植江玲，张伟强，黄先香，2019. “山竹”(1822)台风外围佛山强龙卷天气过程观测分析[J]. 气象与减灾研究，42(4)：251-260.
Zhi Jiangling，Zhang Weiqiang，Huang Xianxiang，2019. Analysis of tornado weather process of No. 1822 Typhoon “Mangkhut”[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research，42(4)：251-260.

“山竹”(1822)台风外围佛山强龙卷天气过程观测分析

植江玲[1,2]，张伟强[3]，黄先香[1,2]

1. 佛山市气象局，广东 佛山 528000
2. 佛山市龙卷风研究中心，广东 佛山 528000
3. 佛山市高明区气象局，广东 佛山 528500

摘 要：利用地面气象观测、多普勒天气雷达、风廓线雷达及现场灾调等资料，对 2018 年 9 月 17 日上午发生在佛山的“山竹”台风(1822)外围强龙卷天气过程进行分析。结果表明：龙卷发生在台风登陆后前进方向右前侧的东北象限，强度为 EF2 级。低层急流汇合与高层辐散相互配合提供了有利的环流背景，环境场表现为中等偏弱的对流有效位能、弱的对流抑制能量、低的抬升凝结高度、大的风暴相对螺旋度和 0—1 km 强垂直风切变等特征。地面气象要素受龙卷影响表现出明显的信号，龙卷过境前后单站气压降低/升高明显，风向出现明显气旋式旋转。产生龙卷的风暴为低质心微超级单体，龙卷出现在雷达钩状回波的弱回波区附近，雷达低仰角速度图上出现强中气旋和龙卷涡旋特征，中气旋尺度小、伸展高度低，且在龙卷发生前其最强切变突然增强。当环境条件有利时，在台风龙卷的高发区，当雷达低仰角速度图上出现中等强度以上中气旋，且底高在 1 km以下时，可以考虑发布龙卷预警。

关键词：台风龙卷，环境条件，中气旋，雷达回波，预警
中图分类号：P429 **文献标识码**：A **文章编号**：1007-9033(2019)04-0251-10
doi：10.12013/qxyjzyj2019-041

Analysis of Tornado Weather Process of No.1822 Typhoon “Mangkhut”

Zhi Jiangling[1,2], Zhang Weiqiang[3], Huang Xianxiang[1,2]

1. *Foshan Meteorological Service*, *Foshan* 528000, *China*
2. *Foshan Tornado Research Center*, *Foshan* 528000, *China*
3. *Gaoming Meteorological Service*, *Foshan* 528500, *China*

Abstract: Based on the conventional observation data of surface automatic weather station, Doppler radar, wind profile data, network videos, disaster investigation and so on, the environmental background and radar echo characteristics of typhoon occurrence and development were discussed. The results showed that the tornado was generated in the northeast jet convergence area between the right forward quadrant of Typhoon “Mangkhut” (1822) and the subtropical high edge, and the intensity was EF2. The divergence of upper level and the convergence of lower level provided a favorable weather background of the tornado occurrence. The typhoon-tornado occurred in an environmental field with weak convective available potential energy (CAPE) and convective inhibitory energy, low elevation condensation height (LCL), strong low-level vertical wind shear and large storm relative helicity (SRH). The pressure dropped sharply when the tornado came and rose rapidly as the tornado was far a-

收稿日期：2019-09-16；**修订日期**：2019-11-28.
基金项目：广东省社会发展科技协同创新体系建设专项(编号：2019B020208015).
作者简介：植江玲，工程师，主要从事短期天气预报业务与研究，E-mail：252335251@qq.com.

way, and the cyclonic convergent wind circled under the impact of the tornado. The tornado was generated by mini supercell storm with low center of mass. The tornado appeared at the edge of the strongest echo gradient region near the weak echo area. Strong mesocyclone was detected in the lower layer of the velocity chart and the duration of mesocyclone was about 1 hour. The mesocyclone center was accompanied by TVS. The mesocyclone became smaller and the vertical extension height decreased. In the high risk area of the typhoon tornado, when environmental conditions were favorable and moderate mesocyclone was detected as well as the mesocyclone base below 1 km, the early warning of tornado may be considered.

Key words: typhoon-tornado; environmental background; radar echo; mesocyclone; early warning

0 引 言

龙卷是从积状云向下延伸的强烈旋转空气柱。龙卷作为猛烈的大气对流现象,常给人类的生命和财产安全造成重大威胁,为气象防灾减灾领域重点关注的对象。随着观测装备的逐渐完善,目前中国对龙卷的研究得到了较大的开展。魏文秀和赵亚民(1995)研究指出,中国龙卷多发生在2个地区:一个是北方地区,包括长三角平原、苏北平原和黄淮平原;另一个是南方地区,包括广西和广东的平原地带。范雯杰和俞小鼎(2015)统计了1961—2010年中国有记录的165次EF2级以上龙卷的发生地区,发现高发区主要分布于中国东部的江淮和两湖平原,以及华南、东北和华北地区东南部等平原地带。在中国东部沿海地区,其中一部分龙卷的产生与热带气旋有关,是由台风外围螺旋雨带上的微超级单体风暴中产生的(郑媛媛等,2015)。许多研究者就台风龙卷的环境条件开展了相关的研究,例如李彩玲等(2016)、李兆慧等(2017)和郑艳等(2017)分别对不同的华南龙卷过程展开研究,发现当环境条件为低层垂直风切变较强和抬升凝结高度较低时,有利于龙卷的发生。目前,龙卷等强对流天气的临近预警主要是基于多普勒天气雷达探测到的中气旋或龙卷涡旋特征(Tornadic Vortex Signature,TVS)(Moller,2001;吴芳芳等,2012;周后福等,2014)。俞小鼎等(2008)和吴芳芳等(2010)分析超级单体龙卷过程个例发现,龙卷发生在一个强降水超级单体风暴中,回波呈钩状结构,有入流槽口的特征,速度图上探测到中气旋和TVS。

虽然已有较多学者对台风龙卷的环境条件和雷达特征展开了研究,但业务上对龙卷的预警仍存在非常大的困难。随着自动气象观测站、不同用途的雷达等越来越多的观测设备被应用于强对流天气的监测和研究,对龙卷的观测分析成为可能。文中,利用地面气象观测、多普勒天气雷达、风廓线雷达以及现场灾害调查等资料,对2018年9月17日台风"山竹"外围佛山强龙卷过程进行分析,加深对龙卷灾害以及台风龙卷发生的环境条件、雷达回波特征的认识,并根据分析结果探讨龙卷预警发布,以期为台风龙卷的监测和预报预警提供参考。

1 龙卷强度定级

2018年9月17日09:37—10:00(北京时,下同),广东省佛山市三水区出现一次龙卷过程。龙卷直径较小,地面破坏直径最小仅有几米,最大约为150 m,影响时间为23 min,移动方向为东南至西北偏北方向,路径长约为18 km。龙卷先后经过三水区白坭镇和西南街道,最后在肇庆市减弱消失(图1)。由于此次龙卷没有直接经过气象观测站,且两者有一定的距离,因此只能根据龙卷造成的灾情评估其强度,且依照"改进的藤田等级"(EF等级)来确定。较大的硬木类树干折断对应的风速为41.6—59.9 m/s,期望值为49.2 m/s;房顶结构被吹走,外墙倒塌对应的风速为46.5—63.5 m/s,期望值达到54.5 m/s(Meng et al,2014)。根据受灾现场的灾情指示物(铁皮厂房、树木、屋顶、围墙等)的受损情况,判断此次龙卷灾害强度为EF2级,属于强龙卷。

2 天气形势

2018年9月16日17:00"山竹"以强台风级别(15级)在广东江门台山沿海地区登陆,23时左右移入广西境内。17日09:37,佛山市三水区白坭镇出现龙卷,而此时台风的强度减弱为热带风暴级别。龙卷的发生地与台风中心的距离约为455 km。黄先香等(2018)统计历史观测记录发现,当处于台风外围的佛山发生龙卷时,龙卷与台风中心的距离为360—550 km,此次龙卷与台风中心距离与上述统计结果一致。

分析17日08:00环流形势综合图(图3)可以发现,西太平洋副热带高压(以下简称"副高")脊线位于30°N附近,其主体位置偏东,佛山处于副高588 dagpm线附近。17日白天副高逐渐加强西伸,其西南侧的偏南气流与台风"山竹"外围东北边缘强劲的东南气流在珠江三角洲地区汇聚。200 hPa高



图 1 龙卷移动路径及受灾现场

Fig. 1 Moving path of tornado and the scene of the disasters

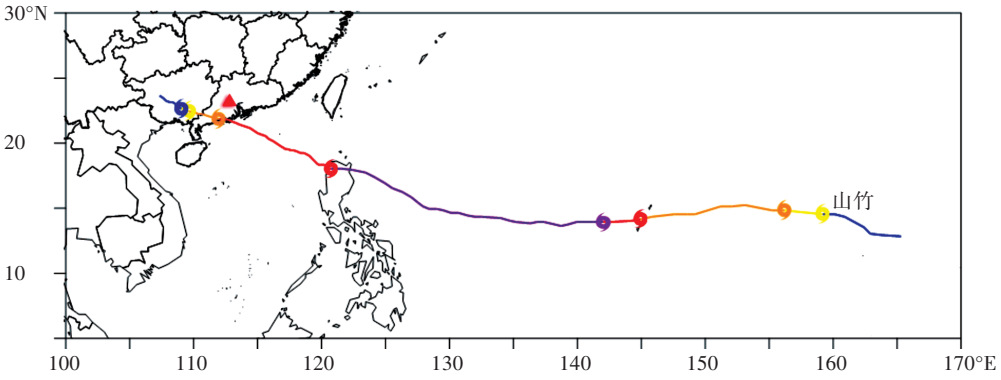


图 2 台风“山竹”移动路径(红色三角形为龙卷发生地)

Fig. 2 Moving path of Typhoon “Mangkhut” (Tornado is marked by red triangle)

度层,佛山处于高压底部,风场辐散抽吸;700—925 hPa 高度层,东南方向和偏南方向的两支急流在珠江三角洲上空汇聚,提供了有利的辐合抬升动力条件,并源源不断从海上输送水汽。地面处于台风低槽内,广东中北部存在一条东北—西南向的辐合线。可见,高层辐散抽吸、低层辐合上升和地面辐合的抬升触发等各层的动力配合以及充足的水汽,给此次龙卷发生发展提供了有利的条件。

3 环境条件

探空站观测通常能反映以站点为中心周围 100—200 km 内的大气层状态。选取距离龙卷发生地 67 km 的清远站和 196 km 的香港站探空数据计算各物理参数(表 1),其中清远站位于佛山以北,香港站位于佛山以南。与一般的强对流天气不同的是,17 日 08:00 的探空资料显示大气为弱的对流不稳定,清远和香港站大气对流有效位能(Convective Available Potential Energy,CAPE)分别为 411.0 和 1 378.9 J/kg。此外,清远和香港站的对流抑制能量(Convective Inhibition,CIN)非常小,抬升凝结高度也非常低,主要因为地面湿度很大,使得抬升凝结高度和自由对流高度都很低,表明稳定层非常薄,

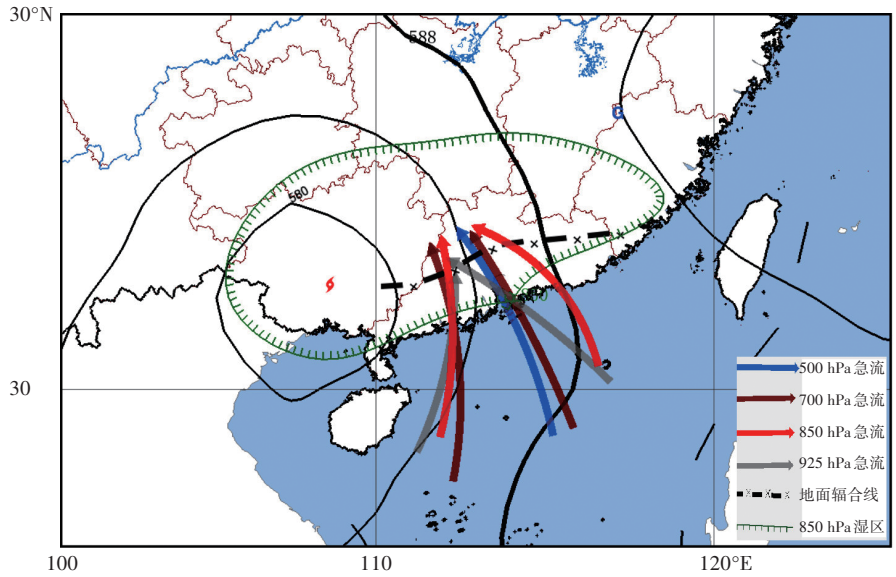


图 3 2018 年 9 月 17 日 08:00 环流综合形势

Fig. 3 Synoptic map at 08:00 BT, September 17, 2018

表 1 2018 年 9 月 17 日 08:00 清远和香港探空站对流参数

Table 1 Convective parameters at Qingyuan and Hongkong sounding station at 08:00 BT, September 17, 2018

站点	对流有效位能 /(J·kg^{-1})	对流抑制 /(J·kg^{-1})	抬升凝结高度 /m	0—1 km 风垂直切变 /(10^{-3} s^{-1})	0—6 km 风垂直切变 /(10^{-3} s^{-1})	风暴相对螺旋度 /(m^2·s^{-2})
清远	411.0	33.3	117.0	15.1	3.2	283.0
香港	1 378.9	12.8	233.0	10.7	3.9	137.0

低层大气很不稳定,有利于触发深厚湿对流天气(朱星球等,2006;吴风波等,2016)。Craven 和 Brooks (2004)统计发现,强龙卷的平均抬升凝结高度低于 1 km。抬升凝结高度越低,说明低层大气相对湿度越大,气块在低层大气被进一步蒸发冷却概率就越小,气块的正浮力就越大,越有利于强龙卷的发生。

龙卷等强天气的产生还需要较强的垂直风切变,而强的低层垂直风切变是产生龙卷的重要动力条件(郑媛媛等,2015;黄先香等,2018)。根据以往龙卷的对流参数统计值可知,产生强龙卷 0—6 km 和 0—1 km 垂直风切变下限为 3.0×10^{-3} s^{-1} 和 5.5×10^{-3} s^{-1}(Craven and Brooks,2004)。清远的 0—6 km 和 0—1 km 垂直风切变分别为 3.2×10^{-3} s^{-1} 和 16.0×10^{-3} s^{-1},香港分别为 3.9×10^{-3} s^{-1} 和 13.0×10^{-3} s^{-1}。虽然都超过统计值的下限,但 0—1 km 垂直风切变远大于下限值,属于强低层风切变。为了更细致地了解龙卷发生前后佛山上空的风垂直分布的变化情况,计算了 17 日 08:00—10:00 三水风廓线雷达(距离龙卷路径东北方向约 14 km) 0—1 km 和 0—6 km 垂直风切变值随时间的变化(图4)。结果表明,0—1 km垂直风切变在08:30—09:00 为 5.0×10^{-3} s^{-1} 左右,于龙卷发生前约 30 min 开始显著增大,09:36 增大至 12.7×10^{-3} s^{-1},09:37 龙卷触地,龙卷发生期间维持在 10.0×10^{-3} s^{-1}以上,属于强低层风切变。而 0—6 km 垂直风切变在龙卷发生前后都维持在 3.0×10^{-3} s^{-1}左右。可见,此次强龙卷过程与 0—1 km 垂直风切变有密

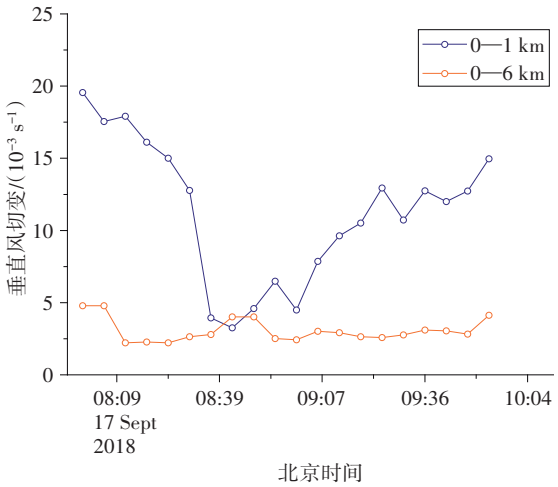


图 4 三水风廓线雷达 0—1 km 和 0—6 km 垂直风切变

Fig. 4 The 0—1 km and 0—6 km vertical wind shears

切关系,低层垂直风切变急剧增大有利于龙卷的发生。风暴相对螺旋度(Storm Relative Helicity,SRH)可以估算风暴运动在垂直风切变环境下产生的旋转潜势。以往的研究表明,SRH 值大于 150 m^2/s^2 时有利龙卷或超级单体风暴的产生(Davies,1984),而计算清远和香港站的 SRH 分别为 283 和 137 m^2/s^2,因此离三水最近的清远站 SRH 值远大于统计值下限,非常有利于超级单体风暴的形成;而上游香港站的 SRH 值没达到 150 m^2/s^2,两者的差异也体现了环境条件的局地性。

进一步分析广东省地面自动站风场发现,9 月 17 日 09:00(图 5a),佛山北部为东北风,中部为偏东风,南部为从沿海吹向内陆的强劲东南风,这三股气流在佛山汇合形成了两条相交的地面风场辐合线。在辐合线的交点以南的九江镇和鹤山县交界附近生成一个涡旋。这个涡旋沿东南—西北向的辐合线向西北方向移动,09:20(图 5b)进入南海区西樵镇,之后继续移动并逐渐靠近三水区白坭镇,09:30 移入白坭镇,随后又进入西南街道。涡旋的走向和地面风场辐合线的位置与龙卷的移动路径对应较好。对比地面辐合线、涡旋和龙卷出现时间,辐合线和涡旋提前于龙卷出现,可见地面风场辐合和涡旋为此次强对流系统提供了有利的抬升触发条件。

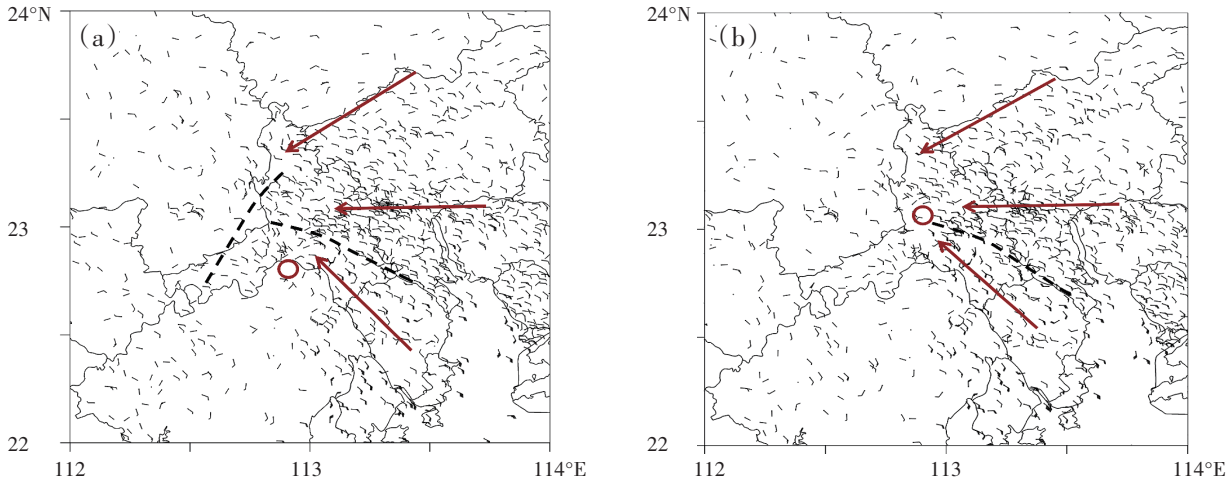


图 5 2018 年 9 月 17 日 09:00(a)和 09:20(b)地面区域自动站观测风场(红色圆圈为小尺度涡旋位置)

Fig. 5 Surface wind field observed by automatic weather stations at 09:00 BT (a) and 09:20 BT (b) September 17, 2018 (Red circle represents the location of the small scale vortex)

此外,从地形上看,珠江三角洲位于中国东南部沿海,是西江、北江共同冲积成的大三角洲与东江冲积成的小三角洲的总称,罗平山脉为其西面侧和北面侧的界限。台风登陆时,在这种喇叭口地形条件下,气流容易在此堆积、抬升。台风登陆后,低层风速由于摩擦作用而减小,形成强烈的垂直风切变,有利于中、小尺度对流系统的触发和加强。

4 龙卷过程的观测特征及预警分析

4.1 地面自动气象站观测

选取离龙卷路径最近的白坭镇中心小学站(G6963,距龙卷路径 1 200 m,图 6a)和西南街道洲边村委站(G6958,距龙卷路径 800 m,图 6b)地面气象观测资料,分析各气象要素受龙卷影响的变化特征。龙卷来临前,G6963 站气压约为 1 004.0 hPa,龙卷触地前 09:35(提前影响该站 2 min 左右)气压急剧下降 1.0 hPa,09:40 气压又迅速升高 1.8 hPa。2 min 平均风速在龙卷来临之前为 1—2 m/s,吹东南风;龙卷来临时风向呈气旋式旋转,由东南风转为偏北到偏东风,风速增大为 3 m/s 左右;龙卷远离后风速减小到 2—3 m/s,恢复东南风。从 5 min 累计降水的演变可见,龙卷来临前约 20 min 降水明显增强,龙卷远离后,降水明显减弱。气温在龙卷来之前略有升高,龙卷到来时气温快速下降 0.1—0.2 ℃,主要是因为前期持续降水已经造成明显的降温,对流风暴移出站点后,气温明显上升。在龙卷向北移动经过西南街道之前,09:40 龙卷路径附近的 G6958 站气压急剧下降 1.8 hPa,龙卷过后又升高 2.2 hPa。2 min 平均风速在龙卷来临之前约为 2 m/s,龙卷影响时风速突增,风向呈气旋式旋转,

09:45 风速加大至 12 m/s,龙卷远离后,风速降为 4 m/s左右。5 min 累计降水在龙卷来临前 30 min 明显增大,气温在龙卷到来时略有下降,龙卷远离后气温显著上升、降水明显减弱。两个站点观测到相对湿度变化不大,主要原因是龙卷来临前台风"山竹"带来长时间降水造成空气湿度较大。

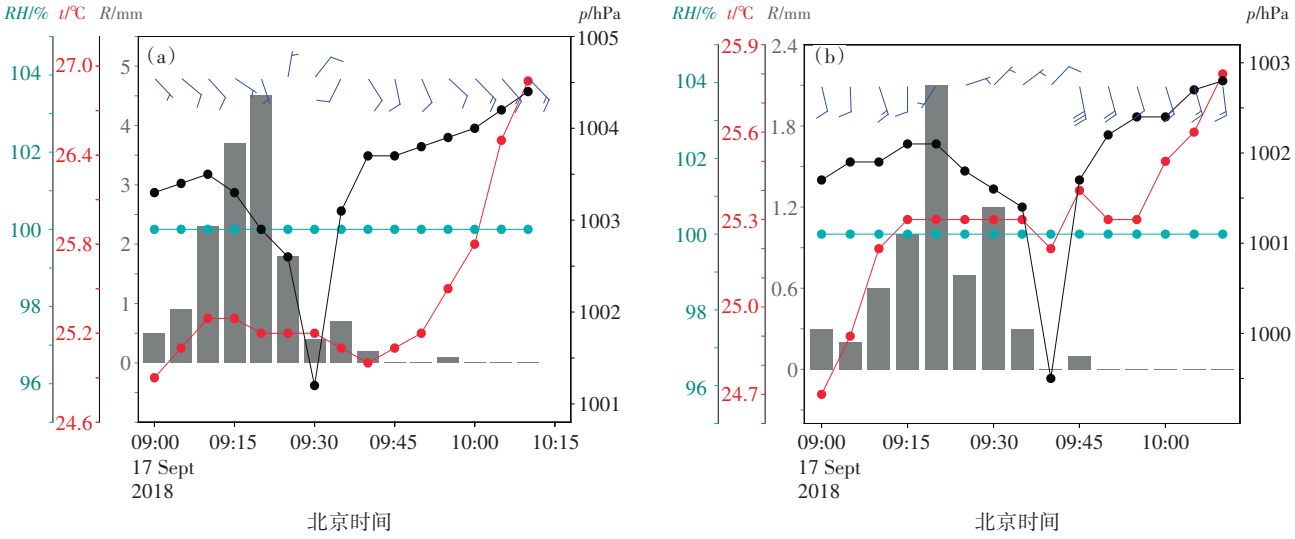


图 6 佛山地面自动站 G6963(a)和 G6958(b)气象要素随时间演变

Fig. 6 Variations of meteorological parameters observed at Foshan automatic weather stations

4.2 雷达观测

2018 年 9 月 17 日早晨,位于广州雷达西南侧的珠江口附近不断有螺旋雨带发展北上影响佛山。08:30 对流风暴在江门鹤山地区急剧加强并逐渐北抬靠近佛山,08:54 对流风暴继续加强,最强反射率因子为 58 dBz(图 7a),呈现低层钩状回波和入流缺口回波特征,随后以偏北向移动进入佛山。09:06—09:24,强度维持或略有短暂减弱,最强反射率因子为 54 dBz 左右。09:30,超级单体风暴在白坭镇突然显著增强,反射率因子极大值增大至 62 dBz,有钩状回波特征。09:36—09:54 对流风暴自三水区白坭镇北部西北移进入西南街道,风暴发展到最强阶段,钩状回波东侧的"V"形入流槽口表现更为明显,可见前侧入流非常强盛,上升运动在急剧加强,龙卷于 09:37 前后在白坭镇金竹村开始触地,龙卷大致发生在微超级单体风暴钩状回波弱回波区内。从 09:42 钩状回波在各高度层的结构(图 8)可以看到,0.5°仰角回波为明显的钩状,钩状回波末端为反射率因子最强区域(用双箭游标作为参照物),此时探测高度为0.9 km。从入流槽口的位置看,低层入

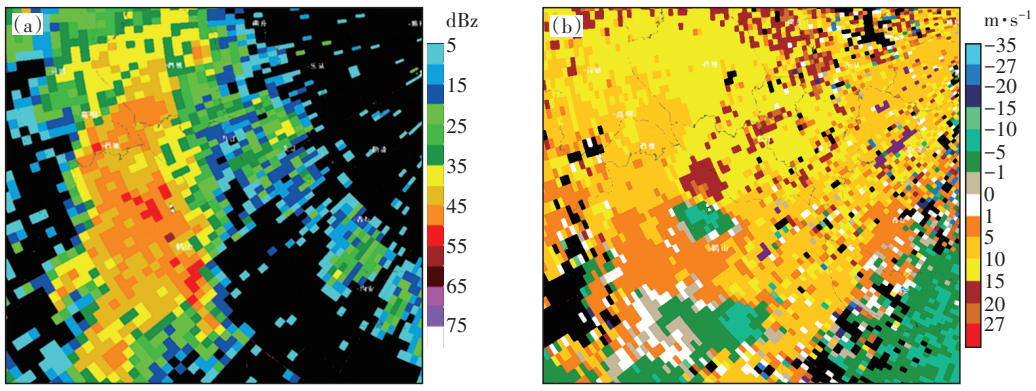


图 7 2018 年 9 月 17 日 08:54 广州雷达 0.5°仰角反射率因子(a)和径向速度(b)

Fig. 7 Reflectivity factor(a) and radial velocity(b) of Guangzhou radar with 0.5° elevation at 08:54 BT, September 17, 2018

流主要是东南风,这与大尺度环流中 925 hPa 上的强劲东南风一致。随着仰角的抬高,回波最强区域向西北方向偏移,表明超级单体风暴向高层发展时向西北方向倾斜,1.5°仰角为弱回波区,对应强的低层暖湿气流入流通道,2.4°和 3.3°仰角出现有界弱回波区,表明在此高度仍有强烈的上升气流,此时探测高度分别为 2.8 和 3.7 km。4.3°高度(4.8 km)以上回波反射率因子显著减弱。可见超级单体风暴发展高度不超过 5 km,尺度也不大,属于低质心的微超级单体风暴,风暴内上升气流强盛,此时龙卷强度达到最强的 EF2 等级。10:00 风暴移出三水区进入肇庆市,回波强度明显减弱,龙卷减弱消失。

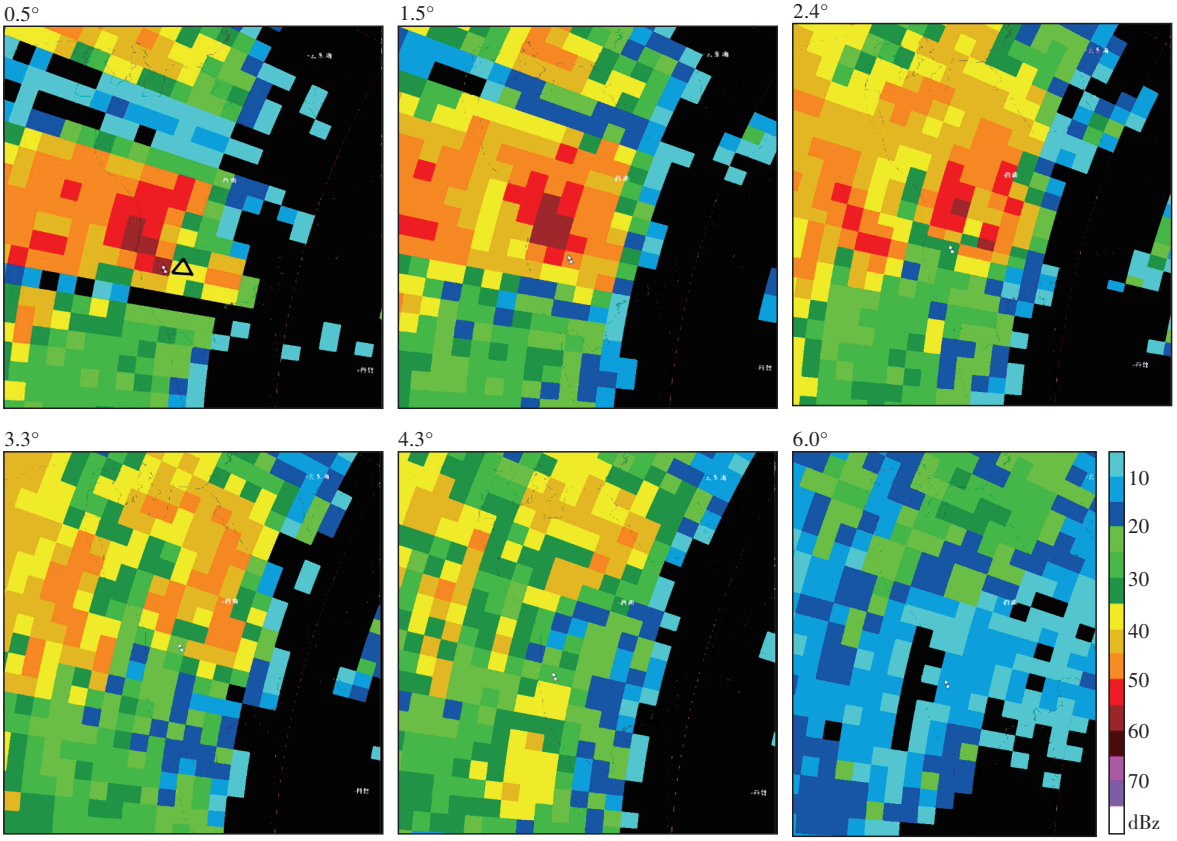


图 8 2018 年 9 月 17 日 09:42 广州雷达不同仰角反射率因子(黑色三角形为龙卷发生地)

Fig. 8 Reflectivity of Guangzhou radar with different elevations at 09:42 BT, Septenber 17, 2018 (Tornado is marked by black triangle)

雷达的径向速度图显示,9 月 17 日 08:42 在鹤山北部,首先在雷达 1.5°仰角探测到中气旋,探测高度为 1.7 km,处于雷达站 230°方向约 49.0 km 处。中气旋的最大入流速度和出流速度中心距离约为 3.6 km,旋转速度为 12.3 m/s,为弱中气旋。08:48—08:54 中气旋向西北偏北方向移动,并向上、向下伸展,低层 0.5°仰角表现为辐合式旋转,中低层 1.5°仰角为纯粹的旋转,正速度出现速度模糊,旋转速度为 20.0 m/s,属于中等强度中气旋,最大正速度区和最小负速度区相距 3—4 km,探测高度 0.8 km(图 7 b)。09:00—09:24 超级单体风暴进入佛山市境内,经过南海区西樵镇、高明区荷城街道和三水区白坭镇南部,中气旋先增强后略有减弱,其中 09:18 旋转速度达到 24.8 m/s,强度达到强中气旋,而 09:24 旋转速度又减弱为 19.6 m/s,属于中等强度中气旋。09:30—09:54 中气旋强度达到最强阶段(图 9),正速度出现速度模糊的区域明显扩大,风速显著增强,旋转速度由 24.5 m/s 增大至 30.5 m/s,达到强中气旋标准,中气旋直径缩小至 2.8 km,顶高维持在 0.6—0.8 km。09:36 在中气旋右侧探测到像素到像素的小尺度切变,没有达到 TVS 的判别阈值,切变值为 20.0 m/s,09:37 在白坭镇金竹村出现龙卷,09:42 在中气旋中心像素到像素的小尺度切变继续增强,切变值增大至 40 m/s。09:48 开始探测到 TVS,切变值达到 52 m/s,由此计算垂直涡度为 0.1 s^{-1},可见垂直涡度很大。从时

间对应上看,在龙卷出现的中气旋强度突然增强阶段,强中气旋持续了 30 min,强中气旋最早出现时间较龙卷提前 19 min,TVS 在龙卷形成后 11 min 被探测到,此时龙卷强度正处于最强阶段 F2 级。10:00 以后中气旋移入肇庆市四会区,强度也明显减弱。

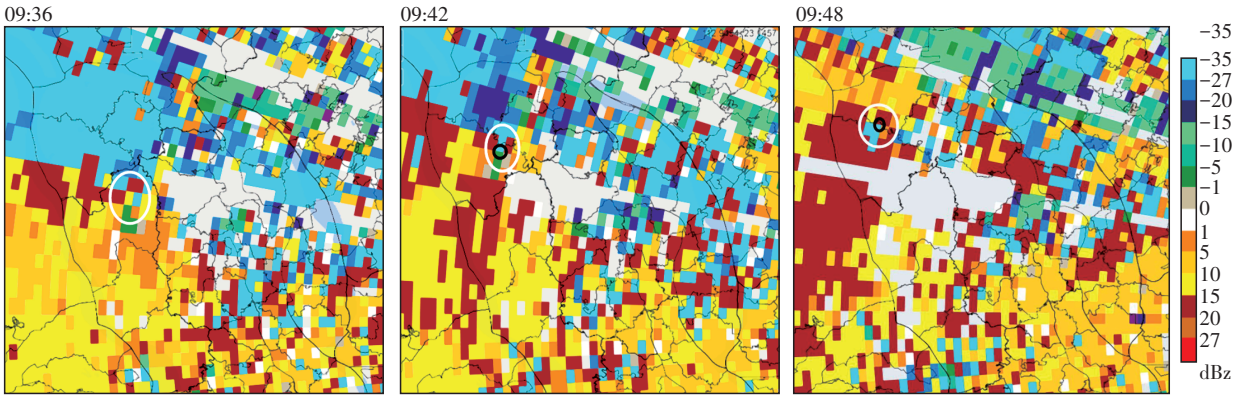


图 9 2018 年 9 月 17 日 09:36—09:48 广州雷达 0.5°仰角径向速度(中气旋、TVS 分别用白色、黑色圆圈表示)

Fig. 9 Radial velocity of Guangzhou radar with 0.5° elevation from 09:36 to 09:48 BT, September 17, 2018 (Mesocyclone is marked by white circle, TVS is marked by black circle)

根据雷达业务 PUP 产品识别出的中气旋特征演变(图 10),中气旋在龙卷发生前 42 min 出现,且中气旋的底高和顶高维持在很低的高度,底高在 0.5—0.8 km,非常接近地面,顶高在 1.2—3.3 km。09:06—09:24 中气旋的直径为 4.0—5.1 km,最强的切变维持在 10×10^{-3} s^{-1}左右。临近龙卷发生时中气旋强度突然增大,最强切变急剧增强至 52×10^{-3} m^{-1},气旋直径缩小至 2.8 km,最强切变和平均直径呈反相变化,同时中气旋顶高向上伸展,在 2.7 km 高度以上,中气旋变得更为深厚,龙卷强度也增强为EF2级。10:00以后风暴单体快速减弱,至 10:06 只识别到三维相关切变,最强切变值明显减小,龙卷减弱后消失。

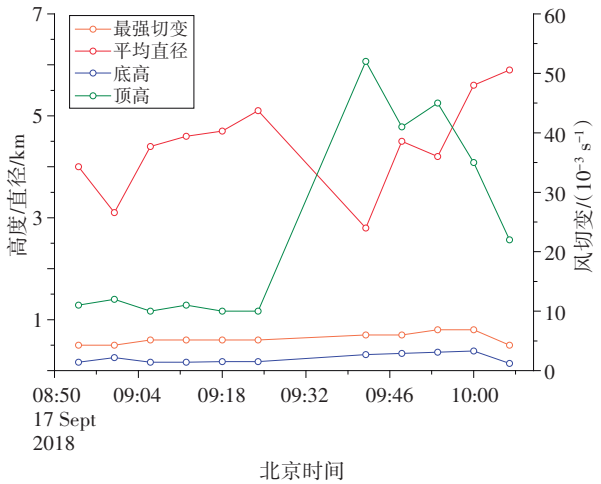


图 10 雷达中气旋探测算法得出的中气旋特征

Fig. 10 Variation characteristics of mesocyclone based on radar cyclone detection algorithm

4.3 龙卷预警分析

Trapp 等(2005)研究指出,中气旋为龙卷预警的重要指标,如果雷达探测到扩展至低层距地面 1 km以内的中等强度以上中气旋,龙卷出现的概率可超过 40%。通过分析雷达特征发现,产生龙卷的微超级单体风暴伸展高度低,中气旋系统的持续时间接近 1 h,中气旋的底高和顶高都很低,底高 0.5—0.8 km,顶高 1—3 km,垂直伸展高度在 3 km 以下。通过分析还发现,当强中气旋旋转速度迅速增大和直径快速减小时,对应龙卷发生或龙卷变强。此次龙卷的发生地三水白坭镇和西南街道属于台风龙卷的高发区(黄先香等,2018),且天气系统配置与历史上佛山的台风龙卷环流背景相似。同时分析探空数据和低层垂直风切变、SRH 等物理量参数可知,尤其是 0—1 km 垂直风切变出现急剧增大,表明环境条件有利于龙卷发生的情况下,需要进一步关注加密自动气象站观测,地面层上如果有风场辐合线和小涡旋等则容易触发对流系统。最后,通过密切监测雷达上螺旋雨带中的强回波区域发现,08:42—08:54 出现钩状回波,此时已探测到中等强度以上中气旋,底高 0.7 km,同时在环境条件有利的前提下,此时发布龙卷预警已有一定把握,佛山市气象台于 09:00 尝试发布了全国首个龙卷警报,09:37龙卷触地。

5 结 论

分析2018年9月17日佛山市三水区出现龙卷发生的天气背景、物理量参数、自动站加密观测、雷达回波以及中气旋演变等观测事实,得到主要结果:

1) 此次龙卷发生1822号台风“山竹”登陆后的外围螺旋雨带中,处在台风前进方向的右前侧的东北象限内,距离台风中心约455 km。龙卷发生时,“山竹”强度处于减弱阶段,但仍有热带风暴量级。

2) 龙卷发生在有利的环流背景下,高层辐散抽吸作用、中低层强劲的东南和偏南急流在佛山上空汇聚与地面中尺度辐合线的抬升触发作用相互配合。龙卷发生前的环境条件表现为中等偏弱的对流有效位能、弱的对流抑制能量、低的抬升凝结高度、大的风暴相对螺旋度和较强的风垂直风切变,尤其是0—1 km垂直风切变在龙卷发生前出现急剧增强,有利于龙卷等强对流天气的发生。

3) 地面层的中尺度辐合线和小尺度涡旋提前于龙卷出现,龙卷发生在小尺度涡旋附近并沿着地面辐合线向北移动。龙卷路径附近的地面自动气象站观测要素因受其影响而表现出明显的信号,龙卷过境时风速突增,单站5 min内气压降低/升高明显,风向出现明显的气旋式旋转。

4) 产生龙卷的母体是镶嵌在台风外围螺旋雨带中低质心的微超级单体,具有钩状回波特征;雷达速度图上低层有中气旋存在,持续时间接近1 h,龙卷发生时尺度较小的中气旋中心伴有TVS,强度达到强中气旋,底高和顶高均很低。龙卷触地前,中气旋急剧增强,中等强度中气旋较龙卷提早30 min以上出现,龙卷出现在雷达钩状回波的弱回波区附近,当中气旋最强切变迅速增大或者达到峰值时,预示着龙卷触地或龙卷增强。在台风龙卷的高发区,当环境场有利时,出现钩状回波,天气雷达低仰角速度图上出现中等强度以上、底高在1 km以下的中气旋且旋转速度持续增大时,可以考虑发布龙卷预警。

参考文献(References)

Craven J P, Brooks H E, 2004. Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep, moist convection[J]. Nati Wea Dig,28:13-24.

Davies J R,1984. Streamwise vorticity:The origin of updraft rotation in supercell storms[J]. J Atmos Sci,41:2991-3006.

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]. Meteor 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, 2005. Observations of the tornado occurred at Foshan on 4 October 2015[J]. Acta Meteor Sinica,75(2):288-313.(in Chinese)

Moller A R, 2001. Severe local storm forecasting[J]. Amer Meteor Soc,50:433-480.

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

Trapp R J, Stumpf G J, Manross K L, 2005. A reassessment of the percentage of tornadic mesocyclones[J]. Wea Forecasting,20:680-687.

魏文秀,赵亚民, 1995. 中国龙卷风的若干特征[J]. 气象,21(5):36-40. Wei W X, Zhao Y M, 1995. The characteristics of tornadoes in China[J]. Meteor Mon,21(5):36-40.(in Chinese)

吴芳芳,俞小鼎,王慧,等, 2010. 一次强降水超级单体风暴多普勒天气雷达特征[J]. 大气科学学报,33(3):285-298.. Wu F F, Yu X D, Wang H, et al, 2010. A HP supercell case study with the data of Doppler weather radar detection[J]. Trans Atmos Sci,33(3):285-298.(in Chinese)

吴芳芳,俞小鼎,张志刚,等, 2012. 对流风暴内中气旋特征与强烈天气[J]. 气象,38(11):1330-1338. Wu F F, Yu X D, Zhang Z G, et al, 2012. The characteristics of the mesocyclone and severe weather associated with convective storms[J]. Meteor Mon,38(11):1330-1338.(in Chinese)

吴风波,李岩松,苏丽蓉, 2016. 2014年春季华南地区两次强对流天气过程对比分析[J]. 气象与减灾研究,32(3):179-189. Wu F B, Li Y S, Su L R, 2016. Comparative analysis of two severe convective weather processes in southern China area[J]. Meteor Disaster Reduction Res,32(3):179-189.(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 tornadic heavy precipitation supercell storm[J]. Chinese J. Atmos Sci,32(3):508-522.(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)

朱星球,应冬梅, 2006. 2004 年 4 月 23 日江西强对流天气过程分析[J]. 气象与减灾研究,29(2):56-59. Yu X D, Zhu X Q, Ying D M, 2006. Analysis of the severe covective weather process on 23th, Apr, 2004 in Jiangxi province[J]. Meteor Disaster Reduction Res,29(2):56-59.(in Chinese)

周后福,习秀广,夏文梅,等, 2014. 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,2(2):306-317. Zhou H F, Diao X G, Xia W M, et al, 2014. Analysis of the tornado supercell storm and its environmental parameters in the Yangtze-Huaihe region[J]. Acta Meteor Sinica,2(2):306-317.(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)