

文章编号: 2096-1618(2018)06-0599-07

龙卷形成过程及母体风暴结构与演变研究进展

唐晓文¹, 李 峰², 刘高平³

(1. 南京大学, 江苏 南京 210089; 2. 中国气象局气象探测中心, 北京 100081; 3. 安徽省气象台, 安徽 合肥 230031)

摘要:系统地回顾了近10年来国内外针对龙卷形成过程,以及相应母体风暴结构和演变特征的研究成果。从龙卷涡旋垂直方向上的涡度演变、龙卷低层涡旋的产生方式、以及与龙卷形成相关的母体风暴对流尺度结构的极化雷达特征三个方面,重点关注了超级单体风暴中龙卷形成研究的最新进展。通过回顾可以发现,目前龙卷形成研究的最前沿围绕着超级单体内部对流尺度结构的精细化特征和机理而进行,这为中国即将开展的龙卷观测和业务预报试验提供了重要的参考。

关键词:龙卷形成; 超级单体; 对流尺度结构; 综述

中图分类号: P445⁺.1

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2018.06.001

0 引言

龙卷是小尺度的涡旋天气系统,通常伴随其他强对流性天气系统(如超级单体风暴、飑线、阵风锋等)发生,是对流风暴中最猛烈的天气现象之一。龙卷形成、发展和消亡的过程迅速,对其进行监测和预报是目前气象科研和业务的难点。由于目前监测和预报技术的滞后,龙卷的发生通常会造成重大的人员伤亡和财产损失。

中国的江淮流域、华南和东北等地区是主要的龙卷发生地。据范雯杰等^[1]不完全统计,年均强龙卷约发生4次。由于龙卷在地域上的相对集中性,周后福等^[2]、王秀明等^[3]、郑媛媛等^[4]对以上龙卷多发区的环境特征进行了统计分析。这些研究揭示了部分相似的有利于龙卷形成的大尺度环境条件,如:增强的低层垂直风切变和丰富的低层水汽来源等。但由于不同区域的主导天气系统的差异,龙卷发生的环境特征也存在较大的差异。

龙卷的生命史包含形成、发展、成熟和消亡4个主要的阶段。其中对龙卷形成过程的研究具有重要的意义,它直接决定了对龙卷的潜在预警预报能力。Markowski et al^[5]研究表明,绝大多数的龙卷(特别是强龙卷)都伴随超级单体风暴而发生,非超级单体龙卷则主要形成于近地面水平风切变线附近。然而,即使在环境条件类似、结构相似的超级风暴单体中,是否会形成龙卷仍然具有很大的随机性。这说明大尺度和中尺度环境条件对于龙卷的形成仅有指示作用,龙卷

的形成主要受小尺度过程的控制。由于客观条件限制,目前观测研究中能直接分辨龙卷内部结构和演变的资料还非常稀少。对龙卷形成过程的认识主要通过研究母体风暴中与龙卷发生直接相关的对流结构,如中气旋的位置和强度变化、有界弱回波区的变化等而得到。

近10年来随着数值模拟技术的进步,特别是新型龙卷观测雷达的应用,对龙卷形成过程的研究有了显著的进步。文中将对近年来国内外针对龙卷形成过程的观测、理论和模拟研究及母体风暴的相关结构和演变研究进行回顾。在总结前人建立的龙卷形成经典概念模型的基础上,从龙卷垂直涡度的演变、低层涡旋的形成及母体风暴对流尺度微物理过程的极化雷达特征三个方面,重点介绍近10年相关研究对龙卷形成经典概念模型的改进和扩展。希望通过对国内外研究进展的总结,明确当前龙卷研究的热点科学问题,为中国即将开展的龙卷观测和业务预警预报提供一定的参考。

1 龙卷形成的经典理论

1.1 超级单体中的龙卷形成

绝大部分的龙卷,特别是EF-2(enhanced fujita)^[6]以上的强龙卷主要都发生在超级单体风暴中。超级单体中与龙卷形成相关的对流尺度结构包括:中气旋、前侧下沉气流区(FFD)和后侧下沉气流区(RFD)(图1)。中气旋是超级单体风暴中的气旋性上升气流区,当上升气流强盛时,降水粒子无法及时增长从而在上升气流区出现水平反射率的小值(有界弱回波区)。中气

收稿日期:2018-10-26

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC1506100、2018YFC1506103)

旋的涡度来自超级单体中的上升气流对环境场水平涡度的倾斜和拉伸作用。FFD 位于风暴平均环境水平风的下风方向,与超级单体降水的拖拽、蒸发冷却有关。RFD 位于风暴平均环境水平风的上风方向,除降水的拖拽、蒸发冷却作用外,由上升气流与环境风相互作用而导致的扰动气压也是 RFD 形成的原因之一。

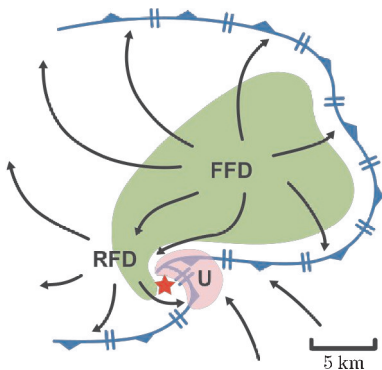


图1 超级单体风暴低层降水和流程概念模型图
(其中绿色填色为降水区,粉色填色为上升气流区,红色五角星为龙卷易发的位置,蓝色线条为地面冷池流出边界)

北半球的龙卷涡旋通常也是气旋性的,但其垂直涡度的形成过程与中气旋截然不同。龙卷的定义要求在近地面出现较强的涡旋特征,但由上升气流的倾斜及拉伸作用形成的涡旋将随上升气流分布到对流层中上层。由于超级单体近地面的环境垂直涡度通常较弱,仅依靠上升气流的拉伸作用通常无法形成龙卷强度的涡旋。因此经典理论认为,在超级单体中龙卷涡旋的形成与下沉气流的倾斜作用密切相关(图2a)。超级单体中与龙卷形成相关的下沉气流主要来自RFD,强盛的RFD可以将位于中上层的涡旋“压低”至近地面从而形成龙卷。由于RFD通常在超级单体的成熟阶段才形成,因此龙卷通常也发生在超级单体生命史的成熟期。

1.2 非超级单体中的龙卷形成

与超级单体风暴中的中气旋无关的龙卷通常被称为非超级单体龙卷(或非中气旋龙卷)。非超级单体龙卷通常出现在近地面不同性质气块间的水平风切变带上,例如低空急流的边界、低空切变线和阵风锋边界等。低层水平风切变对应于环境垂直涡度的大值区。由于水平切变不稳定的作用,这些垂直涡度带通常会组织成单独的垂直涡度中心。当深厚的对流系统移动到近地面强涡度中心上,或者强涡度中心附近触发了新的对流系统后,环境垂直涡度在对流系统上升气流的拉伸作用下增强,并最终在对流系统下方的近地面形成龙卷(图2b)。

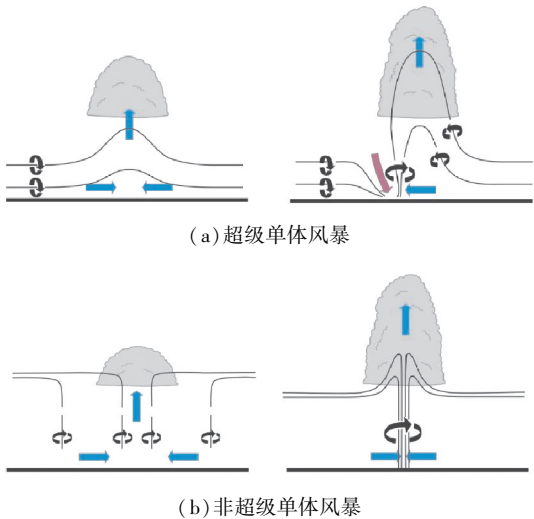


图2 超级单体风暴与非超级单体风暴

2 龙卷形成过程及母体风暴特征研究进展

龙卷形成的经典理论是经过21世纪之前长时间的理论和观测研究总结得出的。而在最近10年里,随着龙卷观测设备和数值模拟技术的进步,对龙卷形成过程以及相关的多尺度结构变化有了很多新认识。如前所述,龙卷(特别是强龙卷)主要发生在超级单体风暴中,因此近年来的研究以及文中回顾的内容主要由超级单体中的龙卷个例组成。值得注意的是,相关研究缺少非超级单体龙卷个例并非因为这种龙卷形成过程不重要。而主要原因是由于非超级单体龙卷的母体风暴结构特征不如超级单体明显且变化更大,难于被传统的天气观测网捕捉到。

从超级单体龙卷形成的经典模型可以看出,龙卷的形成过程与中气旋、RFD、FFD和低层风暴入流的相互作用密切相关。近10年的龙卷形成研究也主要围绕这些对流尺度结构的精细化特征、演变以及相应的机理。中国龙卷精细结构研究受到观测仪器和扫描模式的限制,研究个例的资料以及结果的精细化程度与国外研究还有一定的差距^[7-9]。因此,以下主要根据国外的研究成果,从初始涡旋的垂直发展、低层涡旋的形成及与龙卷形成过程相关的极化雷达特征三个方面来进行综述。

2.1 初始涡旋的垂直发展

超级单体中龙卷形成的经典理论强调了RFD中的下沉气流对水平涡管的动力作用,即下沉气流导致的涡管倾斜将中层的涡旋“压低”至近地层从而形成龙卷涡旋。这种“压低”的过程暗示龙卷涡旋的发展

过程在垂直方向上是“至上而下”的。美国早期的龙卷观测试验(Burgess et al^[10]; Brown et al^[11]证实了这种“自上而下”的龙卷涡旋形成过程,即首先在中上层的多普勒雷达径向速度中出现表征龙卷涡旋的偶极子结构(dipole),然后在低层相应位置出现龙卷。但是,Trapp et al^[12]通过数值模拟证明“自下而上”的龙卷形成过程也是可能的,并将龙卷的形成模式分成了两类:“自上而下”I型和“自下而上”II型。Trapp et al^[13]使用美国WSR-88D天气雷达网的观测资料统计了52个龙卷个例后发现,约有一半的龙卷个例按照“自上而下”的方式形成,而另外一半个例却按照“自下而上”或整层涡旋同时增强的方式形成。

随着近10年针对龙卷和强对流观测而设计的快扫描雷达^[14]和相控阵雷达^[15]的应用,完成一次三维扫描的时间已经缩短到几十秒的量级,因此能够更加准确的反应龙卷涡旋的时间变化特征。然而,在近10年使用新型龙卷雷达观测到的个例中,II型龙卷形成的比例明显增加^[16-17]。French et al^[16]使用先进的相控阵龙卷雷达详细研究了美国中西部3个典型龙卷个例的垂直涡度演变情况。3个个例都首先在雷达最低层扫描中出现龙卷涡旋特征(TVS),在随后的几分钟内逐步在中上层出现龙卷涡旋特征。French et al^[16]认为早期龙卷观测结果中缺少II型龙卷形成个例的现象与早期天气雷达完成一次三维扫描所需的时间较长密切相关。在French et al^[16]分析的个例之一同时被相控阵和WSR-88D雷达观测到。但按照相同的龙卷涡旋判定方法,WSR-88D首先在中层发现龙卷涡旋特征,从而给出龙卷涡旋“自上而下”发展的结论。

2.2 低层涡旋的形成

近年来II型龙卷个例比例的增加是对经典龙卷形成模型的重要补充,同时也提出了新的科学问题,即II型龙卷形成过程中低层垂直涡度的来源。与龙卷形成过程相关的背景涡度可来自正压、斜压和粘性三种不同过程^[18]。经典的I型龙卷形成理论中强调了正压过程的贡献,即环境垂直风切变对应的水平涡度转化为低层垂直涡度的过程。由于II型龙卷形成过程并非按照“至上而下”的方式,这说明其他两种过程对龙卷形成的重要作用。

由理想模拟^[19]和观测资料反演^[20]风场计算得到的涡线分布显示,与龙卷相关的涡线通常呈向上弯曲的拱状结构(图3),而非I型龙卷形成过程所预测的向下弯曲的涡线结构。这种拱型的涡线分布与超级单体下沉气流区近地面冷出流的斜压作用相关。FFD和RFD区的冷池在近地面扩散时,与入流区的暖湿空气

形成一个密度梯度带,密度梯度导致的浮力梯度在冷出流的边缘形成一个环状的水平涡度大值区。在中气旋入流一侧的水平涡度由于上升气流的拉伸作用和扰动气压的抬升作用而加强,从而形成了龙卷。Markowski et al^[21]使用理想模拟试验详细研究了斜压过程对低层龙卷涡旋形成的影响,发现龙卷涡旋的产生对冷池和入流的动力和热力学特性非常敏感。在中等强度的地表冷池和较强的低层垂直风切变条件下,模拟试验再现了与龙卷相似的低层强涡度中心。但在冷池强度增强或者低层垂直风切变减弱的试验里,强盛的冷池切断了中气旋的入流,并使得低层强涡旋中心的位置远离中气旋的上升气流轴。这些过程减弱了中气旋的强度,进而减弱了中气旋上升气流对龙卷涡旋的拉伸作用,并最终导致低层涡旋减弱、维持时间变短。龙卷形成过程对冷池和低层垂直风切变的敏感性可部分解释绝大多数超级单体个例都不形成龙卷这一观测事实。即超级单体本身与龙卷的发生并无直接联系,超级单体内部对流尺度结构(中气旋、入流区、降水区等)的精细化特征才是决定龙卷形成的最关键因素。

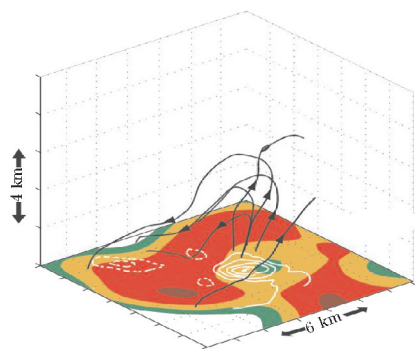


图3 地表冷池斜压作用形成的向上弯曲的拱形涡线(黑色实线)结构^[36]
(填色为雷达反射率,白色等值线为垂直速度)

值得注意的是,地表冷池在超级单体成熟期是一种准稳定的结构。但即使在这种相对稳定的冷池条件下,超级单体中的龙卷形成仍具有相当大的随机性,因此学者们开始研究超级单体冷池内部结构与龙卷形成的关系。针对超级单体低层动力和热力特征的外场观测试验Grzych et al^[22]指出,形成龙卷和未形成龙卷的超级单体在冷池的内部结构上存在较大的差异,其中形成龙卷的个例冷池出流的浮力较强,假相当位温仅略低于入流区。Lee et al^[23]、Skinner et al^[24-25],进一步将超级单体冷池出流的动力和热力差异与RFD内部的涌浪(Surge)结构联系起来。RFD内部的涌浪结构表现为冷池出流区域的局部突然加速,其假相当位温通常明显高于冷池的平均值(图4)。Lee et al^[23]研究的龙卷个例在RFD区出现了多次涌浪结构,其中前

面两次浮力较强的涌浪伴随了一次 EF-4 龙卷的形成和增强的过程,而后两次浮力较弱的涌浪伴随着该龙卷的减弱和消亡。

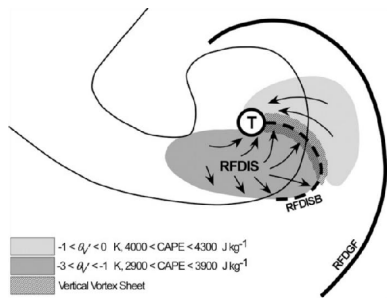


图 4 超级单体风暴 RFD 内部涌浪结构的概念模型图^[23]
(涌浪的热力学特性和风暴入流差异较小,其前沿存在一条强涡度带)

2.3 与龙卷形成相关的极化雷达特征

从以上的研究进展中可见,与龙卷形成相关的母体风暴研究正朝着精细化的方向发展。值得注意的是,虽然理论和模拟研究建立了母体风暴对流尺度精细化结构与龙卷形成的关系,但是相关研究仍有待观测研究的进一步验证和改进。然而,观测母体风暴的对流尺度精细化特征是一项巨大的挑战。例如,使用传统的单多普勒雷达确定准确的龙卷涡旋中心、上升气流中心和冷池出流边界等与龙卷形成过程相关的对流尺度结构仍存在很大的不确定性。近年来具备双极化观测能力的龙卷雷达的广泛应用为龙卷形成研究带来了新的机遇^[26]。双极化龙卷雷达不仅可以获得反映母体风暴中上升气流、风暴入流和出流边界的雷达特征,还为研究与龙卷过程相关的微物理过程提供了可能。以下重点回顾与龙卷形成相关的三项极化雷达特征:龙卷杂波特征(tornadic debris signature, TDS),水平差分反射率弧(Z_{DR} arc),垂直差分反射率柱(Z_{DR} columns)。

龙卷杂波特征(TDS)是被龙卷卷入低空的地物碎片所表现出的极化特征,可以用于判定是否有龙卷发生。超级单体中的 TDS 通常出现在钩状回波的尖端位置。TDS 的具体特征为近地面水平反射率因子大值、差分反射率和相关系数的小值(图 5)。这些极化参数的数值大小与卷入龙卷的地表杂物的极化特性相关,地表杂物主要由介电系数大、形状不规则、取向随机的大粒子(相对于降水粒子)构成。伴随 TDS 出现的雷达特征还包括多普勒速度场上的偶极子结构。早期的雷达观测认为 TDS 仅在强龙卷中出现,但在近 10 年的观测研究中,在各种强度的龙卷(EF-1 以上)中都发现了这一特征。

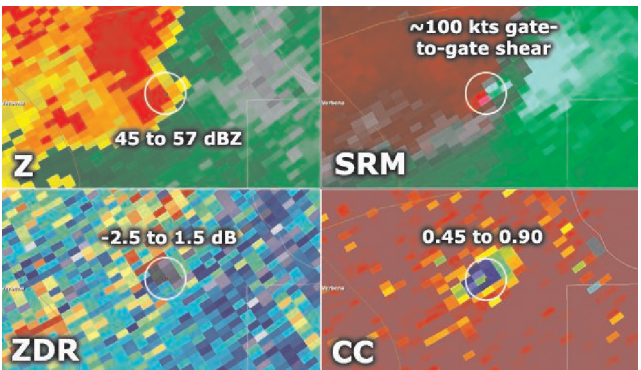


图 5 龙卷杂波特征个例
(对应于反射率的大值、径向速度对、差分反射率和相关系数的小值)

TDS 对于龙卷形成研究和业务预报的主要作用是,可以准确地判断龙卷是否形成以及形成的确切位置。特别是在夜间或者龙卷被降水包围等无法通过肉眼直接观测的情况下。确定龙卷的发生和位置是进一步分析其结构和变化的基本条件,对业务预报而言也是进行预警预报的基础。TDS 的判定需要综合考虑多种极化变量的数值,通常的判定标准要求水平反射率高于 40 dBZ、差分反射率接近 0 或相关系数低于 0.8。在实际判别 TDS 时需要考虑各种观测因素对于极化变量的影响,例如雷达波束随观测距离的展宽效应以及龙卷强度对地表杂物卷起高度的影响。当杂波中夹杂着降水粒子时,可能导致差分反射率和相关系数的增大^[27],从而增加了 TDS 判定的难度。

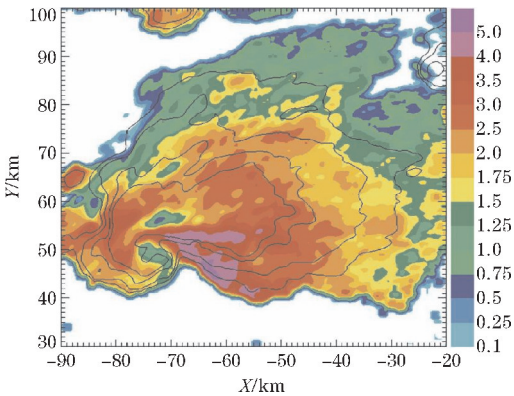


图 6 超级单体中的水平 Z_{DR} 弧结构个例^[28]

水平 Z_{DR} 弧是超级单体 FFD 区低层风暴入流一侧的 Z_{DR} 大值带(图 6)。水平 Z_{DR} 弧仅出现在近地面 1~2 km 并且位于 FFD 近地面强回波区的边缘(即回波梯度最大的区域)。水平 Z_{DR} 弧中的 Z_{DR} 最大值可达 4~5 dB,说明这一区域主要由半径大于 4 mm 的扁平降水粒子构成。Kumjian et al^[28] 通过数值模拟的研究指出,水平 Z_{DR} 弧与低层风暴相对螺旋度(SREH)有很好的相关关系,超级单体风暴中水平 Z_{DR} 弧的出现预示着风暴相对螺旋度的增强。由于风暴相对螺旋度与 FFD 边缘的斜压作用,以及超级单体中气旋的强度

密切相关^[21],因此水平 Z_{DR} 弧的结构特征及演变对于超级单体中的龙卷形成有重要的指示作用^[29-30]。

水平 Z_{DR} 弧在 FFD 边界上的非对称分布(仅出现在风暴入流这一侧)说明形成 Z_{DR} 大值的大粒子并非仅由固态粒子融化而来。这种大粒子浓度偏高的粒子谱主要是由于垂直风切变对不同大小降水粒子的平流差异而形成的(size sorting)。Kumjian et al^[31]通过理想模拟研究了 size sorting 对极化观测变量的影响。模拟的结果显示,使用较为复杂的三参数微物理方案可以再现风切变对降水粒子的 size sorting 作用。模拟的差分反射率最大值出现在垂直风切变下游方向的低层,且与水平反射率和 KDP 的大值区存在位置偏移。Dawson et al 等^[32]研究了冰相粒子的 size sorting 效应与水平 Z_{DR} 弧的关系。其模拟结果显示,冰相粒子的 size sorting 对于水平 Z_{DR} 弧的形成具有主导作用,在完全关闭液态粒子的 size sorting 效应后,单纯的冰相粒子即可以在 FFD 边缘形成水平 Z_{DR} 弧。Dawson et al^[33]进一步研究了风切变对 size sorting 的影响,发现平均风暴相对速度是产生 size sorting 作用的根本原因,垂直风切变仅在降水源随高度发生变化时有贡献。

垂直 Z_{DR} 柱是对流系统上升运动区零度层以上的 Z_{DR} 大值区,主要由大的过冷水滴和湿冰粒子形成(图7)。垂直 Z_{DR} 柱的宽度约为4~8 km,在垂直方向上可延伸至零度层以上数公里。垂直方向上发展高度的不同是垂直 Z_{DR} 柱与水平 Z_{DR} 弧的主要区别。垂直 Z_{DR} 柱内的大降水粒子与对流风暴中强盛的上升运动和降水粒子的再循环过程(recirculation)有关^[34]。对流发展初期形成的降水粒子在下落的过程可能穿越上升与下沉气流的边界而重新进入上升气流区。这些被卷入降水粒子的半径大于其他在上升气流中形成的小粒子,因此可通过碰并过程快速增长为大降水粒子。

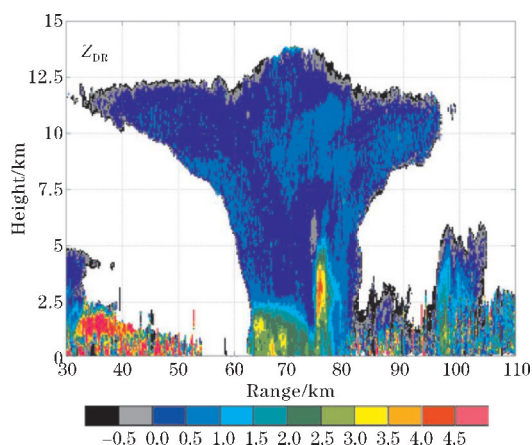


图7 垂直 Z_{DR} 柱结构个例^[34]

能有效观测对流系统的垂直速度。只能通过加密观测和多雷达风场反演的方式间接得到垂直速度。近年来的观测和模拟研究表明,垂直 Z_{DR} 柱的高度、宽度和体积都与对流风暴中的上升运动强度密切相关,是直接反映垂直速度位置和变化的理想变量。Houser et al^[17]使用快速扫描雷达(RaXPoL)对奥克拉荷马州的一次超强龙卷过程研究发现,在龙卷形成之前,龙卷初始涡旋有一个迅速增强的过程,该过程伴随着中低层垂直 Z_{DR} 柱结构的出现和增强。Van den Broeke^[35]使用不同环境条件下的多个超级单体个例对垂直 Z_{DR} 柱与上升运动强度进行了统计研究。使用零度层以上垂直 Z_{DR} 柱的水平面积和 1 dB 等值线的最大高度作为指标,结合对流不稳定能量和风暴相对螺旋度,可以解释超级单体上升气流 80% 以上的速度变化。

3 总结与展望

回顾了近 10 年来国内外针对龙卷形成过程以及相关母体风暴结构和演化特征的研究。以超级单体和非超级单体风暴中龙卷形成过程的经典概念模型为基础,重点从龙卷涡旋垂直方向上的发展特征、龙卷低层涡旋的来源以及与龙卷形成相关的母体风暴对流结构的极化变量特征三个方面,对最新的研究内容进行了回顾和总结。从以上回顾可以看出,随着理论研究和观测技术的快速发展,龙卷形成及其母体风暴结构的研究正在朝着高时空分辨率的方向发展,超级单体风暴中的入流取向与强度、中气旋上升气流的强度和位置及下沉气流区涌浪的动力和热力结构成为新的研究焦点。这些新的研究方向和成果是对经典理论的重要补充,同时也提出了很多亟待解决的新科学问题,例如 RFD 涌浪结构热力学差异的根本原因,FFD 出流的斜压作用对中气旋上升气流强度的影响等。

随着中国现代天气观测网的发展,特别是新一代天气雷达网的业务应用,近年来龙卷研究也呈迅速增长的趋势。但是,通过对比国内外的研究可以发现,中国龙卷研究仍然存在较大的差距。受到观测资料种类和分辨率的限制,目前绝大多数的龙卷研究仍局限于大尺度环境场特征或者对流系统整体的回波结构演变特征的分析。缺乏对龙卷形成过程的直接观测及相关对流尺度结构的动力、热力学特性的详细分析与研究。对龙卷形成过程认识的不足不仅阻碍了分析总结中国龙卷形成的规律,更为龙卷的预警预报带来巨大的困难。

从以上综述可以看出,目前中国龙卷研究和业务水平不足的根源在于缺乏对龙卷进行有效观测的工具

传统多普勒天气雷达由于扫描仰角的限制,并不

以及相应的龙卷个例精细化数据集。因此亟需研制专用的龙卷观测设备,在龙卷的易发区域建立多源立体精细化的观测网,深入研究龙卷观测资料的处理和分析方法,建立中国龙卷个例的高分辨率四维数据集。在此基础上,进一步揭示中国龙卷的演变特征和相应的机理,为龙卷的业务预警预报奠定坚实的基础。

参考文献:

- [1] 范雯杰,俞小鼎. 中国龙卷的时空变化特征[J]. 气象,2015,41:793-805.
- [2] 周后福,刁秀广,夏文梅,等. 江淮地区龙卷超级单体风暴及其环境参数特征[J]. 气象学报,2014,72:306-317.
- [3] 王秀明,俞小鼎,周小刚. 中国东北龙卷研究:环境特征分析[J]. 气象学报,2015,73:425-441.
- [4] 郑媛媛,张备,王啸华,等. 台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析[J]. 气象,2015,41:942-952.
- [5] Markowski P, Y Richardson. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes[M]. 2010:401-407.
- [6] Edwards R, J G LaDue, J T Ferree, et al. Tornado Intensity Estimation: Past, Present, and Future[J]. Bull. Am. Meteorol. Soc., 2013, 94:641-653.
- [7] Zhao K, Coauthors. Doppler Radar Analysis of a Tornadoic Miniature Supercell during the Landfall of Typhoon Mujigae(2015) in South China[J]. Bull. Am. Meteorol. Soc., 2017, 98:1821-1831.
- [8] Bai L, Coauthors. An Integrated Damage, Visual, and Radar Analysis of the 2015 Foshan, Guangdong, EF3 Tornado in China Produced by the Landfalling Typhoon Mujigae (2015) [J]. Bull. Am. Meteorol. Soc., 2017, 98:2619-2640.
- [9] Meng Z, Coauthors. The Deadliest Tornado (EF4) in the Past 40 Years in China[J]. Weather Forecast., 2018, 33:693-713.
- [10] Burgess D W, L R Lemon, R A Brown. Tornado characteristics revealed by Doppler radar [J]. Geophys. Res. Lett., 1975, 2:183-184.
- [11] Brown R a, L R Lemon, D W Burgess. Tornado Detection by Pulsed Doppler Radar [J]. Mon. Weather Rev. 1978, 106, 29-38.
- [12] Trapp R J, R Davies-Jones. Tornadogenesis with and without a Dynamic Pipe Effect[J]. J. Atmos. Sci., 1997, 54:113-133.
- [13] Trapp R J, E D Mitchell, G A Tipton, et al. Descending and Nondescending Tornadic Vortex Signatures Detected by WSR-88Ds [J]. Weather Forecast., 1999, 14:625-639.
- [14] Pazmany A L, J B Mead, H B Bluestein, et al. A Mobile Rapid-Scanning X-band Polarimetric (RaXPo) Doppler Radar System[J]. J. Atmos. Ocean. Technol., 2013, 30:1398-1413.
- [15] Bluestein H B, M M French, I PopStefanija, et al. A Mobile, Phased-Array Doppler Radar For The Study of Severe Convective Storms[J]. Bull. Am. Meteorol. Soc., 2010, 91:579-600.
- [16] French M M, H B Bluestein, I PopStefanija, et al. Reexamining the Vertical Development of Tornadic Vortex Signatures in Supercells [J]. Mon. Weather Rev., 2013.
- [17] Houser J L, H B Bluestein, J C Snyder, et al. Rapid-Scan, Polarimetric, Doppler Radar Observations of Tornadogenesis and Tornado Dissipation in a Tornadic Supercell: The "El Reno, Oklahoma" Storm of 24 May 2011 [J]. Mon. Weather Rev., 2015, 143:2685-2710.
- [18] Markowski P M, An Idealized Numerical Simulation Investigation of the Effects of Surface Drag on the Development of Near-Surface Vertical Vorticity in Supercell Thunderstorms [J]. J. Atmos. Sci., 2016, 73:4349-4385.
- [19] Davies Jones R P, H E Brooks. Mesocyclogenesis from a theoretical perspective[J]. The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards, 1993, 79.
- [20] Markowski P, Coauthors. The Pretornadic Phase of the Goshen County, Wyoming, Supercell of 5 June 2009 Intercepted by VORTEX2. Part II: Intensification of Low-Level Rotation [J]. Mon. Weather Rev., 2012, 140:2916-2938.
- [21] Markowski P M, Y P Richardson. The Influence of Environmental Low-Level Shear and Cold Pools on Tornadogenesis: Insights from Idealized Simulations[J]. J. Atmos. Sci., 2014, 71:243-275.
- [22] Grzych M L, B D Lee, C A Finley. Thermodynamic Analysis of Supercell Rear-Flank Downdrafts from Project ANSWERS [J]. Mon. Weather Rev., 2007, 135:240-246.
- [23] Lee B D, C A Finley, C D Karstens. The Bowdle, South Dakota, Cyclic Tornadic Supercell of 22

- May 2010; Surface Analysis of Rear-Flank Downdraft Evolution and Multiple Internal Surges[J]. Mon. Weather Rev., 2012, 140: 3419–3441.
- [24] Skinner P S, C C Weiss, M M French, et al. VORTEX2 Observations of a Low-Level Mesocyclone with Multiple Internal Rear-Flank Downdraft Momentum Surges in the 18 May 2010 Dumas, Texas, Supercell [J]. Mon. Weather Rev., 2014, 142: 2935–2960.
- [25] Skinner P S, C C Weiss, L J Wicker, et al. Forcing Mechanisms for an Internal Rear-Flank Downdraft Momentum Surge in the 18 May 2010 Dumas, Texas, Supercell [J]. Mon. Weather Rev., 2015, 143: 4305–4330.
- [26] Van Den Broeke, M S. Polarimetric Radar Metrics Related to Tornado Life Cycles and Intensity in Supercell Storms [J]. Mon. Weather Rev., 2017, 145: 3671–3686.
- [27] Bodine D J, R D Palmer, G Zhang. Dual-Wavelength Polarimetric Radar Analyses of Tornadoic Debris Signatures [J]. J. Appl. Meteorol. Climatol. 2014, 53: 242–261.
- [28] Kumjian M R, A V Ryzhkov. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms [J]. J. Appl. Meteorol. Climatol., 2008, 47: 1940–1961.
- [29] Palmer R D, Coauthors. Observations of the 10 May 2010 Tornado Outbreak Using OU-PRIME: Potential for New Science with High-Resolution Polarimetric Radar [J]. Bull. Am. Meteorol. Soc., 2011, 92: 871–891.
- [30] Crowe C, C Schultz, M Kumjian, et al. Use of dual-polarization signatures in diagnosing tornadic potential [J]. Electron. J. Oper. Meteorol., 2012, 13: 57–78.
- [31] Kumjian M R, A V Ryzhkov. The impact of size sorting on the polarimetric radar variables [J]. J. Atmos. Sci., 2012.
- [32] Dawson D T, E R Mansell, Y Jung, et al. Low-Level Z_{DR} Signatures in Supercell Forward Flanks: The Role of Size Sorting and Melting of Hail [J]. J. Atmos. Sci., 2014, 71: 276–299.
- [33] Dawson D T, E R Mansell, M R Kumjian. Does Wind Shear Cause Hydrometeor Size Sorting? [J]. J. Atmos. Sci., 2015, 72: 340–348.
- [34] Kumjian M R, A P Khain, N Benmoshe, et al. The anatomy and physics of Z_{DR} columns: Investigating a polarimetric radar signature with a spectral bin microphysical model [J]. J. Appl. Meteorol. Climatol., 2014, 53: 1820–1843.
- [35] van den Broeke, M S. Polarimetric variability of classic supercell storms as a function of environment [J]. J. Appl. Meteorol. Climatol., 2016, 55: 1907–1925.
- [36] Markowski P, Y Richardson, E Rasmussen et al. Vortex Lines within Low-Level Mesocyclones Obtained from Pseudo-Dual-Doppler Radar Observations [J]. Mon. Weather Rev., 2008, 136: 3513–3535.

Tornadogenesis and the Structural Evolution of Associated Parent Storms

TANG Xiao-wen¹, LI Feng², LIU Gao-ping³

(1. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210089, China; 2. Meteorological Observation Center of CMA, Beijing 100081, China; 3. Anhui meteorological observatory, Hefei 230031, China)

Abstract: This paper reviews recent researches on tornadogenesis and the structural evolution of associated parent storms. Important topics including vertical development of tornado vortex structure, the origin of tornado vortex structure at the lower levels, and the polarimetric characteristics of convective-scale structure in parent storms are discussed in the context of supercell storms. It is shown that recent researches have been focusing on the detailed structure and evolution of convective-scale structures pertains to tornadogenesis in supercell storms. This review points to a possible direction for the future development of research and operation on tornadogenesis in China.

Keywords: tornadogenesis; supercell; convective-scale structure; review