

文章编号: 1000-2022(2004) 05-0587-08

一次龙卷过程的多普勒天气雷达和闪电定位资料分析

姚叶青¹, 魏 鸣¹, 王成刚¹, 李 劲²

(1. 南京大学 中尺度灾害性天气教育部重点实验室, 江苏 南京 210093; 2. 安徽省气象台, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 利用 WSR-98D 多普勒天气雷达和闪电定位资料分析了 2003 年 7 月 8 日发生在安徽省无为县境内的一次龙卷过程。此次龙卷产生于低空急流左侧, 动力、热力条件均为较有利的大尺度环境, 多普勒雷达回波分析发现, 龙卷起源于中高层向低层发展的中- γ 尺度气旋中。闪电定位资料分析表明, 龙卷发生前 10 min 闪电活动开始频繁, 龙卷出现后负地闪明显加大, 且龙卷闪电存在于雷暴的发展后期、成熟和消亡阶段。此次龙卷的一些基本特征与通常结论有所不同, (1) 雷达反射率因子小于通常结论; (2) 龙卷风暴发展高度不是很高, 回波顶高仅 6~9 km, 类似于普通雷暴; (3) 闪电活动中以负地闪为主, 正地闪较少, 并未出现正地闪一度占主导地位的现象。

关键词: 多普勒天气雷达; 闪电定位; 龙卷

中图分类号: P406 **文献标识码:** A

2003 年 7 月 8 日 23 时 20 分到 30 分, 安徽省无为县百胜镇和六店镇出现龙卷, 数人被卷入天空后跌入稻田, 拖拉机倒退 5 m, 大树连根拔起, 全村房屋几乎全部倒塌, 共造成 16 人死亡, 162 人受伤, 直接经济损失 4.8×10^8 元。由于龙卷发生地没有气象观测仪器, 无法得知当时的风力, 但从受灾情况可推测这是一次较强的龙卷, 符合龙卷 FPP 等级 3 的标准^[1]。

龙卷母云是灾害性天气中最猛烈的对流风暴^[2], 是一种损害严重的小尺度对流系统。国内外很多学者研究认为: 龙卷发生时通常有以下 3 种特征: (1) 龙卷母云的雷达回波一般都很强, 在 50 dBZ 以上, 显示出超级单体的一些特征, 如钩状回波、BEWR 等, 此外雷达径向速度场上常常伴有中尺度气旋^[2]。(2) 龙卷风暴十分高大并有明显旋转性^[3]。(3) 龙卷风暴中一度以正地闪为主^[4-6]。所有的龙卷中正地闪的峰值频率大于 1.5 个/min, 龙卷通常发生在风暴正地闪峰值开始下降、负地闪占主导地位的时间段内, 其位置一般在风暴极性开始转变的地方。作为对流强风暴, 龙卷出现时常伴有冰雹等强对流天气, 所以许多对龙卷的研究中包含冰雹的特征, 而此次龙卷由于没有冰雹存在, 观测资料能更好地反映出龙卷特征。

近年国内多普勒天气雷达的业务应用, 使人们有可能对这种强灾害天气进行探测分析, 本文结合闪电定位资料的应用, 以期对这次龙卷过程获得新的、更详细的认识。

收稿日期: 2003-10-23; 改回日期: 2004-03-08

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G1998040909); 国家自然科学基金资助项目(40333027)

作者简介: 姚叶青(1970-), 女, 安徽枞阳人, 硕士生, 研究方向: 短期、短时天气分析和预报。

1 天气背景

1.1 大尺度环流分析

由 7 月 8 日 20 时 500 和 700 hPa 高空图可以看出,保定、许昌到万县一带有一低槽,安徽省处在槽前的西南气流中(图略)。850 hPa 高空图上(图 1),许昌、钟祥到思南一线和许昌到盱眙一线分别有冷槽和暖切变,同时长沙、安庆到南京存在低空急流。龙卷发生地(无为县境内)处在低空急流左侧,风速切变为气旋性切变(安庆 16 m/s, 阜阳 2 m/s),而安庆到南京存在风速辐合(安庆 16 m/s, 南京 12 m/s)。风速切变和风速辐合均有利于对流的形成和发展,而地面处在低压区中,龙卷发生地有闭合小低压(图略)。

1.2 大气动力和热力分析

龙卷属强雷暴中最强的一种小尺度天气系统,其生成和发展与大气的稳定性密不可分,当日 20 时安庆探空站的 $T-h$ 图中(图 2),对流有效位能达 2 120.7 J/kg, K 指数为 34.0,沙氏指数为 -5.5。由此可以看出当时大气层结很不稳定。

此外国外分析认为^[7]:龙卷一般发生于近地面层(厚度不小于 1 km)内水汽丰富,中层(底部在 1 ~ 2.5 km 高度以上)有干冷空气存在,通过蒸发冷却提供潜在的强烈下曳气流的环境中。龙卷要求有深厚的条件性和对流性不稳定,即在深厚的气层中有较大的温度和水汽直减率。在这次龙卷过程中,水汽和温度的垂直变化见表 1 和图 3。

大气中的水汽常用比湿来反映,表 1 说明在

850 hPa 以下水汽较为丰富,而 850 hPa 以上即中层水汽较少,为干冷空气,因此从水汽的角度来说也有利于龙卷的发生。从图 3a 中可看出在 8 日 20 时之前,高层 100 hPa 一直降温,相反低层 925 hPa(图 3b)一直在升温,从低层到高层温度直减率不断增大,8 日 20 时达到最大,随后开始减小,温度直减率的增大有利于大气的上升运动而产生强对流。

2 多普勒雷达资料分析

2.1 强度场分析

龙卷是大气中最猛烈的对流风暴,一般认为龙卷母云都很强,回波强度值通常在 50 dBZ 以上^[1],而本次龙卷的雷达反射率因子并未表现得非常强,为 35 ~ 50 dBZ,和普通的对流性回波强度相当(图 4a),也就是说仅从强度场上无法判断此处有龙卷产生,且回波顶高也只达到 6

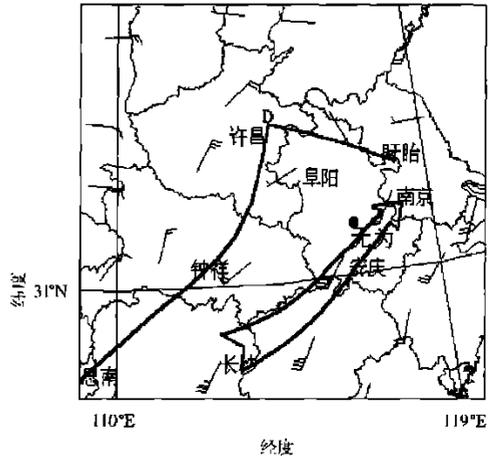


图 1 2003 年 7 月 8 日 20 时 850 hPa 风场

(图中黑点为龙卷发生地)

Fig. 1 850 hPa wind fields

at 2000 BST Jul. 8, 2003

(the black dot is the place

where the tornado took place)

表 1 7 月 8 日 20 时安庆上空中低层湿度分布

Table 1 Humidity at Anqing station from low level to middle level at 2000 BST Jul. 8, 2003

气压/hPa	位势高度/gpm	比湿/(g/kg)
1 000	31	23.7
925	727	19.8
850	1 467	15.3
700	3 119	9.4
500	5 850	4.4
400	7 590	3.3

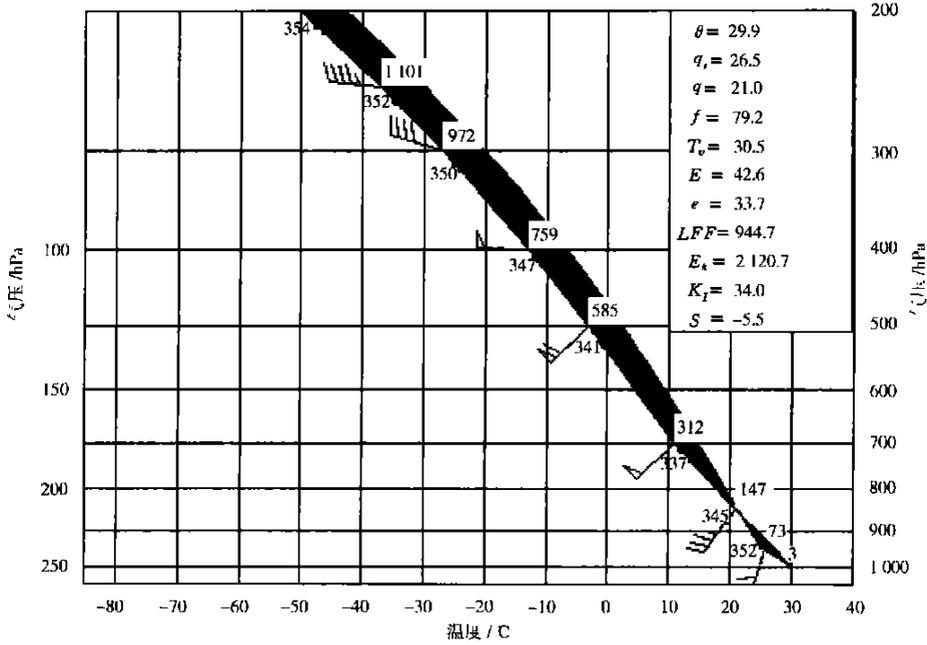


图 2 2003 年 7 月 8 日 20 时安庆 T-lnp 图

Fig. 2 T-lnp diagram at Anqing station at 2000 BST Jul. 8, 2003

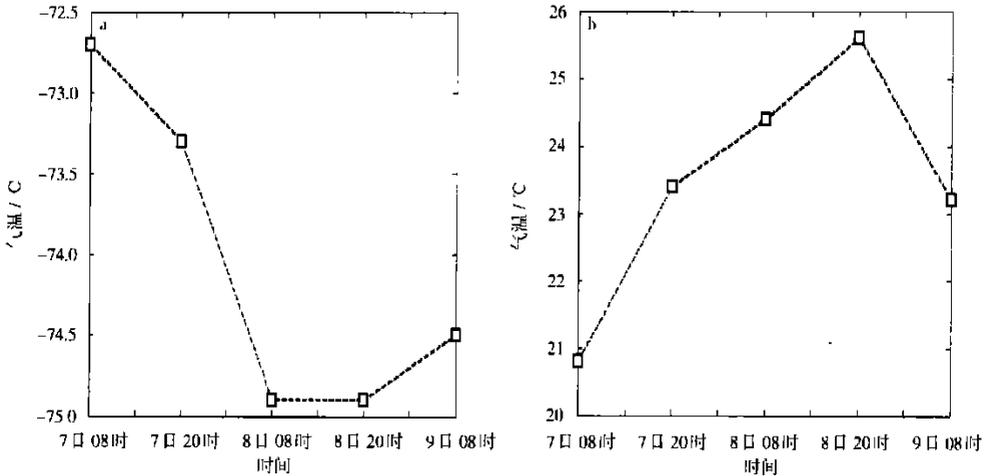


图 3 龙卷发生前 48 h 100 hPa(a) 和 925 hPa(b) 气温演变

Fig. 3 Temperature variations at 100 hPa(a) and 925 hPa(b) levels for 48 h before the tornado took place

~ 9 km(图 4c), 同样类似于普通的对流性天气, 在多普勒强度场的垂直剖面图上强中心位置较低(图 4b), 这和冰雹云的强回波中心高度较高有明显区别。

从上面分析可知, 此次龙卷母云的雷达反射率、回波顶高、强回波中心高度与普通雷暴波相似, 类似的例子如, 2003 年 7 月 20 日 17 时萧县的 3 个镇出现龙卷, 合肥多普勒雷达上没有显示出回波, 原因可能是萧县距合肥雷达站 260 km 左右, 雷达最低仰角探测的高度在 260 km 处波束轴线已在 7 km 以上, 合肥的多普勒雷达上没有探测到回波说明这次龙卷母云

高度可能在 7 km 以下。

综上所述,通常结论认为龙卷母云很强,且发展得较为高大,可能是由于龙卷常和冰雹等强雷暴同时出现而造成。冰雹云常表现为回波强度高、回波顶和强回波中心很高。如果仅有龙卷产生时,在多普勒雷达的强度场和回波顶高上龙卷母云可能和普通雷暴相似,因此运用雷达作强对流预报时这一点值得注意。

2.2 速度场分析

虽然本次龙卷母云在雷达反射率和回波顶高上有别于传统意义上的龙卷母云,但多普勒径向速度场中存在明显的中- γ 尺度气旋,不同于普通雷暴(图 5)。由正负速度中心(雷达站合肥位于图中左上角,距离龙卷发生地约 73 km)可以看出,中尺度气旋在低层(图 5d、对应 1.2 km 高)为辐合性气旋,而中低层(图 5c、对应 2.4 km 高,图 5b、对应 3.6 km 高)为气旋,中层(图 5a、对应 4.8 km 高)为辐散性气旋。正负速度中心的水平尺度约为 10 km,为典型的中- γ 尺度气旋。说明本次龙卷起源于中- γ 尺度气旋,即嵌在中- γ 尺度气旋中,属于 B 型龙卷^[2]。

相对径向速度场上不同仰角中- γ 尺度气旋演变分析发现,本次中- γ 尺度气旋在 22 时 21 分 4.3 度仰角(约 6.8 km 高)上最先出现,随后低层才开始出现(图 6),即中- γ 尺度气旋在中高层最先出现,然后向低层发展。

另外从同一时间不同仰角的强度场上也发现,40 dBZ 的回波中高层先于低层出现(图 7),说明中- γ 尺度气旋强回波区由中高层向低层发展。

以上分析说明此次龙卷起源于中- γ 尺度气旋,且由中高层向低层发展。

3 闪电资料分析

3.1 龙卷的闪电活动特征

本文用合肥、滁州和蚌埠闪电定位仪的优化组合资料对这次龙卷过程中闪电的分布、频率和极性进行分析,发现在龙卷开始前 10 min(23:10—23:16),龙卷发生地附近云、地闪活动频率由此前的几乎为零突然加大,峰值频率达到 2.4 个/min(23:12—23:16 平均),经过 3 min 的间歇后(只有 1 个地闪)到 23:20,云、地闪活动频率又开始加大,持续到 23:36,且 23:21 起负地闪明显加大。在当时的雷达回波强度场上,和龙卷母云强度相当的回波较多,但仅在龙卷母云附近及附近、桐城附近有密集的闪电,而其他相当强度的回波中闪电较少(图 8a)。桐城附近的密集闪电于 23:10 开始,对比图 7 中的 23:12 雷达回波强度场可以看出(图 8b),桐城附近的闪电主要发生在雷暴消散阶段,而龙卷附近的闪电主要发生在雷暴发展后期、成熟和消亡阶段。

综上所述,虽然雷达的强度场上无法把这次龙卷和普通雷暴区分开来,但闪电活动明显不同,龙卷闪电存在于雷暴的发展后期、成熟和消亡阶段,且空间上密集,时间上峰值频率相对较大,而非龙卷的闪电开始于雷暴消亡后或在时空分布上较稀疏。龙卷开始于负地闪明显加大前后,也就是说可从闪电资料来临近预报强对流天气发生和可能出现的地点。

3.2 负地闪为主的原因浅析

此次龙卷闪电所出现的地闪绝大多数是负地闪,而国外很多研究表明在产生龙卷或大冰雹的旺盛风暴中主要是正地闪^[4-7]。或者说正地闪占主导的风暴大多数产生龙卷^[8]。

MacGorman 和 Nielsen 指出^[9]:有两个原因导致正地闪可能在强雷暴天气中产生:第一是超级单体的结构导致倾斜的双极电荷分布,下部的负电荷发生在降水附近,正电荷发生在上升中心顶部的冰晶上。超级单体倾斜结构足以使上面的正电荷有效地接触到地面。第二种机

制是在雷暴的底部可能是明显的正电荷区,这样的正电荷区有几种方式可以形成。如非感应起电机机制可导致对流云底部产生正电荷,即在一些情况下,通过电荷的反向传输,可以使正电荷聚集在软雹上,负电荷在冰晶上。例如温度高于 -10 到 -20 ,雷暴中含有大量液态水时就会出现电荷反向传输。

如果碰撞发生在软雹获得正电荷的情况下,则可能在雷暴的底部、主要负电荷的下方或部分地区产生正电荷区。Ziegler等^[10]通过对经典超级单体的数值模式研究,发现在 0 到 -15 的环境中循环软雹在下落碰撞中可产生小范围的正电荷区。

本文研究的龙卷母云与通常结论不同的是雷达回波强度场不太强、回波顶高度不高,从7月8日20时靠近龙卷发生地的安庆探空资料得知: 0 层大约在 5.2 km, -15 层大约在 8.0 km。从强度场的垂直剖面图上(图9)很明显看出弱回波区在 3 km以下,即强的上升气流位于 3 km以下, $5\sim 9$ km处的弱上升气流难以使相当数量的软雹进行不断循环而产生正电荷并增长为冰雹。另外雷暴的正地闪的第一种机制是由于其倾斜结构使其上面带正电荷的冰晶与地面之间产生正地闪,若雷暴发展不高,也难以有相当数量的冰晶产生正电荷,所以此次龙卷正地闪较少的主要原因可能就是其发展的高度不高所造成,同时也没有出现地面降雹。

4 结 论

(1) 2003年7月8日无为龙卷发生在有利的大尺度背景下,即低空急流左侧的气旋辐合,温度直减率的增大,大气层结极不稳定有利于对流的形成、发展。而近地面层水汽丰富、中层有干冷空气,蒸发冷却也产生龙卷所需的强烈下曳气流。

(2) 此次龙卷起源于由中高层向低层发展的中- γ 尺度气旋中。龙卷开始前 10 min闪电活动开始频繁,龙卷开始后负地闪明显加大,且龙卷闪电主要存在于雷暴发展后期、成熟和消亡阶段。多普勒雷达速度和闪电资料对龙卷的发生和出现的地点有较好的指示意义。

(3) 此次龙卷母云的一些基本特征与通常结论有所不同:雷达反射率因子并不太强($35\sim 50$ dBZ)。发展高度较低($6\sim 9$ km),与普通雷暴相似。闪电活动中地闪极性主要是负地闪,正地闪少,并非正地闪占主导地位。龙卷母云在雷达回波强度场和回波发展的高度上类似于普通雷暴的这一特征在强雷暴的临近预报中值得警惕。

(4) 此次龙卷和通常结论不同的主要原因可能是由于这次龙卷母云发展高度不高,除龙卷外未伴有冰雹等强对流天气现象。一般而言,强雷暴中龙卷的产生常常伴有冰雹的出现,冰雹的存在易于掩盖龙卷本身的特征。可见,龙卷可以产生在雷达反射率因子不大,回波顶不高的雷暴中。而龙卷中正地闪较少的原因可能是龙卷母云发展高度较低,非感应起电机机制不明显,所以地闪主要以负地闪为主。

参考文献:

- [1] 陆汉成. 中尺度天气原理和预报[M]. 北京: 气象出版社, 2000: 124-127.
- [2] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2001: 397.
- [3] 孔燕燕, 沈建国. 强雷暴预报[M]. 北京: 气象出版社, 2001: 142.
- [4] Krider, Pifer A E, Vance D L. Lightning direction-finding system for forecast fire detection[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1980, 61(9): 980-986.
- [5] Orville, Henderson R W, Bosart L F. An east coast lightning detection network[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1983, 64(9): 1 029-1 037.
- [6] Mach D M, MacGorman D R, Rust W D, et al. Site errors and detection efficiency in a magnetic direction-finder

network for location lightning strikes to ground[J]. J Atmos Oceanic Technol, 1986(3): 67-74.

- [7] MacGorman D R, Burgess D W. Positive Cloud-Ground Lightning in Tornadoic Storms and Hailstorms[J]. Mon Wea Rev, 1994, 122(8): 1 671-1 679.
- [8] Kessler E. Thunderstorm Morphology and Dynamics[M]. 包澄澜译, 北京: 气象出版社, 1987: 82-111.
- [9] MacGorman D R, Nielsen K E. Cloud-to-ground lightning in a tornadoic storms on 8 May 1986[J]. Mon Wea Rev, 1991, 119(7): 1 557-1 574.
- [10] Ziegler C L, MacGorman D R. Observed lightning morphology relative to modeled space charge distributions in a tornadoic storm[J]. J Atmos Sci, 1994, 51(6): 833-851.

A Case Analysis of Tornado Based on Doppler Radar Data and Lightning Location Data

YAO Ye-qing¹, WEI Ming¹, WANG Cheng-gang¹, LI Jin²

(1. Key Laboratory of the Meso-scale Severe Weather

of National Educational Ministry, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. Meteorological Observatory of Anhui Province, Hefei 230031, China)

Abstract: In this paper, a tornado case, which occurred in Wuwei, Anhui Province in Jul. 8 2003, is analyzed by using the WSR-98D Doppler Radar data and the Lightning Location data. The tornado took place on the left-hand side of a low-level jet, and the large scale background environment dynamically and thermally are favorable to the genese of tornado. From the analysis of the Doppler radar echoes, we found that the tornado was born in a mesoscale(γ -scale) cyclone, which developed from the middle level to low level. The analysis of the lightning location data shows that about 10 minutes before the tornado took place, the lightning rate increased distinctly, and after the occurrence of the tornado it fell down and the negative ground flashes were obviously increased. Furthermore, tornado lightning existed in the most lifetime of the thunderstorm. In this paper, some observation facts of the tornado are different from some classical theories. Firstly, radar reflectivity factor is not as strong as the classical result. Secondly, the height of the radar echo of the tornadoic thunderstorm is only about 6~9 km as high as the common thunderstorm. Thirdly, in the tornado case, the negative ground flashes are more than the positive ground flashes, which is different from the classical theory that the fraction of tornadoic storm is dominated by frequent positive ground flashes.

Key words: doppler weather radar; lightning location; tornado

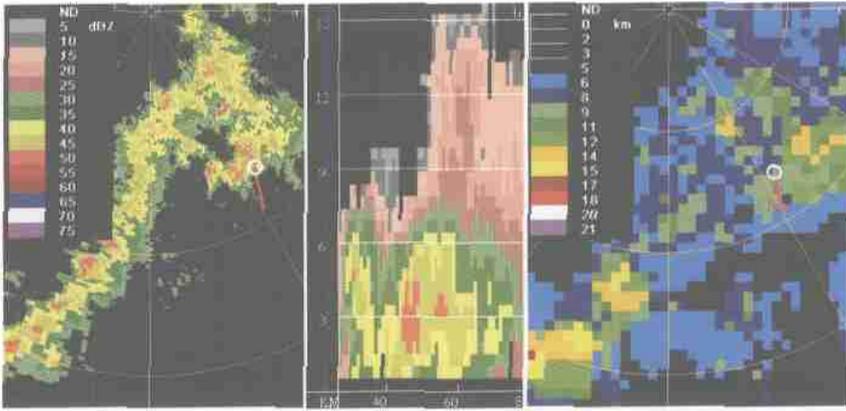


图 4 龙卷母云强度场(图中 A 上面圆圈为龙卷发生地)

a. PPI(23:23, 1.5 仰角); b. 垂直剖面(23:18); c. 回波顶高(23:23)

Fig. 4 Horizontal radar echo of the tornado on 1.5° elevation angle at 2323 BST (a); the vertical cross section of the radar echo at 2318 BST (b); the height of the echo top at 2323 BST (c) (The white circle at the top of A denotes the place where the tornado took place)

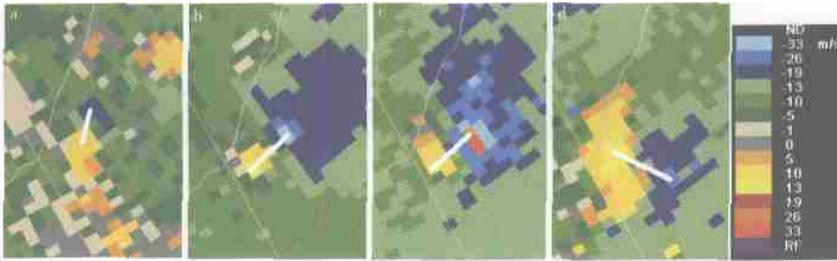


图 5 23:23 不同仰角的风暴相对径向速度场 a. 3.4° b. 2.4° c. 1.5° d. 0.5° (白线为正负速度中心的连线, 雷达站合肥在左上角, 距离中尺度气旋中心约 73 km)

Fig. 5 Radial velocity field relative to thundering on different elevations at 2323 BST Jul. 8, 2003

a. 3.4° b. 2.4° c. 1.5° d. 0.5°

(The white line links the positive velocity center to the negative one; Hefei radar station is at the top-left corner of figures)

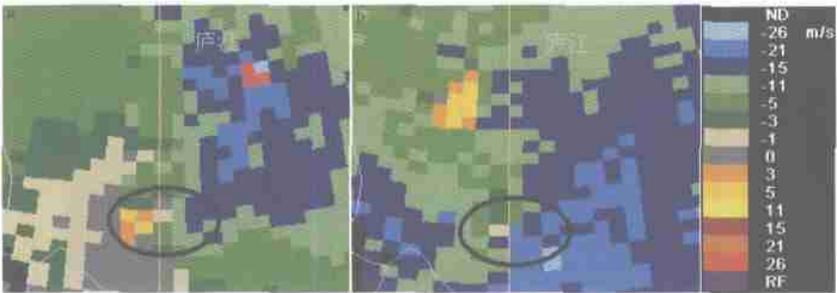


图 6 22:27 仰角为 4.3° (a)、0.5° (b) 的相对径向速度场(雷达站合肥在上方)

Fig. 6 Relative radial velocity field of the thundering on 4.3° (a) and 0.5° (b) elevations at 2227 BST Jul. 8, 2003 (Hefei radar station is on the top of figures)

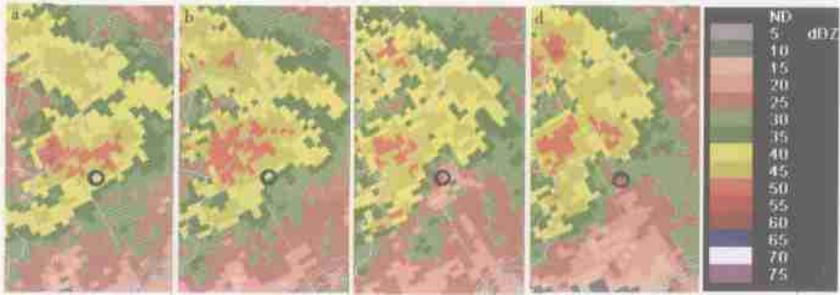


图 7 23:12 仰角为 3.4 (a) 、2.4 (b) 、1.5 (c) 和 0.5 (d) 的强度场(黑圈为龙卷发生地)

Fig. 7 Intensity field of the radar echo on 3.4 (a) , 2.4 (b) , 1.5 (c) and 0.5 (d) elevation at 2312 BST Jul. 8, 2003

(The black open circle is the place where the tornado took place)

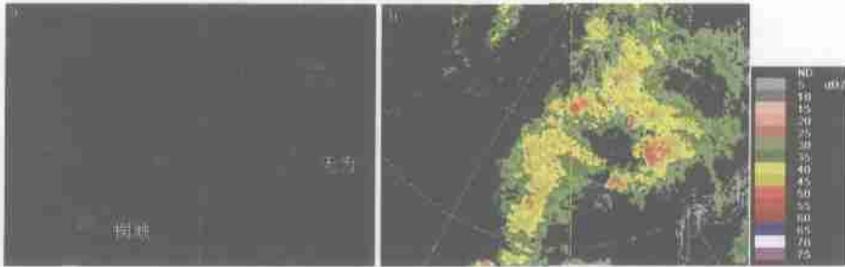


图 8 23:00—23:30 地闪分布(a) 、23:12 雷达强度场 2.4 仰角(b)

Fig. 8 Distributions of the ground lightning in 2300—2330 BST (a) and the intensity field of radar echo at elevation 2.4° at 2312 BST (b)

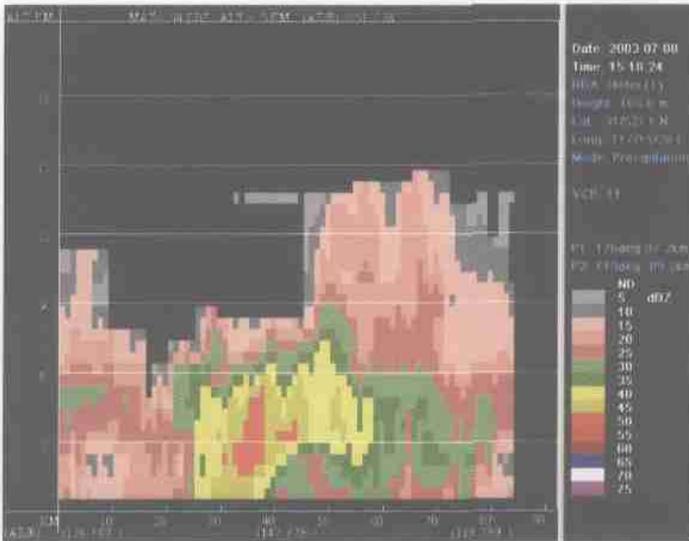


图 9 23:18 强度场垂直剖面

Fig. 9 Vertical cross section of the radar echo at 2318 BST Jul. 8, 2003