台风"山竹"外围强龙卷的结构和机理分析

徐敬涵 1.2.3 冉令坤 2 炎利军 4 智海 1 沈新勇 1.5 李小凡 6

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象 灾害预报预警与评估协同创新中心,南京 210044

2 中国科学院大气物理研究所,北京 100029

3上海市气象灾害防御技术中心(上海市防雷中心),上海 200030

4 佛山市气象局龙卷风研究中心, 广东 528000

5南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海),珠海 519082

6浙江大学地球科学学院,杭州,浙江 310027

摘要本文利用再分析资料和中尺度数值模式 WRFV3.6.1,对 2018 年 9 月 17 日上午发生在佛山市三水区的 EF2 级强龙卷过程开展 49m 分辨率数值模拟,利用模式数据,分析龙卷超级单体和低层类龙卷涡旋(Tornado-Like Vortex,TLV)的结构特征,并通过涡度方程诊断 TLV 的动力成因,结果表明:龙卷由台风"山竹"外围螺旋雨带内的超级单体产生,该单体具有钩状回波、入流缺口、有界弱回波、悬垂回波等典型特征,水成物图上可见上冲云顶、云砧和后部云墙;单体内垂直环流由中部上升气流(Updraft,UD)、前部下沉气流(Front Flank Downdraft, FFD)和后部下沉气流(Rear Flank Downdraft, RFD)构成;TLV发生在低层 UD和 RFD之间,成熟期具有内部下沉、外部上升的结构;涡度方程的诊断分析表明,发展阶段扭转项对 TLV 的加强上传更为关键,成熟阶段拉伸项主导了TLV强度和形态的变化。

关键词 龙卷,超级单体,类龙卷涡旋,扭转项,拉伸项

文章编号 2022038B **中图分类号** P445 doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000



收稿日期 2022-09-20; 网络预出版日期 作者简介 徐敬涵,男,1997年出生,硕士研究生,主要从事中小尺度气象学研究。E-mail: 20191201087@nuist.edu.cn 通讯作者 智海,E-mail:zhihai@nuist.edu.cn 资助项目 广东省科技项目 2019B020208015,国家重点研发计划 2019YFC1510400,国家自然科学基金 41930967、41975054

Structure and mechanism analysis of the tornado at the periphery

of typhoon Mangkhut

XU Jinghan^{1,2,3}, RAN Lingkun², YAN Lijun⁴, ZHI Hai¹, SHEN Xinyong^{1,5}, LI Xiaofan⁶

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education / Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change / Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of

Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3 Shanghai Center for Meterorological Disaster Prevention Technology, Shanghai 200030, China

4 Foshan Meteorological Bureau Tornado Research Center, Guangdong Foshan 528000, China

5 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China

6 School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract Using the reanalysis data and WRFV3.6.1 model, the EF2-level tornado process which occurred in Sanshui District, Foshan City on the morning of 17 September 2018 was simulated at a 49m resolution in this paper. The structure of tornadic supercell and low-layer tornado-like vortex (TLV) are analyzed Using the mode data. Shearing wind helicity is introduced to diagnose the dynamic reasons for the formation of TLV. The results show that the tornado was produced by a supercell in the spiral rainband of typhoon Mangkhut. The supercell had the typical characteristics, such as hook echo, inflow notch, bounded weak echo region, and overhanging echo. The overshooting top, anvil and wall cloud can be seen on the vertical cross section of hydrometeor mixing ratio; The vertical circulation in the supercell is formed by updraft (UD), front flank downdraft (FFD) and rear flank downdraft (RFD); TLV occurred between the low-level UD and RFD; The inside sank while the outside rose during the mature stage of TLV; The diagnosis of the vertical vorticity equation indicates that the torsion term was more critical to the strengthening and upward spread of TLV during the developing stage, while the stretching term dominated the changes in TLV during its mature stage.

Key words tornado, supercell, tornado-like vortex, the torsion term, the stretching term

1. 引言

龙卷是强烈旋转的空气柱,通常与超级单体风暴(supercell)相联系,其空间尺度小、生命史短暂、破坏力极强。Lemon和Doswell(1979)提出了龙卷超级单体概念模型,指出超级单体内存在中部上升气流UD、前部下沉气流FFD和

后部下沉气流 RFD,龙卷形成于 UD 和 RFD 之间的垂直速度水平梯度大值区。 龙卷超级单体的另一个典型结构是后部云墙(Wall Cloud),主要由 FFD 内的蒸 发冷却气流沿 FFGF 进入 UD,上升过程中遇云底饱和的湿空气而形成(Atkins, 2014)。低层中气旋(low-level mesocyclone)与龙卷的形成密切相关(Zieglar et al., 2001)。类龙卷涡旋(TLV)最大涡度大于 0.2 s⁻¹,风速至少达到EF-0级(Schenkman, 2012),其直径介于龙卷和中气旋之间,约 2km。Edwards 等(2012)对比分析 了热带气旋和非热带气旋引起的龙卷,指出热带气旋内龙卷所处环境场具有更高 的深层湿度和更低的对流有效位能 CAPE,且与龙卷相对应的各环境参数特征分 布在更浅薄的垂直层次内。Adachi 和 Mashiko(2020)利用高时空分辨率的雷达 数据对 2019 年台风"海贝思"产生的龙卷过程开展观测分析,发现超级单体后 侧出流区上方存在一对反向旋转的涡旋对,涡旋对与中气旋的相互作用以及近地 面涡度的垂直拉伸在龙卷环流形成中扮演关键角色。

数值模拟的引入,使得龙卷的研究更为精细化、机理化。Klemp 和 Rotunno (1983)、Rotunno 和 Klemp(1985)等人建立了超级单体的数值模型,指出低 层中气旋和龙卷的垂直涡度很大程度上与低层空气沿风暴前侧冷流出边界入流 时在斜压作用下产生的水平涡度有关。Wicker 和 Wilhelmson(1995)研究表明 超级单体云底上方中气旋的加强产生向上的扰动气压梯度力,引起强烈的低空上 升气流,从而将中层的龙卷涡旋特征(tornadic vortex signature, TVS)(Brown et al., 1978)与近地面的龙卷环流联系起来。Mashiko(2009)通过对 2006 年台风"珊 珊"螺旋雨带内龙卷的高分辨率数值模拟,探讨了龙卷中水汽对涡流的影响,揭 示了涡度的垂直拉伸在龙卷形成中的关键作用。Davies-Jones(2015)指出了地 表摩擦的重要作用,摩擦应力打破离心力与内部气压梯度力的平衡,使得边界层 产生猛烈的向上喷射气流并伴随有螺旋线式的气流旋转,旋转气柱急剧收缩产生 龙卷。

国内学者也对龙卷的时空分布、结构特征、形成机理和参数演变等方面开展 了大量研究。范雯杰和俞小鼎(2015)的统计结果表明,广东的平原地带是我国 龙卷的高发区之一,其中一部分龙卷是由热带气旋螺旋雨带内的微超级单体风暴 产生的。黄先香等(2014)分析了佛山地区台风龙卷个例,指出台风龙卷通常出 现在台风移动方向的右前方,且一般产生于台风的减弱阶段。郑媛媛等(2015)

发现与西风带超级单体龙卷相比,台风龙卷中气旋尺度小、伸展高度低,环境场 表现为较低的对流有效位能和大的风暴相对螺旋度。刘式达等(2006)通过对速 度场的分解,得出龙卷具有漏斗状、大口朝上的三维螺旋结构。俞小鼎等(2008) 认为强的低层垂直风切变和低的抬升凝结高度有利于强龙卷的产生。周海光

(2018)利用双多普勒雷达三维风场反演数据对江苏阜宁一次强龙卷的中尺度结构进行研究,结果显示产生龙卷的中气旋南端存在反气旋,形成涡旋偶,对龙卷的生成、加强和触地有重要作用。唐嘉蕙等(2019)对 2015 年台风"彩虹"外围一次强龙卷开展数值模拟,建立了适用于我国华南地区台风螺旋雨带内龙卷超级单体风暴的三维动力结构模型。

在以往研究的基础上,本文将对 2018 年登陆台风"山竹"外围龙卷开展高分辨率数值模拟,探究龙卷超级单体的精细化结构特征,并利用模式资料对产生 龙卷的 TLV 系统进行涡度方程的诊断分析,以期揭示影响龙卷发生发展的关键 物理过程。

2. 天气形势

2018年第22号超强台风"山竹"于9月16日17时(北京时,下同)在广 东省台山市海晏镇沿海登陆,登陆时为强台风(15级,45m/s)。17日上午,"山 竹"位于广西境内,强度减弱为热带风暴(8级,20m/s)。09:37至10:00,处于 "山竹"外围螺旋雨带内的佛山市三水区出现 EF2级强龙卷,持续时间约23分 钟,路径长度约18km,移向为西北偏北方向。龙卷发生前的09:00,200hPa中 高纬度地区盛行西风气流,急流轴位于40°N附近,佛山市上空为台风高层辐散 气流(图1a);500hPa副热带高压控制我国中东部地区,脊线达到30°N以北, 佛山市位于台风和副热带高压之间,受偏南气流控制(图1b);850hPa佛山地 区相对湿度达到95%以上,水汽供应充足(图1c);海平面气压场上,广东沿海 处于台风东侧低压区内,东南和偏南气流在此汇聚,风场辐合显著(图1d)。

综上所述,此次龙卷过程发生在有利的大尺度环境下。低层辐合、高层辐散的流场提供动力抬升条件,中层副高西缘偏南气流和低层东南气流提供充沛的水 汽输送。对流层中下层水平风垂直切变明显,特别是 850 hPa 以下的低层,东南 风随高度显著增强(图 1c、d)。Craven 和 Brooks (2004)的统计结果表明,产 生强龙卷所需的 0-1 km 垂直风切变值为 5.5×10⁻³ s⁻¹以上,而此次龙卷触地前

(09:36), 三水风廓线雷达测得垂直风切变高达 12.7×10⁻³ s⁻¹。08:00 距离龙卷发 生地约 67 km 的清远站探空数据显示, 龙卷发生前大气层结具有弱的对流抑制能 量(33.3 J•kg⁻¹)、低的抬升凝结高度(117.0 m)、大的风暴相对螺旋度(283.0 m²•s⁻²) 和对于台风螺旋雨带内龙卷而言较高的对流有效位能(411.0 J•kg⁻¹), 以上数据 反映了强对流天气和龙卷发生的潜势(植江玲等, 2019)。



图 1 2018 年 9 月 17 日 09 时 (a) 200hPa 风场 (箭头为风矢量,填色为风速;单位:m/s), (b) 500hPa 形势场 (等值线和阴影为位势高度场,单位:dgpm;箭头为风矢量,单位: m/s),(c) 850hPa 风场和湿度场 (箭头为风矢量,单位:m/s;阴影为相对湿度,单位:%), (d) 海平面气压场、10 米风场及其散度 (箭头为风矢量,单位:m/s;阴影为散度,单位: s⁻¹;等值线为海平面气压,单位:hPa),红色圆点表示佛山市位置

Fig.1 The ERA5 analyzed field at 0100 UTC 17 September 2018 (a) Wind field (arrow, m/s) and horizontal wind speed (shaded,m/s) at 200 hPa; (b) Geopotential height field (contour and shaded, dgpm) and wind field (arrow, m/s) at 500 hPa; (c)Relative humidity (shaded, %) and wind field(arrow, m/s) at 850hPa; (d) Sea level pressure field (contour, hPa) and wind field (arrow, m/s) at 10m. The red dot shows the location of Foshan

3. 数值模拟方案设计和对比分析

本文利用中尺度数值模式 WRF V3.6.1,对此次龙卷过程开展高分辨数值模拟。背景场和边界条件采用欧洲中期天气预报中心 ERA5(0.25°×0.25°)再分析 资料。模拟时段为 2018 年 09 月 16 日 18:00:00 UTC 至 2018 年 09 月 17 日 06:00:00

UTC,时长12小时。模拟区域为五层单向嵌套区域,各层均以龙卷发生地佛山市三水区(23°N,113°E)为区域中心,网格分辨率分别为4000m、1333m、444m、148m和49m。各层所使用的参数化方案一致,主要方案如下:微物理过程采用Morrison double-moment scheme;大气辐射参数化方案采用 CAM scheme;近地面层参数化方案采用 Phusics sensitivity options;陆面过程模式采用 Pleim-Xiu Land Surface Model;行星边界层参数化方案采用 ACM2 PBL。由于各层网格分辨率均小于10km,因此未采用积云参数化方案。模式具体设置如表1所示。



图 2 为龙卷发生时段观测和模拟的雷达组合反射率图,可见模拟得出的台风 雨带的分布与实况十分相近,强度略偏强。台风东侧存在三处较强的螺旋雨带, 分别影响雷州半岛附近、海南和广东西部。本文所关注的龙卷发生在广东西部的 螺旋雨带内。



图 2. 2018 年 09 月 17 日 0148 UTC (a) 实况(来自国家气象信息中心 http://data.cma.cn [2022-01-20]) 和 (b) 4000m 分辨率模拟的 0218 UTC 组合反射率(单位: dBZ) Fig.2 (a) Observed radar reflectivity at 0148 UTC 17 September 2018; (b) 4000m resolution simulated radar reflectivity at 0218 UTC(shaded, dBZ)

49m 分辨率模拟数据成功再现了龙卷超级单体风暴和产生龙卷的类龙卷涡 旋 TLV。模拟得出的超级单体低层存在钩状回波结构(图 3c,划圈部分),垂直 剖面图上具有弱回波区和悬垂回波,上述雷达回波特征是龙卷超级单体的重要标志。TLV 系统位于钩状回波内钩处,移动方向、路径长度和持续时间均与观测结论相近,位置较实况略偏北,出现时间滞后约 30 分钟(图 3c)。10m 最大涡度存在减弱后二次加强的特征(图 3a),亦与实况相符(植江玲等,2019)。模拟的 10m 风速偏弱(图 3b),未达 EF2 级强龙卷标准(49-60m/s),可能是由于此次 龙卷直径很小,地面最小破坏直径仅有几米,49m 分辨率不足以模拟出实际龙卷, 仅得出了产生龙卷的 TLV 系统。综上所述,本次模拟效果较好,模式资料可靠。



图 3.49m 分辨率模拟的 0200-0230 UTC, TLV 区域 10m 最大涡度(单位: s⁻¹)(a)、最大风速(单位: m/s)(b)演变图; 实况龙卷路径(红色折线)和 49m 分辨率模拟的 0218 UTC 370m 高度雷达回波(填色,单位: dBZ)及 240m 高度 TLV 路径(蓝色折线)(c)

Fig.3 49m resolution simulated (a) 10m maximum vorticity in the TLV area (s^{-1}) ; (b) 10m maximum wind speed in the TLV area (m/s); (c) The track of observed tornado (red line) and 49m resolution simulated 0218 UTC radar reflectivity (shaded, dBZ) at 370m and the track of TLV at 240m(blue line).

4. 模拟结果分析

本文主要基于 49m 水平分辨率模拟数据,探究此次龙卷超级单体的三维结构特征,并诊断分析产生龙卷的低层中气旋的动力成因。

4.1 超级单体分析

低层具有钩状回波结构是龙卷超级单体的重要特征之一。如图4所示,单体 向西北方向移动,0207 UTC 雷达回波呈块状,最大反射率超过 50dBz(图 4a)。 随后单体面积扩大,尾部拉伸加强,并沿逆时针方向内旋(图 4b),0212 UTC 出现钩状回波特征(图 4c);0218 UTC 钩状回波更为显著,内钩处反射率达到 50dBZ,钩状回波北侧为宽阔的入流缺口,表明单体低层后部入流强烈,标志着 超级单体达到成熟(图 4d)。此后超级单体开始减弱,钩状回波趋于模糊,但主 体回波仍维持很高强度,产生强降水(图 4e、f)。

图 5 为超级单体成熟期 0218 UTC 雷达回波的垂直剖面图,所取剖线穿过了 低层钩状回波和入流缺口。如图所示,超级单体回波顶高约 8km,最强回波在 4km 附近,表明该单体质心高度较低,这与观测事实相符。低层入流缺口处 2km 以下对应弱(无)回波区,这是因为此处上升气流强烈,降水粒子难以聚集。2km 以上为强烈的悬垂回波。



图 4.49m 分辨率模拟的 370m 反射率(单位: dBZ)(a) 0207 UTC; (b) 0210 UTC; (c) 0212 UTC; (d) 0218 UTC; (e) 0224 UTC; (f) 0229 UTC

Fig.4 49m resolution simulated radar reflectivity (shaded, dBZ) at 370m. (a) 0207 UTC; (b) 0210 UTC; (c) 0212 UTC; (d) 0218 UTC; (e) 0224 UTC; (f) 0229 UTC



图 5.49m 分辨率模拟的 0218 UTC 反射率沿 112.82°E 的经向剖面图(单位: dBZ) Fig.5 The vertical cross section of 49m resolution simulated radar reflectivity along 112.82°E (shaded, dBZ) at 0218 UTC

图 6 为低层钩状回波附近 10m 水平风场和 1000m 高度垂直速度。如图所示, 超级单体主体部分由于降水较强,以下沉运动为主,即前部下沉气流 FFD。0207 UTC 尾部出现团状上升运动区 UD,对应近地面强烈辐合(图 6a);随着超级单 体的发展,上升运动区 UD 范围扩大,内部出现后部下沉气流 RFD 并加强(图 6b、c)。0212 UTC 上升气流 UD 和其内部下沉气流 RFD 最明显,整体处于钩状 回波北侧入流缺口处(图 6d)。FFD 主要由降水拖曳作用造成,到达近地面后的 辐散气流与偏东风汇合形成前侧阵风锋 FFGF; RFD 成因较为复杂,可能与降水 拖曳作用、高空干冷气流进入风暴后下沉、降水粒子蒸发冷却产生负浮力(俞小 鼎等,2009)等因素有关。上升区东侧偏南风与偏东风的气旋性切变形成后侧阵 风锋 RFGF。龙卷通常形成于 UD 和 RFD 的耦合区,即 FFGF 与 RFGF 的锢囚处 (Klemp and Rotunno, 1983)。0218 UTC 为超级单体成熟期,RFD 与钩状回波 内钩处相对应(图 6e)。此时近地面辐合已经减弱,UD 北侧的北风入流消失, 被南风贯穿,UD 和 RFD 随之减弱,结构变得松散(图 6e、f)。



图 6.49m 分辨率模拟的 1000m 垂直速度(填色,单位: m/s), 10m 风场(矢量,单位: m/s) 和 30dBZ 等反射率线(a) 0207 UTC;(b) 0208 UTC;(c) 0210 UTC;(d) 0212 UTC;(e) 0218 UTC;(f) 0229 UTC

Fig.6 49m resolution simulated vertical velocity at 1000m (shaded, m/s), wind field at 10m (arrow,

m/s) and 30dBz radar reflectivity contour. (a) 0207 UTC; (b) 0208 UTC; (c) 0210 UTC; (d) 0212 UTC; (e) 0218 UTC; (f) 0229 UTC

图 7 显示了超级单体内水成物随经度和高度的分布情况。在超级单体形成初 期 0207 UTC,水成物分布随高度向东倾斜,大值区位于 4km 附近,单体前侧有 水成物触地,对应降水区(图 7a)。随着超级单体的加强,单体内水成物含量激 增,范围扩大(图 7b)。0218 UTC 超级单体达到成熟,垂直方向存在两处水成 物大值区,一处位于单体中层,向下延伸至地面;另一处位于单体顶部,且向上 凸起形成上冲云顶(Overshooting Top),最大高度超过 8km。单体后部钩状回波 区位置有另一支上宽下窄的漏斗状水成物触地,形成云墙,维持数分钟后回缩。 上部水成物向后伸展,形成云砧(Anvil)。850hPa 以下、112.772°E 以西可见前 部下沉气流 FFD(图 7e)。图 7c-e 划圈部分反映了单体后部水成物向下伸展触地 的过程,这一现象与龙卷的触地关系密切。随后超级单体趋于减弱,0230 UTC 主体结构已崩溃,水成物分离,高度明显降低,但前部仍有明显的水成物接地, 表明此时单体仍产生较强降水(图 7f)。





Fig.7 Zonal-vertical cross section of 49m resolution simulated hydrometeor mixing ratio(shaded, g • kg⁻¹) and wind field(vector, w*15, m/s) through the hydrometeor mixing ratio center at 240m.(a) 0207 UTC; (b) 0212 UTC; (c) 0214 UTC; (d) 0217 UTC; (e) 0218 UTC; (f) 0230 UTC

4.2 低层中气旋分析

2km 以下的低层中气旋与龙卷密切相关,此次超级单体低层中气旋内产生了 TLV 系统,一定程度上反映了实际龙卷的演变特征。图 8 和图 9 分别显示了 240m 高度 TLV 系统的水平结构和 TLV 附近垂直速度的分布情况。根据 TLV 的结构和 强度等特征,将其生命史分为五个阶段:初始阶段 0207-0208 UTC,一涡度大值 带在超级单体尾部产生,向西北方向移动(图 8a、b)。此时下沉气流 RFD 较弱, 初始涡度位于上升气流内,涡度中心与上升运动中心相对应(图 9a)。发展阶段 0208-0210 UTC,涡度大值带东南侧快速加强为 TLV,中心移至 UD 和 RFD 之间

(图 9b),0210 UTC 最大涡度达到 0.32s⁻¹,其东侧伴随南风和东风的气旋性切 变,最大风速超过 40m/s(图 8c)。这一阶段 UD 和 RFD 显著增强,从而产生很 大的垂直速度水平梯度,有利于龙卷的发生。过渡阶段 0210-0212 UTC,TLV 内部开始出现下沉气流(图 9c)。成熟阶段 0212-0218UTC,TLV 内形成独立的 下沉中心,周围为上升运动(图 9d)。TLV 位于低层钩状回波内钩处,其内部减 弱,涡度向东侧集中形成狭窄的半环状涡度带(图 8d、e)。成熟阶段 TLV 内部 下沉、外部上升的结构与实际龙卷的结构一致(Fujita,1981),这一现象较龙卷 开始从云底向下伸展提前约 2 分钟(图 7c)、较龙卷触地提前约 6 分钟(图 7e)出现。0218 UTC 后 TLV 进入减弱阶段,下沉运动逐渐脱离 TLV 内部(图 9e),涡度场和垂直运动的配置与发展期相似,但 UD 和 RFD 较弱(图 8f、图 9f),TLV 短暂加强后逐渐消亡。TLV 强度和形态变化的具体成因,将在第 5 节中讨论。







图 8.49m 分辨率模拟的 240m 高度相对涡度(填色,单位: s⁻¹),水平风场(矢量,单位: m/s)和 30dBZ 反射率等值线(a) 0207 UTC;(b) 0208 UTC;(c) 0210 UTC;(d) 0212 UTC; (e) 0218 UTC;(f) 0224 UTC

Fig.8 49m resolution simulated relative vorticity at 240m (shaded, s⁻¹), wind field at 240m (arrow, m/s) and 30dBZ radar reflectivity contour. (a) 0207 UTC; (b) 0208 UTC; (c) 0210 UTC; (d) 0212 UTC; (e) 0218 UTC; 13 (f) 0224 UTC



图 9.49m 分辨率模拟的 240m 相对涡度 (等值线,单位: s⁻¹,间隔为 0.08 s⁻¹)和垂直速度 (填 色,单位: m/s) (a) 0208 UTC; (b) 0210 UTC; (c) 0211 UTC; (d) 0212 UTC; (e) 0218 UTC; (f) 0224 UTC

Fig.9 49m resolution simulated relative vorticity (contour, s⁻¹, contour interval is 0.08 s⁻¹) and vertical velocity (shaded, m/s), and at 240m. (a) 0208 UTC; (b) 0210 UTC; (c) 0211 UTC; (d) 0212 UTC; (e) 0218 UTC; (f) 0224 UTC

4.3 龙卷超级单体分析

图 10 为 0218 UTC 水成物、风场和涡度场经 240m 高度 TLV 中心的西北-东 南向剖面图。根据图 10,结合上文分析,得出此次龙卷超级单体具有以下特征: 超级单体向西北方向移动,成熟期云体最大高度约 8km。单体中部存在大范围上 升气流 UD,低层后部暖湿入流进入单体后通过 UD 向上输送,4km 附近上升气 流最强,形成一处水成物大值区,此处水成物向单体前部延伸至地面,对应超级 单体的主体强回波和 FFD;单体上部 UD 达到最大高度,水成物聚集形成另一处 大值区和上冲云顶。云砧向单体后部伸展,云砧内气流回落下沉。700hPa 以下 可见 RFD 存在于 UD 内部,与 UD 相互旋转契合,并向下延伸至近地面,对应 低层钩状回波和低层中气旋 TLV。TLV 位于 UD 和 RFD 耦合处,呈内部下沉、 外围上升的结构,涡度大值区在近地面,整体处于云墙内。

需要说明的是,图 10 中单体前部无法见到明显的 FFD,这是由于该图所取 剖面为西北-东南向,未经过 TLV 正西侧 FFD 强烈的强降水回波区,图 6d 和图 7e 更清晰地显示了 FFD 的存在。此外,图 10 所取时次为超级单体发展最为旺盛 的 0218 UTC,意在说明龙卷超级单体的总体结构特征,但此时 TLV 已经有所减 弱,其内部下沉气流 RFD 减弱收窄(图 6e、图 9e),且空间上存在旋转扭曲的 现象,难以用特定角度的剖面将其包含在内,因此图中红线所描绘的区域仅代表 了 RFD 的大致范围。

此次个例中的超级单体属于台风螺旋雨带内的微超级单体(minisupercell) (Suzuki et al, 2000),与经典的龙卷超级单体模型相比,该单体尺度较小,伸展 高度较低,单体内中层中气旋不明显,低层中气旋垂直涡度主要集中在 700hPa 以下,由 UD 和 RFD 相互作用产生,且自近地面向上发展。



图 10. 49m 分辨率模拟的 0218 UTC 经 23.24°N, 112.83°E 的水成物(填色,单位:g•kg⁻¹)、 垂直涡度(蓝色等值线,数值为 0.04、0.08、0.12、0.16、0.20 s⁻¹)、风场(矢量,垂直速度 扩大 15 倍,单位:m/s)的西北-东南向剖面图,红线为 RFD 大致范围 Fig.10 The northwest-southeast cross section of 49m resolution simulated hydrometeor mixing ratio (shaded, g•kg⁻¹), vertical vorticity (blue contour, 0.04, 0.08, 0.12, 0.16, and 0.20 s⁻¹ are shown) and wind field (arrow,w*15, m/s) through 23.24°N, 112.83°E. The red line shows RFD)

5. 涡度方程诊断分析

忽略摩擦作用的垂直涡度方程(Rotunno and Klemp, 1985)如下:

$$\frac{d\zeta}{dt} = \omega_h \cdot \nabla w + \zeta \frac{\partial w}{\partial z} \tag{1}$$

其中, ζ为垂直涡度, ω, 为水平涡度, w为垂直速度。

方程右端第一项为扭转项,体现了垂直速度将垂直风切变产生的水平涡度转 化为垂直涡度的作用。当垂直速度沿水平涡度方向增大时,水平涡管扭转为正向 的垂直涡管,使局地垂直涡度增加;当垂直速度沿水平涡度方向减小时,水平涡 管扭转为负向的垂直涡管,使局地垂直涡度减少。

方程右端第二项为拉伸项。对于气旋式环流,当垂直速度随高度增大时,气 柱拉伸,有水平辐合,气旋式环流加强;当垂直速度随高度减小时,气柱收缩, 有水平辐散,气旋式环流减弱。

以 2km 以下的 TLV 为研究对象,上述两项的作用和相对重要性在其发生发

展的各个阶段呈现出不同的阶段性特征。初始阶段 0207-0208 UTC, TLV 产生于 近地面超级单体尾部上升气流 UD 内, 东侧下沉气流 RFD 较弱。TLV 内存在正 扭转项和拉伸项的共同作用, 其中扭转项作用的高度范围较大,数值较小(图 11a); 正的拉伸项出现的高度很低,但数值较大(图 11b),两项之和的大值区 位于 TLV 中下部(图 11c)。涡度中心与拉伸作用强烈的上升运动区相对应,强 度有所加强。



图 11.49m 分辨率模拟的 0207 UTC 经 TLV 中心的西北-东南向垂直剖面图。填色为(a) 扭转项、(b) 拉伸项及(c) 两项之和(单位: 10⁻³s⁻²);等值线为垂直涡度(单位: s⁻¹,间隔为 0.04s⁻¹);矢量为风场(垂直速度扩大 15 倍,单位: m/s)

Fig.11 49m resolution simulated northwest-southeest vertical cross section of terms of the vorticity equation(shaded, 10⁻³s⁻²), relative vorticity (contour, s⁻¹, interval is 0,04s⁻¹) and wind field (arrow, w*15, m/s) through the center of TLV at 0207 UTC. (a) the torsion term; (b) the stretching term; (c) the sum of the two terms

发展阶段 0208-0210 UTC,上升气流 UD 和后部下沉气流 RFD 显著加强, 升降气流之间垂直速度水平梯度急剧增大,扭转作用成为引起涡度增长的主要因 子,TLV 中心由 UD 内部移至 UD 与 RFD 之间。随着 TLV 不断向 RFD 靠近, 扭转作用在 TLV 内自下而上传播,产生大范围扭转项正值区(图 12a)。拉伸项 在 TLV 下部为正,中上部为弱的负值(图 12b)。此阶段 TLV 内部存在大范围两 项之和的大值区(图 12c),TLV 快速加强上传。

发展阶段扭转项的作用更为关键。一方面,拉伸项正值区仅存在于 TLV 下

部,而扭转项正值区在 TLV 内的数值和范围均很大,有利于 TLV 加强;另一方面,拉伸项在 TLV 中上部为负值,因此 TLV 的向上传播是由扭转项引起的。

水平分布图(图13)更清晰地体现了扭转项的关键作用。以0209 UTC、240m 高度为例,可见 TLV 中心对应着扭转项大值区(图13a),而拉伸项在该区域为 负值(图13b),表明此时 TLV 中心的发展完全由扭转作用导致。其他高度上亦 可见相似的特征。



图 13.49m 分辨率模拟的 0209 UTC, 240 m 高度相对涡度(等值线,间隔为 0.08s⁻¹)和(a) 扭转项(填色,单位: 10⁻³s⁻²),(b) 拉伸项(填色,单位: 10⁻³s⁻²)

Fig.13 49m resolution simulated 0209UTC relative vorticity (contour, interval is $0.08s^{-1}$) and (a) the torsion term (shaded, $10^{-3}s^{-2}$), (b) the stretching term (shaded, $10^{-3}s^{-2}$) at 240m

0210-0212 UTC 为过渡阶段,TLV 内部和周围均以下沉运动为主(图 14)。 TLV 中低层下沉气流随高度增强,拉伸项为负,与西北正、东南负分布的扭转项 相配合,使得 TLV 内两项之和以负值为主,TLV 明显减弱。



Fig.14 The same as Fig.11, but at 0211 UTC

0212 UTC 起,TLV 达到成熟,内部下沉、外部上升的结构建立,垂直速度 水平梯度由TLV 内部指向外。水平涡度为由东南指向西北向(图略),因此TLV 东南侧扭转项为负,使得相对涡度减小;TLV 西北侧扭转项为正,使得相对涡度 增大(图 15a)。拉伸项的作用效果则与扭转项大致相反:由于TLV 随高度向西 北方向倾斜,对于TLV 东南界面,其下侧为TLV 内部,有下沉运动;上侧为TLV 外部,有上升运动,垂直速度随高度增大,拉伸项为正。对于TLV 西北界面, 其下侧为TLV 外部,有上升运动;上侧为TLV 内部,有下沉运动,垂直速度随 高度减小,拉伸项为负(图 15b)。在 0212 UTC-0218 UTC 之间,TLV 结构稳定, (1)式右端两项大致维持上述配置,且由于拉伸项数值明显大于扭转项,两项 之和为东南正、西北负分布(图 15c)。与发展阶段相比,两项之和正值区数值 减小、范围仅局限在TLV 东南侧,TLV 维持震荡减弱的态势。

从水平方向看,拉伸项正、负中心分别位于 TLV 东南侧和西北侧(图 16a), 有利于 TLV 东南侧加强、西北侧减弱。事实上,TLV 内涡度大值区位于其东侧, 呈南北向带状分布,这可能与风场对拉伸项的输送有关:TLV 东侧为南风、北侧 为东风,东北侧风向气旋性切变显著。东侧南风将东南侧正的拉伸项向北输送, 到达东北侧后南风减弱、风速辐合,因此拉伸项经向通量散度为负,拉伸项增大 (图 16c);北侧东风将较大的拉伸项向负值中心输送,以补偿负拉伸项对涡度 的耗散(图 16b)。最终,由TLV东南侧产生的正拉伸项通过水平风场的输送在 TLV东北侧辐合(图 16d),引起相应区域涡度增加,从而在TLV东侧形成南北 向涡度大值带。TLV 南侧和西侧的拉伸项正值区则与强上升运动区相对应,使得 TLV 向西伸展而呈现逗点状结构。

根据以上分析,在TLV 成熟阶段,拉伸项对TLV 的维持和形态变化起主导作用,且拉伸项是由TLV 内部下沉、外部上升的结构及其随高度向西北方向倾斜的形态特征决定的。扭转项与拉伸项呈反位相分布(图15a、b),在TLV 东侧涡度大值带内数值为负,抑制了TLV 进一步发展。



Fig.15 The same as Fig.10, but at 0212 UTC





图 16.49m 分辨率模拟的 0212 UTC, 370 m 高度相对涡度(等值线,单位: s⁻¹)、水平风场 (矢量,单位: m/s)和(a)拉伸项(填色,单位: 0.5*10⁻³s⁻²),(b)拉伸项的纬向通量散 度(填色,单位: 10⁻⁴s⁻²),(c)拉伸项的经向通量散度(填色,单位: 10⁻⁴s⁻²),(d)拉伸项 的水平通量散度(填色,单位: 10⁻⁴s⁻²)

Fig.16 49m resolution simulated 0212 UTC relative vorticity (contour, s^{-1}), wind field (arrow, m/s) and (a) the stretching term (shaded, $10^{-3}s^{-2}$), (b) zonal flux divergence of the stretching term (shaded, $10^{-4}s^{-2}$), (c) longitudinal flux divergence of the stretching term (shaded, $10^{-4}s^{-2}$), (d) horizontal flux divergence of the stretching term (shaded, $10^{-4}s^{-2}$) at 370m

0218 UTC 后,后部下沉气流 RFD 脱离 TLV 内部,TLV 区域垂直运动配置 与发展期相似(图 9b、e),TLV 亦表现出与发展期相似的形态,强度短暂加强。 但随着升降气流的减弱,涡度个别变化项数值减小,TLV 逐渐减弱消散(图略)。

根据以上分析,得出如图 17 所示的 TLV 概念模型。初始阶段,TLV 产生于 UD 内部,自近地面向上发展(图 17a);发展阶段,UD 和 RFD 显著加强形成很 大的垂直速度水平梯度,扭转项成为 TLV 加强和上传的关键因子(图 17b);成 熟阶段,TLV 内部为下沉气流,外部为上升气流,TLV 的倾斜使得下界面(西 北界面)垂直速度随高度减小,拉伸项为负,上界面(东南界面)垂直速度随高 度增大,拉伸项为正,形成非对称结构(图 17c);减弱阶段,TLV 结构与发展 阶段相似,但垂直运动强度较弱(图 17d)。



图 17 根据模拟结果得出的 TLV 概念模型 Fig.17 Conceptual model of TLV derived from simulation results

纵观 TLV 发生发展的全过程,涡度方程可以较好地解释 TLV 的强度及形态 特征。影响涡度方程各项大小的主要因子有:水平风垂直切变产生的水平涡度、 上升气流 UD 和后部下沉气流 RFD 在各高度上的强度及水平分布、TLV 自身的 结构和形态。方程右端两项之和数值愈大,愈有利于 TLV 内对应区域加强或维 持。在这一过程中,低层强垂直风切变扮演者重要角色:其一,产生水平涡度, 通过不均匀垂直速度的扭转作用,产生 TLV 初始垂直涡度,并引导 TLV 加强和 向上发展;其二,上下不同的风应力引起 TLV 发生倾斜,从而影响拉伸项的正 负分布,导致水平方向上 TLV 强度的非对称性。

6. 结论与讨论

本文利用中尺度数值模式 WRFV3.6.1 对 2018 年 9 月 17 日上午发生在佛山 市三水区的 EF2 级龙卷过程开展数值模拟,利用模式数据,分析了龙卷超级单 体的结构特征,并对低层类龙卷涡旋 TLV 进行涡度方程的诊断分析,得到如下 结论: (1)此次龙卷过程发生在有利的环境条件下,低层辐合高层辐散的流场创造了 动力抬升条件,低层来自海洋的暖湿气流提供了充沛的水汽输送。弱的对流抑制 能量、低的抬升凝结高度和大的风暴相对螺旋度反映了层结的不稳定性,表明了 龙卷风暴发生的巨大潜势。

(2)此次龙卷由台风"山竹"螺旋雨带内的超级单体风暴产生。该单体自东南 向西北方向移动,水平和垂直尺度均较小,质心高度较低。雷达回波图上,单体 具有钩状回波、入流缺口、有界弱回波区和回波悬垂等典型特征。单体内部垂直 环流由中部上升气流 UD、前部下沉气流 FFD 和后部下沉气流 RFD 构成。水成 物图上可见上冲云顶和向后伸展的云砧,两支触地水成物分别与强降水回波和钩 状回波相对应。

(3) 类龙卷涡旋 TLV 发生在低层上升气流 UD 和后部下沉气流 RFD 之间,随 高度向西北方向倾斜。发展期 TLV 中心垂直涡度快速增大至 0.3s⁻¹以上,水平方 向直径缩小,垂直方向向上伸展。成熟期内部为下沉气流,外部为上升气流,涡 度大值区集中在 TLV 东侧,呈半环状,强度总体上有减弱趋势。

(4)涡度方程反映了水平涡管扭转为垂直涡管和涡度的垂直拉伸这两种物理过 程对垂直涡度的贡献,揭示了TLV发生发展的关键物理过程。涡度方程诊断分 析表明,初始阶段和发展阶段,TLV在两项共同作用下,由近地面自下而上发展, 其中扭转项随着升降气流的加强而急剧增大,对TLV的加强上传更为关键;成 熟阶段,TLV内部下沉、外部上升的结构及其随高度向西北方向倾斜的形态导致 拉伸项呈东南正、西北负分布,主导了TLV的强度和形态变化,扭转项则起到 弱的抑制作用;减弱阶段,TLV的消散与升降气流的减弱分离有关。

本文成功模拟了龙卷母体风暴和产生龙卷的 TLV 系统,TLV 的位置、移向 和生命史均和实际龙卷十分相似。此次个例中的龙卷超级单体结构特征与唐嘉蕙 等(2019)得出的超级单体结构模型比较相似,本文与上述文献的差异在于,本 文主要关注类龙卷涡旋系统的精细化结构演变,利用涡度方程诊断分析了类龙卷 涡旋 TLV 强度和形态变化的原因,揭示了拉伸项在龙卷形成过程中的重要作用。 在以往研究中,拉伸项通常表现为上升运动随高度增强引起的涡度在垂直方向的 拉伸(俞小鼎等,2008; Mashiko 等,2009),本文指出 TLV 随高度的倾斜也是拉 伸项产生的重要原因,具体表现为 TLV 成熟期具有内部下沉、外部上升的结构,

在 TLV 沿倾斜方向一侧(下界面)拉伸项为负,涡度减小,倾斜方向的反方向 一侧(上界面)拉伸项为正,涡度增大。本文所得结论是由此次过程特定的环境 配置决定的,是否具有普适性尚需开展更多个例的模拟工作加以验证。

参考文献 (References)

Adachi T, Mashiko W. 2020. High temporal-spatial resolution of tornadogenesis in a shallow supercell associated with Typhoon Hagibis(2019) using phased array weather radar[J]. Geophys. Res. Lett., 47:e2020GL089635. doi:10.1029/2020GL089635

- Atkins N T, Glidden E M, Nicholson T M. 2014. Observations of wall cloud formation in supercell thunderstorms during VORTEX2[J]. Mon. Wea. Rev., 142(12):4823-4838. doi:10.1175/MWR-D-14-00125.1
- Brown R A, Lemon L R, Burgess D W. 1978. Tornado detection by pulsed Doppler radar[J]. Mon. Wea. Rev., 106:29-38. doi:10.1175/1520-0493(1978)106<0029:tdbpdr>2.0.co;2
- 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-Jones R. 2015. A review of supercell and tornado dynamics[J]. Atmospheric Research, 158:274-291. doi:10.1016/j.atmosres.2014.04.007
- Edwards R, Dean A R, Thompson R L, et al. 2012. Convective modes for significant severe thunderstorms in the contiguous United States. Part III: Tropical cyclone tornadoes[J]. Wea. Forecasting, 27(6):1507-1519. doi:10.1175/WAF-D-11-00117.1
- 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 Wenjie, Yu Xiaoding, 2015. Characteristics of spatial-temporal distribution of tornadoes in China[J]. Meteor. Mon(in Chinese), 41(7):793-805. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2015.07.001
- Fujita T T. 1981. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales[J]. J. Atmos. Sci., 38(8):1511-1534. doi:10.1175/1520-0469(1981)038<1511:taditc>2.0.co;2
- 黄先香,炎利军,王硕甫,等.2014. 佛山市龙卷风活动的特征及环流背景分析[J]. 广东气象,36(3):1-6. Huang Xianxiang, Yan Lijun, Wang Shuofu, et al. 2014. Characteristics and circulation background analysis of tornado activity in Foshan city[J]. Guangdong Meteorology(in Chinese), 36(3):1-6. doi:10.3969/j.issn.1007-6190.2014.03.004
- Klemp J B, Rotunno R. 1983. A Study of the Tornadic Region within a Supercell Thunderstorm[J]. J. Atmos. Sci., 40(2):359-377. doi:10.1175/1520-0469(1983)040<0359:asottr>2.0.co;2

- Klemp J B, Wilhelmson R B. 1978. Simulations of right- and left- moving storms produced through storm splitting[J]. J. Atmos. Sci., 35(6):1097-1110. doi:10.1175/1520-0469(1978)035<1097:soralm>2.0.co;2
- Klemp J B. 1987. Dynamics of tornadic thunderstorms[J]. Ann. Rev. Fluid Mech., 19:369-402. doi:10.1146/annurev.fl.19.010187.002101
- Lemon L R, Doswell C A. 1979. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis[J].Mon.Wea.Rev.,107(9):1184-1197.doi:10.1175/1520-0493(1979)107<1184:steams>2. 0.co;2
- 刘式达,刘式适,梁福明,等. 2006. 大气涡旋的螺旋结构[J]. 大气科学, 30(5):849-853. Liu Shida, Liu Shikuo, Liang Fuming, et al. 2006. The spiral structure for atmospheric vortex[J]. Chinese Journal of Atmospheric Science(in Chinese), 30(5):849-853. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.05.13
- Mashiko W, Niino H, Kato T. 2009. Numerical simulation of tornadogenesis in an outer-rainband minisupercell of typhoon Shanshan on 17 September 2006[J]. Mon. Wea. Rev., 137(12):4238-4260. doi:10.1175/2009MWR2959.1
- Mead C M. 1997. The discrimination between tornadic and nontornadic supercell environments: A forecasting challenge in the southern United States[J]. Wea. Forecasting, 12(3):379-387. doi:10.1175/1520-0434(1997)012<0379:tdbtan>2.0.co;2
- Rotunno R, Klemp J. 1985. On the Rotation and Propagation of Simulated Supercell Thunderstorms[J]. J. Atmos. Sci., 42(42):271-292. doi;10.1175/1520-0469(1985)042<0271:otrapo>2.0.co;2
- Schenkman A D, Xue M, Shapiro A. 2012. Tornadogenesis in a Simulated Mesovortex within a Mesoscale Convective System[J]. J. Atmos. Sci., 69(11):3372-3390. doi:10.1175/JAS-D-12-038.1
- Suzuli O, Niino H, Ohno H, et al. 2000. Tornado-producing mini supercells associated with Typhoon 9019[J]. Mon. Wea. Rev., 128:1868-1882. doi:10.1175/1520-0493(2000)128<1868:tpmsaw>2.0.co;2
- 唐嘉蕙, 冉令坤, 沈新勇, 等. 2019. 广东佛山 EF3 级龙卷超级单体风暴高分辨率数值模拟[J]. 地球物理学 报, 62(11):4082-4097. Tang Jiahui, Ran Lingkun, Shen Xinyong, et al. 2019. High-resolution numerical resolution of the EF3 tornadic storm in Foshan city, Guangdong Province[J]. Chinese J. Geophys.(in Chinese), 62(11):4082-4097. doi:10.6038/cjg2019M0478
- Wicker L J, Wilhelmson R B. 1995. Simulation and analysis of tornado development and decay within a three-dimensional supercell thunderstorm[J]. J. Atmos. Sci., 52(15):2675-2704.
- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 2009. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 156-157. Yu Xiaoding, Yao Xiuping, Xiong Tingnan, et al. 2009. Doppler Weather Radar Theory and Operation

Application(in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 156-157.

- 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 Xiaoding, Zheng Yuanyuan, Liao Yufang, et al. 2008. Observational investigation of a tornadic heavy precipitation supercell storm[J]. Chinese Journal of Atmospheric Science(in Chinese), 32(3):508-522. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.03.08
- 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 Yuanyuan, Zhang Bei, Wang Xiaohua, et al. 2015. Analysis of typhoon-tornado weather background and radar echo structure[J]. Meteor. Mon.(in Chinese), 41(8):942-952. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2015.08.003
- 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(in Chinese), 42(4):251-260. doi:10.12013/qxyjzyj2019-041
- 周海光. 2018. "6·23"江苏阜宁 EF4 级龙卷超级单体风暴中尺度结构研究[J]. 地球物理学报, 61(9):3617-3639. Zhou Haiguang. 2018. Observations of 23 June 2016 EF4 tornado supercell thunderstorm mesoscale structure in Funing county, Jiangsu Province[J]. Chinese J. Geophys.(in Chinese), 61(9):3617-3639. doi:10.6038/cjg2018L0166
- Ziegler C L, Rasmussen E N, Shepherd T R, et al. 2001. The evolution of the low-level rotation in the 29 May 1994 NewcastleGraham, Texas, storm complex during VORTEX[J]. Mon. Wea. Rev., 129:1339-1368. doi:10.1175/1520-0493(2001)129<1339:teollr>2.0.co;2



