有利于急流的加强和水汽输送。就本文的两个个例而言,伴随较深厚的局地气旋性涡旋的“6·30”的降水强度和范围更大,其最大分钟雨量、小时最大雨量和 3 h 最大累积雨量都较“6·23”大。

今后需要针对各种类型的局地强降水开展风场反演工作,为降水位置和持续时间的估计提供参考,以提高局地定量降水临近预报能力。

**致谢:**感谢 NCAR 孙娟珍博士提供的变分同化算法源程序。

## 参考文献

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.

顾清源,师锐,徐会明. 2010. 移出与未移出高原的两类低涡环流特征的对比分析. 气象,36(4):7-15.

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.

何光碧. 2012. 西南低涡研究综述. 气象,38(2):155-163.

牟容,刘黎平,许小永,等. 2007. 四维变分方法反演低层风场能力研究. 气象,33(1):11-18.

牟容,余君,张亚萍,等. 2012. 一次飑线过程的雷达回波分析及其反演风场研究. 气象科学,32(2):153-159.

潘畅,李建,宇如聪. 2011. 东移西南低涡空间结构的气候学特征. 气候与环境研究,16(1):60-70.

陶诗言. 1980. 中国之暴雨. 北京:科学出版社,225.

王新敏,宋自福,张霞,等. 2009. 一次西南涡路径预报偏差分析及数值模拟. 气象,35(5):18-25.

王中,周毅. 2004. 2002 年 6 月 13 日重庆区域大暴雨分析. 气象,30(5):30-32.

于波,林永辉. 2008. 引发川东暴雨的西南低涡演变特征个例分析. 大气科学,32(1):1-14.

翟丹华,刘德,李强,等. 2014. 引发重庆中西部暴雨的西南低涡特征分析. 高原气象,33(1):140-147.

赵玉春,王叶红. 2010. 高原涡诱生西南涡特大暴雨成因的个例研究. 高原气象,29(4):819-831.

周国兵,隆霄,刘毅. 2006. 重庆市“5·29”暴雨天气过程诊断分析与数值模拟. 气象科技,34(1):29-34.

周森,刘黎平,王红艳. 2014. 一次高原涡和西南涡作用下强降水的回波结构和演变分析. 气象学报,72(3):554-569.

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.

Brandes E, Ziegler C. 1993. Mesoscale downdraft influences on vertical vorticity in a mature mesoscale convective system. Mon Wea Rev,121(5):1337-1353.

Sun J, Crook A. 1997. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint, Part I: Model development and simulated data experiments. J Atmos Sci,4(12):1642-1661.