朱江山，刘娟，边智，等. 2015. 一次龙卷生成中风暴单体合并和涡旋特征的雷达观测研究. 气象，41(2)：182-191.

一次龙卷生成中风暴单体合并和涡旋特征的雷达观测研究*

朱江山[1] 刘 娟[2] 边 智[3] 符长静[4]

1 中国科学院大气物理研究所，北京 100029
2 安徽省阜阳市气象局，阜阳 236001
3 山东省泰安市气象局，泰安 271000
4 山东省烟台市气象局，烟台 264001

提 要：本文利用阜阳市多普勒天气雷达 CINRAD/SA 资料，分析了 2008 年 7 月 23 日发生在安徽省颍上县的龙卷天气过程。结果表明：本次过程中，风暴单体的连续合并对风暴单体迅速增强为超级单体风暴有重要作用。风暴单体的合并和邻近风暴单体之间的相互作用与龙卷的发生在时间和位置上有较明显的相关，说明风暴单体间的合并和相互作用可能对龙卷存在激发作用，这对龙卷预警具有一定的参考价值。在缺省适配参数条件下，雷达系统 CINRAD/SA 的中气旋(M)产品和龙卷涡旋特征(TVS)产品对龙卷预警有较好的指示作用。如果风暴被同时识别出 M 和 TVS 产品，并观测到风暴单体中存在有界弱回波区，则出现龙卷的几率更高。

关键词：风暴单体跟踪，风暴单体合并，龙卷，中气旋产品，龙卷涡旋特征产品

中图分类号：P412，P445 **文献标志码**：A **doi**：10.7519/j.issn.1000-0526.2015.02.006

Analysis of Cell Merger and Vortex Signature During Generation of Tornado in Anhui Based on Doppler Radar Observation

ZHU Jiangshan[1] LIU Juan[2] BIAN Zhi[3] FU Changjing[4]

1 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
2 Fuyang Meteorological Office of Anhui, Fuyang 236001
3 Tai'an Meteorological Office of Shandong, Tai'an 271000
4 Yantai Meteorological Office of Shandong, Yantai 264001

Abstract: Based on the Fuyang Doppler weather radar data, the tornado that occurred in Yingshang County, Anhui Province on 23 July 2008 is analyzed in detail. It is shown that the storm is intensified rapidly after the continuous merging of storm cells, and becomes a supercell. The merger and interaction between the storm cells may be instructive for tornado warning for they are highly correlated to the time and location of the tornado. The mesocyclone and tornado vortex signature products with default parameters setting in CINRAD/SA radar system are indicative to tornado warning. When the two kinds of products are detected for the same storm simultaneously along with the observed bounded weak echo areas, the probability of tornado becomes even higher.

Key words: storm cell tracking, storm cell merger, tornado, mesocyclone (M), tornado vortex signature (TVS)

* 国家自然科学基金面上项目(41275044)和国家自然科学基金青年科学基金项目(41305099)共同资助
2014 年 6 月 17 日收稿； 2014 年 10 月 30 日收修定稿
第一作者：朱江山，主要从事雷达数据分析和数值预报研究. Email：zhujiangshan@mail.iap.ac.cn

引　言

龙卷是积雨云向下伸出的旋转空气柱,通常伴有可见的漏斗状云或上升的尘埃和/或杂物碎片,气柱最大风速直径通常小于 2 km,气柱两侧近地面(距地面高度 200 m 以内)最大风速差超过 40 m·s^{-1}(Wurman et al, 2013)。龙卷的破坏性极强,经过之处会造成重大人员伤亡和经济损失。龙卷尺度小,突发性强,对其预测预警非常困难。为了更有效地对龙卷等灾害性天气进行监测和预警,我国 1999 年开始在全国范围布点建设多普勒天气雷达。该雷达能提供中气旋产品(mesocyclone product,以下简称 M 产品)和龙卷涡旋特征产品(tornado vortex signature product,以下简称 TVS 产品)。

随着多普勒天气雷达布网建设和业务化应用,观测积累了一些龙卷天气过程的雷达资料,对龙卷的研究也随之展开。俞小鼎(2006)利用多普勒天气雷达资料对安徽无为县一次强烈龙卷过程进行了分析,指出伴随暴雨的龙卷是由团状对流系统南端的一个低质心超级单体产生,并对此次龙卷的生成机制进行了探讨。何彩芬等(2006)分析了宁波市一次台风前部龙卷发生发展的环境特征和雷达回波特征,指出下湿中干、强的垂直风切变及地形条件等有利于局地弱龙卷的产生,并用反射率、剖面产品综合分析了该风暴的三维结构。姚叶青等(2007)对两次强龙卷过程进行了分析,认为两次龙卷虽然回波形态、强度和高度各异,但都存在强的中气旋,雷达超前于龙卷发生约 30 min 识别出中气旋。俞小鼎等(2008)对发生在安徽北部的伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴的环境条件进行了分析,认为中等大小的对流有效位能(CAPE),较大的深层垂直风切变,边界层内大的低层垂直风切变,低抬升凝结高度,均有利于超级单体和强龙卷的产生。郑媛媛等(2009)研究了 3 次超级单体强龙卷风暴多普勒雷达回波特征及其与强冰雹超级单体的差异,并对龙卷天气的时空分布、变化趋势以及产生龙卷的环流形势进行了分析。刘娟等(2009)分析了 2007 年 7 月 3 日安徽天长龙卷的多普勒天气雷达产品后,认为如果连续多时次观测到中气旋,同时伴有 TVS 产品,则实况出现龙卷的可能性大。根据美国强风暴实验室(NSSL)龙卷预警指导试验(Tornado Warning Guidance: 2002, http://www.wdtb.noaa.gov/modules/twg02/TWG2002.pdf,后简称 TWG2002)中对 M 和 TVS 产品算法实施的统计,雷达系统算法识别出 TVS 产品的个例中,实况有 30%出现龙卷,如果同时识别出 M 产品,则实况出现龙卷的比例上升至 34%,如果同时还观测到风暴中存在明显的有界弱回波区,则龙卷出现的概率会上升至 39%。朱君鉴等(2009)在 2006 年 6 月 29 日泗县龙卷多普勒雷达产品分析一文中认为灾害性大风的路径与一系列中气旋最大风速圈的南边缘移过的路径(自西向东)一致,TVS 产品和龙卷实际出现的位置也在中气旋的南边缘。刁秀广等(2014)分析了 6 个龙卷风暴中有 5 个是发生在风暴发展阶段(特别是风暴顶迅速上升阶段),认为上升气流将低层辐合线上的小涡旋迅速拉伸,使得旋转运动进一步发展,诱发小尺度范围的强切变,从而导致龙卷发生。李改琴等(2014)和王毅等(2012)对龙卷的天气特征及强对流天气的环境条件作了分析研究。

虽然多普勒天气雷达的 TVS 和 M 产品可以为龙卷监测预警提供有用的参考信息(刘娟等,2009;朱君鉴等,2009;TWG2002),但在实际业务中,要提前 10～20 min 发出比较准确龙卷预警还存在着很大困难。本文利用新一代天气雷达产品,分析了 2008 年 7 月 23 日发生在安徽省颍上县的龙卷天气过程,并探讨了多普勒天气雷达 M 和 TVS 产品在龙卷预警中的潜在应用价值。

1　天气背景和灾情

2008 年 7 月 23 日上午 8 时 500 hPa 天气图上(图略),我国东南部地区为西太平洋副热带高压控制,副热带高压西北方河南大部、山西、陕西南部为一低涡控制,安徽北部处于低涡前部,通过低涡有一条西南—东北向切变线。地面有一冷锋自西向东移动。由 23 日上午 08:00 阜阳站(58203)探空资料(图 1)计算,*CAPE* 为 828 J·kg^{-1},抬升凝结高度很低,为 996 hPa,850 hPa 风速 18 m·s^{-1},700 hPa 风速 15 m·s^{-1},低层风切变很大,地面到 2 km 气层的风切变为 14.2 m·s^{-1},地面到 6 km 气层的风切变为 13.3 m·s^{-1}。雷达给出的垂直风廓线产品(VWP)显示上午 10:29 开始 3 km 高度上的西南风增大到 20 m·s^{-1},之后 20 m·s^{-1}的大风向上向下发展,11:07 向下发展到 1.8 km 高度,11:26 向上发展的 11.9 km(图略)。西南大风一直维持到下午

13:32 才开始减弱。一些研究结果表明(何彩芬等,2006;姚叶青等,2007;俞小鼎,2006;俞小鼎等,2008)强的低层垂直风切变和低抬升凝结高度有利于 F2 级以上的强龙卷形成。

阜阳雷达回波(图略),10:00 之前,雷达站以西为大片混合型降水回波所覆盖;10:00 以后,雷达站以北仍为混合型降水回波,南部逐渐有对流回波发展,呈南北向排列。这条回波带在东移过程中北段不断增强,逐渐演变为北强南弱的回波带。13:00 前后,将要进入颍上县的 2 个强回波单体发生合并,导致 13:10 在颍上县润河镇富坝村和洪庄湖村出现 F2 级龙卷(以下称富坝龙卷)。之后,回波单体短时间减弱,在 13:32 到达颍上县慎城镇时,与另一单体接近,两个单体间相互作用,导致慎城镇颍滨村、保丰村、朱庙村发生 F1 级龙卷(以下称朱庙龙卷)。之后风暴在东移过程中,在安徽江淮之间东部地区多处产生雷雨大风天气。

灾情报告,13:13 前后,润河镇富坝村、洪庄湖村境内受灾严重,风灾导致 6 人受伤,直接经济损失达 800 万元。13:32 前后,慎城镇境内也遭受了龙卷风袭击,该镇颍滨、保丰、朱庙三村受灾较严重。

2 龙卷风暴单体的追踪分析

图 2 是 2008 年 7 月 23 日 10:22—13:32 阜阳雷达 0.5°仰角反射率因子产品,图 3 是阜阳雷达风暴单体跟踪(Storm Tracking Information,STI)产品合成图,图上叠加了各时次的 M 和 TVS 产品,M 和 TVS 产品的适配参数为雷达系统的缺省适配参数。发生在安徽阜阳颍上县富坝村和朱庙村的龙卷,用反射率因子产品结合 STI 产品追踪分析,风暴单体 A0 最初于 10:22 在光山县境内生成(图 2)。在初生阶段,有许多新生的风暴单体,呈南北方向排列。经过不断的单体合并,1 小时后 A0 发展成强风暴单体,11:33 雷达系统对风暴单体识别出 M 产品。A0 发展成强风暴单体后,移动方向开始偏向承载层风向右侧,而在其移动路径南侧新生成的风暴单体大多沿着承载层风向(东北方向)移动。单体 A0 与这些单体的运动方向有一个明显的夹角,有机会与这些单体相遇。A0 在向东偏北方向移动的过程中,13:01—13:07 风暴移动到颍上县西部,与另一风暴单体合并,雷达识别出 1 次中气旋产品和 2 次 TVS 产品,润河镇富坝村、洪庄湖村发生 F2 级龙卷;13:32 风暴单体到达颍上县慎城镇,与另一风暴单体距离非常接近,风暴单体再度显示典型的超级单体特征,雷达识别出 TVS 产品,慎城镇颍滨村、保丰村、朱庙村发生了 F1 级龙卷。

3 风暴单体的合并

风暴单体合并的物理机制和过程非常复杂,本文借助于多普勒天气雷达的 STI 产品分析两类风暴单体的合并。一类是在风暴的初生阶段,弱回波单体并入相对强的单体,导致单体群中弱单体逐渐消散,个别单体发展成强风暴。另一类为强风暴单体或超级单体之间的合并,导致龙卷等强天气的发生。

3.1 风暴初生阶段的单体合并

在风暴初生阶段,由于风暴生成时间的早晚差别,风暴单体处于不同的发展阶段,风暴的尺度、发展高度不同,移动方向和移动速度会有差异,这会导致单体相遇、合并。2008 年 7 月 23 日发生在安徽阜阳颍上县富坝村和朱庙村的龙卷,风暴单体 A0(图 3)最初 10:22 在光山县境内生成。在风暴初生阶段,查看 STI 产品及其匹配数据产品,10:55 风暴单体 A0 的附近,先后有 16 个风暴单体生成,分布在其南北方向上;25 min 后(11:20)A0 附近的单体明显减少,只剩下 3～4 个单体,A0 发展成较强的单体,单体最大反射率因子增强到 55 dBz,回波顶高发展到 9 km。Lee 等(2006a)在跟踪研究 1996 年 4 月 19 日美国伊利诺斯州大规模龙卷爆发过程中 109 个风暴单体的发展演变过程,发现在干线附近生成的大量风暴单体,在生成之后很短时间内(平均时间 17 min 左右),由于单体的合并,杂乱的单体群很快就演变成少数孤立的超级单体。分析这一时段风暴单体的合并减少过程有类似之处。

图 4 是阜阳雷达 10:49—11:07 反射率因子产品,图中单体的跟踪参考了雷达系统的风暴跟踪产品(STI 产品)。为了清楚地显示单体的强中心,滤除了 10 dBz 以下的弱回波,并采用 2.4°仰角反射率因子。单体 A 生成较早,强度比单体 B、C 稍强。单体 B、C 生成晚,随承载层风的方向向东北方向移动,单体 B 的移动速度比单体 A 快,单体 C 的移动速度比单体 B 快。风暴单体 A 发展到强风暴阶段自身有偏向平均风右侧移动的特性,加之风暴B移

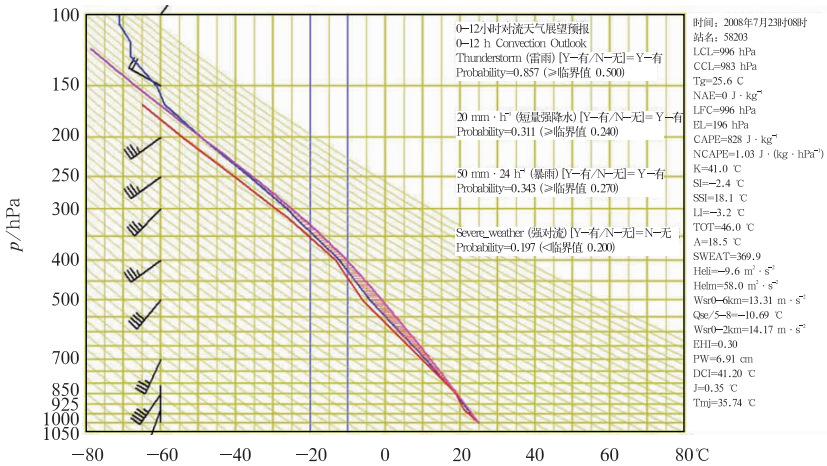


图 1　2008 年 7 月 23 日上午 08 时阜阳(58203)探空曲线图

Fig. 1　T-log$p$ plot at 08:00 BT 23 July 2008 at Fuyang Station (58203)

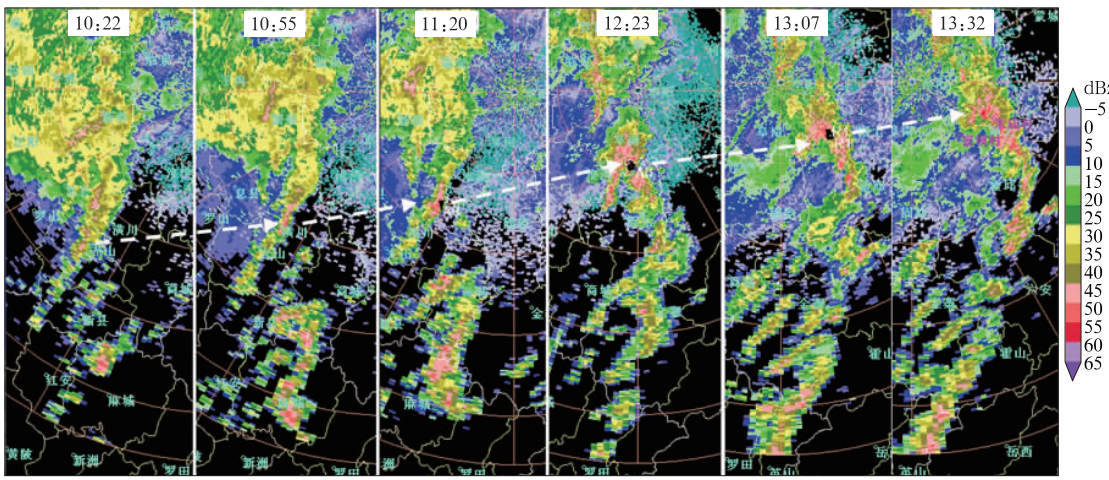


图 2　2008 年 7 月 23 日 10:22—13:32 阜阳雷达 0.5°仰角反射率因子产品

Fig. 2　Reflectivity output at 0.5° elevation of Fuyang Radar during 10:22−13:32 BT 23 July 2008

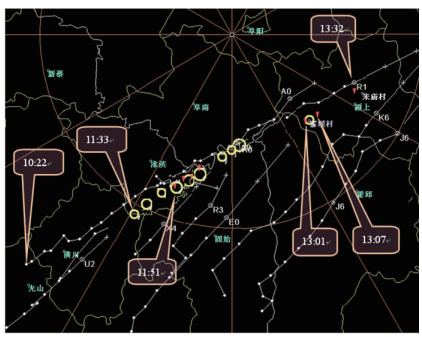


图 3　阜阳雷达 STI 产品合成图

[图上叠加了各时次的 M 产品(黄色圆圈)和 TVS 产品(红色倒三角),M、TVS 产品的适配参数为缺省参数]

Fig. 3　Integrated diagram of STI outputs of Fuyang Radar (M and TVS are overlaid)

动速度比 A 快,10:55 A 与 B 合并。风暴 C 于 11:07 赶上 A,两者再次发生合并。合并不断发生,风暴单体很快发展成为强风暴(Orville et al,1980;Turpeinen,1982)。

3.2　强风暴单体合并

认定两个风暴单体的合并是个复杂的问题,为使问题简化,Lee 等(2006b)将 0.5°仰角反射率因子区域中原本分开的最强反射率因子合并成一整体的过程定义为单体的合并。本文主要依据雷达的 STI 产品,并结合这样的方法分析这次过程中的强风暴单体合并。

图 5 是单体之间的合并过程,发生在 13:01—13:13,图 5a～5c 分别是 13:01、13:07、13:13 三个时次 0.5°仰角反射率因子产品,图 5d～5f 是对应三个时次 0.5°仰角平均径向速度产品。12:35 单体 A 南侧有单体 B 逐渐移近(图略);图 5a 中 13:01 风暴

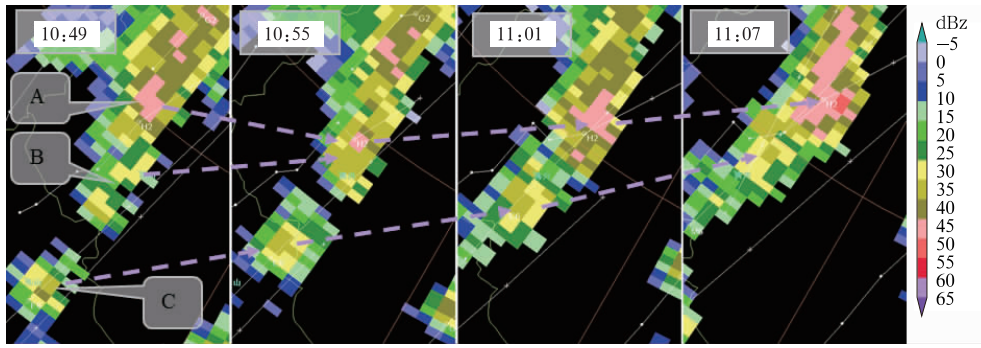


图 4 2008 年 7 月 23 日 10:49—11:07 阜阳雷达 2.4°反射率因子产品

Fig. 4 Reflectivity output at 2.4° elevation of Fuyang Radar during 10:49−11:07 BT 23 July 2008

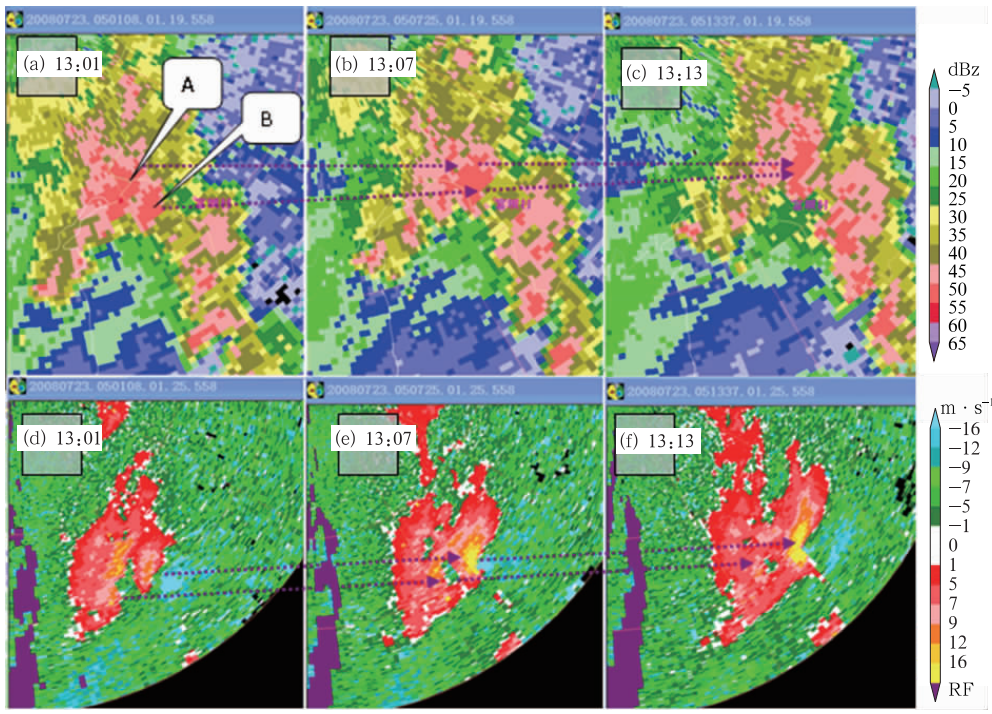


图 5 2008 年 7 月 23 日 13:01(a, d),13:07(b, e)和 13:13(c, f)三个时次 0.5°仰角反射率因子产品(a, b, c)和平均径向速度产品(d, e, f)

Fig. 5 Reflectivity (a, b, c) and velocity (d, e, f) outputs at 0.5° elevation of Fuyang Radar at 13:01 BT (a, d), 13:07 BT (b, e) and 13:13 BT (c, f) 23 July 2008

单体 B 接近单体 A,但 A、B 单体大于 50 dBz 的区域还没有相接,两个单体没有连成一整体;13:07,两个单体大于 50 dBz 的区域已经合并;13:13 这个大于 50 dBz 的区域面积稍为减小,两个单体完成了合并过程。图 5d 中与 A、B 单体对应有 2 个正负速度对,即中尺度涡旋。图中单体 A 对应的正负速度对还没有达到中气旋的标准,雷达中气旋算法用系统缺省适配参数还没有识别出 M 产品,单体 B 对应的正负速度对雷达已经识别出 M 产品,其最大切变为 10×10^{-3} s^{-1},对应高度为 1.8～4.6 km(对应雷达仰角 2.4°～6.0°),最强切变在 3.3 km。13:07(图 5e),两个涡旋都发展加强,雷达中气旋算法识别出两个中气旋产品,单体 A 的涡旋最大切变为 10×10^{-3} s^{-1},对应高度为 0.4～1.5 km(雷达仰角 0.5°～1.5°),是一个低层的浅层涡旋(0.4 km 是雷达能探测到的最低高度,此时雷达的标称仰角是 0.5°,因为天线控制允许误差,实际仰角 0.35°);单体 B 对应涡旋的最大切变为 59×10^{-3} s^{-1},对应高度为 0.5～4.6 km(雷达仰角0.5°～6.0°),最强切变在 0.3 km,同时单体 B 被识别出 TVS 产品;到 13:13(图 5f),对应于单体 A 的涡旋减弱,雷达没有给出 M 产品,而对应于 B 的涡旋仍然保持较强的强

度,最大切变为 56×10^{-3} s^{-1},对应高度为 0.4～4.9 km(雷达仰角 2.4°～6.0°),最强切变在 0.4 km。这个中气旋一直维持到 13:32。龙卷发生位置在 13:07—13:13 的富坝村和 13:32 的朱庙村(图 10)。

Lee 等(2006b)在研究 1996 年 4 月 19 日美国伊利诺斯州大规模龙卷爆发过程中龙卷生成与风暴单体合并的关系时发现 54%的龙卷发生在单体合并前后的 15 min 内,而其中的 55%发生在单体合并前后的 5 min 内。富坝村龙卷发生在单体合并(13:07)后 3 min。

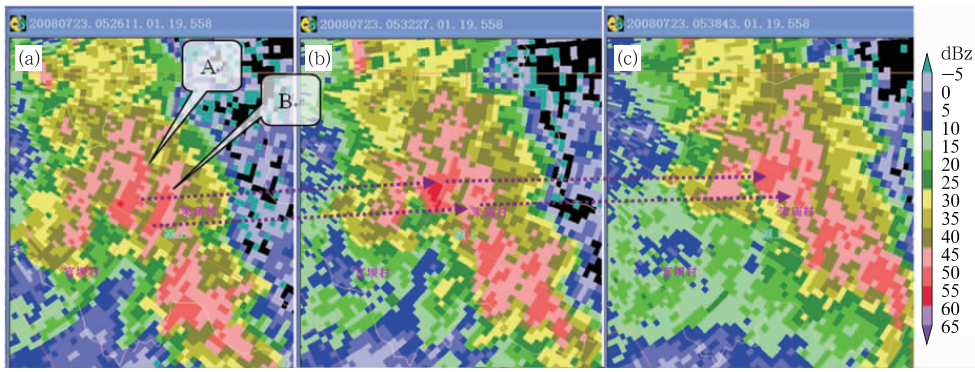


图 6　2008 年 7 月 23 日 13:26(a)、13:32(b)和 13:38(c)0.5°反射率因子产品

Fig. 6　Reflectivity output at 0.5° elevation of Fuyang Radar at 13:26 BT (a), 13:32 BT (b) and 13:38 BT (c) 23 July 2008

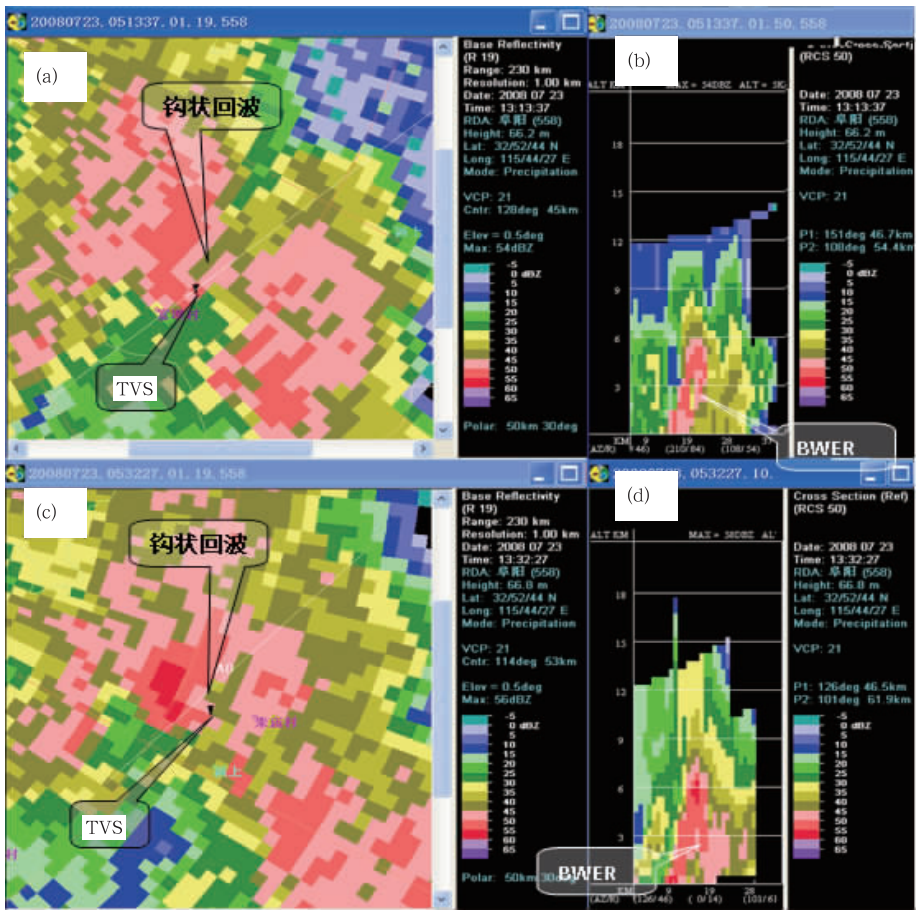


图 7　2008 年 7 月 23 日 13:13(a, b)和 13:19(c, d)阜阳雷达 0.5°仰角反射率因子产品(a, c)及反射率因子垂直剖面产品 RCS(b, d)

Fig. 7　Reflectivity output at 0.5° elevation (a, c) and reflectivity cross section (b, d) of Fuyang Radar at 13:13 BT (a, b) and 13:19 BT (c, d) 23 July 2008

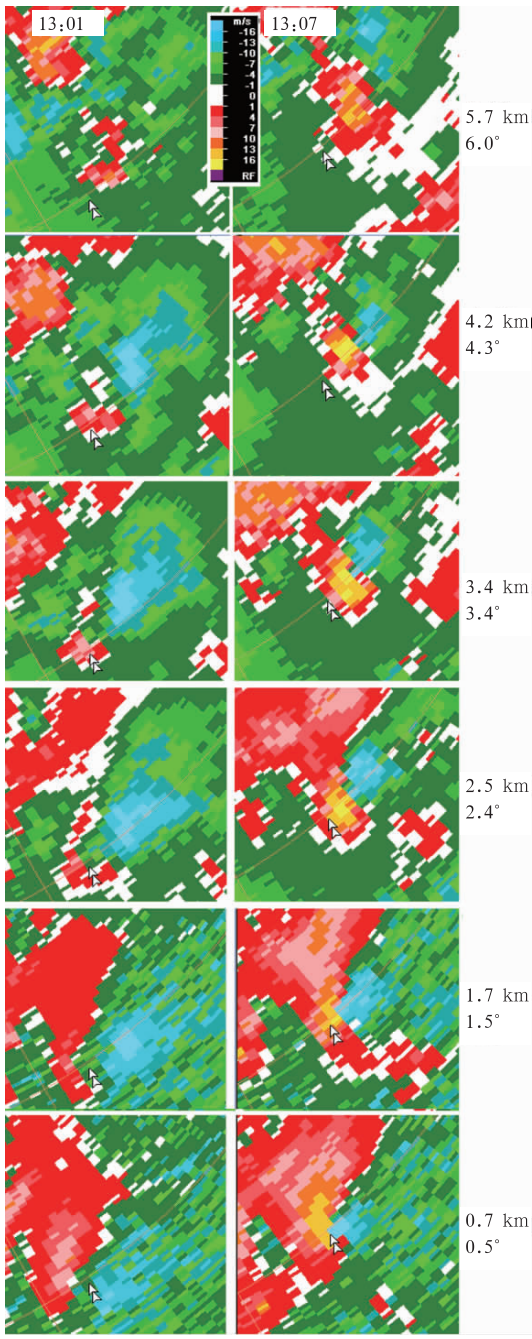


图 8 风暴合并前 13:01 和风暴合并后 13:07，0.5°～6°平均径向速度

（图右侧标注的是雷达观测仰角和对应的参考高度）

Fig. 8 The velocity of 0.5°—6° elevation before (left column) and after (right column) the cell merger

(The elevation and reference height are marked on the right side of the plots)

图 6 是 13:26—13:38 三个时次风暴单体间相互作用的过程，图 6a～6c 分别是 13:26、13:32 和 13:38 三个时次 0.5°反射率因子产品。图中也可以看到 13:32 两个风暴单体之间的距离缩小，13:38 两个单体 45～50 dBz 区域合为一体，50～55 dBz 区域没有合为一体。13:32 风暴 A 呈现出典型的超级单体的特征，在 0.5°仰角的钩状回波区（朱庙村）雷达系统识别出 TVS 产品（图 7），与朱庙村龙卷的实况位置相同。

数值模拟研究表明，气团或单体合并后，合并气团或单体的浮力和上升速度会明显增大（Wilkins et al，1976；Kogan et al，1996）。而增大的上升速度可能会对风暴内的涡旋产生拉伸作用，使涡旋半径减小。根据角动量守恒原理，涡旋的旋转风速会相应增大。本次个例体现了这一涡旋增强过程。图 8 是本次个例中风暴合并前（13:01）和风暴合并后（13:07）0.5°～6°仰角平均径向速度图。从图中可以看到，相比于合并前，单体合并后（13:07）最大正速度和最大负速度之间的距离迅速减小，0.5°和 1.5° 上最大正速度和最大负速度之间的距离缩小到 2 个方位库间的距离，正负速度对中最大正速度和最大负速度的差值也比单体合并前迅速增大（表 1）。

4 反射率因子结构和中气旋分析

4.1 风暴单体反射率因子的结构

产生龙卷的风暴单体 A0，生成以后强度很快增强，11:20 雷达系统探测到 TVS 产品，11:26 探测到 M 产品。图 7 是 2008 年 7 月 23 日 13:13 和 13:32 阜阳雷达 0.5°仰角反射率因子产品和垂直剖面产品，图 7a 和 7c 是 0.5°仰角反射率因子产品，图中具有典型的钩状回波，龙卷涡旋特征算法算出的 TVS 产品（倒三角符号）位于钩状回波的底部；图 7b 和 7d 是分别与图 7a 和 7c 对应的反射率因子剖面产品，显示回波高度发展到 12 km 以上，具有明显的悬挂回波和有界弱回波区，说明风暴中存在强烈的上升气流，最大反射率因子达到 56 dBz，具备了小型超级单体风暴特征。与产生大冰雹的超级单体风暴相比，其最大反射率因子偏低，风暴质心和最大反射率因子高度也偏低，属于低质心强降水超级单体风暴，与俞小鼎（2006）中产生龙卷的风暴单体类似。颍上 13:00—14:00 一小时降雨量 24 mm。

4.2 风暴单体涡旋结构的分析

图 9a 是 2008 年 7 月 23 日 13:01—13:32 阜阳

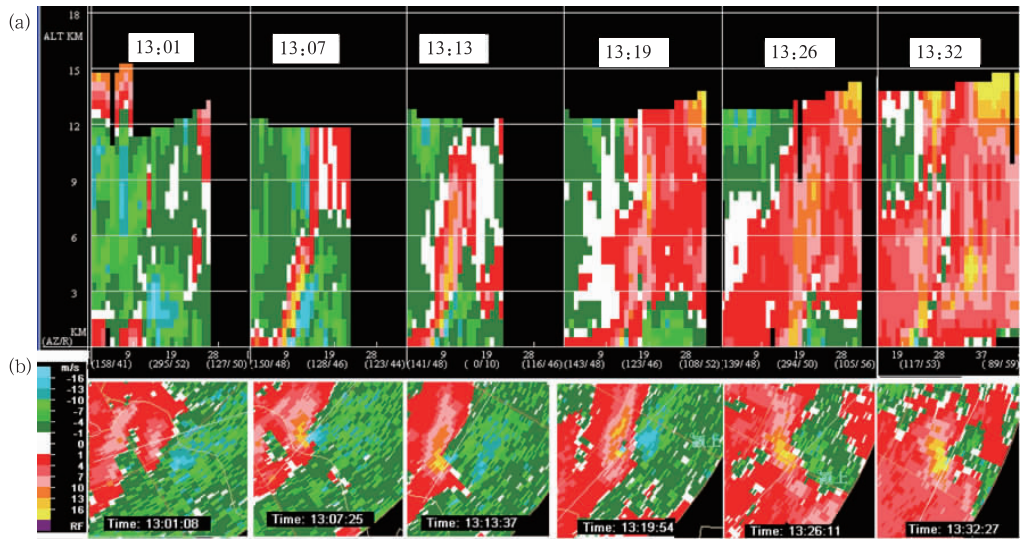


图 9　2008 年 7 月 23 日 13:01—13:32 阜阳雷达 0.5°仰角平均径向速度产品(a)和平均径向速度垂直剖面产品(b)

Fig. 9　Velocity output at 0.5° elevation (a) and velocity cross section (b) of Fuyang Radar during 13:01—13:32 BT 23 July 2008

雷达连续 6 时次 0.5°仰角平均径向速度产品(V25 产品，径向分辨率 250 m，切向分辨率 1°)，图 9b 是对应各时次平均径向速度垂直剖面产品(VCS51 产品)，剖面位置标于对应时次的平均径向速度产品中(白线)。因剖面线与雷达径向接近垂直，故冷色调为负速度，朝向雷达(进入纸面)，暖色调为正速度，离开雷达(穿出纸面)。由图可见，每个时次的平均径向速度产品中都有非常清楚的正负速度对，表明有中尺度涡旋存在。13:01 0.5°仰角速度图和 VCS 可以看出有两个不很强的中气旋存在；13:07 和 13:13 两时次，0.5°仰角平均径向速度和径向速度垂直剖面都显示了非常清晰的涡旋结构；13:19 和 13:26 两个时次，中气旋上层有所减弱，加上背景风(西南风)影响，径向速度垂直剖面中 3 km 以上没有明显正负速度对，但对应中气旋的轴线位置都存在一条风速差较大的分界线，从地面一直延伸到 6 km 或更高的高度；13:32 剖面图上 0.4～6 km 再次出现连续的正负速度，0.5°仰角正负速度差再次增大，中气旋再度增强。

4.3　中气旋产品的三维结构演变

为了适应不同地域、不同季节、不同天气背景，多普勒天气雷达系统的中气旋产品算法(Mesocyclone Dectection Algorithm，MDA)有 15 个可以修改的适配参数，在不同参数设值条件下，系统给出的中气旋产品会有所差异。本例中，用 MDA 缺省参数进行计算时，从 13:01—13:32，只识别出13:07 一次中气旋，如图 10b；调整 MDA 适配参数，降低 MDA 中的判别阈值后，雷达系统在 13:01—13:32 的每个时次都识别出了 M 产品(图 10a)。表 1 给出图 10 中各时次中气旋的特征参数，包括中气旋顶

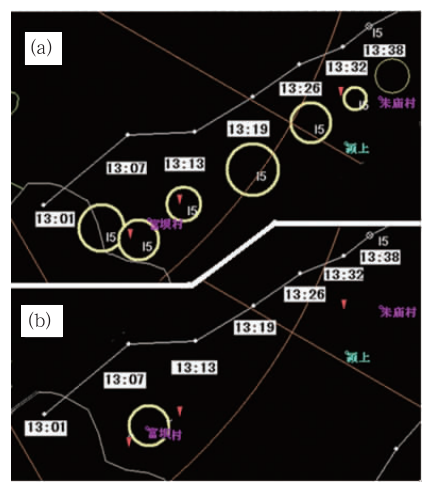


图 10　中气旋算法(MDA)不同适配参数设置，算出的 2008 年 7 月 23 日 13:01—13:38M 产品

(a)用低阈值参数的计算结果，

(b)用系统缺省参数的计算结果

Fig. 10　M products during 13:01—13:38 BT 23 July 2008

(a) lower parameter, (b) default parameter

表 1 低适配参数下的 M 产品的匹配产品值

Table 1 Characteristics of M products with lower parameters

中气旋特征参数	13:01	13:07	13:13	13:19	13:26	13:32
最大切变值/10^{-3} s^{-1}	10	59	56	60	13	18
中气旋顶高/km	4.6	4.6	4.9	2.4	6.1	3.9
最大切变值所在高度/km	3.3	0.3	1.2	0.4	2.1	2.3
中气旋底高/km	1.8	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4
最大风速差/m·s^{-1}	23.5	46.5	46.5	44.5	29.5	32.5
0.5°仰角最大风速差/m·s^{-1}	24.5	37.5	27.5	44.5	29.5	32.5

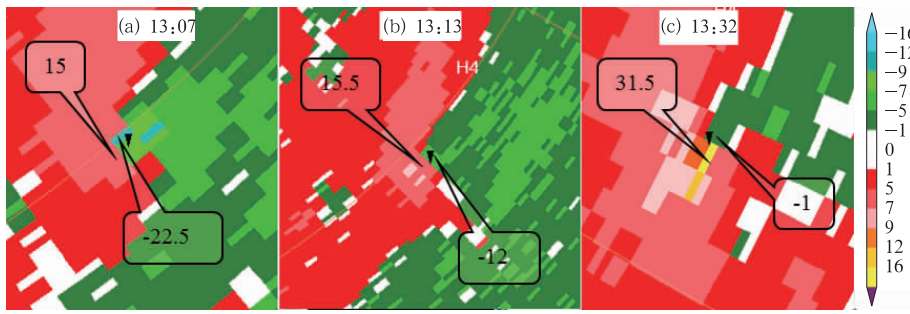


图 11 2008 年 7 月 23 日 13:07(a),13:13(b)和 13:32(c)龙卷发生时 0.5°仰角的平均径向速度产品(25 号产品)

Fig. 11 Mean velocity output at 0.5° elevation of Fuyang Radar when tornado occurred at 13:07 BT (a), 13:13 BT (b) and 13:32 BT (c) 23 July 2008

高、中气旋底高、中气旋最大切变、最大切变所在高度。

Lemon(1976)在一次超级单体研究中发现后侧阵风锋上的一个单体并入弱回波区导致了风暴涡旋强度显著增强和上升速度增大。由表 1 可见,13:07 风暴单体合并后,中气旋的最大切变值由 13:01 的 10×10^{-3} s^{-1}增大到 59×10^{-3} s^{-1},之后连续 3 个时次保持在 56×10^{-3} s^{-1}以上。13:07 开始,中气旋的底降到雷达探测到最低仰角,高度为 0.3 km。13:13 后,风暴距离雷达的距离增大,雷达探测的最低仰角是 0.5°,雷达探测到最低高度变为 0.4 km。

表 1 中还列出了风暴各层中最大风速差和 0.5°仰角最大风速差(图 11)。13:19 之后,风暴的旋转强度有所减弱,但最大风速差出现在最低仰角。13:32 由于最大风速差 32.5 m·s^{-1}出现在雷达最低仰角,高度 0.4 km,朱庙村出现了 F1 龙卷。雷达的最低探测仰角是 0.5°,雷达天线半功率点波瓣宽度为 1°,因此不能精确的探测近地面龙卷的风速而只能探测到龙卷的母中气旋的风速(Stumpf et al,1998),也就是说只能探测到龙卷风速的近似估计值(Mitchell et al,1998)。近年来发展的车载精细雷达,具有较高的分辨率和较低的探测高度,对近地面平均径向速度有较高的探测精度。Toth等(2013)对发生在距离 WSR-88D 雷达 100 km 半径内风的探测值与车载精细雷达的近地面风的探测值作了比较分析,得到切变值关系的近似经验公式 $I_{DOW}=2.0\times(I_{WSR\text{-}88D})-24$ 和平均径向速度差(DV)探测值关系的近似经验公式 $M_{DOW}=1.4\times M_{WSR\text{-}88D}+0.4$,其中 I_{DOW}和 M_{DOW}分别为车载雷达测得到切变值和速度值,$I_{WSR\text{-}88D}$和 $M_{WSR\text{-}88D}$分别为 WSR-88D 测得到切变值和速度值。颍上龙卷发生时,当地没有中小尺度观测网,没有地面风记录可以佐证,依上述经验公式估测近地面风速大约能达到 53 和 46 m·s^{-1},富坝村、洪庄湖村发生龙卷达到 F2 级,颍滨村、保丰村、朱庙村的龙卷达到 F1 级,根据发生的灾情,两地发生的龙卷也可分别估判为 F2、F1 级。

4.4 TVS 产品分析

本次个例中,天气雷达系统识别出的 3 次 TVS 产品(13:07、13:13、13:32)都与实况龙卷发生有较明显的相关。如图 10 所示,富坝村龙卷出现在 13:07、13:13 两次 TVS 产品的中间,说明 13:07—13:13 风暴中有龙卷涡旋产生,在移经富坝村时涡旋下降触地。图中 STI 产品的位置是风暴单体质

心的位置,TVS 产品位于风暴单体右侧低层钩状回波内。13:32 的 TVS 产品的位置与朱庙村出现的龙卷实际位置一致。就本次个例而言,使用缺省适配参数计算出的 TVS 产品可以为龙卷监测提供较好的依据。同时,为了获得提前预警信息,可以尝试略微降低阈值参数进行 TVS 产品识别,及时发现那些潜在的可能发展成为龙卷的风暴单体,为预报员提供一定的预警参考。

5　结　论

(1) 2008 年 7 月 23 日安徽颍上的龙卷天气过程发生在中等不稳定条件下,低空有西南风急流,低层垂直风切变大,中低空湿度大,抬升凝结高度低,有利于龙卷的生成和维持。

(2) 生成龙卷的风暴单体从风暴单体生成到龙卷发生,经历了 3 h。在风暴生成的初期,风暴单体发生了多次合并过程,使其发展成强风暴。之后,其移动方向偏离承载层平均风的方向,与其右侧的风暴单体相遇,发生单体合并,使风暴进一步增强。

(3) 龙卷发生在小型超级单体中,风暴中的中气旋从 6 km 高度延伸到近地面,中气旋的最大切变位于风暴的低层或底部。

(4) 在缺省适配参数条件下,雷达系统 CINRAD/SA 的 M 和 TVS 产品对龙卷预警有较好的指示作用。如果风暴中同时识别出 M 和 TVS 产品,并观测到风暴单体中存在有界弱回波区,则出现龙卷的几率更高。

(5) 本次个例中两次龙卷的发生分别与风暴单体合并和风暴单体间的相互作用有明显的相关,说明风暴单体的合并和风暴单体接近时的相互作用可能会激发龙卷,对龙卷预警有一定的参考价值。但这一现象在我国龙卷个例中是否普遍存在,还需通过更多的个例研究加以证实。

参考文献

刁秀广,万明波,高留喜,等. 2014. 非超级单体龙卷风暴多普勒天气雷达产品特征及预警. 气象,40(6):668-677.

何彩芬,姚秀萍,胡春蕾,等. 2006. 一次台风前部龙卷的多普勒天气雷达分析. 应用气象学报,17(3):370-375.

李改琴,许庆娥,吴丽敏,等. 2014. 一次龙卷天气的特征分析. 气象,40(5):628-636.

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.

王毅,郑媛媛,张晓美,等. 2012. 夏季安徽槽前形势下龙卷和非龙卷型强对流天气的环境条件对比研究. 气象,38(12):1473-1481.

姚叶青,俞小鼎,郝莹,等. 2007. 两次强龙卷过程的环境背景场和多普勒雷达资料的对比分析. 热带气象学报,23(5):483-490.

俞小鼎. 2006. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析. 高原气象,25(5):914-924.

俞小鼎,郑媛媛,廖玉芳,等. 2008. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究. 大气科学,32(3):508-522.

郑媛媛,朱红芳,方翔,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.

朱君鉴,刘娟,王德育,等. 2009. 2006 年 6 月皖北龙卷多普勒雷达产品分析. 气象科技,37(5):523-524.

Kogan Y L, Shapiro A. 1996. The simulation of a convective cloud in a 3D model with explicit microphysics. Part II: Dynamical and microphysical aspects of cloud merger. J Atmos Sci,53:2525-2545.

Lee B D, Jewett B F, Wilhelmson R B. 2006a. The 19 April 1996 Illinois tornado outbreak. Part I: Cell evolution and supercell isolation. Wea Forecasting,21:433-448.

Lee B D, Jewett B F, Wilhelmso R B. 2006b. The 19 April 1996 Illinois tornado outbreak. Part II: Cell mergers and associated tornado incidence. Wea Forecasting,21:449-464.

Lemon L R. 1976. The flanking line, a severe thunderstorm intensification source. J Atmos Sci,33:686-694.

Mitchell E D W, Vasiloff S V, Stumpf G J, et al. 1998. The National Severe Storms Laboratory Tornado Detection Algorithm. Wea Forecasting,13:352-366.

Orville H D, Kuo Y, Farley R, et al. 1980. Numerical simulation of cloud interactions. J Rech Atmos,14:499-516.

Stumpf G J, Witt A, Mitchell E D, et al. 1998. The National Severe Storms Laboratory Mesocyclone Detection Algorithm for the WSR-88D*. Wea Forecasting,13:304-326.

Toth M, Trapp R, Wurman J, et al. 2013. Comparison of mobile-radar measurements of tornado intensity with corresponding WSR-88D measurements. Wea Forecasting,28:418-426.

Turpeinen O. 1982. Cloud interactions and merging on Day 261 of GATE. Mon Wea Rev,110:1238-1254.

Wilkins E M, Sasaki Y K, Gerber G E, et al. 1976. Numerical simulation of the lateral interactions between buoyant clouds. J Atmos Sci,33:1321-1329.

Wurman J, Kosiba K. 2013. Finescale radar observations of tornado and mesocyclone structures. Wea Forecasting,28:1157-1174.