

牟容,余君,张亚萍,等. 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, 2012, 32(2): 153-159.

MU Rong, YU Jun, ZHANG Yaping, et al. Radar data analysis and retrieving wind field research of a squall line. Journal of the Meteorological Sciences, 2012, 32(2): 153-159.

一次飑线过程的雷达回波分析及其反演风场研究

牟容¹ 余君² 张亚萍¹ 易田³ 黎中菊¹

(1 重庆市气象台, 重庆 401147; 2 重庆市气象信息与技术装备中心, 重庆 401147; 3 黔江区气象局, 重庆 409000)

摘要 用常规气象观测资料, 中尺度自动气象站资料和多普勒天气雷达资料, 对2009年4月15日发生在重庆中西部的飑线过程的进行了分析, 发现了“逆风区”在预报中具有一定的提前量。同时通过四维变分(4D-VAR)同化方法反演风场, 得到反演的水平风场能较好的反映飑线内部各个发展阶段的对流单体的内部流场结构, 同时发现4D-VAR反演风场能较好的反映出飑线不同发展阶段的流场特征。

关键词 飑线; “逆风区”; 4D-VAR同化

分类号: P458.3

doi: 10.3969/2012jms.0021

文献标识码: A

Radar data analysis and retrieving wind field research of a squall line

MU Rong¹ YU Jun² ZHANG Yaping¹ YI Tian³ LI Zhongju¹

(1 Chongqing Meteorological Observation, Chongqing 401147, China;

2 Chongqing Information and Technique Center, Chongqing 401147, China;

3 Qianjiang Meteorological Bureau, Chongqing Qianjing 409000, China)

Abstract A squall line which attacked Chongqing on April 15, 2009 was analysed. Based on sounding, surface observation and radar data, the weather is considered as a squall line. And the synoptic scale background, physical parameters and so on are analysed. It's found that “adverse wind region” exhibited by 4d-VAR can be used to forecast heavy precipitation. The retrieved wind can represent the squall line's internal structures of each convection cell. And it can display the character of flow field at various stages.

Key words Squall line; “Adverse wind region”; 4D-VAR simulation

引言

飑线是一种中小尺度天气系统, 过境时, 风向突变, 气压涌升、气温急降, 飑线后的风速一般为每秒几十米, 强时可超过40 m/s。因其天气形成、发展过程十分迅速, 因此可预报时间很短。常规资料在时间、空间分辨上都不能满足要求。但多普勒天气雷达资料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, 是研究中小尺度天气系统的主要手

段之一。

鉴于多普勒天气雷达的原始资料主要是回波强度和径向速度, 不直接提供三维风场、气压场和温度场等气象参量, 使得多普勒天气雷达资料在实际应用中存在很大的局限性。如何运用多普勒天气雷达的多种导出产品, 特别是速度场资料及其衍生产品, 对飑线系统的回波和流场结构、演变特征进行分析, 并提出相应的临近预报思路是非常有意义的探讨^[2]。为此, 人们发展了很多基于多普勒天气雷达

收稿日期 (Received): 2010-12-09; 修改稿日期 (Revised): 2011-01-05

基金项目: 气象关键技术集成与应用(重点/面上)项目(CAMGJ2012M48)

通讯作者 (Corresponding author): 牟容 (MU Rong). mr0912@163.com.

资料的反演方法,例如:陶祖钰的 VAP 方法^[3]、郎虚兴的 VVP 方法^[4]、姜海燕和葛润生的涡度-散度方法^[5],张少波和陆汉城的二维变分方法^[6],以及 SUN 等发展的四维变分(4D-VAR)同化^[1,7-14]等方法。通过这些同化反演方法,可以得到更准确的高时空分辨率的中小尺度系统的三维中尺度结构,也能为中尺度或云模式提供更详尽的初始场资料^[1]。而 4D-VAR 同化方法已成为国际上资料同化的主流技术,它是 3D-VAR 同化在时间上的拓展,将动力约束与资料约束以及不同时刻的一切观测资料作为一个整体考虑,这种方法所得的最优初值即与数值模式相协调,又能使同化时段内的模式预报值最大限度地符合实际观察值^[1]。本文用 4D-VAR 方法同化重庆多普勒雷达资料,对 2009 年 4 月 15 日袭击重庆的一次飑线天气过程进行反演分析。

1 模式简介

为了更好的了解风暴内部的结构,利用简化的 4D-VAR(四维变分)同化方法对回波发展较旺盛阶段的雷达体扫资料进行风场反演。该同化方法为一个三维云模式,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。4D-VAR 方法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。给模式变量赋初始猜测值,应用模式向前积分预报,得到模式输出结果。计算一段时间内(同化窗)模式输出结果与雷达观测值之间的差别(用价值函数表示)。运用模式共轭方程组(伴随模式)反向积分,计算价值函数的收敛条件满足(价值函数达到最小值),从而求得某一同化时段内与雷达观测资料最接近的模式最优解。为此单部雷达价值函数 J 为

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

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^{ob} 和 Z^{ob} 是雷达观测的径向速度和反射率因子。 V_r 和 Z 表示模式输出的径向速度和反射率因子,它们不是模式变量,不能由模式直接输出而是通过模式输出的三维风场和雨水计算得到

$$V_r = \frac{x - x_0}{r} u + \frac{y - y_0}{r} v + \frac{z - z_0}{r} (w - V_{tm})$$

$$r = [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{1/2}$$

其中 r 表示任一格点 (x, y, z) 与雷达站 (x_0, y_0, z_0) 之

间的距离, V_{tm} 是雨水下落末速度。4D-VAR 资料同化就是使得价值函数 J 最小化,找到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。同化模式和变分同化方法由 SUN, et al^[7] 建立,具体算法见文献[1]和[7],在此就不再赘述。

采用 $61 \times 61 \times 15$ 的格点值,水平方向 2 km 分辨率,垂直方向 1 km 分辨率,对水平范围 120 km,垂直范围 15 km,时间间隔 6 min 的相邻两次雷达体扫资料进行同化迭代 15 次,得到后一体扫所在时刻各高度上的风场分布。采用干模式(纯动力学模式),利用前一体扫资料计算的 VAD 风场作为初始场,前一循环同化所得的结果作为背景场,引入同化系统。

2 分析结果

2.1 天气形势

2009 年 4 月 15 日 17—20 时(北京时,下同)重庆市长寿、丰都、涪陵等地遭受冰雹、大风、局地暴雨等灾害性天气袭击。三站气温序列由 18 时的 29 °C 陡降到 20 时的 20 °C,且在 18—19 时的突变幅度最大;气压在 19—20 时也有一个突然变高的过程;对于湿度而言,由于午后太阳辐射的作用,水汽蒸发,相对湿度在下午明显减小,但是 3 个站的相对湿度却在 18—19 时不约而同的由 40% 左右上升到 70% 以上,更明显的是涪陵站由 18 时的 43% 变为 92%。从各站气象要素突变的情况,以及观测到的雷达回波特征来看,这是一次典型的飑线过程。

4 月 13 日到 15 日 500 hPa,高纬度一直维持两槽一脊形势。

14 日 08 时 500 hPa 从新疆到两广地区均受高脊影响,除青海东部一个站(52866)和甘肃西部两个站(56080,52983)有较弱的西北风和偏西风的切变,高原上分析不出明显的低值系统;重庆为东北气流控制,天气晴好,当天重庆部分台站最高温度超过 30 °C。14 日 20 时,弱切变略有南压到甘肃西部(56080)和南部(56096)两站之间,此时重庆为西北气流控制。15 日 08 时,弱切变加强发展,槽线位于甘肃东部—川东—云贵交界处,重庆此时已转受槽前西南气流控制;同时次 700 hPa 整个重庆受弱脊控制,850 hPa 川东—重庆西部有一闭合的低涡(图 1);到 20 时,高原槽槽底经过重庆市中部,700 hPa 的切变加深为低涡,850 hPa 低涡东移到湖南西部,转为东北—西南向的切变线;地面图上冷锋在东北到河套一带,14 时快速南压到江南至甘肃南部,重

庆地区天空云量也增加到一半以上。16日08时,500 hPa低槽完全东移出重庆,天气又转为晴好(图1)。

从形势场分析来看,受高空高原槽东移下滑,配合850 hPa低涡东移以及地面上在我国东北部有一冷空气向南压,回流影响盆地东部,加剧中低层辐合和切变形成强烈的上升气流。在4月15日午后18时—20时左右重庆市中西部造成了强对流天气发展。

2.2 多普勒天气雷达产品分析

在西北气流的大环境下,08时各种指示强对流的参数都表现得比较平静,均未达到强对流天气所要求的阈值,随着午后太阳辐射增强,地面气温升高,高温高湿区的能量进一步得到积蓄,加之重庆本属丘陵地带,受地形影响,16时四川的大竹、邻水等地开始已经开始有回波生成。此回波继续东南向缓慢移动,到17:25时(图略)已经到达重庆中部的丰都、涪陵等区县,到18:09时(图2a)反射率因子的最大值已经超过60 dBz,而60 dBz反射率因子的回波持续到20:00时,从组合反射率因子图上能够看到是由多个单体按西南—东北向排列的,到18:27时已经形成一条带状分布的强回波带,从18:52时(图2b)开始强回波带移动方向前沿的回波梯度增大,线状回波明显,此明显特征到19:35时(图2c)过后才逐渐演变成椭圆的对流单体群。回波缓慢向偏东方向移动,但强度并没有明显减弱,同时在其移动方向的前方不断有新的对流单体生成发展,合并到该单体群中,直到21:00左右该对流单体群才逐渐减弱。

对18:52的反射率因子沿着回波移动方向的强

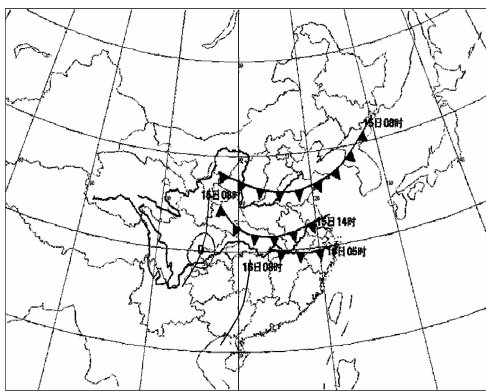


图1 天气形势综合配置图

(—) 500 hPa 槽线, (D) 850 hPa 低涡, ▲ 地面冷锋)

Fig. 1 Comprehensive configuration of weather situation

(—) 500 hPa trough-line, (D) 850 hPa low-vortex, ▲ cold front)

回波单体进行剖面(如图3),看到4个处于不同发展阶段的风暴单体。A、B、C三个单体已经处于消亡阶段了,而回波移动方向的前沿,单体D正处于成熟阶段,有穹窿,在低层存在弱回波区,达到60 dBz以上的强中心在2~7 km高度,到19:10时该单体的60 dBz以上强中心下降到2~4 km高度(图略),说明此时该单体的大粒子或者冰雹正在下落。

从径向速度图的发展来看(如图4),在回波最强时段18:52,低层的风速很大,0.5°仰角径向速度图(图4b)上,最大径向速度达20 m/s以上,实际速度有可能比这个更大;同时,径向辐合也是非常明显的。而在1.5°仰角上,强回波对应位置有“逆风区”存在(如图4a),在长寿、垫江、丰都三县交界一带有一负速度区,其周围都是正速度区,这片负速度区就是我们所说的“逆风区”。该“逆风区”随着强回波一起移动,到19:54移动到丰都县境内。

2.3 “逆风区”

1990年,张沛源等根据多普勒天气雷达的观测事实,提出了在多普勒速度图上识别暴雨的判据,即“逆风区”的概念。之后,国内不少有关短时暴雨雷达回波分析的文献[15]都提到了“逆风区”可以作为短时强降水预报的一种指标。针对这次飊线过程,我们提取中尺度区域自动气象站19时和20时1 h降水量,如图5,图中椭圆所在位置为对应图4a径向速度“逆风区”所在位置,从19时的1 h雨量来看,“逆风区”附近基本仅有3个测站有大于10 mm的降水。但是,随着回波向东移的过程中,“逆风区”也向偏东方向移动,到20时,“逆风区”所在位置(对应图5b中椭圆位置)丰都县附近的降水就普遍比较大,15个站点1 h降水量>10 mm,其中丰都县南天湖的1 h降雨量达51.1 mm。这说明“逆风区”对强降水的预报具有1 h左右的提前量。我们可根据“逆风区”出现的位置、移速、移向等,判断未来1 h内强降水的落区等。

2.4 反演风场

为了更清楚的了解飊线内部的动力结构,利用4V-DAR方法对此次飊线过程进行风场反演,采用61×61×15的格点值,水平方向2 km分辨率,垂直方向1 km分辨率,对水平范围120 km,垂直范围15 km的回波进行反演分析。

如图6所示,处于成熟阶段的飊线,以距离雷达站点以东60 km,以北30 km,即:(60,30)为中心进行反演。在水平风场的2 km、4 km高度带状回波东北段的后部(图6中椭圆处),有一个风向辐合区,

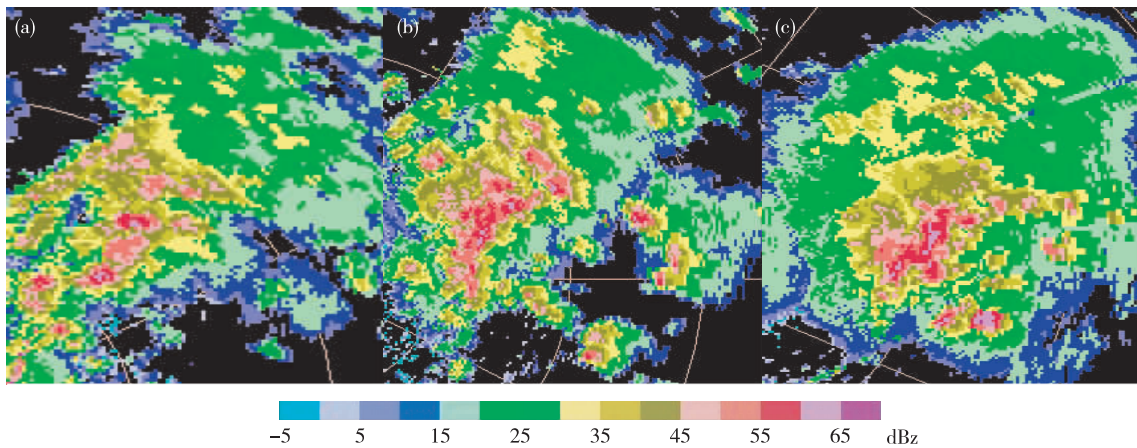


图2 强对流天气时各时刻的组合反射率因子图 (a)18:09;(b)18:52;(c)19:35;
 Fig. 2 Time series of composite reflectivity factor during severe storm process (a)18:09; (b)18:52; (c)19:35

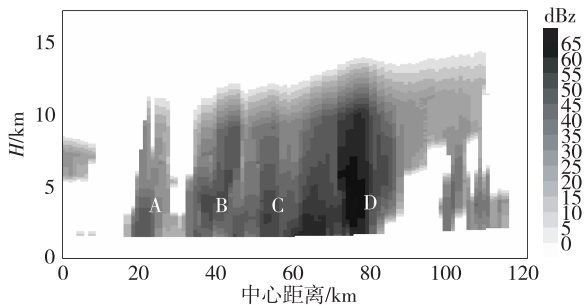


图3 18:52时沿着回波移动方向的强回波单体垂直剖面图
 Fig. 3 Cross section along moving direction of strong echo at 18:52

形成了强烈的上升气流,使得对流不断发展。同时在低层1 km(图略)、2 km高度上强回波带的前部也有一明显的辐合区,它处于带状回波前沿反射率因子梯度最大的区域,就是垂直剖面能看到的穹窿区。从图6的各高度层水平风来看,基本上都是以西南风为主,为了更清楚的了解飊线内部气流的垂直反演结果,了解不同发展阶段对流单体内部的气流情况我们沿着西南—东北向,也是飊线的线状回波发展方向做剖面,图6a中(0, -15) - (120, 55)方向

的剖面图如图7,为了更清楚的表现垂直速度分量,图中垂直速度分量均被扩大2倍。图7中有两个较强的对流单体B、C,还有一个已经减弱的弱单体A存在,对流单体B对应图6a中最强回波处的单体,此时低层回波较强,降水已经产生,在近地层由于降水拖曳作用,已转为下沉气流,虽然其上层仍有些残留的上升气流,不过都已比较弱。而此强回波单体左边的下沉气流更强,这是由于前一个对流单体A已处于消亡阶段,它的降水造成了强盛的下沉气流;而在距离剖面起点最远的一处新生的对流单体C正处于强盛的发展阶段,上升气流强盛,对应图6中的平面风场,正是这个椭圆区域的强盛的气流辐合,才使得上升气流发展旺盛,直到12 km以上仍维持强盛的上升气流。

为了清楚的了解飊线在各个发展阶段的内部气流结构,我们又以距离雷达以东60 km,以北60 km为反演中心,即(60, 60)进行反演,得到17:52时的风场水平分布如图8(a、b),此时飊线还处于初生阶段,从1 km高度(图8a)来看,图中曲线部分有一条

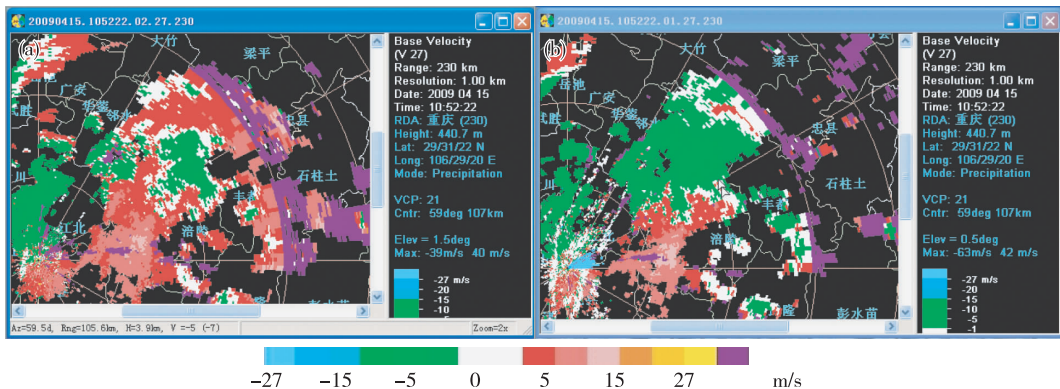


图4 18:52径向速度PPI图(a)1.5°仰角;(b)0.5°仰角;
 Fig. 4 Doppler velocity PPI at 18:52 (a)1.5° elevation angle at; (b) 0.5° elevation angle

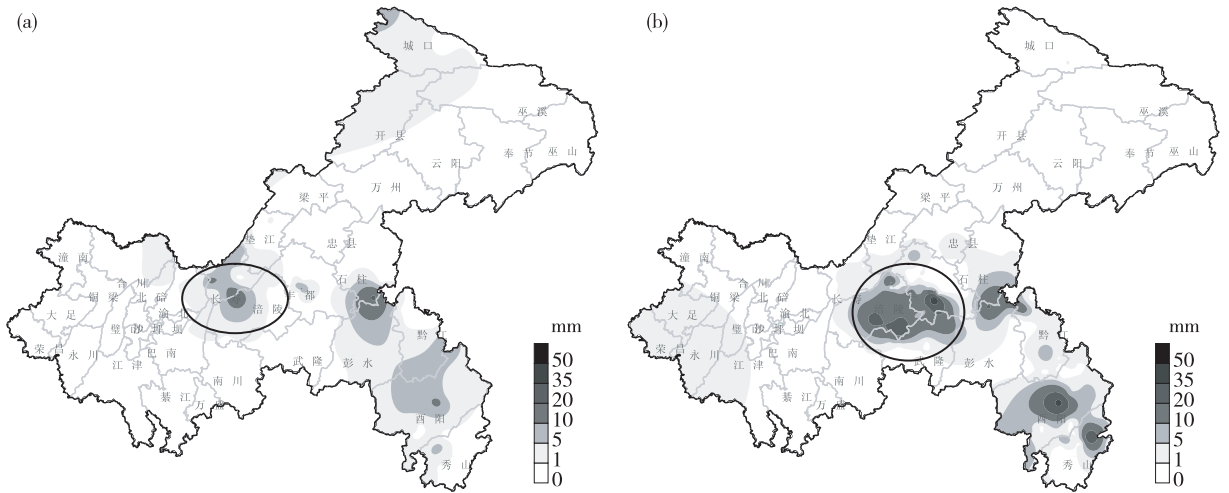


图5 重庆市中尺度自动气象站雨量(单位:mm)分布 (a)18—19 时降水量; (b)19—20 时降水量
 Fig.5 Hourly rainfall(unit:mm) distribution of Chongqing's mesoscale automatic meteorological station (a)18:00 - 19:00; (b)19:00 - 20:00

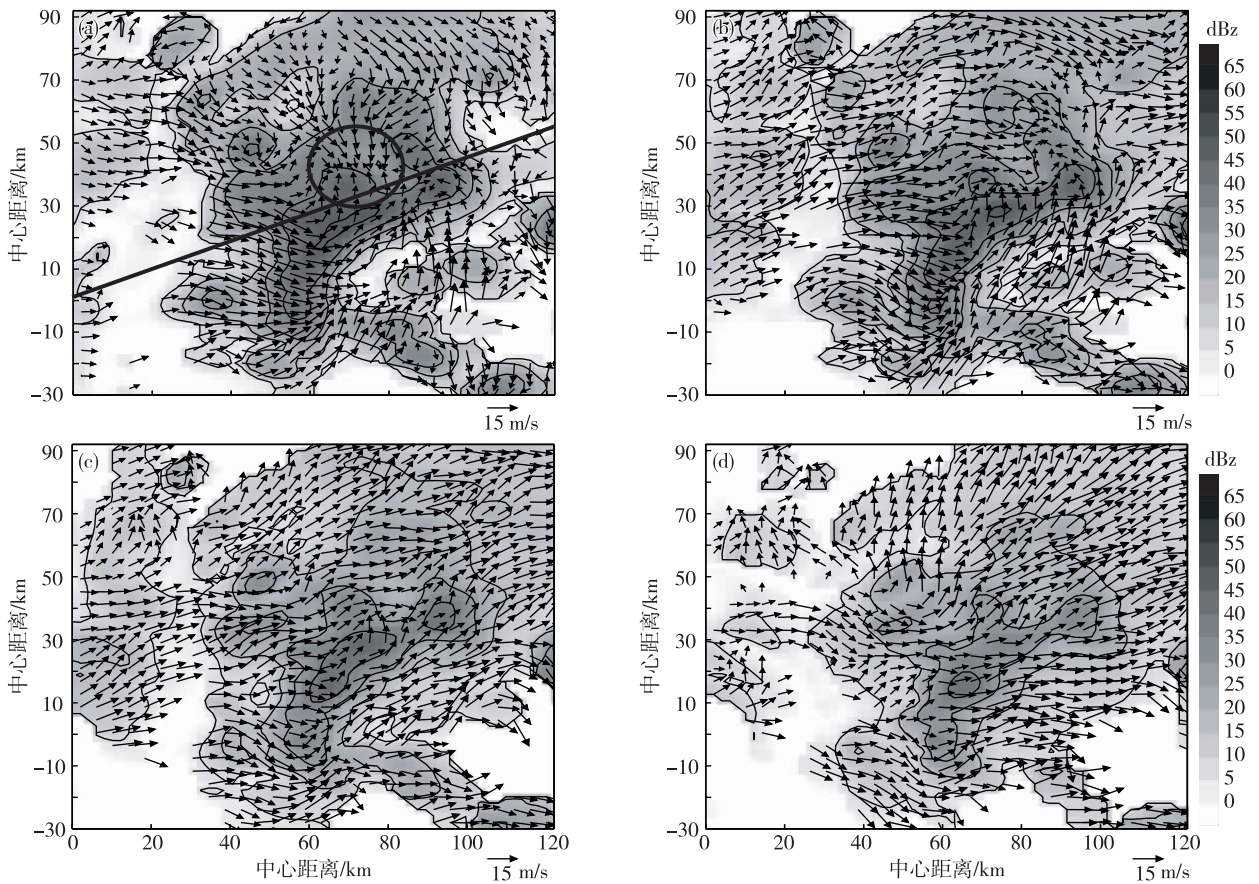


图6 18:52 反演水平风场在不同高度上和反射率因子的叠加图
 (a)2 km;(b)4 km;(c)6 km;(d)8 km

Fig.6 Base reflectivity factor and wind field at (a)2 km;(b)4 km;(c)6 km;(d)8 km

明显的风速风向的辐合区,而且这个区域正好是强回波发展的区域,此时在2 km高度(图8b)上的辐合也存在,但是没有1 km高度上的明显,说明辐合是

从低层开始的。由于低层的辐合一直存在,使得飊线得以发展维持。到21:00后,强回波的主体已经移到重庆市东南部,距离多普勒天气雷达观测站较

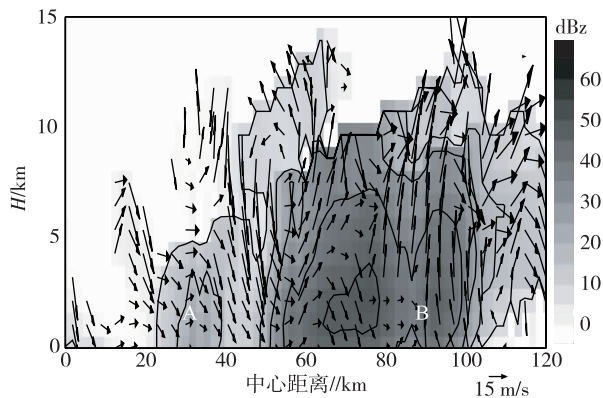


图7 沿着(1, -15) — (120, 55)方向($u-2w$)的垂直剖面
Fig. 7 Vertical cross section of $u-2w$ along SE to NE direction

远,我们以距离雷达以东140 km为反演中心,即(140, 0)进行反演,如图8(c、d),虽然在强回波区仍然有风速风向的辐合,但是在强回波区的后部,大部分风场都是以辐散为主,全部盛行下沉气流,对流单体处于消亡阶段。

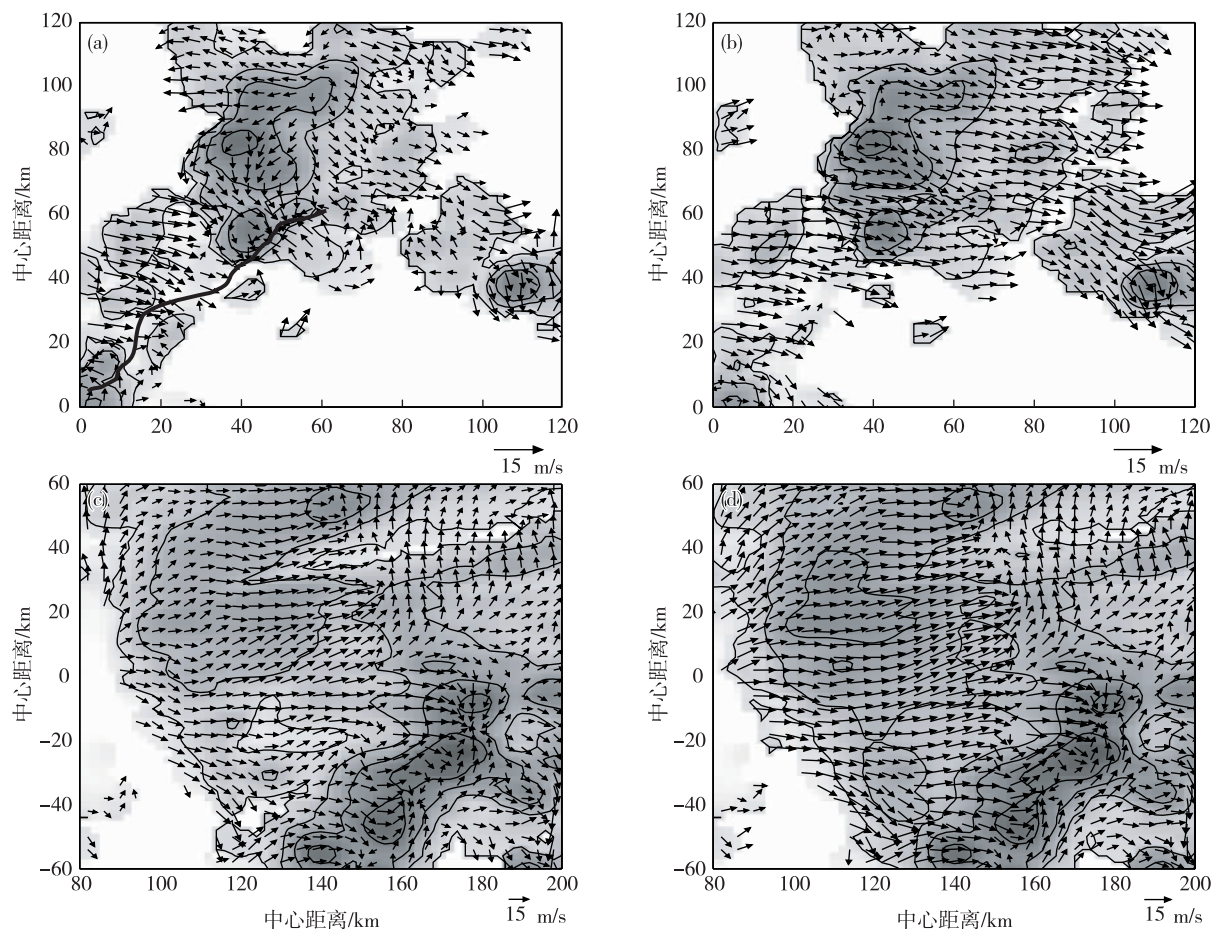


图8 飑线初生时段及消亡阶段不同高度上的反射率因子与风场叠加图
(a)1 km(17:52);(b)2 km(17:52);(c)1 km(21:02);(d)2 km(21:02)

Fig. 8 Base reflectivity factor and wind field at the newborn and ending phase of squall line
(a)1 km height at 17:52; (b)2 km height at 17:52; (c)1 km height at 21:02; (d)2 km height at 21:02

3 结论

通过此次灾害性天气过程的中尺度自动站观测资料、雷达资料进行分析,得到如下结论:

(1)2009年4月15日重庆中部发生了一次飑线天气过程,部分台站的气温、气压、相对湿度等观测值在18—20时这段时间内发生突变。从形势场分析来看,此次飑线过程是受高空高原槽东移下滑,配合850 hPa低涡东移以及地面上在我国东北部有一冷空气向南压,回流影响盆地东部,加剧中低层辐合和切变形成强烈的上升气流,形成的强对流天气。

(2)从雷达产品分析,该飑线天气过程是由多个独立的强对流单体线性排列发展起来的,观测到反射率因子 ≥ 60 dBz的时间大约有2 h。沿着回波移动方向,可以观测到处于不同发展阶段的对流单体,强回波中心随着单体的发展高度不断降低。

(3)强回波对应位置的低层径向速度图上有辐合和“逆风区”存在,通过对比中尺度雨量站数据,

发现“逆风区”对短时强降水预报具有约1 h的预报提前量。

(4) 利用4D-VAR方法反演的低层风场分析,在成熟阶段的飚线,带状回波新生单体附近,有一个风向辐合区,形成了强烈的上升气流,使得深对流得以维持;同时强回波带的前部沿着强回波带也有一明显的辐合区,它处于带状回波前沿反射率因子梯度最大的区域,就是垂直剖面能看到的穹窿区。沿着飚线的线状回波发展方向做剖面与反演的垂直风场叠加,发现4D-VAR反演风场能较好的反映出组成飚线的处于不同发展阶段的各个对流单体的内部气流特征。

(5) 处于初生阶段的飚线,其风场从低层开始有风向风速的辐合,随着飚线的发展,辐合也向高层发展,直到成熟和消亡阶段,由于降水的拖曳作用,盛行下沉气流,在强回波移动方向的后部有风向风速的辐散存在。

参 考 文 献

- [1] 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[硕士论文]. 北京:中国气象科学研究院,2007.
MU Rong. A study on real time retrieving low-level wind field in quasi-operational application with 4D-VAR assimilation technique [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese), 2007.
- [2] 邵玲玲,黄宁立,邬锐,等. 一次强飚线天气过程分析和龙卷强度级别判定. 气象科学,2006,26(6):627-632.
SHAO Lingling, HUANG Ningli, WU Rui, et al. The analysis of a strong squall line process and classification of tornado intensity. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 2006, 26(6): 627-632.
- [3] 陶祖钰. 从单 Doppler 雷达速度场反演风矢量场的 VAP 方法. 气象学报,1992,50(1):81-90.
TAO Zuyu. The VAP method to retrieve the wind vector field based on single Doppler velocity field. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 1992, 50(1): 81-90.
- [4] 郎需兴,魏鸣,葛文忠,等. 一种新的单多普勒雷达风场反演方法. 气象科学,2001,21(4):417-424.
LANG Xuxing, WEI Ming, GE Wenzhong, et al. A new method of retrieving wind field using single Doppler radar. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 2001, 21(4): 417-424.
- [5] 姜海燕,葛润生. 一种新的单多普勒雷达的反演技术. 应用气象学报,1997,8(2):219-223.
JIANG Haiyan, GE Runsheng. A new retrieval technique for single-Doppler radar. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 1997, 8(2): 219-223.
- [6] 张少波,陆汉城,康建伟. 一次超级单体风暴多普勒天气雷达资料的低层风场反演研究. 气象科学,2007,27(2):147-154.
ZHANG Shaobo, LU Hancheng, KANG Jianwei. The lower level wind retrieval applied to super cell storm using Doppler radar. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 2007, 27(2): 147-154.
- [7] SUN J, Flicher D, Lilly D. Recovery of three-dimensional wind and temperature fields from single-Doppler radar data. J. Atmos. Sci., 1991, 48:876-890.
- [8] SUN J and Crook A. Wind and thermodynamic retrieval from single Doppler measurements of a gust front observed during Phoenix II. Mon. Wea. Rev., 1994, 122:1075-1091.
- [9] LI J, CHEN Y L, LEE W C. Analysis of a heavy rainfall event during TAMEX. Mon. Wea. Rev., 1997, 125(6):1060-1082.
- [10] GENG B, Tsuboki K. Relationship between middle-level inflow and organization of mesoscale convective system // International GAME/HUBEX Workshop. Sapporo, Japan, 2000:65-68.
- [11] 刘黎平,邵爱梅,葛润生,等. 一次混合云暴雨过程风场中尺度结构的双多普勒雷达观测研究. 大气科学,2004,28(2):278-284.
LIU Liping, SHAO Aimei, GE Runsheng, et al. A study of mesoscale wind structures in heavy rainfall system of merging cloud with dual-Doppler radar. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2004, 28(2): 278-284.
- [12] 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. Atmos. Sci., 1997, 54(12):1642-1661.
- [13] 牟容,刘黎平,许小勇,等. 四维变分方法反演低层风场能力研究. 气象,2007,33(1):11-19.
MU Rong, LIU Liping, XU Xiaoyong, et al. The capability research on retrieving low-level wind field with 4D-VAR assimilation technique. Meteorological Monthly (in Chinese), 2007, 33(1): 11-19.
- [14] 牟容,余君,刘德. 重庆2008年7月21日强对流天气成因及其特征分析. 气象,2009,35(5):49-54.
MU Rong, YU Jun, LIU De. Analysis of a strong convection event about causation and character on 21 July 2008 in Chongqing city. Meteorological Monthly (in Chinese), 2009, 35(5): 49-54.
- [15] 李军霞,汤达章,李培仁,等. 中小尺度的多普勒径向速度场特征分析. 气象科学,2007,27(5):557-563.
LI Junxia, TANG Dazhang, LI Peiren, et al. Analysis of MESO and small scale Doppler velocity features. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 2007, 27(5): 557-563.