

文章编号:1673-8411 (2018) 01-0028-05

1713号台风“天鸽”外围龙卷特征及成因分析

黄荣, 黄晴, 屈梅芳, 赖珍权

(广西区气象台, 南宁, 530022)

摘要:利用常规观测资料、多普勒天气雷达资料和区域加密自动站资料对1713号台风“天鸽”外围的龙卷过程进行分析,结果表明:(1)此次龙卷过程发生在台风外围螺旋云带前部,物理量分析表明广西东南部具有较大的不稳定度能量,抬升凝结高度较低,低层垂直风切变较大,有利于龙卷发生的环境热力和动力条件。中尺度地面辐合线触发出新生对流单体,该对流单体在高温高湿和强不稳定状态环境中最终发展为龙卷。(2)此次龙卷为微超级单体风暴,具有低层有钩状回波、中高层回波悬垂和有界弱回波区(BWER)等典型超级单体特征,低层钩状回波的演变与龙卷的生成密切相关。(3)中气旋先于低层钩状回波出现,钩状回波形成于强中气旋附近。龙卷发生时中气旋底高在2km左右,TVS切变底部高度0.5km左右并且不断下降,与龙卷漏斗状云柱高度逐渐下降接地的趋势一致。

关键词:台风;龙卷;钩状回波;中气旋;TVS

中图分类号:P445 **文献标识码:**A

Analysis of the characteristics and causes of the peripheral tornado of NO.1713 Typhoon Hato

Huang Rong, Huang Qing, Qu Meifang, Lai Zhenquan

(Guangxi Meteorological Observatory, Nanning Guangxi 530022)

Abstract: Using conventional observation data, Doppler weather radar, and regional encrypted automatic station data, the tornado process in NO.1713 typhoon Hato periphery was analyzed. The main conclusions of this paper were: (1) the tornado occurred in the front of the spiral cloud band in the typhoon periphery. Analysis of physical quantities showed that there was high instability energy in southeast Guangxi. The vertical wind shear in the middle-low level was large and the lifting condensation level was very low. These were the environmental conditions that conducive to the development of the tornado. The surface mesoscale convergence line triggered the generation of a new convection cell which eventually developed into a tornado with high temperature, high humidity, and strong instability. (2) This tornado was a micro-supercell storm with hook echo in the low level, echo overhung and bounded weak echo region (BWER) in the middle-upper level, which were typical supercell features. The evolution of the low-level hook echo was closely related to the occurrence and extinction of the tornado. (3) The mesocyclone appeared before the low-level hook echo and the hook echo appeared near the strong mesocyclone. When the tornado occurred, the bottom height of the mesocyclone was about 2km, the bottom height of TVS shear was about 0.5km and continued to descend, which was consistent with the tornado funnel cloud that gradually descended to the ground.

Keywords: typhoon; tornado; hook echo; mesocyclone; TVS

1 引言

龙卷是一种破坏力极大的小尺度强对流天气,其显著特征是有一条漏斗状云柱从雷暴云底伸展至

地面,是一种猛烈的小型涡旋和小型低压系统。EF2级以上的龙卷由于其在地面产生风速极大的旋转风,通常会造成重大的人员伤亡和财产损失,例如2016年6月23日发生江苏省盐城市阜宁县的EF4

收稿日期:2017-10-10

基金项目:中国气象局预报司龙卷预警业务试验能力建设(二期)、广西短时临近预报技术创新团队项目共同资助。

作者简介:黄荣(1982-),男,工程师,硕士,研究方向:灾害性天气短时临近预报预警。

级龙卷导致 99 人死亡、数百人受伤, 大批建筑和设施被毁。因此龙卷的发生环境和监测预警一直是国内外气象学者重点研究领域之一。研究表明^[1-3], 龙卷多发生在西风带低槽或横槽、冷涡等西风带天气系统中, 环境大气具有抬升凝结高度较低、中低层比湿较大、0℃以下对流有效位能极端大等特征, 超低空强垂直风切变有利于龙卷小尺度涡旋的形成, 低层切变线和地面气旋式辐合切变是龙卷风暴可能的触发机制。龙卷通常是由超级单体发展形成, 具有低层入流缺口、中高层回波悬垂等经典超级单体的反射率因子特征, 雷达速度图像呈现出在深厚强烈的中尺旋里面包裹更小尺度的龙卷式涡旋特征(TVS)^[4-5]。此外, 有部分龙卷发生台风的外围云带中^[6-8], 登陆前或登陆后的台风前部超低空强垂直风切变和极不稳定层结是有利龙卷发生的环境条件, 部分台风龙卷也具有中气旋结构、龙卷式涡旋特征(TVS)中, 但比西风带的龙卷风暴尺度小, 生命史较短。近年来在明显变暖趋势的气候背景下, 极端强降水、冰雹、飑线强对流等极端天气事件增多^[9-13], 陆地龙卷和水龙卷等事件也时有发生, 例如 2013 年和 2015 年在柳州和桂林分别发生了龙卷天气, 李向红等^[14]对这两次龙卷过程进行对比分析, 得到了两次龙卷过程环境条件和雷达特征异同点。但总体上广西有记录的 EF2 级以上的龙卷过程相对较少^[15], 在多普勒天气雷达布网以前地面观测网也难以捕捉到 α 小尺度的龙卷天气, 因此针对广西龙卷的研究并

不多见, 针对广西台风龙卷的分析研究更是几乎为空白。2017 年 8 月 23 日 15 时左右, 广西玉林市北流市隆盛镇遭受罕见的龙卷风袭击, 本文通过常规观测资料、多普勒天气雷达资料和区域加密自动站资料详细分析此次龙卷过程特征和成因, 希望通过本文研究可以对广西龙卷研究补充完善, 为今后台风外围龙卷预警提供参考。

2 过程天气实况和灾情

受 1713 号台风“天鸽”外围强对流云团影响, 2017 年 8 月 22 日下午至 8 月 23 日广西自东向西出现大范围的雷暴和雷暴大风天气(图 1a), 8 月 22 日 20 时—23 日 20 时全区共有 51 个县级站观测到雷暴天气和 52 站次 8 级($17.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)以上雷暴大风, 雷暴大风主要出现在桂南、桂西, 桂南、桂西大部出现雨量 $20\text{--}40\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的短时强降水天气(图略), 局地雨强超过 $50\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。8 月 23 日 15 时左右, 北流市隆盛镇秧道村松花组附近遭到罕见的龙卷风袭击, 媒体报道附近居民用手机拍摄到龙卷的漏斗状云已接地的视频(图 1b)。事后灾情调查表明, 此次龙卷共造成 5 人受伤, 照耀河砂石厂和永基储石场部分机械、临时铁皮顶房屋被毁, 一辆越野车被风吹翻, 储石场后山腰 100 多棵松树和速生桉被拦腰吹断。根据“增强藤田级别”对龙卷强度的判定标准^[15], 综合认定此次龙卷强度为 EF2 级, 最大风速可能达 $50\text{--}60\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

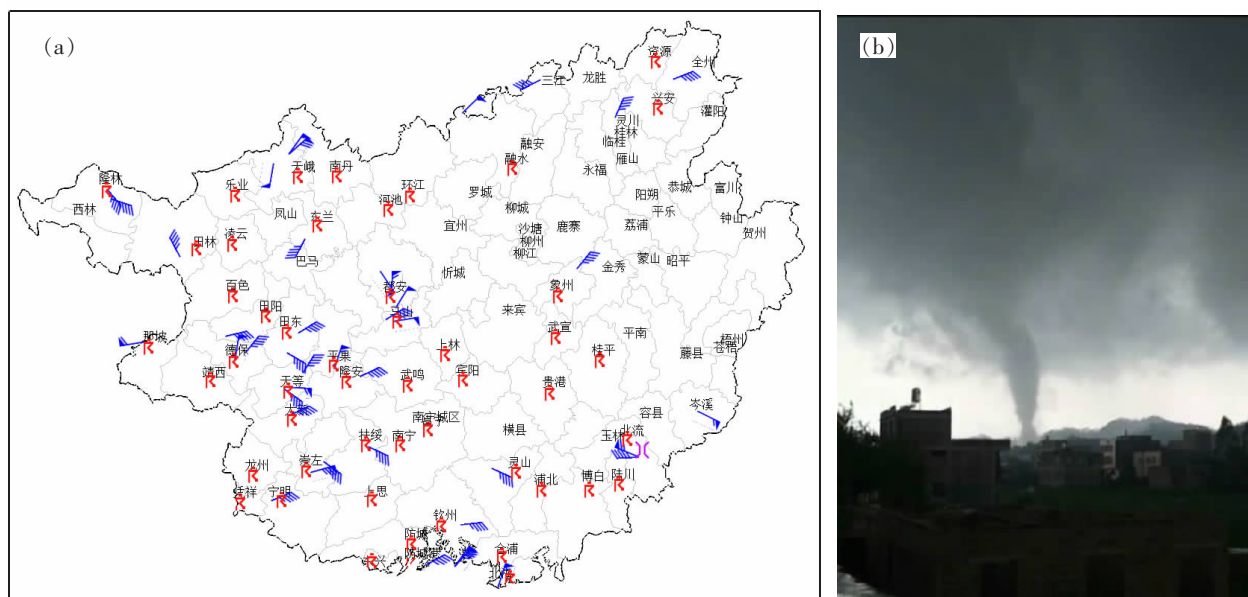


图 1 (a)2017 年 8 月 22 日 20 时—23 日 20 时强对流天气落区(已去除由台风低压引起的大风, 仅绘出对流造成的雷暴大风)(b)居民拍摄到龙卷视频截图

3 雷达特征分析

3.1 回波演变特征

此次龙卷发生地距离玉林雷达站约 30km,位于台风龙卷的雷达有效探测距离内,因此选取玉林雷达资料对龙卷的回波特征进行分析。追踪组合反射率因子(图略)的演变发现,产生北流龙卷的风暴于 23 日 13:07 在一条螺旋云带回波前部约 50km 处生成,该对流风暴在东北气流的引导下向西南方向移动,14:05—14:35 在容县中部地区强度迅速增强,14:52—14:58 最大反射率因子强度达 60~63dBz。龙卷风暴回波呈块状,尺度约 20km 左右,与普通单体风暴的组合反射率因子回波形态并没有明显区别。从基本反射率因子演变(图 2,见彩页)看出,14:35 在风暴西南侧识别出中气旋,14:41 在前一时中气旋部位从 0.5°到 2.4°仰角反射率因子都观测到钩状回波,但“钩状”头部反射率因子强度仅为 25~40dBz,较容易忽略。14:58 1.5°仰角钩状回波特征更为突出,15:04 钩状回波特征减弱,钩状回波特征共持续了 4 个体扫,其出现时间和维持时段与灾情收集到的龙卷发生时间相当,因此可以认为出现钩状回波后不久龙卷生成,钩状回波减弱消失后,龙卷也快速消亡。14:58 沿着钩状回波前沿经过西南部回波主体的作反射率因子垂直剖面(图 3,见彩页),显示龙卷风暴具有中高层回波悬垂和有界弱回波区(BWER)等超级单体风暴特征,在悬垂强回波中有一个细长倾斜的回波柱连接到低层钩状回波并已接地,从龙卷周边居民手机拍摄的视频资料可见龙卷风典型的“漏斗云”已接地(图 1b),可以判断倾斜回波柱为龙卷的漏斗状云柱。龙卷回波顶高 9km,垂直伸展高度不超过 10km,与郑媛媛等^[16]分析的台风龙卷的雷达回波结构相似,属于微超级单体风暴。

3.2 中气旋和 TVS 特征

龙卷的发生发展与中气旋的发展是密切相关的。14:35 玉林雷达中气旋产品首次在编号 09 的风暴中标记出中气旋,之后在 14:46、14:58 识别出中气旋。14:35 2.4°仰角径向速度图上显示大范围的环境风场为东北气流,中气旋负速度中心为 $-22\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,正速度中心约为 $6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,旋转速度为 $14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。中气旋距离雷达约 39km,属于弱中气旋。14:46 2.4°仰角中气旋负速度中心为 $-22\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,正速度中心约 $16\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,旋转速度达 $19\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,中气旋距离雷达约 31km,为中等强度中气旋,同时在风暴中首次识别出

TVS,在 0.5°仰角到 6.0°仰角都可以看到相邻像素之间正负速度的切变,最强的速度切变位于约 3.3km 高度。14:52 雷达算法没有识别出中气旋,也没有识别出 TVS,经分析这是由于 0.5°仰角钩状回波区域对应的径向速度退速度模糊失败(显示为被紫色区域覆盖),不满足 TVS 算法要求切变达到 0.5°仰角或高度低于 600m 的标准^[17],但在 2.4°~6.0°仰角都有相邻方位角正负速度的切变,说明龙卷风暴中维持强烈的小尺度旋转气流。14:58 在钩状回波头部对应位置雷达再次识别出 TVS(图 2e,见彩页),速度图上从 0.5°到 6.0°仰角都存在相邻方位角的正负速度切变,通过 PUP 四分屏显示(图略)TVS 由低层到高层偏移向西南侧约 2km,2.4°仰角切变速度达到 $38\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,表明此时龙卷的小尺度涡旋气流非常强烈。对中气旋底高和顶高进行分析(图 4,见彩页)表明,14:35—14:58 中气旋底高略有升高,顶高从 2.4km 显著升高到 4.6km,已发展为深厚的中气旋。但与已有研究成果认为龙卷接地是伴随着中气旋底高不断降低过程的结论不同^[18],经分析这是由于 14:35 和 14:46 识别出的中气旋位于钩状回波附近,而 14:58 识别出的中气旋位于龙卷母体风暴中部(图 2e,见彩页),因此中气旋高度变化未能反映出龙卷漏斗云高度降低的过程。位于钩状回波的头部的 TVS 切变底部高度 14:58 为 0.4km,相比 14:46 时下降了 0.2km,与龙卷漏斗状云柱高度逐渐下降接地的趋势一致。

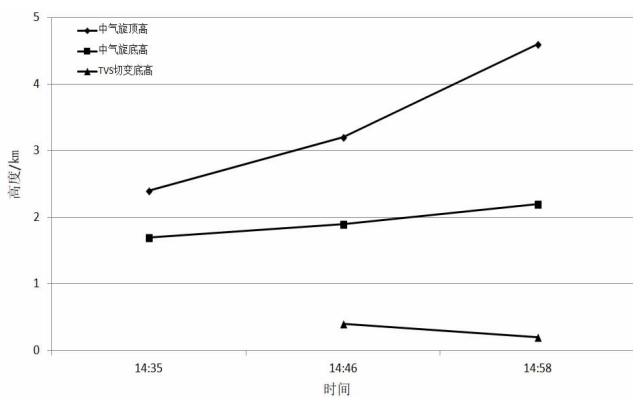


图 5 2017 年 8 月 23 日 14:35—14:58 龙卷中气旋顶高、底高和 TVS 切变底高时间变化

4 龙卷成因分析

4.1 环境条件分析

2017 年第 13 号台风“天鸽”(路径见图 6)于 8 月 20 日 14 时在台湾东南部洋面上生成,之后向西

偏北方向移动进入南海北部,强度逐渐加强,22 日 15 时加强为台风,23 日 07 时加强为强台风。23 日 08 时 500hPa 天气图(图 6)显示,强盛的西太平洋副热带高压控制我国江南地区和高原东部,高压中心达 596hPa,588dagpm 等值线呈虎口状,西脊点位于 90°E 附近,中纬度地区无西风带系统,没有明显冷空气影响。此时台风中心位于距离广东省珠海市东南部约 130km 的洋面,强度为强台风级,广西位于台风倒槽西北侧,受风速 12~18m·s⁻¹ 东北气流控制,在广东和广西交界附近存在风速的辐合。700hPa 和 850hPa 形势(图略)与 500hPa 类似,广西大部为东北气流影响。“天鸽”于 23 日 12 时 50 分以强台风级在广东省珠海市沿海一带登陆,登陆时中心附近最大风力 14 级(45m·s⁻¹),登陆后继续向西北移动,14 时台风强度仍为强台风级,中心位于广东省台山市境内,距离龙卷发生地约 235km,广西仍位于台风倒槽西侧。

选取阳江、梧州、北海三个探空站资料分析此次龙卷发生前的环境场热力条件(表 1),可以看出梧州站(距离龙卷发生地约 130km)具备更有利的对流不稳定条件:K 指数达到 43℃,CAPE 达到了 1466J·

kg⁻¹,SI 指数达到-3.41,强天气威胁指数(SWEAT)超过 300,同时抬升凝结高度为 988hPa,对流抑制能接近为 0J·kg⁻¹。925hPa 气温 24℃,比湿达到 19g·kg⁻¹,850hPa 比湿也达到 17g·kg⁻¹,探空层结曲线显示显著的湿层从近地面延伸到约 400hPa。这些物理量特征参数表明,梧州附近环境大气处于高温高湿、强烈的对流性不稳定状态,很低的抬升凝结高度、中等强度以上的 CAPE 等环境条件与西风带龙卷发生的环境条件相似。雷达的 VWP 产品具有高时空分辨率的优点,因此利用玉林雷达 VWP 产品来分析龙卷发生地的垂直风切变条件,由于雷达 VWP 无地面风场,故采用 0.3km 高度和 1.2km 高度风来计算低层垂直风切变。23 日 08 时,0.3km 高度风为西北风,风速为 4m·s⁻¹,1.2km 高度风为东北风,风速为 10m·s⁻¹,相应的 0.3~1.2km 风切变为 8×10⁻³s⁻¹。14 时随着台风外围东北气流向广西东部输送,边界层风速明显增大,0.3km 高度风速为 6m·s⁻¹,风向为 315°,1.2km 高度风速为 14m·s⁻¹,风向为 45°,0.3~1.2km 风切变为 10.8×10⁻³s⁻¹,达到台风龙卷的环境 0~1km 切变阈值 10⁻²s⁻¹,因此显著增强的低层垂直风切变是形成龙卷的主要动力条件^[16]。

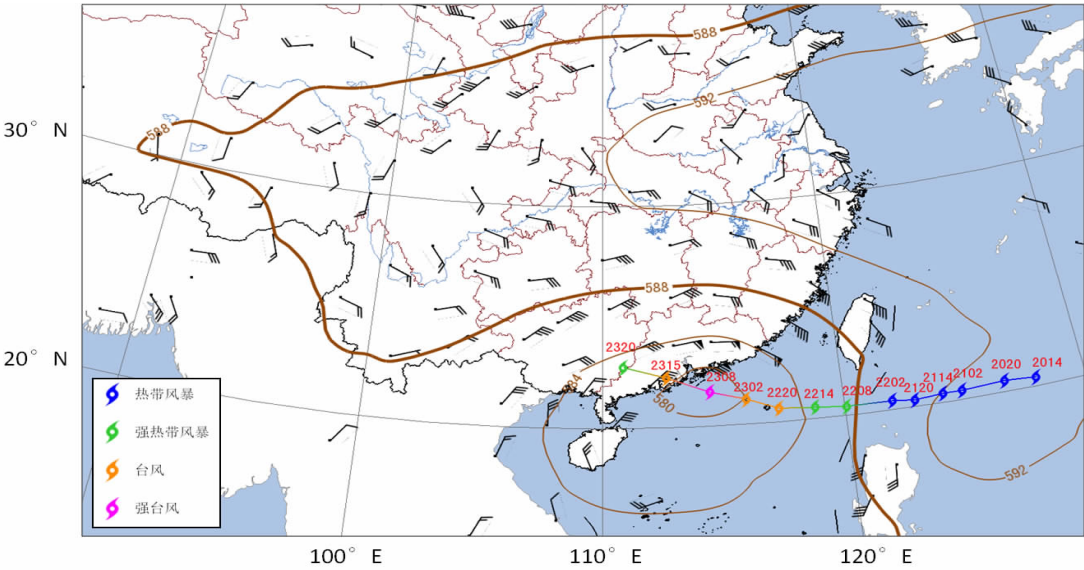


图 6 2017 年 8 月 23 日 08 时 500hPa 形势场及 8 月 20 日 14 时—8 月 23 日 20 时台风路径

表 1 2017 年 8 月 23 日 08 时北流临近探空站点不稳定参数

探空站	CAPE (J·kg ⁻¹)	CIN (J·kg ⁻¹)	K 指数(℃)	SI 指数	SWEAT	LCL(hPa)
阳江	344.9	152.4	38	0.22	289.2	960
梧州	1466.5	0.1	43	- 3.41	315.8	988
北海	102.5	187.2	39	- 0.46	294.8	985

4.2 触发条件分析

通过地面区域加密自动站和雷达资料分析此次龙卷的触发机制。23 日 11 时(图略),广西西部和东南部地面相当位温较 08 时显著增大,形成一条由西向东的暖舌,同时在梧州至南宁一带东北气流和偏西气流汇合,形成一条中尺度辐合线,在北流隆盛镇产生龙卷的风暴于 13 时左右在地面辐合线附近生成。14 时(图 7,见彩页),随着台风中心向西北移动,中尺度地面辐合线略向南压,北流位于 386K 的相当位温暖中心附近,大气不稳定性进一步增大,风暴 14 时移入容县中部地区后强度迅速增强,在北流附近高温高湿和较强的低层垂直风切变的环境下最终发展为龙卷。15 时以后,龙卷风暴在环境较强东北气流的引导下快速向西南移动远离地面辐合线,综合分析此次龙卷发生地附近的地形条件发现,龙卷发生和移动都在山地丘陵地带,而高原、山地的地形不利于龙卷发展增强^[15],两个因素综合可能是该龙卷持续时间较短原因之一。

5 结论和讨论

(1)此次龙卷过程发生在 1713 号台风“天鸽”外围螺旋云带前部,距离台风中心约 235km。物理量分析表明广西东南部具有较大的不稳定性能量,环境大气处于强不稳定状态,抬升凝结高度较低,低层垂直风切变较大,有利于龙卷发生的环境热力和动力条件。中尺度地面辐合线触发出新生对流单体,该对流单体在高温高湿和强的低层垂直风切变的有利环境下最终发展为龙卷,但由于龙卷发生在山地丘陵地带,生成后快速远离辐合线和不利的地形条件可能是该龙卷持续时间较短原因之一。

(2)此次龙卷为尺度约 20km 的微超级单体风暴,具有低层钩状回波、中高层回波悬垂和有界弱回波区(BWER)等典型超级单体特征,垂直伸展高度仅 9km。低层钩状回波持续了 4 个体扫,低层钩状回波的演变与龙卷的生消密切相关,出现钩状回波后不久龙卷生成,钩状回波减弱消失后,龙卷也快速消亡。

(3)中气旋先于低层钩状回波出现,钩状回波形成于强中气旋附近,龙卷发生时中气旋底高在 2km 左右,TVS 切变底部高度 0.5km 左右并且不断下降,与龙卷漏斗状云柱高度逐渐下降接地的趋势一致。

需要注意的是,此次台风龙卷仅从组合反射率因子形态与普通单体风暴的回波并没有明显区别,

出现 TVS 到龙卷接地的时间很短暂,考虑到雷达观测传输和算法必要的运行时间导致产品不可能立即到达预报员桌面,因此要对此次龙卷进行提前预警是很困难的。在实际业务中需要密切关注中气旋的发展,当出现强中气旋,且出现 TVS 和低层钩状回波时,需特别警惕出现龙卷的可能性很高,及时开展实况预警。受雷达观测技术条件等多方面因素的制约,雷达 TVS 算法也存在较高的虚警率,目前龙卷的准确预警仍是一个难题。本文对台风龙卷的发生环境探讨还较初步,还需要利用更细致的中尺度观测资料或中尺度数值模拟作进一步分析研究。

参考文献:

- [1] 姚叶青,郝莹,张义军,李劲,刘高平,邱学兴,余金龙,刘远永.安徽龙卷发生的环境条件和临近预警[J].高原气象,2012,31(6):1721-1730.
- [2] 王宁,王婷婷,张硕,慕秀香,杨秀峰.东北冷涡背景下一次龙卷过程的观测分析[J].应用气象学报,2014,25(4):463-469.
- [3] 张小玲,杨波,朱文剑,方翀,刘鑫华,周康辉,蓝渝,田付友.2016 年 6 月 23 日江苏阜宁 EF4 级龙卷天气分析[J].气象,2016,42(11):1304-1314.
- [4] 俞小鼎,郑媛媛,廖玉芳,姚叶青,方翀.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,2008(3):508-522.
- [5] 郑艳,俞小鼎,任福民,蔡亲波.海南一次超级单体引发的强烈龙卷过程观测分析[J].气象,2017,43(6):675-685.
- [6] 蒋义芳,吴海英,沈树勤,刘安宁.0808 号台风凤凰前部龙卷的环境场和雷达回波分析[J].气象,2009,35(4):68-75+130-131.
- [7] 郑峰,钟建锋,张灵杰.超强台风“圣帕”引发温州类龙卷的特征分析[J].高原气象,2012,31(1):231-238.
- [8] 李彩玲,炎利军,李兆慧,麦雪湖,黄先香.1522 号台风“彩虹”外围佛山强龙卷特征分析[J].热带气象学报,2016,32(3):416-424.
- [9] 罗红磊,何洁琳,李艳兰,等.气候变化背景下影响广西的主要气象灾害及变化特征[J].气象研究与应用,2016,37(1):10-14.
- [10] 农孟松,祁丽燕,黄海洪,邓汝伊,班荣贵.桂西北一次超级单体风暴过程的分析[J].气象,2011,37(12):1519-1525.
- [11] 杨思施,黄开刚,刘国忠.2013.3.23 百色市致灾冰雹天气过程成因分析[J].气象研究与应用,2015,36(2):43-46.
- [12] 陈伟斌,陈见,赵金彪,等.一次飑线大风天气过程成因

(下转第 90 页)

向基本均为偏 W 风,而在 18.0kgpm 以上时,四季最多、次多风向均逐渐转为偏 E 风。

参考文献:

- [1] 吴国雄,刘辉等(译).气候物理学,北京,气象出版社[M],1995,104-1411.
- [2] 李崇银.气候动力学引论.北京,气象出版社[M],2000.
- [3] 陈哲.中国探空气球水平漂移总体特征分析[J].气象.2010,36(2):22-27.
- [4] 李伟,李书严,王建凯等.中国地区高空气象探测气球空间漂移分析[J].气象学报.2010,68(3):421-427.
- [5] 杨荣康,李伟,郭启云.中国地区探空漂移距离与漂移速度分析[J].理论与算法.2013,20(4):60-63.
- [6] 张春阳,彭力.1981-2010年洪家气象站风向风速变化特征分析[J].气象研究与应用.2017,38(2):72-76.
- [7] 杨玉静,杨志华,农国傲等.桂平市20年大风天气气候统计分析[J].气象研究与应用.2017,38(1):47-49.
- [8] 宋丽莉,吴战平,秦鹏等.复杂山地近地层强风特性分析[J].气象学报.2009,67(3):452-460.
- [9] 何如,谭敏玲,罗红磊等.南宁市横县地区风能资源评估[J].气象研究与应用.2015,36(3):59-63.
- [10] 杨风群,林苗青,翁永安.南澳岛风能资源的评估[J].气象研究与应用.2011,32(3):58-61.
- [11] 孙小龙,苏志,何如等.富川地区风能资源分析[J].气象研究与应用.2012,33(3):25-28.
- [12] 徐永清,张弛,王庆祥等.城市近地层风特征与污染系数分析[J].气象与环境科学.2014,37(3):55-59.
- [13] 崔丽曼.河南省雷暴大风气候特征及近年变化趋势分析[J].气象研究与应用.2016,37(3):33-37.
- [14] 张爱英,任国玉,郭军等.近30年我国高空风速变化趋势分析[J].高原气象.2009,28(3):681-687.
- [15] 任国玉,张爱英,王颖等.我国高空风速的气候学特征[J].地理研究.2009,28(6):1583-1592.
- [16] 谢今范,刘玉英,李宇凡.吉林地面和高空风速变化特征及成因分析[J].高原气象.2015,34(5):1424-1434.
- [17] 李刚,钱保贵,刘清芳等.滇东南高空风季节变化特征分析[J].气象研究与应用.2012,33(S1):68-70.
- [18] 田庆明,马廷德,杜岩.酒泉地区高空风速分布特征及影响因素[J].干旱区研究.2009,26(5):671-675.
- [19] 崔世锋,程正飞,吴月友.安徽省安庆地区高空风特征分析[J].安徽农业科学.2010,38(22):11803-11805.
- [20] 《中国高空L波段秒级观测基础数据集(V1.0)》简介[M].北京,国家气象信息中心,2016.
- [21] 中国高空L波段秒级观测基础数据集(V1.0)评估报告[M].北京,国家气象信息中心,2016.
- [22] 常规高空气象观测业务手册.[M].北京,气象出版社,2011.
- [23] 邱传涛,李丁划.平均风向的计算方法及其比较[J].高原气象.1997,16(1):94-98.

(上接第32页)

- 分析[J].气象研究与应用,2015,36(1):14-19,131.
- [13] 陆秋霖,黄荣,农孟松,等.2017年4月广西北部一次强对流天气中尺度分析[J].气象研究与应用,2017,38(2):18-21.
- [14] 李向红,胡静,伍静,刘锋,郑传新.广西两次系列龙卷过程多尺度对比分析[J].灾害学,2017,32(3):71-79.
- [15] 范雯杰,俞小鼎.中国龙卷的时空分布特征[J].气象,2015,41(7):793-805.
- [16] 郑媛媛,张备,王啸华,孙康远,慕瑞琪,夏文梅.台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析[J].气象,2015,41(8):942-952.
- [17] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等.多普勒天气雷达原理与业务应用.[M].气象出版社,2006:215.
- [18] 陈元昭,俞小鼎,陈训来,王书欣,罗鸣.2015年5月华南一次龙卷过程观测分析[J].应用气象学报,2016,27(3):334-341.