

一次冷锋大暴雨过程的多普勒雷达观测分析*

张家国¹⁾²⁾ 吴翠红²⁾ 王 珏²⁾ 万玉发¹⁾

¹⁾(中国气象局武汉暴雨研究所,武汉 430074)

²⁾(武汉中心气象台,武汉 430074)

摘 要

2003 年 6 月 22—23 日受冷锋和低空急流影响,湖北省东部地区出现了一次区域性大暴雨过程。用每 6 min 一次的武汉多普勒雷达资料,详细分析了冷锋和低空急流天气系统在多普勒雷达径向速度 PPI 速度垂直剖面 VCS 和速度谱宽产品上的主要特征和演变特点。结果表明:PPI 上冷锋对应一条径向速度辐合线,由于多普勒雷达所测的是径向速度,辐合线在向雷达站移动过程中出现逐渐“变短”的现象。因在冷锋附近低层的风垂直切变相对较大,多普勒雷达所测的速度谱宽很大,这一特征对确定冷锋的位置很有帮助。中尺度低空急流在 PPI 速度图上表现为有较大径向速度切向梯度的大风核,且距离雷达站越远这一特征越明显。在上述分析基础上,还结合地面逐时雨量资料等分析讨论了产生暴雨中尺度对流系统的传播与冷锋和低空急流的关系。

关键词:冷锋;中尺度急流;暴雨;多普勒雷达特征

引 言

锋面、低空急流等天气系统与暴雨等强对流天气有密切关系^[1]。多普勒天气雷达不仅能探测到反映降水强度的反射率因子,而且能探测到反映大气风场特征的径向速度、谱宽等。利用多普勒天气雷达资料特别是径向速度资料分析和识别这些天气系统的发生发展过程无疑对暴雨等强对流天气的监测和短时预报有重要意义。目前对冷锋、低空急流等天气系统的多普勒天气雷达速度场特征的研究一是用理想风场进行模拟研究^[2-3],二是通过多普勒风场反演的应用研究^[4],而对天气过程的个例研究较少。我国多普勒天气雷达布网初具规模,如何利用多普勒天气雷达速度场产品分析识别中小尺度系统已是实际业务工作之所急。2003 年 6 月 22—23 日湖北省东部地区出现了一次区域性大暴雨过程,武汉多普勒天气雷达采集到这次过程的完整资料。本文详细分析了与这次大暴雨相关的冷锋和低空急流天气系统的多普勒雷达 PPI 和 VCS 速度特征、速度谱宽特征;在此基础上结合雷达反射率因子、逐时雨量资料,分析了产生暴雨的中尺度对流系统的活动与冷

锋和低空急流的天气学关系,为暴雨等强对流天气的短时预报提供一些思路。

1 主要影响天气系统

这场区域性大暴雨过程主要是受冷锋、低空急流影响产生的。江淮气旋加深导致地面冷空气南下,向南移动的冷锋与西南低空急流相遇导致中尺度对流云团生成。2003 年 6 月 22 日 08:00 850 hPa 在 112°E,35°N 有一低值系统,但风场和高度场还没有形成完整的闭合环流;700 hPa 辐合线在 110°E 一带;500 hPa 低槽远在 105°E,33°N 至 110°E,40°N 一带(图略);副热带高压较强,脊线在 23°N 稳定维持;副高西侧大气低层有一支西南急流一直伸展到江淮地区,急流的西边界在武汉附近。随着中层 500 hPa 低槽快速东移,低层低值系统东移并在江淮地区加深形成气旋波。至 20:00,850 hPa 在江淮地区有一闭合低值中心形成(图略),气旋性环流明显;相应地,在地面天气图上江淮地区有一个明显的气旋波生成。在气旋波后部偏北气流引导下华北小股冷空气南下与西南暖湿气流汇合。同时,红外卫星云图观测到一个 α 中尺度的对流云团位于气旋波逗点

* 湖北省科技攻关计划课题(2004AA306B01)和湖北省气象局科技发展基金项目(2003ZZ01)共同资助。

2005-01-24 收到,2005-08-29 收到再改稿。

状云系的尾部,亦即在冷锋尾部,此时云团处在发展阶段,并在向南移动的过程中不断加强,从而导致湖北省东部地区大暴雨过程的发生。

2 多普勒天气雷达观测特征分析

2.1 速度图上锋面急流特征

彩图 1 是暴雨发生期间多普勒天气雷达观测到的 PPI 速度图随时间的演变。冷锋在南下的过程中,PPI 速度图上位于雷达站北部有一条正负速度辐合线(蓝色曲线所示),并逐渐移向雷达站,它是冷锋在速度图上的表现(下同)。辐合线上还出现了明显的人字形扰动。23 日 00:03,在辐合线的南侧,零速度线通过雷达站并表现为“S”型,说明低层有暖平流;速度图上的牛眼特征,说明风速随高度先增加后减小,反映对流层低层有西南低空急流存在。急流中心最大风速为 $19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,中心高度在 $2 \sim 3 \text{ km}$,风向为西南风(急流的方向用绿箭头线表示,下同),其走向与东西向辐合线有 30° 的夹角。上述对流云团出现在辐合线和低空急流交汇点附近及其以西的地方。

随着锋面向南移动,这条辐合线表现为逐渐“变短”的趋势,22 日 22:51 正负速度之间的辐合线长约 110 km ,23 日 00:03 变为 60 km 左右,经过雷达站时正负速度辐合线基本上消失,下面对辐合线逐渐“变短”的原因进行分析。

图 2 是与彩图 1 中 23 日 00:03 相对应的示意图。辐合线东侧的零速度线 DF 在雷达方位大约 22.5° 的径向上(以正北为零),参照辐合线所在高度的高空风观测记录,辐合线北侧为西西北风,那么,辐合线北侧和 22.5° 径向以西的区域,在雷达速度图上的反映就是负速度区,而在 22.5° 径向以东区域,西西北风与西南风在雷达径向上分量均为远离雷达,在速度图上表现正速度区,西西北风与西南风间的辐合线 DE 变得不清楚了。另外, AC 是与西南风相垂直的零速度线,在 C 点以西雷达所测的西南风和西西北风的径向风均为向着雷达,西西北风与西南风间的辐合线位置 BC 与 DE 一样在速度图上表现不出来。随着辐合线距离雷达站越近,正负速度辐合线的长度 CD 会越来越短。本文后面速度谱宽的分析可知,辐合线在移到雷达站以前并未消失,而且强降水、强反射率因子带十分明显。锋面的这一特点很容易被误解为系统在逐渐减弱,在实际

应用中这是值得注意的地方。

23 日 07:22 辐合线在雷达站以南,辐合线北侧正速度逐渐减小并出现零速度区,而且范围不断变大,其附近强回波范围减小,红外卫星云图上强降水云团减弱消散,反映底层辐合在减弱。23 日 08:17 正负速度辐合线消失,但在雷达站东南方向有一个负速度的大风核,在大风核的左侧区域,仍然有强降水存在,在第 3 章将对大风核特征进行分析。

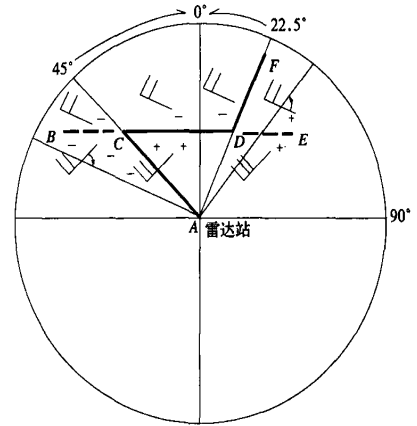


图 2 辐合线在移向雷达站时会变短的示意图
(-、+ 分别表示径向速度为向着雷达和远离雷达)

2.2 谱宽图上锋面特征

谱宽是对多普勒天气雷达距离库内速度离散程度的度量,换言之,它是距离库内速度方差估计的度量,与距离库内各运动目标速度的差异成正比。对气象目标而言,影响速度谱宽的主要因子有:①垂直方向上的风切变;②由波束宽度引起的横向风效应;③大气湍流运动^[5]。由于冷锋附近垂直风切变明显(见彩图 3a),因此,多普勒雷达谱宽产品可用于对冷锋进行定位。彩图 4 是雷达所观测到的速度谱宽演变过程。比较彩图 1 可以看出,辐合线附近有一强谱宽带(蓝色曲线所示),谱宽值为 $2 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,比多普勒雷达速度图上正负速度辐合线要长,与反射率因子场上强回波带基本一致。很显然,尽管速度图上辐合线在南压的过程中逐渐变得不明显,但强谱宽带长度很少变化,这证实了辐合线变短是一种虚假现象。因此,锋面辐合线的位置可参考谱宽的分布来确定。

2.3 VCS 上锋面和风暴气流结构特征

彩图 3 是沿着 10° 方位角所作的径向速度和反射率因子垂直剖面图。从速度垂直剖面图彩图 3a 上可以看出,正速度区向负速度区倾斜,即辐合线随

高度向偏北方向倾斜,锋面可定在正、负速度过渡带即“零速度”带所在位置,坡度约为 1/10 ~ 1/5。另外,3 km 以下的低空急流很强,径向风速达到 $13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,并在冷锋附近开始有倾斜上升。由于冷锋附近一般是暖空气上升冷空气下沉,因此,对本次冷锋过程而言,我们可以对实际风做如下推断:在中低层,正径向速度说明暖湿气流远离雷达并倾斜向上,负径向速度说明冷空气向着雷达并倾斜向下。从 9 km 高度开始高空正、负速度区分布与低层相反,说明 9 km 高度上开始出现高层辐散,彩图 3a, b 中带箭头的蓝色虚线表示垂直二维气流结构。上述这种结构维持了约 9 h。

彩图 3b 是对应的反射率因子垂直剖面,可看出,强对流单体靠近低层正负速度辐合线即锋面的地方。从 23 日 04:00 开始,锋面结构开始发生变化(图略),与旺盛期相比,有以下两个特点:① 锋面坡度减小,约为 1/20;② 低层锋面前后的负速度和正速度很小,并出现零速度,说明低层辐合减弱。尽管高层始终存在着辐散气流结构,然而随着低层辐合的减弱,对流回波高度、强回波高度均明显下降。因此,对流系统的减弱只是由于低层辐合减弱所引起的。

由上述分析可知,此次锋面降水过程类似于 Browning 概括的后向暖湿输送带模式^[6],低空急流在地面锋附近急骤上升形成线对流。所不同的是,这次过程在对流层高层 9 km 以上还叠加了一个辐散层。该辐散层不能简单地解释为风暴顶的辐散,因为在风暴减弱时它依然存在。

3 速度图上中尺度低空急流特征

23 日 08:17 速度图上辐合线特征已经消失(彩图 1f) 仅在雷达站西南方向有一个负速度的大风核,在大风核的左侧 23 日 08:00—11:00 还出现了 60 mm 的强降水中心。结合其他几次天气过程我们概括出速度图上大风核的特性有:① 最大径向速度很大;② 径向风随方位变化快,即径向风切向梯度大;③ 大风核离雷达站有一定距离。从下面分析可知,大风核实际上就是中尺度低空急流在径向速度上的表现。雷达径向风速分量公式^[5]为:

$$V_r(\beta) = -V_h \cos(\beta - \beta_0) \cos \alpha + V_f(\beta) \sin \alpha \quad (1)$$

式(1)中, $V_r(\beta)$ 为多普勒雷达观测的径向风速, V_h 为水平风速, V_f 为垂直速度, α 为雷达天线仰角, β

为方位角, β_0 为水平风向与正 x 轴的夹角。由式(1)可知,在低仰角速度图上不考虑垂直速度随方位角 β 的影响,即在风场水平均匀条件下,雷达所测的径向风按余弦规律变化。这里,考虑风向不变风速变化(如急流附近)的情况,则径向风速随方位角的变化加快,即径向风切向梯度较水平风场均匀时要大。分析如下:由式(1)对方位角求导数,又 $\Delta n = \Delta\beta \cdot R$ (图 5), R 是测量点到雷达站的距离, Δn 为与 $\Delta\beta$ 相对应的弦长。得到式(2):

$$\frac{\partial V_r(\beta)}{\partial \beta} = V_h \sin(\beta - \beta_0) \cos \alpha - \cos(\beta - \beta_0) \cos \alpha \frac{\partial V_h}{\partial n} \cdot R \quad (2)$$

由式(2)分析可知,在有急流情况下,径向速度随方位角的变化通常情况下除受方位效应影响外,还受风水平切变的影响,分别为式(2)右边第一、二项。分析表明由于急流的存在,后项与前项有相同的量级,它使得径向风速随方位的变化明显加大,而且距离雷达站越远,影响越显著。因此,在径向速度上根据径向风切向梯度特征,很容易识别出中尺度急流切变的存在。实际上在其他个例分析中,也发现在对流系统附近速度场上没有中尺度辐合系统如辐合线、低涡特征,但是有与强对流对应的径向风大风核存在。

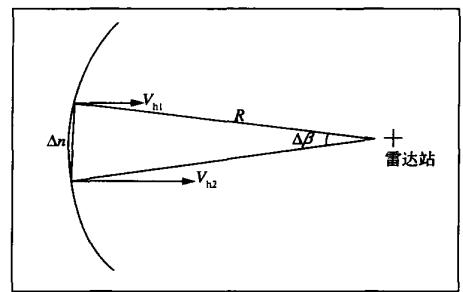


图 5 急流切变对径向风切向梯度影响示意图

4 冷锋、低空急流与暴雨的关系

4.1 强降水分布和演变过程

在这次大暴雨过程中,湖北省东部地区雨量在 50 mm 以上有 25 站,其中雨量超过 100 mm 的有 13 个站,大暴雨中心位于武汉市西北部,3 h 雨量分别为 131 mm 和 136 mm。强降水从 22 日 19:00 一直

持续到 23 日 13:00,为描述暴雨空间分布随时间演变的规律,作 22 日 20:00—23:00,22 日 23:00—23 日 02:00,02:00—05:00,05:00—08:00,08:00—11:00,11:00—14:00,6 个时段 3 h 累积降水量分布(图 6)。累计时间取 3 h 主要是考虑到这次暴雨过程强降水在经过某一测站时一般不超过 3 h。雷达

观测反映,22 日 20:00—23:00 降水带延伸到河南省南部和安徽省北部,因缺少这一地区 1 h 雨量资料,故图中等值线未闭合,用虚线向外延伸。从图中可看出:暴雨在时空分布上有明显的 β 中尺度特点;强降水分布为带状,强降水中心在雨带的右端;雨带在南移的过程中强降水带和强降水中心向西转移。

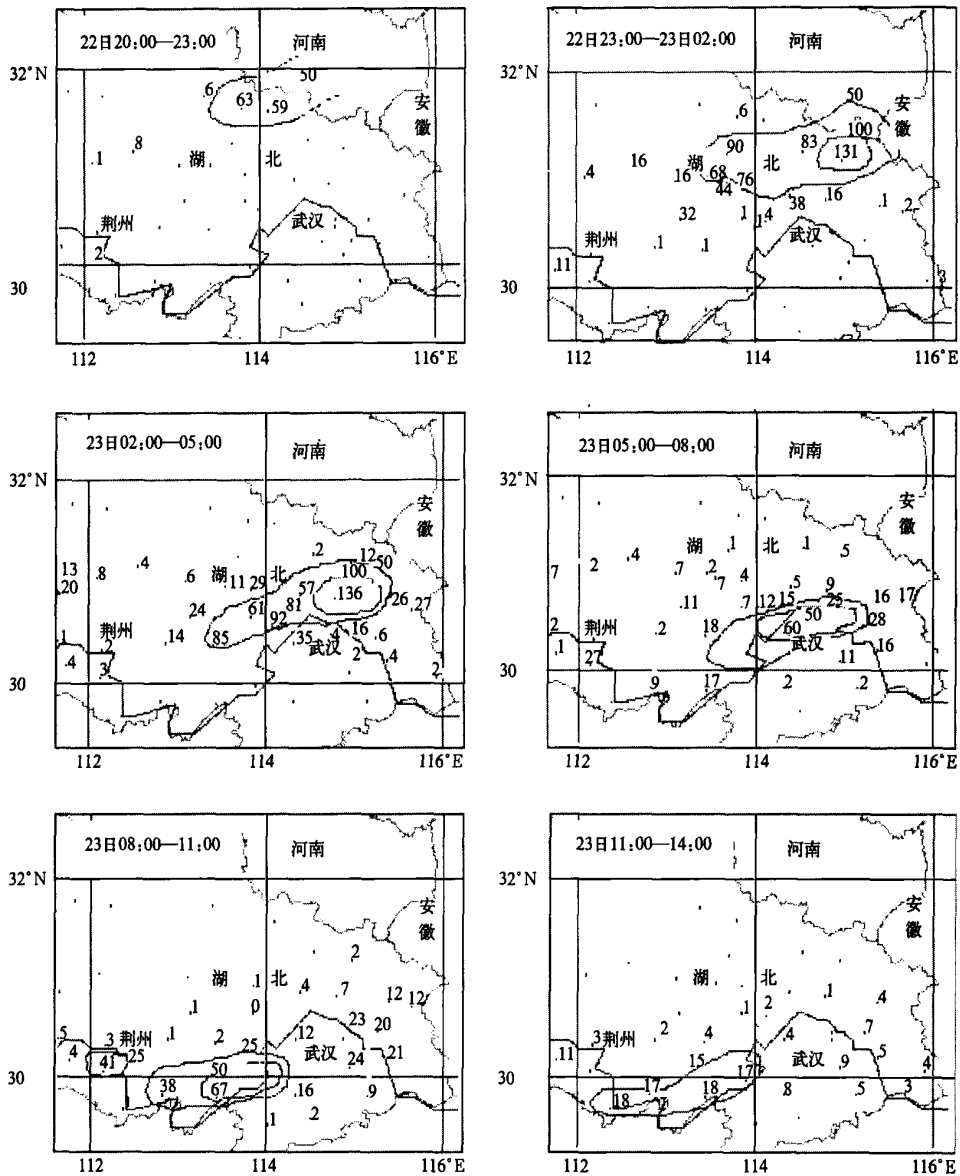


图 6 6 个时段 3 h 累积降水量分布随时间变化(单位: mm)

4.2 多普勒雷达反射因子分析

彩图 7 是雷达所观测到的 4 个时刻反射率因子场的叠加图,图中已将小于 35 dBz 的弱回波滤掉。从图中可以看出以下几个特点:① 22 日 22:50,对流回波带基本上为 ENE—WSW 向,以后回波带的

西段移动较快而东段移动较慢,回波带逐渐变为 SW—NE 向;② 对流带与速度图上辐合线位置一致;③ 对流带由几个回波团组成,回波团向东南或偏东南方向移动,如图箭头所示。回波团移动方向与回波带的夹角较小,强降水持续时间长,有利于

暴雨的产生^[7]; ④新的回波团在对流带的西端生成, 在向东南方向移动的过程中减弱, 因此随着对流带的南移, 对流带整体向西伸展, 东段对流的发展受到抑制。如 22 日 22:50 雷达观测到对流带上有两个强对流回波团 A, B; 23 日 01:31, A 没有大的变化, B 强度已减弱, 团状结构不明显, 而在西端又有回波团 C 发展; 23 日 04:15, 又有回波团 D 发展起来。从整体上看, 随时间推移强降水回波向西转移, 这与降水分析一致。

4.3 冷锋、低空急流与暴雨的关系

通过上述分析可以看出: 由于多普勒雷达所观测的是径向风, 冷锋在向南移动的过程中所表现的辐合线会逐渐变短, 但速度谱宽展示了辐合线的全貌, 因此辐合线在移过雷达站以前一直存在; 辐合线在整个南压的过程中低空急流与冷锋交角变化很小, 交角大约有 30° ; 强对流回波带形成于低空急流左侧、地面冷锋附近; 在对流回波带南压的过程中, 强回波团逐渐向西发展, 东侧减弱, 暴雨中心西移。由这些观测事实, 可用彩图 8 描述冷锋、低空急流和暴雨区的天气学关系。根据三者之间的关系, 可以推断: 由于急流位置和走向不变, 在冷锋不断南移的过程中两者交汇点会逐渐西移, 受急流左侧强的切变涡度、右侧反气旋涡度等影响, 对流在交汇点附近及西侧加强而东侧减弱, 由此导致暴雨区西移。

5 结论

1) PPI 速度图上冷锋对应一条正负径向速度辐合线, 由于多普勒雷达所测的是径向速度, 辐合线在向雷达站移动的过程中会出现逐渐“变短”的现象。因在冷锋附近低层风垂直切变相对较大, 雷达所测的速度谱宽很大, 这一特征对确定冷锋的位置

很有帮助。

2) 中尺度低空急流在多普勒雷达 PPI 速度图上表现为大风核, 有较大的径向速度和径向风切向梯度特征, 且距离雷达站越远梯度特征越明显。暴雨与中尺度急流左侧气旋切变有密切关系, 中尺度急流左侧气旋切变能够触发中尺度对流系统的形成。

3) 造成这次区域性大暴雨的中尺度对流系统是由冷锋和低空急流共同作用的结果。暴雨区位于冷锋和低空急流的交汇点附近和急流的左侧, 冷锋和低空急流位置的变化也决定了暴雨中心位置的变化。

4) 在中尺度对流系统强烈发展阶段, 低空急流强盛, 并在地面锋附近形成很陡的强上升运动; 在中尺度对流系统减弱阶段, 尽管对流层高层存在辐散气流, 但锋面坡度减小, 低层辐合减弱, 上升气流倾斜趋于平缓, 降水强度减弱。

参考文献

- [1] 陶诗言. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980.
- [2] 刘晓阳, 冯凯, 顾松山. 典型风场的单多普勒速度特征. 南京气象学院学报, 1996, 19(2): 245-251.
- [3] 夏文梅, 王凌震, 张亚萍, 等. 低空急流的单多普勒速度特征. 南京气象学院学报, 2003, 26(4): 289-295.
- [4] 陶祖钰. 单多普勒雷达观测资料反演冷锋流场的试验. 热带气象学报, 1995, 11(2): 232-233.
- [5] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学. 北京: 气象出版社, 2001: 232-233; 243-243.
- [6] 孔玉寿, 章东华. 现代天气预报技术. 北京: 气象出版社, 2000. 174-175.
- [7] Charles A Doswell III, Harold E Brooks, Robert A Maddox. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. *Mon Wea Rev*, 1996, 114: 561-571.

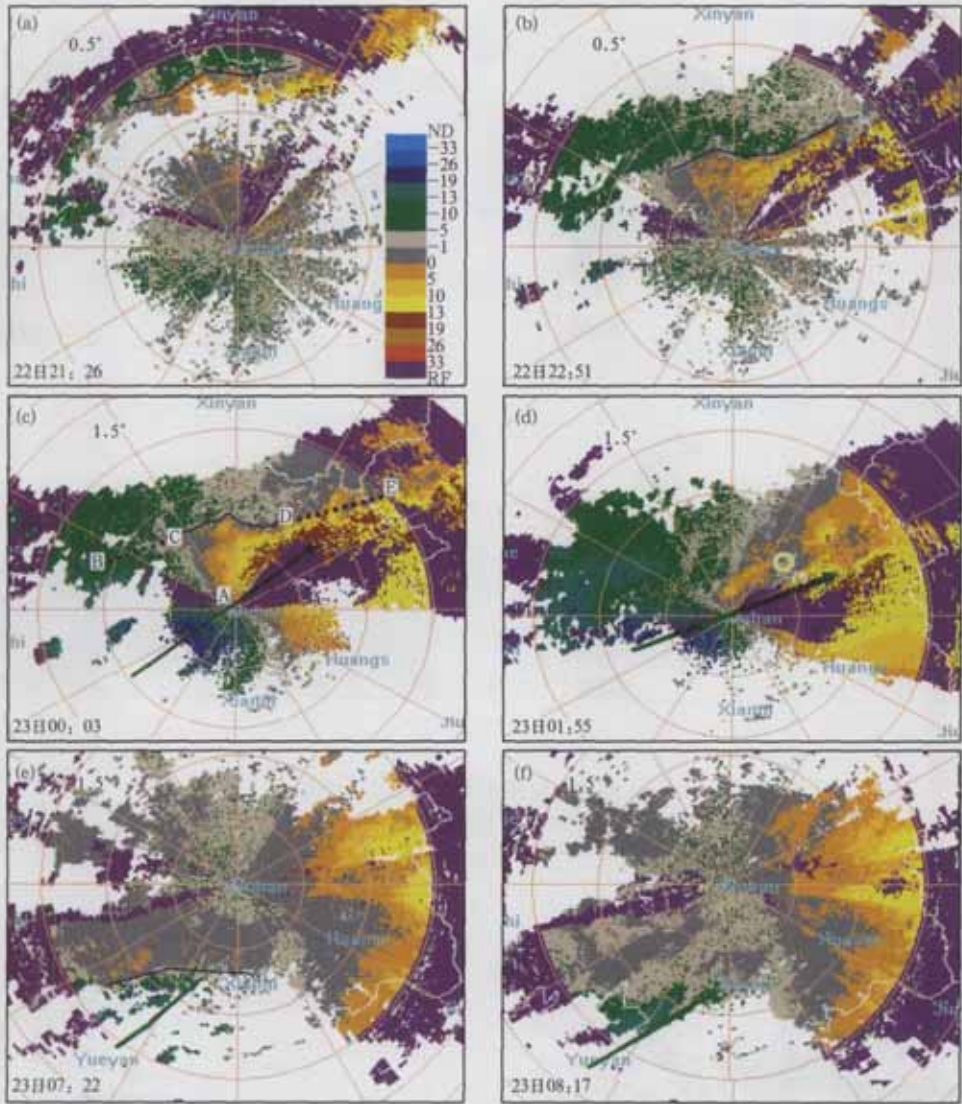


图1 2003年6月武汉雷达PPI速度图上冷锋、低空急流特征和演变过程(距离每圈50 km, 最外圈为30 km)

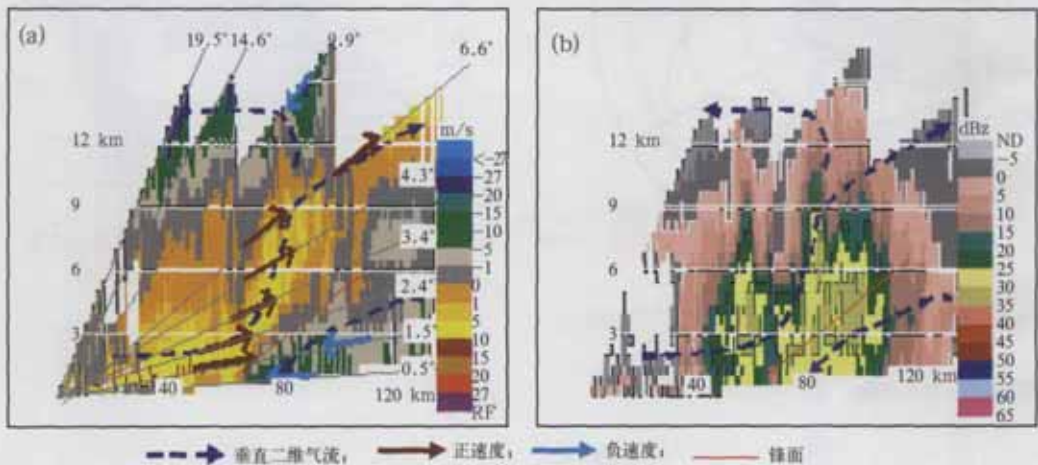


图3 2003年6月22日22:51武汉雷达沿10°方位角的径向速度(a)和反射率因子(b)垂直剖面图

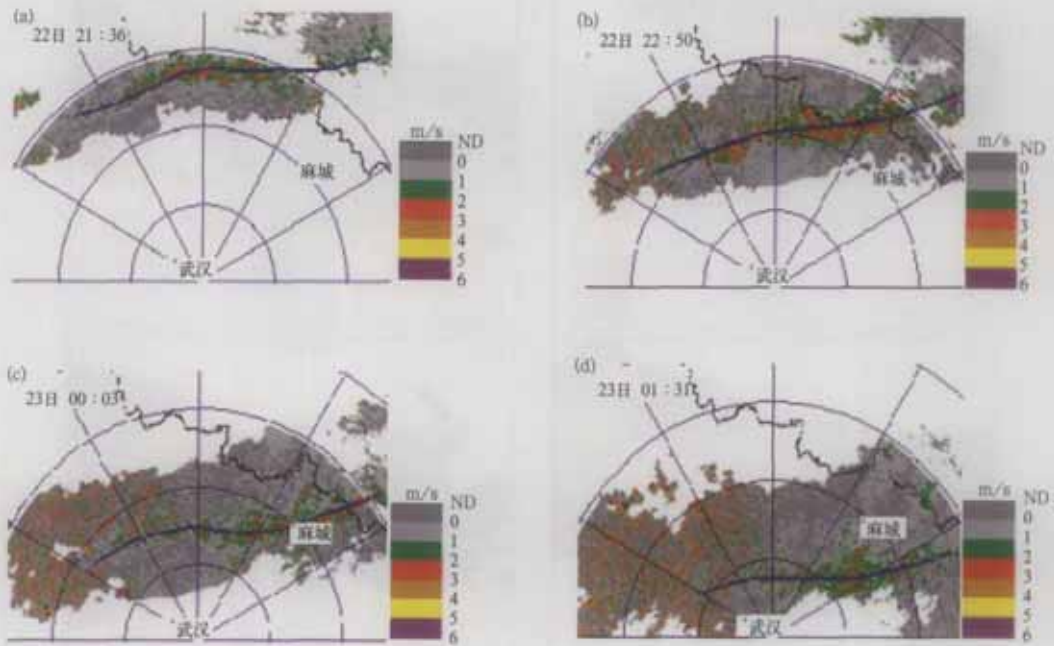


图4 冷锋附近速度谱宽分布及演变图
(仰角为1.5°, 距离每圈50 km)

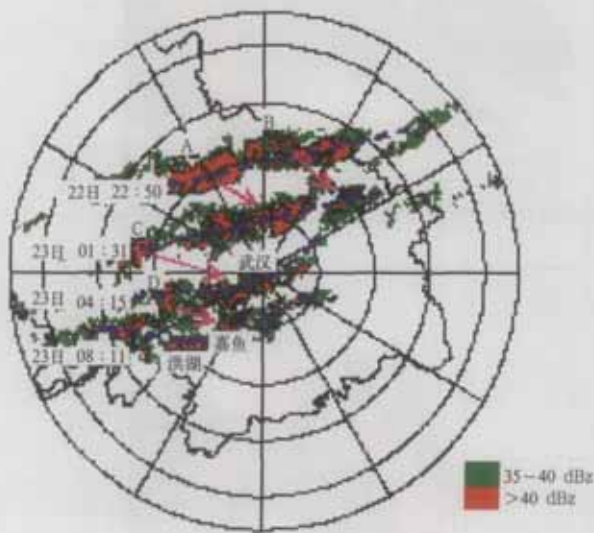


图7 2003年6月武汉多普勒雷达观测的4个时刻反射率因子场的叠加图
(仰角为1.5°, 距离每圈50 km, 最外圈为30 km)

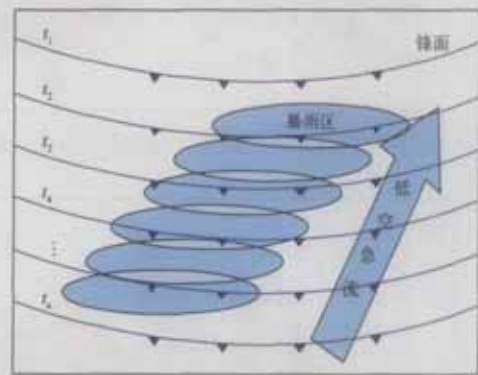


图8 冷锋、低空急流和暴雨关系示意图
(图中 t_1, t_2, \dots, t_n 表示时间序列)

Observational Analysis on a Cold Front Heavy Rain Using Doppler Radar Data

Zhang Jiaguo¹⁾²⁾ Wu Cuihong²⁾ Wang Jue²⁾ Wan Yufa¹⁾

¹⁾ (Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430074)

²⁾ (Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074)

Abstract

Forced by cold front and low-level jet, a regionally torrential rainfall occurs in the east of Hubei Province during June 22–23, 2003. On 22 June, a synoptic-scale cyclone is developing over the reaches of the Changjiang and Huaihe River. Led by the deepening cyclone, the ground cold front moves southward and triggers meso-scale convective system (MCS) when it confronts with southwest low-level jet. The MCS perches on the tail of the comma pattern cloud system in infrared weather satellite image. The MCS moves southward, strengthens and results in heavy rain in the east of Hubei Province.

Wuhan Doppler radar collects the data set during the heavy rain period. The radial velocity and spectrum width features of the cold front and the low-level jet on Doppler radar are analyzed in detail using base velocity, velocity cross section, base spectrum width data collected by Wuhan Doppler radar every six minutes. Also, combining analysis on radar base reflectivity and surface rain-gages data, the synoptic relationships between the spread of the MCS and the cold front, low-level jet are discussed briefly. The results are as follows: ① There is a convergence line corresponding to cold front on base velocity product. Because Doppler radar only detects radial velocity of the wind, the convergence line gets short gradually when it moves towards radar station. Spectrum width is high near the cold front for relatively high vertical wind shear in low level of the troposphere, which helps to determine the position of the cold front. ② The salient features of the meso-scale low-level jet on base velocity product include big radial velocity and big tangent gradient of the radial velocity, and the farther the gale core is apart from radar station, the clearer the big tangent gradient behaves, which is called “great gale core” detected by Doppler radar many times. ③ The MCS that brings regional torrential rainfall is jointly resulted from cold front and low-level jet. At the intense developing stage of the MCS, the strong low-level jet climbs along cold surface front quickly and steeply. At weakening stage of the MCS, rainfall intensity decreases because of lessened gradient of the cold front though there is a divergence flow in troposphere aloft. In addition, the heavy rain occurs near the join point of the cold front and low-level jet and on the left of the jet. As the direction and position of the low-level jet is fixed, the join point can shift to west when cold front moved to south. Accordingly, MCS strengthens in the west of the join point for horizontally cyclonic vortex on the left of the jet, and weakens in the east of it for horizontally anti-cyclonic vortex on the right of it.

Key words: cold front; low-level jet; heavy rain; Doppler radar characteristics