



2021年5月14日武汉龙卷风暴的环流背景和涡度来源分析

韩雪蕾 郑衍欣 赵树云 肖艳姣 王五科 李双林

Analysis of the circulation background and vorticity source for the Wuhan tornado storm on 14 May, 2021

HAN Xuelei, ZHENG Yanxin, ZHAO Shuyun, XIAO Yanjiao, WANG Wuke, LI Shuanglin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-138>

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

2020年7月22日淮北地区两次龙卷过程的环境背景和雷达特征的对比分析

Comparative analysis of environmental background and radar characteristics of two tornadoes in Huaibei area on 22 July 2020

暴雨灾害. 2022, 41(3): 266–275 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.003>

2021年5月14日武汉龙卷现场调查及雷达探测特征分析

Damage survey and radar characteristics of the 14th May 2021 Wuhan tornado in Hubei province

暴雨灾害. 2022, 41(2): 142–150 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.004>

双偏振天气雷达精细化探测技术对2021年两个龙卷风暴识别能力的影响分析

Analysis on the influence of fine detection technology of dual polarization weather radar on recognition ability of two tornado storms in 2021

暴雨灾害. 2022, 41(2): 130–141 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.003>

2021年苏州与武汉两地龙卷的环境条件与雷达特征对比分析

Comparative analysis of environmental conditions and radar characteristics for two tornadoes occurred in Suzhou and Wuhan in 2021

暴雨灾害. 2023, 42(4): 415–426 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-044>

2021年5月武汉两次对流性大风天气的多普勒雷达观测分析

Doppler radar observation and analysis of two convective gale weather events in Wuhan in May 2021

暴雨灾害. 2022, 41(2): 119–129 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.002>

2024年初湖南两次区域性低温雨雪冰冻天气的成因对比

Comparison of causes of two regional rainfall/snowfall and freezing events with low temperatures in Hunan in early 2024

暴雨灾害. 2024, 43(6): 680–692 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-081>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

韩雪蕾,郑衍欣,赵树云,等.2026.2021年5月14日武汉龙卷风暴的环流背景和涡度来源分析[J].暴雨灾害,45(3):330–339. HAN Xuelei, ZHENG Yanxin, ZHAO Shuyun, et al. 2026. Analysis of the circulation background and vorticity source for the Wuhan tornado storm on 14 May, 2021 [J]. Torrential Rain and Disasters, 45(3):330–339 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023–138

2021年5月14日武汉龙卷风暴的环流背景和涡度来源分析

韩雪蕾^{1, 2, 3}, 郑衍欣⁵, 赵树云^{1, 3, 4}, 肖艳姣¹, 王五科^{3, 4}, 李双林^{3, 4}

(1. 中国气象局流域强降水重点开放实验室/暴雨监测预警湖北省重点实验室中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉 430205; 2. 山东省聊城市气象局, 聊城 252000; 3. 中国地质大学(武汉)环境学院大气科学系, 武汉 430074; 4. 中国气象局-中国地质大学(武汉)极端天气气候与水文地质灾害研究中心, 武汉 430074; 5. 中国气象局成都高原气象研究所高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610213)

摘要: 2021年5月14日20:39(北京时), 武汉发生了一次罕见的EF3级龙卷, 造成严重人员伤亡和财产损失。中国地质大学(武汉)的X波段双偏振天气雷达和武汉市观象台的S波段天气雷达均显示, 此次龙卷的母体风暴为一个具有钩状回波的超级单体。利用探空数据、ERA5再分析数据, 并结合中尺度数值模式, 首先对此次龙卷风暴的雷达回波特征、环流背景和环境条件进行分析, 并与湖北1977年4月16日的EF3级龙卷过程的环流背景进行对比, 最后研究了此次过程的涡度来源。结果表明: (1) 此次龙卷风暴发生在西北太平洋副热带高压(以下简称副高)外围的南支气流中。青藏高原东侧低压系统的发展加强了其与副高之间的气压梯度, 一方面有利于形成低空急流, 另一方面也有利于低空垂直风切变的增强, 为龙卷风暴的发生提供了有利的水汽和动力条件。高、低空急流的耦合为深对流的充分发展提供了有利的“低层辐合、高层辐散”条件, 而江淮倒槽为风暴的形成提供了触发条件。(2) 此次龙卷风暴与1977年4月16日湖北另一次EF3级龙卷过程的环流背景有相似之处, 主要体现在高低空急流的耦合、江淮倒槽的影响、以及强的西南—东北向低空垂直风切变。(3) 此次龙卷风暴产生过程中, 低层风暴相对速度与环境水平涡度均为东南—西北向, 环境水平涡度在风暴相对速度方向有着较大的投影分量, 风暴相对螺旋度大值区由东南向西北伸入风暴内部, 为中气旋的发展提供了涡度来源。这凸显了在龙卷风暴短时临近预报预警中, 高时空分辨率垂直风廓线观测资料的重要性。

关键词: 龙卷风暴; 环流背景; 涡度来源; WRF模式模拟

中图分类号: P445+1

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2023–138

Analysis of the circulation background and vorticity source for the Wuhan tornado storm on 14 May, 2021

HAN Xuelei^{1, 2, 3}, ZHENG Yanxin⁵, ZHAO Shuyun^{1, 3, 4}, XIAO Yanjiao¹, WANG Wuke^{3, 4}, LI Shuanglin^{3, 4}

(1. China Meteorological Administration Basin Heavy Rainfall Key Laboratory/Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430205; 2. Liaocheng Meteorological Bureau of Shandong Province, Liaocheng 252000; 3. Department of Atmospheric Science, School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074; 4. Centre for Severe Weather and Climate and Hydro-Geological Hazards, Wuhan 430074; 5. Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Institute of Tibetan Plateau)

Abstract: At 20:39 BT on 14 May 2021, a rare EF3 tornado struck Wuhan, causing severe casualties and significant property damage. Both the X-band dual-polarization weather radar at China University of Geosciences (Wuhan) and the S-band weather radar at Wuhan Observatory indicated that the parent storm of this tornado was a supercell with a hook echo. Using ERA5 reanalysis data combined with a mesoscale numerical model, the radar echo characteristics, circulation background, and environmental conditions of this tornado event were analyzed. And the tornado's circulation background was compared with that of another EF3 tornado which occurred in Hubei

收稿日期: 2023–07–04; 定稿日期: 2024–11–09

资助项目: 中国气象局流域强降水重点开放实验室(2023BHR-Y28); 国家自然科学基金项目(42075055); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(G1323521141); 山东省气象局面上课题(2020sdqxm20); 山东省气象局预报员专项(SDYBY2021-04); 全国暴雨研究开放项目(BYKJ2025Q04)

第一作者: 韩雪蕾, 主要从事强对流天气研究。E-mail: 15069512095@163.com

通信作者: 赵树云, 主要从事气候预测、气候变化、中小尺度天气研究。E-mail: zhaosy@cug.edu.cn

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY–NC–ND 4.0

Province on 16 April 1977. The vorticity source during this event was analyzed at last. The results are as follows. (1) The tornado occurred within the southern branch flow on the periphery of the Western North Pacific Subtropical High (WNPSH). The development of a low-pressure system east of the Tibetan Plateau enhanced the pressure gradient between the low-pressure system and the WNPSH, which favored the formation of a low-level jet and strengthened low-level vertical wind shear, providing favorable moisture and dynamic conditions for the tornado storm. The coupling of upper- and low-level jets created an excellent environment for deep convection with low-level convergence and upper-level divergence, while the Jianghuai inverted trough served as a triggering mechanism for the convective storm. (2) The circulation background of this Wuhan tornado shares similarities with that of another EF3 tornado that occurred in Hubei on 16 April 1977, particularly in terms of the coupling of upper- and low-level jets, the influence of the Jianghuai inverted trough, and strong southwest-northeast oriented low-level vertical wind shear. (3) During the tornado storm genesis, both the low-level storm-relative velocity and the environmental horizontal vorticity were oriented southeast-northwest. The environmental horizontal vorticity had a large projection component along the storm-relative velocity direction, and a high-value area of storm-relative helicity extended from the southeast into the storm interior, providing a vorticity source for mesocyclone development. This underscores the importance of high spatiotemporal resolution vertical wind profile observations in the nowcasting and warning of tornadoes.

Key words: tornado storm; circulation background; source of vorticity; WRF model simulation

引言

龙卷是从风暴云底向下伸展及地的一种范围很小而风力极大的小型涡旋,是一种小尺度天气系统。龙卷可以分为中气旋龙卷和非中气旋龙卷,非中气旋龙卷一般比中气旋龙卷弱(王东海等,2018;郑永光,2020;陈小华等,2023;张桂莲等,2023)。龙卷尺度小、生命时间短、破坏性强、预报难度大,一直是中小尺度灾害天气领域的研究重点(黄先香等,2019a,2019b;张一平等,2019;郭泽勇等,2021;黄舒婷等,2021;王学强等,2023)。

2021年5月14日20:40(北京时,下同)左右,武汉市蔡甸区千子山附近出现了龙卷大风(以下简称为“5·14”武汉龙卷)(李彩玲等,2022),共造成10人死亡、230人受伤及多处房屋倒塌,其灾情非常严重。针对此次大风灾害过程成立的气象专家调查组认定该龙卷风在成熟阶段强度达到了行标三级(EF3)(植江玲等,2022)。根据范雯杰和俞小鼎(2015)的统计,1961—2010年50a间湖北省龙卷强度达到EF3级的仅有1次。由此可见,“5·14”武汉龙卷强度和所造成的灾害程度在该地区比较少见。

湖北地处两湖平原的北部,其东部是龙卷多发区,但强度通常在EF2级以下,上次发生EF3级的龙卷还要追溯到1977年4月16日,发生在黄冈等地,造成了118人死亡(郑永光,2020),迄今未有EF4级龙卷发生记录。因此,针对湖北龙卷的研究相比江苏、广东和东北地区要少许多。“5·14”武汉龙卷发生后,专家学者们针对此次过程做了较多研究。毛以伟等(2022)回顾了“5·14”武汉龙卷发生前后的气象服务。李彩玲等(2022)详细分析了“5·14”武汉龙卷的现场灾调情况和对应的雷达探测特征。王珏等(2022)对比了2021年5月10日和14日两次对流性

大风天气过程中的多普勒雷达特征,发现5月10日大风在径向速度上表现为辐散特征,而5月14日大风由超级单体龙卷产生。王艺娟等(2023)对比了“5·14”武汉龙卷和发生于同日约1h前的苏州龙卷,发现二者均达到了EF3级,足见当夜夜间长江流域对流活动的剧烈;对比结果显示苏州龙卷的热力条件较好(高对流有效位能、较低的抬升凝结高度和对流抑制能量),动力条件偏弱(中等偏弱的风暴相对螺旋度和垂直风切变),而“5·14”武汉龙卷的动力条件较好,热力条件偏弱。

龙卷的尺度在几十米至上百米,预报难度大,甚至连观测到它都有困难,然而它并非独立发生,而是产生于特定的中尺度天气系统中(比如超级单体风暴、有弓形回波特征的飑线)和有利的大尺度环流背景下(汤洁等,2021;项阳和王林林,2021;姬雪帅等,2022;周玥滢和方娟,2024)。这也为龙卷的预报、预警提供了思路和可能性。针对湖北省强龙卷,前人研究多侧重于雷达回波特征和热动力环境条件分析,而对大尺度环流背景特征以及龙卷母体风暴的涡度来源的分析还不够深入。因此本文对“5·14”武汉龙卷发生的环流背景进行详细分析,并通过与1977年4月16日发生于湖北黄冈等地的EF3级龙卷的环流背景进行对比,以寻找湖北省强龙卷发生的环流背景的共性特征。进一步,基于再分析数据和数值模式模拟,分析“5·14”武汉龙卷母体风暴的涡度来源,以揭示“5·14”武汉龙卷母体风暴中气旋发展的动力环境特征。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文使用的资料包括:(1)武汉市气象台S波段多普勒天气雷达和中国地质大学(武汉)未来城校区

(以下简称为地大未来城校区) X 波段双偏振多普勒天气雷达资料,用于诊断“5·14”武汉龙卷母体风暴的雷达回波和径向速度特征,确定其母体风暴类型。其中, S 波段雷达采用 VCP21 扫描方式进行体扫描(即 6 min 完成 9 个指定仰角的扫描),基数据的方位分辨率约为 1°;而 X 波段雷达 3 min 进行一次体扫描,基数据的方位分辨率约为 0.75°; (2) 欧洲中期天气预报中心第五代全球再分析数据集(ERA5),时间分辨率为 1 h、空间分辨率为 0.25°×0.25°。变量包括海平面气压、不同气压层的位势高度以及经向和纬向风,用于“5·14”武汉龙卷发生前的环流背景分析和其母体风暴的涡度来源诊断; (3) 武汉站 2021 年 5 月 14 日 20:00 的探空数据,用于诊断“5·14”武汉龙卷发生前的热动力条件。值得注意的是,考虑到再分析数据的时间分辨率较低,难以满足生命期较短的中小尺度对流系统的分析要求,本文还使用到了数值模式模拟数据(见 1.3 节),用以验证基于再分析数据的涡度来源诊断; (4) 采用美国国家环境预报中心(NCEP)逐 6 h 的全球最终业务分析数据,作为模式初始场及侧边界条件,水平分辨率为 0.25°×0.25°,用于“5·14”武汉龙卷天气过程的模拟。

1.2 涡度来源的诊断方法

天气诊断和预报中常用风暴相对螺旋度(SRH)来表征涡度的输送强度,它反映了气流方向上的水平涡度大小与入流强弱对风暴旋转性的贡献(石燕茹等,2011)。SRH(记为 S_{RH}) 计算公式如下

$$S_{RH} = \int_0^h (\vec{V}_h - \vec{C}) \cdot \vec{\omega}_h dz \quad (1)$$

表 1 “5·14”武汉龙卷过程 WRF 模式模拟方案设置

Table 1 Simulation scheme settings of WRF in the Wuhan tornado on 14 May, 2021

试验	嵌套层数	内层分辨率/m	微物理方案	输出间隔/min	垂直层数	陆面方案	辐射方案	边界层方案
exp1	4	180	Thompson	3	51	NLSM	RRTM	YU
exp2	4	180	Morrison2mom	3	51	NLSM	RRTM	YU
exp3	4	180	Thompson	3	51	NLSM	RRTM	YU
exp4	3	500	Thompson	3	51	NLSM	RRTM	YU

注: NLSM 全称为陆面方案(Noah Land Surface Model) (Mahrt et al., 1984), RRTM 全称为辐射方案(Rapid Radiative Transfer Model) (Mlawer et al., 1998), YU 全称为边界层方案(Yonsei University scheme) (Hong et al., 2006)

经过对比,发现不论采用哪种模式试验,基本都可以模拟出与雷达观测结果相似的反射率因子分布特征,但是具体的龙卷移动路径有所差异。观测表明,“5·14”武汉龙卷生成于武汉市蔡甸区金堆湖以东 500 m 附近,接地时间为 20:33—20:53,移速约 54 km·h⁻¹,先后途经友爱村、新集村、千子山陵园、军山科技产业园 3 期和川江池公园(植江玲等,2022)。图 1 中彩色实线分别给出不同试验方案模拟的武汉

其中, $\vec{V}_h$ 为水平方向上的环境风场, $\vec{C}$ 为风暴的水平速度,二者单位均为 m·s⁻¹; $\vec{\omega}_h$ 为水平涡度(单位: s⁻¹) 矢量, h 为气层厚度(单位: m)。实际计算中常采用以下简化公式

$$S_{RH} = \sum_{n=0}^{N-1} [(u_{n+1} - \vec{C}_x)(v_n - \vec{C}_y) - (u_n - \vec{C}_x)(v_{n+1} - \vec{C}_y)] \quad (2)$$

其中, N 为入流气层高度, h 对应的气压层数, x 、 y 分别指示矢量的 $\vec{C}$ 的纬向与经向分量。实际计算时,考虑到流入风暴的气流主要来自地面至 3 km 高度, N 取 3 km (~700 hPa) 以下层数, C 取为 850~400 hPa 平均风风速的 75% (陈锋等, 2019; 唐嘉蕙等, 2019)。

1.3 模式介绍和试验方案

考虑到再分析数据时间分辨率为逐小时,不能完全满足分析生命史短、演变快的中小尺度天气系统的需求。因此,利用非静力中尺度数值模式 WRF4.0,对“5·14”武汉龙卷天气过程进行数值模拟。模拟区域采用多层(3~4 层)嵌套,中心点的经纬度为(114.31°E, 30.58°N),积分时间为 5 月 14 日 14:00—15 日 02:00。考虑到针对具体天气过程的模拟效果可能依赖初始条件、水平分辨率、微物理方案,选用不同的模式设置(表 1),设计了 4 组试验(exp1、exp2、exp3 和 exp4)进行龙卷移动路径等的模拟效果检验,选取检验效果最好的试验结果用于分析。WRF4.0 可以输出雷达反射率因子,这是模拟强对流天气的关键诊断量。使 WRF 模式输出雷达反射率因子的具体操作包括: (1) 配置编译选项时,启用雷达反射率模块; (2) namelist.input 中设置雷达反射率相关诊断和输出选项。

附近 800 m 高度处的反射率因子最大值中心的移动路径,其中 exp1 模拟的路径与龙卷移动路径最为贴近,因此后续分析中采用该试验结果。

2 雷达回波特征

5 月 14 日 20:36,武汉站 S 波段天气雷达在 0.5°和 1.5°仰角上监测到武汉西部出现了对流云团,且带有明显的钩状回波特征,为此次武汉龙卷的母体风暴

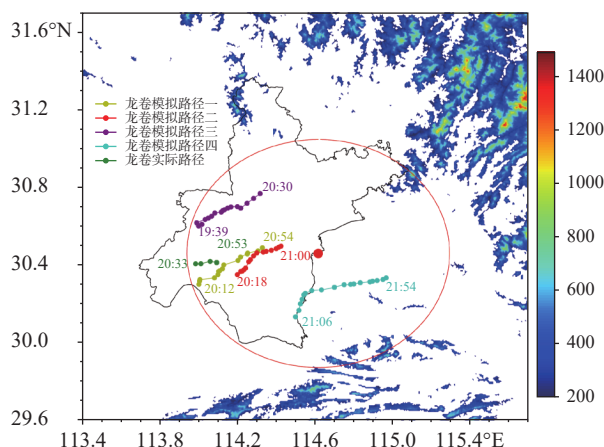


图1 2021年5月14日20:33—20:53武汉龙卷实际移动路径(绿色圆点)、exp1(黄色圆点)、exp2(红色圆点)、exp3(紫色圆点)、exp4(蓝色圆点)模式试验下模拟的最大涡度移动路径和海拔高度(填色,单位:m)(红色圆点和圆形实线分别代表地大未来城校区雷达位置和观测半径)

Fig. 1 Observed track (green dots) of the Wuhan tornado from 20:33 BT to 20:53 BT on 14 May 2021, simulated maximum vorticity tracks under exp1 (yellow dots), exp2 (red dots), exp3 (purple dots), exp4 (blue dots) and terrain elevation (color-filled, unit: m) (The red dot and solid circle denote the location and observation radius of the radar at the Future City Campus of China University of Geosciences (Wuhan), respectively)

(图2a₁、a₂),最强回波超过了55 dBZ。从武汉站雷达的径向速度图上可以看到明显的中气旋特征(图2b₁、b₂),最大的正速度为19~27 m·s⁻¹,而最大负速度为

-36~-27 m·s⁻¹,表明有强烈的旋转。在0.5°和1.5°仰角上均检测到龙卷涡旋信号(Tornado Vortex Signature, TVS)。沿着一条穿过龙卷母体风暴钩状回波处的半径(图a₁中红线)做雷达反射率的垂直剖面(图2a₃),可见超级单体风暴的典型结构,如前悬回波、回波穹窿、有界回波;还可见一个强回波柱,最大的反射率为60~65 dBZ。这表明“5·14”武汉龙卷的母体风暴为一个带有明显中气旋特征的超级单体。

20:34,架设在地大未来城校区的X波段天气雷达也监测到“5·14”武汉龙卷的母体风暴。地大未来城校区位于武汉站雷达所在地以东20~30 km处,而此时风暴位于武汉西部。因此,风暴距离该雷达的相对位置较武汉站雷达更远一些。X波段雷达的探测范围小于S波段雷达,但空间分辨率高于后者。为看清龙卷在母体风暴中的相对位置,图3放大了超级单体风暴钩状回波附近倒V型晴空缺口的细节。可见20:34,龙卷开始接地的位置在倒V型晴空缺口的左侧边缘,随着整个风暴的东移,龙卷也跟着这个晴空缺口的边缘向东移动,且龙卷的前进方向始终与该边缘保持垂直。20:50,晴空缺口消失,龙卷也减弱结束。晴空缺口是超级单体风暴中强上升气流区的标志,这也佐证了前人发现(范雯杰和俞小鼎,2015),即龙卷经常发生在超级单体风暴中强上升气流区和后侧下沉气流区(由对流降水产生)交界的位置。对

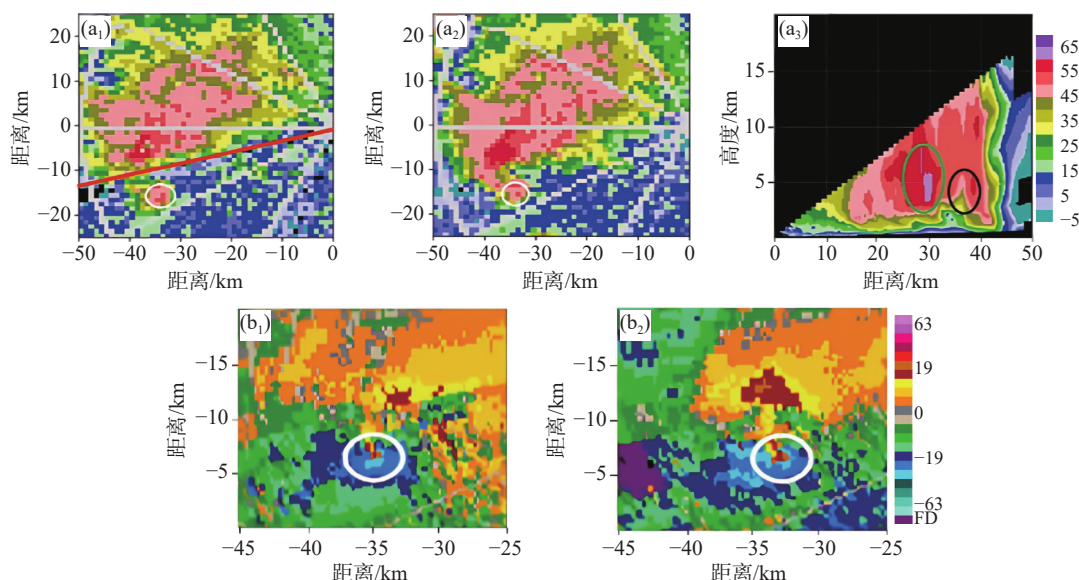


图2 2021年5月14日20:36武汉站S波段天气雷达在0.5°(a₁)和1.5°(a₂)仰角基本反射率因子(填色,单位: dBZ)和其沿a₁中红色线方向的垂直剖面(a₃),以及0.5°(b₁)和1.5°(b₂)仰角径向速度(填色,单位: m·s⁻¹)(图2b₂、b₃白色圆圈为龙卷涡旋信号TVS所在位置,图2a₃中绿色和黑色圆圈分别指示强回波柱和回波穹窿位置)

Fig. 2 The (a₁, a₂) Reflectivity factor (unit: dBZ) at two elevation angles (0.5° and 1.5°) and (a₃) the vertical cross-section along the red line in panel a₁, along with (b₁, b₂) radial velocity (unit: m·s⁻¹) at the same two elevation angles, observed by the Wuhan S-band weather radar at 20:36 BT on 14 May 2021 (The white circles in Fig. 2b₁ and Fig. 2b₂ mark the locations of the tornado vortex signature, green and black circles in the cross-section in Fig. 2a₃ indicate the positions of the strong echo column and echo vault, respectively)

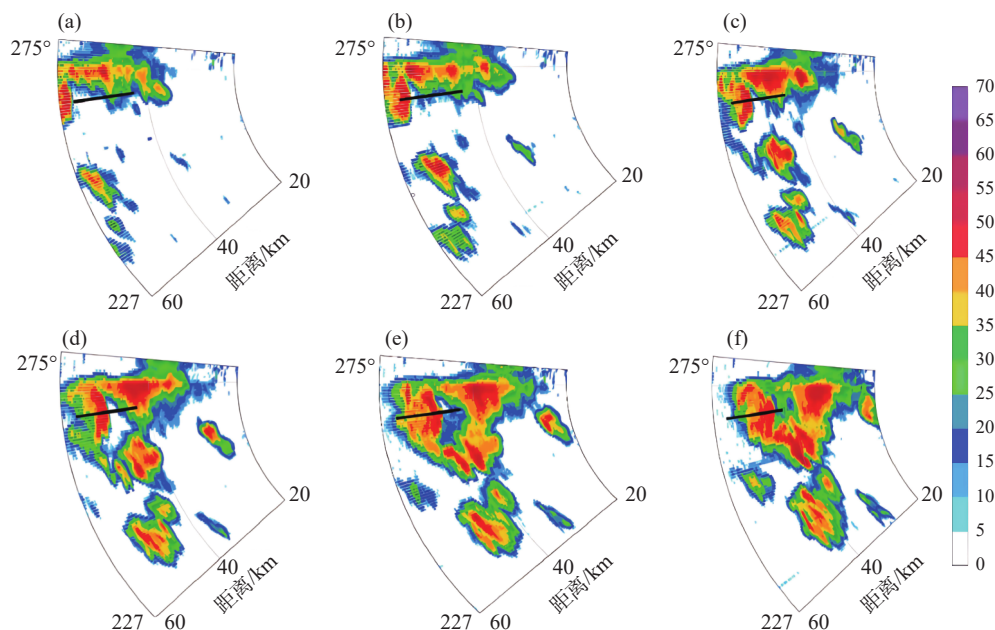


图 3 2021 年 5 月 14 日 20:34 (a)、20:37 (b)、20:41 (c)、20:44 (d)、20:47 (e) 和 20:50 (f) 地大未来城校区 X 波段雷达 2.0°仰角反射率因子图 (单位: dBZ) (黑色直线为龙卷移动路径)

Fig. 3 X-band radar reflectivity factor (unit: dBZ) at an elevation angle of 2.0°, observed at the Future City Campus of China University of Geosciences (Wuhan), China, at (a) 20:34 BT, (b) 20:37 BT, (c) 20:41 BT, (d) 20:44 BT, (e) 20:47 BT, and (f) 20:50 BT on May 14, 2021 (The black straight line indicates the tornado track)

比图 2 和图 3 可见, 相比 S 波段雷达, X 波段雷达对钩状回波, 倒 V 型晴空缺口的细节刻画得更清晰。

3 天气形势和环境条件

3.1 天气形势

2021 年 5 月 14 日 20:00, 200 hPa 上, 副热带西风急流位于 30°N 附近, 而武汉位于高空急流出口区的左侧 (图 4a)。根据高空急流附近次级环流的分布特征, 高空急流出口区的左侧有利于高空辐散。500 hPa 上, 西北太平洋副热带高压 (以下简称副高) 588 dagpm 线西伸至华南沿海, 南支槽引导的西南气流位于副高西侧, 为长江中下游地区提供了充足的水汽。850 hPa 上, 东北北部和西南地区东部各有一个低压中心, 后者与副高之间较大的气压梯度有利于低空急流的发展, 急流轴从华南西部延伸至长江

中下游地区。高、低空急流的配置有利于长江中下游地区强对流的发生和发展。在地面上, 贵州和川渝交界处存在低压中心, 江淮地区受地面倒槽影响, 温度露点差普遍小于 1.5 °C (图 4a)。王东海等 (2018) 总结了长江中下游地区五种有利于触发龙卷的天气形势: (1) 副高外围的南支气流; (2) 静止锋; (3) 台风; (4) 副热带气旋; (5) 锋前飚线。综合来看, “5·14”武汉龙卷发生的环流形势符合“副高外围的南支气流”特征。

湖北省虽是龙卷的多发区, 但强龙卷发生次数却并不多。为寻找湖北省强龙卷发生前的环流共性特征, 图 4b 和图 5b 给出 1977 年 4 月 16 日湖北省 EF3 级龙卷发生前的环流形势。从图 4b 可见, 与“5·14”武汉龙卷相比, 1977 年龙卷发生前副高的位置更偏南, 南支槽偏弱, 但中纬度低压槽强度偏强, 是西风

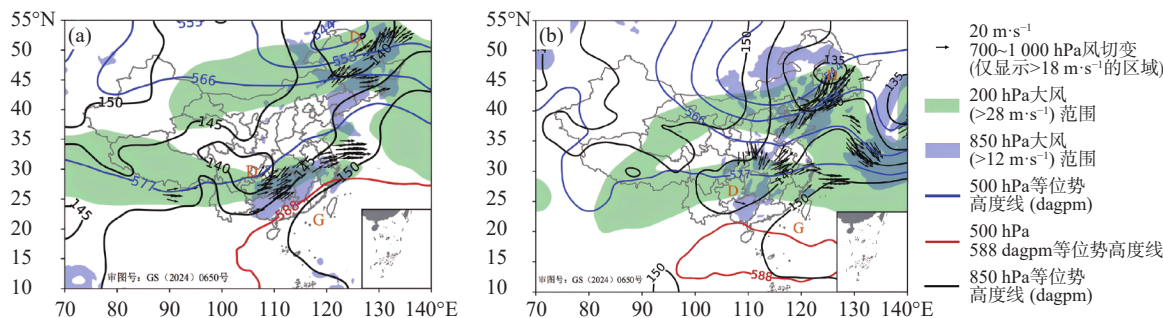


图 4 2021 年 5 月 14 日 20 时 (a)、1977 年 4 月 16 日 18 时 (b) 环流形势的综合分析图

Fig. 4 Comprehensive analysis of the circulation pattern for (a) 20:00 BT on 14 May 2021 and (b) 18:00 BT on 16 April 1977

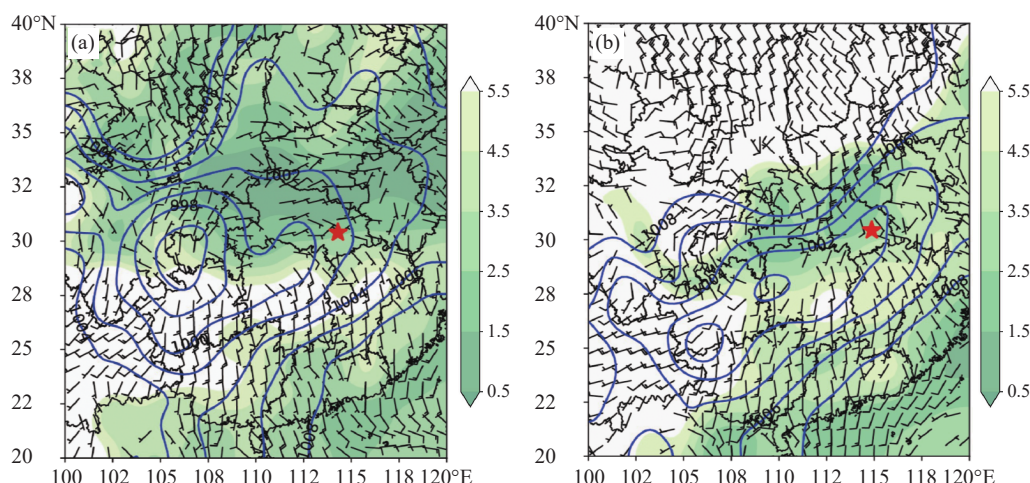


图5 2021年5月14日20时(a)、1977年4月16日18时(b)海平面气压(蓝色等值线,单位:hPa)、2 m高度的温度露点差(填色,单位:℃)和10 m高度的风场(风羽,单位: m s^{-1})(红色五角星为龙卷发生大致位置)

Fig. 5 Sea level pressure (blue contours, unit: hPa), 2-m dewpoint depression (shaded, unit: $^{\circ}\text{C}$), and 10-m wind field (wind barbs, unit: m s^{-1}) for (a) 20:00 BT on 14 May 2021 and (b) 18:00 BT on 16 April 1977 (The red five-pointed star marks the approximate location of tornado)

槽和地面冷锋作用下产生的龙卷。两次湖北 EF3 级龙卷环流背景有明显的相似点,比如,均有东北冷涡和西南低值系统的身影,高、低空急流的配置都有利于强对流发生发展,湖北省东部均受到江淮倒槽的影响。普鲁克分析(Gower, 1975)可通过平移、旋转和缩放比较两个图像之间的相似程度。利用该方法对图4a、b中多变量构成的两次湖北 EF3 级龙卷发生前的环流特征进行图像相似性评估,发现二者的普鲁克距离平方 M^2 为 0.63 (M^2 取值范围为 0~1,越接近 0 相似度越高), p 值为 0.000 1 ($p < 0.05$ 时一般认为两组形状之间的相似程度具有统计学上的显著性)。说明两次龙卷发生前的环流形势具有整体上的显著相似性。

3.2 环境条件

低层垂直风切变是风暴发展的关键动力因子。2021年5月14日20:00贵州、湖南、湖北东部以及江苏南部近地面到700 hPa (~3 km 以内)垂直风切变较强,超过了 18 m s^{-1} ,且风的切变方向均为西南偏西(图4a)。需要指出的是,当日19:00前后,江苏省苏州市也发生了 EF3 级龙卷。这些地区强而分布规律的低层垂直风切变环境有利于产生中气旋和超级单体风暴。强而分布规律的低层垂直风切变特征在1977年4月16日湖北强龙卷个例中也有体现(图4b)。

从环境热力和动力条件上看,2021年5月14日20:00,武汉站的探空结果表现出明显的不稳定层结特征,对流有效位能(CAPE)达到了 1764.1 J kg^{-1} ,沙氏指数(SI)为 -1.23 K 。其中,CAPE接近我国 EF1 级以上龙卷风暴的中值水平(1700 J kg^{-1})(俞小鼎等, 2021)。武汉站的抬升凝结高度(LCL)为 943.7 m,接

近 Thompson 等(2000)统计的 EF2 级以上强龙卷的平均 LCL (981 m)。从动力学指数上看,武汉站 0—1 km 垂直风切变(SHR)为 11.8 m s^{-1} ,低于俞小鼎等(2021)统计的我国 EF1 级以上龙卷的中值(14 m s^{-1})。表征强对流天气的物理指标较高,如强天气威胁指数(SSI)为 368.8,风暴强度指数(SWEAT)为 301.5。

4 涡度来源分析

湖北省仅有的两次 EF3 级龙卷记录均发生在春季,而非热力条件更好的夏季。动力条件似乎对于湖北省 EF3 级以上强龙卷的发生更为重要一些。龙卷虽然是小尺度的强烈涡旋,但是它的发生与中气旋有着紧密的联系,尤其是强龙卷多发生在有中气旋特征的超级单体风暴中。从2.1节分析可见,超级单体正是“5·14”武汉龙卷的母体风暴,因此,本节侧重分析该龙卷母体风暴中涡度的来源。

前人研究(Markowski and Richardson, 2010)发现,中气旋的生成主要与涡度方程中的两个贡献项有关:首先是水平涡度向垂直方向上的倾斜项,其次是垂直涡度的水平平流项。尤其是前者,它解决了中气旋中垂直涡度来源的问题。观测发现,超级单体风暴多发生在水平风垂直切变较强(即水平涡度较强)的环境中,证明了涡度方程中倾斜项的重要作用。如果投影在风暴相对入流方向上的水平涡度较大,则表明环境中不断有涡度向风暴上升运动中心输送,然后在上升气流的作用下向垂直方向上倾斜,有利于中气旋的形成和维持。

由图4a可见,5月14日19:00—20:00武汉上空地面至700 hPa的风切变呈西南—东北向,按照“右

手法则”,水平涡度应由东南指向西北,正好与近地面的水平风方向一致(图 5a),说明水平涡度在近地面气流方向上具有较大的投影分量。图 6a 给出 5 月 14 日武汉附近 19:00—20:00 平均的 700 hPa 垂直涡度与大约 0~3 km 的 SRH 的空间分布,可见当时武汉站以西约 50 km 处存在正涡度大值中心,而武汉站处在 SRH 的大值中心 ($270\sim 300\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$),表明低层不断有涡度向该地区输送,这为后续发展出超级单体风暴提供了有利的动力环境。图 6a 也给出 700—1 000 hPa

风切变产生的水平涡度矢和 850 hPa 风暴相对速度矢,二者近于同向,均由东南指向西北。这解释了为何该时段武汉处于 0~3 km 风暴相对螺旋度的大值中心。图 6b 给出武汉上空的风矢端迹,可见 9 km 以下,尤其是 3 km 以下,风随高度一致的顺时针旋转。根据 Markowski 和 Richardson (2010) 的研究结论,这种顺时针弯曲的风矢端迹利于不同高度上风暴相对气流与涡度总是大致同向,并形成孤立的单体风暴。

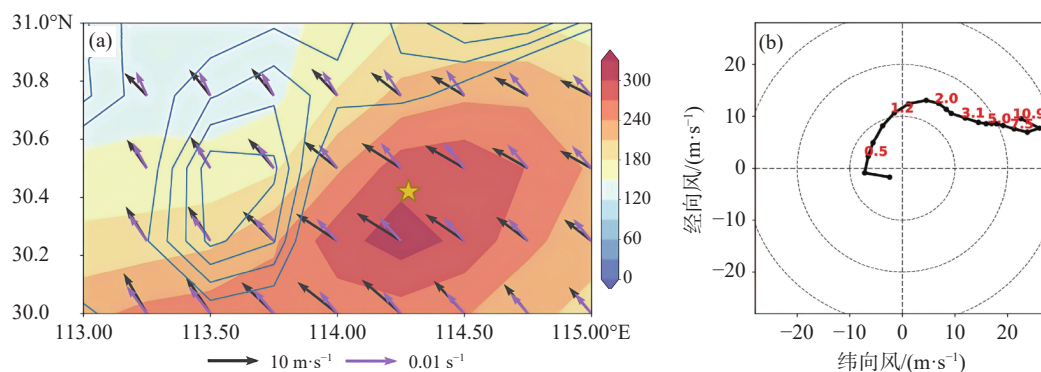


图 6 2021 年 5 月 14 日 20 时的 700 hPa 相对涡度[蓝色等值线,单位: 10^{-5} s^{-1} ,闭合中心由外向内为 $(3.0\sim 4.5)\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$,间隔 $0.5\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$],地面至 700 hPa 风暴相对螺旋度(填色,单位: $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$),700—1 000 hPa 风切变产生的水平涡度(紫色箭头,单位: s^{-1})以及 850 hPa 风暴相对速度(灰色箭头,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) (a) 和风速矢端迹图 (b) (图 a 中黄色五角星为武汉气象站的位置,图 b 中红色数字代表垂直高度,单位: km)

Fig. 6 The (a) 700 hPa vertical relative vorticity (blue contours, unit: 10^{-5} s^{-1} , $(3.0\text{ to }4.5)\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ from outside to inside of the closed center, interval $0.5\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$), surface to 700 hPa storm-relative helicity (shaded, unit: $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$), horizontal vorticity generated by 700-1 000 hPa wind shear (purple vectors, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), and 850 hPa storm-relative velocity (grey vectors, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), and (b) hodograph with red numbers indicating altitude (unit: km), for 20:00 BT on 14 May 2021 (The location of Wuhan meteorological station is marked by a yellow pentagram)

图 6 来自 ERA5 再分析数据,时空分辨率较低。为更细致地观察“5·14”武汉龙卷母体风暴中的涡度发展,下面采用 WRF4.0 的模拟试验结果进行进一步讨论。图 7 为 exp1 试验(试验设置见表 1)模拟的 5 月 14 日 20:42 距地面 1 600 m 高度的雷达反射率和异常水平风场(减去区域平均风场),可见模式基本可以模拟出这次龙卷的母体风暴特征,即一个带有明显钩状回波的超级单体风暴。风暴的东西向长度大约 30 km,中心的雷达回波强度超过 50 dBz,与实况比较一致。结合图 1 可见,exp1 试验对造成“5·14”武汉龙卷的中尺度对流系统的模拟效果较好,基本再现了龙卷母体风暴的位置、中心雷达回波强度、移动方向以及东西向范围。

从逐 3 min 输出的模拟结果看,超级单体风暴向东—东北方向移动,与对流层中层的环境风方向基本一致,而 SRH 的大值区位于其东南侧(图 8a)。20:39—20:42, SRH 大值区向西北方向延伸并伸入风暴内部(图 8b、8c)。随着超级单体风暴的涡旋中心与 SRH 的大值区靠近,垂直涡度得到了进一步增

强。伴随中气旋的发展,20:39,开始出现了 SRH 的负值区,原因可能是风暴中发展出了与环境水平涡度方向相反的相对出流。20:45,垂直涡度达到最强,

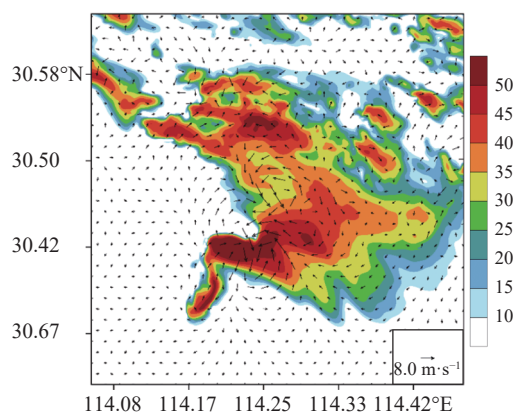


图 7 exp1 试验模拟的 2021 年 5 月 14 日 20:42 1 600 m 高度处对应的武汉龙卷母体风暴的雷达反射率(填色,单位: dBz)和异常水平风场(风矢,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig. 7 Simulated radar reflectivity (shaded, unit: dBz) and abnormal horizontal wind field (vectors, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) at 1 600 m height above the Wuhan tornado in exp1, at 20:42 BT on 14 May 2021

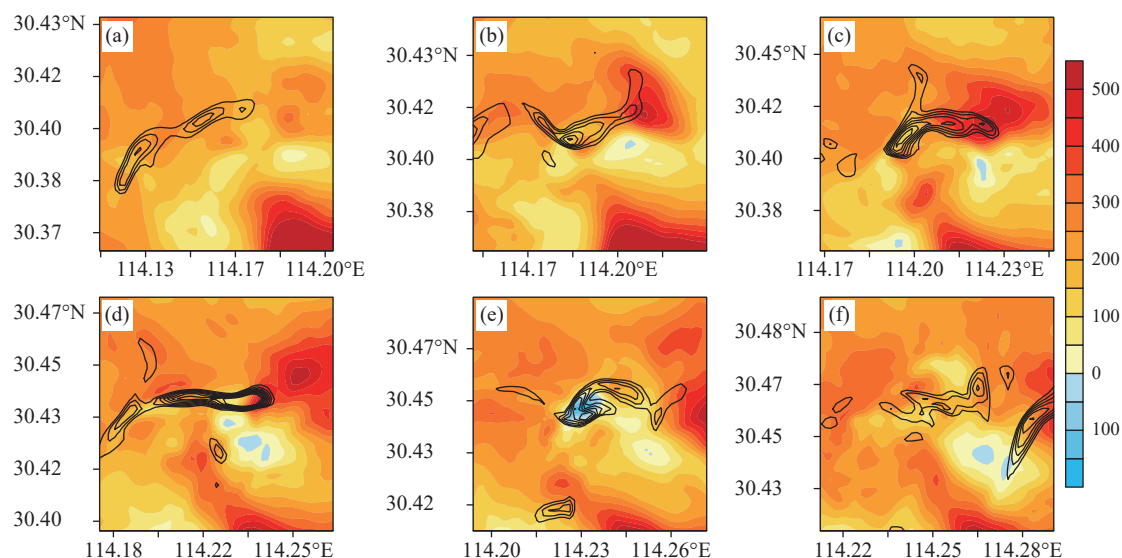


图8 exp1 试验模拟的2021年5月14日20:36(a)、20:39(b)、20:42(c)、20:45(d)、20:48(e)、20:51(f)武汉龙卷上空0—3 km 风暴相对螺旋度(填色,单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)和400 m高度处的垂直涡度(等值线,单位: s^{-1})

Fig. 8 Simulated 0-3 km storm-relative helicity (shaded, unit: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) and 400 m vertical vorticity (contours, unit: s^{-1}) over the Wuhan tornado at (a) 20:36 BT, (b) 20:39 BT, (c) 20:42 BT, (d) 20:45 BT, (e) 20:48 BT, and (f) 20:51 BT on 14 May 2021 in exp1

中气旋发展成熟,同时SRH负值区相较前面时刻也明显扩大。20:48,SRH的负值区中心得到进一步增强,而且风暴的正涡度中心叠加在SRH的负值区上,代表此时环境风场无法继续为超级单体风暴输送涡度,导致风暴的旋转减弱。20:51,随着超级单体风暴继续朝东北方向移动,和SRH大值区逐渐脱离,垂直涡度快速减弱,超级单体也进入了衰亡阶段。

相比再分析数据,数值模式模拟结果以更高的时间分辨率展示了龙卷母体风暴从加强到衰亡的发展历程,不仅佐证了环境涡度输送对于龙卷母体风暴加强的重要性,也表明风暴自身的发展对于环境具有反作用。

5 结论与讨论

本文针对2021年5月14日发生在武汉的EF3级龙卷风暴过程,利用X波段双偏振天气雷达和S波段天气雷达、武汉站探空数据、ERA5再分析数据,并结合中尺度数值模拟结果,从雷达回波特征、环流特征,并与湖北发生于1977年4月16日的EF3级龙卷过程的环流背景进行对比,最后对此次过程的涡度来源进行分析。得到以下主要结论:

(1)“5·14”武汉龙卷的母体风暴是一个具有典型中气旋特征的超级单体,它发生在副高外围的南支气流中。副高的北抬与青藏高原东侧低压系统的发展有利于两者之间低空垂直风切变的加强。高、低空急流的耦合有利于强对流的发展,而地面江淮倒槽为对流提供了触发条件。环流形势为龙卷风暴的

发生提供了有利的环境热力和动力条件:武汉站20:00的CAPE达 $1764.1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,0—1 km垂直风切变达 $11.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(2)对比“5·14”武汉龙卷和1977年4月16日黄冈等地的EF3级龙卷发生前的环流形势,也印证了低空垂直风切变、高低空急流耦合和江淮倒槽在湖北强龙卷发生中的重要作用。利用多变量(包括200 hPa和850 hPa风场、500 hPa和850 hPa位势高度、700—1000 hPa的垂直风切变)进行普鲁克分析,发现1977年黄冈等地的EF3级龙卷和“5·14”武汉EF3级龙卷发生前的环流特征整体上具有显著的相似性。

(3)“5·14”武汉龙卷发生前大约40 min,武汉西部出现了涡度的大值中心,而700—1000 hPa风切变产生的水平涡度与低层风暴相对速度近乎同向,均为东南—西北向,使得武汉站附近出现风暴相对螺旋度的大值中心,这为后续中气旋的发展和加强提供了源源不断的涡度来源。逐3 min的模拟结果也显示,在龙卷母体风暴加强的过程中,风暴相对螺旋度大值区由东南向西北延伸至风暴内部。随着龙卷风暴的加强,逐渐出现了负的风暴相对螺旋度。当涡度中心与负的风暴相对螺旋度重叠,龙卷母体风暴开始衰减。

湖北地处两湖平原的北部,长江中游,下垫面湿润,是仅次于江苏省的龙卷多发区(范雯杰和俞小鼎,2015),但是历史上强龙卷的发生次数不多,两次EF3级龙卷均发生于春季,可见春季风暴对该地区具有一定的危害性。本文的分析表明,湖北省强龙卷

发生的环流背景具有一些鲜明的特征,源源不断的涡度输送是强龙卷母体风暴发生的关键动力因素。对于该地区强龙卷的预报和预警,环流形势上可重点关注地面倒槽和低空急流的发展条件(如深槽前的冷锋、西南涡与副高挤压形成的等压线密集区)。低空急流不仅可以输送水汽,提供良好的水汽条件,还可以与倒槽中的南或东南风形成风随高度顺转的动力条件。还应关注高低空急流的耦合情况,以判断是否利于对流的充分发展。在环流形势有利的情况下,3 km 以下环境涡度的输送情况对于初生对流的组织化发展非常关键,凸显了高时空分辨率的垂直风廓线观测的重要性。需要指出的是,受限于湖北省强龙卷发生次数,上述环流特征的适用性还需后续深入分析验证。

致谢:北京星天宇科技有限公司和中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院马亚宇在雷达资料分析等方面给予帮助,谨致谢忱。

参考文献 (References):

- 陈锋,董美莹,冀春晓,等.2019.雷达资料同化对 2016 年 6 月 23 日阜宁龙卷模拟的改进[J].*气象学报*,77(3):405–426. Chen F, Dong M Y, Ji C X, et al. 2019. Improving the simulation of the tornado occurring in Funing on 23 June 2016 by using radar data assimilation [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,77(3):405–426 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2019.025
- 陈小华,李华宏,何钰,等.2023.云南两次非超级单体天气特征分析[J].*高原山地气象研究*,43(1):81–89. Chen X H, Li H H, He Y, et al. 2023. Characteristics of two non-supercell tornadoes in Yunnan [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*,43(1):81–89 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674–2184.2023.01.010
- 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]. *Meteorological Monthly*,41(7):793–805 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2015.07.001
- 郭泽勇,张弘豪,胡胜,等.2021.华南一次非中气旋海面龙卷的大气条件和雷达特征分析[J].*热带气象学报*,37(4):541–555. Guo Z Y, Zhang H H, Hu S, et al. 2021. Analysis of atmospheric conditions and radar characteristics of a non-mesocyclone waterspout in South China [J]. *Journal of Tropical Meteorology*,37(4):541–555 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004–4965.2021.052
- 黄舒婷,王东海,李国平,等.2021.采用不同背景场的龙卷模拟结果对比分析[J].*高原山地气象研究*,41(2):61–76. Huang S T, Wang D H, Li G P, et al. 2021. Comparative analysis of tornado simulation results with different background fields [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*,41(2):61–76 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674–2184.2021.02.007
- 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 Meteorologica Sinica*,77(4):645–661 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2019.055
- 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]. *Meteorological Monthly*,45(6):777–790 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2019.06.004
- 姬雪帅,黄山江,张曦丹,等.2022.河北张家口一次超级单体龙卷雷达回波特征分析[J].*气象科技*,50(4):545–553. Ji X S, Huang S J, Zhang X D, et al. 2022. Analysis of Radar Echo characteristics of a supercell tornado in Zhangjiakou, Hebei Province [J]. *Meteorological Science and Technology*,50(4):545–553 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671–6345.20210401
- 李彩玲,杨波,姚聃,等.2022. 2021 年 5 月 14 日武汉龙卷现场调查及雷达探测特征分析[J].*暴雨灾害*,41(2):142–150. Li C L, Yang B, Yao D, et al. 2022. Damage survey and radar characteristics of the 14th May 2021 Wuhan tornado in Hubei Province [J]. *Torrential Rain and Disasters*,41(2):142–150 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2022.02.004
- 毛以伟,方思达,吴翠红,等.2022.武汉 5·14 罕见龙卷风天气气象服务回顾[J].*城市与减灾*,2022(2):23–25. Mao Y W, Fang S D, Wu C H, et al. 2022. Meteorological service review on tornado weather in Wuhan city of Hubei province on May, 14th of 2021 [J]. *City and Disaster Reduction*,2022(2):23–25 (in Chinese)
- 石燕茹,寿绍文,王丽荣,等.2011.风暴相对螺旋度与强对流天气类型的关系分析[J].*气象与环境学报*,27(1):65–71. Shi Y R, Shou S W, Wang L R, et al. 2011. Relationship between storm relative helicity and types of strong convective weather [J]. *Journal of Meteorology and environment*,27(1):65–71 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673–503X.2011.01.013
- 唐嘉惠,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 J H, Ran L K, Shen X Y, et al. 2019. High-resolution numerical simulation of the EF3 tornadic storm in Foshan city, Guangdong Province [J]. *Chinese Journal of Geophysics*,62(11):4082–4097 (in Chinese). doi:10.6038/cjg2019M0478
- 汤洁,徐芬,吴海英,等.2021. 1710 号台风“海棠”外围龙卷大气环境条件和雷达特征分析[J].*气象科技*,49(2):235–243. Tang J, Xu F, Wu H Y, et al. 2021. Synoptic situation and radar characteristics of tornado in outside-region of typhoon Haitang [J]. *Meteorological Science and Technology*,49(2):235–243 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671–6345.20200144
- 王东海,李兆慧,高枫亭,等.2018.中国与欧美龙卷统计特征比较分析及研究进展[J].*气象科技进展*,8(2):8–23. Wang D H, Li Z H, Gao Z T, et al. 2018. A comparison of statistical characteristic and research progress of tornadoes in China to that in Europe and USA [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*,8(2):8–23 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095–1973.2018.02.001
- 王珏,肖艳姣,冷亮,等.2022. 2021 年 5 月武汉两次对流性大风天气的多普勒雷达观测分析[J].*大气科学*,41(2):119–129. Wang J, Xiao Y J, Leng L, et al. 2022. Doppler radar observation and analysis of two convective gale weather events in Wuhan in May 2021 [J]. *Torrential Rain and Disasters*,41(2):119–129 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2022.02.002

- 王学强,李晓坤,李林惠,等.2023.内蒙古一次强龙卷天气的中尺度特征分析[J].*沙漠与绿洲气象*,17(4):125–131. Wang X Q, Li X K, Li L H, et al. 2023. Mesoscale characteristics analysis of a strong tornado weather in Inner Mongolia [J]. *Desert and Oasis Meteorology*,17(4): 125–131 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2023.04.017
- 王艺娟,姚昶,梁旭东,等.2023.2021年苏州与武汉两地龙卷的环境条件与雷达特征对比分析[J].*暴雨灾害*,42(4):415–426. Wang Y J, Yao D, Liang X D, et al. 2023. Comparative analysis of environmental conditions and radar characteristics for two tornadoes occurred in Suzhou and Wuhan in 2021 [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 42(4):415–426 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-044
- 项阳,吴林林.2021.一次超级单体龙卷双偏振多普勒天气雷达分析[J].*气象科技*,49(4):579–588. Xiang Y, Wu L L. 2021. Analysis of a supercell tornado with dual-polarization doppler radar [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*,49(4):579–588 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671-6345.20200563
- 俞小鼎,赵娟,范雯杰.2021.中国龙卷的时空分布与关键环境参数特征[J].*热带气象学报*,37(Z1):681–692. Yu X D, Zhao J, Fan W J. 2021. Tornadoes in China: Spatiotemporal distribution and environmental characteristics [J]. *Journal of Tropical Meteorology*,37(Z1):681–692 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2021.064
- 张桂莲,李一平,江靖,等.2023.多个超级单体风暴诱发的EF3级强龙卷特征分析[J].*气象*,49(11):1315–1327. Zhang G L, Li Y P, Jiang J, et al. 2023. Characteristic analysis of EF3 strong tornado induced by multiple supercell storms [J]. *Meteorological Monthly*,49(11):1315–1327 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2023.083001
- 张一平,牛淑贞,郑世林,等.2019.“07·06”周口龙卷现场调查和可预警性综合分析[J].*大气科学*,45(8):1135–1148. Zhang Y P, Niu S Z, Zheng S L, et al. 2019. Investigation and warning practicability analysis of the 6 July 2017 tornado in Zhoukou city [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,45(8):1135–1148 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.08.010
- 郑永光.2020.中国龙卷气候特征和环境条件研究进展综述[J].*气象科技进展*,10(6):69–75. Zheng Y G. 2020. Review of climatology and favorable environmental conditions of tornado in China [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*,10(6):69–75 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.012
- 植江玲,黄先香,白兰强,等.2022.2021年中国龙卷活动与灾情特征[J].*气象科技进展*,12(1):26–36. Zhi J L, Huang X X, Bai L Q, et al. 2022. Tornado activity and disaster characteristics in China in 2021 [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*,12(1):26–36 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2022.01.004
- 周玥滢,方娟.2024.热带气旋发展增强过程中龙卷尺度涡旋活动特征[J].*南京大学学报(自然科学)*,60(2):230–243. Zhou Y Y, Fang J. 2024. Characteristics of tornado-scale vortices in an intensifying tropical cyclone [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*,60(2): 230–243 (in Chinese). doi:10.13232/j.cnki.jnju.2024.02.005
- Gower J C. 1975. Generalized procrustes analysis [J]. *Psychometrika*,40: 33–51. doi:10.1007/BF02291478
- Hong S Y, Noh Y, Dudhia J, et al. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. *Monthly Weather Review*,134(9):2318–2341. doi:10.1175/MWR3199.1
- Mahrt L, Pan H. 1984. A two-layer model of soil hydrology [J]. *Boundary Layer Meteorology*,29(1):1–20. doi:10.1007/BF00119116
- Markowski P, Richardson Y. 2010. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes [M]. Bognor Regis, England: John Wiley and Sons, Limited: 240
- Mlawer E J, Clough S A, et al. 1998. Shortwave and longwave enhancements in the rapid radiative transfer model [C]//In Proceedings of the 7th Atmospheric Radiation Measurement Science Team Meeting, 41(15): 31–94
- Thompson R L, Edwards R, Hart J A, et al. 2000. An assessment of supercell and tornado forecast parameters with RUC-2 model close proximity sounding [C]//Preprints, 21st Conf on Severe Local Storms. San Antonio: American Meteorological Society:595–598

(责任编辑 唐国琰)