

中国当代强对流天气研究与业务进展*

俞小鼎¹ 郑永光²YU Xiaoding¹ ZHENG Yongguang²

1. 中国气象局气象干部培训学院, 北京, 100081

2. 国家气象中心, 北京, 100081

1. *China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081, China*2. *National Meteorological Centre, Beijing 100081, China*

2019-10-14 收稿, 2020-03-04 改回.

俞小鼎, 郑永光. 2020. 中国当代强对流天气研究与业务进展. 气象学报, 78(3): 391-418

Yu Xiaoding, Zheng Yongguang. 2020. Advances in severe convective weather research and operational service in China. *Acta Meteorologica Sinica*, 78(3):391-418

Abstract This article reviews advances in severe convective weather research and operational service in China during the past several decades. It emphasizes the synoptic situations favorable for severe convective weather, the major organization modes of severe convective storms, the favorable environmental conditions and the characteristics of weather radar echoes and satellite imageries of severe convective weather, as well as the forecasting and nowcasting techniques of the weather. As a whole, Chinese scientists have profoundly understood synoptic patterns, organizations and evolution characteristics from radar and satellite observations, and mechanisms of different types of convective weather in China. They have studied and have deeply understood multiple types of triggering mechanism for convection, and the environmental conditions, the structures and modes, and the maintenance mechanisms for supercell storms and squall lines. They also have obtained the organization modes and climatological distributions of mesoscale convective systems and different types of convective weather in China, and the multiscale characteristics and formation mechanisms for large hail, tornadoes, downbursts and damaging convective wind gusts based on radar, satellite and lightning observations, and damage survey features. For operational weather forecasting, they have developed various methods and techniques for identifying severe weather and for mesoanalysis. Many different types of nowcasting and forecasting techniques for severe weather forecast such as "ingredients-based" and deep learning have been developed. As a result, the performance of operational severe convective weather forecasts in China has been significantly improved.

Key words Severe convective weather, Research and operation, Advances, Contemporary China

摘要 对当代中国几十年来强对流天气研究和业务进展做了阐述, 主要包括强对流系统产生的环境背景和主要组织形态, 以及具体强对流天气的有利环境条件、触发机制、卫星云图特征、多普勒天气雷达回波特征以及预报、预警技术等诸方面。总体来看, 中国学者对强对流以及不同类型强对流天气(强冰雹、龙卷、雷暴大风)发生、发展的环流背景以及通过雷达和卫星观测到的组织结构及其演变特征都已有了明确认识, 研究了对流系统的多种触发机制, 深入认识了超级单体、飚线等对流系统的环境条件、组织结构特征和维持机制, 了解了中国中尺度对流系统的组织形态和气候分布特征, 获得了强冰雹、龙卷、下击暴流和雷暴大风等的雷达、卫星和闪电等的多尺度观测特征、形成机制和现场灾害调查特征, 发展了各类强对流天气识别、监测和分析方法以及基于“配料法”和深度学习方法等的预报、预警技术等。因此, 强对流天气业务预报水平已得到显著提升。

* 资助课题: 国家重点研发计划项目(2018YFC1507504、2017YFC1502003)、国家自然科学基金面上项目(41775044、41375051)和中国工程科技中长期发展战略研究领域战略研究项目(2019-ZCQ-06)。

作者简介: 俞小鼎, 主要从事强对流天气分析和临近预报研究与教学。E-mail: xdyu1962@126.com

通信作者: 郑永光, 主要从事强对流和强降水等中小尺度天气研究。E-mail: zhengyg@cma.gov.cn

关键词 强对流, 研究和业务, 进展, 当代中国

中图法分类号 P445 P446 P457.9

1 引言

强对流天气是导致气象灾害的重要天气类型, 与中小尺度天气系统关系密切。对强对流天气的研究, 对于防灾、减灾意义重大, 文中将对数十年来中国现代强对流天气的研究进展做简要阐述。关于强对流天气, 目前并没有严格定义, 行业标准正在制定之中, 中国业界达成的共识是: 落到地面上直径不小于 2 cm 的冰雹、阵风超过 17 m/s 的对流性大风、发生在陆地上所有级别的龙卷以及不低于 20 mm/h 的短时强降水称为强对流天气。由于短时强降水常常发生在暴雨期间, 而关于暴雨研究进展已有人做了综合评述, 因此文中只涉及强冰雹、雷暴大风(含下击暴流)和龙卷。需要说明的是, 前述强对流天气也经常伴随短时强降水天气, 并且 50 mm/h 以上的短时强降水属于相对极端的强对流天气(俞小鼎, 2012; Chen, et al, 2013; 郑永光等, 2017)。作为对比, 美国国家气象局(NWS)的强对流天气标准为: 落到地面上直径不小于 2.5 cm 的冰雹、阵风不低于 25 m/s 的对流性大风(雷暴大风)以及发生在陆地上的所有级别的龙卷。

强对流天气研究和预报的基础是探测, 也离不开数值预报技术的发展(俞小鼎, 2012; 郑永光等, 2015), 但数值预报模式进展不在本文中讨论。中国的强对流天气研究进展与天气雷达、气象卫星、闪电定位仪、自动气象站等观测技术发展和设备部署密切相关(Zhang, et al, 2020), 也得益于 20 世纪 60 年代以来的各种与中尺度对流天气相关的野外观测试验研究, 比如 60 年代长江三角洲地区灾害性天气中尺度观测试验, 70 年代华南前汛期暴雨试验, 80、90 年代珠江三角洲、长江三角洲、长江中游和京津冀等多个基地的中尺度系统观测试验(Zhang, et al, 2020), 1998 年的华南暴雨科学试验、淮河流域能量与水分循环研究试验, 2000 年之后的长江中下游梅雨锋暴雨野外科学试验、华南暴雨试验(SCHeREX)、“突发性强对流天气演变机理和监测预报技术研究”观测试验、华南季风降水试验(SCMREX)等。

强对流天气研究的主要目的是提高强对流天

气的预报、预警水平。强对流天气预报可分为潜势预报和临近预报、预警。潜势预报常常需要解决如下几个问题: (1)今天哪些区域有利于深厚湿对流(雷暴或对流风暴)的产生? (2)可能会产生哪些雷暴(对流风暴)类型? 是多单体强风暴? 超级单体风暴还是飚线? 多单体风暴和超级单体风暴是孤立出现还是以雷暴群的方式出现? 有无可能出现强对流天气? 如果有可能, 是以强冰雹为主? 还是以雷暴大风或者龙卷为主? 还是上述 3 种强对流天气的某种组合? 而强对流天气的临近预报、预警主要是根据多普勒天气雷达回波特征适当结合地面气象站、卫星和闪电等观测资料判断未来 0—2 h 是否可能出现大冰雹、雷暴大风(含下击暴流)或者龙卷。

根据上述几方面的主要问题, 综合概述强对流产生的有利环境条件、导致强对流天气的对流风暴类型例如超级单体、飚线以及中尺度对流系统, 然后阐述对强对流天气本身的研究进展, 介绍国家气象中心(中央气象台)强天气预报中心自 2009 年成立以来强对流天气业务和技术进展情况, 提出未来研究的努力方向。

2 雷暴和强对流天气产生的有利条件

一般深厚湿对流(雷暴或对流风暴)的产生要素包括静力不稳定、水汽和抬升触发, 在任何时间任何地点, 这 3 个要素能够同时满足, 就会有雷暴(深厚湿对流或对流风暴)生成(Doswell III, 1987)。如果触发机制是在地面附近, 则生成的深厚湿对流称为“地基对流(surface based convection)”; 如果触发机制是在近地层以上, 则生成的深厚湿对流称为“高架对流(elevated convection)”(Colman, 1990)。对于地基对流, 触发机制主要是边界层辐合线和地形。而对于高架对流, 触发机制主要是低层(925—700 hPa)的辐合切变线、地形以及重力波。边界层辐合线包括冷锋、干线、雷暴流出边界(阵风锋)、海风锋辐合线、地形辐合线以及水平对流卷(horizontal convective rolls)等。如果要产生强对流天气如大冰雹、对流性强阵风和龙卷, 常常还需要中等以上强度的深层(0—6 km 或 0—8 km)风垂直切变(Johns, et al, 1992; McNulty, 1995; Doswell III,

2001; Moller, 2001), 一些强对流天气系统如多单体强风暴、超级单体和强飏线通常都发生在显著的深层风垂直切变环境下; 也有一些强对流天气出现在弱的深层风垂直切变环境下, 由脉冲风暴产生 (Chisholm, et al, 1972)。

2.1 雷暴和强对流的环境背景

吴泗璋(1938)就讨论了中国的雷暴系统, 指出中国雷暴可以分为两大类, 一类是气团雷暴, 发生在均匀气团内; 另一类是锋面气旋雷暴, 锋面气旋雷暴又可以分为冷锋雷暴、暖锋雷暴和冷锋前暖区雷暴, 并给出了类似 $T-\ln p$ 图分析的示例。王沛霖(1964)考虑了整个对流气柱内上升气块的浮力的平均效应, 推导出一个便于日常做对流预报用的平均不稳定能量指标。雷雨顺等(1978)提出基于能量的考量来预报强对流的思路, 分别定义了总温度、干空气总温度和饱和总温度, 根据探空绘制的上述各种温度的垂直廓线称为比能垂直廓线。通过分析和比较这些廓线, 可以分析大气局地稳定度、饱和度和潮湿程度(相对湿度)。相对于传统的抬升指数、Showalter 指数以及 K 指数等, 这些廓线可以提供更多关于雷暴(深厚湿对流)生成潜势的信息。雷雨顺等(1978)进一步提出, 在地面图上绘制总温度(用湿静力能+动能后除以定压比热), 等值线密集区称为“能量锋区”, 总温度高的区域称为“高能区”, 低的地区称为“低能区”, 而雷暴容易出现在能量锋附近或者能量锋所围成的高能区中。这套理论和方法对中国的深厚湿对流(雷暴)天气预报技术产生了重要影响, 至今很多预报员写论文还经常使用“高能区”和“能量锋”等概念。其实, 所谓“能量锋”对应冷锋、暖锋、准静止锋或者干线, 都是触发对流的重要机制; 而“高能区”就是暖湿区。“能量锋”和“高能区”等概念现在不宜再使用了, 因为这两个概念完全可以用其他更常用的概念代替。此外, 雷雨顺等(1978)所提方法的一个严重不足是没有考虑风垂直切变对强对流天气的重要影响。雷雨顺等(1980)提出了潜在不稳定的概念, 其含义是只有当气块能够抬升到自由对流高度以上时, 才具有潜在不稳定。那时虽然已经有气块抬升构成的正面积和负面积的概念, 并且已经有对流有效位能(CAPE)概念的正式定义 (Moncrieff, et al, 1976), 只是当时受计算能力的限制难以精确计算正面积(对流有效位能)和负面积(对流抑制能

量)大小。因此, 他们提出的潜在不稳定概念还是具有一定的应用价值。

巢纪平等(1964)利用一套线性和非线性方程组得到结论, 对流流场的结构决定了风垂直切变对于对流的发展是否有利。王德铮(1965)则指出福建春季暖区对流与 850 hPa 辐合带的关系密切。陶诗言(1980)指出中纬度局地强风暴的 3 个有利条件: 对流层中下层为明显条件不稳定、有强的风垂直切变和对流层中层非常干燥而低层为暖湿层。丁一汇等(1981)讨论了暴雨和强对流之间天气尺度条件的差异: 暴雨发生在低空辐合高空辐散的深厚上升运动区, 低层或中低层的强暖平流导致了气层的条件不稳定, 水汽主要通过大气边界层输送, 向暴雨区大量辐合集中; 而强对流天气的高空辐散或负涡度区不明显或不存在, 中层冷平流对条件不稳定层的建立起重要作用。邹美恩等(1984)讨论了湖南 42 次冰雹雷暴大风等强对流天气与干暖盖的关系, 发现 36 次有干暖盖结构、且暖盖下面有急流的达 30 次。王沛霖(1964)讨论了珠江三角洲地区局地强风暴发生的环境条件并与中纬度局地强风暴环境进行了比较。

许爱华等(2014)提出了中国强对流天气 5 种基本形势配置: 冷平流强迫类、暖平流强迫类、斜压锋生类、准正压类、高架雷暴类。俞小鼎等(2012)总结了各类强对流天气(冰雹、雷暴大风、龙卷和短时强降水)发生的有利环境条件。张小玲等(2012)根据强对流天气产生的几个要素(静力不稳定、水汽、抬升触发和风垂直切变)阐述了强对流天气分析的一些基本原则和具体做法。孙继松等(2012)、王秀明等(2014)和郑永光等(2017)对雷暴和不同类型强对流天气潜势预报中的一些基本概念尤其是容易混淆的概念进行了阐述和澄清。

2.2 雷暴和强对流的抬升触发机制

丁一汇(1978)指出, 弧状云线(阵风锋)与锋面、飏线和积云线(水平对流卷)相交区域是强对流发展和强对流天气最有可能出现的区域。孙淑清等(1980)提出低空急流脉动(低空急流速度在短时间内的突然增加)是触发对流的一种重要机制。杨越奎等(1992)针对 1983 年 4 月 28 日一次强对流过程, 分析了相应冷锋的次级环流, 指出冷锋垂直环流的上升支可能是触发对流发生的重要机制。赵德山等(1982)发现阵风锋中有非常强烈的阵风涌

浪和很强上升气流,最强上升气流区位于阵风锋前部大约 200 m 以上高度。翟国庆等(1989)发现冷锋和阵风锋与其他中尺度辐合线的相交是强对流触发的重要原因。刘运策等(2001)对有利于海风锋触发对流的环境背景特征做了总结。王彦等(2011)对天津渤海湾海风锋的活动规律进行了归纳,并指出单独海风锋不容易触发雷暴,只有当海风锋辐合线与其他辐合线相交时,才容易触发雷暴。公衍铎等(2019)和郑永光等(2020)通过个例分析发现,已有地面辐合线加强并同其他对流系统的阵风锋辐合线共同作用来触发对流。漆梁波等(2006)讨论了多普勒天气雷达上的窄带回波即边界层辐合线在对流触发临近预报中的作用。Huang 等(2019)利用巴彦淖尔 CC 型多普勒天气雷达 5 a 观测资料分析了黄河河套地区边界层辐合线及其触发对流情况,发现在总识别的 323 个边界层辐合线中,44% 与对流触发有关。

刁秀广等(2009)在考察了多个个例后发现:远离风暴主体的阵风锋和顺地面风移动的风速辐合线在热力条件较弱的情况下一般不会产生对流,阵风锋的叠加或阵风锋与其他辐合线叠加在有利环境条件下可产生局地强对流,而单纯的近地层辐合线在有利环境条件下可产生孤立的局地对流。俞小鼎等(2012)介绍了安徽阵风锋与水平对流卷相遇触发对流个例和夜间北京偏东低空急流发展在西山抬升触发强对流的例子。俞小鼎(2012)和陈明轩等(2013)都指出偏东风强低空急流遇到太行山地形抬升触发对流导致的后向传播是 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨的成因之一。

孙淑清等(1992)在分析 1985 年 8 月 20 日北京一次对流过程时,发现形成于北京西部的一条南北走向的 γ 中尺度干线与对流过程的触发密切相关。王秀明等(2015)发现导致东北地区龙卷的对流系统多数情况下是由伴随地面干线的汇合流场导致的地面附近的辐合线所触发。Qin 等(2017)分析了北京西北部干线和冷锋合并触发对流的个例。陈明轩等(2017)针对一个发生在京津冀地区包含 3 次风暴过程的强对流事件,研究了在京津冀复杂地形条件下导致对流风暴局地新生及快速增强的对流尺度热力和动力机制,讨论了地形、阵风锋和低层暖湿气流相互作用导致对流生成和加强的机制。

Bai 等(2019)利用多种观测资料和高分辨率数值模拟资料,指出 2009 年 6 月 3 日傍晚河南位于黄河以北平原地区一次强对流系统的触发是不断有前期雷暴下沉气流形成的冷涌(间歇性阵风锋)冲到山下,与山下伴随气流汇合的干线相遇,在干线与扇状阵风锋的交汇点处触发强对流。俞小鼎等(2020)给出了冷锋、干线、阵风锋、海风锋辐合线以及地形触发对流系统的例子并对触发机理进行了讨论。

高分辨率静止气象卫星多通道红外云图结合可以用来判断雷暴(深厚湿对流)的初生,比在雷达回波上确认对流的初生提前 10—30 min。由于对流发展初期会使云体厚度增加,云顶温度急剧下降,云顶相态发生变化等,这些特征可通过多光谱综合分析技术来判识,从而捕捉到初生的对流(覃丹宇等,2014)。已有一些研究(刘京华等,2012; Huang, et al, 2017; 郭巍等,2018; 周鑫等,2019)基于日本葵花静止气象卫星或中国 FY-2F 静止气象卫星观测数据的多通道红外亮温及其时间变化提取出多个指标来综合识别对流系统初生。

盛杰等(2014)指出 2010—2012 年中国南方冷锋后的高架对流过程的主要触发机制是低空暖湿急流结合低层辐合切变线。俞小鼎等(2016)在仔细分析基础上判断 2007 年 3 月 30 日傍晚至夜间山东高架强对流(强冰雹和雷暴大风)过程的触发机制是山脉背风坡的较大振幅俘获重力波。Zhang 等(2019)在分析导致 2016 年 6 月 23 日阜宁 EF4 级龙卷的超级单体风暴起源时,发现中低层中空浅薄的湿绝对不稳定层使得弱的上升气流触发了高架中尺度对流系统(MCS),然后演变为地基的中尺度对流系统,其中部分对流系统演变为导致著名的“6.23”EF4 级龙卷的超级单体风暴。

3 强对流系统的组织形态

3.1 超级单体风暴

“超级单体”一词是 Browning(1964)研究美国一次强对流风暴时提出的,代表该风暴在其最强盛期间的准稳定状态。Browning(1977)在一篇综述文章中指出超级单体风暴内部的旋转特征是其区别于其他风暴类型的最主要特征。随后的理论(Davies-Jones, 1984)和数值模拟工作(Klemp, et al, 1978, 1981; Rotunno, et al, 1982, 1985; Weisman, et al, 1984; Klemp, 1987)进一步证明中气旋是超级

单体的最本质特征,这在国际雷达气象学界逐渐达成共识。

王昂生等(1983, 1985)将超级单体分为3种类型:(1)有界弱回波区(BWER)大;(2)BWER小;(3)没有明显BWER;并指出只有第一种类型的超级单体风暴才会产生严重的雹灾。张鸿发等(1997)发现,甘肃平凉地区的强对流风暴中一部分具有明显的低层钩状回波,其中90%为气旋式钩状,10%为反气旋钩状。由于当时没有多普勒天气雷达,因此无法识别中气旋。事实上,张鸿发等(1997)发现的气旋式钩状回波与中气旋相对应,而反气旋式钩状回波与中反气旋对应,这些具有明显钩状回波的强对流风暴都是超级单体。

郑媛媛等(2004)利用位于合肥的中国第一部业务布网的多普勒天气雷达(SA型)深入细致地分析了2002年5月27日安徽北部的一次经典超级单体风暴,发现该超级单体的中气旋分别呈现为纯粹气旋式旋转(中低层)、辐散合并气旋式旋转(中高层)以及略带气旋式旋转的强烈风暴顶辐散(高层);中气旋垂直扩展达到9 km左右,中低层对应钩状回波,中层和中高层对应有界弱回波区。赵坤等(2008)分析发生在台湾海峡雨带上的一个超级单体中气旋发现,此中气旋由低层形成随后向上发展,内核直径先是低层大中层小,随后中层扩大与低层接近成圆柱状,之后快速减弱。潘玉洁等(2008)分析了镶嵌在一条飑线中的超级单体时发现钩状回波附近存在一个强烈的中气旋,其起源于中层(3.5—5.0 km高度),随后向下和向上发展。俞小鼎等(2008)对2005年7月30日中午导致一次EF3级强龙卷的典型强降水超级单体风暴的演变和结构特征进行了深入细致的分析。该超级单体的演化可以归结为“带状回波—典型强降水超级单体—弓形回波”3个阶段。在典型强降水超级单体阶段,形成一个庞大深厚的强降水超级单体和被包裹在其中的直径约12 km、深厚强烈的中气旋,然后由于后侧入流的出现,低层回波形态层演变为“S”形,而中层回波呈现为螺旋型,龙卷出现在这个时刻。戴建华等(2012)发现华东地区2009年6月5日弓形飑线前的暖区特殊环境有利于超级单体风暴产生,并使用风廓线资料对比了近风暴环境的变化,发现0—3 km风垂直切变和风暴相对螺旋度的增强对飑线和超级单体发展起到关键作用,飑线

与超级单体风暴形成了“弓”与“箭”的关系。

张鸿发等(2004)描述了1976年8月13日发生在甘肃平凉的超级单体风暴分裂过程,虽然只有常规雷达观测资料,但从典型的钩状回波和有界弱回波区以及分裂行为可以确定是超级单体。分裂后,右移单体强度明显强于左移单体,左移单体移动速度相对较快,最大回波强度 ≤ 50 dBz,维持了40 min;右移单体在移动过程中的最大回波强度 ≥ 55 dBz,移动缓慢,呈准稳定态,维持了100 min。廖玉芳等(2007b)分析了2004年4月29日下午发生在湖南北部的一次超级单体分裂过程。该超级单体风暴经过了3次分裂过程,每次风暴分裂点均位于风暴体左侧边缘,分裂后右移的中气旋占支配地位的母风暴保持强盛,与分裂出的左移风暴相对应的是一个中反气旋,该左移风暴强度较弱,其包含的中反气旋维持时间也不超过半小时。事实上,在风暴分裂之前,中气旋占支配地位的母风暴中就有弱的中反气旋发展,整个演变情况与Rotunno等(1982)所给出的对应于风切变矢量随高度顺时针切变情况下超级单体分裂演变的情形基本一致。王福侠等(2014)分析了2007年7月9日晚间发生在河北中南部的超级单体分裂过程:风切变矢量随高度逆时针旋转,发生了多次超级单体分裂情况,其中3个超级单体分裂后左移的反气旋风暴确实得到选择性加强,部分右移的气旋性风暴受到明显抑制,与超级单体动力学的理论(Rotunno, et al, 1982; Klemp, 1987)基本一致。俞小鼎等(2020)分析了2004年5月21日夜間发生在安徽巢湖地区的超级单体分裂过程,发现分裂后右移(气旋式)和左移(反气旋式)超级单体强度相当。

王秀明等(2009)利用WRF模式模拟了2005年5月31日北京超级单体雹暴,模拟的超级单体发生分裂,中气旋占支配地位,右移风暴占绝对优势,尽管实际的超级单体并没有被观测到明显的分裂过程,但几乎所有超级单体数值模拟都有分裂过程出现。Yao等(2019)使用Bryan云模式(<http://www2.mmm.ucar.edu/people/bryan/cm1/faq.html>)针对2012年7月21日北京特大暴雨期间发生在通州区张家湾的龙卷进行了极高分辨率数值模拟(采用模式嵌套,中心区域最高水平分辨率100 m),采用7月21日14时(北京时,下同)探空作为初始场,做下垫面均匀的理想模拟。模拟出的龙卷超级单

体也经历了风暴分裂(实际的超级单体没有观测到分裂过程),其较强的右移带有中气旋的单体与观测的实际龙卷的超级单体具有比较好的一致性。

廖玉芳等(2007a)对湖南10次强对流事件中的22个超级单体进行详细分析,结果表明:超级单体可由孤立单体、多单体风暴、中尺度对流系统内的单体发展而成;超级单体中包含有低顶超级单体和微型超级单体;超级单体维持时间多数超过1 h,但最短时间只有24 min;超级单体的最大反射率因子均超过60 dBz;上述22个超级单体风暴中,中气旋最大旋转速度为24 m/s。湖南超级单体风暴可以产生冰雹、雷暴大风、龙卷和短时强降水,其中冰雹和雷暴大风产生频率最高。刁秀广等(2011)根据回波结构组织特征,将山东济南SA型新一代多普勒天气雷达观测到的54个超级单体分为孤立型和镶嵌型两大类,前者产生冰雹、雷暴大风和龙卷,后者产生冰雹尤其是强冰雹能力弱一些,但产生雷暴大风的能力与孤立型超级单体基本相当。吴芳芳等(2013)统计分析了2005—2009年苏北72个超级单体环境条件、雷达回波特征和强对流天气。苏北超级单体具有长生命史和持久的中气旋,具有有界弱回波区或弱回波区结构,产生大冰雹、龙卷、短时强降水和下击暴流,类型主要有经典超级单体、强降水超级单体以及由强降水超级单体组成的复合风暴。Yu等(2012)选取了2002—2009年中国的228次超级单体过程,对其关键环境参数进行了统计分析,选出其中150个具有较多普勒天气雷达观测的超级单体分析了其主要回波特征。结果表明:超级单体对应的对流有效位能的峰值频率区间是1500—2500 J/kg,位于这一区间的超级单体风暴占总数的56%,而超级单体对应的0—6 km风矢量差的峰值频率区间为15—25 m/s,占样本总数的62%;超级单体中气旋旋转速度的峰值频率区间为15—25 m/s,占样本总数的86%;中气旋对应的垂直涡度的峰值频率区间位于 $(1.0—2.0) \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$,中气旋直径的峰值频率区间为4.0—7.0 km,最大为14.5 km,平均为6.2 km;绝大多数中气旋生命史为30—130 min,最长生命史大约为3.5 h。

3.2 飏线与弓形回波

飏线是指准连续的能够带来区域性雷暴大风的线性对流系统(俞小鼎等,2020)。飏则是指至少

2 min时段的平均风不低于8 m/s的大风现象(Doswell III, 2001),相应的阵风很容易超过15 m/s。弓形回波可以是孤立的、由多单体构成的在雷达回波上呈现“弓形”的多单体结构,更多情况下是镶嵌在飏线中作为飏线的一部分,“弓形”的向前凸起部分附近更容易产生雷暴大风。

卢鏊(1935)描述了1931年6月10—11日华东地区一次飏线过程:“中国东部有飏线经过,自北而南,所经之地,狂风骤发,温度突降,雷电并施,雨雹交作,拔树摧屋,伤人损畜,为一时之浩劫。”丁一汇等(1982)根据1970—1981年18次飏线个例对其流型配置和关键环境特征进行了分析,总结出4种飏线流型配置:槽后型、槽前型、高后型以及台风倒槽或东风波型。张沛源(1983)分析了1980年7月20日张家口附近的一次结构松散的飏线过程,包括环境背景和天气雷达回波特征,根据雷达回波特征推断出飏线不同发展阶段的垂直环流特征。蔡则怡等(1988)详细和深入地分析了1983年6月27日华北地区的4个飏线组成的飏线群,提出了华北地区飏线生命史的中尺度天气模式,包括组织、扩展和消散3个阶段,生命史3—5 h。何齐强等(1992)利用卫星云图、天气雷达回波、常规高空地面观测以及华东中尺度试验加密观测,对1983年4月27日晚间到28日凌晨发生在江淮地区的一次暖区飏线进行分析,结果表明:飏线接近低空西南风急流轴时,对流强度增大,离开急流轴时强度减弱;飏线过境时环境高空风减小,低层风增大;飏线前约30 km到飏线后约50 km的范围内,存在着狭长的低-高-低3个 β 中尺度系统,其中飏线后的带状中高压强度最大,其前部负压可达1 hPa/km,是飏线过境引起瞬时强风的部位,飏线过南京时最大阵风达35.9 m/s。

姚叶青等(2008)基于常规高空地面观测和合肥SA型新一代天气雷达分析了2008年8月24日影响河南、安徽、江苏、浙江和上海四省一市的大范围飏线过程,在其将近14 h的生命史中经历多次分裂、再生和重组;发现穿过弓形回波凸点的径向速度垂直剖面清楚呈现出显著的中层径向辐合(MARC)特征。漆梁波等(2004)将上海引进的美国WSR-88D雷达观测与当时为数不多的风廓线雷达观测结果相结合,对2008年8月24日飏线经过前后低层暖湿入流和后侧下沉气流的进行了

讨论。谢健标等(2007)根据常规高空地面观测和广州 SA 型新一代天气雷达对 2005 年 3 月 22 日发生在华南的强飑线过程进行了分析。导致此次飑线的对流系统在 3 月 21 日下午已在广西形成, 大约在 22 日 05 时形成飑线, 08 时进入广东, 14 时前后进入福建, 17 时前后在即将进入浙江时消散, 生命史长达 12 h, 在广西东部、整个广东和福建西部产生严重风灾, 10 个国家级观测站测到 30 m/s 以上强阵风, 其中福建永春国家级观测站测到 40 m/s 强阵风。此次飑线过程是 21 世纪中国发生的最强飑线之一。飑线前沿阵风锋与飑线回波主体前沿紧贴着, 分辨不出对应阵风锋的窄带回波, 阵风锋位置对应径向速度最强辐合区。垂直剖面显示飑线前沿反射率因子具有明显回波悬垂和弱回波区结构, 径向速度呈现明显中层径向辐合; 而飑线发生环境对应不到 1000 J/kg 的对流有效位能和 28 m/s 非常强的 0—6 km 风矢量差, 飑线位于冷锋前暖区, 飑线主轴与冷锋几乎垂直。

王俊等(2007)利用山东滨州 SC 和济南(齐河) SA 型新一代天气雷达的径向速度进行双雷达速度场反演, 对 2004 年 6 月 21—22 日发生在山东的一次强飑线过程的飑线内部和外围风场结构进行了分析, 虽然风场反演精度受到较大限制, 但仍然揭示出飑线北端气旋式涡旋、南端反气旋式涡旋以及飑线中部窄的强对流带前沿东南风和偏西风之间的强辐合区。庄薇等(2010)利用新疆乌鲁木齐和五家渠两部 CC 型新一代多普勒天气雷达反演风场分析了 2005 年 6 月 26 日发生在新疆北部的一次强飑线结构, 结果表明, 该飑线流场特征是低层存在明显的辐合线, 中层辐合, 高层辐散, 中低层的风场辐合使旧回波右侧(西南侧)一定距离处依次生成新回波并与旧回波合并, 对流单体间的中低层辐合促使其迅速合并, 导致飑线发展。潘玉洁等(2012)利用相距 84 km 的广州和深圳 SA 型新一代天气雷达双雷达风场反演结果对 2007 年 4 月 23—24 日广东强飑线过程进行了分析, 指出该飑线气流特征呈准二维结构, 包括系统前方深厚的从前向后的气流和系统后部低层的从后向前气流, 这两支气流在系统前缘低层辐合形成动力高压扰动, 触发新对流单体, 是系统长时间维持的主要机制。

王晓芳等(2010)采用 WRF 三重嵌套模式(最小格距 3 km)对发生在湖北的一次飑线过程进行了

数值模拟, 结果表明, 在飑线前方是强而窄的上升气流, 后方中层偏上是一支宽广的从前向后(由南往北)的倾斜上升气流, 下方是一支由后向前的(由北向南)的倾斜下沉气流; 飑线低空有两支入流: 前方偏南气流和后方下沉入流。陈明轩等(2012)利用三维数值云模式和雷达资料四维变分同化技术, 深入分析了 2009 年 7 月 20 日发生在华北地区的一次飑线过程的低层动力和热动力影响机制。结果表明, 这次飑线过程处在低层中等强度风垂直切变的环境条件下, 低层环境风垂直切变和冷池相互作用是本次飑线过程维持发展和传播的关键机制。孙建华等(2014)进行水汽含量对飑线组织结构和强度影响的数值试验后表明环境场中不同的水汽含量和垂直分布会影响下沉气流和冷池的强度从而影响对流的组织形态、维持时间和强度。

陶岚等(2014)分析了 2012 年 7 月 13—14 日夜间发生在长江三角洲地区的弓形回波雷暴大风过程, 发现在整层湿度较大的环境中, 来自对流系统南侧的中高层干暖气流的卷入加强了雷暴中降水的蒸发冷却作用, 导致雷暴中下沉运动明显增强, 是产生直线大风的关键因素。盛杰等(2019)对发生在 2018 年 3 月初影响广西、湖南、江西、福建和浙江的大范围飑线过程进行了分析, 此次飑线是自 2005 年 3 月 22 日华南强飑线之后最强的一次飑线过程, 飑线在经过江西时强度最强, 最强瞬时风速超过 37 m/s(庐山站)。该文总结此次飑线过程的特点与大风成因是: (1)受平流和前向传播共同作用, 飑线移动速度很快(100 km/h); (2)飑锋(阵风锋)后雷暴高压强, 与锋前暖低压形成强水平气压梯度有利于风的加速, 因而有利于产生大范围直线型大风; (3)通过对比镶嵌在飑线内的弓形回波南北段回波结构差异表明, 飑线后侧中层干冷空气入流促使降水粒子蒸发导致剧烈降温形成强下沉气流、结合后侧干冷空气入流伴随的动量下传是导致极端大风的主要原因。

Meng 等(2012)利用 2007—2009 年全国雷达拼图对中国台风前飑线进行了统计分析, 发现: (1)大多数台风前飑线形成方式属于断线(broken line)方式; (2)台前飑线通常位于台风移动方向的右前象限, 到台风中心的平均距离为 600 km, 飑线最大长度 220 km, 最大反射率因子 57—62 dBz, 平均生命史 4 h, 平均移动速度 12.5 m/s; (3)相比于中纬度

西风带飏线, 台前飏线的生命史和长度都更短。基于2008—2009年的全国雷达拼图, Meng等(2013)对中国东部飏线进行了统计分析, 结果表明: (1) 飏线最频繁地出现在山东、河南、安徽和江苏四省交界处附近, 其中7月发生最多; (2) 飏线以西南—东北走向最多, 最大长度243 km, 多数向东移动, 平均移速14.4 m/s, 平均生命史4.7 h; (3) 飏线形成方式以断线方式为主, 形态以尾随层状云降水型为主; (4) 相对于美国飏线, 中国飏线形成在更高的湿度、大致相当的对流有效位能以及相对弱的风垂直切变环境下。郑媛媛等(2014)研究了东北冷涡背景下江淮飏线生成时的环境背景特征: (1) 存在明显的中尺度气旋式环流, 850、925 hPa和地面有辐合线或干线存在; (2) 对流层中低层温度直减率大, 具有显著条件不稳定; (3) 风垂直切变强, 对流层低层风随高度强烈顺转, 400—500 hPa有西风急流存在。

3.3 中尺度对流系统

Browning(1977)基于天气雷达回波特征将对流风暴分为单体风暴、多单体风暴、超级单体风暴和多单体线状风暴(其中一部分为飏线), 被业界广泛接受。而中尺度对流系统最初是从窗区红外云图定义的。Maddox(1980)根据红外云图上低亮温区域的大小和形态定义了中尺度对流复合体(MCC)。Zipser(1982)将红外云图上观测到的对流系统统称为“中尺度对流系统”, 其要求是起源于对流, 且某一方向的尺度超过100 km。Houze等(1989)根据中尺度对流系统的雷达回波特征, 将其结构分为两大类: 线性结构和非线性结构。3.2节涉及的飏线可以看作是线性中尺度对流系统的一个子集, 只是由于飏线对于强对流天气的极端重要性, 从而专门设立了一节阐述飏线。在本小节, 将从更大视角阐述中尺度对流系统。

根据尺度划分标准, 基于静止气象卫星窗区红外通道观测的中尺度对流系统通常可划分为 α 中尺度对流系统(M_α CS)和 β 中尺度对流系统(M_β CS); 而由于中尺度对流系统还具有不同形状, 因此又把 M_α CS划分为中尺度对流复合体(Maddox, 1980)和持久的细长对流系统(Persistent Elongated Convective Systems, PECS)(Anderson, et al, 1998); 把 M_β CS划分为 M_β CCS和 M_β ECS(Jirak, et al, 2003; 方宗义等, 2006)。

中国的气象卫星资料研究与应用始于20世纪

70年代(陶诗言等, 1979, 1983; 方宗义等, 2004, 2006), 80年代开始应用地球静止气象卫星资料(方宗义等, 2004), 该资料较其他类型卫星资料更常用于中尺度对流系统的研究, 因为其具有很高的时间分辨率和地理分布稳定性, 能够形象地反映大气中的大尺度和中尺度气象过程(陶诗言等, 1979; 方宗义等, 2006)。当时已认识到镶嵌在锋面云带内的中尺度对流系统是产生暴雨和强对流天气的直接天气系统, 给出了其动力学和热力学结构及其最有利于中尺度暴雨云团发展的高、低层天气尺度系统的配置等(Fang, 1985; 李玉兰等, 1993; 江吉喜等, 1998)。张庆红等(2000)应用高分辨率中尺度数值模式成功模拟了一个华南准静止锋面上的中尺度对流系统, 给出了其概念模型, 展示了由于其中的潜热释放而形成的中尺度低空急流、中尺度高空急流和上升气流的关系。

识别中尺度对流系统的通常方法是使用窗区红外通道亮温阈值, 虽然并没有一个确定的阈值标准, 但大多数研究的识别阈值在 -32 — -52 °C, 比如Maddox(1980)。Zheng等(2008, 2013)、束宇等(2010)主要依据红外亮温不高于 -52 °C来识别强对流云, 获得了较多气候分布特征的新认识。有部分研究使用分裂窗通道亮温差阈值(Inoue, et al, 2006; 陈国春等, 2011)和温度梯度阈值(卢乃锰等, 1997)等来识别对流云或者中尺度对流系统。卫星观测的中尺度对流系统传播特征可以归纳为连续传播和跳跃性传播两类, 其中又都有向前和向后传播(方宗义等, 2006), 其移动方向大体与大气低层平均气流方向相近(项续康等, 1995), 大多偏向平均风的右侧, 也有少数个例偏向平均风左侧, 如2005年6月10日发生在黑龙江的一次中尺度对流系统(寿亦萱等, 2007)。

多通道观测和高分辨率的可见光观测能够提供中尺度对流系统的更多细节特征。利用多通道观测亮温及其时间变化识别对流初生阶段的积云对流状态; 对流成熟阶段的纹理特征、上冲云顶特征和微物理特征等。部分个例研究(郑永光等, 2018; 公衍铎等, 2019; 盛杰等, 2019)发现, 高分辨率可见光云图揭示的中尺度对流系统云顶不仅纹理粗糙和具有上冲云顶特征, 而且通过动画发现其具有一定的旋转和波动特征。

仅仅利用红外云图很难解释中尺度对流系统

的发展和组织结构特征,因此,已有研究大量综合应用多种资料信息来分析揭示中尺度对流系统的这些特征:如 Qin 等(2004)利用多种卫星资料综合揭示了一次暴雨过程的多尺度特征及中尺度暴雨云团的活动与演变;寿亦萱等(2007)应用多普勒雷达和卫星资料分析了2005年6月10日黑龙江省沙兰河上游暴雨中尺度对流系统结构和演变特征,发现雷达探测的强对流更多发生在亮温梯度大值区;而部分个例研究(郑永光等,2018;公衍铎等,2019;罗琪等,2019)发现,强对流有时主要分布于低亮温和以正闪为主的闪电活跃处。王晓芳等(2012)基于云图和新一代天气雷达(尤其是后者)统计分析长江中下游地区梅雨期中尺度对流系统的类型和活动特征发现,线状中尺度对流系统发生频率比非线状的略高,有8种典型的线状中尺度对流系统:尾随层状云降水型、准静止后向建立型、邻接层状单项发展型、前导层状降水型、平行层状降水型、断裂线状型、镶嵌线状型(EL)、长带层状云降水型(LL);其中EL型和LL型是长江中下游地区梅雨期特有的两类线状中尺度对流系统。吴芳芳等(2019)分析了2006年7月3日晚苏北的一个中尺度对流复合体的多尺度结构,发现:成熟阶段的中尺度对流复合体云系尺度约为1000 km;天气雷达观测则显示主要是一条150—200 km的活跃弓形飑线,伴随尺度在60 km左右的“中尺度对流涡旋(MCV)”,地面存在有 β 中尺度冷池和阵风锋,弓形飑线前侧出现多个尺度在4—5 km的 γ 中尺度涡旋。

静止气象卫星观测难以像雷达观测那样给出直接的强降水、雷暴大风、冰雹等强对流天气的识别特征,但卢乃锰等(1997)分析表明,云顶温度、温度梯度、云团的膨胀、穿透性云顶的存在等与降水强度有明显的对应关系,不过在不同的地区,这种对应关系有所不同。统计分析发现,在监测和预报雷暴大风和冰雹天气时,需要利用静止气象卫星云图特别关注快速发展的中尺度对流系统、长椭圆形中尺度对流系统的右侧和其右侧的孤立对流云团,尤其是窗区红外温度低负值区和高梯度区、窗区红外和水汽通道亮温差值大值区及大梯度区均配合的区域等(方翀等,2014;蓝渝等,2014)。

20世纪80年代末以来,使用 -32°C 或者 -52°C 窗区红外亮温作为中尺度对流系统的识别阈值,对中国及周边地区获得了较多的中尺度对流系统普

查工作成果,例如中国南方(李玉兰等,1989;江吉喜等,1990;项续康等,1995)、青藏高原(江吉喜等,1996;杨本相等,2005;李博等,2018)、黄海及周边地区(Zheng, et al, 1999)、云南及周边地区(段旭等,2004)等。Ma 等(1997)对1993—1995年夏季中国及邻近区域的椭圆率为0.5以上的 $M_{\alpha}\text{CS}$ 与 1.5° 纬度以上尺度的 $M_{\beta}\text{CS}$ 进行了普查分析,获得了234个 $M_{\alpha}\text{CS}$ 和585个 $M_{\beta}\text{CS}$,发现西南和华南、黄河和长江中下游地区是 $M_{\alpha}\text{CS}$ 和 $M_{\beta}\text{CS}$ 的多发区。Zheng 等(2008)则利用10 a夏季静止卫星窗区红外资料使用 -52°C 红外亮温阈值较全面地获得中国及周边地区MCS的分布特征;总体上MCS活跃区呈现为3条东西向带状分布;3条MCS活跃带由东亚夏季风相互连结。Yang 等(2015)利用8 a 5—8月FY-2卫星观测资料进一步分析了不同类型MCS的气候分布特征;除了把MCS划分为MCC、PECS、 $M_{\beta}\text{CCS}$ 和 $M_{\beta}\text{ECS}$ 之外,还增加了 $\text{SM}_{\beta}\text{CCS}$ (较小的 β 中尺度圆形MCS)和 $\text{SM}_{\beta}\text{ECS}$ (较小的 β 中尺度长条形MCS)类型;发现中国80%的MCS为长条形。Ma 等(1997)发现中国 $M_{\alpha}\text{CS}$ 的生命史存在两种明显不同的日变化类型:一类发生在午后,傍晚时成熟,入夜后消散;另一类在上半夜形成,凌晨达到最大,然后迅速消散。Zheng 等(2008)则对不同地区的MCS不同的日变化特征进行分析表明,不同地区MCS的日变化有所不同。MCS的日变化特征可区分为单峰型与多峰型,单峰型MCS多发生在山区,多峰型MCS多发生于平原与盆地。四川盆地MCS夜发性特征显著;两广地区海陆交界处MCS具有午后向陆地传播、入夜后向海洋传播的特征,且具有持续时间长、日变化较不显著的海岸线深对流活动特征(Zheng, et al, 2013)。但不同类型资料揭示的对流日变化特征存在差异。

4 强对流天气和预报

4.1 强冰雹

葛润生(1966)对1964年北京的12次降雹过程进行了总结和分析,主要结论是:(1)雹暴有时排列成行,走向通常与冷锋成 60° — 90° 角,不像以降雨为主的雨带一般平行于冷锋;(2)相对于一般没有冰雹的雷阵雨,多次冰雹的平均反射率因子垂直廓线呈现出更强的回波强度,且强回波的高度较高;(3)强的冰雹过程中,RHI回波图表现出明显的

回波悬垂和弱回波区(WER)结构。王昂生等(1978)指出产生强冰雹的对流风暴类型有超级单体风暴、多单体风暴和脉冲风暴(原文中称为“对称雹云”)等几种。杨培才等(1980)指出:(1)华北地区经常遇到的雹云回波系统主要有5类,即南移型飏线回波带、东移型飏线回波带、气团型回波群、超级单体和复合单体;(2)几种雹云回波的典型形态包括条状回波、钩状回波和指状回波。龚乃虎等(1980)总结甘肃平凉地区雹云回波移动特征发现,大多数雹云从西北向东南移动,占65%;一部分自北向南移动,占19%;还有一部分自西向东移动,占6%;极少数逆高空风移动或停滞少动,占5%。他们还发现,36 dBz以上的较强回波扩展到6 km(离地高度)以上以及反射率因子随高度分布在中层有较大值是判别冰雹云的较好指标。马振骅等(1980)指出作为冰雹云主要特征指标之一的指状回波的形成有两种不同过程。雷雨顺(1983)根据700和850 hPa温度是否分别小于3℃和12℃将降雹分为冷性降雹和暖性降雹,冷性降雹只占19%,主要发生在2月,春或秋季也有少数,这种降雹绝大多数是霰或小冰雹。暖性降雹中强冰雹较多,雹块直径常达2—3 cm,且大多伴随有雷暴大风。王昂生等(1983, 1985)指出有界弱回波区大的超级单体才会产生严重的雹灾。徐阳春(1991)根据回波顶高、强回波顶高、负温区厚度和回波外形4个因子结合起来识别冰雹云和非冰雹云,获得较好结果。葛润生等(1998)利用中国气象科学研究院C波段多普勒天气雷达资料给出了1995年6月22日北京一次强烈雹暴内流场的大致结构。张鸿发等(2002)利用甘肃平凉25 a(1974—1998年)的地面冰雹目击资料和711型天气雷达观测资料发现:(1)平凉冰雹云回波顶高(地面以上高度)普遍超过9.7 km,30 dBz反射率因子所扩展到的高度是区别强和弱降雹云的有用参数;(2)平凉冰雹云的最大反射率因子区主要出现在5—6 km高度上,该高度层的回波强度约是0℃层回波值的2倍。

俞小鼎等(2005)指出45或50 dBz的回波垂直扩展到-20℃等温线对应的高度之上,回波悬垂与弱回波区、有界弱回波区、垂直累积液态含水量(VIL)或VIL密度的异常大值、三体散射以及强烈风暴顶辐散是多普勒天气雷达预警强冰雹的主要指标。廖玉芳等(2007a)基于常德SB型新一代天

气雷达观测对2002年5月14日湖南北部系列强对流天气进行了分析,在中国首次观测到反映大冰雹的三体散射回波特征。廖玉芳等(2007c)对中国各地11次强对流事件中23个产生S波段新一代天气雷达三体散射的对流风暴进行了统计分析发现:(1)出现三体散射现象的对流风暴其反射率因子核心强度都在60 dBz以上;(2)三体散射长钉(TBSS)的长度与强反射率因子核心区域的体积和最大强度成正相关;(3)在出现三体散射长钉的情况下,地面都观测到直径2 cm以上冰雹。刁秀广等(2008)指出垂直累积液态含水量和其密度对于冰雹特别是强冰雹的识别具有很好指示意义,VIL值出现跃增也可以作为判别强冰雹的指标。胡胜等(2015)选取广东省12个直径2 cm以上大冰雹风暴单体为样本,分析了大冰雹的雷达回波特征,结果显示:(1)大冰雹单体最大反射率因子都超过65 dBz,该强反射率因子扩展高度均超过5 km(地面以上高度);(2)都观测到了三体散射回波,并且该特征的识别具有一定的预警提前量;(3)-20℃等温线对应高度上的反射率因子均超过54 dBz。张文海等(2019)基于广东10部SA型新一代天气雷达资料,采用机器学习技术开发了冰雹识别算法,检验结果表明,这种新算法比传统的系列阈值识别方法的命中率(POD)高9%。

陈进强(1984)分析了1964—1979年的京津地区强冰雹天气的环境场和发生条件,强冰雹发生的时间多数开始于13—17时,终止于16—20时。当贝加尔湖至乌兰巴托之间出现冷涡中心(500 hPa)时,中高层的干冷西北气流与低层暖湿气流在京津地区交绥,形成条件不稳定层结,同时深层风垂直切变显著,京津地区的强冰雹发生在200 hPa极锋急流轴,500 hPa大风区以及850 hPa的西南急流交点附近的高温高湿区内。李江波等(2011)分析了1975—2008年19次华北(蒙古)冷涡导致的京津冀连续3 d以上降雹天气过程,结果表明:造成华北(蒙古)冷涡连续降雹的天气形势主要有4种:深厚冷涡型、浅薄冷涡型、阶梯槽与冷涡型以及横槽与冷涡型;冷涡导致的河北中北部降雹回波多为带状回波,降大冰雹的几率较低;而南部降雹则多为呈块状回波的多单体强风暴或超级单体风暴,降大冰雹几率较高。蓝渝等(2014)选取2010—2012年华北地区27次冰雹过程,按照大气环流背景、主要影

响系统和云系特征等将其划分为冷涡云系尾部型、低涡槽前型和偏北气流控制型共3种。曹艳察等(2018)分析了中国一级阶梯和二级阶梯区域(以海拔高度1 km为阈值)产生冰雹天气的环境条件,发现一级阶梯区域冰雹往往出现在具有更不稳定的层结构、更大不稳定能量(CAPE)、更多水汽含量以及更强的风垂直切变环境中。俞小鼎等(2020)总结了大量中国发生的强冰雹例子的环境背景和雷达回波特征,建议强冰雹的环境要素是对流有效位能、代表对流层深层风垂直切变的0—6 km风矢量差、以及冰雹融化层高度(湿球温度0℃层到地面的高度);强冰雹的多普勒天气雷达回波特征包括高悬的强回波(55 dBz的强回波垂直扩展到-20℃等温线对应的高度以上),任何位置出现65 dBz以上的强回波,垂直累积液态含水量的异常大值,高大的回波悬垂和弱回波区,超级单体有界弱回波区,三体散射以及强烈风暴顶辐散等。

Zhang等(2008)利用1961—2005年中国冰雹资料进行了气候统计分析,得出:(1)中国冰雹容易出现在山区和北方的平原地区,出现在中国北方的频率高于出现在南方的频率;(2)在中国北部和西部降雹通常晚春开始,早秋结束;在华南和西南,降雹往往从早春开始;(3)中国大部分地区降雹出现在15—20时。赵金涛等(2015)构建了中国大陆地区1950—2009年县域单元的冰雹灾害案例数据库,发现:(1)中国大陆雹灾空间分布呈现一带多区的特点,从东北至西南形成一个雹灾带;(2)1987年以前,年冰雹灾害发生的县次数总体上呈上升趋势,1987年之后呈下降趋势,20世纪70年代至90年代中期为雹灾高发期。

许焕斌等(1985, 1988, 1990)先后研发了一维冰雹云模式、二维冰雹云模式和三维对流云模式,并利用上述三维对流云模式探讨冰雹形成机制提出了冰雹增长的“穴道”理论(许焕斌等, 2001)。郭学良等(2001a, 2001b)研发了三维冰雹云冰雹分档模式,将冰雹分为21档5类。陈宝君等(2012)利用上述三维冰雹分档对流云模式结合三维粒子运行增长模式,对一次超级单体雹暴个例进行了数值模拟。实测风暴的结构如中气旋、弱回波区、回波悬垂等被很好地模拟再现,显示了模式对超级单体具有良好的模拟能力。模拟结果表明,雹胚在风暴发展阶段由过冷雨滴冻结产生,主要分布在主上升

气流区上部,在主上升气流区西北侧中高层也有相当数量的雹胚粒子,冰雹主要分布在主上升气流区东侧。

王洪等(2018)利用珠海与澳门共建的中国首部具有双线偏振功能的S波段多普勒天气雷达(SA-POL)探测资料分析了发生在珠海附近的一次典型华南春季超级单体雹暴,最大降雹2—3 cm。大冰雹区除了高反射率因子(60 dBz以上)外,两个偏振方向的反射率因子的相关系数较低(小于0.9),以及较低的差分反射率因子(Z_{DR})(-1.0到0.5 dB)。冯晋勤等(2018)利用位于厦门的中国第3部(第2部是位于上海的具有升级双线偏振功能的WSR-88D)具有双线偏振功能的S波段多普勒天气雷达探测资料对福建东南沿海的一次雹暴过程进行了分析,发现冰雹在下降过程中差分反射率因子和比差分相移(K_{DP})由负值转正值,表明冰雹下降过程中随着温度升高逐渐由干冰雹融化成大雨滴或外包水膜的冰雹。总体而言,双线偏振功能的引入使得新一代多普勒天气雷达对强冰雹以及冰雹状态(干冰雹、带有水膜的冰雹以及大量拥挤在一起的较小冰雹)的识别能力得到加强。

4.2 下击暴流和雷暴大风

下击暴流是指雷暴内的强下沉气流,该下沉气流在地面上导致8级以上强阵风,则该下沉气流下部和地面强辐散风合起来作为一个整体被称为“下击暴流”(Fujita, et al, 1977)。雷暴大风也叫雷雨天大风,是指由深厚湿对流(雷暴或对流风暴)在地面附近产生的非龙卷直线型强阵风。雷暴大风主要由雷暴(深厚湿对流)内强下沉气流伴随动量下传,以及下沉气流导致的地面附近冷池的扩散(冷池前沿为阵风锋)所致(Johns, et al, 1992; McNulty, 1995; Moller, 2001)。多数雷暴大风事件伴随有下击暴流的发生,是下击暴流的直接后果之一。3.2节所讨论的飚线和弓形回波就是导致雷暴大风的主要两种对流系统类型。

许焕斌等(1995)利用三维对流云模式(许焕斌等, 1990)的二维版本模拟了发生在美国的一次下击暴流过程,分别利用敏感试验讨论了降水强度、降水粒子相态和大小、环境风垂直切变和湿度对湿微下击暴流的影响。刘洪恩(2001)利用北京市气象局C波段多普勒天气雷达(类似于后来的CC型新一代天气雷达)探测资料分析了1997年7月22日北京地区的一个湿微下击暴流的多普勒速度

场结构,识别出明显的2—3 km尺度低层强辐散特征。这是在中国利用多普勒天气雷达首次探测到下击暴流的低层强辐散场。他进一步利用许焕斌等(1995)采用的同样模式模拟此次下击暴流过程,得到的结论与许焕斌等(1995)利用美国下击暴流个例的模拟结果不同,他的模拟结果表明降水拖曳力是此次下击暴流的主要驱动力,而许焕斌等(1995)模拟美国下击暴流个例的结论是降水蒸发冷却对下击暴流强度的贡献远大于降水拖曳。

俞小鼎等(2006b)对2003年6月6日下午发生在安徽定远和合肥的系列下击暴流事件进行了细致深入的分析。该下击暴流事件发生在大的对流有效位能(3200 J/kg)和中等偏上的0—6 km风垂直切变(0—6 km风矢量差为16 m/s)环境下,700—400 hPa的对流层中层存在明显干层。系列下击暴流由一个几乎停滞的多单体强风暴产生,合肥SA型多普勒天气雷达观测到相继3个对流单体反射率因子核心下降和伴随气旋式旋转的显著中层径向辐合(MARC)特征,3个系列下击暴流相继产生,低层呈现明显的尺度为4—10 km的径向速度辐散,持续时间超过40 min,导致地面强阵风,伴随3—4 cm直径的冰雹和强降水。陶岚等(2011)基于反射率因子核心下降以及低层小尺度径向速度辐散特征研发了基于多普勒天气雷达观测的下击暴流探测算法,测试结果效果较好。通过对1998—2007年北京地区134个雷暴大风事件的普查,廖晓农等(2009)发现,北京地区绝大多数雷暴大风的环境背景都具有对流层中层存在明显干层的特征,但是也有少数个例产生于偏南暖湿气流中,对流层中层不存在明显干层。

2009年6月3日傍晚至夜间,起源于河南黄河北岸的强单体移过黄河迅速发展为一个超级单体风暴,并带有长长的阵风锋。随着时间推移该强对流风暴又进一步演化为弓形回波飑线,在河南商丘和安徽产生较大范围雷暴大风,最强阵风超过30 m/s,导致32人死亡。分析当天08时常规高空和地面观测,无论是从流型配置还是关键环境参数,很难判断出傍晚将会出现如此强烈的对流。不少学者对这次过程进行了分析和研究(孙虎林等,2011;王秀明等,2012, 2013;梁建宇等,2012;刘香娥等,

2012;金龙等,2013)。王秀明等(2012)的分析结果表明:(1)此次区域性雷暴大风事件的演变过程可以分为超级单体阶段和弓形回波飑线阶段;(2)此次对流风暴系统由山西的雷暴群下沉气流导致的阵风锋移动到水汽相对充沛处触发,在傍晚有利的环境下迅速发展成具有较强中层径向辐合的超级单体风暴,多个超级单体的强下沉气流导致的冷池合并产生了超级单体阶段的地面大风;(3)根据径向速度增幅估计,风暴强下沉气流辐散、强冷池密度流和层状云部分降水粒子蒸发对弓形回波飑线阶段地面大风的增幅作用几乎相当,冷池合并是上述强对流系统在商丘地区产生极端雷暴大风的重要原因。梁建宇等(2012)通过分析此次过程的数值模拟结果,特别强调了后侧中层干冷空气入流对此次区域雷暴大风过程的重要贡献。刘香娥等(2012)通过数值模拟指出降雨的蒸发冷却对此次极端雷暴大风过程中强冷池的形成起到关键作用。王秀明等(2013)通过数值模拟进一步指出,此次区域雷暴大风过程,0—6 km的深层风垂直切变较弱,但925—700 hPa风垂直切变较强,在这种风垂直切变配置下,低层水汽成为风暴结构的重要影响因子,在中高湿度环境下形成高度组织化的飑线,低湿度环境下形成组织程度差一些的脉冲风暴。这与孙建华等(2014)的研究结果有类似之处。

2015年6月1日晚,长江游轮“东方之星”于湖北监利附近在大雨中倾覆,导致船上游客442人遇难。当时怀疑游轮遭遇龙卷或者下击暴流袭击。中国气象局成立由减灾司、预报司、国家气象中心、中国气象科学研究院、湖北省气象局、南京大学、北京大学组成的联合调查组。调查组首先设立灾害调查小组对“东方之星”倾覆地区周边进行了灾情调查,郑永光等(2016a)总结了此次调查的结果:对卫星和雷达观测资料以及事发周边陆地区域的现场天气调查结果分析表明,6月1日21时—21时40分事发江段和周边区域发生了下击暴流和可能龙卷导致的强风灾害,最强风力超过12级,具有空间分布不连续、多尺度和强灾害时空尺度小等特征。联合调查组中的雷达分析组^①在给中国气象局的报告中指出,此次“东方之星”倾覆事件是由一次弓形回波产生的微下击暴流导致;根据雷达径

^① 赵坤,薛明,俞小鼎等. 2015. “东方之星”倾覆事故原因雷达分析组报告. 中国气象局, 11pp

向速度结合下击暴流概念模型估计,当时“东方之星”倾覆前所在位置和游轮主体高度处所遭受的由上述微下击暴流导致的强阵风在 35 m/s 以上。

王福侠等(2016)对 2006—2008 年河北省中南部地区雷暴大风的 SA 型天气雷达回波特征统计分析表明:(1)产生雷暴大风的主要回波类型为弓形回波、带状回波和孤立块状回波,其中带状回波(包括不含弓形回波的飚线)占 67%,弓形回波占 20%,孤立块状回波占 13%;(2)雷暴大风的主要雷达回波特征是弓形回波、低层径向速度大值区和阵风锋回波,其中低层径向速度大值区是雷暴大风的主要回波特征;(3)大约 34% 产生雷暴大风的对流风暴由于不具有低层径向速度大值区或弓形回波或阵风锋等特征而无法预警。杨璐等(2018)选取 2010—2014 年发生在北京地区的 19 个致灾雷暴大风天气过程,分析发现依据径向速度大值区能对 78% 的带状回波和全部的弓形回波造成的雷暴大风天气提前发布预警,而其中有 67% 可提前 30 min。俞小鼎等(2020)建议,除了低层绝对值 20 m/s 以上的径向速度大值区、弓形回波、显著中层径向速度辐合以及移动速度超过 15 m/s 的阵风锋,对于孤立的块状回波,如果其移动速度较快,也可以考虑雷暴大风预警,其移动速度的预警阈值需要根据当地大量个例的雷达回波统计来确定。郭英莲等(2019)对湖北省 3 类不同组织形态的中尺度对流系统(线性 MCS、非线性 MCS 和孤立对流风暴)造成的地面强风(极大风速 ≥ 17 m/s)的时空分布、移动与传播、对流环境特征等方面进行了统计对比分析,结果表明:(1)非线性 MCS 和孤立对流风暴是造成湖北省地面大风的主导系统,其中,非线性 MCS 造成的地面大风站次数占强对流大风站次总数的 41.9%,而 39.3% 的地面强对流大风站次是由孤立对流风暴造成的;(2)虽然大于 17 m/s 的地面入流大风个例的比例很小,但存在地面入流大风的强对流系统的影响范围、持续时间均远大于同一类型对流系统的平均值。

费海燕等(2016)对中国 25 m/s 以上强雷暴大风的气候特征和环境参数进行统计分析研究表明:(1)强雷暴大风高频区位于中国中东部地区,强雷暴大风从 3 月开始在华南和江南地区出现,4 月进入华中、华东地区,5 月北进到华北、东北和西北地区;(2)中国强雷暴大风的中低层风垂直切变中等,

明显低于美国大范围雷暴大风事件 Derecho 对应的环境风垂直切变的均值;(3)对流层中层存在明显的干层。Yang 等(2017)利用 2010—2014 年雷暴大风资料分析了中国 17 m/s 以上雷暴大风事件的时、空分布特征,表明雷暴大风事件主要发生在暖季中国东部;春季,广东出现雷暴大风频率最高,而夏季,中国北方和广东出现雷暴大风的频率都比较高。马淑萍等(2019)选取中国大陆 2002—2017 年 95 个产生 30 m/s 以上强阵风的极端雷暴大风个例和同样数量的普通雷暴个例作对比分析,以突出极端雷暴大风事件的关键环境参数特征。

4.3 龙卷

龙卷是对流云产生的破坏力极大的小尺度灾害性天气,最强龙卷的地面极大阵风风速介于 125—140 m/s(Davies-Jones, et al, 2001)。通常将龙卷分为两大类型(Johns, et al, 1992; Davies-Jones, et al, 2001; Moller, 2001):中气旋龙卷(超级单体龙卷)和非中气旋龙卷(非超级单体龙卷)。中气旋龙卷,龙卷产生在超级单体中气旋内部,大部分 EF2 或以上级龙卷是由超级单体风暴产生的;非中气旋龙卷,龙卷不是发生在中气旋内部,产生龙卷的深厚湿对流系统也通常不是超级单体。非中气旋龙卷可以进一步分为两类:(1)非中气旋龙卷出现在飚线或者弓形回波前部的 γ 中尺度涡旋(又称为中涡旋)内,该 γ 中尺度涡旋形成机制与超级单体中气旋完全不同,它可以孕育龙卷,也可以引发强的直线型雷暴大风(Trapp, et al, 2003)。这类 γ 中尺度涡旋的大小与超级单体内的中气旋大致相当,在垂直伸展上通常比中气旋浅薄。这种在位于飚线和/或弓形回波前部的 γ 中尺度涡旋内形成的龙卷通常比在超级单体中气旋中形成的龙卷要弱,但其中强的也可以达到 EF2 级,个别的甚至可以达到 EF3 级。(2)非中气旋通常出现在地面辐合切变线上,这类辐合切变线上产生的瞬变涡旋遇到积雨云或浓积云中上升气流垂直拉伸涡度加强而形成龙卷(Wakimoto, et al, 1989)。这类龙卷通常较弱,绝大多数是 EF0 级的弱龙卷,个别的可以达到 EF1 级。中国龙卷发生频率虽远低于美国,但也时有发生(范雯杰等, 2015)。

沈树勤(1990)分析了 1962—1984 年在江苏境内产生的 11 个台风外围雨带上的龙卷过程,表明龙卷产生与台风所在位置和强度有关,并初步分析

了龙卷的形成条件。蒋汝庚(1997)对1995年4月19日发生在广东番禺洪奇沥镇的龙卷进行了分析,包括天气背景、气象卫星云图和常规天气雷达回波。从给出的雷达反射率因子回波结构判断,此次龙卷应该是由超级单体产生的。刘勇等(1998)对1983年9月4日发生在陕西中部咸阳附近的一次龙卷过程进行了高、低空环流配置和地面附近流场分析,常规天气雷达反射率因子回波显示,龙卷出现在爬线尾部的一个明显的弓形回波中,很可能属于上述非超级单体龙卷的第一类。

俞小鼎等(2006a)对2003年7月8日23时20分发生在安徽无为的一次EF3级龙卷的环境背景尤其是多普勒天气雷达回波特征进行了详细深入的分析。此次龙卷分析的最大特点在于使用了中国第一部业务运行的位于安徽合肥的多普勒天气雷达(SA型)探测资料。分析表明,此次龙卷的环境背景特点是对流有效位能(2800 J/kg)和0—6 km风垂直切变(24 m/s)都较大,有利于超级单体风暴的形成。此外,0—1 km的风矢量差为12 m/s,抬升凝结高度为650 m,有利于EF2或以上级龙卷的产生(Craven, et al, 2002; Evans, et al, 2002; Thompson, et al, 2003)。产生该强龙卷的对流系统最初是梅雨期间一条位于大片层状云降水区中的强对流雨带,逐渐演化成为一个团状的对流系统,而龙卷产生自该系统南端的一个超级单体。在龙卷进行过程中的23时29分,雷达0.5°仰角径向速度图像呈现出一个强辐合式中气旋包裹着一个更小尺度的龙卷式涡旋特征(TVS),与TVS对应的垂直涡度达 $5.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。俞小鼎等(2008)还利用徐州SA型多普勒天气雷达探测资料对2005年7月30日11时30分安徽灵璧发生的一次由强降水超级单体导致的EF3级龙卷过程进行了详细和深入分析。刘娟等(2009)对2007年7月3日下午发生在安徽天长到江苏高邮的一次EF3级龙卷过程进行了分析,着重分析在龙卷发生前和发生过程中中气旋的演变特征,相应的超级单体镶嵌在梅雨期的对流雨带中。郑媛媛等(2009)对发生在安徽的3次EF2级以上的超级单体龙卷过程的环境和多普勒天气雷达回波特征进行了总结,并与超级单体强烈雹暴的环境和多普勒天气雷达回波特征做了对比分析。Meng等(2014)对2012年7月21日下午北京特大暴雨期间发生在通州区张家湾的超级单

体龙卷进行了灾情调查、环境条件和雷达回波特征分析。此次灾情调查依据美国改进的Fujita级别EF级(WSEC, 2006),是中国第一次比较规范的龙卷灾情调查。郑媛媛等(2015)对热带气旋外围雨带龙卷的环境背景和雷达回波特征进行了分析和总结。

范雯杰等(2015)根据《中国气象灾害大典》《中国气象灾害年鉴》以及其他资料,对1961—2010年中国EF2或以上级龙卷以及2004—2013年EF1或以上级龙卷的时、空分布特征进行了统计分析,部分结果表明:(1)1961—2010年共记录到165次强龙卷,含EF2级145次、EF3级16次、EF4级4次,年均3.3次;(2)2004—2013年共记录到143次EF1或以上级龙卷,其中EF1级121次、EF2级19次、EF3级3次,年均EF1或以上级龙卷14.3次;(3)龙卷主要发生在中国东部和部分中部平坦地区,包括江淮地区、两湖平原、华南地区、东北地区和华北地区东南部等,其中江苏尤其是江苏北部是中国龙卷最多发的地区。吴芳芳等(2013)对2005—2009年苏北地区超级单体的环境背景、雷达回波特征和产生的强对流天气进行了统计分析,其中一条结论是,上述5年间在苏北地区共有72个超级单体发生,共发生超级单体龙卷事件11起,苏北地区超级单体(中气旋)产生龙卷的概率是15.3%。由于样本不够多,上述结果是非常粗略的。

2015年10月4日彩虹台风登陆广东西部沿海,其外围雨带上微型超级单体产生的龙卷在当日15时28分—16时袭击了广东省佛山市,造成严重灾害,导致4人死亡,80余人受伤,是一次EF3级强龙卷。这次龙卷被拍摄到当时为止最完整和清晰的视频(相对于中国而言),中国气象局、南京大学大气科学学院、北京大学物理学院大气与海洋科学系以及佛山龙卷中心都派人参与了详细的灾情调查。李兆慧等(2017)对这次台风龙卷的路径、定级以及广州SA型多普勒天气雷达的回波特征进行了分析。Zhao等(2017)和Bai等(2017)都对此次强台风龙卷的灾情调查、环境背景和产生龙卷的中气旋的结构特征进行了阐述、分析和讨论。Zhao等(2017)着重讨论了导致龙卷的微型超级单体中气旋的结构和演变,并与美国飓风外围雨带上产生龙卷的微型超级单体中气旋结构进行对比。Bai等(2017)对此次龙卷的灾情调查有非常深入、清晰和

细致的分析,不漏掉任何重要细节,并将结论通过图片以非常直观和生动的形式表达出来;同时对环境背景和中气旋演变特征也有很清晰的分析。2016年6月23日14时20分—15时,一个庞大的超级单体中产生的剧烈龙卷袭击了江苏盐城市的阜宁县,导致重大人员伤亡和财产损失,98人死亡,846人受伤,大量基础设施被毁,并出现一定数量的飞射物,是40年来中国死人最多的一次龙卷。强龙卷还伴随着冰雹、直线型雷暴大风和强降水。大约在当天14时前后,江苏省气象台短时临近首席预报员给阜宁气象局打电话,要求他们发布龙卷警报^①,龙卷警报最终在14时39分发出,此时龙卷已经在进展中,但仍然是有效警报,因为此后龙卷还有20 min左右生命史。中国气象局(国家气象中心和中国气象科学研究院)、南京大学、北京大学、江苏省气象局以及广东佛山龙卷研究中心立即派出人员进行联合灾情调查,最终确定此次龙卷路径长34.5 km,路径平均宽度2 km左右,最宽处4.1 km,最强灾害等级EF4级(郑永光等,2016b; Xue, et al, 2016; Meng, et al, 2018)。张小玲等(2016)和郑永光等(2018)给出了此次强龙卷的环境背景、卫星云图和雷达回波特征等分析。Meng等(2018)对这次阜宁EF4级龙卷的环境背景、雷达回波特征、龙卷业务预警流程以及龙卷灾情调查进行了分析和讨论,指出龙卷最强盛时对应的低层中气旋的旋转速度为42 m/s,而中气旋中构成TVS的相邻速度对的速度差值达85 m/s。2019年7月3日17时17—47分,辽宁开原部分地区发生了罕见的EF4级强龙卷,龙卷路径长度约14 km(张涛等,2020),共造成7人死亡、190余人受伤;这是辽宁省第一次记录到EF4级龙卷事件,并有较全面的视频、目击和灾情调查记录;张涛等(2020)和郑永光等(2020)分别给出了该次龙卷的详细灾害调查和天气分析结果,郑永光等(2020)发现该超级单体龙卷风暴前期产生的降水改善了对流层低层相对湿度较低这一不利龙卷的环境条件,当风暴钩状回波部分移动到龙卷形成区域时产生了不太强的下沉气流和冷池,在其他有利条件的共同作用下,形成了该次开原强龙卷。

刁秀广等(2014)分析了2006—2012年发生在山东境内的5次非超级单体龙卷过程(6个龙卷)的

环境和龙卷母风暴的雷达回波特征,其中在2次非超级单体龙卷过程中,龙卷出现在飏线和/或弓形回波前沿。2016年6月5日下午发生在海南文昌的EF3级龙卷的形成过程被一部监视鱼塘的摄像机基本完整的记录下来,非常珍贵。王秀明等(2019)认为此次海南文昌龙卷属于非典型超级单体龙卷,或者更确切地说是一种混合型,既具有超级单体龙卷特征,也具有非超级单体龙卷特征。吴芳芳等(2019)在分析2006年7月3日傍晚到4日凌晨一个中尺度对流复合体的多尺度结构过程中发现该复合体的主要构成之一是一条飏线,沿着该飏线前沿形成多个尺度为4—5 km的 γ 中尺度涡旋,其中一部分 γ 中尺度涡旋产生了龙卷,包括4个EF2级和3个EF1级龙卷。黄先香等(2019)对2018年6月8日台风“艾云尼”螺旋雨带上不同微型超级单体分别产生的2个龙卷过程进行了分析,使用了广州SA雷达、佛山气象局X波段双偏振多普勒天气雷达探测资料,后者成功捕捉到佛山南海龙卷过程中的龙卷碎片特征(TDS)。

4.4 强对流天气预报

孙继松等(2014)和俞小鼎等(2020)都对强对流天气预报进行了清晰、详细和深入的阐述。强对流天气潜势预报方法主要分为两大类:流型辨识法(Miller, 1972; McNulty, 1995)和基于构成要素的预报方法(Doswell III, et al, 1996; Moller, 2001),又称配料法。两种预报方法具有很好的互补性,结合起来使用可以取得最好效果。目前,基于机器学习技术的预报方法也在持续发展中。孙继松等(2014)讨论的范围更广,涉及到强对流天气预报的方方面面,其中对潜势预报的阐述更为详细,对临近预报只做了简要介绍。对强对流天气潜势预报,孙继松等(2014)既使用了流型配置法,又使用了配料法,以及两种方法的结合。俞小鼎等(2020)非常详细和深入地阐述和讨论了强对流临近预报、预警问题,同时也给出了各类强对流天气的有利环境背景,为强对流潜势预报提供重要线索。

雷蕾等(2011)基于2007—2008年5—9月北京探空和天气实况,讨论了利用探空计算的关键环境参数对北京强对流天气进行分类预报的可能性。雷蕾等(2012)进一步做了基于北京市气象局

^① 蒋义芳,私人通信,2019。

WRF快速同化更新系统BJ-RUC的对流天气分类概率预报试验。该项研究在利用实况探空资料、微波辐射计和风廓线构建的特种探空资料对北京地区强对流天气条件进行判别,以及快速更新循环同化预报系统(BJ-RUC)探空资料可应用性分析的基础上,根据统计的强对流天气判别指标,计算模式格点上的强对流发生概率,并进一步针对冰雹(雷暴大风)和短时强降水天气下不同物理量的阈值范围,初步探索中尺度数值模式对强对流天气分类预报的可能性。曾明剑等(2015)针对雷暴大风、短时强降水、冰雹和龙卷等强对流天气短期预报,根据“邻(临)近”原则对江苏2001—2009年2—9月各类强对流天气进行时间和站点的匹配后,应用相对偏差模糊矩阵评价技术,对对流参数进行权重分配和逐次筛选,获得了既体现强对流与气候平均态间明显差异,又体现自身相对稳定的特征对流参数序列;再根据各特征对流参数的频谱分布分别获得其频率分布分段函数;然后基于中尺度数值模式预报,综合历史频率分布和权重分配,构建了江苏省分类强对流天气预报概率。Zhou等(2019)基于全球数值模式预报数据,利用深度卷积神经网络方法,分别构建了雷暴、短时强降水、冰雹和雷暴大风天气的预报模型,其预报产品已经成为中央气象台强对流天气业务预报重要参考。

5 中央气象台强对流天气业务进展

5.1 业务发展历史和成效

从20世纪80年代开始到该世纪末,中国气象业务部门随着天气雷达的布网陆续开展了强对流天气短时和临近预报业务。进入21世纪,随着中国新一代(多普勒)天气雷达网的建设,省级及以下气象业务部门强对流天气监测和临近预报、预警等业务更为完善;中央气象台从2005年开始尝试预报强对流天气,但2009年以前仅有雷暴和强对流天气(没有分类)潜势预报两类产品。

2009年3月,中央气象台成立强天气预报中心,是中国首个组建的专职强对流天气预报队伍,以带动全国的强对流天气预报业务和技术发展。自此,中央气象台逐步建立起了强对流天气监测、分析、预报、检验(郑永光等,2015;杨波等,2017;张小玲,2019)和灾害调查(郑永光等,2016a,2016b)等一系列完整的客观技术支撑、业务和流程,并对

气象部门内部和公众实时或者定时发布监测和预报产品。

基于多源观测资料,中央气象台通过因特网和业务内网实时发布不同类别、不同时间段的强对流天气分类监测产品(图1a);每年4—9月每日3次(06、11和18时)定时发布未来24h分类强对流(雷暴、冰雹、雷暴大风和短时强降水)落区和概率预报,1次(18时)发布未来48和72h的强对流落区预报;其他月份按照监测和预计的强对流天气情况来确定是否发布相应预报或者预警。图1b为2015年4月28日06时发布的当日08—12时强对流天气落区预报。2015年起,中央气象台开始在气象部门内部尝试发布未来3—6h的短时预报试验产品;2018年开始在中央气象台内部开展一周强对流天气展望预报。2013年,中央气象台开始发布强对流天气预警,分为蓝、黄、橙3个等级,其中2015年4月28日首次发布黄色预警(图1)。预警通常同短期预报一样定时发布,但2016年6月30日15时,中央气象台首次在非常规时段发布强对流天气黄色预警(公衍铎等,2019)。2010—2015年4—9月的中央气象台强对流天气预报产品检验结果(图2)(唐文苑等,2017)表明:强对流天气业务预报能力呈现明显上升趋势;在相同预报时段、预报时效条件下,雷暴、短时强降水、风雹的预报能力依次降低,其中风雹预报能力明显低于前两类,但系统性大范围的风雹天气预报能力较强,如2015年4月28日强风雹过程预报。近几年的强对流天气预报检验结果具有相同的趋势(Zhang, et al, 2020)。

5.2 客观支撑技术

中央气象台建立了较为完整的强对流天气监测、分析、预报和检验等客观技术支撑体系(郑永光等,2015;张小玲,2019)。基于常规地面观测、重要天气报、自动气象站、闪电、雷达和卫星等多源观测资料,应用模糊逻辑、聚类、卡尔曼滤波等技术,中央气象台自主研发了适用于强对流天气的自动气象站资料质量控制技术、强对流信息提取和统计技术、深对流云识别和追踪、基于闪电资料的雷暴单体识别和追踪等实时监测和外推预报技术,改进了TITAN算法(Han, et al, 2009;郑永光等,2010,2013,2015;周康辉等,2016),与相关省市气象部门等共同开发了SWAN系统(郑永光等,2010;

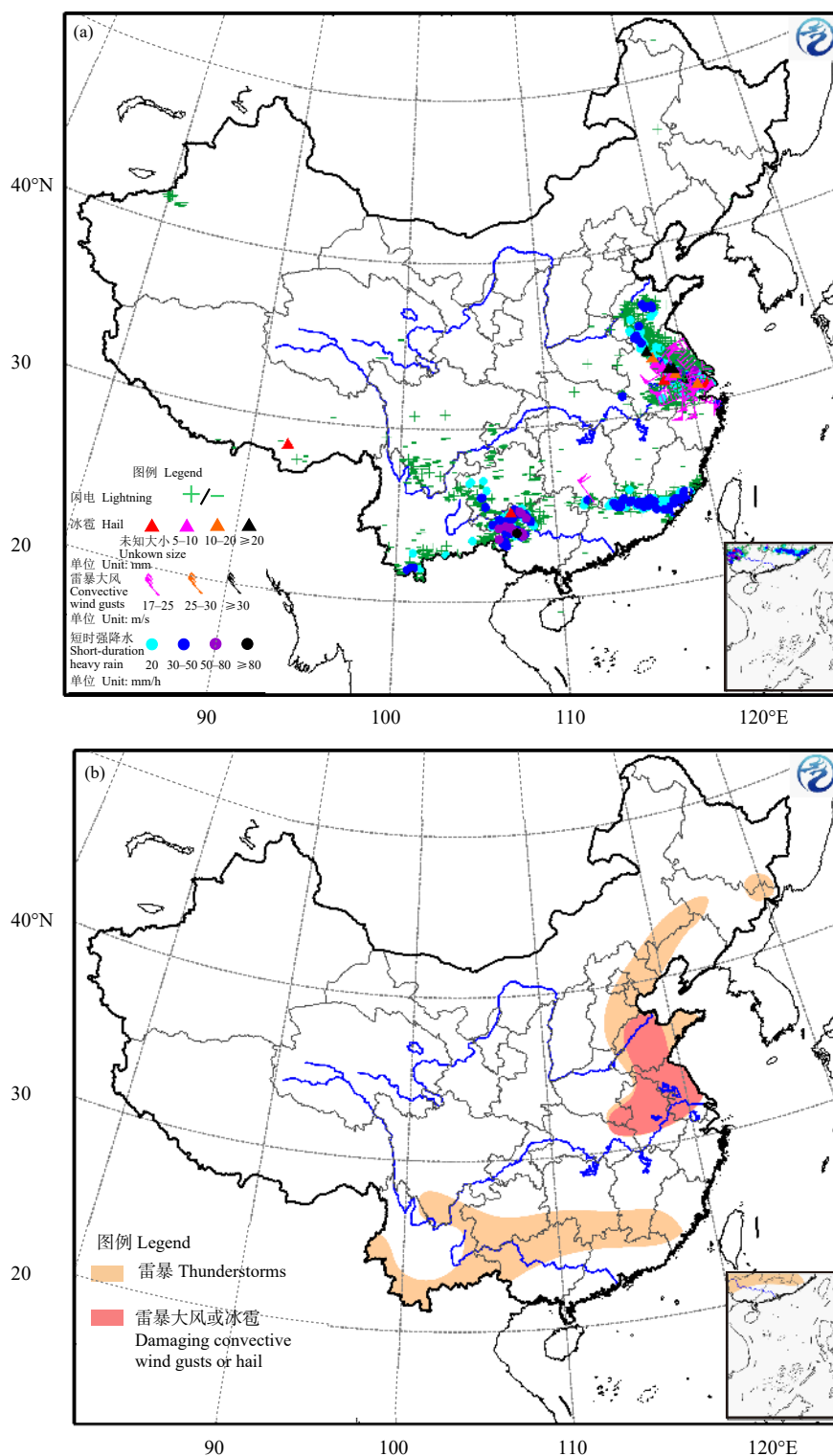


图 1 2015 年 4 月 28 日中央气象台强对流天气分类监测和预报产品

(a. 28 日 14 时—29 日 02 时 12 h 强对流天气监测, b. 28 日 06 时发布的当日 08—20 时雷暴与雷暴大风或冰雹预报)

Fig. 1 Monitoring and forecasting products of different types of severe convective weather issued by the National Meteorological Center of CMA on 28 April 2015 (a. 12 h severe convective weather monitoring for the period from 14:00 BT 28 to 02:00 BT 29 April, b. forecasts of thunderstorm and damaging convective wind gusts or hails for the day from 08:00 BT to 20:00 BT issued at 06:00 BT 28 April)

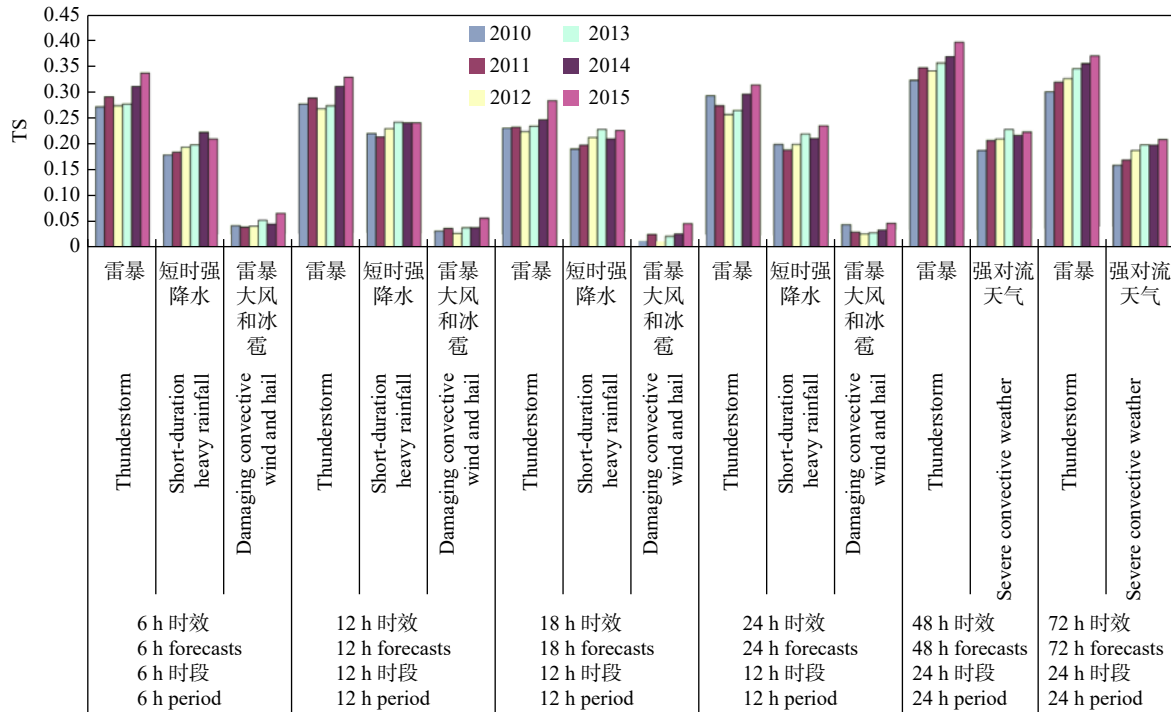


图2 2010—2015年强对流天气分类预报逐年TS评分(唐文苑等, 2017)

Fig. 2 Yearly threat scores (TS) of forecasts for classified severe convective weather during 2010—2015 (Tang, et al, 2017)

韩丰等, 2018)。中央气象台统计分析了短时强降水、冰雹和雷暴大风等不同类型强对流天气的特征物理量适用性和分布(Tian, et al, 2015; 曹艳察等, 2018; 公衍铎等, 2019; 罗琪等, 2019)以及卫星云图特征(蓝渝等, 2014; 方翀等, 2014)等, 在此基础上发展了在全国推广应用的《中尺度天气分析规范》, 包括天气尺度环境分析技术规范和中尺度过程分析技术规范(蓝渝等, 2013; 张涛等, 2013; 郑永光等, 2015); 并基于数值(集合)模式预报产品、应用配料法和深度学习(深度卷积神经网络)技术等分别构建了分类强对流客观概率预报技术(张小玲, 2019; Zhou, et al, 2019)。高分辨率区域数值模式预报产品及其释用技术是强对流天气短时预报业务的主要技术支撑(郑永光等, 2015); 虽然其仍存在较多不确定性, 但中央气象台以“多模式集成”“邻域概率法”和“时间滞后集合法”等方法初步建立高分辨率数值模式预报产品的释用技术(郑永光等, 2015; 杨波等, 2017; 唐文苑等, 2019)。中央气象台“强天气监测和分析综合业务平台”构建了强对流天气监测、分析、预报和检验等业务综合支撑体系, 包括数据分析处理系统、自动气象绘图系

统、WEB检索与显示系统, 是气象信息综合分析处理系统(MICAPS)的重要补充, 该平台通过中国气象局业务内网辐射各级天气预报业务部门(郑永光等, 2015; 杨波等, 2017; 张小玲, 2019)。

6 总结和展望

对中国当代强对流天气研究和业务的进展进行了综述。没有面面俱到, 主要从对流生成环境背景、强对流系统的主要组织形态(包括超级单体风暴、飚线和中尺度对流系统)以及对具体强对流天气(强冰雹、下击暴流和雷暴大风、龙卷)的有利环境条件、多普勒天气雷达回波特征和气象卫星云图特征诸方面进行重点阐述。最后还简要介绍了中央气象台强对流天气业务发展和现状。可以看到, 中国学者在强对流天气研究和业务应用方面确实做了大量工作, 与美国的差距在逐渐缩小。

取得的主要成就包括:(1)基于流型配置和配料法对中国强对流的生成环境做了较为系统的研究, 研究成果又为同样采用上述两种主要方法的强对流潜势预报方法奠定了基础;(2)对雷暴和强对流的抬升触发机制进行了一定程度的研究和探讨,

基本明确了冷锋、阵风锋以及其他类型边界层辐合线(如海风锋辐合线)在雷暴和强对流触发和演变中的重要作用;(3)对强对流的组织形态如超级单体风暴、飑线与弓形回波、以及中尺度对流系统进行了广泛、深入和细致的观测和分析;(4)基于美国学者前期研究成果,对强冰雹、雷暴大风和龙卷等强对流天气的主要基于多普勒天气雷达回波特征并紧密结合环境背景的临近预报、预警技术进行了研究、总结和广泛应用;(5)强对流天气业务预报能力显著提升。

同时需要指出,中国在强对流天气观测手段尤其是大型外场试验、强对流系统结构与演变,以及不同类型强对流天气形成机理研究方面与美国还存在一些差距。此外,由于中国与美国天气、气候背景的显著差异,龙卷研究和业务预报存在较显著差异。今后,在对流生成和演变机制、强对流组织形态以及不同类型强对流天气产生机理和分类强对流天气预报、预警技术等方面需要更加深入和细致的研究。在强对流天气业务方面,需要进一步推进高分辨率数值预报模式在强对流潜势和临近预报中的应用,尝试将基于循环神经网络的人工智能技术应用于强对流临近预报、预警,迫切需要建立高效率的强对流天气警报自动生成和发布平台,从预报员打算发布警报到用户接到警报的时间差不超过一定的时间阈值(这一时间阈值在美国国家气象局是3 min)。由于篇幅所限,文中对中国强对流天气研究和业务几十年来进展只是选择了几个方面进行重点阐述,不可能全面覆盖强对流研究和业务方面的完整内容和一些学者所做的贡献。

参考文献

- 蔡则怡,李鸿洲,李焕安. 1988. 华北飑线系统的结构与演变特征. *大气科学*, 12(2): 191-199. Cai Z Y, Li H Z, Li H A. 1988. Structure and evolution of squall line systems in North China. *Sci Atmos Sinica*, 12(2): 191-199 (in Chinese)
- 曹艳察,田付友,郑永光等. 2018. 中国两级阶梯地势区域冰雹天气的环境物理量统计特征. *高原气象*, 37(1): 185-196. Cao Y C, Tian F Y, Zheng Y G, et al. 2018. Statistical characteristics of environmental parameters for hail over the two-step terrains of China. *Plateau Meteor*, 37(1): 185-196 (in Chinese)
- 巢纪平,陈历舒. 1964. 风速垂直切变对于对流的发展和结构的影响. *气象学报*, 34(1): 94-102. Chao J P, Chen L S. 1964. On the effects of the vertical wind shear on the development and the structure of convection. *Acta Meteor Sinica*, 34(1): 94-102 (in Chinese)
- 陈宝君,郑凯琳,郭学良. 2012. 超级单体风暴中大冰雹增长机制的模拟研究. *气候与环境研究*, 17(6): 767-778. Chen B J, Zheng K L, Guo X L. 2012. Numerical investigation on the growth of large hail in a simulated supercell thunderstorm. *Climatic Environ Res*, 17(6): 767-778 (in Chinese)
- 陈国春,郑永光,肖天贵. 2011. 我国暖季深对流云分布与日变化特征分析. *气象*, 37(1): 75-84. Chen G C, Zheng Y G, Xiao T G. 2011. Distribution and spatiotemporal variations of deep convective clouds over China during the warm season. *Meteor Mon*, 37(1): 75-84 (in Chinese)
- 陈进强. 1984. 京津地区强冰雹环境场分析. *气象学报*, 42(3): 375-381. Chen J Q. 1984. Analysis of strong hail environment field in Beijing-Tianjin area. *Acta Meteor Sinica*, 42(3): 375-381 (in Chinese)
- 陈明轩,王迎春. 2012. 低层垂直风切变和冷池相互作用影响华北地区一次飑线过程发展维持的数值模拟. *气象学报*, 70(3): 371-386. Chen M X, Wang Y C. 2012. Numerical simulation study of interactional effects of the low-level vertical wind shear with the cold pool on a squall line evolution in North China. *Acta Meteor Sinica*, 70(3): 371-386 (in Chinese)
- 陈明轩,王迎春,肖现等. 2013. 北京“7.21”暴雨雨团的发生和传播机理. *气象学报*, 71(4): 569-592. Chen M X, Wang Y C, Xiao X, et al. 2013. Initiation and propagation mechanism for the Beijing extreme heavy rainstorm clusters on 21 July 2012. *Acta Meteor Sinica*, 71(4): 569-592 (in Chinese)
- 陈明轩,肖现,高峰. 2017. 出流边界对京津冀地区强对流局地新生及快速增强的动力效应. *大气科学*, 41(5): 897-917. Chen M X, Xiao X, Gao F. 2017. Dynamical effect of outflow boundary on localized initiation and rapid enhancement of severe convection over Beijing-Tianjin-Hebei region. *Chinese J Atmos Sci*, 41(5): 897-917 (in Chinese)
- 戴建华,陶岚,丁杨等. 2012. 一次罕见飑前强降水超级单体风暴特征分析. *气象学报*, 70(4): 609-627. Dai J H, Tao L, Ding Y, et al. 2012. Case analysis of a large hail-producing severe supercell ahead of a squall line. *Acta Meteor Sinica*, 70(4): 609-627 (in Chinese)
- 刁秀广,朱君莹,黄秀韶等. 2008. VIL 和 VIL 密度在冰雹云判据中的应用. *高原气象*, 27(5): 1131-1139. Diao X G, Zhu J J, Huang X S, et al. 2008. Application of VIL and VIL Density in warning criteria for hailstorm. *Plateau Meteor*, 27(5): 1131-1139 (in Chinese)
- 刁秀广,车军辉,李静等. 2009. 边界层辐合线在局地强风暴临近预警中的应用. *气象*, 35(2): 29-33. Diao X G, Che J H, Li J, et al. 2009. Application of boundary convergence line in nowcasting warning of severe convective storm. *Meteor Mon*, 35(2): 29-33 (in Chinese)
- 刁秀广,杨传凤,李静等. 2011. 济南地区超级单体强度和流场结构分析. *高原气象*, 30(2): 489-497. Diao X G, Yang C F, Li J, et al. 2011. Analyses on reflectivity and airflow structure for different types of supercell storm in Jinan region. *Plateau Meteor*, 30(2): 489-497 (in Chinese)
- 刁秀广,万明波,高留喜等. 2014. 非超级单体龙卷风暴多普勒天气雷达产

- 品特征及预警. *气象*, 40(6): 668-677. Diao X G, Wan M B, Gao L X, et al. 2014. Doppler radar product features and warning of non-supercell tornadic storms. *Meteor Mon*, 40(6): 668-677 (in Chinese)
- 丁一汇. 1978. 强对流天气的分析和预报. *气象*, 4(5): 15-17. Ding Y H. 1978. Analysis and forecast of severe convective weather. *Meteor Mon*, 4(5): 15-17 (in Chinese)
- 丁一汇, 章名立, 李鸿洲等. 1981. 暴雨和强对流天气发生条件的比较分析. *大气科学*, 5(4): 388-397. Ding Y H, Zhang M L, Li H Z, et al. 1981. A comparative study on the occurrence conditions of heavy rainfall and severe convective weather. *Sci Atmos Sinica*, 5(4): 388-397 (in Chinese)
- 丁一汇, 李鸿洲, 章名立等. 1982. 我国飑线发生条件的研究. *大气科学*, 6(1): 18-27. Ding Y H, Li H Z, Zhang M L, et al. 1982. A study on the genesis conditions of squall-line in China. *Sci Atmos Sinica*, 6(1): 18-27 (in Chinese)
- 段旭, 张秀年, 许美玲. 2004. 云南及其周边地区中尺度对流系统时空分布特征. *气象学报*, 62(2): 243-250. Duan X, Zhang X N, Xu M L. 2004. Spatial and temporal distributions of mesoscale convective systems in Yunnan and its periphery areas. *Acta Meteor Sinica*, 62(2): 243-250 (in Chinese)
- 范雯杰, 俞小鼎. 2015. 中国龙卷的时空分布特征. *气象*, 41(7): 793-805. Fan W J, Yu X D. 2015. Characteristics of spatial-temporal distribution of tornadoes in China. *Meteor Mon*, 41(7): 793-805 (in Chinese)
- 方翀, 郑永光, 林隐静等. 2014. 导致区域性雷暴大风天气的云型分类及统计特征分析. *气象*, 40(8): 905-915. Fang C, Zheng Y G, Lin Y J, et al. 2014. Classification and characteristics of cloud patterns triggering regional thunderstorm high winds. *Meteor Mon*, 40(8): 905-915 (in Chinese)
- 方宗义, 许健民, 赵凤生. 2004. 中国气象卫星和卫星气象研究的回顾和发展. *气象学报*, 62(5): 550-560. Fang Z Y, Xu J M, Zhao F S. 2004. Progress and prospect of China meteorological satellite and satellite meteorology. *Acta Meteor Sinica*, 62(5): 550-560 (in Chinese)
- 方宗义, 覃丹宇. 2006. 暴雨云团的卫星监测和研究进展. *应用气象学报*, 17(5): 583-593. Fang Z Y, Qin D Y. 2006. A review of satellite observed heavy rainfall cloud clusters. *J Appl Meteor Sci*, 17(5): 583-593 (in Chinese)
- 费海燕, 王秀明, 周小刚等. 2016. 中国强雷暴大风的气候特征和环境参数分析. *气象*, 42(12): 1513-1521. Fei H Y, Wang X M, Zhou X G, et al. 2016. Climatic characteristics and environmental parameters of severe thunderstorm gales in China. *Meteor Mon*, 42(12): 1513-1521 (in Chinese)
- 冯晋勤, 张深寿, 吴陈锋等. 2018. 双偏振雷达产品在福建强对流天气过程中的应用分析. *气象*, 44(12): 1565-1574. Feng J Q, Zhang S S, Wu C F, et al. 2018. Application of dual polarization weather radar products to severe convective weather in Fujian. *Meteor Mon*, 44(12): 1565-1574 (in Chinese)
- 葛润生. 1966. 1964年北京地区降雹过程的雷达分析. *气象学报*, 36(2): 213-222. Ge R S. 1966. Radar analysis of hailfall process in Beijing in 1964. *Acta Meteor Sinica*, 36(2): 213-222 (in Chinese)
- 葛润生, 姜海燕, 彭红. 1998. 北京地区雹暴气流结构的研究. *应用气象学报*, 9(1): 1-7. Ge R S, Jiang H Y, Peng H. 1998. Flow structure of hailstorm in Beijing area. *Quart J Appl Meteor*, 9(1): 1-7 (in Chinese)
- 龚乃虎, 瞿章, 蔡启铭等. 1980. 平凉地区雹云回波移动特征. *气象学报*, 38(3): 281-288. Gong N H, Qu Z, Cai Q M, et al. 1980. Hail cloud echo movement characteristics in Pingliang area. *Acta Meteor Sinica*, 38(3): 281-288 (in Chinese)
- 公衍铎, 郑永光, 罗琪. 2019. 冷涡底部一次弓状强飑线的演变和机理. *气象*, 45(4): 483-495. Gong Y D, Zheng Y G, Luo Q. 2019. Evolution and development mechanisms of an arc-shaped strong squall line occurring along the south side of a cold vortex. *Meteor Mon*, 45(4): 483-495 (in Chinese)
- 郭巍, 崔林丽, 顾问等. 2018. 基于葵花8卫星的上海市夏季对流初生预报研究. *气象*, 44(9): 1229-1236. Guo W, Cui L L, Gu W, et al. 2018. Summer convective initiation forecasting in Shanghai based on Himawari-8 satellite. *Meteor Mon*, 44(9): 1229-1236 (in Chinese)
- 郭学良, 黄美元, 洪延超等. 2001a. 三维冰雹分档强对流云数值模式研究 I. 模式建立及冰雹的循环增长机制. *大气科学*, 25(5): 707-720. Guo X L, Huang M Y, Hong Y C, et al. 2001a. A study of three-dimensional hail-category hailstorm model Part I: Model description and the mechanism of hail recirculation growth. *Chinese J Atmos Sci*, 25(5): 707-720 (in Chinese)
- 郭学良, 黄美元, 洪延超等. 2001b. 三维冰雹分档强对流云数值模式研究 II. 冰雹粒子的分布特征. *大气科学*, 25(6): 856-864. Guo X L, Huang M Y, Hong Y C, et al. 2001b. A study of three-dimensional hail-category hailstorm model Part II: Characteristics of hail-category size distribution. *Chinese J Atmos Sci*, 25(6): 856-864 (in Chinese)
- 郭英莲, 孙继松. 2019. 湖北三类组织形态强对流系统造成的地面强对流大风特征. *大气科学*, 43(3): 483-497. Guo Y L, Sun J S. 2019. Characteristics of strong convective wind events caused by three types of convective systems in Hubei Province. *Chinese J Atmos Sci*, 43(3): 483-497 (in Chinese)
- 韩丰, 沃伟峰. 2018. SWAN2.0 系统的设计与实现. *应用气象学报*, 29(1): 25-34. Han F, Wo W F. 2018. Design and implementation of SWAN2.0 platform. *J Appl Meteor Sci*, 29(1): 25-34 (in Chinese)
- 何齐强, 陆汉城, 张铭. 1992. 江淮地区暖区飑线中尺度观测研究. *气象学报*, 50(3): 290-300. He Q Q, Lu H C, Zhang M. 1992. A mesoscale study of squall line in warm sector of Jiang-Huai area. *Acta Meteor Sinica*, 50(3): 290-300 (in Chinese)
- 胡胜, 罗聪, 张羽等. 2015. 广东大冰雹风暴单体的多普勒天气雷达特征. *应用气象学报*, 26(1): 57-65. Hu S, Luo C, Zhang Y, et al. 2015. Doppler radar features of severe hailstorms in Guangdong Province. *J Appl Meteor Sci*, 26(1): 57-65 (in Chinese)
- 黄先香, 俞小鼎, 炎利军等. 2019. 1804号台风“艾云尼”龙卷分析. *气象学报*, 77(4): 645-661. Huang X X, Yu X D, Yan L J, et al. 2019. An

- analysis on tornadoes in typhoon Ewinar. *Acta Meteor Sinica*, 77(4): 645-661 (in Chinese)
- 江吉喜, 叶惠明, 陈美珍. 1990. 华南地区中尺度对流性云团. *应用气象学报*, 1(3): 232-241. Jiang J X, Ye H M, Chen M Z. 1990. Investigation of mesoscale convective cloud cluster in South China. *Quart J Appl Meteor*, 1(3): 232-241 (in Chinese)
- 江吉喜, 项续康, 范梅珠. 1996. 青藏高原夏季中尺度强对流系统的时空分布. *应用气象学报*, 7(4): 473-478. Jiang J X, Xiang X K, Fan M Z. 1996. The spatial and temporal distributions of severe mesoscale convective systems over Tibetan Plateau in summer. *Quart J Appl Meteor*, 7(4): 473-478 (in Chinese)
- 江吉喜, 项续康. 1998. “96.8”河北特大暴雨成因的中尺度分析. *应用气象学报*, 9(3): 304-313. Jiang J X, Xiang X K. 1998. Mesoscale analysis of causes for “96.8” extreme torrential rain of Hebei Province. *Quart J Appl Meteor*, 9(3): 304-313 (in Chinese)
- 蒋汝庚. 1997. 龙卷型强风暴——1995年4月19日洪奇沥龙卷风剖析. *应用气象学报*, 8(4): 492-497. Jiang R G. 1997. A tornado type severe storm: Report of detailed analysis on Hongqili tornado on 19 April 1995. *Quart J Appl Meteor*, 8(4): 492-497 (in Chinese)
- 金龙, 赵坤, 谢利平等. 2013. 一次弓形回波结构和演变机制的观测分析. *气象科学*, 33(6): 591-601. Jin L, Zhao K, Xie L P, et al. 2013. Radar observation analysis on structure and evolution mechanism of a bow echo. *J Meteor Sci*, 33(6): 591-601 (in Chinese)
- 蓝渝, 张涛, 郑永光等. 2013. 国家级中尺度天气分析业务技术进展 II: 对流天气中尺度过程分析规范和支撑技术. *气象*, 39(7): 901-910. Lan Y, Zhang T, Zheng Y G, et al. 2013. Advances of mesoscale convective weather analysis in NMC II: Mesoscale nowcasting analysis and supporting techniques. *Meteor Mon*, 39(7): 901-910 (in Chinese)
- 蓝渝, 郑永光, 毛冬艳等. 2014. 华北区域冰雹天气分型及云系特征. *应用气象学报*, 25(5): 538-549. Lan Y, Zheng Y G, Mao D Y, et al. 2014. Classification and satellite image features of hail weather in North China. *J Appl Meteor Sci*, 25(5): 538-549 (in Chinese)
- 雷蕾, 孙继松, 魏东. 2011. 利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别. *气象*, 37(2): 136-141. Lei L, Sun J S, Wei D. 2011. Distinguishing the category of the summer convective weather by sounding data in Beijing. *Meteor Mon*, 37(2): 136-141 (in Chinese)
- 雷蕾, 孙继松, 王国荣等. 2012. 基于中尺度数值模式快速循环系统的强对流天气分类概率预报试验. *气象学报*, 70(4): 752-765. Lei L, Sun J S, Wang G R, et al. 2012. An experimental study of the summer convective weather categorical probability forecast based on the rapid updated cycle system for the Beijing area (BJ-RUC). *Acta Meteor Sinica*, 70(4): 752-765 (in Chinese)
- 雷雨顺, 吴宝俊, 吴正华. 1978. 用不稳定能量理论分析和预报夏季强风暴的一种方法. *大气科学*, 2(4): 297-306. Lei Y S, Wu B J, Wu Z H. 1978. A method for analysing and forecasting the local severe storms in summer using the theory of instability energy. *Sci Atmos Sinica*, 2(4): 297-306 (in Chinese)
- 雷雨顺, 吴正华. 1980. 静力稳定度的能量分析. *气象学报*, 38(4): 367-373. Lei Y S, Wu Z H. 1980. Energy analysis of static stability. *Acta Meteor Sinica*, 38(4): 367-373 (in Chinese)
- 雷雨顺. 1983. 大范围雹暴的发生条件. *高原气象*, 2(1): 52-60. Lei Y S. 1983. The conditions for occurrence of extensive hailstorms. *Plateau Meteor*, 2(1): 52-60 (in Chinese)
- 李博, 杨柳, 唐世浩. 2018. 基于静止卫星的青藏高原及周边地区夏季对流的气候特征分析. *气象学报*, 76(6): 983-995. Li B, Yang L, Tang S H. 2018. The climatic characteristics of summer convection over the Tibetan Plateau revealed by geostationary satellite. *Acta Meteor Sinica*, 76(6): 983-995 (in Chinese)
- 李江波, 王宗敏, 王福侠等. 2011. 华北冷涡连续降雹的特征与预报. *高原气象*, 30(4): 1119-1131. Li J B, Wang Z M, Wang F X, et al. 2011. Characteristic and forecasting of continuous hail shooting processes caused by the north China cold vortex. *Plateau Meteor*, 30(4): 1119-1131 (in Chinese)
- 李玉兰, 王婧婧, 郑新江等. 1989. 我国西南—华南地区中尺度对流复合体(MCC)的研究. *大气科学*, 13(4): 417-422. Li Y L, Wang J R, Zheng X J, et al. 1989. The study of the mesoscale convective complex (MCC) over the South-West and South of China. *Sci Atmos Sinica*, 13(4): 417-422 (in Chinese)
- 李玉兰, 陶诗言, 杜长萱. 1993. 梅雨锋上中尺度对流云团的分析. *应用气象学报*, 4(3): 278-285. Li Y L, Tao S Y, Du C X. 1993. An analysis of the meso-convective cloud clusters in Mei-Yu front. *Quart J Appl Meteor*, 4(3): 278-285 (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. *气象学报*, 75(2): 288-313. Li Z H, Wang D H, Mai X H, et al. 2017. Observations of the tornado occurred at Foshan on 4 October 2015. *Acta Meteor Sinica*, 75(2): 288-313 (in Chinese)
- 梁建宇, 孙建华. 2012. 2009年6月一次飑线过程灾害性大风的形成机制. *大气科学*, 36(2): 316-336. Liang J Y, Sun J H. 2012. The formation mechanism of damaging surface wind during the squall line in June 2009. *Chinese J Atmos Sci*, 36(2): 316-336 (in Chinese)
- 廖晓农, 于波, 卢丽华. 2009. 北京雷暴大风气候特征及短时临近预报方法. *气象*, 35(9): 18-28. Liao X N, Yu B, Lu L H. 2009. Climatology and nowcasting methods for thunderstorm gale in Beijing. *Meteor Mon*, 35(9): 18-28 (in Chinese)
- 廖玉芳, 俞小鼎, 唐小新等. 2007a. 基于多普勒天气雷达观测的湖南超级单体风暴特征. *南京气象学院学报*, 30(4): 433-443. Liao Y F, Yu X D, Tang X X, et al. 2007a. Characteristics of supercell storms in Hunan detected by Doppler weather radars. *J Nanjing Inst Meteor*, 30(4): 433-443 (in Chinese)
- 廖玉芳, 俞小鼎, 唐小新. 2007b. 2004年4月29日常德超级单体研究. *南京气象学院学报*, 30(5): 579-589. Liao Y F, Yu X D, Tang X X. 2007b. Investigation into supercell storm on 29 April 2004 in Changde. *J Nanjing Inst Meteor*, 30(5): 579-589 (in Chinese)
- 廖玉芳, 俞小鼎, 吴林林等. 2007c. 强雹暴的雷达三体散射统计与个例分

- 析. 高原气象, 26(4): 812-820. Liao Y F, Yu X D, Wu L L, et al. 2007c. Statistic and case studies on radar three body scattering of severe hailstorm. Plateau Meteor, 26(4): 812-820 (in Chinese)
- 刘洪恩. 2001. 微下击暴流的特征及其数值模拟. 气象学报, 59(2): 183-195. Liu H E. 2001. Characteristics and numerical simulation of microburst. Acta Meteor Sinica, 59(2): 183-195 (in Chinese)
- 刘娟, 朱君鉴, 魏德斌等. 2009. 070703 天长超级单体龙卷的多普勒雷达典型特征. 气象, 35(10): 32-39. Liu J, Zhu J J, Wei D B, et al. 2009. Doppler weather radar typical characteristics of the 3 July 2007 Tianchang supercell tornado. Meteor Mon, 35(10): 32-39 (in Chinese)
- 刘京华, 王彬, 韩雷等. 2012. 京津地区一次强对流天气的初生预警技术研究. 北京大学学报(自然科学版), 48(1): 42-46. Liu J H, Wang B, Han L, et al. 2012. Forecasting convective initiation of a convective weather event in Beijing-Tianjin region. Acta Sci Nat Univ Pekinensis, 48(1): 42-46 (in Chinese)
- 刘香娥, 郭学良. 2012. 灾害性大风发生机理与飑线结构特征的个案分析模拟研究. 大气科学, 36(6): 1150-1164. Liu X E, Guo X L. 2012. Analysis and numerical simulation research on severe surface wind formation mechanism and structural characteristics of a squall line case. Chinese J Atmos Sci, 36(6): 1150-1164 (in Chinese)
- 刘勇, 刘子臣, 马廷标等. 1998. 一次飑线过程中龙卷及飑锋生成的中尺度分析. 大气科学, 22(3): 326-335. Liu Y, Liu Z C, Ma T B, et al. 1998. A meso-scale analysis of tornado and squall front forming in a squall line process. Sci Atmos Sinica, 22(3): 326-335 (in Chinese)
- 刘运策, 庄旭东, 李献洲. 2001. 珠江三角洲地区由海风锋触发形成的强对流天气过程分析. 应用气象学报, 12(4): 433-441. Liu Y C, Zhuang X D, Li X Z. 2001. Severe local storms initiated by the sea breeze front in the pearl river delta during the late spring and summer. Quart J Appl Meteor, 12(4): 433-441 (in Chinese)
- 卢乃锰, 吴蓉璋. 1997. 强对流降水云团的云图特征分析. 应用气象学报, 8(3): 269-275. Lu N M, Wu R Z. 1997. Strong convective cloud characteristics derived from satellite cloud picture. Quart J Appl Meteor, 8(3): 269-275 (in Chinese)
- 卢蓂. 1935. 民国二十年六月十日寒暖气流之移动与飑线. 气象杂志(气象学报), 11(1): 10-23. Lu W. 1935. Squall line and the movement of the cold current and warm current on 10 June 1931. Acta Meteor Sinica, 11(1): 10-23 (in Chinese)
- 罗琪, 郑永光, 陈敏. 2019. 2017年北京北部一次罕见强弓状飑线过程演变和机理. 气象学报, 77(3): 371-386. Luo Q, Zheng Y G, Chen M. 2019. Evolution and development mechanisms of a rare strong arc-shaped squall line that occurred in northern Beijing in 2017. Acta Meteor Sinica, 77(3): 371-386 (in Chinese)
- 马淑萍, 王秀明, 俞小鼎. 2019. 极端雷暴大风的环境参量特征. 应用气象学报, 30(3): 292-301. Ma S P, Wang X M, Yu X D. 2019. Environmental parameter characteristics of severe wind with extreme thunderstorm. J Appl Meteor Sci, 30(3): 292-301 (in Chinese)
- 马振骅, 刘锦丽, 马建骊. 1980. 冰雹云的指状回波结构及其形成机制探讨. 大气科学, 4(1): 21-29. Ma Z H, Liu J L, Ma J L. 1980. The structure of the hailstorm's "finger" echoes and the possible mechanism of their formation. Sci Atmos Sinica, 4(1): 21-29 (in Chinese)
- 潘玉洁, 赵坤, 潘益农. 2008. 一次强飑线内强降水超级单体风暴的单多普勒雷达分析. 气象学报, 66(4): 621-636. Pan Y J, Zhao K, Pan Y N. 2008. Single-Doppler radar observation of a heavy precipitation supercell on a severe squall line. Acta Meteor Sinica, 66(4): 621-636 (in Chinese)
- 潘玉洁, 赵坤, 潘益农等. 2012. 用双多普勒雷达分析华南一次飑线系统的中尺度结构特征. 气象学报, 70(4): 736-751. Pan Y J, Zhao K, Pan Y N, et al. 2012. Dual-Doppler analysis of a squall line in southern China. Acta Meteor Sinica, 70(4): 736-751 (in Chinese)
- 漆梁波, 陈永林. 2004. 一次长江三角洲飑线的综合分析. 应用气象学报, 15(2): 162-173. Qi L B, Chen Y L. 2004. Synthetic analysis of a squall in Yangtze River Delta. J Appl Meteor Sci, 15(2): 162-173 (in Chinese)
- 漆梁波, 陈春红, 刘强军. 2006. 弱窄带回波在分析和预报强对流天气中的应用. 气象学报, 64(1): 112-120. Qi L B, Chen C H, Liu Q J. 2006. Application of narrow-band echo in severe weather prediction and analysis. Acta Meteor Sinica, 64(1): 112-120 (in Chinese)
- 覃丹宇, 方宗义. 2014. 利用静止气象卫星监测初生对流的研究进展. 气象, 40(1): 7-17. Qin D Y, Fang Z Y. 2014. Research progress of geostationary satellite-based convective initiation. Meteor Mon, 40(1): 7-17 (in Chinese)
- 沈树勤. 1990. 台风前部龙卷风的一般特征及其萌发条件的初步分析. 气象, 16(1): 11-16. Shen S Q. 1990. Analysis of the general characteristics and genesis conditions of tornado in front of typhoon. Meteor Mon, 16(1): 11-16 (in Chinese)
- 盛杰, 毛冬艳, 沈新勇等. 2014. 我国春季冷锋后的高架雷暴特征分析. 气象, 40(9): 1058-1065. Sheng J, Mao D Y, Shen X Y, et al. 2014. Analysis on characteristics of elevated thunderstorms behind cold fronts in China during spring. Meteor Mon, 40(9): 1058-1065 (in Chinese)
- 盛杰, 郑永光, 沈新勇等. 2019. 2018年一次罕见早春飑线大风过程演变和机理分析. 气象, 45(2): 141-154. Sheng J, Zheng Y G, Shen X Y, et al. 2019. Evolution and mechanism of a rare squall line in early spring of 2018. Meteor Mon, 45(2): 141-154 (in Chinese)
- 寿亦莹, 许健民. 2007. "05.6"东北暴雨中尺度对流系统研究 II: MCS 动力结构特征的雷达卫星资料分析. 气象学报, 65(2): 171-182. Shou Y X, Xu J M. 2007. The rainstorm and mesoscale convective systems over northeast China in June 2005 II: A synthetic analysis of MCS's dynamical structure by radar and satellite observations. Acta Meteor Sinica, 65(2): 171-182 (in Chinese)
- 束宇, 潘益农. 2010. 红外云图上中尺度对流系统的自动识别. 南京大学学报(自然科学版), 46(3): 337-348. Shu Y, Pan Y N. 2010. Self-identification of mesoscale convective system from satellite infrared imagery. J Nanjing Univ (Nat Sci), 46(3): 337-348 (in Chinese)
- 孙虎林, 罗亚丽, 张人禾等. 2011. 2009年6月3-4日黄淮地区强飑线成熟阶段特征分析. 大气科学, 35(1): 105-120. Sun H L, Luo Y L, Zhang R H, et al. 2011. Analysis on the mature-stage features of the severe squall

- line occurring over the Yellow River and Huaihe River basins during 3—4 June 2009. *Chinese J Atmos Sci*, 35(1): 105-120 (in Chinese)
- 孙建华, 郑淋淋, 赵思雄. 2014. 水汽含量对飑线组织结构和强度影响的数值试验. *大气科学*, 38(4): 742-755. Sun J H, Zheng L L, Zhao S X. 2014. Impact of moisture on the organizational mode and intensity of squall lines determined through numerical experiments. *Chinese J Atmos Sci*, 38(4): 742-755 (in Chinese)
- 孙继松, 陶祖钰. 2012. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题. *气象*, 38(2): 164-173. Sun J S, Tao Z Y. 2012. Some essential issues connected with severe convective weather analysis and forecast. *Meteor Mon*, 38(2): 164-173 (in Chinese)
- 孙继松, 戴建华, 何立富等. 2014. 强对流天气预报的基本原理与技术方法: 中国强对流天气预报手册. 北京: 气象出版社, 282pp. Sun J S, Dai J H, He L F, et al. 2014. The Basic Principles and Methods of Convective Weather Forecasting: China Convective Weather Forecasting Manual. Beijing: China Meteorological Press, 282pp (in Chinese)
- 孙淑清, 翟国庆. 1980. 低空急流的不稳定性及其对暴雨的触发作用. *大气科学*, 4(4): 327-337. Sun S Q, Zhai G Q. 1980. On the instability of the low level jet and its trigger function for the occurrence of heavy rainstorms. *Sci Atmos Sinica*, 4(4): 327-337 (in Chinese)
- 孙淑清, 孟婵. 1992. 中- β 尺度干线的形成与局地强对流暴雨. *气象学报*, 50(2): 181-189. Sun S Q, Meng C. 1992. The formation of a meso- β dry line and local convective rainstorm. *Acta Meteor Sinica*, 50(2): 181-189 (in Chinese)
- 唐文苑, 周庆亮, 刘鑫华等. 2017. 国家级强对流天气分类预报检验分析. *气象*, 43(1): 67-76. Tang W Y, Zhou Q L, Liu X H, et al. 2017. Analysis on verification of national severe convective weather categorical forecasts. *Meteor Mon*, 43(1): 67-76 (in Chinese)
- 唐文苑, 郑永光. 2019. 基于快速更新同化数值预报的小时降水量时间滞后集合订正技术. *气象*, 45(3): 305-317. Tang W Y, Zheng Y G. 2019. Improvement of hourly precipitation forecast using a time-lagged ensemble based on rapid refresh assimilation and forecast. *Meteor Mon*, 45(3): 305-317 (in Chinese)
- 陶岚, 戴建华. 2011. 下击暴流自动识别算法研究. *高原气象*, 30(3): 784-797. Tao L, Dai J H. 2011. Research on automatic detection algorithm of downburst. *Plateau Meteor*, 30(3): 784-797 (in Chinese)
- 陶岚, 袁招洪, 戴建华等. 2014. 一次夜间弓形回波特征分析. *气象学报*, 72(2): 220-236. Tao L, Yuan Z H, Dai J H, et al. 2014. Analysis of the characteristics of a nocturnal bow echo. *Acta Meteor Sinica*, 72(2): 220-236 (in Chinese)
- 陶诗言, 方宗义, 李玉兰等. 1979. 气象卫星资料在我国天气分析和预报上的应用. *大气科学*, 3(3): 239-246. Tao S Y, Fang Z Y, Li Y L, et al. 1979. The application of the meteorological satellite data to weather analysis and forecasting in China. *Sci Atmos Sinica*, 3(3): 239-246 (in Chinese)
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1-12. Tao S Y. 1980. The Heavy Rain of China. Beijing: Science Press, 1-12 (in Chinese)
- 陶诗言, 方宗义, 李玉兰. 1983. 四年来我国气象卫星资料分析应用研究. *气象学报*, 41(3): 263-274. Tao S Y, Fang Z Y, Li Y L. 1983. Analysis and application of meteorological satellite data in China for four years. *Acta Meteor Sinica*, 41(3): 263-274 (in Chinese)
- 王昂生, 黄美元. 1978. 冰雹和防雹研究述评. *大气科学*, 2(1): 76-84. Wang A S, Huang M Y. 1978. A review of the researches on hail and hail suppression. *Sci Atmos Sinica*, 2(1): 76-84 (in Chinese)
- 王昂生, 徐乃璋. 1983. 强烈雹暴结构和降雹. *大气科学*, 7(1): 95-101. Wang A S, Xu N Z. 1983. Structure of severe hailstorm and its hail shooting. *Sci Atmos Sinica*, 7(1): 95-101 (in Chinese)
- 王昂生, 徐乃璋. 1985. 强单体雹暴的研究. *大气科学*, 9(3): 260-267. Wang A S, Xu N Z. 1985. The studies of strongcell hailstorms. *Sci Atmos Sinica*, 9(3): 260-267 (in Chinese)
- 王德铮. 1965. 福建地区春季暖区中的雷暴活动和辐合带的关系. *气象学报*, 35(3): 316-327. Wang D Z. 1965. Relationship between thunderstorm activity and convergence zone in warm sector of spring in Fujian. *Acta Meteor Sinica*, 35(3): 316-327 (in Chinese)
- 王福侠, 俞小鼎, 同学瑾. 2014. 一次超级单体分裂过程的雷达回波特征分析. *气象学报*, 72(1): 152-167. Wang F X, Yu X D, Yan X J. 2014. Analysis of the splitting processes of the supercell storms based on the Doppler weather radar data. *Acta Meteor Sinica*, 72(1): 152-167 (in Chinese)
- 王福侠, 俞小鼎, 裴宇杰等. 2016. 河北省雷暴大风的雷达回波特征及预报关键点. *应用气象学报*, 27(3): 342-351. Wang F X, Yu X D, Pei Y J, et al. 2016. Radar echo characteristics of thunderstorm gales and forecast key points in Hebei Province. *J Appl Meteor Sci*, 27(3): 342-351 (in Chinese)
- 王洪, 吴乃庚, 万齐林等. 2018. 一次华南超级单体风暴的S波段偏振雷达观测分析. *气象学报*, 76(1): 92-103. Wang H, Wu N G, Wan Q L, et al. 2018. Analysis of S-band polarimetric radar observations of a hail-producing supercell. *Acta Meteor Sinica*, 76(1): 92-103 (in Chinese)
- 王俊, 朱君鉴, 任钟冬. 2007. 利用双多普勒雷达研究强飑线过程的三维风场结构. *气象学报*, 65(2): 241-251. Wang J, Zhu J J, Ren Z D. 2007. A study of 3-D wind structure of a strong squall line using Dual-Doppler weather radar data. *Acta Meteor Sinica*, 65(2): 241-251 (in Chinese)
- 王沛霖. 1964. 对流预报的平均不稳定能量指标. *气象学报*, 34(3): 299-303. Wang P L. 1964. A mean unstable energy index for convective forecasting. *Acta Meteor Sinica*, 34(3): 299-303 (in Chinese)
- 王晓芳, 胡伯威, 李灿. 2010. 湖北一次飑线过程的观测分析及数值模拟. *高原气象*, 29(2): 471-485. Wang X F, Hu B W, Li C. 2010. Observation study and numerical simulation of the structure for a squall line case in Hubei. *Plateau Meteor*, 29(2): 471-485 (in Chinese)
- 王晓芳, 崔春光. 2012. 长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析 I: 组织类型特征. *气象学报*, 70(5): 909-923. Wang X F, Cui C G. 2012. Analysis of the linear mesoscale convective systems during the Meiyu period in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Part I: Organization mode features. *Acta Meteor Sinica*, 70(5): 909-923 (in Chinese)

Chinese)

- 王秀明, 钟青, 韩慎友. 2009. 一次冰雹天气强对流(雹)云演变及超级单体结构的个例模拟研究. 高原气象, 28(2): 352-365. Wang X M, Zhong Q, Han S Y. 2009. A numerical case study on the evolution of hail cloud and the three-dimensional structure of supercell. Plateau Meteor, 28(2): 352-365 (in Chinese)
- 王秀明, 俞小鼎, 周小刚等. 2012. "6.3"区域致灾雷暴大风形成及维持原因分析. 高原气象, 31(2): 504-514. Wang X M, Yu X D, Zhou X G, et al. 2012. Study on the formation and evolution of "6.3" damage wind. Plateau Meteor, 31(2): 504-514 (in Chinese)
- 王秀明, 周小刚, 俞小鼎. 2013. 雷暴大风环境特征及其对风暴结构影响的对比研究. 气象学报, 71(5): 839-852. Wang X M, Zhou X G, Yu X D. 2013. Comparative study of environmental characteristics of a windstorm and their impacts on storm structures. Acta Meteor Sinica, 71(5): 839-852 (in Chinese)
- 王秀明, 俞小鼎, 周小刚. 2014. 雷暴潜势预报中几个基本问题的讨论. 气象, 40(4): 389-399. Wang X M, Yu X D, Zhou X G. 2014. Discussion on basical issues of thunderstorm potential forecasting. Meteor Mon, 40(4): 389-399 (in Chinese)
- 王秀明, 俞小鼎, 周小刚. 2015. 中国东北龙卷研究: 环境特征分析. 气象学报, 73(3): 425-441. Wang X M, Yu X D, Zhou X G. 2015. Study of northeast China torandoes: The environmental characteristics. Acta Meteor Sinica, 73(3): 425-441 (in Chinese)
- 王秀明, 俞小鼎. 2019. 热带一次致灾龙卷形成物理过程研究. 气象学报, 77(3): 387-404. Wang X M, Yu X D. 2019. A study on the physical process involved in the genesis of a severe tropical tornado. Acta Meteor Sinica, 77(3): 387-404 (in Chinese)
- 王彦, 于莉莉, 朱男男等. 2011. 渤海湾海风锋与雷暴天气. 高原气象, 30(1): 245-251. Wang Y, Yu L L, Zhu N N, et al. 2011. Sea breeze front in Bohai Bay and thunderstorm weather. Plateau Meteor, 30(1): 245-251 (in Chinese)
- 吴芳芳, 俞小鼎, 张志刚等. 2013. 苏北地区超级单体风暴环境条件与雷达回波特征. 气象学报, 71(2): 209-227. Wu F F, Yu X D, Zhang Z G, et al. 2013. A study of the environmental conditions and radar echo characteristics of the supercell-storms in northern Jiangsu. Acta Meteor Sinica, 71(2): 209-227 (in Chinese)
- 吴芳芳, 俞小鼎, 王慧等. 2019. 一次黄海之滨中尺度对流复合体多尺度结构特征观测研究. 气象学报, 77(5): 785-805. Wu F F, Yu X D, Wang H, et al. 2019. An observational study of multi-scale structural features of MCC on the coast of the Yellow Sea. Acta Meteor Sinica, 77(5): 785-805 (in Chinese)
- 吴泗璋. 1938. 中国之雷雨. 气象杂志, 14(4): 131-145. Woo S C. 1938. The thunderstorms of China. Acta Meteor Sinica, 14(4): 131-145 (in Chinese)
- 项续康, 江吉喜. 1995. 我国南方地区的中尺度对流复合体. 应用气象学报, 6(1): 9-17. Xiang X K, Jiang J X. 1995. Mesoscale convective complexes over the southern China mainland. Quart J Appl Meteor, 6(1): 9-17 (in Chinese)
- 谢健标, 林良勋, 颜文胜等. 2007. 广东 2005 年 "3-22" 强飑线天气过程分析. 应用气象学报, 18(3): 321-329. Xie J B, Lin L X, Yan W S, et al. 2007. Dynamic diagnosis of an infrequent squall line in Guangdong on March 22, 2005. J Appl Meteor Sci, 18(3): 321-329 (in Chinese)
- 许爱华, 孙继松, 许东蓓等. 2014. 中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征. 气象, 40(4): 400-411. Xu A H, Sun J S, Xu D B, et al. 2014. Basic synoptic situation classification and element character of severe convection in China. Meteor Mon, 40(4): 400-411 (in Chinese)
- 许焕斌, 王思微. 1985. 一维时变冰雹云模式研究(一): 反映雨和冰雹谱的双参数演变. 气象学报, 43(1): 13-25. Xu H B, Wang S W. 1985. A numerical model of hail-bearing convective cloud (1): Biparameter evolution of size distribution of raindrops, frozen raindrops and hailstones. Acta Meteor Sinica, 43(1): 13-25 (in Chinese)
- 许焕斌, 王思微. 1988. 二维冰雹云数值模式. 气象学报, 46(2): 227-236. Xu H B, Wang S W. 1988. Two-dimension hailcloud model. Acta Meteor Sinica, 46(2): 227-236 (in Chinese)
- 许焕斌, 王思微. 1990. 三维可压缩大气中的云尺度模式. 气象学报, 48(1): 80-90. Xu H B, Wang S W. 1990. A three-dimensional cloud-scale model suitable for compressible atmosphere. Acta Meteor Sinica, 48(1): 80-90 (in Chinese)
- 许焕斌, 魏绍远. 1995. 下击暴流的数值模拟研究. 气象学报, 53(2): 168-176. Xu H B, Wei S Y. 1995. The modeling study of downburst. Acta Meteor Sinica, 53(2): 168-176 (in Chinese)
- 许焕斌, 段英. 2001. 冰雹形成机制的研究并论人工雹胚与自然雹胚的"利益竞争"防雹假说. 大气科学, 25(2): 277-288. Xu H B, Duan Y. 2001. The mechanism of hailstone's formation and the hail-suppression hypothesis: "Beneficial Competition". Chinese J Atmos Sci, 25(2): 277-288 (in Chinese)
- 徐阳春. 1991. 雷达判别宁南山区冰雹云的综合指标. 高原气象, 10(4): 420-425. Xu Y C. 1991. A comprehensive indexes recognizing hail cloud by using weather radar in mountain area of south Ningxia. Plateau Meteor, 10(4): 420-425 (in Chinese)
- 杨波, 郑永光, 蓝渝等. 2017. 国家级强对流天气综合业务支撑体系建设. 气象, 43(7): 845-855. Yang B, Zheng Y G, Lan Y, et al. 2017. Development and construction of the supporting platform for national severe convective weather forecasting and service. Meteor Mon, 43(7): 845-855 (in Chinese)
- 杨本相, 陶祖钰. 2005. 青藏高原东南部 MCC 的地域特点分析. 气象学报, 63(2): 236-242. Yang B X, Tao Z Y. 2005. The analysis of local features of MCC on southeast Tibetan Plateau. Acta Meteor Sinica, 63(2): 236-242 (in Chinese)
- 杨璐, 陈明轩, 孟金平等. 2018. 北京地区雷暴大风不同生命期内的雷达统计特征及预警提前量分析. 气象, 44(6): 802-813. Yang L, Chen M X, Meng J P, et al. 2018. Radar statistical characteristics and warning lead analysis of thunderstorm gales in different life periods in Beijing. Meteor

- Mon, 44(6): 802-813 (in Chinese)
- 杨培才, 郭裕福, 刘锦丽等. 1980. 华北地区降雹回波系统的分类及单体特征. *大气科学*, 4(3): 236-244. Yang P C, Guo Y F, Liu J L, et al. 1980. The classification of hailstorm systems in north China and the characteristics of the cells in the hailstorms. *Sci Atmos Sinica*, 4(3): 236-244 (in Chinese)
- 杨越奎, 张铭. 1992. 次级环流在强对流天气产生和演变中的作用. *应用气象学报*, 3(4): 487-491. Yang Y K, Zhang M. 1992. The role of secondary circulation in the initiation and evolution of severe convective weather. *Quart J Appl Meteor*, 3(4): 487-491 (in Chinese)
- 姚叶青, 俞小鼎, 张义军等. 2008. 一次典型飏线过程多普勒天气雷达资料分析. *高原气象*, 27(2): 373-381. Yao Y Q, Yu X D, Zhang Y J, et al. 2008. Analysis on a typical squall line case with Doppler weather radar data. *Plateau Meteor*, 27(2): 373-381 (in Chinese)
- 俞小鼎, 王迎春, 陈明轩等. 2005. 新一代天气雷达与强对流天气预警. *高原气象*, 24(3): 456-464. Yu X D, Wang Y C, Chen M X, et al. 2005. Severe convective weather warnings and its improvement with the introduction of the NEXRAD. *Plateau Meteor*, 24(3): 456-464 (in Chinese)
- 俞小鼎, 张爱民, 郑媛媛等. 2006a. 一次系列下击暴流事件的多普勒天气雷达分析. *应用气象学报*, 17(4): 385-393. Yu X D, Zhang A M, Zheng Y Y, et al. 2006a. Doppler radar analysis on a series of downburst events. *J Appl Meteor Sci*, 17(4): 385-393 (in Chinese)
- 俞小鼎, 郑媛媛, 张爱民等. 2006b. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析. *高原气象*, 25(5): 914-924. Yu X D, Zheng Y Y, Zhang A M, et al. 2006b. The detection of a severe tornado event in Anhui with China new generation weather radar. *Plateau Meteor*, 25(5): 914-924 (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. *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. *Chinese J Atmos Sci*, 32(3): 508-522 (in Chinese)
- 俞小鼎. 2012. 2012年7月21日北京特大暴雨成因分析. *气象*, 38(11): 1313-1329. Yu X D. 2012. Investigation of Beijing extreme flooding event on 21 July 2012. *Meteor Mon*, 38(11): 1313-1329 (in Chinese)
- 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展. *气象学报*, 70(3): 311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M. 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection. *Acta Meteor Sinica*, 70(3): 311-337 (in Chinese)
- 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 2016. 中国冷季高架对流个例初步分析. *气象学报*, 74(6): 902-918. Yu X D, Zhou X G, Wang X M. 2016. A preliminary case study of elevated convection in China. *Acta Meteor Sinica*, 74(6): 902-918 (in Chinese)
- 俞小鼎, 王秀明, 李万莉等. 2020. 雷暴与强对流临近预报. 北京: 气象出版社, 416 pp. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al. 2020. Thunderstorm and Strong Convection Nowcasting. Beijing: China Meteorological Press, 416pp (in Chinese)
- 曾明剑, 王桂臣, 吴海英等. 2015. 基于中尺度数值模式的分类强对流天气预报方法研究. *气象学报*, 73(5): 868-882. Zeng M J, Wang G C, Wu H Y, et al. 2015. Study of the forecasting method for the classified severe convection weather based on a meso-scale numerical model. *Acta Meteor Sinica*, 73(5): 868-882 (in Chinese)
- 翟国庆, 俞樟孝, 朱持则. 1989. 一次局地强风暴的中分析. *大气科学*, 13(4): 429-434. Zhai G Q, Yu Z X, Zhu C Z. 1989. A meso-analysis of local severe convection storm. *Sci Atmos Sinica*, 13(4): 429-434 (in Chinese)
- 张鸿发, 龚乃虎, 贾伟等. 1997. 平凉地区强对流钩状回波特征的观测研究. *大气科学*, 21(4): 401-412. Zhang H F, Gong N H, Jia W, et al. 1997. Observational investigation of characteristics of severe convective hook echo in Pingliang region. *Sci Atmos Sinica*, 21(4): 401-412 (in Chinese)
- 张鸿发, 左洪超, 鄯秀书等. 2002. 平凉冰雹云回波特征分析. *气象学报*, 60(1): 110-115. Zhang H F, Zuo H C, Qie X S, et al. 2002. Analysis of echo characteristics of Pingliang hailstorm. *Acta Meteor Sinica*, 60(1): 110-115 (in Chinese)
- 张鸿发, 左洪超, 陈成品等. 2004. 一例长生命史雷暴云分裂过程的回波特征. *高原气象*, 23(1): 40-47. Zhang H F, Zuo H C, Chen C P, et al. 2004. Echo structure for splitting process of a long life cycle thunder cloud. *Plateau Meteor*, 23(1): 40-47 (in Chinese)
- 张沛源. 1983. 飏线雹暴不同发展阶段的垂直流场特征. *高原气象*, 2(3): 40-48. Zhang P Y. 1983. Vertical airflow characteristics of squall-line hailstorm at different developmental stages. *Plateau Meteor*, 2(3): 40-48 (in Chinese)
- 张庆红, 刘启汉, 王洪庆等. 2000. 华南梅雨锋上中尺度对流系统的数值模拟. *科学通报*, 45(18): 1988-1992. Zhang Q H, Lau K H, Wang H Q, et al. 2000. Numerical simulation on mesoscale convective system along Mei-Yu front in southern China. *Chinese Sci Bull*, 45(18): 1988-1992 (in Chinese)
- 张涛, 蓝渝, 毛冬艳等. 2013. 国家级中尺度天气分析业务技术进展 I: 对流天气环境场分析业务技术规范改进与产品集成系统支撑技术. *气象*, 39(7): 894-900. Zhang T, Lan Y, Mao D Y, et al. 2013. Advances of mesoscale convective weather analysis in NMC I: Convective weather environment analysis and supporting techniques. *Meteor Mon*, 39(7): 894-900 (in Chinese)
- 张涛, 关良, 郑永光等. 2020. 2019年7月3日辽宁开原龙卷灾害现场调查及其所揭示的龙卷演变过程. *气象*, 46(5): 603-617. Zhang T, Guan L, Zheng Y G, et al. 2020. Damage survey of the 3 July, 2019 Kaiyuan tornado in Liaoning Province and its evolution revealed by disaster. *Meteor Mon*, 46(5): 603-617 (in Chinese)
- 张文海, 李磊. 2019. 人工智能在冰雹识别及临近预报中的初步应用. *气象学报*, 77(2): 282-291. Zhang W H, Li L. 2019. A preliminary application of artificial intelligence on the detection and nowcasting of hail weather. *Acta Meteor Sinica*, 77(2): 282-291 (in Chinese)
- 张小玲, 谌芸, 张涛. 2012. 对流天气预报中的环境场条件分析. *气象学报*, 70(4): 642-654. Zhang X L, Chen Y, Zhang T. 2012. Meso-scale convective weather analysis and severe convective weather forecasting.

- Acta Meteor Sinica, 70(4): 642-654 (in Chinese)
- 张小玲, 杨波, 朱文剑等. 2016. 2016年6月23日江苏阜宁EF4级龙卷天气分析. *气象*, 42(11): 1304-1314. Zhang X L, Yang B, Zhu W J, et al. 2016. Analysis of the EF4 tornado in Funing County, Jiangsu Province on 23 June 2016. *Meteor Mon*, 42(11): 1304-1314 (in Chinese)
- 张小玲, 郑永光, 杨波. 2019. 强对流天气研究和预报技术. 北京: 气象出版社, 522 pp. Zhang X L, Zheng Y G, Yang B. 2019. Severe Convection Weather Research and Forecasting Technology. Beijing: China Meteorological Press, 522pp (in Chinese)
- 赵德山, 洪钟祥, 马惠英. 1982. 一次雷暴密度流的风场结构的研究. *大气科学*, 6(2): 157-164. Zhao D S, Hong Z X, Ma H Y. 1982. A study on the structure of wind field of thunderstorm density current. *Sci Atmos Sinica*, 6(2): 157-164 (in Chinese)
- 赵金涛, 岳耀杰, 王静爱等. 2015. 1950-2009年中国大陆地区冰雹灾害的时空格局分析. *中国农业气象*, 36(1): 83-92. Zhao J T, Yue Y J, Wang J A, et al. 2015. Study on spatio-temporal pattern of hail disaster in China mainland from 1950 to 2009. *Chinese J Agrometeor*, 36(1): 83-92 (in Chinese)
- 赵坤, 周仲岛, 潘玉洁等. 2008. 台湾海峡中气旋结构特征的单多普勒雷达分析. *气象学报*, 66(4): 637-651. Zhao K, Zhou Z D, Pan Y J, et al. 2008. Single-Doppler radar analysis of a mesocyclone in the Taiwan Strait. *Acta Meteor Sinica*, 66(4): 637-651 (in Chinese)
- 郑永光, 张小玲, 周庆亮等. 2010. 强对流天气短时限近预报业务技术进展与挑战. *气象*, 36(7): 33-42. Zheng Y G, Zhang X L, Zhou Q L, et al. 2010. Review on severe convective weather short-term forecasting and nowcasting. *Meteor Mon*, 36(7): 33-42 (in Chinese)
- 郑永光, 林隐静, 朱文剑等. 2013. 强对流天气综合监测业务系统建设. *气象*, 39(2): 234-240. Zheng Y G, Lin Y J, Zhu W J, et al. 2013. Operational system of severe convective weather comprehensive monitoring. *Meteor Mon*, 39(2): 234-240 (in Chinese)
- 郑永光, 周康辉, 盛杰等. 2015. 强对流天气监测预报预警技术进展. *应用气象学报*, 26(6): 641-657. Zheng Y G, Zhou K H, Sheng J, et al. 2015. Advances in techniques of monitoring, forecasting and warning of severe convective weather. *J Appl Meteor Sci*, 26(6): 641-657 (in Chinese)
- 郑永光, 田付友, 孟智勇等. 2016a. “东方之星”客轮翻沉事件周边区域风灾现场调查与多尺度特征分析. *气象*, 42(1): 1-13. Zheng Y G, Tian F Y, Meng Z Y, et al. 2016a. Survey and multi-scale characteristics of wind damage caused by convective storms in the surrounding area of the capsizing accident of cruise ship "Dongfangzhixing". *Meteor Mon*, 42(1): 1-13 (in Chinese)
- 郑永光, 朱文剑, 姚聘等. 2016b. 风速等级标准与2016年6月23日阜宁龙卷强度估计. *气象*, 42(11): 1289-1303. Zheng Y G, Zhu W J, Yao D, et al. 2016b. Wind speed scales and rating of the intensity of the 23 June 2016 tornado in Funing County, Jiangsu Province. *Meteor Mon*, 42(11): 1289-1303 (in Chinese)
- 郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎. 2017. 强对流天气预报的一些基本问题. *气象*, 43(6): 641-652. Zheng Y G, Tao Z Y, Yu X D. 2017. Some essential issues of severe convective weather forecasting. *Meteor Mon*, 43(6): 641-652 (in Chinese)
- 郑永光, 朱文剑, 田付友. 2018. 2015年“东方之星”翻沉事件和2016年阜宁EF4级龙卷对流星暴环境条件、结构特征和机理. *气象科技进展*, 8(2): 44-54. Zheng Y G, Zhu W J, Tian F Y. 2018. Environmental conditions, structures, and mechanisms of convective storms of 2015 "Oriental Star" capsizing event and 2016 Funing EF4 tornado. *Adv Meteor Sci Technol*, 8(2): 44-54 (in Chinese)
- 郑永光, 蓝渝, 曹艳察等. 2020. 2019年7月3日辽宁开原EF4级强龙卷生成条件、演变特征和机理. *气象*, 46(5): 589-602. Zheng Y G, Lan Y, Cao Y C, et al. 2020. Environmental conditions, evolution and mechanisms of the EF4 tornado in Kaiyuan, Liaoning Province on 3 July, 2019. *Meteor Mon*, 46(5): 589-602 (in Chinese)
- 郑媛媛, 俞小鼎, 方翀等. 2004. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析. *气象学报*, 62(3): 317-328. Zheng Y Y, Yu X D, Fang C, et al. 2004. Analysis of a strong classic supercell storm with Doppler weather radar data. *Acta Meteor Sinica*, 62(3): 317-328 (in Chinese)
- 郑媛媛, 朱红芳, 方翔等. 2009. 强龙卷超级单体风暴特征分析与预警研究. *高原气象*, 28(3): 617-625. Zheng Y Y, Zhu H F, Fang X, et al. 2009. Characteristic analysis and early-warning of tornado supercell storm. *Plateau Meteor*, 28(3): 617-625 (in Chinese)
- 郑媛媛, 张雪晨, 朱红芳等. 2014. 东北冷涡对江淮飑线生成的影响研究. *高原气象*, 33(1): 261-269. Zheng Y Y, Zhang X C, Zhu H F, et al. 2014. Study of squall line genesis with northeast cold vortex. *Plateau Meteor*, 33(1): 261-269 (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. *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. *Meteor Mon*, 41(8): 942-952 (in Chinese)
- 周康辉, 郑永光, 蓝渝. 2016. 基于闪电数据的雷暴识别、追踪与外推方法. *应用气象学报*, 27(2): 173-181. Zhou K H, Zheng Y G, Lan Y. 2016. Flash cell identification, tracking and nowcasting with lightning data. *J Appl Meteor Sci*, 27(2): 173-181 (in Chinese)
- 周鑫, 周顺武, 覃丹宇等. 2019. 利用FY-2F快速扫描资料分析对流初生阶段的云顶物理量特征. *气象*, 45(2): 216-227. Zhou X, Zhou S W, Qin D Y, et al. 2019. Analysis of cloud top features during convective initiation using FY-2F Satellite scan data. *Meteor Mon*, 45(2): 216-227 (in Chinese)
- 庄薇, 刘黎平, 薄兆海等. 2010. 新疆一次强飑线过程双多普勒雷达观测的中尺度风场结构分析. *气象学报*, 68(2): 224-234. Zhuang W, Liu L P, Bo Z H, et al. 2010. Study of the mesoscale wind field structure of a strong squall line in the Xinjiang Uygur Autonomous Region based on the dual-Doppler radar observations. *Acta Meteor Sinica*, 68(2): 224-234 (in Chinese)
- 邹美恩, 陶诗言. 1984. 湖南强风暴暖盖环境场研究. *大气科学*, 8(2): 135-142. Zou M E, Tao S Y. 1984. A study on the formation and maintenance of the inversion layer in the severe storms in Hunan Province. *Sci*

- Atmos Sinica*, 8(2): 135-142 (in Chinese)
- Anderson C J, Arritt R W. 1998. Mesoscale convective complexes and persistent elongated convective systems over the United States during 1992 and 1993. *Mon Wea Rev*, 126(3): 578-599
- Bai L Q, Meng Z Y, Huang L, et al. 2017. An integrated damage, visual, and radar analysis of the 2015 Foshan, Guangdong, EF3 Tornado in China produced by the landfalling Typhoon Mujigae (2015). *Bull Amer Meteor Soc*, 98(12): 2619-2640
- Bai L Q, Meng Z Y, Huang Y P, et al. 2019. Convection initiation resulting from the interaction between a quasi-stationary dryline and intersecting gust fronts: A case study. *J Geophys Res Atmos*, 124(5): 2379-2396
- Browning K A. 1964. Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. *J Atmos Sci*, 21(6): 634-639
- Browning K A. 1977. The structure and mechanisms of hailstorms//Borland S W, Browning K A, Changnon Jr S A, et al. Hail: A Review of Hail Science and Hail Suppression. Boston, MA: American Meteorological Society, 1-47
- Chen J, Zheng Y G, Zheng X L, et al. 2013. Distribution and diurnal variation of warm-season short-duration heavy rainfall in relation to the MCSs in China. *Acta Meteor Sinica*, 27(6): 868-888
- Chisholm A J, Renick J H. 1972. The kinematics of multicell and supercell Alberta hailstorms. Edmonton, Canada: Research Council of Alberta Hail Studies, 24-31
- Colman B R. 1990. Thunderstorms above frontal surfaces in environments without positive CAPE. Part I: A climatology. *Mon Wea Rev*, 118(5): 1103-1121
- Craven J P, Brooks H E, Hart J A. 2002. Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep, moist convection//Proceedings of the 21st Conference on Severe Local Storms. San Antonio: American Meteorological Society, 642-650
- Davies-Jones R. 1984. Streamwise vorticity: The origin of updraft rotation in supercell storms. *J Atmos Sci*, 41(20): 2991-3006
- Davies-Jones R, Trapp R J, Bluestein H B. 2001. Tornadoes and tornadic storms//Doswell III C A. Severe Convective Storms. Boston, MA: American Meteorological Society, 167-221
- Doswell III C A. 1987. The distinction between large-scale and mesoscale contribution to severe convection: A case study example. *Wea Forecasting*, 2(1): 3-16
- Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A. 1996. Flash flood forecasting: An ingredients-based Methodology. *Wea Forecasting*, 11(4): 560-581
- Doswell III C A. 2001. Severe Convective Storms. Boston, MA: American Meteorological Society, 1-26
- Evans J S, Doswell C A. 2002. Investigating derecho and supercell proximity soundings//Proceedings of the 21st Conference on Severe Local Storms. San Antonio: American Meteorological Society, 635-638
- Fang Z Y. 1985. The preliminary study of medium-scale cloud clusters over the Changjiang Basin in summer. *Adv Atmos Sci*, 2(3): 334-340
- Fujita T T, Byers H R. 1977. Spearhead echo and downburst in the crash of an airliner. *Mon Wea Rev*, 105(2): 129-146
- Han L, Zheng Y G, Wang H Q, et al. 2009. 3-D storm automatic identification based on mathematical morphology. *Acta Meteor Sinica*, 23(2): 156-165
- Houze Jr R A, Rutledge S A, Biggerstaff M I, et al. 1989. Interpretation of Doppler weather radar displays of midlatitude mesoscale convective systems. *Bull Amer Meteor Soc*, 70(6): 608-619
- Huang Y P, Meng Z Y, Li J, et al. 2017. Distribution and variability of satellite-derived signals of isolated convection initiation events over central eastern China. *J Geophys Res Atmos*, 122(21): 11357-11373
- Huang Y P, Meng Z Y, Li W B, et al. 2019. General features of radar-observed boundary layer convergence lines and their associated convection over a sharp vegetation-contrast area. *Geophys Res Lett*, 46(5): 2865-2873
- Inoue T, Ueda H, Inoue T. 2006. Cloud properties over the Bay of Bengal derived from NOAA-9 split window data and the TRMM PR product. *SOLA*, 2: 41-44
- Jirak I L, Cotton W R, McAnelly R L. 2003. Satellite and radar survey of mesoscale convective system development. *Mon Wea Rev*, 131(10): 2428-2449
- Johns R H, Doswell III C A. 1992. Severe local storms forecasting. *Wea Forecasting*, 7(4): 588-612
- Klemp J B, Wilhelmson R B. 1978. Simulations of right-and left-moving storms produced through storm splitting. *J Atmos Sci*, 35(6): 1097-1110
- Klemp J B, Wilhelmson R B, Ray P S. 1981. Observed and numerically simulated structure of a mature supercell thunderstorm. *J Atmos Sci*, 38(8): 1558-1580
- Klemp J B. 1987. Dynamics of tornadic thunderstorms. *Annu Rev Fluid Mech*, 19: 369-402
- Ma Y, Wang X, Tao Z Y. 1997. Geographic distribution and life cycle of mesoscale convective system in China and its vicinity. *Prog Nat Sci*, 7(5): 583-589
- Maddox R A. 1980. Mesoscale convective complexes. *Bull Amer Meteor Soc*, 61(11): 1374-1387
- McNulty R P. 1995. Severe and convective weather: A central region forecasting challenge. *Wea Forecasting*, 10(2): 187-202
- Meng Z Y, Zhang Y J. 2012. On the squall lines preceding landfalling tropical cyclones in China. *Mon Wea Rev*, 140(2): 445-470
- Meng Z Y, Yan D C, Zhang Y J. 2013. General features of squall lines in east China. *Mon Wea Rev*, 141(5): 1629-1647
- Meng Z Y, Yao D. 2014. Damage survey, radar, and environment analyses on the first-ever documented tornado in Beijing during the heavy rainfall event of 21 July 2012. *Wea Forecasting*, 29(3): 702-724
- Meng Z Y, Bai L Q, Zhang M R, et al. 2018. The Deadliest Tornado (EF4) in the past 40 years in China. *Wea Forecasting*, 33(3): 693-713
- Miller R C. 1972. Notes on Analysis and Severe Storm Forecasting Procedures

- of the Air Force Global Weather Central. Technical Report 200(Rev). Omaha: Air Weather Service, 181pp
- Moller A R. 2001. Severe local storms forecasting//Doswell III C A. Severe Convective Storms. Boston, MA: American Meteorological Society, 433-480
- Moncrieff M W, Miller M J. 1976. The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. *Quart J Roy Meteor Soc*, 102(432): 373-394
- Qin D Y, Jiang J X, Ma L, et al. 2004. Mesoscale convective systems during 20-23 June 2002 revealed by satellite observation. *Acta Meteor Sinica*, 18(1): 1-16
- Qin R, Chen M X. 2017. Impact of a front-dryline merger on convection initiation near a mountain ridge in Beijing. *Mon Wea Rev*, 145(7): 2611-2633
- Rotunno R, Klemp R B. 1982. The influence of the shear-induced pressure gradient on thunderstorm motion. *Mon Wea Rev*, 110(2): 136-151
- Rotunno R, Klemp R B. 1985. On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorms. *J Atmos Sci*, 42(3): 271-292
- Thompson R L, Edwards R, Hart J A, et al. 2003. Close proximity soundings within supercell environments obtained from the rapid update cycle. *Wea Forecasting*, 18(6): 1243-1261
- Tian F Y, Zheng Y G, Zhang T, et al. 2015. Statistical characteristics of environmental parameters for warm season short-duration heavy rainfall over central and eastern China. *J Meteor Res*, 29(3): 370-384
- Trapp R J, Weisman M L. 2003. Low-level mesovortices within squall lines and bow echoes. Part II: Their genesis and implications. *Mon Wea Rev*, 131(11): 2804-2823
- Wakimoto R M, Wilson J W. 1989. Non-supercell tornadoes. *Mon Wea Rev*, 117(6): 1130-1140
- Weisman M L, Klemp J B. 1984. The structure and classification of numerically simulated convective storms in directionally varying wind shears. *Mon Wea Rev*, 112(12): 2479-2498
- WSEC. 2006. A Recommendation for an Enhanced Fujita Scale (EF-scale). Lubbock, TX: Wind Science and Engineering Center, Texas Tech University, 95pp
- Xue M, Zhao K, Wang M J, et al. 2016. Recent significant tornadoes in China. *Adv Atmos Sci*, 33(11): 1209-1217
- Yang X L, Sun J H, Zheng Y G. 2017. A 5-yr climatology of severe convective wind events over China. *Wea Forecasting*, 32(4): 1289-1299
- Yang X R, Fei J F, Huang X G, et al. 2015. Characteristics of mesoscale convective systems over China and its vicinity using geostationary satellite FY2. *J Climate*, 28(12): 4890-4907
- Yao D, Meng Z Y, Xue M. 2019. Genesis, maintenance and demise of a simulated tornado and the evolution of its preceding Descending Reflectivity Core (DRC). *Atmosphere*, 10(5): 236
- Yu X D, Wang X M, Zhao J, et al. 2012. Investigation of supercells in China: Environmental and storm characteristics//Proceedings of the 26th Conference on Severe Local Storms. Nashville, TN: American Meteorological Society
- Zhang C X, Zhang Q H, Wang Y Q. 2008. Climatology of hail in China: 1961-2005. *J Appl Meteor Climatol*, 47(3): 795-804
- Zhang M R, Meng Z Y, Huang Y P, et al. 2019. The mechanism and predictability of an elevated convection initiation event in a weak-lifting environment in central-eastern China. *Mon Wea Rev*, 147(5): 1823-1841
- Zhang X L, Sun J H, Zheng Y G, et al. 2020. Progress in severe convective weather (SCW) forecasting in China since the 1950s. *J Meteor Res*, in press
- Zhao K, Wang M J, Xue M, et al. 2017. Doppler radar analysis of a tornadic miniature supercell during the landfall of typhoon Mujigae(2015) in South China. *Bull Amer Meteor Soc*, 98(9): 1821-1831
- Zheng Y G, Tao Z Y, Wang H Q, et al. 1999. Environment of meso- α -scale convective system development in Yellow Sea region. *Prog Nat Sci*, 9(11): 842-848
- Zheng Y G, Chen J, Zhu P J. 2008. Climatological distribution and diurnal variation of mesoscale convective systems over China and its vicinity during summer. *Chinese Sci Bull*, 53(10): 1574-1586
- Zheng Y G, Chen J. 2013. A climatology of deep convection over South China and the adjacent waters during summer. *J Trop Meteor*, 19(1): 1-15
- Zhou K H, Zheng Y G, Li B, et al. 2019. Forecasting different types of convective weather: A deep learning approach. *J Meteor Res*, 33(5): 797-809
- Zipser E J. 1982. Use of a conceptual model of the life-cycle of mesoscale convective systems to improve very-short-range forecasts//Browning K A. Nowcasting. New York: Academic Press, 191-204