

李昭春,朱君鉴,张持岸,等,2021.海南屯昌儋州台风雨带龙卷双偏振雷达探测分析[J].气象,47(9):1086-1098. Li Z C, Zhu J J, Zhang C A, et al, 2021. Analysis of dual polarization radar detection of tornado typhoon rainband in Danzhou and Tunchang in Hainan Province[J]. Meteor Mon, 47(9):1086-1098(in Chinese).

## 海南屯昌儋州台风雨带龙卷双偏振雷达探测分析<sup>\*</sup>

李昭春<sup>1,5</sup> 朱君鉴<sup>2</sup> 张持岸<sup>3</sup> 孙 剑<sup>3</sup> 王 瑶<sup>4</sup>

1 海南省气象探测中心,海口 570203

2 山东省气象台,济南 250031

3 北京敏视达雷达有限公司,北京 100029

4 海南省东方市气象局,东方 572600

5 海南省南海气象防灾减灾重点实验室,海口 570203

**提 要:** 分析了 2019 年 8 月 29 日发生在海南省屯昌县和儋州市龙卷过程的海口双偏振多普勒雷达探测资料。龙卷发生在台风杨柳右前方大约 370 km 处的台风雨带中的对流风暴单体中,两次龙卷发生都与风暴合并有关联,一次发生在风暴单体合并前 12 min,一次发生在风暴单体合并后 5 min。单体合并导致风暴反射率因子增强,风暴高度增高,风暴中气旋迅速增强。两次龙卷,雷达都探测到龙卷涡旋特征(TVS),探测到 TVS 的时间比龙卷发生时间分别提前 27 min 和 5 min。龙卷发生前对应龙卷涡旋特征位置的相关系数(CC)值没有变化,龙卷发生时,龙卷涡旋特征位置的 CC 值突然减小到 0.8 以下,龙卷发生后 CC 的低值特征持续了 20 min 以上。两次龙卷都有后部风暴单体并入,龙卷发生在主风暴单体的后部、两个风暴单体合并的连接处。

**关键词:** 风暴单体合并,双偏振参数,零滞后相关系数,龙卷涡旋特征,龙卷碎片特征

**中图分类号:** P456

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.09.005

## Analysis of Dual Polarization Radar Detection of Tornado Typhoon Rainband in Danzhou and Tunchang in Hainan Province

LI Zhaochun<sup>1,5</sup> ZHU Junjian<sup>2</sup> ZHANG Chian<sup>3</sup> SUN Jian<sup>3</sup> WANG Yao<sup>4</sup>

1 Hainan Meteorological and Technical Equipment Centre, Haikou 570203

2 Shangdong Meteorological Observatory, Jinan 250031

3 Beijing Metstat Radar Co. LTD, Beijing 100029

4 Dongfang Meteorological Office of Hainan Province, Dongfang 572600

5 Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou 570203

**Abstract:** The radar data of Haikou dual polarization Doppler during the tornado processes in Tunchang County and Danzhou City of Hainan on 29 August 2019 are analyzed. The tornadoes occurred in a convective storm in the typhoon rain belt about 370 km to the right of Typhoon Podul. Both tornado occurrences were related to the merging of the storms. One occurred at 12 min before the merging of the storm cells, and another occurred at 5 min after the storm cells merged. The merger of the cell led to enhancement of the storm reflectivity with the storm height increasing, and the cyclone in the storm strengthened

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划项目(2018YFC1506104,2018YFC1506102)和海南省南海气象防灾减灾重点实验室开放基金项目(SCSF201904)共同资助

2020 年 10 月 12 日收稿; 2020 年 12 月 20 日收修定稿

第一作者:李昭春,主要从事新一代天气雷达的保障和产品研究. E-mail:lizhaochun@163.com

通讯作者:朱君鉴,主要从事气象雷达应用和强对流天气预警研究. E-mail:2894380621@QQ.com

rapidly. Tornadic vortex signature (TVS) was detected during two tornadoes, and the time of detection of TVS was 27 min and 5 min earlier than the time of the tornadoes. Corresponding to the position of the TVS before the tornado occurred, the correlation coefficient (CC) value did not change. When the tornado occurred, the CC value of the position of the TVS suddenly decreased to below 0.8, and the low-value of the CC continued for more than 20 min after the tornado occurred. Both tornadoes had the rear storm cells merged. The tornado occurred at the rear of the main storm cells at the junction where the two storm cells merged.

**Key words:** storm cell merging, dual polarization feature, co-polar correlation coefficient, tornadic vortex signature (TVS), tornadic debris signature (TDS)

## 引 言

海南省是我国龙卷多发的省份之一。据统计,2004—2015年海南省共发生龙卷21次,其中热带气旋龙卷7次,热带气旋龙卷普遍达到EF1级或EF2级(郑艳等,2017)。

热带气旋外围雨带中常常有龙卷发生,近年来我国广东省发生过多次这一类龙卷(黄先香等,2019a;李彩玲等,2007;李兆慧等,2017;朱文剑等,2016),2006年8月4日和2015年10月4日发生在广东省佛山市的龙卷,都造成了重大的人员伤亡和巨大的财产损失。2019年8月29日夜,在台风杨柳的外围雨带中,海南省屯昌县新兴镇和西昌镇、儋州市那大镇先后遭受龙卷风袭击,导致8人死亡,8人受伤(李彩玲等,2020,陆琛和魏鸣,2020)。因为其生命史短、尺度小、突发性强,对龙卷的监测和预警非常困难。对于台风外围的龙卷预警难度更大,近年来郑媛媛等(2015)、李彩玲等(2016)、王秀明和俞小鼎(2019)对此类龙卷的监测和预警做了很多研究。郑媛媛等(2015)对10次台风龙卷过程的环境背景和其中F2、F3级以上龙卷过程的回波结构演变特征分析认为:(1)台风龙卷所处环境基本为弱对流有效位能( $200\sim 1000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ )和风随高度强烈顺转的强低空风的垂直切变环境, $0\sim 1\text{ km}$ 风的垂直切变超过 $10^{-2}\text{ s}^{-1}$ ,风暴的相对螺旋度很大。台风龙卷大多数出现在台风前进方向的右前侧,位于 $0\sim 1\text{ km}$ 风切变和相对风暴螺旋度大值区。龙卷主要产生于台风外围螺旋雨带上,台前龙卷产生前往往地面已存在风向切变和风速的辐合,但温度梯度不大。(2)在台风影响环境下导致龙卷的风暴属于微超级单体风暴,有水平尺度 $2\sim 4\text{ km}$ 的中气旋;垂直涡度限制在 $4\text{ km}$ 以下;风暴单体的质心在

$2\text{ km}$ 左右,风暴伸展高度在 $5\sim 7\text{ km}$ 。佛山龙卷研究中心(黄先香等,2019b)在研究成果的基础上,建立了珠江三角洲龙卷预警流程,成功地预警了2018年两次龙卷的发生,验证了流程的可行性。以上研究成果对于台风路径的预警提供了较好的技术支持,但正如黄先香等(2019b)指出的,目前龙卷预警的空报率比较高,需要对雷达观测资料的深入分析,加深对龙卷的触发、维持、消亡机制的认识。

寻找更多有效的龙卷预警方法,使用先进的双偏振多普勒雷达信息是便利的途径之一。龙卷的发生发展突发性强,在实际业务中对龙卷的预警,需要预报人员在很短的时间内做出决策,需要更多龙卷发生前雷达探测的有用信息。Wurman et al(2007)分析了两部高时空分辨率的X波段多普勒雷达同时探测到的1997年5月26日发生在俄克拉何马的龙卷风暴过程,风暴中发生了两次龙卷,最初的龙卷发生在主超级单体与另一个较弱的风暴合并时,这个龙卷被两个风暴的降水所包围,仅仅几分钟后,最底层的涡旋都开始减弱,龙卷消亡;第二个龙卷发生,是主超级单体与另一个更大的超级单体合并,合并后中层中气旋再度增强,新的钩状回波再度发展,龙卷再度产生,但合并破坏了主超级单体的结构,钩状回波很快收缩,中气旋消散,龙卷也很快消亡。

Lee et al(2006a;2006b)跟踪研究了1996年4月19日美国伊利诺伊州大规模龙卷爆发过程中109个风暴单体的移动、分裂、合并和发展的复杂过程,分析了龙卷生成与风暴单体合并和风暴之间相互作用的关系,发现26次风暴合并中,54%的龙卷发生在单体合并前后的15 min内。安徽阜阳的一次龙卷过程中也探测到龙卷发生前的风暴单体合并(朱江山等,2015),龙卷发生在单体合并后3 min。2016年6月5日发生在海南文昌的龙卷也与两个部分单体之间相互作用有关(王秀明和俞小鼎,

2019;张培昌等,2019)。张涛等(2020)、郑永光等(2020)对2019年7月3日辽宁开原龙卷的演变特征、形成条件和机理做了研究和分析。

双偏振多普勒天气雷达的应用,为龙卷的探测提供了更多有用的信息,2019年8月29日发生在海南省儋州市的龙卷,距离海口双偏振雷达60~120 km范围内。雷达探测资料分析表明,龙卷的发生与风暴单体的合并有关联。龙卷发生前雷达给出了龙卷涡旋特征(TVS)产品,龙卷发生时,探测到了龙卷碎片特征(TDS)。

## 1 海口双偏振雷达的性能和标定

海口雷达原为S波段单偏振多普勒天气雷达CINRAD/SA,2019年4月升级改造为双偏振多普勒雷达并投入运行。同年5—7月进行雷达技术维护,对雷达系统的各个参数进行了严格标定。

## 2 龙卷发生概况

2019年8月29日02—04时(北京时,下同),受台风杨柳外围环流影响,海南省屯昌县新兴镇和西昌镇、儋州市那大镇先后遭受龙卷风袭击,导致8人死亡,8人受伤。根据佛山市龙卷研究中心和海南省气象局的联合实地调查结果,屯昌县龙卷(以下简称屯昌龙卷)发生在02:54前后,持续时间约7 min,路径长度约9 km,造成大片树木拦腰折断和大片树木连根拔起,最大破坏宽度约150 m,破坏程度为EF2级,无人员伤亡。

此时台风杨柳位于17.2°N、113.1°E南海海面上,距离儋州龙卷发生地大约370 km,向偏西方向移动(中央气象台台风网 <http://typhoon.nmc.cn/web.html>),龙卷发生地位于台风杨柳前进方向的右前侧,与黄先香等(2019a;2019b)、郑媛媛等(2015)研究的台风龙卷易发区结论一致。

儋州市那大镇龙卷(以下简称儋州龙卷)约发生在04:03,持续时间约6 min,龙卷跳跃式前进,路径总长度约5 km,中间有1.8 km破坏痕迹不明显,最大破坏宽度约400 m,造成整个铁皮厂房屋顶和钢架结构坍塌,破坏程度相当于EF2级,导致8人死亡、8人受伤。

## 3 风暴移动、合并和发展的双偏振雷达反射率因子分析

### 3.1 风暴的移动和合并

图1a是台风杨柳移动轨迹(中央气象台台风网 <http://typhoon.nmc.cn/web.html>),29日02时台风杨柳以25 km·h<sup>-1</sup>的速度向西移动。图1b是海口双偏振多普勒雷达CINRAD/SA\_D(以下简称海口雷达)反射率因子产品(R20)。红色三角为儋州龙卷发生地位置,红色圆圈为台风中心位置,两者之间距离大约370 km。台风向偏西方向移动(红色箭头方向)。发生龙卷的风暴单体位于台风外围雨带中,这条外围雨带不是很典型(风暴单体排列不连续),雨带中的风暴单体沿台风外围的东北气流自东北向西南方向移动(黄色中空箭头方向)。图2是风暴单体X4的反射率因子移动路径,反射率因子滤除了低于50 dBz的部分,01:40引发龙卷的风暴单体X4在海口东部生成,风暴随着台风外围的偏东北气流向西南方向移动。02:09风暴单体X4追上其前方的单体M5(图略),两个风暴单体合并,回波顶高由5 km增高到8 km以上,最大反射率因子高度上升到4 km(图3a),最大反射率因子增强到59 dBz,风暴迅速增强,单体中开始探测到气旋性涡旋,风暴移动方向开始偏向承载层气流方向的右侧,向西偏南方向移动。02:55风暴移动到屯昌境内,风暴单体后方较弱的单体C5追上单体X4,再次发生风暴单体合并,回波顶高和最大反射率因子高度再次增高,风暴强烈发展,很快地面出现龙卷。03:58风暴移动到儋州市那大镇附近,又一次与其后方的风暴单体N8合并,风暴再度增强,地面再次出现龙卷。

### 3.2 风暴单体的合并

风暴单体的合并常常导致风暴的强烈发展,有很多龙卷的发生与风暴单体合并有关。Sabones et al(1996)曾经探测到超级单体和飑线的相互作用引发的龙卷,Wolf et al(1996)也报道了超级单体之间的合并导致了强龙卷的生成。

Lee et al(2006a)研究了1996年4月19日美国

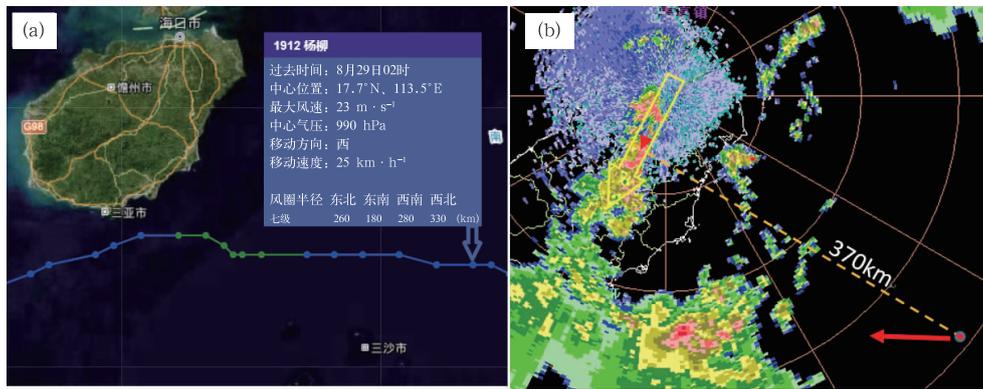


图 1 2019 年 8 月 29 日(a)02—19 时台风杨柳移动轨迹,(b)03:01 海口雷达 0.5°反射率因子产品(R20)  
 (图 1b 中红色三角:儋州龙卷位置,黄色箭头为龙卷移动方向,红点:台风位置,红色箭头:台风移动方向)

Fig. 1 (a) Typhoon Podul moving track from 02:00 BT to 19:00 BT, (b) Haikou radar reflectivity factor product at 0.5° elevation (R20) at 03:01 BT 29 August 2019  
 (Red triangle is location of Danzhou tornado, yellow arrow is moving direction of the tornado, red dot is typhoon location, red arrow indicates motion direction of typhoon)

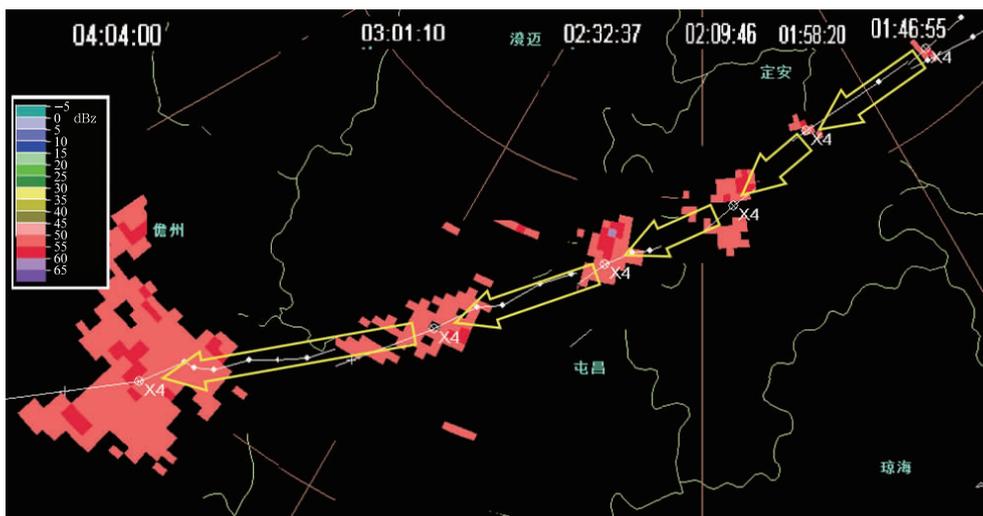


图 2 2019 年 8 月 29 日风暴单体 X4 移动路径  
 (图中滤除了反射率因子小于 50 dBz 的部分)

Fig. 2 The moving path of the storm cell X4 on 29 August 2019  
 (The part with reflectivity factor less than 50 dBz is filtered out in the figure)

伊利诺伊州大规模龙卷爆发过程中的 26 次风暴合并,将导致风暴单体合并的情况归纳为 3 种:(1)偏向承载层平均风右侧的气旋性旋转的单体与沿着承载层平均风方向不旋转的单体之间的合并;(2)偏向承载层平均风左侧的反气旋性旋转的单体拦截不旋转的单体或者气旋性旋转的单体之间的合并;(3)偏向承载层平均风右侧的气旋性旋转的单体拦截另一个偏离很小的单体之间的合并。并且将风暴单体合并的形态分为 4 种:类型 A,一个较大的风暴单体合并入一个较小的单体,结果反射率因子面积增大,或者强度增强。合并后,风暴结构和旋转度随之发生

变化。类型 B,主风暴和次风暴合并,结果主风暴脉冲上升,主风暴周围或者风暴合并位置反射率因子增强。类型 C,当两个较强的风暴单体移动到很近时,在两个反射率强中心之间新生一个新的单体,这种情况常常发生在两个单体强度相差不大的情况下。数值模拟显示(Ryzhkov et al,2002),新的上升气流在两个风暴之间出流边界相遇的地方,这个新的风暴很快取代了原来的两个风暴。类型 D,在两个风暴单体合并的连接点或者附近生成新的单体,并入的单体失去 ID,这个新生单体只在极短暂的时间内迅速发展并且产生龙卷。

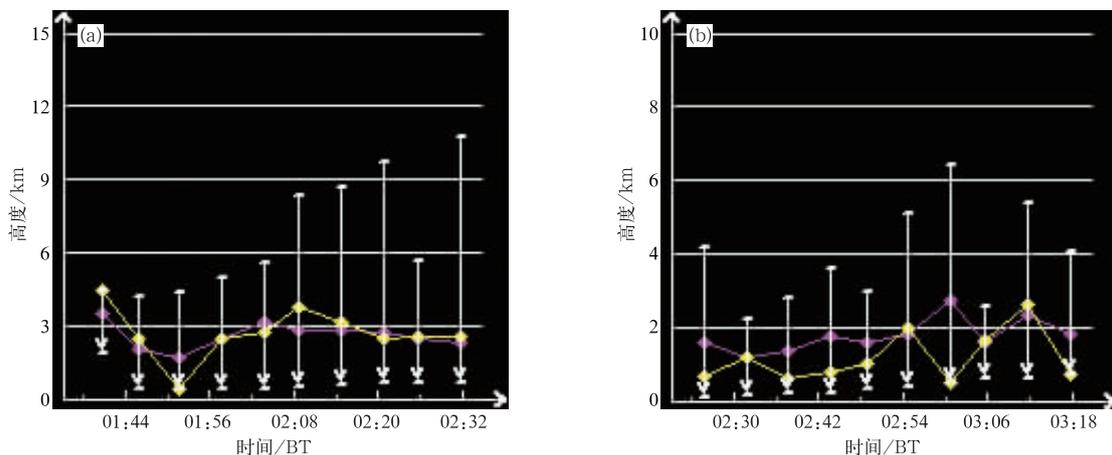


图 3 2019 年 8 月 29 日风暴单体 X4 风暴变化趋势产品

(a) 屯昌龙卷, (b) 儋州龙卷

(黄线是风暴质心高度, 紫线是最大反射率高度, 白线段为风暴顶高和底高)

Fig. 3 Storm cell X4 trend products on 29 August 2019

(a) Tunchang tornado, (b) Danzhou tornado

(Yellow line is the height of the storm's center of mass, purple line is the height of maximum reflectivity, white line segment is the storm top and bottom height)

### 3.2.1 屯昌龙卷风暴单体的合并

确定风暴单体合并的时间常常比较困难, 为使问题简化, Lee et al(2006a)将  $0.5^\circ$  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

过程定义为单体合并的时间。本文主要依据雷达的风暴追踪信息 (STI) 产品, 并结合这样的方法分析此次过程中的强风暴单体合并过程。

图 4 是海口雷达 02:44—03:01 反射率因子产

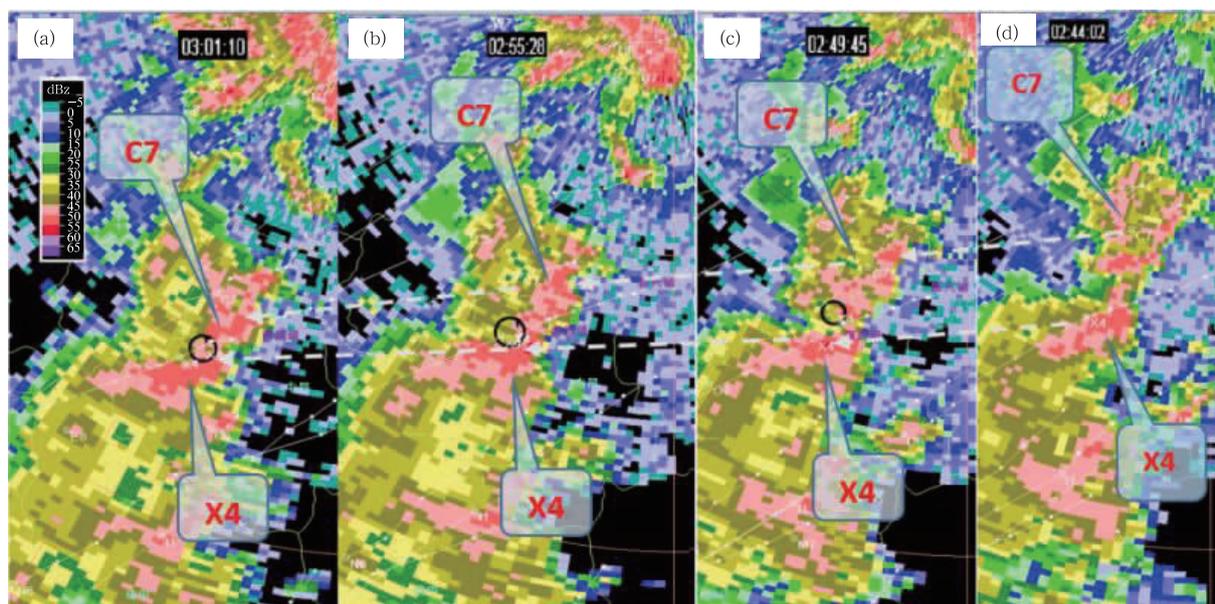


图 4 2019 年 8 月 29 日 (a)03:01, (b)02:55, (c)02:49, (d)02:44

海口雷达反射率因子合成展示屯昌龙卷风暴单体的合并过程

(X4, C7 为风暴单体, 黑圆圈表示中气旋, 下同)

Fig. 4 Merging process of Tunchang tornado storm cells expressed by series of Haikou radar reflectivity at

(a) 03:01 BT, (b) 02:55 BT, (c) 02:49 BT, (d) 02:44 BT 29 August 2019

(X4, C7 indicate storm cells, black circle indicates mesocyclone, the same below)

品,图上叠加了 STI 产品,白色细线是 STI 的移动轨迹和预报方向,借助于 STI 的指示,02:44(图 4d)中有较强风暴单体 X4 和较弱小的单体 C7,单体 C7 沿着承载层平均风方向向西南方向移动;单体 X4 已经发展得很强,风暴中已经探测到中气旋初始涡旋,02:49(图 4c)风暴中探测到中气旋(M)和龙卷涡旋特征(TVS),风暴移动方向偏向承载层平均风方向的右侧,与 C7 比较移动速度也慢一些,因此两个单体之间的距离不断缩小,到 03:01(图 4a),在 0.5°仰角,单体 C7 反射率强中心的大部分已经并入单体 X4,两个单体大于 50 dBz 的中心完全连接到一起,时间是 03:06(图略)。参考 Lee et al(2006b)的判别方法,把 0.5°仰角两个风暴单体的强中心合并到一起作为判据,认定为单体合并时间,则比龙卷发生时间(02:54)滞后 12 min。

### 3.2.2 儋州龙卷风暴单体的合并

儋州龙卷风暴单体的合并过程与屯昌龙卷的风暴合并非常类似(图 5)。03:46 风暴单体 X4 已经移动到屯昌的西部,即将进入儋州,在 X4 的北边有个风暴单体 N8(图 5d),03:46—04:04,N8 和 X4 之间的距离越来越小。实地调查龙卷发生在 04:03,同样参考 Lee et al(2006b)的方法,03:58(图 5b) 0.5° 仰角两个风暴单体的强中心合并到一起,认定为方便合并时间,比龙卷发生提前 5 min。

屯昌龙卷发生在风暴单体合并前 12 min,儋州龙卷发生在风暴单体合并后 5 min,以下做简单的分析。屯昌龙卷发生时,从 02:55 时 0.5°反射率可以看到,风暴单体 X4 的钩状回波已经形成,可认为单体 C7 与 X4 之间的相互作用激发了龙卷的生成,猜测单体 C7 的前部下沉气流进入 X4 的钩状回波区,但因为风暴距离雷达约有 70 km,0.5°仰角 PPI 上风暴中心位置距离地面 1 km,无法探测到低层的状况来验证,因此只能是猜测;而儋州龙卷发生时,03:58 风暴中心距离雷达大约 100 km,0.5°仰角风暴中心位置距离地面 1.5 km,1.5 km 以下的状况也无法探测到,但从 TVS 叠加在 03:58 时 0.5°仰角反射率因子图(图 5b)上的位置,大致在风暴强反射率的中心位置,因此可以认为由于风暴合并使得风暴上升速度增强,导致涡旋在垂直方向拉伸而产生龙卷(参看图 6c,6d)。

图 6 是海口雷达 03:46—04:04 连续 4 个时次 RCS 产品,剖面位置通过单体 X4 和单体 N8 的强中心(图 5 中白色细线的位置)。从图中可以看到风暴单体 N8 逐渐追上单体 X4,两个单体的强中心逐渐合并的过程。风暴内最强反射率因子(55~60 dBz)的面积不断增大,高度增高,最强反射率因子的高度由大约 6 km 上升到 7.5 km 左右。

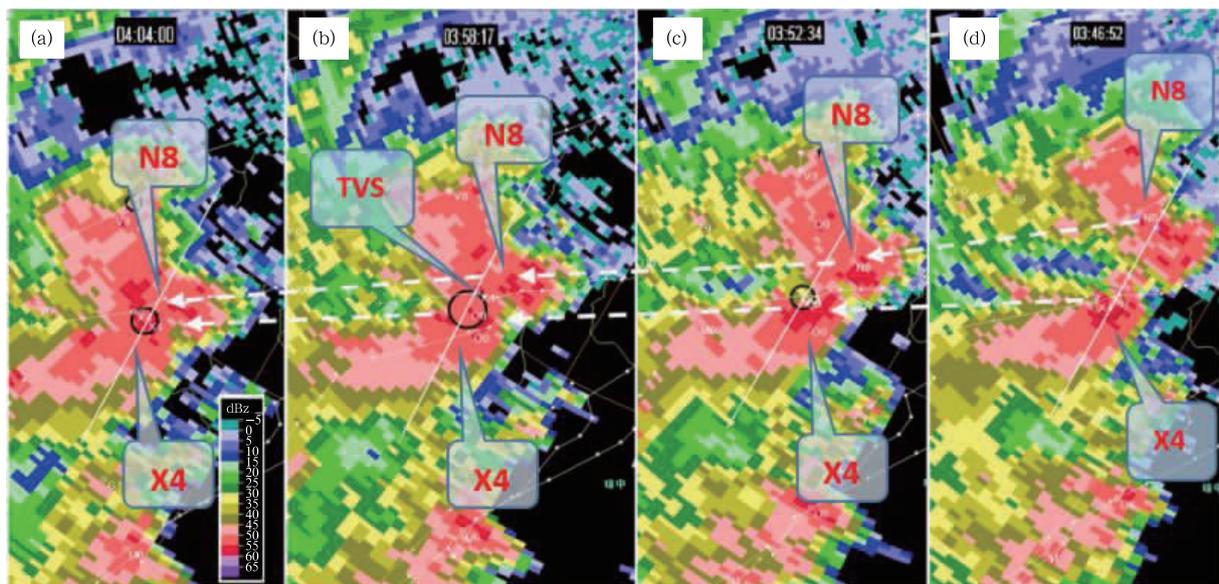


图 5 同图 4,但为儋州龙卷(a)04:04,(b)03:58,(c)03:52,(d)03:46 (N8 为风暴单位,黑色倒三角为 TVS)

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for Danzhou tornado at (a) 04:04 BT, (b) 03:58 BT, (c) 03:52 BT, (d) 03:46 BT (N8 is storm cell, black inverted triangle indicates TVS)

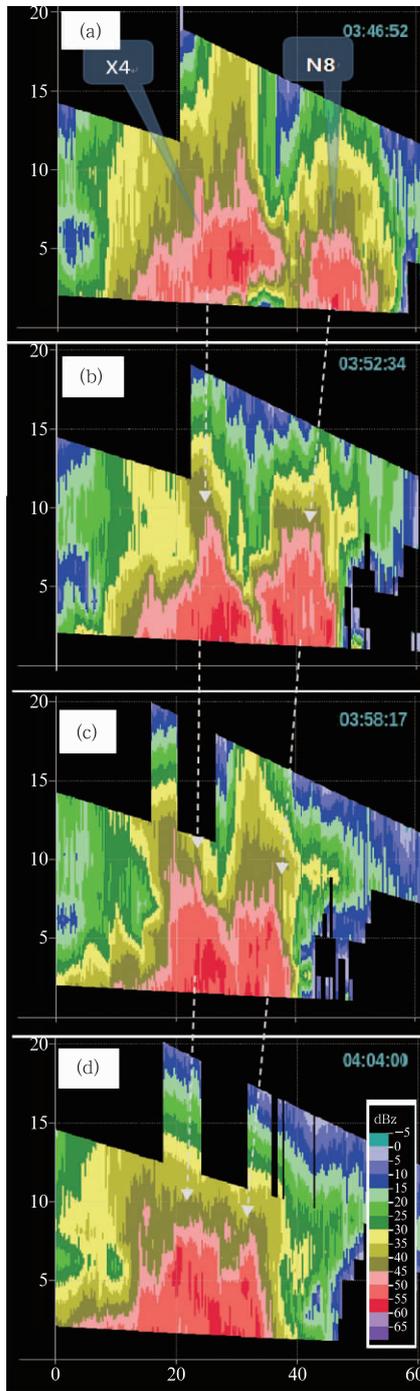


图 6 海口雷达 2019 年 8 月 29 日 (a)03:46, (b)03:52, (c)03:58, (d)04:04 连续 4 个时次 RCS 产品 (剖面位置通过单体 X4 和单体 N8 的中心)

Fig. 6 Haikou Radar RCS products for volume scan at (a) 03:46 BT, (b) 03:52 BT, (c) 03:58 BT, (d) 04:04 BT 29 August 2019 (The cross section passes through the center of the cell X4 and the cell N8)

后面的分析会看到龙卷发生在两个风暴单体的相接位置。

### 3.3 风暴单体合并的预报

风暴单体合并有可能激发风暴的发展,导致龙卷的发生,在纷乱的风暴单体移动的情况下,判断可能的风暴合并对于龙卷预警是有用的,CINRAD/SA 的 STI 产品是有用的工具。STI 产品中,白色小圆圈是风暴单体当前的质心位置,白色细折线是风暴的过去位置,线上的菱形小方点是风暴过去每个体扫时间的质心位置,风暴的前方带十字线的直线是预报的风暴未来位置,两个十字星之间的时间间隔是 15 min。图 7a 是 29 日 03:46 海口雷达的 STI 产品,图中可以看到风暴单体 N8 过去的移动速度和预报速度都比单体 X4 快很多,并且预示未来风暴之间的距离会很快缩小,风暴很快会发生合并。图 7b 02:49 时风暴单体 C7 和 X4 也类似,预示很快就要发生风暴合并。需要注意的是 STI 产品每个体扫完成后会不断修正预报位置,个别时次会出现较大的方向偏差,因此考察单体移动的历史位置,判断风暴移动的大趋势更为准确。比如图 7a 中,根据过去位置做主观外推(图中红色虚线),风暴单体 N8 与 X4 的合并时间比图中两个 STI 产品的交点时间有所提前,与这两个风暴的实际合并时间(04:04)很接近。

## 4 TVS 产品和双偏振参数分析

### 4.1 TVS 产品特征分析

TVS 是专门为龙卷的监测和预警设计的雷达应用产品。在屯昌龙卷发生前 27 min,风暴单体 X4 中 02:27 和 02:33 连续两个体扫雷达探测到 TVS;02:54 龙卷发生之后,02:55—03:07,连续 3 个体扫雷达探测到 TVS;儋州龙卷发生前 5 min,雷达又探测到 TVS。表 1 是这次龙卷过程中雷达探测到的 TVS 产品的部分属性。表中可见,TVS 涡旋的底高为 0.6~1.4 km,平均为 0.9 km。进一步分析,底高的差异是因为龙卷涡旋与雷达的距离不同而造成的,这 6 次的底高都是雷达最低仰角 0.5°探测到的高度,也就是雷达能够探测到的最低高度。龙卷

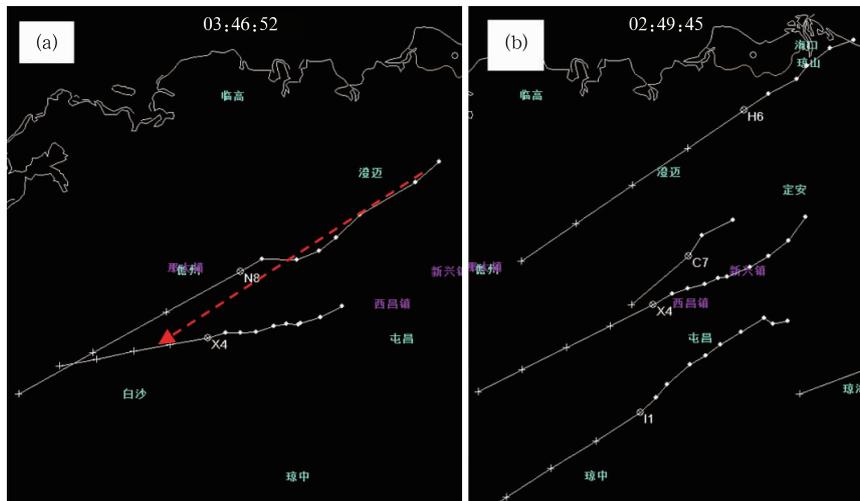


图 7 2019 年 8 月 29 日(a)03:46 和(b)02:49 海口雷达风暴追踪信息(STI)产品  
(图 7a 中红色虚线表示对风暴单体 N8 移动方向的修正)

Fig. 7 The storm tracking information (STI) products of Haikou Radar at (a) 03:46 BT and (b) 02:49 BT 29 August 2019  
(Red dotted line represents the correction of the movement direction of the storm cell N8 in Fig. 7a)

涡旋最大切变所在的高度也都是雷达所能探测到的最低高度 0.6~1.4 km。TVS 涡旋的顶高在 3.4~4.7 km,平均为 3.9 km。TVS 的厚度平均为 3 km。龙卷的最大切变在  $18 \times 10^{-3} \sim 35 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,平均值为  $30 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。儋州龙卷最大切变为  $18 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,比屯昌龙卷小很多,除了涡旋自身的强度有差

异外,这与龙卷和雷达之间的距离增加时雷达波束展宽效应有关。例如 2009 年 7 月 16 日河南省濮阳县发生的 F1 级龙卷(李改琴等,2014),因为距离雷达只有 16 km,雷达探测到的最大切变量达到  $215 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。

表 1 2019 年 8 月 29 日屯昌龙卷和儋州龙卷风暴 TVS 特性表

Table 1 Tunchang tornado and Danzhou tornado storm TVS characteristics on 29 August 2019

时间/BT	02:27	02:33	02:55	03:01	03:07	03:58	平均值
底高/km	0.6	0.7	0.8	0.9	0.9	1.4	0.9
顶高/km	3.4	2.6	4.3	3.4	4.7	4.7	3.9
厚度/km	2.7	2.0	3.5	2.5	3.8	3.3	3.0
最大切变/ $10^{-3} \text{ s}^{-1}$	30	35	33	33	30	18	30
最大切变所在高度/km	0.6	0.7	0.8	0.9	0.9	1.4	0.9

图 8 是海口雷达 0.5°径向速度(图 8a,8c,8e)和径向速度垂直剖面(图 8b,8d,8f)产品。垂直剖面的位置是其径向速度产品上的白线位置,通过龙卷涡旋中心(白色箭头的位 置),剖面线与径向接近垂直,雷达位于龙卷的北偏东方向,在涡旋左侧是离开雷达的正速度,右侧是朝向雷达的负速度。三幅剖面图上可以看到,涡旋的高度只有 2 km 左右,比雷达算出高度略低,这是因为环境风(北偏东方向)很大,涡旋正负速度对的上部被淹没所致。还可以看

到,涡旋强度最底层最强,负速度和正速度都是最低层绝对值最大。局限于雷达的分辨率,粗略估计涡旋的水平尺度在 4 km 左右,中心最强,向外围逐渐减弱。

#### 4.2 双偏振参数分析

龙卷碎片特征(tornadic debris signature, TDS)是指龙卷将地面上的杂物碎片卷到空中,这些杂物碎片方向随机、形状不规则、尺寸很大、介电常数很高,

从而产生高反射率因子  $Z_{HH}$ 、低的差分反射率  $Z_{DR}$  和异常低的零滞后相关系数  $CC$  的双偏振雷达探测特征。自从 Ryzhkov et al(2002)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碎片特征 TDS 之后,许多探测研究表明,在 C 波段和 X 波段双偏振雷达上同样探测到了 TDS。2015 年 10 月 4 日广东省佛山市台风彩虹外围的龙卷, X 波段雷达曾经探测到 TDS 特征(张建云等, 2018), TDS 特征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。

Kumjian and Ryzhkov(2008)曾经提到在龙卷被雨区包裹的情况下,雨滴可能与龙卷卷起的杂物混杂。这样  $Z_{DR}$  会因为雨滴的存在而升高,从而导致  $Z_{DR}$  不是很低。但是任何非气象反射物,如混杂在水成物中的龙卷卷起的杂物碎片,都会使相关系数  $CC$  明显降低。因此在有雨滴存在的情况下,不能过于强调  $Z_{DR}$  很低的 TDS 特征,而  $CC$  是龙卷监

测最有效的双偏振参量,对此, Ryzhkov et al(2005)也有同样的论述。

在这次龙卷过程中,  $CC$  低值的 TDS 特征非常清楚,而  $Z_{DR}$  低值的特征不明显。图 9 是 03:01 海口雷达  $0.5^\circ$  的反射率因子(图 9a)、径向速度(图 9b)和零滞后相关系数(图 9c)。图中双箭头指向的位置是龙卷涡旋特征(图 9b 中 TVS)的位置(使用双偏振雷达 PUP 软件的光标联动功能,双箭头同时指向不同产品的同一坐标位置),反射率因子值大于 50 dBz,这个位置位于上文所述主风暴单体 X4 的后部、后面追上并入的单体 C7 的前部,2 个风暴单体合并的接点位置;径向速度产品指向正负速度对位置,正速度达到  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,负速度为  $-13.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,速度差为  $38.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;零滞后相关系数低于 0.8,最低值为 0.76,这是典型的 TDS 特征。

图 10 是 8 月 29 日 04:04 海口雷达  $0.5^\circ$  的反射率因子(图 10a)、径向速度(图 10b)和零滞后相关系数(图 10c)。图中双箭头指向的位置是龙卷涡旋特征(图 10b 中 TVS)的位置,反射率因子值大于 55 dBz,

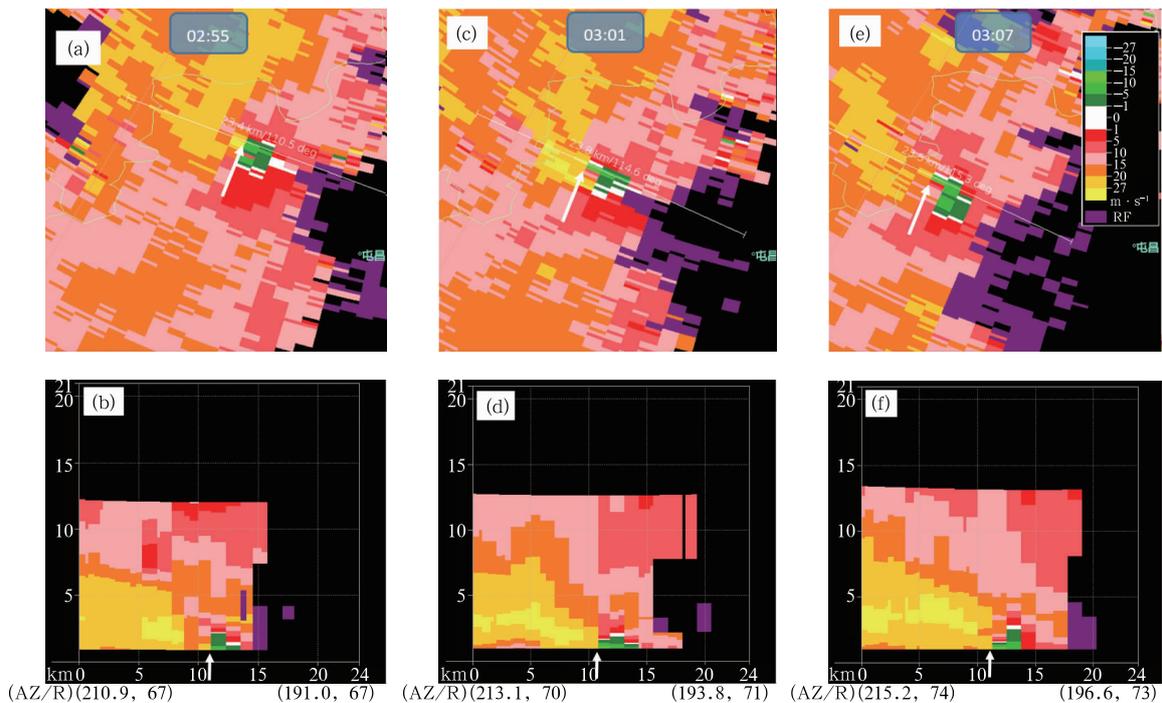


图 8 2019 年 8 月 29 日(a,b)02:55,(c,d)03:01,(e,f)03:07

海口雷达(a,c,e)径向速度和(b,d,f)沿图 8a,8c,8e 中白线径向速度垂直剖面产品

Fig. 8 Radial velocity (a, c, e) and radial velocity cross-section (b, d, f) along white line in Figs. 8a, 8c, 8e of Haikou Radar at (a, b) 02:55 BT, (c, d) 03:01 BT, (e, f) 03:07 BT 29 August 2019

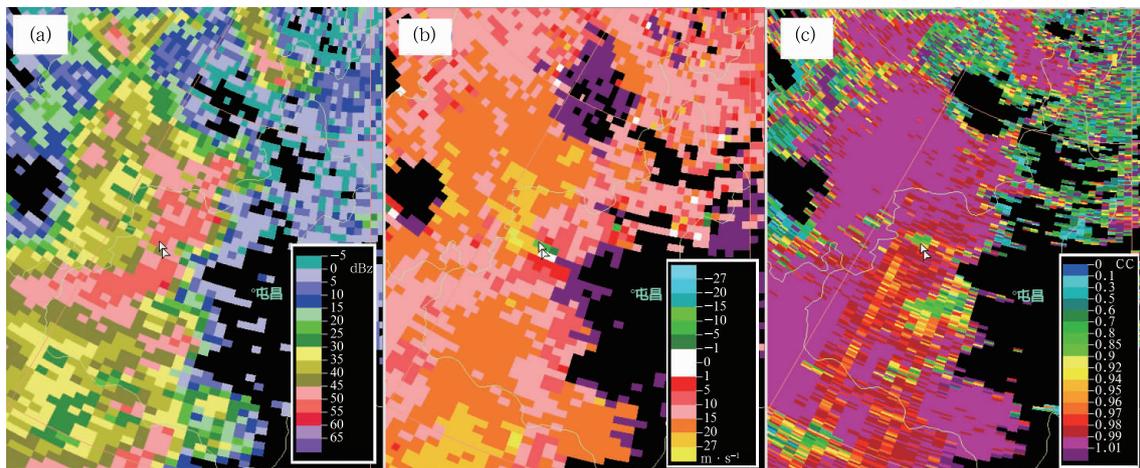


图 9 2019 年 8 月 29 日 03:01 海口雷达 0.5°(a)反射率因子,(b)径向速度,(c)零滞后相关系数  
 Fig. 9 Reflectivity (a), radial velocity (b) and co-polar correlation coefficient (c) at 0.5° elevation of Haikou Radar at 03:01 BT 29 August 2019

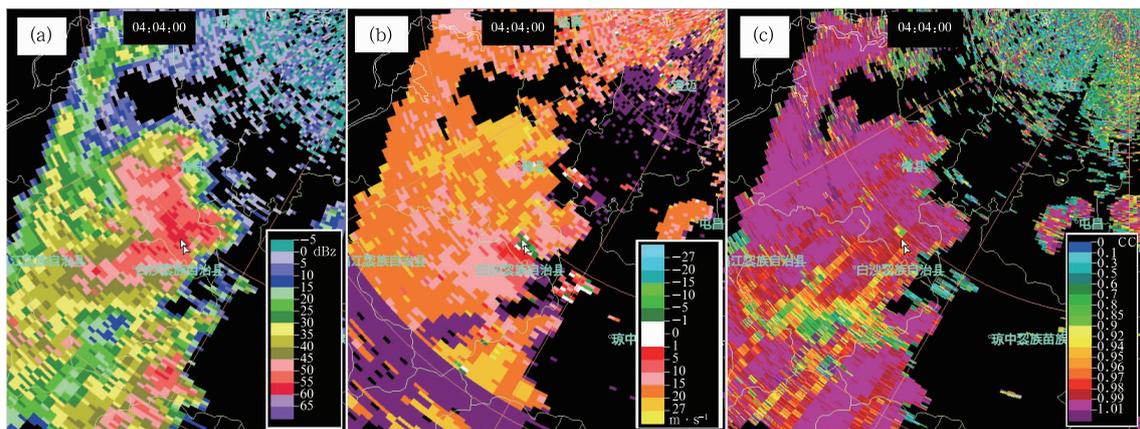


图 10 同图 9,但为 04:04  
 Fig. 10 Same as Fig. 9, but for 04:04 BT

这个位置位于上文所述风暴单体 X4 的后部、N8 的前部,2 个风暴单体合并的接点位置;径向速度产品指向正负速度对,正速度达到  $34.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,负速度为  $-7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,速度差为  $41.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;零滞后相关系数低于 0.88,最低为 0.85。

图 11 列出了零滞后相关系数 CC 随时间的变化情况,图 11a~11d 是海口雷达 0.5°平均径向速度 V(27 号产品),图 11e~11h 是 CC(160 号产品)。图 11a 和 11e 的时间相同,位置相同,图中双箭头指向相同的位置,从 02:55(图 11a)到 03:29(图 11d)白色虚线箭头所指位置都有清晰的正负速度对,这个速度对的位置是龙卷涡旋特征(TVS)的位置。

右侧相同的位置表示了相关系数的状态,03:01(图 11f),TVS 位置的 CC 值在 0.9 以下,而 02:55(图 11e)TVS 位置的 CC 值比周围低得很少,因此可以认为这是龙卷刚刚发生。实地调查屯昌龙卷 03:03 之后消散,但从图中可以看到这个 CC 的低值的特征一直维持到 03:12(图 11g)之后,甚至到 03:29 还可以看到对应于 TVS 的位置,CC 的值还比其周围的低(大约 0.94 左右)。分析其原因,应该是地面的杂物碎片一旦被卷到 TVS 的涡旋中,往下落地的过程很慢,而在龙卷开始着地时,只是一瞬间就把地面的杂物卷到空中,时间很短,因此 02:55—03:01 期间 CC 值变化很大。

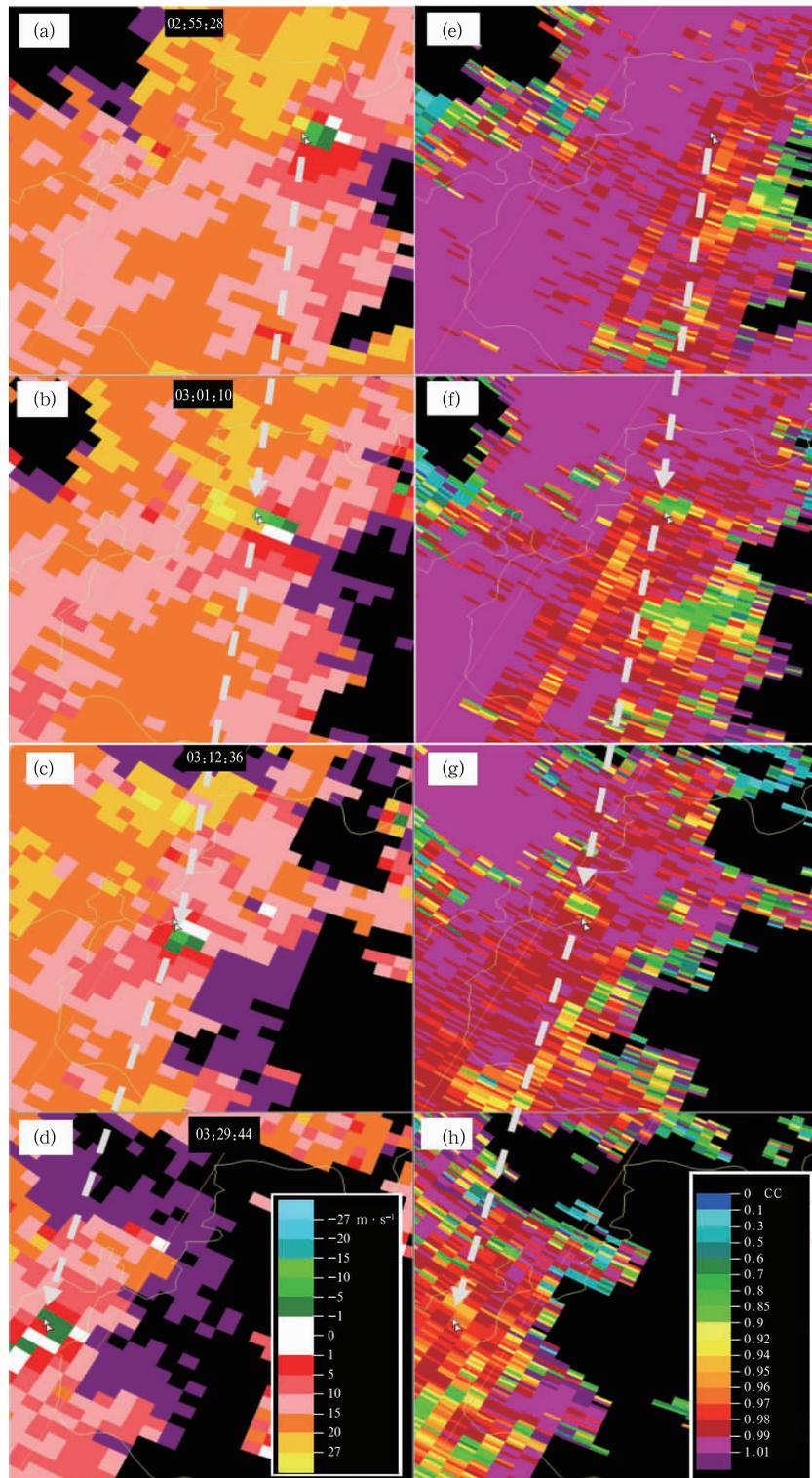


图 11 2019 年 8 月 29 日 (a,e)02:55,(b,f)03:01,(c,g)03:12,(d,h)03:29 海口雷达  $0.5^\circ$  平均径向速度(a~d)和零滞后相关系数(e~h)

Fig. 11 Haikou Radar  $0.5^\circ$  radial velocity (a~d) and co-polar correlation coefficient (e~h) at (a, e) 02:55 BT, (b, f) 03:01 BT, (c, g) 03:12 BT, (d, h) 03:29 BT 29 August 2019

儋州龙卷从 03:58 开始,CC 的值 04:04 突然减低到 0.8 以下(图略),之后也维持了超过 12 min。CC 的低值在 03:01 和 04:04 两个时次最清晰,因为雷达波束随距离展宽的效应,不便于分析 TDS 的尺度大小,径向方向,雷达的距离库长为 250 m,分析看到 CC 的低值区大约占 10 个库长,大约 2.5 km。

## 5 结论与讨论

综合以上分析,得到以下结论:

(1)龙卷发生在台风杨柳右前方大约 370 km 的台风外围雨带中,雨带中较强风暴单体 X4 的强烈发展和转向,拦截了后面移动速度快的较小风暴单体 C7 和 N8,造成风暴合并,引发龙卷产生。

海南省这次两处龙卷的发生都伴有风暴的合并,屯昌风暴单体合并并在龙卷发生后 12 min,儋州风暴合并并在龙卷发生前 5 min。因此在环境条件有利于龙卷产生的条件下,监测风暴的合并对于龙卷预警无疑是有实际应用价值的。监测表明,STI 产品能给出风暴移动的轨迹,预示风暴未来的合并,是监测风暴合并的有用工具。

(2)屯昌龙卷发生前 27 min,儋州龙卷发生前 5 min,雷达探测到了 TVS,可见 TVS 产品是龙卷探测和预警的有效工具。探测到的 TVS 涡旋的底高都是雷达能够探测到的最低高度,平均为 0.9 km。TVS 涡旋的顶高在 3.4~4.7 km,平均为 3.9 km。TVS 的厚度平均为 3 km。龙卷的最大切变在  $18 \times 10^{-3} \sim 35 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,平均值为  $30 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。最大切变也都发生在雷达能探测到的最低高度。

(3)两次龙卷发生时,龙卷涡旋处的 CC 值都非常低,03:01 低至 0.76。龙卷发生后,地面杂物碎片被卷到空中,CC 值突然降低;龙卷消亡后,CC 的低值能维持 10 min 以上,说明杂物碎片会在空中停留较长时间。CINRAD/SA 是大功率远距离探测雷达,最低仰角  $0.5^\circ$ ,在 50 km 以外,雷达波束中心高度已经在 600 m 以上,即使探测到 TVS,也无法知道地面是否发生了龙卷,而 TDS 特征可以帮助确认龙卷是否已经发生,尽管 TDS 对龙卷的预警没有提前时间,但对于风暴移动的下流的预警是有意义的,这个例子中看到龙卷发生后,CC 的值突然增大,这可以明确判断龙卷的发生,但是龙卷消亡之后,尽管对应 TVS 位置 CC 的值会逐渐减小,但仍然低于 TVS 周围的价值,因此对于判断龙卷的消亡需要结合

更多的信息做进一步深入研究。

## 参考文献

- 黄先香,俞小鼎,炎利军,等,2019a. 1804 号台风“艾云尼”龙卷分析[J]. 气象学报,77(4):645-661. Huang X X, Yu X D, Yan L J, et al, 2019a. An analysis on tornadoes in Typhoon Ewiniar[J]. Acta Meteor Sin, 77(4):645-661(in Chinese).
- 黄先香,俞小鼎,炎利军,等,2019b. 珠江三角洲台风龙卷的活动特征及环境条件分析[J]. 气象,45(6):777-790. Huang X X, Yu X D, Yan L J, et al, 2019b. Analysis of typhoon-tornado activity characteristics and environmental condition in the Pearl River Delta[J]. Meteor Mon, 45(6):777-790(in Chinese).
- 李彩玲,黄先香,蔡康龙,等,2020. 2019 年中国龙卷等对流大风过程及灾情特征[J]. 气象科技进展,10(1):7-14. Li C L, Huang X X, Cai K L, et al, 2020. Characteristics of tornado activity in China in 2019[J]. Adv Meteor Sci Technol, 10(1):7-14(in Chinese).
- 李彩玲,炎利军,李兆慧,等,2016. 1522 号台风“彩虹”外围佛山强龙卷特征分析[J]. 热带气象学报,32(3):416-424. Li C L, Yan L J, Li Z H, et al, 2016. Analysis of a tornado in outside-region of Typhoon Mujigae in 2015[J]. J Trop Meteor, 32(3):416-424(in Chinese).
- 李彩玲,杨宇声,郑启康,等,2007. 一次台风暴雨中的龙卷风天气[J]. 广东气象,29(3):26-29. Li C L, Yang Y S, Zheng Q K, et al, 2007. Analysis on a tornado event occurring in a typhoon inducing rainstorm[J]. Guangdong Meteor, 29(3):26-29(in Chinese).
- 李改琴,许庆娥,吴丽敏,等,2014. 一次龙卷风天气的特征分析[J]. 气象,40(5):628-636. Li G Q, Xu Q E, Wu L M, et al, 2014. Characteristics analysis of tornado weather[J]. Meteor Mon, 40(5):628-636(in Chinese).
- 李兆慧,王东海,麦雪湖,等,2017. 2015 年 10 月 4 日佛山龙卷过程的观测分析[J]. 气象学报,75(2):288-313. Li Z H, Wang D H, Mai X H, et al, 2017. Observations of the tornado occurred at Foshan on 4 October 2015[J]. Acta Meteor Sin, 75(2):288-313(in Chinese).
- 陆琛,魏鸣,2020. 2019 年 8 月 29 日海南儋州台风雨带中夜间龙卷的多源资料分析[J]. 科学技术与工程,20(20):8028-8042. Lu C, Wei M, 2020. Multi-data analysis of night tornadoes of Danzhou typhoon belt in Hainan Province on August 29 th, 2019[J]. Sci Technol Eng, 20(20):8028-8042(in Chinese).
- 王秀明,俞小鼎,2019. 热带一次致灾龙卷形成物理过程研究[J]. 气象学报,77(3):387-404. Wang X M, Yu X D, 2019. A study on the physical process involved in the genesis of a severe tropical tornado[J]. Acta Meteor Sin, 77(3):387-404(in Chinese).
- 张建云,张持岸,葛元,等,2018. 1522 号台风外围佛山强龙卷 X 波段双偏振多普勒雷达反射率因子特征[J]. 气象科技,46(1):163-169. Zhang J Y, Zhang C A, Ge Y, et al, 2018. Characteristics of X-band dual-polarization Doppler radar products during strong tornado around Typhoon Mujigae in Foshan[J]. Meteor Sci

- Technol, 46(1):163-169(in Chinese).
- 张培昌,朱君鉴,魏鸣,2019.龙卷形成原理与天气雷达探测[M].北京:气象出版社:60-65. Zhang P C, Zhu J J, Wei M, 2019. Tornado Formation Principle and Weather Radar Detection[M]. Beijing:China Meteorological Press:60-65.
- 张涛,关良,郑永光,等,2020.2019年7月3日辽宁开原龙卷灾害现场调查及其所揭示的龙卷演变过程[J].气象,46(5):603-617. Zhang T, Guan L, Zheng Y G, et al, 2020. Damage survey of the 3 July 2019 Kaiyuan tornado in Liaoning Province and its evolution revealed by disaster[J]. Meteor Mon, 46(5):603-617 (in Chinese).
- 郑艳,俞小鼎,任福民,等,2017.海南一次超级单体引发的强烈龙卷过程观测分析[J].气象,43(6):675-685. Zheng Y, Yu X D, Ren F M, et al, 2017. Analysis on a severe tornado process in Hainan triggered by supercell[J]. Meteor Mon, 43(6):675-685 (in Chinese).
- 郑永光,蓝渝,曹艳察,等,2020.2019年7月3日辽宁开原EF4级强龙卷形成条件、演变特征和机理[J].气象,46(5):589-602. Zheng Y G, Lan Y, Cao Y C, et al, 2020. Environmental conditions, evolution and mechanisms of the EF4 tornado in Kaiyuan of Liaoning Province on 3 July 2019[J]. Meteor Mon, 46(5):589-602.
- 郑媛媛,张备,王啸华,等,2015.台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析[J].气象,41(8):942-952. Zheng Y Y, Zhang B, Wang X H, et al, 2015. Analysis of typhoon-tornado weather background and radar echo structure[J]. Meteor Mon, 41(8):942-952 (in Chinese).
- 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[J].气象,41(2):182-191. Zhu J S, Liu J, Bian Z, et al, 2015. Analysis of cell merger and vortex signature during generation of tornado in Anhui based on Doppler radar observation[J]. Meteor Mon, 41(2):182-191 (in Chinese).
- 朱文剑,盛杰,郑永光,等,2016.1522号“彩虹”台风龙卷现场调查与中尺度特征分析[J].暴雨灾害,35(5):403-414. Zhu W J, Sheng J, Zheng Y G, et al, 2016. Damage survey and mesoscale features analysis on tornado in outer rain-band of Typhoon “Mujigae” on 4 October 2015[J]. Torr Rain Disa, 35(5):403-414 (in Chinese).
- Kumjian M R, Ryzhkov A V, 2008. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms[J]. J Appl Meteor Climatol, 47(7):1940-1961.
- Lee B D, Jewett B F, Wilhelmson R B, 2006a. The 19 April 1996 Illinois tornado outbreak. Part I: cell evolution and supercell isolation[J]. Wea Forecasting, 21(4):433-448.
- Lee B D, Jewett B F, Wilhelmson R B, 2006b. The 19 April 1996 Illinois tornado outbreak. Part II: cell mergers and associated tornado incidence[J]. Wea Forecasting, 21(4):449-464.
- Ryzhkov A V, Burgess D, Zrnicek D, et al, 2002. Polarimetric analysis of a 3 May 1999 tornado[C]//Preprints 21st Conference on Severe Local Storms. San Antonio: American Meteorological Society.
- Ryzhkov A V, Schuur T J, Burgess D W, et al, 2005. Polarimetric tornado detection[J]. J Appl Meteor, 44(5):557-570.
- Sabones M E, Agee E M, Akridge M, 1996. The Palaski county and West Lafayette, Indiana, tornadoes, 26-27 April, 1994: a case study of supercell (mesocyclone) and squall-line bow echo interaction[C]//Preprints 18th Conference on Severe Local Storms. San Francisco, CA: American Meteorological Society:746-750.
- Wolf R, Przybylinski R W, Berg P, 1996. Observations of a merging bowing segment and supercell[C]//Preprints 18th Conference on Severe Local Storms. San Francisco, CA: American Meteorological Society:740-745.
- Wurman J, Richardson Y, Alexander C, et al, 2007. Dual-Doppler and single-Doppler analysis of a tornadic storm undergoing mergers and repeated tornadogenesis[J]. Mon Wea Rev, 135(3):736-758.