

文章编号: 2096-1618(2018)05-0490-08

1522号台风外围强龙卷 CINRAD/SA 气象产品特征研究

张建云¹, 张持岸¹, 葛元¹, 朱君鉴²

(1. 北京敏视雷达有限公司, 北京 100094; 2. 山东省气象台, 山东 济南 250031)

摘要:利用新一代天气雷达 CINRAD/SA 雷达系统的探测资料和气象产品,分析了2015年10月4日发生在广东佛山台风外围强龙卷的特征。龙卷发生在距离台风中心约350 km雨带中的小型超级单体中,风暴单体的回波顶发展到12 km左右。龙卷发生前,大于50 dBZ的强反射率因子核发展到5.5 km;龙卷发生后,强中心高度下降,强反射率因子核的高度降低到3.5 km。风暴单体的低层后方出现钩状回波,钩状回波的末端出现高达65 dBZ的强反射率因子。风暴单体的中气旋发展高度低,延伸厚度浅薄,切变强烈。无辐合辐散的纯气旋性环流层的高度在1.2 km左右,其下方是辐合气旋性流场,上方是辐散气旋性流场。与经典超级单体中的中气旋相比,就如垂直方向上压缩了的中气旋。中气旋下方,低层辐合的强弱,与龙卷的强弱变化密切相关,在龙卷发展到最强之前,低层辐合很强,随着低层辐合的减弱,龙卷也随之减弱。中气旋适配参数的阈值用雷达系统的缺省值时,第一次算出中气旋的时间比龙卷出现的时间提前16 min,而适当降低阈值后,算出第一个中气旋的时间比龙卷出现的时间提前了58 min。雷达系统输出第一个龙卷涡旋特征(TVS)产品比实际龙卷发生的时间提前了4 min。因为距离雷达很近,在1536(北京时,HHMM,下同)和1542时次,雷达探测到了表征龙卷碎片特征(TDS)的高反射率因子。

关键词: CINRAD/SA; 中气旋; 龙卷涡旋特征; 龙卷碎片特征

中图分类号: P445⁺. 1

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2018.05.002

0 引言

龙卷是小尺度灾害性天气系统,其水平尺度在数十米到2 km之间^[1],龙卷的发生和变化非常快,对龙卷的监测预警和研究需要分钟级的快速扫描雷达或其他探测设备进行探测^[2]。直到目前为止,美国对龙卷的监测和预警仍然主要依靠WSR-88D雷达网。该雷达网2013年完成了双偏振升级改造,尽管分配到水平通道上的发射功率小了一半,但由于双偏振雷达能探测到龙卷碎片特征(TDS),因此对龙卷的监测预警能力还是有所提高。CINRAD/SA雷达与升级之前的WSR-88D雷达一样,对龙卷有同样的探测能力。该雷达完成1个体扫的时间,扫描模式VCP11约5 min,VCP21约6 min,反射率因子径向分辨率1 km,切向分辨率1°,平均径向速度径向分辨率0.25 km,切向分辨率1°。尽管探测龙卷时间分辨率和空间分辨率还不够高,但雷达系统的中气旋(M)、龙卷涡旋特征(TVS)等丰富的产品,在龙卷的监测预警中能发挥重要的作用。雷达稳定的反射率因子和准确的平均径向速度等产品在风暴距离雷达较近时,还可以对龙卷发生发展进行一些研究。

1522台风外围龙卷造成了重大人员伤亡和财产

损失,有意重大义研究^[3-8]。文献[3]根据对龙卷进行的灾情调研,航拍龙卷灾情路径,走访龙卷目击者,确认龙卷路径及灾情级别,结合龙卷视频照片等资料以及地面观测资料进行综合分析研究,结果表明产生此次龙卷的超级单体存在于台风彩虹外围螺旋云带内;龙卷向西北偏北方向移动,触地时长为32 min,受灾路径长度为31.7 km,最大受灾直径为577 m,平均速度约为60 km/h,具有“移动速度快,影响范围广,破坏力强”的特点。文献[4]认为这次龙卷最大强度达到EF3级。龙卷发生在“彩虹”台风右前象限,地面存在触发对流的中尺度辐合线,水汽充沛,抬升凝结高度低,0~1 km垂直风切变强;顺德龙卷出现在勾状回波顶端、中气旋持续时间约1 h,龙卷过程在迅速发展阶段表现出中气旋尺度缩小、高度下降、径向切变增强等特征。文献[5]认为低空急流、低空强的垂直风切变和低的抬升凝结高度,高层辐散、低层辐合,上干下湿的不稳定层结,弱冷空气的低层入侵,珠三角喇叭口地形以及佛山东南低、西北高的地形有利于低层辐合的加强,为龙卷的产生提供了很好的动力条件。风暴单体发展至强盛阶段,雷达探测到典型的钩状回波、入流缺口等特征;中气旋由弱中气旋加强到强中气旋,由中层向低层发展且切变不断增强时,龙卷触地或继续加强。龙卷发生前16 min出现弱中气旋,龙卷发生前4 min出现强中气旋并伴有TVS特征。文献[6-7]通

收稿日期:2018-09-05

基金项目: 国家公益性行业(气象)科研专项基金资助项目(GYHY201506021)

过双多普勒雷达资料的分析,认为龙卷生成前1 h,中气旋开始生成,其最大旋转速度位于大约2 km高度,约30 m/s,TVS在中气旋最强的时候生成,位于前侧下沉气流和上升气流之间,接近中气旋的中心。中气旋的生成和增强主要是由于低层水平涡度被抬升倾斜直至垂直和随后强上升气流的拉升。

本文利用 CINRAD/SA 雷达系统的产品生成软件 (RPG) 和产品终端显示软件 (PUP) 对体扫数据进行回放,对这次龙卷过程的各种雷达产品进行了分析研究,文内雷达产品图不做任何处理,都采用目前雷达业务中可以得到的产品形式,目的是为在龙卷和其他灾害性天气的监测和预警实际业务中,挖掘雷达系统的潜在能力,找到更多可以直接应用雷达产品信息。

1 2015 年 10 月 4 日台风“彩虹”外围龙卷风暴的概况

2015 年 10 月 4 日台风“彩虹”在广东登陆1 h后,台风中心位于广东湛江附近(见图 1),佛山市距离台风中心约350 km,螺旋雨带中出现了系列龙卷。图 1 是广州新一代天气雷达 2015 年 10 月 4 日 1536(北京时,格式为 HHMM,下同)1530 反射率因子 R20 产品,图上黑色倒三角符号为叠加的反射率因子产品上的龙卷涡旋特征(TVS)产品,当时台风中心位于雷达的西偏南方向,方位 242°,距离约350 km处。1528-1603 顺德区勒流、伦敦、北滘、乐从等地遭龙卷风袭击,造成 4 人死亡,168 人受伤^[3]。

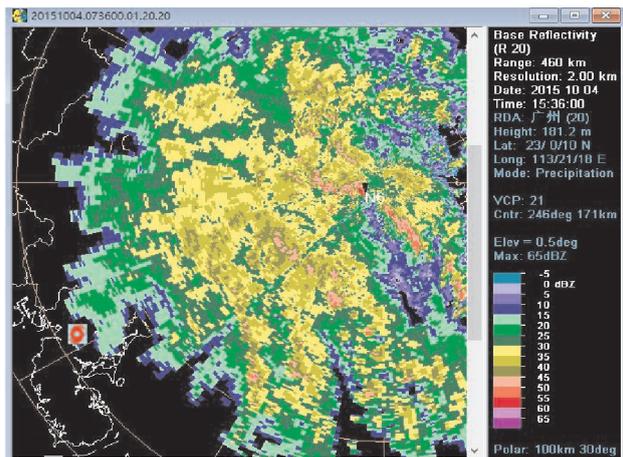


图 1 广州 CINRAD/SA 雷达 2015 年 10 月 4 日 1536 反射率因子产品 R20

图 2 是 2015 年 10 月 4 日 1418-1606 广州 CINRAD/SA 雷达 0.5°龙卷风暴单体反射率因子产品合成图,根据广州 CINRAD/SA 雷达的风暴追踪产品(STI),在佛山生成龙卷的风暴单体 1418 之前在珠海附近生

成,STI 产品 1418 给出 ID 号 N6(体扫数据回放时,起始时间不同,系统给出的 ID 号不同),生成后沿着台风外围螺旋雨带的方向向北偏西方向移动。根据中国气象局和广东省气象局联合实地调查的结果^[3-5],风暴单体中龙卷涡旋 1528 在勒流连杜富安工业区生成,之后向北偏西方向移动,经过伦敦、北滘、乐从、石湾、张槎等乡镇,1600 在罗村甘坑造成灾害之后逐渐减弱消散,历时 32 min^[3]。图 2 上叠加了雷达系统的中气旋产品(M)和龙卷涡旋产品(TVS),由图 2 可见,1530-1548,风暴低层出现明显的钩状回波。从实地灾情调查结果和雷达产品都可以看出 1536-1542 是龙卷最强的时段,1554 之后龙卷风暴进入减弱阶段。

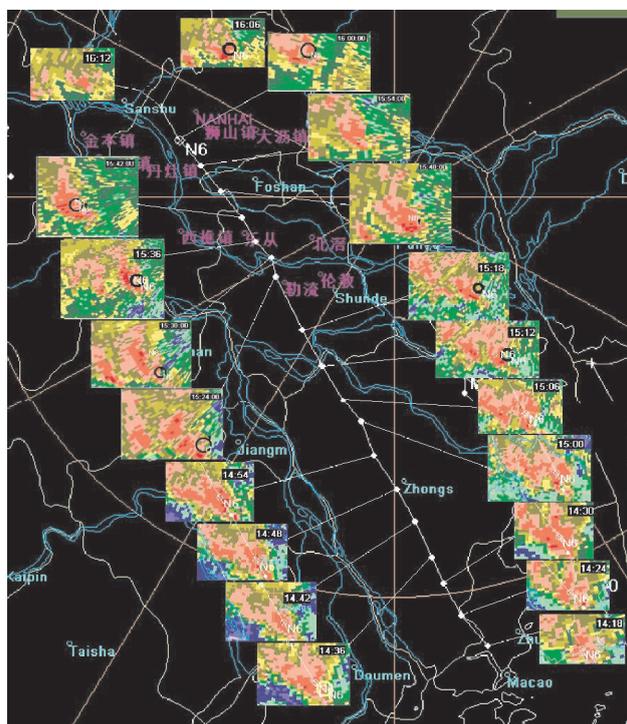


图 2 2015 年 10 月 4 日 1418-1606 CINRAD/SA 雷达 0.5°龙卷风暴单体反射率因子产品合成图

2 龙卷的风暴单体的结构

2.1 风暴的发展高度和强中心高度

图 3 是 CINRAD/SA 雷达风暴结构产品中的风暴高度特征,是风暴结构(产品号 62)的图形产品,纵坐标为高度,横坐标是雷达体积扫描的顺序时间。白色竖线表示风暴底和风暴顶的连线,白线上的黄点为最大反射率因子的高度,粉红点为风暴质心的高度。可以看到 1528 龙卷发生之前,风暴顶的高度最高,达到 7~8 km,从 1524 开始,风暴顶的高度逐渐下降,1536 降到最低,大约 5 km 左右,这是风暴中龙卷最强的时

段。之后 1554 之后又开始下降,风暴进入减弱消散阶段,龙卷也随之减弱。1512 之前,最大反射率因子高度维持在3.5~4 km,1518 开始下降,1536 和 1542 两个时次最大反射率因子降到最低高度,大约 0.5~0.4 km(这两个时次最大反射率因子降到 0.5°,是 TDS 造成的,如果去除 TDS 的影响,通过逐层反射率因子分析,最大反射率因子的高度在 2 km 以上),1548 之后又上升并维持在 2~2.5 km。风暴单体的质心高度 1524 之前大部分时次维持在 2 km 以上,1530 之后下降到 2 km 以下。

这次龙卷风暴的移动路径,离开雷达的距离较近,1536 风暴距离雷达最近,只有 23 km 左右,因为雷达最高探测仰角是 19.5°,最低仰角 0.5°,因此在风暴距离雷达较近时,会出现风暴顶和底的高度由远及近移动时,风暴顶和风暴底的高度有规律地下降,这种有规律的下降是由于在高层雷达仰角之间的间隔较大造成的(风暴顶处在 2 个扫描仰角之间,这时给出的风暴顶的高度都是下面一个仰角的高度,看起来在逐渐下降),反之风暴顶和底高度有规律地升高,图中可以看到这种影响的存在。为此对 1506-1600,对风暴单体进行了反射率因子剖面(RCS)分析,在风暴各个仰角的 PPI 图上找到最大反射率因子的位置,通过最高仰角上的最大反射率的位置做剖面,得到图 4 各时次的

反射率因子剖面图 RCS 系列。从 RCS 的时间序列图也可以看到风暴顶的探测也受到这种影响,但可以看到大于 50 dBZ 的强反射率因子中心因为发展高度不高,没有发展到 19.5°以上,因此没有受到太大的影响,只是当时的探测模式是 VCP21,高层的扫描仰角之间间距较大,因此强中心高度的顶部高度还是会有一些误差。分析看到,在龙卷发生前,1524 风暴强中心的高度 45 dBZ 的高度达到 6 km,60 dBZ 的高度达到 5 km,风暴底部出现的有界弱回波区的高度达到 2.5 km,大于 50 dBZ 的强反射率因子中心的高度在 5.5 km 左右。龙卷发生之后,大于 50 dBZ 的强反射率因子中心的高度逐渐降低,1536 降低到 4 km,之后再下降到 3.5 km 左右,大约比龙卷发生前下降了 2 km。

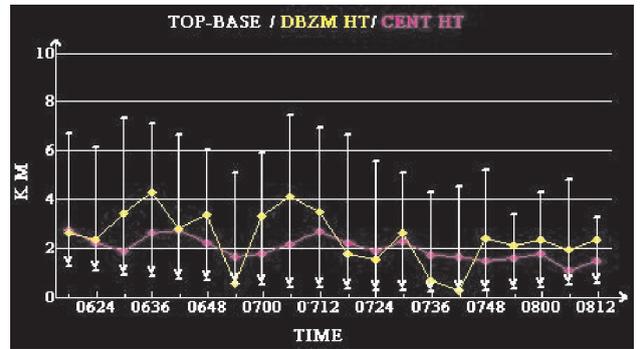


图3 风暴发展高度、最大反射率因子高度、质心高度时间序列

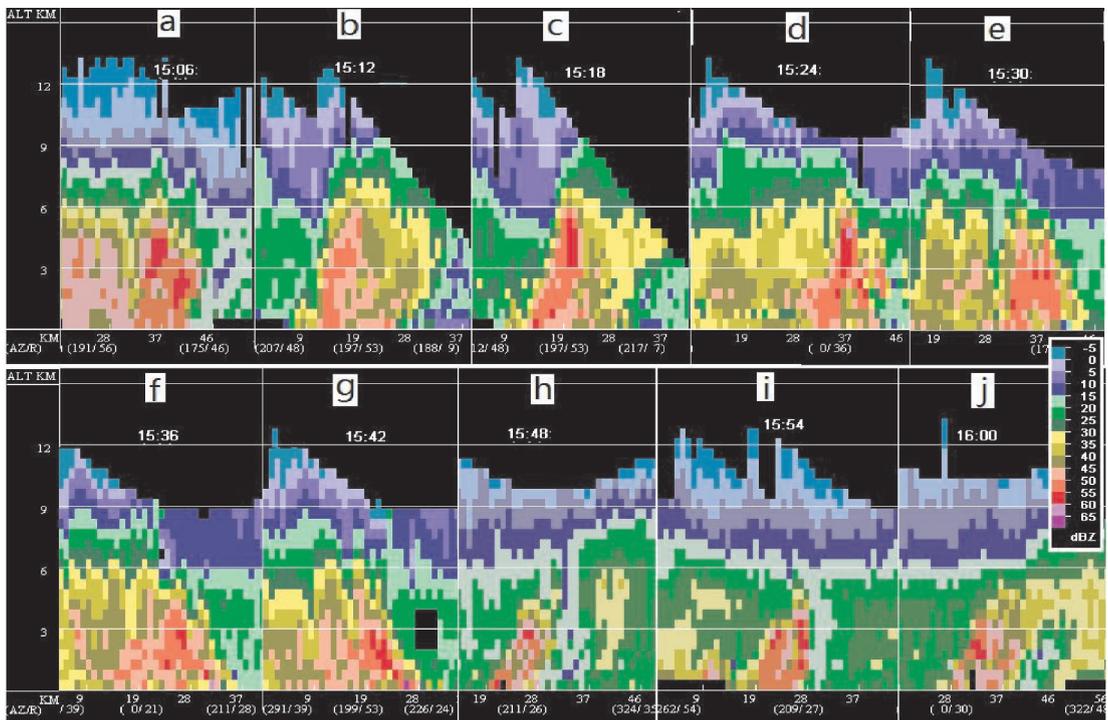


图4 反射率因子剖面 RCS 时间序列

2.2 风暴低层的钩状回波

图 5 是 1536、1542 广州雷达 0.5°反射率因子产

品,可以看到在风暴移动方向的后方有清楚的钩状回波。仔细分析可以看到 1512 雷达系统输出中气旋产品开始,低层反射率因子就出现了钩状回波,只是没有

1536 和 1542 那么典型。钩状回波反射率因子较低的位置是低层入流缺口位置,1536 和 1542 两个时次,钩

状回波的末端出现了尺度约 1 km 的强回波,强反射率因子 1536 达到 65 dBZ,1542 达到 66 dBZ。

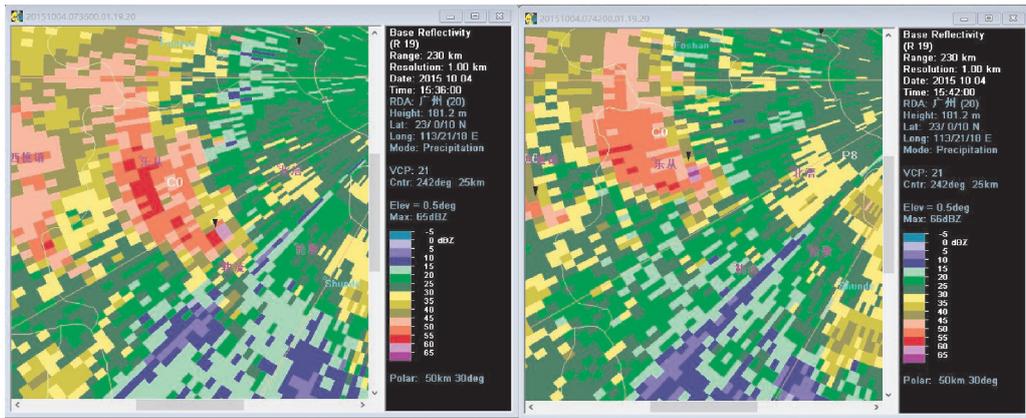


图 5 1536、1542 广州雷达 0.5° 反射率因子产品

3 平均径向速度产品和中气旋产品

3.1 中气旋延伸厚度浅薄、切变强烈

表 1 是产生龙卷的风暴单体 N6 的中气旋特性,其中 1548 和 1554 两个时次,用雷达系统原适配参数值计算,中气旋算法(MDA)算法没有算出中气旋,表中这两个时次的中气旋特性是降低了 MDA 算法中的部分阈值计算得到的。据周后福^[9]的统计,江淮地区龙卷风暴的中气旋的平均顶高为 3.9 km,平均底高为 1.2 km,平均延伸厚度为 2.7 km,平均切变量

为 $14.4 \times 10^{-3} / s$ 。这次龙卷风暴单体 N6 的中气旋的平均顶高为 1.8 km,平均底高为 0.8 km,平均延伸厚度为 1.0 km,平均切变量 $27 \times 10^{-3} / s$ 。中气旋的底高、顶高都低很多,中气旋的延伸厚度也浅薄很多,但切变值很高。可见这次龙卷风暴单体的中气旋有以下几个特点,发展高度低,延伸厚度浅薄,切变强烈。以 1536 为例,中气旋的底 0.7 km,中气旋的顶 1.5 km,厚度仅 0.8 km。直接读取体扫资料数据,0.5° 仰角上,中气旋的正速度为 37.5 m/s,负速度为 -28 m/s,速度差为 65.5 m/s,切变量为 $39 \times 10^{-3} / s$ 。这也与郑媛媛^[10]的研究结果一致。

表 1 风暴单体 N6 的中气旋特性

时间	1506	1512	1518	1524	龙卷前平均	1530	1536	1542	1548	1554	1600	1606	龙卷期间平均
最大切变 ($10^{-3} s^{-1}$)	8	10	16	18	13	49	39	35	14	20	16	16	27
中气旋顶/km	2.5	3.6	3.1	2.8	3.0	2.7	1.5	1.6	1.5	2.1	1.1	1.9	1.8
中气旋底/km	1.9	1.6	1.4	1.2	1.5	0.7	0.7	0.7	0.9	1.0	0.4	1.2	0.8
最大切变高度/km	2.5	2.7	3.1	2.0	2.6	1.5	0.7	1.2	1.4	2.1	1.1	1.2	1.3
中气旋厚度/km					1.5								1.0

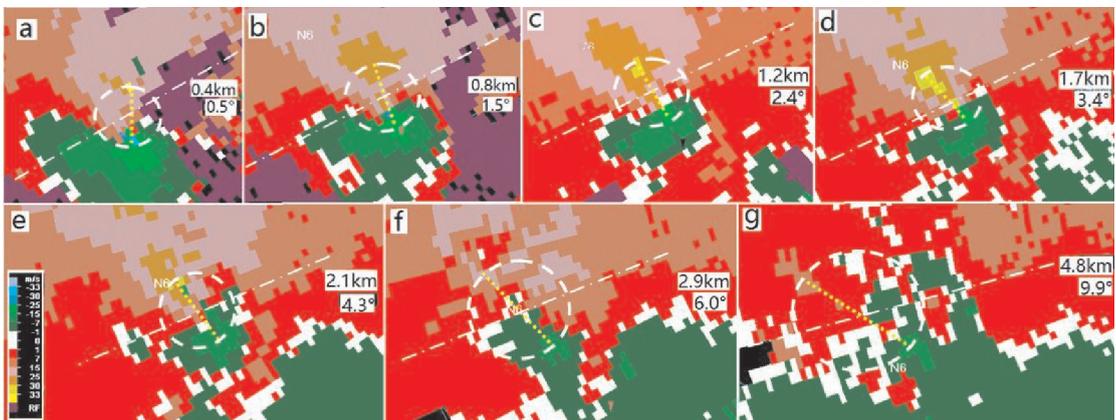


图 6 广州雷达 1536 仰角 0.5° ~ 9.9° 平均径向速度 V25 产品

图6分别是广州雷达1536仰角 $0.5^\circ \sim 9.9^\circ$ 平均径向速度25号产品,图上标注的高度是正速度最大值和负速度最大值之间连线的中点位置的近似高度,也就是涡旋中心的近似高度。这次雷达探测模式为VCP21, 0.5° 的最大不模糊速度是 26.5 m/s ,龙卷的最大正速度和负速度的绝对值都超过了最大不模糊速度,回放时进行了速度退模糊。分析各层的正负速度最大值位置离开雷达的距离, 2.4° (图6c)上正速度最大值的位置和负速度最大值的位置与雷达之间的距离大约相等,说明在这个高度上中气旋是无辐合辐散的纯气旋性流场,高度约为 1.2 km ,在其下方的 1.5° 和 0.5° 仰角上,正速度的最大值到雷达的距离比负速度的近,是辐合性的气旋性流场;在 1.2 km 以上,正速度的最大值到雷达的距离比负速度的远,也就是说 1.2 km 以上,风暴中中气旋的环流就开始出现辐散,到仰角 6.0° (高度大约 2.9 km),正速度的最大值到雷达的距离比负速度的更远,正负速度最大值之间的距离也增大很多,正负速度的差值也减小了很多,说明在这高度上辐散进一步增强,中气旋环流减弱。到

4.8 km (仰角 9.9°)高度,中气旋环流的形态已经很难辨认,辐散已经很强。与经典超级单体中的中气旋相比,就如在垂直方向进行了压缩一样。

3.2 低层辐合的变化与龙卷的强弱和维持

这次龙卷维持了 32 min ,维持时间之长是国内龙卷灾害很少见的,对于龙卷生成后是否能够维持,Dowell and Bluestein 2002^[11]认为龙卷的维持,风暴的中层必须有持续的中气旋和低层水平的辐合流场同时配合,中气旋的减弱或者低层辐合的减弱都会导致龙卷的减弱和消散。在这次龙卷过程中没有足够细的时空密度的低空资料来计算低层的散度。 1536 风暴离开雷达的距离大约 23 km , 0.5° 仰角在 23 km 处波瓣中心的高度约 0.4 km ,因此可以用低层雷达平均径向速度定性的分析中气旋下方辐合的变化。这次龙卷发生在距离雷达 60 km 范围内,可以用CINRAD/SA雷达的最高分辨率的平均径向速度产品25号产品进行分析,其径向分辨率为 250 m ,在速度退模糊后,可以比较清晰地看到低层涡旋的状况。

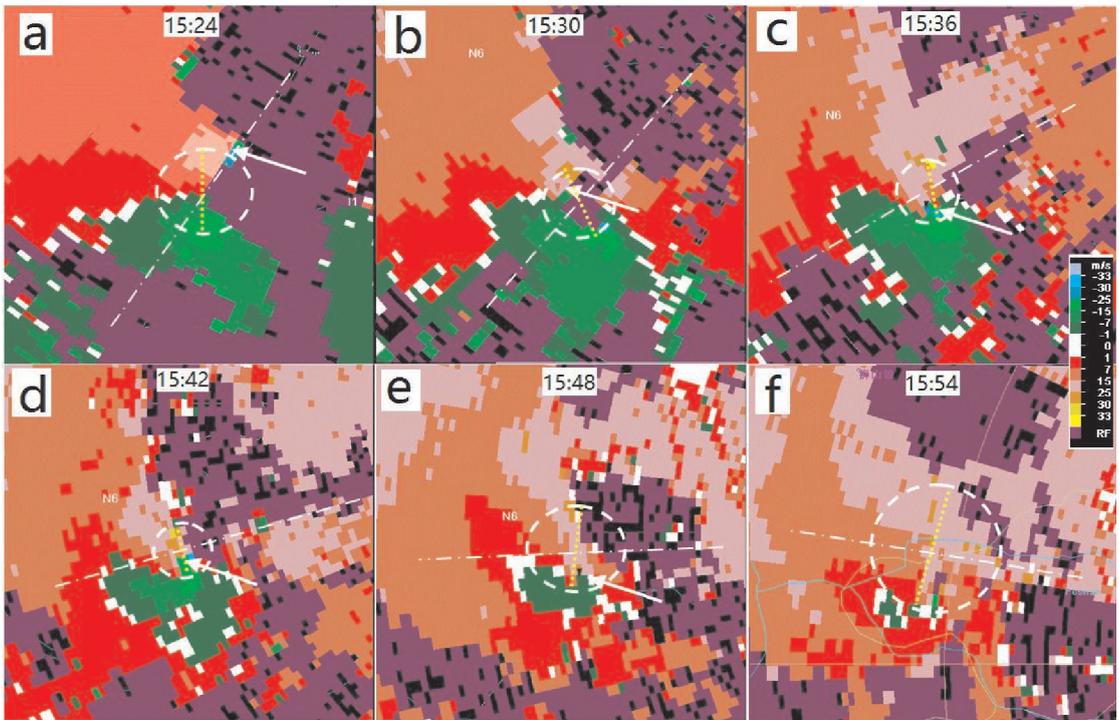


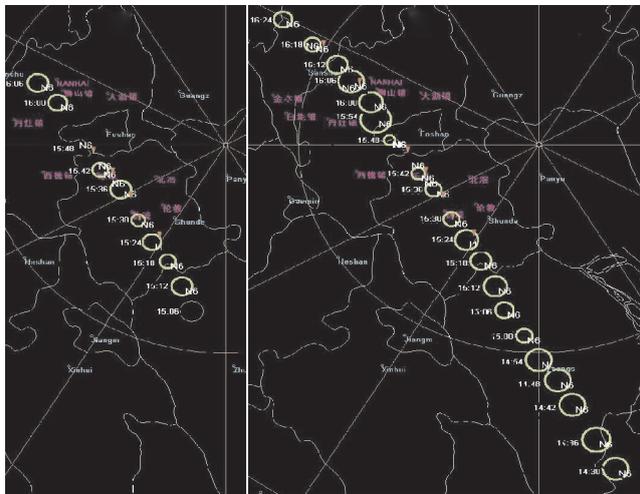
图7 1524–1554广州雷达 0.5° 平均径向速度产品V25

图7是1524–1554广州雷达 0.5° 平均径向速度25号产品,图中白色点划线为雷达的径向,白色圆圈经过涡旋的最大速度中心和最小速度中心,可近似认为涡旋的最大速度圈,黄色虚线是连接最大和最小速度中心的连线。从图7d(1542)看到黄线与白色点划线大致垂直,说明正速度中心到雷达的距离与负速度中心到雷达的距离近似相等,可认为无辐合辐散,而在图7(a)–(c)(1524–1536),黄线的正速度一端到雷达

的距离比负速度一端到雷达的距离小,说明这3个时段中气旋的下方都存在明显的辐合,而在1542之后,在图7(e)、(f)上,由于距离折叠等原因,找不到正速度的最大值位置,但根据 $15 \sim 25\text{ m/s}$ 的正速度区(粉红色区域)可以大致估计出图中涡旋的位置,黄线的正速度一端到雷达的距离与负速度一端到雷达的距离相近,说明中气旋的下方辐合开始减弱。另外还可以看到涡旋的直径1524–1542逐渐缩小,1536和1542最

小,之后又逐渐变大。这与表 1 中中气旋的切变值 1536 和 1542 达到最大,之后逐渐减弱相一致。灾情调查[3] 1536 和 1542 是龙卷灾害最严重的时段,15 时 36 分世龙工业区的地面受灾直径扩大到 230 m,江义水闸达到 367 m,15 时 42 分龙卷灾情半径继续扩大,马龙工业区灾情直径为 354 m,劳岳工业区出现灾情最大直径为 577 m。分析说明 1542 之后,低层辐合开始减弱,中气旋强度和龙卷的灾害程度开始减弱。

3.3 中气旋算法不同适配参数阈值回放试验



(a)用原适配参数阈值计算 (b)用降低的适配参数阈值计算

图 8 风暴单体 N6 的 M 和 TVS 产品

对在顺德产生龙卷的风暴单体 N6 进行跟踪分析,并使用雷达系统 MDA 算法用不同的缺省参数阈值进行计算。使用缺省适配参数阈值,1506 风暴单体 N6,MDA 算法开始识别出三维特征涡旋(图 8a 中的细圆圈),之后连续 6 时次(1512-1542)算法给出中气旋产品(图 8a),之后的 1548、1554 两个时次没有给出中气旋,1600 和 1606 两个时次又计算出了 2 个时次中气旋。第一次给出中气旋的时间比龙卷出现的时间(1528)提前了 16 min。适当降低适配参数的阈值(适配参数的阈值用雷达系统的缺省值和阈值可取的下限值之间的中间值),算出的结果如图 8(b),1430 到 1624 之间的 20 个时次,MDA 都给出了中气旋产品。这样

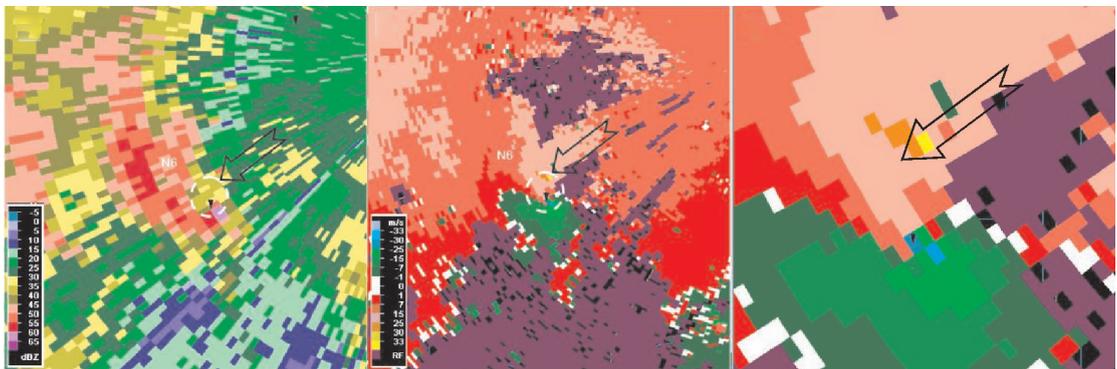
开始算出中气旋的时间比龙卷出现的时间提前了 58 min。文献[6-7]用双多普勒雷达分析的结果,风暴单体中的中气旋在龙卷发生 1 h 之前生成,二者相近。

对于同一天 1700 发生在番禺的龙卷,使用缺省适配参数阈值,MDA 自 1600 开始到 1642 连续 8 时次算出中气旋,比龙卷发生提前 1 h。用适配参数可选范围的下限值回放,风暴单体中 1512 开始算出中气旋,比龙卷发生提前将近 2 h。

4 龙卷涡旋特征 TVS 产品和龙卷碎片特征 TDS

4.1 龙卷涡旋特征 TVS 产品

使用雷达系统适配参数的缺省值进行回放,自 1524-1548,连续 5 个时次算出 TVS 产品。图 8 上红色倒三角符号是叠加的 TVS 产品。第一个 TVS 产品比实际龙卷发生的时间提前了 4 min。图 9(a)是广州雷达 1536 0.5° 反射率因子 R19 产品,图 9(b)是 0.5° 平均径向速度 V25 产品,为了将反射率因子与速度进行对比分析,两图的地理位置一样,图上叠加了 TVS 产品(黑色倒三角符号),图 9(c)是图 9(b)的放大图。图 9a 中白色箭头为风暴移动的方向,根据平均径向速度产品上正负速度的最大值,可以分析出这一层的中气旋在位置如白色圆圈所示,直径大约 3 km 左右,中气旋的位置在图 9(a)上对应为钩状回波。从速度图上可以看到最大正速度的中心离开雷达的距离与最大负速度的中心离开雷达的距离相差很大,说明在低层既是辐合性流场,辐合又很强,图中正速度区形成了相对于风暴的入流气流(黑色双箭头),与中纬度出现的经典的超级单体的入流缺口不一样,这个入流缺口位于风暴的右后侧,而钩状回波位于风暴移动方向的后方。图 9(c)可以看到这时 TVS 的位置不在中气旋的中心,而是位于中气旋环流的边缘上,1530 TVS 的位置位于中气旋的中心(图略)。直接读取体扫资料数据,龙卷的正速度分别为 26 m/s,负速度为 -43.5 m/s,速度差为 69.5 m/s,切变量为 $128 \times 10^{-3}/s$ 。



(a) R19 (b) V25 产品 (c) 放大的 V25 产品

图 9 1536 广州雷达 0.5°

4.2 龙卷碎片特征 TDS 产品

TDS 是 Ryzhkov 等^[12] 1999 年用 S 波段双偏振雷达在超级单体钩状回波的末端处探测到龙卷的特征,后来的研究在 C 波段和 X 波段双偏振雷达上同样探测到了 TDS。TDS 在龙卷监测预警业务中非常有用,尤其在龙卷被雨区包围,或者龙卷发生在夜间,视觉无法确认龙卷是否已经在地面生成的情况下,TDS 可以帮助确认龙卷的发生和位置。

龙卷中心的高风速、低气压将地面上的杂物卷到空中,这些杂物体积大,排列取向杂乱无章,高分辨率双偏振雷达[1]和双偏振改造后的 WSR-88D 都探测到了这种龙卷碎片回波,并以此判断龙卷的真实存在。TDS 双偏振雷达的差分反射率(ZDR)和零滞后相关系数(CC)的测值都非常小,反射率因子测值很高。在这次龙卷过程的最后12 min,佛山的 X 波段双偏振多普勒雷达观测到了这一特征。目前没有双偏振改造升级的 SA 雷达,反射率因子径向分辨率1 km,切向分辨率1°,对于龙卷的监测预警,分辨率还不够高,因此 TDS 的这种高反射率特性很难探测到。这次龙卷风暴,距离广东番禺雷达最近时只有23 km,1536 和 1542 两时次在勒流、乐从龙卷发生的位置0.5°反射率因子分别出现了65 dBZ和66 dBZ(直接读取体扫资料)的大值,径向、切向范围约1 km,这是雷达可分辨的最小距离。实际上 TDS 的尺度可能更小,SA 雷达的 R19 产品1 km显示单元的 dBZ 值是4个0.25 km距离库中取的最大值,因此尽管分辨率为1 km,但1 km范围内的最大值能保留下来。认定这个高反射率因子对应的是 TDS,还因为该地区是平原地区,没有如此高值地物回波,而1.5°反射率因子也没有这么高的值。另外,TDS 的高度一般不会很高,0.5°的雷达波束中心高度在龙卷处约0.4 km,只有天线波瓣的下半部探测到,充塞系数不会很高,但由于这2个时次龙卷灾害范围很大,灾害范围直径达到577 m^[3],使得杂物碎片在天线波瓣的水平方向充塞系数很高,因此能探测到 TDS。

5 结论

通过对广州 CINRAD/SA 雷达 1522 台风“彩虹”历史体扫数据的回放分析研究,得到如下结论:

(1) 龙卷发生在距离台风中心350 km雨带中的小型超级单体中,风暴单体的回波顶最高时发展到12 km左右,龙卷发生前,大于50 dBZ的强反射率因子核龙卷发生前发展到5.5 km;龙卷发生后,强中心高度下降,大于50 dBZ的强反射率因子核的高度较低到

3.5 km,是低质心强降水小型超级单体,风暴单体的后方出现钩状回波,钩状回波的末端出现高达65 dBZ 的反射率因子。

(2) 这次龙卷风暴单体的中气旋,发展高度低,延伸厚度浅薄,切变强烈。龙卷风暴中的中气旋与经典的超级单体风暴中的中气旋有类似的结构,无辐合辐散的纯气旋性环流层在1.2 km左右,其下方是辐合气旋性流场,上方是辐散气旋性流场,与经典超级单体中的中气旋相比,就如垂直方向上压缩了的中气旋。

(3) 中气旋下方,低层(≤ 0.4 km)的辐合的强弱,与龙卷的强弱变化密切相关,在龙卷发展到最强时,低层辐合最强,随着低层辐合的减弱,龙卷也随之减弱。

(4) 适配参数的阈值用雷达系统的缺省值,第一次给出中气旋的时间比龙卷出现的时间提前了16 min。降低适配参数的阈值后,算出第一个中气旋的时间比龙卷出现的时间提前了58 min。雷达系统输出第一个 TVS 产品比实际龙卷发生的时间提前了4 min。

(5) 因为距离雷达很近,1536 和 1542 雷达探测到了表征龙卷杂物特征 TDS 的高反射率因子。

参考文献:

- [1] Wurman J, Kosiba K. Finescale Radar Observations of Tornado and Mesocyclone Structures [J]. *Weather and Forecasting*, 2013, 28(5):1157-1174.
- [2] 刘黎平,吴林林,吴肿,等. X 波段相控阵天气雷达对流过程观测外场试验及初步结果分析[J]. *大气科学*, 2014, 38(6):1079-1094.
- [3] 李兆慧,王东海,麦雪湖,等. 2015 年 10 月 4 日佛山龙卷过程的观测分析[J]. *气象学报*, 2017, 75(2):288-313.
- [4] 朱文剑,盛杰,郑永光,等. 1522 号“彩虹”台风龙卷现场调查与中尺度特征分析[J]. *暴雨灾害*, 2016, 35(5):403-414.
- [5] 李彩玲,炎利军,李兆慧,等. 1522 号台风“彩虹”外围佛山强龙卷特征分析[J]. *热带气象学报*, 2016, 32(3):416-424.
- [6] Zhao K, Wang M, Xue M, et al. Doppler Radar Analysis of a Tornadic Miniature Supercell during the Landfall of Typhoon Mujigae (2015) in South China[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98(9):1821-1831.
- [7] Xue M, Zhao K, Wang M, et al. Recent Signifi-

- cant Tornadoes in China [J]. 大气科学进展, 2016, 33(11): 1209-1217.
- [8] 麦雪湖, 炎利军, 李兆慧. 2015年10月4日佛山强龙卷风灾害过程浅析[J]. 广东气象, 2015, 37(6): 6-8.
- [9] 周后福, 刁秀广, 夏文梅, 等. 江淮地区龙卷超级单体风暴及其环境参数分析[J]. 气象学报, 2014, 72(2): 306-317.
- [10] 郑媛媛, 张备, 王啸华, 等. 台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析[J]. 气象, 2015, 41(8): 942-952.
- [11] Dowell D C, Bluestein H B. The 8 June 1995 McLean, Texas, Storm. Part II: Cyclic Tornado Formation, Maintenance, and Dissipation [J]. Monthly Weather Review, 2010, 130(11): 2649-2670.
- [12] Ryzhkov A V, Burgess D W, Zrni'c D S, et al. Polarimetric analysis of a 3 May 1999 tornado [C]. In 21th Conference on Severe Local Storms, San Antonio, TX. Boston: American Meteorological Society (Preprints), 2002.

Study on Characteristics of Strong Tornado CINRAD/SA Products in Typhoon No. 1522

ZHANG Jian-yun¹, ZHANG Chi-an¹, GE Yuan¹, ZHU Jun-jian²

(1. Beijing Metstar Radar Co., Ltd., Beijing 100094, China; 2. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China)

Abstract: Using the observation data and meteorological products of CINRAD/SA Radar system, the characteristics of the violent tornado occurred in Guangdong Province on 4 October 2015 were analysed. The significant tornado was spawned from a minisupercell located in the out rainband of Typhoon Mujigae. The storm top reached about 12 km. The intensity core of 50 dBZ is about 5.5 km before tornado touches down, It descends to 3.3 km after tornado happens. The low level reflectivity exhibits classic hook echo with 65 dBZ high reflectivity at the end of the hook. The low altitude mesocyclone has high shear. Non divergence level was located at about 1.2 km, with convergence cyclone below and divergence cyclone above. Likened to the mesocyclone in supercell, it has been constringent in vertical direction. Strength of the tornado is relative to the convergence intensity under the mesocyclone. The first time the mesocyclone product been given out was 16 min ahead of tornado happens, when the threshold of the adaptation parameter using the default value of the algorithm. Adjust the adaptation parameter to a resonable lower value, the first time the mesocyclone been given out was 58 min ahead of tornado happens. The first Tornado Vortex Signature (TVS) products been given out by radar system was 4 min ahead of time the actual tornado occurrence. Because it's close to radar site, the high reflectivity of Tornado Debris Signature (TDS) was detected at scan of 1536 and 1542.

Keywords: CINRAD/SA; mesocyclone; tornado vortex signature; tornadic debris signature