

江淮地区龙卷超级单体风暴及其环境参数分析^{*1}

周后福^{1,2,3} 刁秀广⁴ 夏文梅⁵ 王德育⁶ 项 阳⁷

ZHOU Houfu^{1,2,3} DIAO Xiuguang⁴ XIA Wenmei⁵ WANG Deyu⁶ XIANG Yang⁷

1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京, 210044
2. 安徽省气象科学研究所, 合肥, 230031
3. 安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 合肥, 230031
4. 山东省气象台, 济南, 250031
5. 江苏省气象科学研究所, 南京, 210009
6. 安徽省宿州市气象局, 安徽宿州, 234000
7. 安徽省阜阳市气象局, 安徽阜阳, 236001

1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China
 2. Anhui Institute of Meteorological Sciences, Hefei 230031, China
 3. Key Laboratory of Atmospheric Sciences and Satellite Remote Scanning of Anhui, Hefei 230031, China
 4. Shandong Provincial Meteorological Observatory, Ji'nan 250031, China
 5. Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210009, China
 6. Suzhou Meteorological Office, Suzhou, Anhui 234000, China
 7. Fuyang Meteorological Office, Fuyang, Anhui 236001, China
- 2013-04-23 收稿, 2013-11-12 改回.

周后福, 刁秀广, 夏文梅, 王德育, 项阳. 2014. 江淮地区龙卷超级单体风暴及其环境参数分析. 气象学报, 72(2): 306-317

Zhou Houfu, Diao Xiuguang, Xia Wenmei, Wang Deyu, Xiang Yang. 2014. Analysis of the tornado supercell storm and its environmental parameters in the Yangtze-Huaihe region. *Acta Meteorologica Sinica*, 72(2): 306-317

Abstract Based on the Doppler radar detection data and the NCEP reanalysis data, 6 tornado supercell storms in the Yangtze-Huaihe region from 2003 to 2010 and their environmental parameters were analyzed. The results show that: (1) H_{BASE} average of the tornado supercell storms was 1.7 km, H_{TOP} average was 9.1 km. The height of maximum reflectance factor was mostly in the lower part of the storm, close to somewhere quarter to its base. H_{BASE} average was much lower than the mean averaged over all the supercell storms of the Yangtze-Huaihe region, but H_{TOP} average was slightly lower. (2) I_{VIL} average was 25.6 kg/m², and Z_{MX} average was 54.8 dBZ. I_{VIL} average was much smaller than the mean averaged over all supercell storms of the Yangtze-Huaihe region, but Z_{MX} average was slightly lower. (3) M_{BASE} average of the tornado supercell storms was 1.2 km, M_{TOP} average was 3.9 km, and M_{SHR} average was $14.4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Compared to the average for the Yangtze-Huaihe region, tornado M_{BASE} and M_{TOP} were obviously lower, but M_{SHR} was slightly lower. (4) When TVS (Tornado Vortex Signature) parameters got the maximum value, V_{AD} was between 12 and 45 m/s, the V_{LLD} was greater than 30 m/s, V_{MXD} was larger than 30 m/s, the height of V_{MXD} was not lower than 0.8 km, T_{DPT} was between 2.4 and 6.4 km, the T_{BASE} was between 0.7 and 1.5 km, T_{TOP} was between 2.3 and 6.4 km, and T_{MXSHR} exceeded $22 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. The maximum parameter occurrence time of TVS agreed with the actual time. On average, tornado appeared within 6 min after TVS appeared. And, (5) 0–6 km vertical wind shear of the tornado supercell storm as detected by the radar was 15.2 percent higher than the averaged value over the

* 资助课题: 国家自然科学基金项目(41140036, 40475017)。

作者简介: 周后福, 从事强天气分析预报研究。E-mail: zh_fahqx@sohu.com

Yangtze-Huaihe region. I_{CAPE} average was 1752 J/kg, K index was 38°C, wind shear average from 850 hPa to the ground exceeded 12 m/s, and, the temperature difference from 850 to 500 hPa was 23.7°C before tornado happened. The energy was on a moderate to strong condition, the instability of the atmosphere was higher, and vertical wind shear became larger.

Key words Tornado, Supercell storm, Mesocyclone, TVS, Environmental parameter

摘 要 利用多普勒雷达探测资料和 NCEP 再分析资料,对 2003—2010 年发生在江淮地区的 6 个龙卷超级单体风暴及其环境参数进行了分析。研究表明:(1)龙卷超级单体风暴 H_{BASE} 平均为 1.7 km, H_{TOP} 平均为 9.1 km; H 多在风暴的下部,近于下部的 1/4 处。 H_{BASE} 平均值比江淮地区各种超级单体的平均值低得多, H_{TOP} 则略低。(2)龙卷超级单体 I_{VIL} 平均为 25.6 kg/m², Z_{MX} 平均为 54.8 dBz。和江淮地区超级单体相比,龙卷 I_{VIL} 要小得多,而龙卷 Z_{MX} 略低。(3)龙卷超级单体的中气旋 M_{BASE} 、 M_{TOP} 和 M_{SHR} 平均值分别为 1.2 km、3.9 km 和 $14.4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,和江淮地区超级单体相比,龙卷 M_{BASE} 、 M_{TOP} 明显低,而 M_{SHR} 略高。(4)TVS 参数最强时的 V_{AD} 在 12—45 m/s, V_{LLD} 多大于 30 m/s, V_{MXD} 多超过 30 m/s, V_{MXD} 的高度不低于 0.8 km, T_{DPT} 在 2.4—6.4 km, T_{BASE} 在 0.7—1.5 km, T_{TOP} 在 2.3—6.4 km, T_{MXSHR} 超过 $22 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。TVS 参数最强时间与龙卷实际时间基本吻合,平均相差 4.2 min;平均而言,TVS 出现后 6 min 有龙卷发生。(5)雷达推算的龙卷超级单体的 0—6 km 风垂直切变比江淮地区超级单体的风垂直切变平均值高 15.2%;龙卷发生前 I_{CAPE} 平均为 1752 J/kg, I_K 为 38°C, 850 hPa 到地面风切变平均超过 12 m/s, 850—500 hPa 温差平均为 23.7°C。龙卷发生前能量处在中等到强的状态,大气不稳定性较强,风垂直切变大。

关键词 龙卷, 超级单体风暴, 中气旋, TVS, 环境参数

中图法分类号 P413 P445+.1

1 引 言

超级单体风暴的概念由 Browning(1962)首先提出。Browning 给出了超级单体风暴的雷达反射率因子特征,认为在成熟阶段具有持续相对稳定的特点,稳定性和持续性是超级单体与其他强风暴的主要区别。到了 20 世纪 70 年代,Donaldson(1970)在研究超级单体时最先发现了“龙卷气旋”,揭示出龙卷超级单体的旋转特性,此后超级单体风暴作为一种风暴类型的概念被广泛接受和使用(Marwitz, 1972a, 1972b, 1972c)。随着多普勒雷达技术的逐渐成熟与应用,大量雷达观测数据验证了风暴内部中气旋的存在(Ray, 1975),后来的多普勒雷达探测进一步证明了超级单体风暴是与中气旋相伴而生,为此, Browning(1978)对超级单体风暴的概念作出修订,认为具有深厚中气旋的对流单体才是超级单体风暴,上述概念随后在学术界得到了广泛认可(Moller, et al, 1994; Doswell, 2001)。中气旋是风暴上升气流与后侧下沉气流紧密相联的小尺度涡旋,是雷达径向速度回波的典型特征(俞小鼎等, 2006)。在超级单体的三维模式中,上升气流从右前方进入风暴,到高层作气旋式扭转进入云砧区,下沉气流在对流层中层从风暴右侧进入,在左后方低层离开风暴。此后根据气旋的旋转速度、速度切变、维持时间和伸展厚度对中气旋进行了定义(赵坤等,

2008),至今仍被广泛使用(Jerald, et al, 2013)。近年来已经有运用云尺度模式和雷达资料的四维同化(4Dvar)技术,针对超级单体风暴的热动力机制进行数值模拟的研究(陈明轩等, 2012)。

龙卷分为两类,分别是超级单体风暴产生的龙卷和非超级单体风暴产生的龙卷(Wilson, 1986)。超级单体龙卷与持续、深厚的中气旋紧密相关,从雷达回波上可以观测到龙卷往往是伴随低层中气旋(小于 1 km)的出现而产生的,从雷达径向速度图上有时能识别与龙卷紧密联系的比中气旋尺度小、旋转快的涡旋即龙卷涡旋特征(TVS);并非所有的龙卷都与超级单体风暴有关,非超级单体风暴龙卷可以发生在各种产生对流风暴的环境下,研究认为非超级单体龙卷与非超级单体风暴相联系,同时与边界层辐合切变线密切相关(郑媛媛等, 2004);有些非超级单体风暴发生在弱的风垂直切变环境条件,而另一些非超级单体风暴产生在强的风垂直切变条件下,一般将其生命史分为 3 个阶段:生成阶段、成熟阶段和消亡阶段(俞小鼎等, 2006)。TVS 的定义通常由 3 个部分组成,即切变、垂直方向伸展和持续性;切变指的是相邻方位角的距离库到距离库的径向速度切变值,反映气流旋转的强弱,切变值的阈值设定为 20 m/(s · km);如果有 2 个以上仰角存在潜在 TVS,则相应的三维结构被识别为 TVS。到目前为止,尽管中气旋和 TVS 在识别龙卷时虚警率较

高,但依然是识别龙卷的有效指标。

随着各地多普勒雷达的应用,其高时空分辨率的观测数据为探测小尺度的龙卷提供了一条有效途径,有关龙卷超级单体的研究近年来开展较多,取得了一系列的研究成果(Michael, et al, 2009; Joshua, et al, 2013),并有龙卷预测的技术成果(Christopher, et al, 2013)。龙卷是在一定的环境条件下产生的,龙卷超级单体风暴发生前的环境往往为中等到强的对流不稳定和中等到强的相对风暴螺旋度,0—6 km 风垂直切变通常超过 20 m/s,低层风切变矢量有较大的气旋式曲率(章国材,2011)。廖玉芳等(2003)针对 2002 年 5 月 14 日发生在湖南的强对流风暴个例做出分析,并根据出现的龙卷对 TVS 进行验证;宋子忠等(2006)研究认为,2005 年 7 月 30 日的龙卷超级单体垂直液态水含量密度超过 5 g/m^3 ,低层风向顺时针旋转,垂直切变大;刘娟等(2009)针对 2007 年 7 月 3 日发生在苏皖交界处的龙卷进行了分析,着重研究中气旋和 TVS 的典型特征;俞小鼎等(2008)针对 2005 年安徽北部龙卷的强降水超级单体风暴进行了详细分析,重点是环境条件和回波演变特征;郑媛媛等(2009)针对安徽 3 次超级单体龙卷的雷达回波特征做的研究认为,超级单体龙卷产生在中等大小的对流有效位能和强风垂直切变条件下,同时抬升凝结高度较低;方丽娟等(2009)针对 2008 年 5 月 23 日一次超级单体龙卷过程进行了研究,发现龙卷母云与低空急流密切相关,速度场上伴有强中气旋;金巍等(2009)分析 2005 年 8 月 10 日超级单体引发的龙卷时认为,超低空南支急流、低空西南急流和高空风垂直切变有利于龙卷产生,中气旋形成与发展明显;李向红等(2010)针对一次包括龙卷、冰雹和暴雨等强对流天气分析时发现,弓形回波和线形波动有“V”形缺口,龙卷和冰雹是由 γ 尺度的超级单体造成,且有三体散射回波。俞小鼎等(2012)认为,高架雷暴随着其发展出现阵风锋,触发新的雷暴发展而导致龙卷等强天气。

可以看出,上述有关超级单体龙卷的研究成果大多集中在龙卷个例的研究,极少数涉及到 3 次龙卷超级单体个例的探讨,鲜见有 3 次以上的龙卷超级单体的总结。2 次以上的龙卷超级单体的研究有:张一平等(2012)针对河南 2 次龙卷做过研究,对雷达探测资料参数和环境参数进行了统计;刁秀广等(2009)曾对 3 次超级单体风暴雷达产品进行过分

析,但是其超级单体都是冰雹灾害,不是龙卷灾害性天气。超级单体风暴特性与地域也有一定关系,本研究拟对江淮地区 6 个龙卷超级单体风暴进行分析,既探讨其风暴参数、中气旋参数和 TVS 参数的变化,也做了与江淮地区 90 个超级单体风暴的参数的比较,同时也探讨龙卷超级单体的环境场参数的特征,目的是提炼出龙卷超级单体风暴与本地区各种超级单体风暴的异同点,为灾害性龙卷的监测预警提供支撑。

2 资料与方法

选用江淮地区多普勒 SA 天气雷达(合肥、阜阳、徐州、南京)探测半径在 30—150 km 2003—2010 年的资料,以及相应的地面龙卷灾情资料,确定龙卷单体的发生时间、地点,并依据 Fujita 提出的风力和破坏程度判定龙卷等级,据此给出龙卷的破坏级别(表 1)。每次龙卷发生时都有中气旋的产生,且至少在雷达的两个体扫中连续出现,故它们都属于超级单体风暴。考虑到每次龙卷发生的地点不同,所用到的多普勒雷达站点也不同,表中也列出了雷达观测站。表中只是给出县名,没有列出龙卷发生的乡镇所在地,实际地点为该县的若干个乡镇。2003 年 7 月 8 日在安徽的两个县分别出现龙卷,由于两个龙卷的级别有差异,故按照龙卷的属性分别列出。2007 年 7 月 3 日、2010 年 7 月 17 日尽管在苏皖两省的两个县出现龙卷,由于是同一个龙卷经过了两地,故将其作为一个龙卷的属性列出。可以看出,龙卷出现在平原和江淮丘陵地区,龙卷灾害级别多属于 EF2—EF3 级。表中列出的江淮地区单体都发生在 7 月,实际上在 6 和 8 月也会出现龙卷,比如 2006 年 6 月 29 日出现的安徽泗县龙卷、2008 年 7 月 23 日出现的安徽颍上县龙卷、2008 年 6 月 20 日出现的安徽灵璧县龙卷,由于这些龙卷不属于超级单体龙卷,故不在本研究的考察对象中。表中每个龙卷发生时的雷达回波中都有中气旋,且至少 2 个体扫都出现了中气旋,故为超级单体龙卷个例。

环境参数的分析有两类,一类是基于 NCEP 再分析资料计算的,一类是雷达 VWP(VAD Wind Profile)产品推算的风垂直切变。2007 年之后 NCEP 再分析资料所用的为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,2007 年之前没有 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,只有 $1^\circ \times 1^\circ$ 资料,故 2003—2006 年用到的是 $1^\circ \times 1^\circ$ 资料。计算时选择最靠近龙卷发

生地和发生时间的格点资料。由 NCEP 再分析资料得到的大气环境参数包括对流有效位能(I_{CAPE})、K 指数(I_{K})、850 hPa 到地面的风垂直切变、850 hPa 与 500 hPa 的温差。 I_{CAPE} 属于能量参数, I_{K} 属于不稳定和水汽条件的综合参数,850 hPa 到地面的风垂直切变属于风切变参数,850 hPa 与 500 hPa 的温差属于上下层之间的不稳定参数。雷达的风廓

线产品 VWP 有垂直方向上的风速、风向分布,据此可以算出各层之间的水平风矢差,由风矢差得到风垂直切变;由风向的变化得到风向切变。经由雷达 VWP 产品得到的风垂直切变具有时间精度高的特点,其得到的风切变多不是龙卷超级单体内部风切变,而是环境背景下的风切变,属于大气环境参数。

表 1 超级单体龙卷的基本属性

Table 1 The basic property of the supercell tornado

发生日期	发生时间(北京时)	发生地点	雷达站	龙卷级别
2003 年 7 月 8 日	22 时 10 分	安徽庐江县	合肥	EF1
2003 年 7 月 8 日	23 时 20 分	安徽无为县	合肥	EF2—EF3
2005 年 7 月 30 日	11 时 26 分	安徽灵璧县	徐州	EF3
2007 年 7 月 3 日	16 时 47 分	安徽天长市、江苏高邮市	南京	EF3
2007 年 7 月 7 日	18 时 57 分	安徽肥东县	合肥	EF2
2010 年 7 月 17 日	19 时 30 分	安徽砀山县、江苏丰县	徐州	EF2—EF3

3 参数分析

根据多普勒雷达对龙卷的探测产品,龙卷超级单体的参数包括风暴参数和中气旋参数、风切变、TVS 参数、环境参数等。风暴参数有最大反射率因子(Z_{MX} ,单位: dBz)、基于单体的垂直累积液态水含量(I_{VIL} ,单位: kg/m^2)、最大反射率因子高度(H)、单体底高(H_{BASE})和单体顶高(H_{TOP})等;中气旋参数有中气旋底部(M_{BASE})、顶部(M_{TOP})、最大切变量(M_{SHR} ,单位: 10^{-3} s^{-1})及所在高度等;基于雷达的风切变有风速切变和风向切变;TVS 参数有径向速度差的平均值(V_{AD})、最低仰角径向速度差(V_{LLD})、最大径向速度差(V_{MXD})、三维环流特征的厚度(T_{DPT})、底部(T_{BASE})和顶部高度(T_{TOP})、三维环流特征中最大切变量(T_{MXSHR})及其高度;环境参数有 I_{CAPE} 、 I_{K} 、风切变、温差等。

3.1 风暴参数

图 1 为龙卷超级单体的风暴参数,图中横粗线为龙卷发生时间。由此可知,2003 年 7 月 8 日 21 时 47 分(北京时,下同)风暴厚度近 9 km,接下来 2 个时次风暴迅速变弱,22 时 03 分风暴明显增强, H 降低,22 时 09 分风暴再次减弱,22 时 15 分风暴 H_{TOP} 迅速抬高近 3 km,超过 11 km,且 H 在降低,此时在庐江县出现了第一个龙卷,22 时 49 分风暴有明显减弱趋势;到了 23 时 06 分风暴再次增强, H_{TOP} 再次迅速抬高 2.2 km,超过 10 km,但是 H 没有明显降低,直到 23 时 18 分风暴依然较强,但 H

下降很快,此时(约 23 时 20 分)在无为县出现了第二个龙卷,此后风暴逐渐有所减弱。2005 年 7 月 3 日 10 时 07 分风暴已经比较强,厚度超过 12 km,此后连续 4 个体扫的风暴依然较强,在 10 时 44 分有明显减弱的趋势,到 10 时 48 分再次增强,11 时 14 分厚度达到最强(15.4 km),后面两个时次的风暴再次减弱,伴随着风暴高度的变化, H 也在变化,多处在风暴的中下部;11 时 32 分风暴 H_{TOP} 猛然抬高 6.2 km,此时出现了龙卷,随后一个体扫的风暴迅速下降,在后面 6 个体扫的厚度大致在 10—11 km。2007 年 7 月 3 日 16 时 18 分风暴比较弱,下一个时次迅速抬高到 13 km 以上,厚度增加 12 km,此后 3 个体扫的风暴变化不大,16 时 42 分风暴有所减弱,下一个体扫再次增强, H_{TOP} 向上增高, H_{BASE} 向下延伸,厚度增加 3.7 km,且 H 有明显降低,龙卷就出现在此时;随后多个时次风暴减弱,厚度多不超过 6 km。2007 年 7 月 7 日 18 时 38—51 分风暴已经较强,到 18 时 57 分风暴迅速加强, H_{TOP} 猛然抬升 4.3 km,同时伴有 H 的升高,龙卷出现在此时;此后也有风暴的增强和减弱的现象,但没有出现龙卷;可以看到, H 一直较低,甚至在风暴底部。2010 年 7 月 17 日 19 时 01—24 分风暴厚度在 4—5 km,没有前面 5 次龙卷过程的风暴强烈;19 时 30 分风暴有所减弱,19 时 36 分风暴再次增强, H 也有明显增强的趋势,第一个龙卷就发生在此时;此后 4 个时次风暴一直较为强劲,20 时风暴略有抬升,但是 H 迅速增高(1.3 km),第 2 个龙卷出现在此时;此后风暴逐渐减弱。

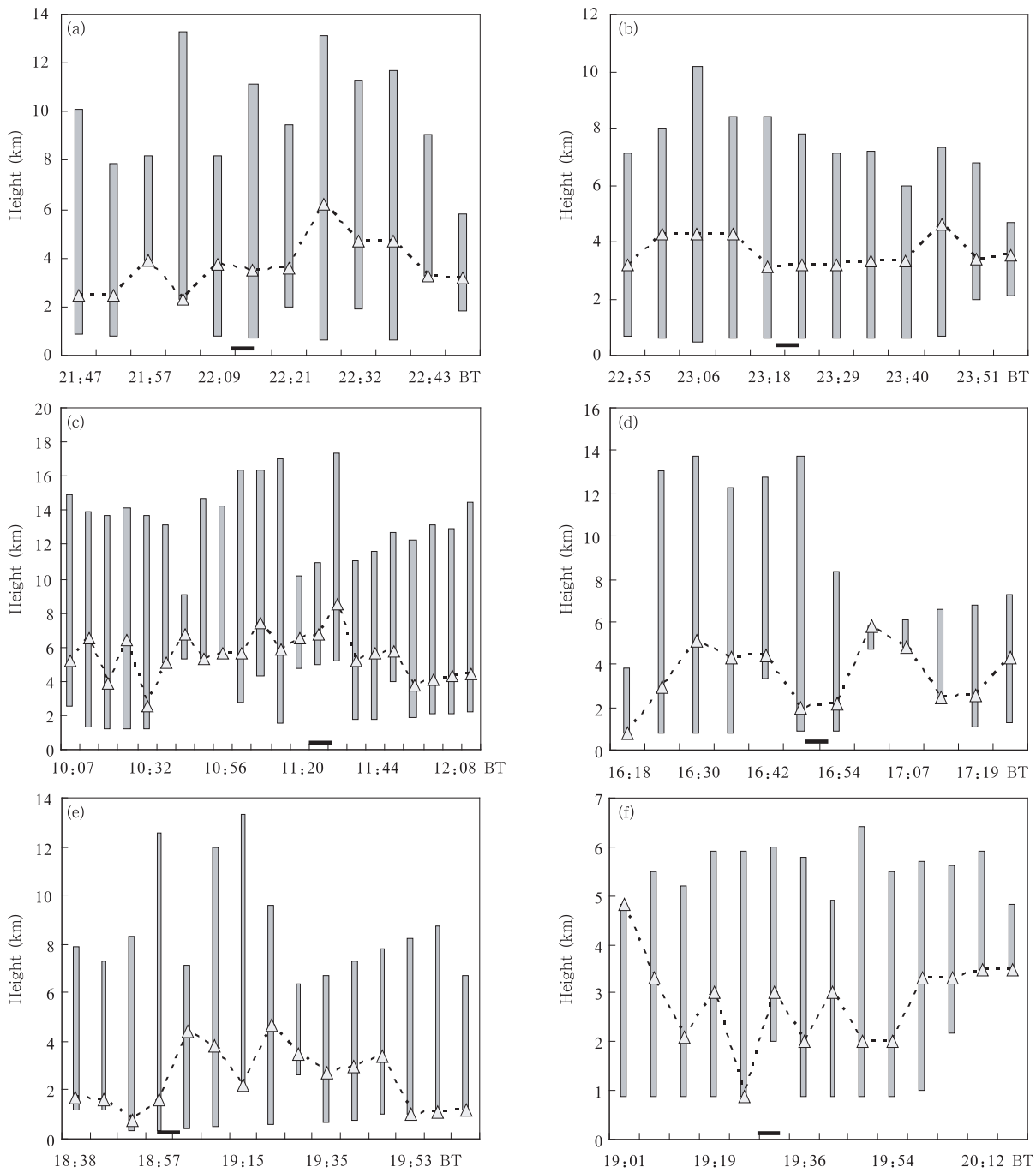


图 1 风暴高度(柱)及最大反射率因子高度(虚线)

(a. 2003 年 7 月 8 日 22 时 10 分, b. 2003 年 7 月 8 日 23 时 20 分,
c. 2005 年 7 月 30 日, d. 2007 年 7 月 3 日, e. 2007 年 7 月 7 日, f. 2010 年 7 月 17 日)

Fig. 1 Storm height (bar) and the height of maximum reflectance factor (dashed line)

(a. 22:10 BT 8 July 2003, b. 23:20 BT 8 July 2003, c. 30 July 2005, d. 3 July 2007, e. 7 July 2007, f. 17 July 2010)

针对龙卷过程的 H_{BASE} 、 H_{TOP} 以及 H 占风暴高度的比例,统计结果见表 2。由表可见,风暴 H_{BASE} 多在 2 km 以下,平均 1.7 km;风暴 H_{TOP} 多在 8 km 以上,只有 2010 年的低于 8 km,平均为 9.1 km; H

占风暴高度的比例最高的为 42.4%,最低的不到 20%,平均为 27.2%,说明 H 多在风暴的下部,近于下部的 1/4 处。与江淮地区 90 个超级单体(包括冰雹、雷雨大风、龙卷等天气)风暴的 H_{BASE} 平均值

4 km、 H_{TOP} 平均值 10 km 相比,龙卷超级单体风暴 的 H_{BASE} 要低得多, H_{TOP} 略低。

表 2 风暴参数属性
Table 2 The storm parameters property

龙卷时间	H_{BASE} (km)	H_{TOP} (km)	H 占风暴高度比例(%)	I_{VIL} (kg/m ²)	Z_{MX} (dBz)
2003 年 7 月 8 日 22 时 10 分	1.6	10.3	21.8	24.4	54.5
2003 年 7 月 8 日 23 时 20 分	0.9	7.3	42.4	22.2	54.8
2005 年 7 月 30 日	3.1	13.5	22.9	40.3	57.3
2007 年 7 月 3 日	1.9	9.2	24.6	19.3	52.2
2007 年 7 月 7 日	1.0	8.7	19.4	27.9	55.6
2010 年 7 月 17 日	1.5	5.7	31.9	17.4	54.1
平均	1.7	9.1	27.2	25.3	54.8

龙卷风暴的 I_{VIL} 和 Z_{MX} 曲线变化见图 2,图上依然将龙卷发生时间标注其上。由图可知,2003 年 7 月 8 日前 3 个时次 I_{VIL} 低于 20 kg/m²,22 时 09 分开始跃增,后两个时次继续增大,龙卷出现在 I_{VIL} 跃增的 22 时 10 分;在 22 时 49 分 I_{VIL} 下降到最低值,后 2 个时次再次迅速增大,并一直保持在 23 kg/m² 左右,第二个龙卷发生在 23 时 20 分前后; Z_{MX} 在 50—60 dBz,而且变化不大。2005 年 7 月 30 日前 5 个时次的 I_{VIL} 多在 40 kg/m² 左右,10 时 38—56 分处在较低的位置,11 时 02—14 分处在较高的状态,11 时 20 分再次跃增,于 11 时 26 分出现龙卷; Z_{MX} 多处 在 55—60 dBz,且变化不大。2007 年 7 月 3 日 16 时 18 分的 I_{VIL} 仅有 15 kg/m²,此后连续 3 个体扫都是在逐步增大,16 时 42 分迅速降低,下一个时次再次上升,龙卷就发生在这一时次;后续各个时次 I_{VIL} 一直较低,不足 15 kg/m²; Z_{MX} 多在 50—55 dBz。2007 年 7 月 7 日 18 时 38 分的 I_{VIL} 只有 21 kg/m²,此后连续 2 个时次的 I_{VIL} 跃增幅度较大,于 18 时 57 分发生龙卷天气,后续的多个时次 I_{VIL} 持续性地降低; Z_{MX} 多在 50—60 dBz。2008 年 7 月 23 日 13 时 01 分的 I_{VIL} 仅有 20 kg/m²,此后连续 3 个时次有所增大,龙卷就出现在 13 时 10 分,13 时 25 分风暴消失; Z_{MX} 也多在 50—55 dBz。2010 年 7 月 17 日的 I_{VIL} 明显较低,普遍不足 25 kg/m²,在 19 时 36 分开始增加前的 19 时 30 分出现一次龙卷,在 20 时的 I_{VIL} 跃增时再次出现龙卷; Z_{MX} 的变化一直较小,多在 50—55 dBz。

可以看出,龙卷超级单体 I_{VIL} 多在 10—40 kg/m²,平均值约为 25.6 kg/m²; Z_{MX} 多在 50—60 dBz 变化,平均值约为 54.8 dBz。与江淮地区 90 个超级单体的 I_{VIL} 平均值 40 kg/m²、 Z_{MX} 平均值 58

dBz 比较,龙卷超级单体的 I_{VIL} 要小得多,而龙卷超级单体的 Z_{MX} 仅比超级单体的略低。

3.2 中气旋参数

图 3 为龙卷超级单体的中气旋参数,柱体为中气旋高度,分别有 M_{BASE} 、 M_{TOP} ,虚线为 M_{SHR} ,横线为龙卷发生时间。可以看出,2003 年 7 月 8 日是中气旋连续次数最多的龙卷过程,中间有一次中断,其他有 19 个体扫;第一个龙卷发生在中气旋跃增, M_{SHR} 有所增加之时;22 时 15 分中气旋 M_{BASE} 降低 0.4 km, M_{TOP} 抬升 3.2 km, M_{SHR} 增大 $3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,龙卷出现在体扫的时间段内;在随后的 5 个体扫中有 2 个体扫的 M_{TOP} 跃增,但是 M_{BASE} 变化不大, M_{SHR} 不大,在 $10 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 左右变化;22 时 49 分中气旋消失,下一个时次中气旋再次出现,厚度较小, M_{SHR} 也较小,22 时 12 分的 M_{SHR} 有剧增的现象,此后 2 个时次中气旋厚度依然不大,在 23 时 29 分再次有 M_{SHR} 剧增的现象,龙卷发生在该时间之前;后续的中气旋逐渐有所萎缩,尽管在 23 时 46 分的 M_{SHR} 升高到 $36 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,但是中气旋较弱,没有龙卷相对应。2005 年 7 月 30 日 10 时 38 分开始出现较弱的中气旋, M_{SHR} 不大,此后 3 个时次中气旋有所增强, M_{SHR} 依然不大,11 时 02 分中气旋跃增,且 M_{SHR} 也增强到 $33 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,有龙卷潜势但没有出现龙卷;11 时 20 分中气旋明显减弱,下一个时次消失,11 时 32 分中气旋再次增强,厚度有 4.5 km,且 M_{SHR} 跃增至 $25 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,龙卷就发生在此时;随后几个时次中尽管中气旋厚度较厚,但是 M_{SHR} 不大,没有龙卷发生。2007 年 7 月 3 日 16 时 18 分开始出现中气旋,厚度较薄, M_{SHR} 不大,16 时 36 分有所增强,到 16 时 48 分中气旋依然较厚,而 M_{SHR} 跃增至 $38 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,龙卷就发生在此时;随后中气旋迅

速消失。2007 年 7 月 7 日 18 时 51 分有中气旋产生,厚度较薄,18 时 57 分中气旋有所增强,且 M_{SHR} 也增强至 $16\times 10^{-3} s^{-1}$,此次龙卷发生于这一时间。

2010 年 7 月 17 日 19 时 30 分开始有中气旋出现, M_{SHR} 不大,19 时 36 分中气旋 M_{BASE} 有所降低, M_{SHR} 有所增强,龙卷发生在这一时间。

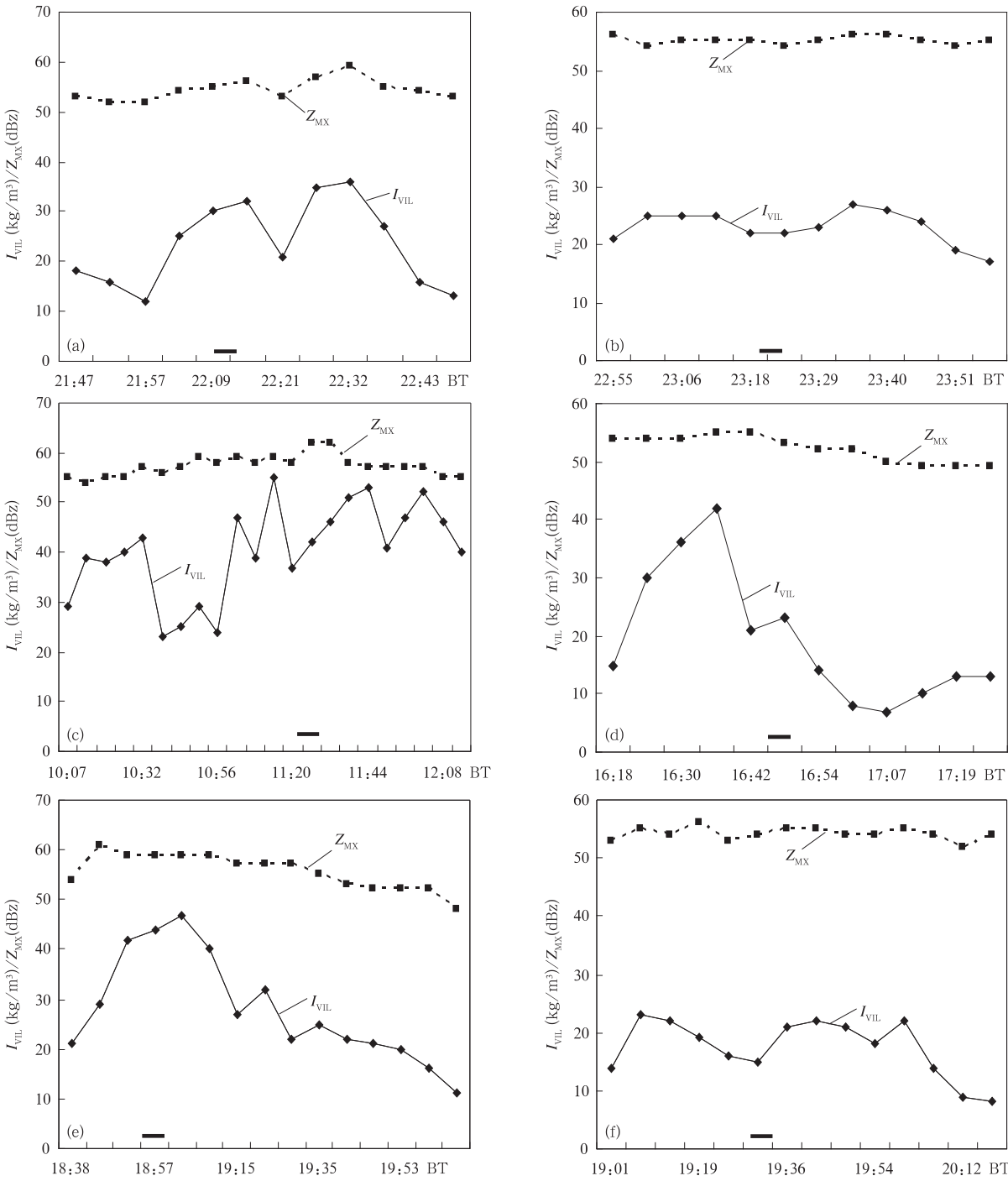


图2 风暴 I_{VIL} 和 Z_{MX}

(a. 2003 年 7 月 8 日 22 时 10 分, b. 2003 年 7 月 8 日 23 时 20 分,
c. 2005 年 7 月 30 日, d. 2007 年 7 月 3 日, e. 2007 年 7 月 7 日, f. 2010 年 7 月 17 日)

Fig. 2 I_{VIL} and Z_{MX} of the storms

(a. 22:10 BT 8 July 2003, b. 23:20 BT 8 July 2003, c. 30 July 2005, d. 3 July 2007, e. 7 July 2007, f. 17 July 2010)

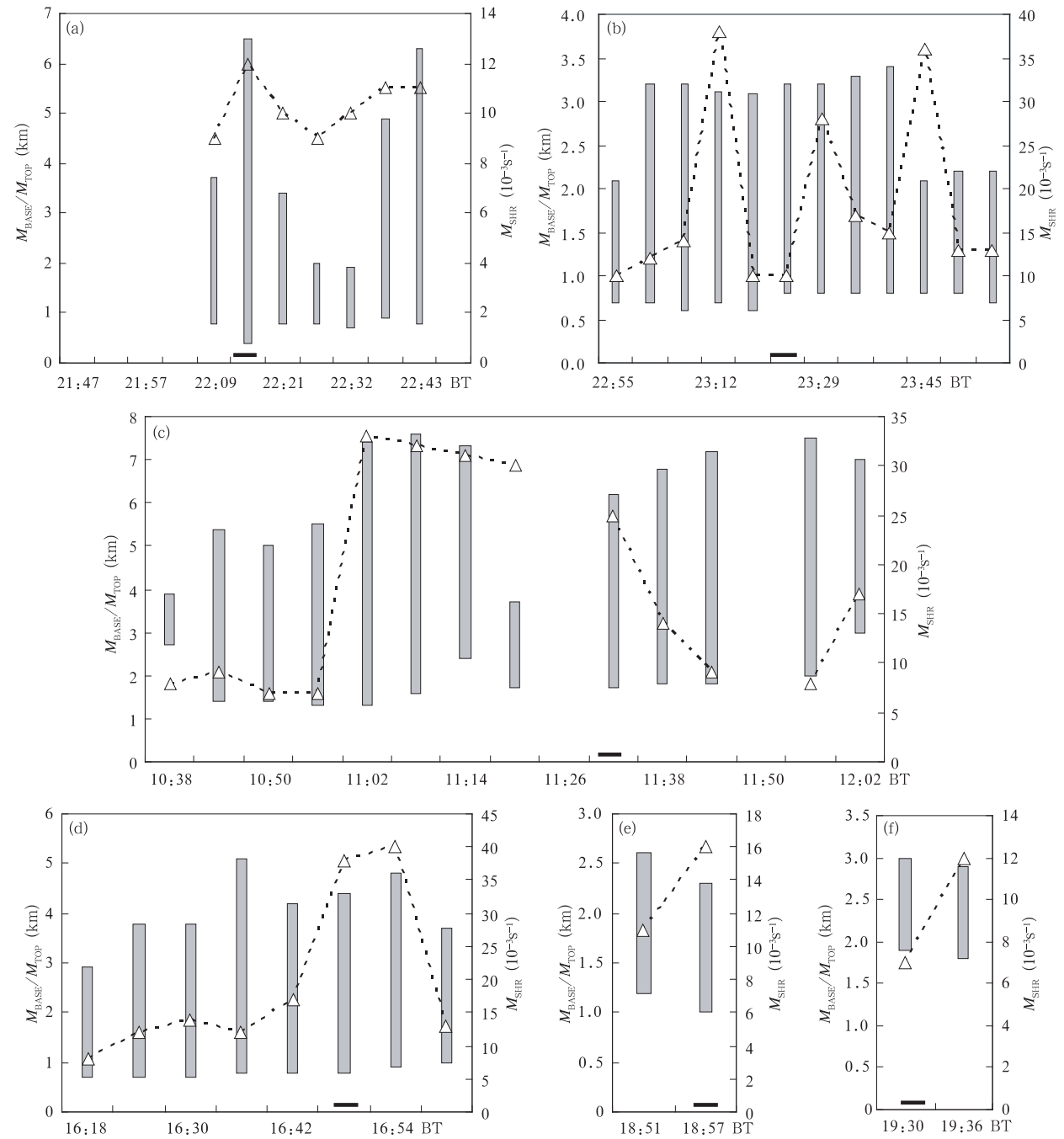


图3 中气旋参数

(a. 2003 年 7 月 8 日 22 时 10 分, b. 2003 年 7 月 8 日 23 时 20 分,
c. 2005 年 7 月 30 日, d. 2007 年 7 月 3 日, e. 2007 年 7 月 7 日, f. 2010 年 7 月 17 日)

Fig. 3 Mesocyclone parameters

(a. 22:10 BT 8 July 2003, b. 23:20 BT 8 July 2003, c. 30 July 2005, d. 3 July 2007, e. 7 July 2007, f. 17 July 2010)

表 3 列出中气旋的基本属性,包括连续中气旋个数、 M_{BASE} 、 M_{TOP} 和 M_{SHR} ,2003 年 7 月 8 日有 2 次龙卷发生,故不仅列出日期,还给出具体的时间。由此可知,连续 2 个中气旋都会有龙卷产生,最多的连

续个数是 12 个,平均有 5.7 个; M_{BASE} 多在 1 km 左右,平均有 1.2 km; M_{TOP} 最低的仅有 2.4 km,最高的超过 6 km,平均为 3.9 km; M_{SHR} 多在 $10 \times 10^{-3} s^{-1}$ 以上,最低的近于 $10 \times 10^{-3} s^{-1}$,最高的接近 20

$\times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 平均有 $14.4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。江淮地区 90 个超级单体的中气旋 M_{BASE} 、 M_{TOP} 和 M_{SHR} 平均值分别约为 2.6 km、5 km 和 $13 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 与其相比, 龙卷超级单体的 M_{BASE} 、 M_{TOP} 明显偏低, 而 M_{SHR} 略高。

表 3 中气旋属性
Table 3 The mesocyclone property

龙卷时间	连续中气旋个数	$M_{\text{BASE}}/(\text{km})$	$M_{\text{TOP}}/(\text{km})$	$M_{\text{SHR}}/(10^{-3} \text{ s}^{-1})$
2003 年 7 月 8 日 22 时 10 分	7	0.7	4.1	10.3
2003 年 7 月 8 日 23 时 20 分	12	0.7	2.9	18.0
2005 年 7 月 30 日	3	1.8	6.7	16.0
2007 年 7 月 3 日	8	0.8	4.1	19.2
2007 年 7 月 7 日	2	1.1	2.4	13.5
2010 年 7 月 17 日	2	1.8	3.0	9.5
平均	5.7	1.2	3.9	14.4

3.3 TVS 参数

为了考察每次龙卷 TVS 参数的统计特性, 给出 TVS 最强时的参数值, 同时将龙卷实际发生时间一并列于表 4, TVS 参数最强的要求是多数参数达到最大。2007 年 7 月 7 日尽管发生了龙卷且属于超级单体, 但是没有出现 TVS, 故表中只有 5 个超级单体的 TVS 参数。由此可知, 5 个单体的 TVS 参数最强时的 V_{AD} 在 12—45 m/s, V_{LLD} 大多大于 30 m/s, V_{MXD} 多超过 30 m/s, V_{MXD} 的高度不低于 0.8 km, T_{DPT} 在 2.4—6.4 km, T_{BASE} 在 0.7—1.5 km, T_{TOP} 在 2.3—6.4 km, T_{MXSHR} 超过 $22 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, T_{MXSHR} 的高度多低于 2 km。而且可以发现,

TVS 参数最强的时间与龙卷实际出现的时间基本吻合, 相差在 3—12 min, 平均相差 4.2 min。

表 5 给出 TVS 持续时间最长的一次龙卷参数值, 其中 23 时 18—29 分有 1 个时段没有 TVS。龙卷实际出现时间为 23 时 20 分, 由表可知, 在龙卷发生时间段的 V_{AD} 超过 20 m/s, V_{LLD} 大于 35 m/s, V_{MXD} 超过 40 m/s, 三维环流大于 3.5 km, T_{MXSHR} 超过 $33 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。由其他龙卷 TVS 参数的演变也得出大体有类似结果, 即龙卷发生时的径向速度差(平均值、最低仰角、最大)偏大, 三维环流特征深厚, 三维环流最大切变量偏大。

表 4 龙卷 TVS 最强参数与龙卷时间

Table 4 The list of the TVS maximum parameters of tornado and the tornado time of occurrence

TVS 时间	$V_{\text{AD}}(\text{m/s})$	$V_{\text{LLD}}(\text{m/s})$	$V_{\text{MXD}}/\text{高度}(\text{m/s})/(\text{km})$	$T_{\text{DPT}}(\text{km})$	$T_{\text{BASE}}/T_{\text{TOP}}(\text{km})$	$T_{\text{MXSHR}}/\text{高度}(10^{-3} \text{ s}^{-1})/(\text{km})$	龙卷发生时间
2003 年 7 月 8 日 22 时 15 分	14.5	34.5	34.5/0.8	5.6	0.8/6.4	25/6.4	22 时 10 分
2003 年 7 月 8 日 23 时 12 分	31.5	37.5	48/1.9	2.4	0.7/3.1	39/1.9	23 时 20 分
2005 年 7 月 30 日 11 时 20 分	16.5	46	46/1.5	6.4	1.5/7.9	29/1.5	11 时 26 分
2007 年 7 月 3 日 16 时 54 分	44.5	46.5	46.5/0.9	2.4	0.9/3.3	39/0.9	16 时 47 分
2010 年 7 月 17 日 19 时 42 分	12.5	25	25/0.9	3.3	0.9/2.3	22/0.9	19 时 30 分
平均	23.9	37.9	40.0/1.2	4.0	1.0/4.6	30.8/2.3	

表 5 2003 年 7 月 8 日龙卷 TVS 参数

Table 5 The list of the tornado TVS parameters on 8 July 2003

时间	$V_{\text{AD}}(\text{m/s})$	$V_{\text{LLD}}(\text{m/s})$	$V_{\text{MXD}}/\text{高度}(\text{m/s})/(\text{km})$	$T_{\text{DPT}}(\text{km})$	$T_{\text{BASE}}/T_{\text{TOP}}(\text{km})$	$T_{\text{MXSHR}}/\text{高度}(10^{-3} \text{ s}^{-1})/(\text{km})$
23 时 01 分	21.5	22	35/3.2	2.5	0.7/3.2	28/3.2
23 时 06 分	21	27	35/1.5	2.9	0.5/3.4	35/1.5
23 时 12 分	31.5	37.5	48/1.9	2.4	0.7/3.1	39/1.9
23 时 18 分	26.5	41.5	41.5/0.6	3.7	0.6/4.3	33/0.6
23 时 29 分	16.5	29.5	29.5/0.7	2.5	0.7/3.2	24/0.7
23 时 35 分	22	29.5	35.5/2	2.5	0.7/3.2	28/2.0
23 时 40 分	22	37.5	37.5/0.7	2.6	0.7/3.3	29/0.7

3.4 时间参数

中气旋和 TVS 是识别龙卷的有效参数,故表 6 给出中气旋、TVS 最早出现时间和龙卷时间,以及中气旋、TVS 提前龙卷的时间。由表可知,有 2 次出现中气旋而没有 TVS,说明即使没有 TVS,有了中气旋也可以有龙卷超级单体风暴的出现;中气旋提前龙卷出现的时间,少则 1 min,多则 48 min,平

均而言,中气旋出现后 18 min 有龙卷发生,故中气旋的产生对于龙卷的预警具有一定的指示意义;TVS 出现时间和龙卷出现时间相比,多数是 TVS 在前龙卷在后,有 2 次是龙卷在前 TVS 在后,平均而言,TVS 出现后 6 min 有龙卷发生,即多数情况下,TVS 的出现伴随有龙卷超级单体风暴。

表 6 中气旋、TVS 的时间属性
Table 6 The time property of the mesocyclone and TVS

单体日期	中气旋时间	TVS 时间	龙卷时间	中气旋提前龙卷时间(min)	TVS 提前龙卷时间(min)
2003 年 7 月 8 日	22 时 09 分	22 时 15 分	22 时 10 分	1	- 5
2003 年 7 月 8 日	22 时 55 分	23 时 06 分	23 时 20 分	25	14
2005 年 7 月 30 日	10 时 38 分	10 时 56 分	11 时 26 分	48	30
2005 年 7 月 30 日	11 时 20 分		11 时 26 分	6	
2007 年 7 月 3 日	16 时 18 分	16 时 42 分	16 时 47 分	29	5
2007 年 7 月 7 日	18 时 51 分		18 时 57 分	6	
2010 年 7 月 17 日	19 时 19 分	19 时 42 分	19 时 30 分	11	- 12

3.5 环境参数

3.5.1 基于雷达的风切变

利用雷达 VWP 产品所得到的 0—1 km 和 0—6 km 的环境风垂直切变值见表 7,2005 年 7 月 30 日龙卷出现时间为 11 时 26 分,11 时 20 分有中气旋,但没有 TVS,故同时列出 TVS 时间,在计算风切变平均值时只算一次。由表可见,0—1 km 的风切变最小有 6 m/s,最大有 12 m/s,平均超过 8 m/s;0—6 km 的风切变最小有 8 m/s,最大有 24 m/s,平均超过 16 m/s。无论是低层 0—1 km 还是 0—6 km 的风垂直切变都比较大。从低层 0—1 km 的风向切变来看,只有 2007 年 7 月 7 日的龙卷是逆时针旋转,其他都是顺时针旋转,说明低层多顺时针方向的风切变,伴随有暖平流的出现。江淮地区 90 个超级单体风暴的 0—6 km 风垂直切变约为 14.5 m/s,和其相比,龙卷超级单体的 0—6 km 风垂直切变高出 15.2%。

表 7 基于雷达的风切变(m/s)
Table 7 The wind shear (m/s) based on the radar

单体日期	0—1 km 风切变	0—6 km 风切变
2003 年 7 月 8 日	8	20
2003 年 7 月 8 日	10	24
2005 年 7 月 30 日	12	20
2007 年 7 月 3 日	7	16
2007 年 7 月 7 日	8	12
2010 年 7 月 17 日	6	8
平均	8.5	16.7

3.5.2 基于 NCEP 的参数

表 8 列出龙卷发生地点和时间最近的 NCEP 再分析资料格点计算得到的环境参数。表 7 中有 6 个龙卷超级单体,但是 2003 年两次龙卷出现时间较近,只能用一次的 NCEP 资料来计算,故有 5 次龙卷过程的环境参数。由表可见,5 个过程的 I_{CAPE} 最小为 600 J/kg,最大为 2850 J/kg,平均为 1752 J/kg;根据姚学祥(2011)的研究结果表明强对流天

表 8 龙卷发生最近时间的环境参数
Table 8 The environmental parameters at the times nearest to tornado occurrence

龙卷时间	NCEP 时间	I_{CAPE} (J/kg)	$I_K(^{\circ}C)$	850 hPa 到地面风切变(m/s)	$T_{850}-T_{500}(^{\circ}C)$
2003 年 7 月 8 日 22 时	2003 年 7 月 8 日 20 时	2110	35	16	24.5
2005 年 7 月 30 日 11 时	2005 年 7 月 30 日 14 时	2850	37	7	24.4
2007 年 7 月 3 日 16 时	2007 年 7 月 3 日 14 时	1500	40	16	23.0
2007 年 7 月 7 日 18 时	2007 年 7 月 7 日 20 时	1700	41	12.8	24.7
2010 年 7 月 17 日 20 时	2010 年 7 月 17 日 20 时	600	37	9	22
平均		1752	38	12.2	23.7

气的 I_{CAPE} 值一般要求大于 400 J/kg , 即使最小的 I_{CAPE} 值也远大于强对流天气所要求的数值; I_K 至少 35°C , 最大 41°C , 符合强对流天气的基本要求; 850 hPa 到地面风切变最小的为 7 m/s , 最大的为 16 m/s , 平均超过 12 m/s ; $850\text{—}500 \text{ hPa}$ 温差最小的有 22°C , 平均值为 23.7°C 。能量处在中等到较大的状态, 大气不稳定性较强, 风垂直切变大, 易导致强天气的发生。

4 结 语

通过对龙卷超级单体风暴的分析, 得到以下主要结论:

(1) 龙卷超级单体风暴 H_{BASE} 多在 2 km 以下, 平均 1.7 km ; H_{TOP} 多在 8 km 以上, 平均 9.1 km ; H 占风暴高度的比例平均为 27.2% , 说明 H 多在风暴的下部, 近于下部的 $1/4$ 处。龙卷超级单体风暴的 H_{BASE} 比江淮地区各种超级单体低得多, 而 H_{TOP} 则略低。

(2) 龙卷超级单体 I_{VIL} 多在 $10\text{—}40 \text{ kg/m}^2$, 平均 25.6 kg/m^2 ; Z_{MX} 多在 $50\text{—}60 \text{ dBz}$, 平均 54.8 dBz 。和江淮地区各种超级单体比较, 龙卷超级单体的 I_{VIL} 要小得多, 而龙卷超级单体的 Z_{MX} 仅比超级单体的略低。

(3) 龙卷超级单体的中气旋 M_{BASE} 、 M_{TOP} 和 M_{SHR} 平均值分别为 1.2 km 、 3.9 km 和 $14.4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 和江淮地区各种超级单体比较, 龙卷超级单体的 M_{BASE} 、 M_{TOP} 明显偏低, 而 M_{SHR} 略高。

(4) TVS 参数最强时的 V_{AD} 在 $12\text{—}45 \text{ m/s}$, V_{LLD} 大多大于 30 m/s , V_{MXD} 多超过 30 m/s , V_{MXD} 的高度不低于 0.8 km , T_{DPT} 在 $2.4\text{—}6.4 \text{ km}$, T_{BASE} 在 $0.7\text{—}1.5 \text{ km}$, T_{TOP} 在 $2.3\text{—}6.4 \text{ km}$, T_{MXSHR} 超过 $22 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, T_{MXSHR} 的高度多低于 2 km 。TVS 参数最强的时间与龙卷实际出现的时间基本吻合, 相差在 $3\text{—}12 \text{ min}$, 平均相差 4.2 min 。平均而言 TVS 出现后 6 min 有龙卷发生。

(5) 雷达 VWP 产品推算的龙卷超级单体的 $0\text{—}6 \text{ km}$ 风垂直切变比江淮地区超级单体的平均值高出 15.2% ; 龙卷发生前 I_{CAPE} 平均为 1752 J/kg , I_K 为 38°C , 850 hPa 到地面风切变平均超过 12 m/s , $850\text{—}500 \text{ hPa}$ 温差平均为 23.7°C 。可见对流有效能量为中等到强的状态, 大气不稳定性较强, 风垂直切变大, 易导致强天气的发生。

本研究针对江淮地区龙卷超级单体风暴进行了统计, 得到了一些有益的结果。但是还有非超级单体而形成的龙卷, 对这些个例没有做出分析; 同时也没有研究风暴的低层风场环流结构, 风暴顶部的辐散情况, 没有与江淮地区强风暴相应的参数做对比, 因此有不少问题有待继续探讨和深入研究。只有不断地探究超级单体和强风暴结构的时空演变特征, 才能更好地掌握龙卷超级单体风暴的形成机理及其规律, 为未来龙卷的预报预警提供有益的支撑。

参考文献

- 陈明轩, 王迎春, 肖现等. 2012. 基于雷达资料四维变分同化和三维云模式对一次超级单体风暴发展维持热动力机制的模拟分析. 大气科学, 36(5): 929-944
- 刁秀广, 朱君鉴, 刘志红. 2009. 三次超级单体风暴雷达产品特征及气流结构差异性分析. 气象学报, 67(1): 133-146
- 方丽娟, 姬菊枝, 陶国辉等. 2009. 一次超级单体风暴中龙卷的天气过程分析及龙卷强度判定. 自然灾害学报, 18(2): 167-172
- 金巍, 曲岩, 安来友. 2009. 超级单体引发的龙卷天气过程分析. 气象, 35(3): 36-41
- 李向红, 唐熠, 郑传新等. 2010. 一次多种强对流天气过程的雷达回波特征分析. 气象, 36(8): 61-71
- 廖玉芳, 俞小鼎, 郭庆. 2003. 一次强对流系列风暴个例的多普勒天气雷达资料分析. 应用气象学报, 14(6): 656-662
- 刘娟, 朱君鉴, 魏德斌等. 2009. 070703 天长超级单体龙卷的多普勒雷达典型特征. 气象, 35(10): 32-39
- 宋子忠, 刘娟, 张健等. 2006. 灵璧强龙卷个例的多普勒天气雷达分析. 气象科学, 26(6): 689-695
- 姚学祥. 2011. 天气预报技术与方法. 北京: 气象出版社, 134-145
- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南等. 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京: 气象出版社, 116-120
- 俞小鼎, 郑媛媛, 廖玉芳等. 2008. 一次伴有强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究. 大气科学, 32(3): 508-522
- 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 2012. 雷暴与强对流的临近天气预报技术进展. 气象学报, 70(3): 311-337
- 章国材. 2011. 强对流天气分析与预报. 北京: 气象出版社, 58-64
- 张一平, 俞小鼎, 吴葵等. 2012. 区域暴雨过程中两次龙卷风事件分析. 气象学报, 70(5): 961-973
- 赵坤, 周仲岛, 潘玉洁等. 2008. 台湾海峡中气旋结构特征的单多普勒雷达分析. 气象学报, 66(4): 637-651
- 郑媛媛, 俞小鼎, 方翀等. 2004. 2003 年 7 月 8 日安徽系列龙卷的新一代天气雷达分析. 气象, 30(1): 38-40, 45
- 郑媛媛, 朱红芳, 方翀等. 2009. 强龙卷超级单体风暴特征分析与预警研究. 高原气象, 28(3): 617-625
- Browning K A. 1962. Cellular structures of convective storms. Meteor Mag, 91: 341-350
- Browning K A. 1978. The structure and mechanisms of hailstorms. Meteor Monogr, 38: 1-36

- Christopher J N, Anders A J. 2013. Classifying proximity soundings with self-organizing maps toward improving supercell and tornado. *Wea Forecasting*, 28:783-801
- Donaldson R J Jr. 1970. Vortex signature recognition by a Doppler radar. *J Appl Meteor Mag*, 9: 661-670
- Doswell C A III. 2001. Severe convective storms. *Meteor Monogr*, (69): 1-26
- Jerald A B, Steven E N, Richad L T, et al. 2013. Tornado probability of detection and lead time as a function of convective mode and environmental parameters. *Wea Forecasting*, 28: 1261-1276
- Joshua M B, Barbara E M, William G, et al. 2013. Discriminating environmental conditions for significant warm sector and boundary tornadoes in parts of the Great Plains. *Wea Forecasting*, 28: 1498-1523
- Marwitz J D. 1972a. The structure and motion of severe hailstorms. Part I: Supercell storms. *J Appl Meteor*, 11(1): 166-179
- Marwitz J D. 1972b. The structure and motion of severe hailstorms. Part II: Multi-cell storms. *J Appl Meteor*, 11(1): 180-188
- Marwitz J D. 1972c. The structure and motion of severe hailstorms. Part III: Severely sheared storms. *J Appl Meteor*, 11(1): 189-201
- Michael M F, Howard B B, Louis J W, et al. 2009. An example of the use of mobile Doppler radar data for tronado verification. *Wea Forecasting*, 24:884-891
- Moller A R, Doswell C A III, Foster M P, et al. 1994. The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures. *Wea Forecasting*, 9: 327-347
- Ray P S. 1975. Dual-Doppler observation of a tornadic storm. *J Appl Meteor*, 14(8): 1521-1530
- Wilson J W. 1986. Tornadogenesis by nonprecipitation induced wind shear lines. *Mon Wea Rev*, 114: 270-284