黄先香,俞小鼎,炎利军,等,2019.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, 2019. Analysis of typhoon-tornado activity characteristics and environmental condition in the Pearl River Delta[J]. Meteor Mon, 45(6):777-790(in Chinese).

珠江三角洲台风龙卷的活动特征及环境条件分析*

黄先香[1,2] 俞小鼎[3] 炎利军[1] 李彩玲[1] 李兆明[1]

1 佛山市龙卷风研究中心,广东佛山 528000

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081

3 中国气象局气象干部培训学院,北京 100081

提 要: 利用常规观测、自动气象站、多普勒雷达等资料分析珠江三角洲台风龙卷的活动特征及其产生的环境条件。结果表明:台风龙卷发生在6—10月,时间多为10—20时,出现在台风登陆后1.3~21.3 h的时段内;多数龙卷位于台风中心的东北象限,台风中心在广东湛江—广西东南部或北部湾附近时是珠江三角洲龙卷发生的高风险期。高层辐散、低层辐合及中低空强东南急流在珠江口附近叠加是龙卷产生的有利环流背景。强或弱龙卷环境条件的共同特征为低抬升凝结高度、强深层和低层垂直风切变及较大风暴相对螺旋度(SRH),主要差异是强龙卷的深层和低层垂直风切变与SRH更大;相似台风路径下,有/无龙卷环境条件的明显差异在于0~1 km低层垂直风切变和SRH,两值越大出现超级单体或中气旋的可能性越大,龙卷发生概率也就越高。台风龙卷风暴母体属于低质心的微型超级单体风暴;低层有强或中等强度中气旋,有时强中气旋中心伴有龙卷涡旋特征(TVS);龙卷出现在钩状回波顶端或TVS附近。与西风带超级单体龙卷相比,台风龙卷中气旋的尺度更小、垂直伸展高度更低。

关键词: 台风龙卷,活动特征,环境条件,雷达回波特征,相似路径台风,珠江三角洲

中图分类号: P445 **文献标志码:** A **DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.06.004

Analysis of Typhoon-Tornado Activity Characteristics and Environmental Condition in the Pearl River Delta

HUANG Xianxiang[1,2] YU Xiaoding[3] YAN Lijun[1] LI Cailing[1] LI Zhaoming[1]

1 Foshan Tornado Research Center of Guangdong Province, Foshan 528000

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on the data of conventional observation, automatic weather station and Doppler weather radar, this paper analyzes the activity characteristics and environmental condition of the typhoon-tornadoes in the Pearl River Delta. The results show that tornadoes occur from June to October and the time is concentrated in the period from 10:00 BT to 20:00 BT. Tornadoes occur between 1.3 h and 21.3 h after typhoon landfall. A strong preference for tornado occurrence is in the northeast quadrant with respect to land-falling typhoon center. High risk periods of tornado genesis in the Pearl River Delta correspond to the typhoon center locating between Zhanjiang of Guangdong and southeast Guangxi or Beibu Gulf. The synoptic situation of upper-level divergence, low-level convergence, and superimposition of strong southeasterly

* 国家自然科学基金项目(41175043和41675023)、广东省科技厅社会发展科技协同创新体系建设专项(2019B020208015)、灾害天气国家重点实验室开放课题(2018LASW-B18)共同资助

2018年4月16日收稿; 2018年8月6日收修定稿

第一作者:黄先香,主要从事强对流天气预警研究. Email:fsqxj@163.com

通信作者:俞小鼎,主要从事强对流天气的多普勒天气雷达探测和预警以及临近天气预报研究. Email:xdyu1962@126.com

jets at mid- and low-layer over the Pearl River Delta are conducive to the weather background of tornadoes. The common environmental conditions for strong or weak tornado genesis appear to be low LCL, strong deep-layer and low-level vertical wind shear (VWS) and high storm relative helicity (SRH). The major difference between weak and strong tornado cases is that the latter has stronger deep-layer and low-level VWS and greater SRH. The significant diversities are VWS at 0－1 km and SRH between tornadic and nontornadic environmental conditions under the similar typhoon tracks. With the higher values of VWS and SRH, the possibility of supercells and mesocyclones increases, thus tornadoes are most likely to be detected. Tornado storms are mini supercell storms with low centriod. Strong or moderate mesocyclones are likely to be detected through the radial velocity data of the CINRAD/SA radar at low level, and significant tornadic vortex signature (TVS) may be found in the center of mesocyclones. The tornadoes lie in the interior of the hook echo or near TVS. Compared with the supercell tornadoes in the westerlies, mesocyclones of typhoon tornadoes are smaller in scale and lower in stretching height.

Key words: typhoon tornado, activity characteristic, environmental condition, radar echo feature, typhoons in similar tracks, Pearl River Delta

引 言

龙卷为直径几十米到几百米的小尺度天气系统，较强龙卷(EF2级或以上)移动速度快，所产生的地面风速强(最强风速可达140 m·s^{-1}以上)，能在短时间内造成重大人员伤亡和财产损失(俞小鼎等，2006a；2006b；2008；郑媛媛等，2009；Meng and Yao，2014；曾明剑等，2016；郑永光等，2016)。相对美国而言，我国龙卷发生频率要低得多，不及美国龙卷发生频率的十分之一，不过仍常有发生，强龙卷主要分布在江淮地区、两湖平原、华南地区、东北地区和华北地区东南部等平原地区，年均发生龙卷的次数不低于85次，EF1或以上级龙卷年均21次，近半个世纪龙卷数量呈下降趋势(范雯杰和俞小鼎，2015)。由于监测密度不够、探测技术局限和真实龙卷数值模拟的困难，目前对龙卷的研究仍然是中小尺度天气学的难点。美国是龙卷最为多发的国家，在龙卷探测和研究方面取得了大量成果，先后发现了中气旋(Donaldson，1970)、龙卷涡旋特征(TVS)(Brown et al，1978)，研究了有利于龙卷发生的环境条件(Brown et al，1978；Doswell III and Burgess，1988；Brooks et al，2003)，找出了龙卷发生的关键因子包括对流有效位能(CAPE)、深层垂直风切变、低层垂直风切变、抬升凝结高度(LCL)、风暴相对螺旋度(SRH)等(Brooks et al，2003；McCaul，1991)，提出了龙卷超级单体风暴的模型(Lemon and Doswell III，1979)和多要素综合的显著龙卷参数(STP)等(Thompson et al，2004)。Davies-Jones(1984)、Schultz and Cecil(2009)以及Edwards(2012)还分类研究与总结了美国大平原龙卷和热带气旋外围龙卷气候特点以及两类龙卷发生环境的差异性。美国飓风龙卷主要分布在墨西哥湾和大西洋沿岸，虽然1950年以来飓风龙卷占总龙卷量的比重为3.4%，但是1948—1986年期间大约59%的飓风产生龙卷；飓风龙卷主要出现在飓风移动方向的右前象限，该区域中CAPE不大但低层垂直风切变较强，相对螺旋度较大，抬升凝结高度很低。Schultz and Cecil(2009)指出，84%的飓风龙卷发生在登陆前12 h至登陆后48 h内，峰值是登陆后0～12 h；飓风龙卷的数量和强度与飓风强度和尺度有一定对应关系(McCaul，1991)；飓风龙卷的移动路径最长可达76 km(Edwards，2012)。我国龙卷主要分为西风带系统中的龙卷和热带气旋外围龙卷(以下简称台风龙卷)。廖玉芳等(2003)、李改琴等(2014)、俞小鼎等(2006b；2008)以及张小玲等(2016)分析西风带龙卷个例指出，龙卷发生在中等偏强的大气热力不稳定环境条件下，龙卷位于钩状回波的顶端。郑媛媛等(2009)研究3次超级单体龙卷产生的背景和雷达特征指出，龙卷产生在中等大小的CAPE、强垂直风切变和低LCL的条件下，与非龙卷超级单体风暴相比，导致强龙卷的中气旋底高偏低，基本在1 km以下。郑艳等(2017)分析海南一次超级单体龙卷过程得出，海陆风效应增强了低空垂直风切变，大的CAPE和低的LCL是有利环境条件，龙卷发生在勾状回波低层反射率因子最大梯度区域靠近弱

回波区域一侧。刘娟等(2009)、唐小新和廖玉芳(2007)、张晰莹等(2013)、陈元昭等(2016)、朱江山等(2015)、郑永光等(2016)和王易等(2018)分析了超级单体龙卷个例的风暴环境条件、雷达特征以及龙卷强度估计等。刁秀广等(2014)则探讨了非超级单体龙卷的雷达特征。钱维宏等(2017)采用风暴尺度数值模式分析了有利于龙卷发生的扰动环境场。陈联寿和丁一汇(1979)和沈树勤(1990)对台风龙卷的研究指出,龙卷产生在台风的一定部位,主要位于台风的右前象限,部分出现在右后方,距离台风中心300～400 km;郑媛媛等(2015)对台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析表明,龙卷产生的环境场为相对较弱的 CAPE、强低空风垂直切变以及大的 SRH;在台风影响环境下导致龙卷的风暴属于微型超级单体风暴,中气旋尺度较小,风暴垂直伸展高度较低。

珠江三角洲(以下简称珠三角)是龙卷特别是台风龙卷较为高发的地区之一,近 10 年华南两次最强台风龙卷(0606 号台风派比安外围系列龙卷和 1522 号台风彩虹外围系列龙卷)都发生在该区域。珠三角作为粤港澳大湾区的核心,经济社会发达、人口稠密,气象灾害极易形成连锁反应和放大效应,加强龙卷天气分析对防灾意义重大。但因龙卷时空尺度小、突发性强、发生概率小,因而样本不多,目前对珠三角台风龙卷的研究仍局限于个例分析(李兆慧等,2017;黄先香等,2018;李彩玲等,2016;朱文剑等,2016),对于珠三角台风龙卷的活动特征及环境条件的研究还很少,龙卷的预警预报和数值模拟仍是难点。陶祖钰等(2016)指出,小概率的极端天气可以用相似法进行统计预报。本文利用 MICAPS 常规观测资料、区域自动气象站、多普勒天气雷达资料和 FNL/NCEP 分析资料等,对珠三角台风龙卷的活动特征及环境条件进行分析,旨在归纳历史上台风龙卷的统计规律,为台风龙卷这类小概率、高影响天气的监测预警和短临预报提供参考。

1　资料来源

龙卷资料主要来源于广东省气候中心龙卷档案、珠三角各市气象灾害档案、《中国气象灾害年鉴》等。表 1 给出了珠三角台风龙卷记录的灾情统计特征(总共有 11 次台风龙卷过程、出现了 16 个龙卷)。需要说明的是,由于 2005 年以前的互联网和媒体不够发达、智能手机不普及,灾害发生后主要是通过实地灾情调查、走访,再结合雷达资料等确认龙卷过程,难免会出现一些漏记情况。2005 年以来,龙卷过程登记较为详细完备;特别是近 3 年来,除了实地调查走访和群众手机视频图像外,还有无人机连续大范围的灾情航拍,再加上多普勒雷达、稠密自动气象站等资料的综合判断,使得龙卷灾害的时空特征能够全方位呈现,确保了龙卷样本的客观真实。

表 1　珠三角台风龙卷的灾情统计表

Table 1　Statistics of disaster situations of typhoon tornadoes in the Pearl River Delta

台风个例	年/月/日	时间/BT	地点	灾情概述
6403 号	1964/7/2	22:40	佛山禅城张槎	1 人死亡,24 人伤,毁屋 42 间
7406 号	1974/6/13	14:30	佛山南海九江镇	46 人伤,直接经济损失 68 万元
9403 号	1994/6/9	06:50—07:10	佛山南海盐步里水	14 人死亡,291 人伤,毁屋 900 间,损失 3300 万元
		07:10—07:20	广州白云花都	21 人伤,毁屋 550 间,200 多个花鸟市场被吹毁
0508 号“天鹰”	2005/7/30	10:00	广州番禺区榄核	2 人受伤,大树连根拔起,多处民房受损
0606 号“派比安”	2006/8/4	10:50—11:00	佛山南海西樵丹灶镇	2 人死亡,70 多人伤
		13:10—13:20	佛山三水白坭镇	2 人死亡
		15:25	佛山南海大沥镇	6 人死亡,172 人伤,直接经济损失超 1 亿元
		13:00	肇庆高要金渡镇	无人员伤亡
		14:10	清远石角镇	无人员伤亡
0817 号“海高思”	2008/10/4	10:58	江门恩平沙湖镇	无人员伤亡
1306 号“温比亚”	2013/7/2	07:00	佛山三水西南街道	龙卷路径长 2 km,宽 100 m;1 人伤,猪死 200 余头
1309 号“飞燕”	2013/8/3	06:30	佛山三水芦苞镇	龙卷路径长 1 km,宽 100 m;3 人伤,损失 830 万元
1311 号“尤特”	2013/8/15	18:30—18:40	东莞道滘镇	1 人死亡,17 人伤,损失约 1000 万元
1415 号“海鸥”	2014/9/16	23:20	佛山三水白坭镇	造成部分厂房倒塌、工棚损毁、树木折断
1522 号“彩虹”	2015/10/4	15:28—16:03	佛山顺德禅城南海	4 人死亡,80 人伤,损失超 7 亿元
		17:00	广州番禺区南村镇	3 人死亡,134 人伤,损失 1.3 亿元

2 台风龙卷的活动特征

2.1 台风龙卷的空间分布特征

图1给出了珠三角区域陆上台风龙卷的空间分布情况。由图1a可见,发生在佛山的台风龙卷个数最多,有10个,其次是广州2个,江门、肇庆、东莞、清远各记录到1个;深圳、珠海、惠州和中山没有陆上台风龙卷记录;同时还可以看到,台风龙卷给佛山造成的灾害也是最严重的,共造成29人死亡。结合地形图(图1b)可见,台风龙卷的发生频率与地形因素关系密切,龙卷多发的佛山和广州地区,位于广东省中南部,地处珠三角腹地,地势较平坦,北面和西面多山地和丘陵,东南邻"喇叭形"的珠江口,这种地形易导致强对流天气多发、频发,也可能促进龙卷的生成。另外,从地理特征看,江河、湖泊等对龙卷的生成也有一定的促进作用。台风龙卷集中发生的区域恰好对应了西江、北江和东江所包围的区域,里面又含有东平水道、市桥水道、沙湾水道等,河网较多,低层暖湿气流在河道上空由于摩擦减小会有所加速,有利于东南气流的加速和汇聚。在合适的天气形势下,极易导致大气对流强烈发展,有助于龙卷的生成。

以上分析表明,台风龙卷具有在某地频发的特征,其发生与地形地貌等因素有一定关系,龙卷易出现在地形平坦地区,山地、丘陵等地形不利于龙卷产生。

2.2 台风龙卷的时间分布特征

图2a给出了珠三角台风龙卷的逐月分布。可以看出,珠三角台风龙卷出现在6—10月热带气旋活跃期,其中以8月最为多发,占总数的44%,该月对应了热带气旋在华南西部登陆的高峰期,也与该时期广东受到台风影响最多这一统计事实相吻合。从台风龙卷发生起始时间的分布(图2b)来看,台风龙卷主要发生在白天,其中有11个台风龙卷的发生起始时间在10—20时,占到总数的69%,该时段也正是经过太阳辐射后、大气层结最不稳定、强对流天气最易发生的时段;此外,早晨06—07时也有3个台风龙卷发生,表现为一个小峰值;夜间20时至次日06时台风龙卷较少发生。

2.3 引发龙卷的台风路径

图3给出了引发珠三角龙卷的台风路径分布。可以看出,西行的热带气旋(以下简称台风)易在珠三角地区产生龙卷,台风龙卷多数出现在登陆台风中心的东北象限,极少数出现在登陆台风中心的东南象限,如1311号"尤特"外围的东莞龙卷。这与陈联寿和丁一汇(1979)研究指出龙卷产生在台风的一定部位,主要位于台风的右前象限,部分出现在右后方的论述,以及Schultz and Cecil(2009)统计美国1950—2007年飓风龙卷最多发区域在方位340°～120°的结论是相一致的。其中,9403号台风、0606号"派比安"、1306号"温比亚"、1311号"尤特"和1522号"彩虹"这5个台风的路径最为相似,其登陆点集中在广东阳西—湛江一带,登陆后台风维持西北行,当台风中心位于广东湛江—广西东南部的钦州、玉林、贵港一带时,珠三角地区易出现龙卷。而且,几个强龙卷过程(9403号台风、0606号"派比安"和1522号"彩虹")都产生在这类路径下。所以,可以把这类台风路径定义为"珠三角台风龙卷第一影响路径"或"珠三角台风龙卷高影响路径"。登陆后的台风中心位于广东湛江—广西东南部一带时是珠三角台风龙卷产生的高风险时段,广东湛江—广西东南部一带是珠三角台风龙卷产生的高风险区(图3a红色虚点椭圆),龙卷发生地与台风中心的距离在350～450 km。另外,6403号台风、7406号台风、0508号"天鹰"、1309号"飞燕"、1415号"海鸥"这几个台风路径比较相似,其登陆点集中在海南东北部,登陆后台风维持偏西行进入北部湾,当台风中心位于海南岛中北部—北部湾一带时,珠三角地区也容易出现龙卷。不过由于这类台风路径相对偏南,其在珠三角地区产生的龙卷过程一般强度较弱。可以把这类台风路径定义为"珠三角台风龙卷第二影响路径"。登陆后的台风中心位于海南岛中北部—北部湾一带时是珠三角台风龙卷产生的风险时段,海南岛中北部—北部湾一带是珠三角台风龙卷产生的风险区(图3a蓝色虚点椭圆),龙卷发生地与台风中心的距离在500～610 km。统计还表明,珠三角台风龙卷均发生在台风登陆以后,以台风在中国第一次登陆时间来计算,珠三角台风龙卷发生在台风登陆后1.3～21.3 h的时段内,其中约82%出现在台风登陆后的9～15 h,因此珠三角台风龙卷的最大威胁主要在台风登陆后24 h内;龙卷发生

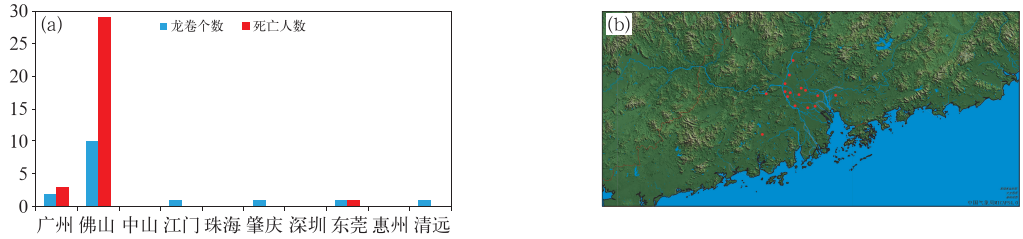


图 1　珠三角台风龙卷

(a)龙卷个数和死亡人数，(b)龙卷起始位置(红点)

Fig. 1　Distribution of tornadoes in the Pearl River Delta

(a) tornado records and death toll, (b) tornado falling areas (red dots)

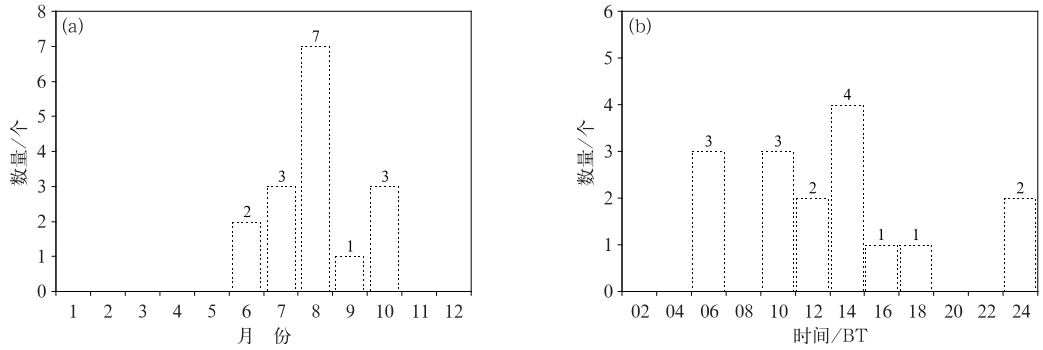


图 2　珠三角台风龙卷记录的逐月分布(a)和日变化分布(b)

Fig. 2　Monthly (a) and hourly (b) distributions of tornadoes in the Pearl River Delta

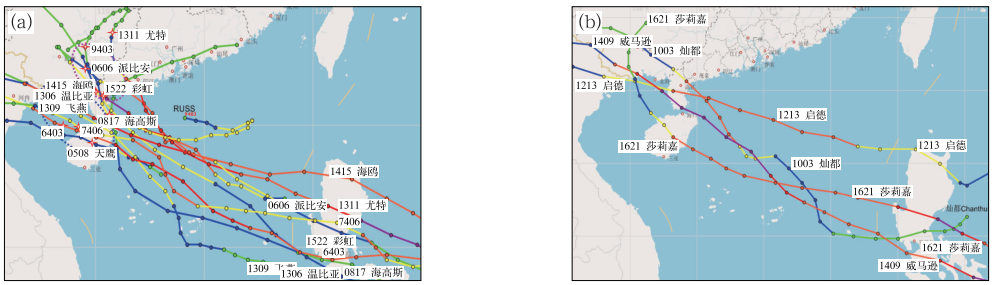


图 3　引发珠三角龙卷的台风路径(a)及相似台风路径下珠三角无龙卷产生的台风个例(b)

(图 3a 中的星号表示出现龙卷时的台风中心位置，蓝/红色虚点区为风险区/高风险区)

Fig. 3　The contrastive tracks of tornadic typhoons (a) and nontornadic typhoons (b)

(The higher risk area and risk area are marked by red and blue dashed lines, respectively;
Star signals represent positions of the typhoon center at the time of tornado genesis in Fig. 3a)

时，台风强度在热带低压到强台风量级之间，其中维持在热带风暴以上量级的约占 73%。

2.4　相似台风路径下无龙卷产生的台风路径

对近年来历史台风进行普查发现，与上述台风路径比较相似，但在珠三角地区没有台风龙卷出现的台风个例主要有 4 个：1003 号“灿都”、1213 号“启德”、1409 号“威马逊”、1621 号“沙莉嘉”(图 3b)。说明按照相似台风路径来判断珠三角地区是否有龙卷发生只是一种基于统计规律的可能性判断，在有利的台风路径下，珠三角出现台风龙卷的几率高于其他台风路径下出现台风龙卷的比例。这也表明，珠三角台风龙卷除了与台风路径、台风登陆后中心所处位置等因素有关外，台风登陆后在珠三角区域上空的大尺度环流背景、关键环境参数以及局地中小尺度环流等是否适宜也很关键。

3 台风龙卷大尺度环流背景和环境条件

3.1 台风龙卷大尺度环流背景

图 4 给出了 2 次强龙卷过程(1522 号“彩虹”龙卷和 0606 号“派比安”龙卷)及 1 次弱龙卷过程(1415 号“海鸥”龙卷)的环流形势图。从高空形势综合图(图 4a)可以看到强龙卷和弱龙卷过程的共同特征:珠三角地区处于台风东侧和副热带高压西侧之间强盛东南气流中,中低空各层都存在强东南偏南急流,而且各层东南急流轴的位置非常接近,上、下叠加在珠江口附近;高层 200 hPa 的分流区即高空辐散区也位于珠江口附近,低层 925 hPa 在广东中部一带存在辐合线。不同的是,强龙卷过程的东南急流特别是低空的东南急流更强,其 925 hPa 的东南风风速达 17～20 m·s^{-1},弱龙卷过程 925 hPa 东南风风速为 16 m·s^{-1}。对其他弱龙卷过程统计发现,珠江口附近 925 hPa 东南风风速阈值在 13～16 m·s^{-1}。强龙卷和弱龙卷过程的地面形势(图 4b)也非常相似,地面都还同时受到冷空气影响,广东中部一带存在地面辐合线。龙卷发生在低层辐合与高层辐散和中低空急流交汇处附近。其他台风龙卷过程的天气形势也存在类似特征。因此,根据天气流型可以大致定性判断是否有利于台风龙卷的发生,但由于统计样本较少,对出现的龙卷强度还很难准确判断。

为弥补探空资料时空分辨率的不足,利用逐日 4 次 1°×1°的 FNL/NCEP 分析资料对强、弱龙卷的环境场进行了合成分析。参照“邻(临)近原则”(章国材,2011),分别合成分析 2 次强龙卷过程(1522 号“彩虹”和 0606 号“派比安”龙卷)和 6 次弱龙卷过程(0508 号“天鹰”、0817 号“海高思”、1306 号“温比亚”、1309 号“飞燕”、1311 号“尤特”和 1415 号“海鸥”龙卷)。需要说明的是,由于 1997 年以前没有 FNL/NCEP 分析资料,这里是将 1997 年以后的个例进行了合成分析。由图 5 可见,龙卷发生时,强龙卷过程台风中心平均位置在湛江附近,弱龙卷过程台风中心平均位置在北部湾;强、弱龙卷过程中低层珠江口附近都存在东南偏南急流,主要差别在于强龙卷过程低空的东南偏南急流更强,在龙卷发生地附近,强龙卷过程 925 和 850 hPa 的东南偏南风风速达 20 m·s^{-1}以上,弱龙卷过程低空的东南偏南风速在 16～18 m·s^{-1}。与探空资料对比,会发现 NCEP 资料的低层风略偏大,但在业务上可以作为定性参考。

3.2 台风龙卷对应的关键环境参数

强龙卷的产生需要超级单体风暴的中尺度环

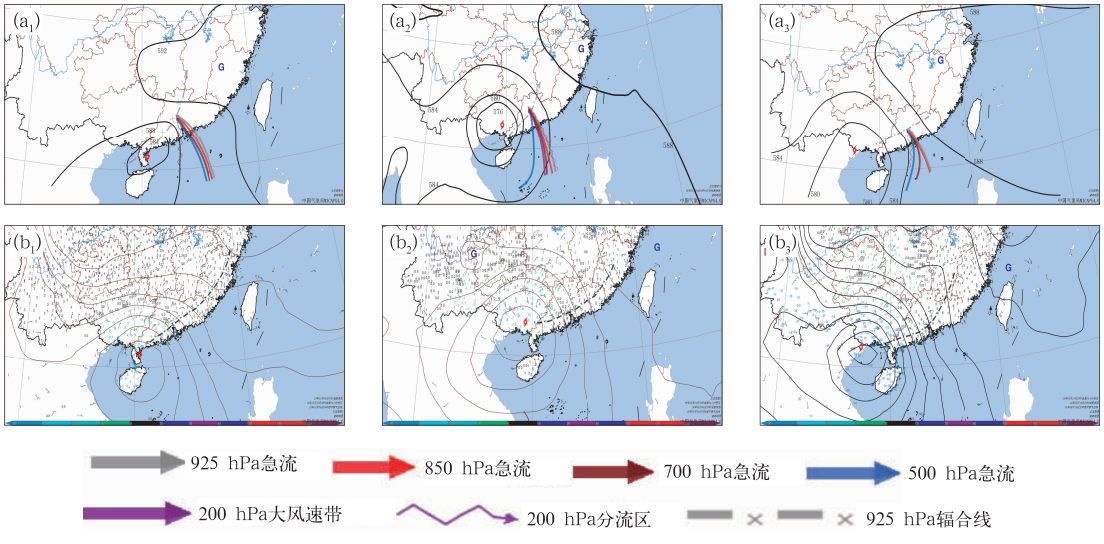


图 4 2015 年 10 月 4 日 08 时(a_1,b_1),2006 年 8 月 4 日 08 时(a_2,b_2)和 2014 年 9 月 16 日 20 时(a_3,b_3)台风龙卷过程的综合形势图(a)和地面图(b)

Fig. 4 The comprehensive weather chart (a) and surface map (b) of typhoon-tornado cases (a_1, b_1) 08:00 BT 4 October 2015, (a_2, b_2) 08:00 BT 4 August 2006, (a_3, b_3) 20:00 BT 16 September 2014

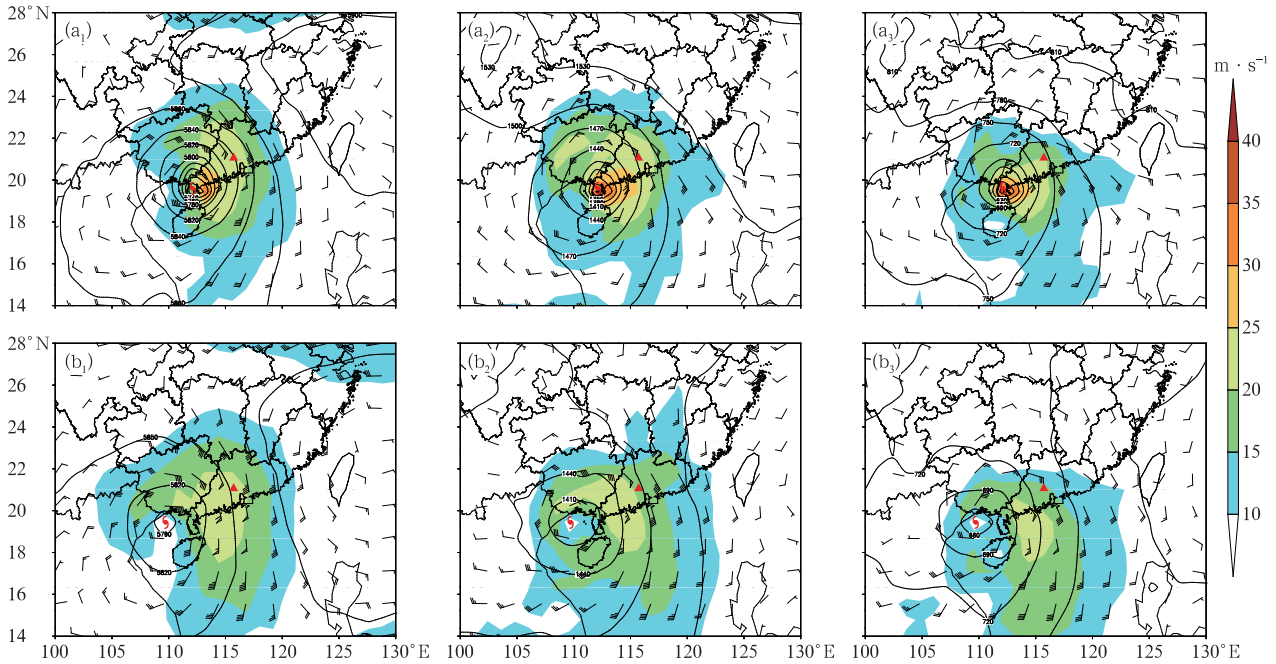


图 5　500 hPa(a_1,b_1),850 hPa(a_2,b_2),925 hPa(a_3,b_3)强龙卷过程(a)和弱龙卷过程(b)的环流形势合成图

(▲:龙卷发生地,阴影区:风速≥10 m·s^{-1})

Fig. 5　Composite synoptic situation of strong tornadoes (a) and weak tornadoes (b)

(a_1, b_1) 500 hPa, (a_2, b_2) 850 hPa, (a_3, b_3) 925 hPa

(▲: tornado, shaded area: wind speed≥10 m·s^{-1})

境,而龙卷超级单体风暴形成的必要条件包括有一定大小的 CAPE、较强的深层及低层垂直风切变、较大的 SRH 以及低的 LCL 等。这些已经在龙卷超级单体风暴的观测事实和数值模拟中得到印证(McCaul,1991;Lemon and Doswell III,1979;Thompson et al,2000;俞小鼎等,2012)。下面用探空资料计算了上述台风龙卷过程的 CAPE、对流抑制(CIN)、0～6 km 垂直风切变($W_{sr0\sim6\ km}$)、0～1 km 垂直风切变($W_{sr0\sim1\ km}$)和 SRH 等大气环境参数(由于 2000 年以前的个例资料不全,这里只计算了 2000 年以后的台风龙卷个例环境参数,表 2)。

从台风龙卷过程上游的香港探空站 T-ln$p$ 图(图略)可以看到,台风龙卷对应的温湿探空曲线和 CAPE 形态都很相似,整个对流层相对湿度都很大,基本处于饱和状态,CAPE 呈竖直的狭长形、数值比较温和,LCL 都很低,CIN 都很小,导致深厚湿对流容易触发(图略)。台风龙卷都是发生在这种相对较弱的条件不稳定环境下,与西风带超级单体龙卷(俞小鼎等,2006b;2008;张小玲等,2016;廖玉芳等,2003)通常所要求的上干下湿、强对流不稳定温湿探空曲线形态是有明显区别的。

强的垂直风切变特别是强的 0～1 km 低层垂直风切变是造成龙卷的主要动力条件。表 2 给出台风龙卷过程中距离龙卷发生地最近的探空站一些具体环境参数,表中除了 0817 号台风外围江门龙卷选取邻近的阳江探空资料外,其余的均为清远探空资料。其中,“彩虹”龙卷和“派比安”龙卷是强龙卷过程。从表 2 可以看出,珠三角强龙卷和弱龙卷过程的环境条件的共同特征是:CAPE 值普遍不大,在 100～1000 J·kg^{-1},平均 300 J·kg^{-1}左右,LCL 很低,在 600 m 以下,CIN 很小,在 10～50 J·kg^{-1},垂直风切变和 SRH 较大,0～6 km 深层垂直风切变在 2.4×10^{-3} s^{-1}以上,0～1 km 低层垂直风切变在 13.2×10^{-3} s^{-1}以上,SRH 在 100 m^2·s^{-2}以上。Thompson et al(2000)统计分析超级单体龙卷的对流参数,归纳出 EF2 级以上强龙卷 0～6 km 垂直风切变的下限为 3.0×10^{-3} s^{-1},平均为 4.0×10^{-3} s^{-1},0～1 km 垂直风切变的下限为 5.5×10^{-3} s^{-1}、平均为 9.5×10^{-3} s^{-1},并指出 0～1 km 垂直风切变的大小对于判断龙卷的生成更为有效。Davies-Jones(1984)将 150 m^2·s^{-2}的 SRH 取为有利于产生超级单体风暴的最低值。从表 2 还可见,珠三角强、弱龙卷过程环境参数的主要差异在于对应强龙卷过程的垂直风切变和 SRH 更大。对于强龙卷过

程，无论是 0～6 km 深层垂直风切变还是 0～1 km 低层垂直风切变都很强，0～6 km 垂直风切变在4.2 ×10^{-3} s^{-1}以上，0～1 km 垂直风切变在 16.0 ×10^{-3} s^{-1}以上，超过或远高出 Thompson et al(2000)统计的 0～6 和 0～1 km 垂直风切变对应的平均值(4.0×10^{-3}、9.5×10^{-3} s^{-1})，属于强的垂直风切变；强龙卷过程对应的 SRH 也很大，在 300 $m^2 \cdot s^{-2}$以上，远高于 150 $m^2 \cdot s^{-2}$的临界值。

表 2 台风龙卷的环境参数

Table 2 Environmental parameters of typhoon tornadoes

台风编号	时间/(年/月/日/时)	*CAPE* /J·kg^{-1}	*CIN* /J·kg^{-1}	*LCL* /m	$W_{sr0\sim6\ km}$ /10^{-3} s^{-1}	$W_{sr0\sim1\ km}$ /10^{-3} s^{-1}	*SRH* /$m^2 \cdot s^{-2}$
1522 号“彩虹”	2015/10/4/08	144	21	342	4.2	16	420
0606 号“派比安”	2006/8/4/08	279	42	271	4.4	20	305
1415 号“海鸥”	2014/9/16/20	175	28	430	3.5	13.9	227
1311 号“尤特”	2013/8/15/08	97	15	150	3.2	14.9	240
1309 号“飞燕”	2013/8/3/08	240	14	220	3.4	13.2	210
1306 号“温比亚”	2013/7/2/08	310	17	590	2.9	14.9	100
0508 号“天鹰”	2005/7/30/08	933	0	270	2.4	15.3	116
0817 号“海高思”	2008/10/4/08	337	0	180	3.8	14.2	151

3.3 相似台风路径下有/无龙卷发生的环境条件对比

表 3 给出了当台风中心位于珠三角台风龙卷产生的高风险区(广东湛江到广西东南部或北部湾一带)时，珠三角有/无龙卷发生的清远探空站的关键环境参数对比。从 0～6 km 深层垂直风切变看，有龙卷和无龙卷的差异并不明显，明显差异在于 0～1 km 的低层垂直风切变和风暴相对螺旋度 SRH 上。从 SRH 来看，无龙卷发生的 4 次台风过程的 SRH 整体偏小。特别是“启德”和“威马逊”过程的 SRH 很小，不利于微型超级单体的出现，实际雷达上也没有监测到微型超级单体。在这里需要特别说明一下超强台风“威马逊”过程，虽然“威马逊”是 1949 年以来登陆广东的最强台风，但可以看到其在珠三角地区的 SRH 不大。“灿都”和“沙利嘉”过程的 SRH 较大，分别为 115 和 207 $m^2 \cdot s^{-2}$，“灿都”过程的 SRH 与“温比亚”“天鹰”弱龙卷过程的 SRH 大小相当，“沙利嘉”过程的 SRH 与“飞燕”弱龙卷过程的 SRH 大小相当，比“天鹰”“温比亚”“海高思”弱龙卷过程的 SRH 大。实际上“灿都”和“沙利嘉”影响期间，在广州 SA 型多普勒天气雷达上观测到有微型超级单体和弱中气旋出现的，只是强度偏弱，持续时间短，没有龙卷产生。这表明 SRH 对超级单体或中气旋的出现有较好的指示性，SRH 越大，出现超级单体或中气旋的可能性越大。但是否有龙卷发生，还要看 0～1 km 低层垂直风切变大小等环境条件。从 0～1 km 低层垂直风切变来看，没有龙卷发生的 4 次台风过程的 0～1 km 垂直风切变，单从数值上看，也不算小，都达到了 Thompson et al(2000)

表 3 相似台风路径下有/无龙卷发生时的环境参数对比

Table 3 Environmental parameters under similar typhoon tracks between tornadic and nontornadic cases

台风编号	时间/(年/月/日/时)	有/无龙卷	$W_{sr0\sim6\ km}$ /10^{-3} s^{-1}	$W_{sr0\sim1\ km}$ /10^{-3} s^{-1}	*SRH* /$m^2 \cdot s^{-2}$
1522 号“彩虹”	2015/10/4/08	有	4.2	16	420
0606 号“派比安”	2006/8/4/08	有	4.4	20	305
1415 号“海鸥”	2014/9/16/20	有	3.5	13.9	227
1311 号“尤特”	2013/8/15/08	有	3.2	14.9	240
1309 号“飞燕”	2013/8/3/8	有	3.4	13.2	210
1306 号“温比亚”	2013/7/2/08	有	2.9	14.9	100
0508 号“天鹰”	2005/7/30/8	有	2.4	15.3	116
0817 号“海高思”	2008/10/4/08	有	3.8	14.2	151
1003 号“灿都”	2010/7/22/20	无	2.4	10.7	115
1213 号“启德”	2012/8/17/20	无	2.4	11.7	65
1409“威马逊”	2014/7/19/08	无	3.1	12.4	70
1621“沙利嘉”	2016/10/19/08	无	3.9	12.9	207

统计的平均值,但与 8 次龙卷过程的 0～1 km 垂直风切变阈值(13.2×10^{-3} s^{-1})相比,还是明显偏小。

所以,在台风龙卷气候概率较高的区域,将龙卷易发的台风中心东北区域与大的 SRH 区以及 0～1 km 低层强的垂直风切变区相结合,再综合低 LCL 等环境条件,可以在一定程度上确定龙卷未来可能出现的区域。

3.4　触发系统

以上分析表明,相似的环流背景、相似的环境条件,可以对龙卷多发地区某一次龙卷过程发生的可能性给出重要线索。但龙卷为何会出现在上述特定地点和特定时间,这其中的原因是多方面的,也很复杂。我们考虑主要原因有两个:一是文中前面分析所提到的"龙卷发生频率与地形因素密切有关",另外一个很重要的原因是与地面中小尺度系统的活动有关。

对台风龙卷过程的地面自动站风场分析表明,在台风龙卷发生前,在龙卷风暴移动方向上都是先有地面辐合线和小尺度涡旋存在。"彩虹"外围顺德龙卷最早于 2015 年 10 月 4 日 15:28 前后在顺德区勒流镇触地,从当天的广东省地面自动站风场可以看到,在龙卷发生前的 15:20,佛山境内就已经存在一条东南—西北向的地面辐合线,并且在辐合线南端的中山北部与顺德交界处有一个小尺度涡旋生成(图 6a),小尺度涡旋沿着地面辐合线向西北方向移动,15:28 前后在顺德区勒流富安工业区附近对流强烈发展产生了龙卷(图 6b),之后小尺度涡旋继续沿着地面辐合线西北移(图 6c),龙卷移动路径与小尺度涡旋的移动路径一致,龙卷随后相继影响了顺德区的伦教、北滘、乐从镇和禅城区的石湾、张槎及南海区的狮山罗村等镇街。"彩虹"外围番禺龙卷于 2015 年 10 月 4 日 17 时前后在番禺区南村附近触地,龙卷发生前的 16:50,相应区域地面自动站风场资料分析显示同样也存在风场辐合线和小尺度涡旋(图 6d)。

"派比安"外围佛山南海西樵和丹灶龙卷最早于 2006 年 8 月 4 日 10:50 前后在南海区西樵镇触地,分析 2006 年 8 月 4 日 10 时的广东省地面自动站资料同样显示,地面辐合线和小尺度涡旋早于龙卷出现。佛山以北主要吹东北风,佛山中部、东莞、惠州一带吹偏东风,南部珠江口附近的珠海、中山一带吹强劲的东南风,三支气流在佛山汇聚,形成一条纵跨清远、佛山和江门的西北—东南向的风向风速辐合线(图 7),在辐合线南部附近的江门鹤山一带开始有小尺度涡旋生成(图7b),之后小尺度涡旋沿着地

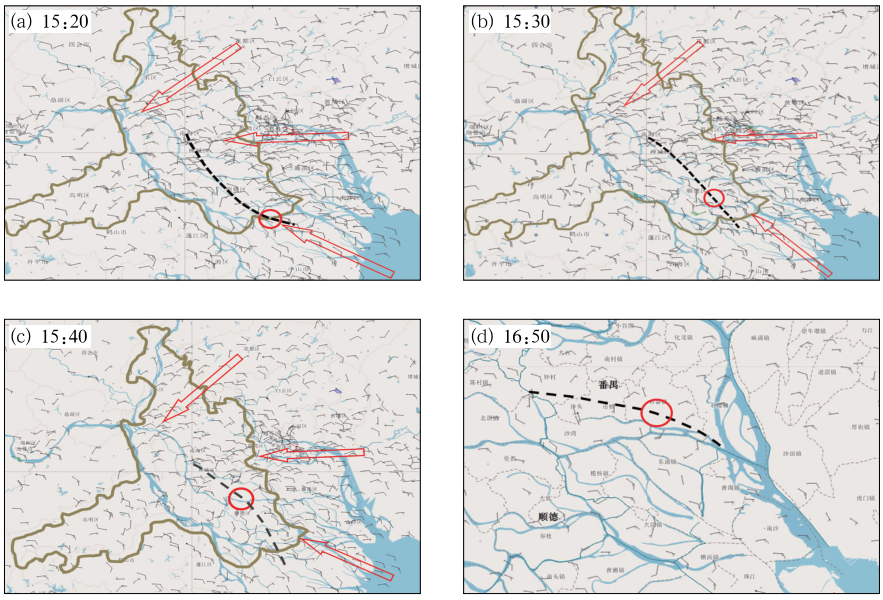


图 6　2015 年 10 月 4 日 15:20(a),15:30(b),15:40(c)和 16:50(d)
广东区域自动站 2 min 平均风向风速
(黑色虚线:地面风场辐合线,红色圈:小尺度涡旋,箭头:3 个不同来向的气流)

Fig. 6　The 2-min average wind direction and wind speed of Guangdong automatic weather station network at 15:20 BT (a), 15:30 BT (b), 15:40 BT (c) and 16:50 BT (d) 4 October 2015
(black dashed line: convergence line, red circle: small-scale vortex, arrows: air currents from three different directions)

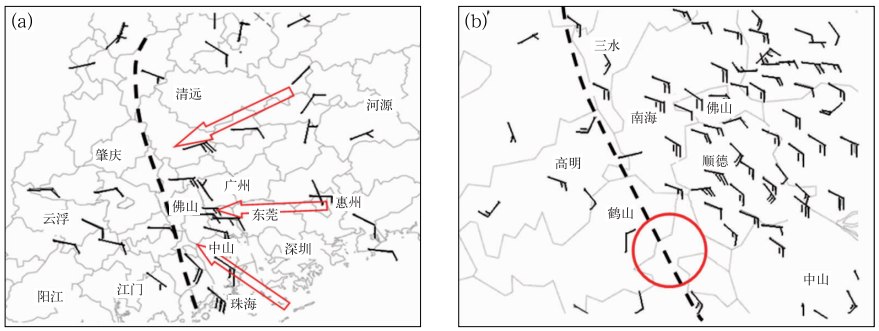


图 7 同图 6,但为 2006 年 8 月 4 日 10 时
(图 7b 是对图 7a 的放大)
Fig. 7 Same as Fig. 6, but at 10:00 BT 4 August 2006
(Fig. 7b is an enlargement made from Fig. 7a)

面辐合线向西北移动,于 10:50 前后在南海区西樵镇对流强烈发展产生了龙卷。“海鸥”龙卷、“尤特”龙卷等发生前,相应区域地面自动站风场资料分析同样显示地面辐合线和地面小尺度涡旋存在且早于龙卷出现(图略)。

以上分析表明,地面辐合线和小尺度涡旋是有利于龙卷发生发展的重要中、小尺度系统。所以,在日常值班过程中,在环境条件有利的情况下,还要特别关注地面这种中小尺度天气系统。此外,这种近地层小尺度涡旋的活动还可能与形成龙卷涡旋的垂直涡度生成有关,还需要采用高时空分辨率的数值模式进行深入的模拟分析。

4 雷达特征

4.1 台风龙卷雷达反射率因子和径向速度特征

图 8 分别给出了 1522 号“彩虹”2015 年 10 月 4 日 15:36 佛山顺德勒流龙卷、1415 号“海鸥”2014 年 9 月 16 日 23:18 佛山三水白坭龙卷、1311 号“尤特”2013 年 8 月 15 日 18:36 东莞道滘龙卷、1309 号“飞燕”2013 年 8 月 3 日 06:24 佛山三水芦苞龙卷、1306 号“温比亚”2013 年 7 月 2 日 06:48 佛山三水西南龙卷和 0606 号“派比安”2006 年 8 月 4 日 10:59 佛山南海丹灶龙卷的广州多普勒雷达 0.5°仰角的反射率因子(图 $8a_1$～$8a_6$)和平均径向速度(图 $8b_1$～$8b_6$)。从图 8a 可以看出,台风龙卷风暴母体属于微型超级单体风暴,多数龙卷过程都呈现出低层钩状回波和入流缺口回波等特征,但台风龙卷过程的这种低层钩状回波不是很典型,与西风带超级单体龙卷所具有的低层经典钩状回波还是有差别的,这种差异部分是由于广州 SA 新一代天气雷达的反射率因子径向分辨率为 1 km,无法观测到微型超级单体结构的细节。图 8b 是与图 8a 相对应的同时刻广州多普勒雷达平均径向速度对比图。可以看出,在台风龙卷过程中,雷达速度图上低层都有强中气旋或中等以上强度的中气旋存在,有时在强中气旋中心还伴有明显的 TVS,龙卷触地前后,中气旋和 TVS 底高会出现显著下降,底高一般会降至 1 km 以下,强龙卷过程(如 1522 号“彩虹”外围顺德龙卷)TVS 底高最低只有 200～300 m。台风龙卷多数出现在钩状回波的顶端或 TVS 附近。

4.2 台风龙卷与西风带超级单体龙卷雷达特征对比

图 9 分别是 2015 年 10 月 4 日 15:36“彩虹”台风外围佛山顺德龙卷、2006 年 8 月 4 日 10:53“派比安”台风外围佛山南海龙卷与 2011 年 5 月 7 日 18:00 佛山南海西风带超级单体龙卷的反射率因子和径向速度垂直剖面。从反射率因子垂直剖面可见,台风龙卷母风暴 50 dBz 以上的强回波主要在 5 km 以下,呈现出低质心的特点(图 $9a_1$,$9a_2$);而西风带龙卷母风暴伸展高度很高,50 dBz 以上的强回波高达 10 km,有界弱回波区的高度在 5～6 km,最大反射率因子超过 65 dBz,具有经典超级单体风暴的特征(图 $9a_3$)。

从径向速度垂直剖面(图 9b)可以看到,台风龙卷和西风带龙卷都存在强中气旋或 TVS,主要差别在于台风龙卷的中气旋尺度更小,垂直伸展高度更低。图 $9b_1$,$9b_2$ 台风龙卷的中气旋伸展高度在3 km 以下,平均直径为 1.6 km,图 $9b_3$ 西风带龙卷的中气旋垂直伸展高度达到了 7 km 以上,平均直径为 4.5 km。

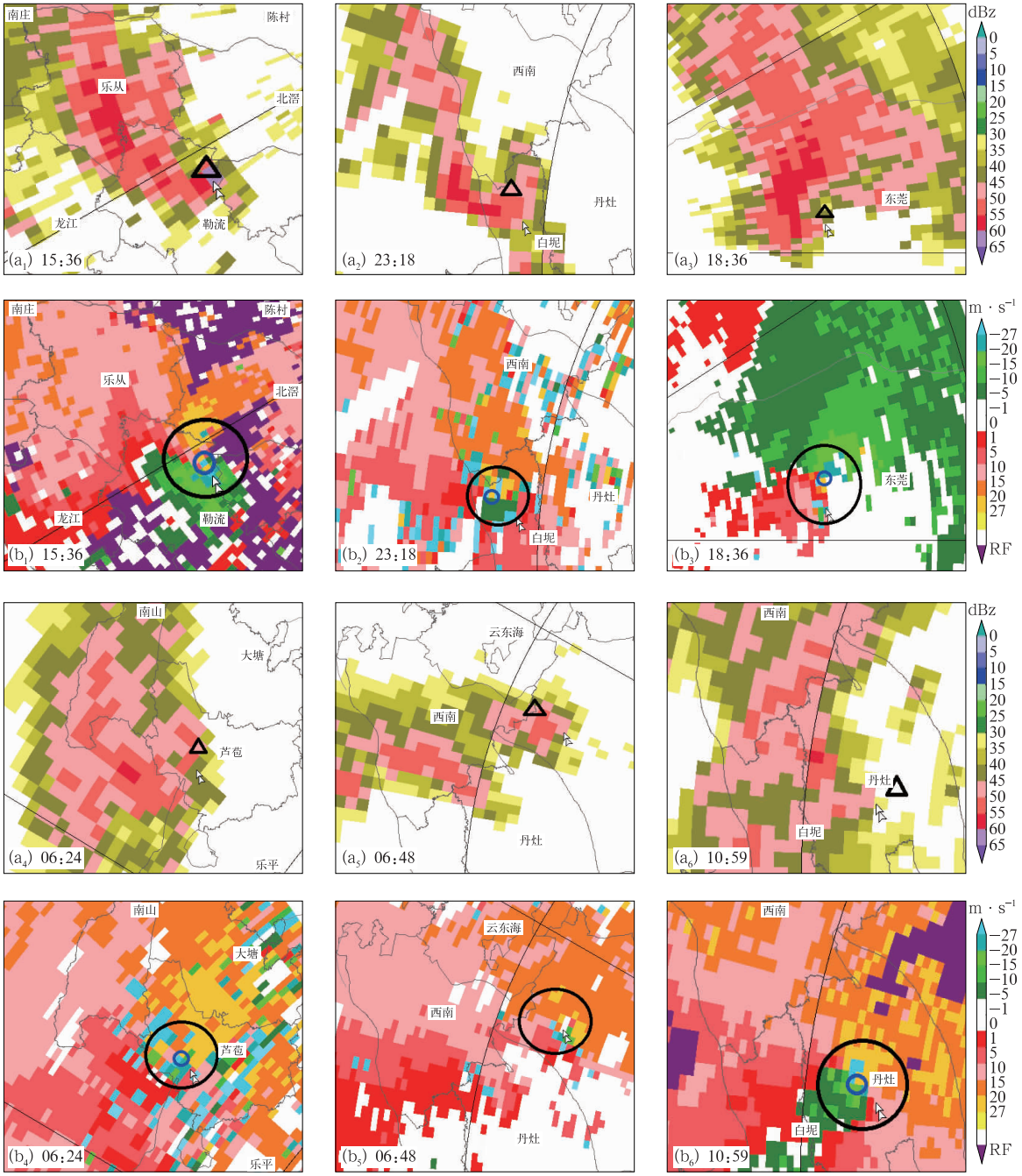


图 8　台风龙卷过程的广州多普勒天气雷达 0.5°仰角反射率因子(a)和平均径向速度(b)

(a_1,b_1)2015 年 10 月 4 日 15:36,(a_2,b_2)2014 年 9 月 16 日 23:18,(a_3,b_3)2013 年 8 月 15 日 18:36,

(a_4,b_4)2013 年 8 月 3 日 06:24,(a_5,b_5)2013 年 7 月 2 日 06:48,(a_6,b_6)2006 年 8 月 4 日 10:59

(黑色三角形:龙卷大致发生地,黑色圆圈:中气旋,蓝色圆圈:TVS)

Fig. 8　The 0.5° elevation reflectivity (a) and mean radial velocity (b)

of Guangzhou Doppler Radar during the typhoon tornadoes

(a_1, b_1) 15:36 BT 4 October 2015, (a_2, b_2) 23:18 BT 16 September 2014,

(a_3, b_3) 18:36 BT 15 August 2013, (a_4, b_4) 06:24 BT 3 August 2013,

(a_5, b_5) 06:48 BT 2 July 2013, (a_6, b_6) 10:59 BT 4 August 2006

(black triangle: tornadoes, black circles: mesocyclone, blue circle: TVS)

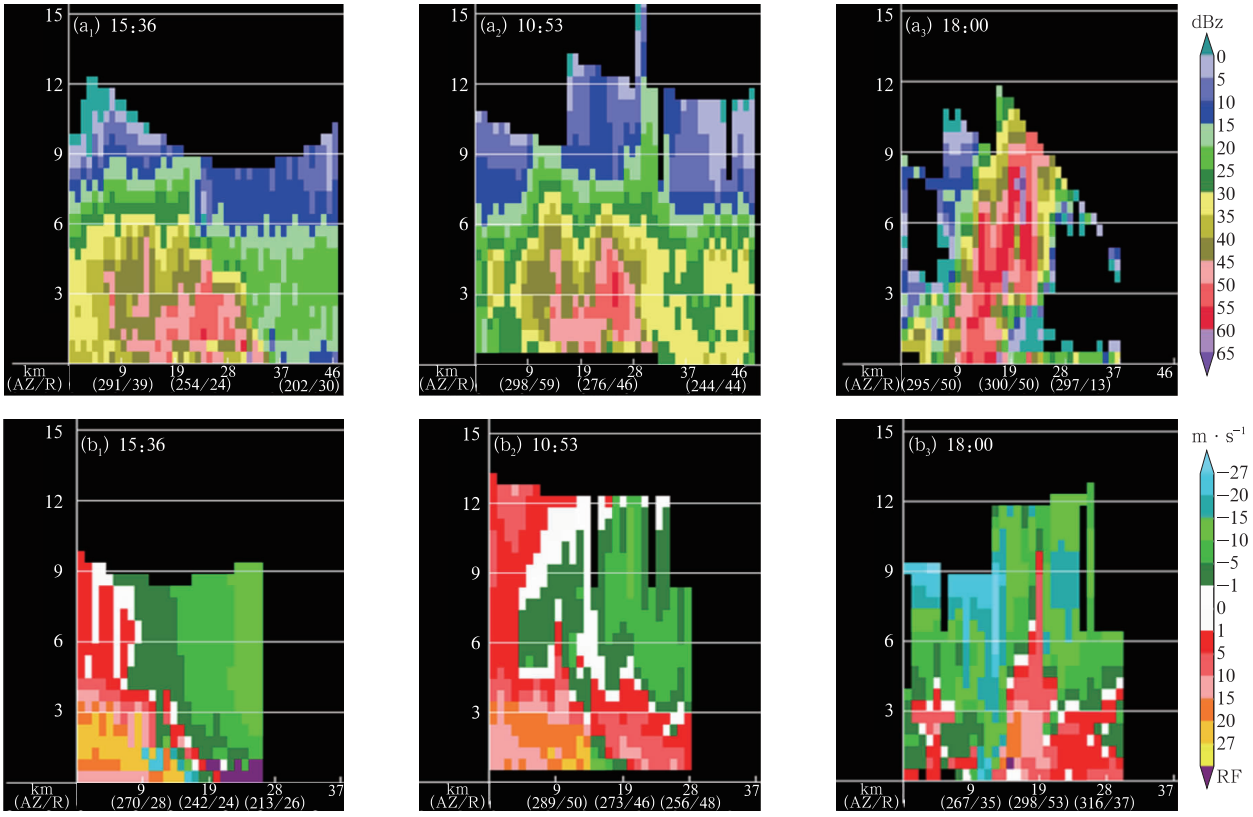


图 9 2015 年 10 月 4 日 15:36(a_1,b_1),2006 年 8 月 4 日 10:53(a_2,b_2),2011 年 5 月 7 日 18:00(a_3,b_3)龙卷过程广州雷达反射率因子(a)和平均径向速度(b)垂直剖面

Fig. 9 The cross-sections of reflectivity (a) and mean radial velocity (b) of Guangzhou Doppler Radar (a_1, b_1) 15:36 BT 4 October 2015, (a_2, b_2) 10:53 BT 4 August 2006, (a_3, b_3) 18:00 BT 7 May 2011

5 结 论

(1) 珠三角台风龙卷具有较强的地域性,以佛山最为高发,其次是广州。台风龙卷的发生频率与地形因素关系密切,多发生在地势比较平坦、河网较多的区域。台风龙卷出现在 6—10 月热带气旋活跃期,8 月最为多发,占总数的 44%,对应热带气旋在华南西部登陆的高峰期;龙卷发生起始时间多集中在 10—20 时,占总数的 69%。

(2) 西行台风易在珠三角地区产生龙卷,台风龙卷多数出现登陆台风中心的东北象限,极少数出现在登陆台风中心的东南象限(右后侧)。其中,台风登陆点在广东阳西—湛江一带、登陆后台风维持西北行的路径为珠三角台风龙卷产生的第一高风险台风路径,台风登陆后中心位于广东湛江—广西东南部一带时,是珠三角台风强龙卷产生的高风险时段;台风登陆点在海南东北部、登陆后台风维持西行进入北部湾的路径为珠三角台风龙卷产生的第二高风险台风路径,台风登陆后中心位于北部湾时是珠三角弱台风龙卷产生的高风险时段。珠三角台风龙卷均发生在台风登陆以后,且集中在台风登陆后1.3~21.3 h 的时段内,其中台风登陆后 9~15 h 发生的龙卷约占总数的 82%;龙卷发生时,台风强度在热带低压到强台风量级之间,约 73%的台风强度在热带风暴以上量级。

(3) 中低空各层存在强东南急流且在珠江口附近上下叠加、高层 200 hPa 存在明显的分流区、地面有弱冷空气扩散并存在辐合线是珠三角强或弱台风龙卷产生的有利大尺度环流背景,龙卷发生在低层辐合与高层辐散和中低空急流交汇处附近。不同的是,对应强龙卷过程的东南急流特别是低空的东南急流更强,925 hPa 东南风风速在强龙卷发生时一般达 17~20 $m \cdot s^{-1}$,弱龙卷阈值在 13~16 $m \cdot s^{-1}$。

(4) 珠三角强或弱台风龙卷环境条件的共同特征表现为较弱的 CAPE、低 LCL 和强的深层和低层垂直风切变及较大的 SRH,主要差异在于对应强龙卷过程具有更强的深层和低层垂直风切变和更大的

SRH，0～6 km 垂直风切变在 4.0×10^{-3} s^{-1} 以上，0～1 km 垂直风切变在 16.0×10^{-3} s^{-1} 以上，SRH 在 300 $m^2\cdot s^{-2}$ 以上。相似台风路径下，珠三角地区有/无台风龙卷环境条件的明显差异在于 0～1 km 的低层垂直风切变和 SRH 上，0～1 km 垂直风切变和 SRH 越大，出现超级单体或中气旋的可能性越大，产生龙卷的可能性也就越大。地面辐合线和地面小尺度涡旋是有利于台风龙卷发生发展的重要中、小尺度天气系统。

（5）台风龙卷风暴母体具有低层钩状回波及其与暖湿气流相连接的入流缺口回波等典型超级单体风暴的部分特征，但其伸展高度不高，50 dBz 以上的强回波主要在 5 km 以下，属于低质心的微型超级单体风暴。在新一代天气雷达径向速度图上低层可探测到强中气旋或中等强度的中气旋，有时强中气旋中心还伴有明显的 TVS，与西风带超级单体龙卷相比，台风龙卷中气旋的尺度更小、垂直伸展高度更低。台风龙卷多数出现在钩状回波顶端或 TVS 附近。

本文对有利于珠三角台风龙卷发生的台风路径、大尺度环流背景和环境条件等进行了探讨，但由于珠三角台风龙卷的样本偏少，结论还是很初步的，有待于今后对更多台风龙卷个例观测资料进行分析和高分辨率数值模拟深入研究。

参考文献

陈联寿，丁一汇，1979. 西太平洋台风概论[M]. 北京：科学出版社：464-465. Chen L S，Ding Y H，1979. Introduction to Typhoon in Western Pacific Ocean[M]. Beijing：Science Press：464-465（in Chinese）.

陈元昭，俞小鼎，陈训来，等，2016. 2015 年 5 月华南一次龙卷过程观测分析[J]. 应用气象学报，27(3)：334-341. Chen Y Z，Yu X D，Chen X L，et al，2016. A tornado in South China in May 2015[J]. J Appl Meteor Sci，27(3)：334-341(in Chinese).

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[J]. 气象，40(6)：668-677. Diao X G，Wan M B，Gao L X，et al，2014. Doppler radar product features and warning of non-supercell tornadic storms[J]. Meteor Mon，40(6)：668-677(in Chinese).

范雯杰，俞小鼎，2015. 中国龙卷的时空分布特征[J]. 气象，41(7)：793-805. Fan W J，Yu X D，2015. Characteristics of spatial-temporal distribution of tornadoes in China[J]. Metero Mon，41(7)：793-805(in Chinese).

黄先香，俞小鼎，炎利军，等，2018. 广东两次台风龙卷的环境背景和雷达回波对比[J]. 应用气象学报，29(1)：70-83. Huang X X，Yu X D，Yan L J，et al，2018. Contrastive analysis of two intense typhoon-tornado cases with synoptic and doppler weather radar data in Guangdong[J]. J Appl Meteor Sci，29(1)：70-83(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).

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[J]. 应用气象学报，14(6)：656-662. Liao Y F，Yu X D，Guo Q，2003. Case study of a series of severe convective storms based on China new generation doppler weather radar data[J]. J Appl Meteor Sci，14(6)：656-662(in Chinese).

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[J]. 气象，35(10)：33-39. Liu J，Zhu J J，Wei D B，et al，2009. Doppler weather radar typical characteristics of the 3 July 2007 Tianchang supercell tornado[J]. Meteor Mon，35(10)：33-39(in Chinese).

钱维宏，梁卓轩，金荣花，等，2017. 扰动变量在强对流天气分析和模式评估中的应用—以苏北里下河地区引发龙卷的扰动系统为例[J]. 气象，43(2)：166-180. Qian W H，Liang Z X，Jin R H，et al，2017. Application of anomalous variables to severe convective system analyses and model evaluation：a case study on tornado-producing anomalous systems near Lixia River，Jiangsu Province[J]. Meteor Mon，43(2)：166-180(in Chinese).

沈树勤，1990. 台风前部龙卷风的一般特征及其萌发条件的初步分析[J]. 气象，16(1)：11-15. Shen S Q，1990. Analysis of the general characteristics and genesis conditions of tornado in front of typhoon[J]. Meteor Mon，16(1)：11-15(in Chinese).

唐小新，廖玉芳，2007. 湖南省永州市 2006 年 4 月 10 日龙卷分析[J]. 气象，33(8)：23-28. Tang X X，Liao Y F，2007. An analysis of a tornado in Yongzhou，Hunan Province[J]. Meteor Mon，33(8)：23-28(in Chinese).

陶祖钰，赵翠光，陈敏，2016. 谈谈统计预报的必要性[J]. 气象科技进展，6(1)：6-13. Tao Z Y，Zhao C G，Chen M，2016. The necessity of statistical forecasts[J]. Adv Meteor Sci Technol，6(1)：6-13(in Chinese).

王易，郑媛媛，孙康远，等，2018. 南京雷达中气旋产品特征值统计分析[J]. 气象学报，76(2)：266-278. Wang Y，Zheng Y Y，Sun K Y，et al，2018. A statistical analysis of characteristics of mesocyclone products from Nanjing radar[J]. Acta Meteor Sin，76(2)：266-278(in Chinese).

俞小鼎，姚秀萍，熊廷南，等，2006a. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京：气象出版社：297-305. Yu X D，Yao X P，Xiong T N，et al，2006a. Principle and Operational Application of Doppler Weather Radar[M]. Beijing：China Meteorological Press：297-

305(in Chinese).

俞小鼎,郑媛媛,张爱民,等,2006b. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析[J]. 高原气象,25(5):914-924. Yu X D,Zheng Y Y,Zhang A M,et al,2006b. The detection of a severe tornado event in Anhui with China new generation weather radar[J]. Plateau Meteor,25(5):914-924(in Chinese).

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[J]. 大气科学,32(3):508-522. Yu X D,Zheng Y Y,Liao Y F,et al,2008. Observational investigation of a tornado heavy precipitation supercell storm[J]. Chin J Atmos Sci,32(3):508-522(in Chinese).

俞小鼎,周小刚,王秀明,2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报,70(3):311-337. Yu X D,Zhou X G,Wang X M. 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. Acta Meteor Sin,70(3):311-337(in Chinese).

曾明剑,吴海英,王晓峰,等,2016. 梅雨期龙卷环境条件与典型龙卷对流风暴结构特征分析[J]. 气象,42(3):280-293. Zeng M J,Wu H Y,Wang X F,et al,2016. Analysis on environmental conditions and structural features of typical convective tornado storm in Meiyu period[J]. Meteor Mon,42(3):280-293(in Chinese).

章国材,2011. 强对流天气分析与预报[M]. 北京:气象出版社:68-72. Zhang G C,2011. Analysis and Prediction of Severe Convective Weather[M]. Beijing:China Meteorological Press:68-72(in Chinese).

张晰莹,吴迎旭,张礼宝,2013. 利用卫星、雷达资料分析龙卷发生的环境条件[J]. 气象,39(6):728-737. Zhang X Y,Wu Y X,Zhang L B,2013. Analysis of tornado ambient conditions based on the FY-2 satellite and radar data[J]. Meteor Mon,39(6):728-737(in Chinese).

张小玲,杨波,朱文剑,等,2016. 2016年6月23日江苏阜宁EF4级龙卷天气分析[J]. 气象,42(11):1304-1314. Zhang X L,Yang B,Zhu W J,et al,2016. Analysis of the EF4 tornado in Funing County,Jiangsu Province on 23 June 2016[J]. Meteor Mon,42(11):1304-1314(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,朱文剑,姚聃,等,2016. 风速等级标准与2016年6月23日阜宁龙卷强度估计[J]. 气象,42(11):1289-1303. Zheng Y G,Zhu W J,Yao D,et al,2016. Wind speed scales and rating of the intensity of the 23 June 2016 tornado in Funing County,Jiangsu Province[J]. Meteor Mon,42(11):1289-1303(in Chinese).

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).

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[J]. 高原气象,28(3):617-625. Zheng Y Y,Zhu H F,Fang X,et al,2009. Characteristic analysis and early-warning of tornado supercell storm[J]. Plateau Meteor,28(3):617-625(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 Dis,35(5):403-414(in Chinese).

Brooks H E,Lee J W,Craven J P,2003. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data[J]. Atmos Res,67-68:73-94.

Brown R A,Lemon L R,Burgess D W,et al,1978. Tornado detection by pulsed Doppler radar[J]. Mon Wea Rev,106(1):29-38.

Davies-Jones R P,1984. Streamwise vorticity:the origin of updraft rotation in supercell storms[J]. J Atmos Sci,41(20):2991-3006.

Donaldson R J,1970. Vortex signature recognition by a Doppler radar[J]. J Appl Meteor,9(4):661-670.

Doswell III C A,Burgess D W,1988. On some issues of United States tornado climatology[J]. Mon Wea Rev,116(2):495-501.

Edwards R,2012. Tropical cyclone tornadoes:a review of knowledge in research and prediction[J]. Electronic J Severe Storms Meteor,7(6):1-61.

Lemon L R,Doswell III C A,1979. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis[J]. Mon Wea Rev,107(9):1184-1197.

McCaul E W Jr,1991. Buoyancy and shear characteristics of hurricane-tornado environments[J]. Mon Wea Rev,119(8):1954-1978.

Meng Z Y,Yao D,2014. Damage survey,radar,and environment analyses on the first-ever documented tornado in Beijing during the heavy rainfall event of 21 July 2012[J]. Wea Forecasting,29(3):702-724.

Schultz L A,Cecil D J,2009. Tropical cyclone tornadoes,1950—2007[J]. Mon Wea Rev,137(10):3471-3484.

Thompson R L,Edwards R,Hart J A,2000. An assessment of supercell and tornado forecast parameters with RUC-2 model close proximity soundings[C]// Preprints 21st Conference on Severe Local Storms. San Antonio,American Meteorological Society:595-598.

Thompson R L,Edwards R,Mead C M,2004. An update to the supercell composite and significant tornado parameters[C]// Preprints 22nd Conference on Severe Local Storms. Hyannis:American Meteorological Society.