

陈洪滨, 朱彦良. 2012. 雷暴探测研究的进展 [J]. 大气科学, 36 (2): 411–422, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11064. Chen Hongbin, Zhu Yanliang. 2012. Review on the observation investigation of thunderstorms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (2): 411–422.

雷暴探测研究的进展

陈洪滨 朱彦良

中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测实验室, 北京 100029

摘要 雷暴是指伴有雷鸣和闪电的强对流性天气系统, 它一方面是春末和夏季许多地区主要的降水来源, 另一方面在全球范围内每年都要造成重大的人员和财产损失, 因此是天气学、气象学和大气科学中的重要研究对象。雷暴发生和发展机制与条件的研究, 雷暴(潜势)的数值天气预报, 雷暴的临近预报预警, 都需要多种技术手段获取的观测资料来支撑。过去半个多世纪, 国内外大气和气象科学家开展了一系列雷暴探测研究, 中尺度地基加密观测网的观测揭示了雷暴单体过境时各种气要素的变化特征, 无线电探空观测给出了雷暴发生和发展有利的热力与动力学条件, 并发展了一些基于探空资料有预报意义的对流指数, 早期的飞机穿云和绕云探测对了解雷暴及其环境的温度和风场结构有很大帮助, 地基多普勒天气雷达已成为探测雷暴尤其是超级单体风暴降水及风场演变的有力工具, 卫星遥感也在雷暴的监测与研究中发挥越来越大的作用。本文试图对雷暴探测研究方面的进展进行回顾综述, 以利今后组织开展雷暴综合观测试验研究, 进一步增加对雷暴发生和发展规律的认识, 进而提高雷暴的预报预警水平。

关键词 雷暴 探测 进展

文章编号 1006-9895 (2012) 02-0411-12

中图分类号 P412

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11064

Review on the Observation Investigation of Thunderstorms

CHEN Hongbin and ZHU Yanliang

Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Thunderstorm is defined as the severe convective weather with thunder and lightning. On the one hand, it brings much useful precipitation in spring and summer in many regions, especially in semi-arid areas. On the other hand, however, its accompanying hails, heavy rain, tornados, and strong wind bursts cause much loss in life and property over the world wide. So, thunderstorm is one of severe weather phenomena to be continuously investigated in meteorological and atmospheric sciences. The observational data of thunderstorm are always required in studying storm initiation and development mechanism, developing mesoscale models, and predicting and warning thunderstorm hazards. This paper aims to review the advance in thunderstorm observation investigations with focus on the description of some field experiments over the past 6 decades.

Key words thunderstorm, observation, review

收稿日期 2011-03-23, 2011-07-07 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40975001, 中国科学院知识创新工程方向项目 KZCX2-YW-207, 公益性行业(气象)科研专项项目 GYHY201106046

作者简介 陈洪滨, 男, 1960年出生, 研究员, 主要从事大气遥感、大气探测和大气辐射传输方面的研究。E-mail: chb@mail.iap.ac.cn

1 引言

雷暴是指伴有雷鸣和闪电的强对流性天气系统,它产生在强烈的对流云中,常伴有强烈的阵雨或暴雨,时有冰雹、下击暴流和龙卷风发生,每年在世界各地造成重大人员和财产损失。因此,雷暴是天气、气象学和大气科学中的重要研究对象。

在天气学方面,我们对雷暴产生和发展的条件有了一定的了解(寿绍文等,2003;孙淑清和高守亭,2005)。强对流天气发生发展一般需要的条件有:位势不稳定层结、足够的水汽辐合与供应、强烈上升运动和抬升促发机制、环境风场合适的垂直切变以及低空急流的存在。一定的地形或地表覆盖差异(如陆地—水体分布),对于对流的促发与发展也有加强或抑制作用。有关著作中有专门章节描述孤立对流系统、带状对流系统和中尺度对流复合系统的特征及其基本模式,讨论影响对流系统发生和发展的多种因子,依据描述大气对流的理论模式定性论述大气不稳定能量、风垂直切变、云内液态水负荷、夹卷作用、对流云合并及下沉气流等因子对对流系统发生和发展的影响与作用。

由于对流雷暴发生的地点非常分散、时间尺度短和空间尺度小(1~10 km),使得目前的常规天气观测网难以监测大多数雷暴事件,其预报水平还相当的低。

在过去的半个多世纪中,为了增加对雷暴发生发展的条件和机制的科学认识,提高雷暴灾害的预报预警水平,国内外大气和气象科学家开展了一系列雷暴探测研究,包括一些较大规模的外场综合观测试验。目前,国内雷暴的研究主要集中在雷暴的预报预警、雷暴的风场结构(气流)分析、利用多普勒天气雷达探测雷暴结构与演变、利用中尺度模式模拟雷暴以及雷暴的电场结构观测与分析。

本文试图对国内外雷暴探测研究进行回顾综述,了解探测技术水平和外场试验的经验,以利于今后组织开展雷暴的综合观测试验研究,进而改进雷暴快速识别、跟踪和潜势预报系统,提高雷暴的预报预警水平。

2 国内的研究进展

2.1 雷暴的地面常规观测

地面气象台站有观测员的雷暴观测和记录。许

多地区根据多年的人工观测资料,开展了雷暴日的统计分析及其天气特征研究,对雷暴出现的日变化、季节变化及其对应的天气形势等有了许多认识。部分地区的统计分析还揭示了雷暴活动与一些气候变化因子的关系。例如,秦丽等(2006)利用北京近郊地区沙河、南苑和西郊3个测站15年(1990~2004年)的观测资料和常规探空资料,对北京地区局地雷暴大风发生的天气、气候特征和日变化特征进行了统计分析,结果显示有利于雷暴大风产生的探空结构为:低层暖湿,中高层有干冷空气,不稳定度较大,风垂直切变较大。陈思蓉等(2009)利用1951~2005年中国743个站点的雷暴和冰雹观测资料,统计其发生日数并分析变化趋势,结果表明,中国雷暴和冰雹等强对流天气发生的概率分布具有明显的地理和日变化差异,日间与夜间强对流天气分布变化很大;中国雷暴发生频繁的区域共有5个,各区域雷暴日数存在不同的年际变化特征;50多年来,全国雷暴日数除青藏高原地区略有上升外,总体呈下降趋势。

雷暴过境时本站的气象要素(气压、温度、风速、风向、降水等)都会有明显的变化。肖稳安和周咏梅(1993)利用上海地区的地面站网观测资料,分析了1983年和1985年三次暴雨和龙卷天气过程中地面气象要素和物理量场的变化,为暴雨和强对流天气预报提供了一些先兆特征。目前,我国许多省市布设了非常密集的自动气象站网,这对于雷暴大风的天气监测与预警有一定的帮助。徐亚钦等(2011)利用多普勒雷达和经过质量控制的地面加密自动站资料,选取浙江宁波地区比较典型的10次强对流天气过程,统计分析了逐时地面辐合场、累计雨量及与雷达回波之间的相互对应情况,结果表明:雷达回波前沿的地面中尺度辐合区域与未来回波的发生发展有着密切的关系,同时对主回波未来的走向和形状也有较大的影响。

2.2 探空观测

从探空资料能够计算分析雷暴发生发展需要的不稳定层结和垂直风切变,在雷暴(潜势)单站预报中,经常利用探空资料计算得到多种物理量或指数,如有效对流位能(CAPE)、对流抑制能量(CIN)、抬升指数(LI)、深对流指数(DCI)和强天气威胁指数。例如,王笑芳和丁一汇(1994)基于北京地区冰雹落区与中尺度天气系统、散度场、涡

度场、地面总能量场及相对湿度分布的关系的分析,研究了利用北京 08 时(北京时间,下同)单站探空资料预报强对流天气有无及强度的判断树方法,为强对流天气的短时预报提供了有应用价值的思路和方法。

楼茂园和沈明玉(1994)报道,1991 年 4 月 9 日 19 时杭州探空站释放的探空气球进入了超单体雷暴内部,出现了气球超速上升和下降。第一只气球 5 分钟就到达了 500 hPa 高度(一般只能到达 850 hPa 上下),重放的第二只气球 16 分钟到达 260 hPa 的高度,接着迅速下降,6 分钟之后信号消失。经与雷达资料对比发现,该单体的最大上升速度不在气球所经之处,计算得到气球超速为 10.4 m/s。第二次探空气球的轨迹为反气旋弯曲的轨迹。这是国内为数不多的探空进入雷暴获得其风场测量的研究报道。

张义军等(1995)通过对不同云系电活动、对流及降水特性相关性的研究表明,一般对流云系都具有较大的层结不稳定能量,CAPE 越大雷暴发展较强,最大云顶高度也高,雷电活动强烈。但是有时弱雷暴发生的 CAPE 还高于强雷暴的。

张翠华等(2005)研究了高原雷暴天气的大气层结,揭示其具有以下特征:整层弱不稳定,高度可以伸展到 100 hPa,整层不稳定能量不大,且分布较均匀,能量特别大的不稳定层不会出现。近地层相对湿度有一“逆湿”现象,厚度约 1~2 km。无论强雷暴天气还是弱雷暴天气都具有上述相似层结。这种层结易触发对流,发展高度很高,但强度不大,面积较小。

秦丽等(2006)探讨了一些对流参数,如最佳对流有效位能(BCAPE)、下沉对流有效位能(DCAPE)、风暴相对螺旋度(SREH)、大风指数(WINDEX)、风暴强度指数(SS1)、深厚对流指数(DCI)等,对北京地区强对流天气发展潜势的指示意义。

2.3 多普勒天气雷达探测雷暴结构及特征

多普勒天气雷达是观测雷暴结构与演变的一种有效技术,采用其风垂直分布产品(VWP)、垂直累积液水含量(VIL)及回波高度和强度联合分析,可帮助区分一般性降水、雷暴降水和雹暴。自本世纪初,我国许多气象台站装备了新一代多普勒天气雷达,利用多普勒雷达资料开展雷暴研究的工作有

许多,主要关注最大反射率因子强度、超级单体风暴中气旋最大旋转速度、最大垂直涡度、雷暴单体低层强度回波特征、雷暴单体维持时间以及雷达回波发展演变过程等。张培昌等(2001)在《雷达气象学》一书中,系统地描述了由天气雷达探测得到的一般雷暴、多单体雷暴、超级单体雷暴、中尺度对流系统(MCS)、中尺度对流复合系统(MCC)的气流和降水结构及其主要雷达回波特征,其中专门有一章介绍多普勒雷达对强风暴的探测,还给出了探测实例。俞小鼎等(2005)和许焕斌等(2006)的著作中,系统地介绍了对流风暴及其雷达回波特征、天气雷达对灾害性对流天气的探测及在预警预报和防雹增雨业务中的作用。

葛润生等(1998)使用一部多普勒天气雷达对 1995 年 6 月 22 日北京地区一次较强的雹暴天气过程进行了较密集的探测,通过风场反演得到了降水云中气流的水平结构和垂直结构,显示这次过程沿着辐合带发生,垂直剖面气流有良好的组织性,表现出强烈的旋转和上升。这种气流结构不同于传统的超级单体雹暴中的气流模式,有其局地地形特点。郎需兴等(2001)提出速度平面处理(VPP)一维风矢量场反演方法可以对雷暴的风场结构进行反演。袁野等(2007)利用合肥和马鞍山的两部多普勒天气雷达资料分析了对流云垂直运动结构。

冯锦明等(2002)对青藏高原雷达回波的观测表明,高原在雨季后,几乎每天都有雷暴发生,云底高度低,强度弱,最大回波强度一般在 30 dBZ 左右,很少超过 40 dBZ,生命期短,一般约几十分钟,水平范围小,但回波垂直伸展高度却很高,大部分都在海拔 15 km 以上,个别可达 18 km,回波顶高已不能相对表征雷暴强弱。李玉林等(2003)利用 1988~2000 年 7~9 月南昌“713”雷达及建阳和长沙 713 雷达站部分资料的回波素描图,进行统计分析得到南方夏季对流云回波的顶高、强度、性质等参数变化规律与主要特征。南方夏季对流云降水回波的平均顶高值为 9.38 km,强度季平均值为 36.9 dBZ。

陈秋萍等(2003)使用福建省建阳市和龙岩市二部新一代天气雷达 2001 年和 2002 年 7~9 月对流云系统的观测资料,统计分析在距离雷达站 50~100 km 范围内有完整生命史的对流云,其中单体的占 74.4%,多单体合并的对流云 25.6%;单体

对流云, 初始回波在 0°C 以下占该类的 85.6%, 多个单体合并对流云, 在合并前初始回波在 0°C 层以下占该类的 81.4%; 多单体合并对流云平均生命史较长 (113 min), 回波平均强度大 (55 dBZ)。

朱君鉴等 (2004) 采用 CINRAD/SA 雷达每 6 分钟一次对雷暴的立体扫描资料, 分析了我国新一代天气雷达探测到的几次冰雹云的空间结构。结果表明, 风暴中存在中尺度气旋, 其低层气旋性辐合、中低层纯气旋性旋转、中上层气旋性辐散、高层辐散。在中高层气旋的右后侧紧挨着有一个反中气旋伴随。中气旋与反中气旋形成了一个“8”型流场和“S”型的强回波区。而在“S”的两个拐弯处的内侧, 水平速度更小, 易形成大冰雹生成区。

邵玲玲等 (2006) 利用 WSR-88D 多普勒雷达的观测资料, 研究了 2004 年 7 月 12 日发生在上海地区伴有冰雹和龙卷的一次飢线天气过程, 分析了飢线回波的分布、移动和变化特征, 揭示了飢线与前方弱线状回波交汇在飢线加强和弓状回波形成中的作用, 验证了新一代天气雷达相对风暴速度场和中气旋等产品在局地强风和龙卷预警预报中的价值。许多雷达回波个例分析研究中都发现, 当两个回波块或条块合并时, 往往加强为产生雷雨大风的雷暴。

殷占福和郑国光 (2006) 利用 MICAPS、探空和 NCEP 资料, 分析了 2003 年 6 月 28 日山东德州一次强降雹天气过程降雹前的天气形势、能量场特征、含水量场。根据两部多普勒天气雷达资料, 分析了雹云的演变过程及流场结构。研究表明, 此次超级单体风暴过程由单个单体发展而来, 具有强超级单体风暴的典型特征, 移动方向在盛行风向右侧 20° 左右, 属于右移风暴。

蒋年冲等 (2007) 利用合肥新一代天气雷达观测的 1 万多个 γ 中尺度天气的对流云资料, 按 5 种天气类型对其生命史、反射率因子、回波顶高及厚度以及垂直积分液态含水量进行了统计分析。结果表明, 5 种天气系统中对流云生命史在 1 小时之内占 90%~95%, 单体厚度一般在 2~5 km, 最大厚度也有超过 10 km 的。廖玉芳等 (2007) 利用湖南的三部多普勒天气雷达资料, 对发生在湖南的 10 次强对流事件中的 22 个超级单体进行了分析, 分别由孤立风暴、多单体风暴和中尺度对流系统内的风暴发展而成, 最大反射率因子强度均超过 63 dBZ,

风暴中气旋最大旋转速度为 24 m/s, 最大垂直涡度为 $513 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

地基天气雷达网的观测资料也是当前对流天气和雷暴临近预报的主要信息源。陈明轩等 (2004) 对对流天气的临近预报技术进展进行了回顾, 主要介绍了基于雷达和气象卫星资料的雷暴识别追踪和外推预报技术、数值预报技术以及以分析观测资料为主的概念模型预报技术。检验和定性评估表明, 将多种资料和技术集于一体的概念模型专家预报系统, 其临近预报的准确率最高, 时效也最长, 是临近预报技术未来发展的主要趋势之一。

2.4 卫星观测

雷暴成熟时云顶高度高, 在红外卫星云图上反映的是亮温低值区, 因此, 可以在系列静止卫星云图上识别和跟踪雷暴云团。强雷达回波区常常位于亮温等值线密集区, 降水大多出现在亮温小于 -42°C 地区。

肖稳安 (1981) 利用 3 小时一次的日本 GMS 云图资料, 分析了 1978 年 6~8 月中国大陆六类雷暴天气, 给出了强雷暴活动的云图特征, 并指出 30 分钟一次的 GMS 云图对分析和监测大陆上的强雷暴更为有利。石定朴等 (1996) 采用 GMS 卫星红外云图的云顶红外温度 (TBB) 等值线分析方法, 对 1992 年 8 月初在中国 3 个地区不同环流背景下发生的 MCS 进行了分析, 表明该方法能较细致地揭示 MCS 的形成和发展过程。

郑永光等 (2007) 利用 1997~2004 年 5~8 月静止气象卫星逐时红外亮温资料, 对北京及周边地区的对流活动情况进行了统计分析, 结果表明 -52°C 红外亮温的统计特征可以较好地展现该地区夏季对流活动时空分布的基本气候特征, 影响北京及其周边地区的盛行对流系统有两大类。

何文英和陈洪滨 (2006) 利用 TRMM 卫星上时空匹配的测雨雷达 (PR)、微波成像仪 (TMI)、可见光和红外扫描仪 (VIRS) 观测资料, 研究了 1999 年 5 月 9 日发生在黄淮地区的一次冰雹降水过程, 综合分析了此次强对流降水过程在不同阶段的降水结构、云顶亮温和降雨厚度以及相应的微波亮温变化特征。

2.5 雷暴闪电探测

闪电是雷暴的一个特征, 除了可见的闪电外, 雷暴云放电的云闪和云地闪所产生的电磁脉冲频谱

很宽,从直流分量一直到超高频。接收和检测来自雷电的电磁波,可以确定雷电的方位、距离、放电极性、强度等参数。目前已研发成功多种单站和多站闪电定位仪,许多国家和地区部署了地面监测网,如美国的国家闪电监测网(NLDN)(Orville, 2008)。我国十多年来,开展实施了一系列雷电观测项目,雷暴闪电探测技术、应用和资料分析研究方面的文献很多(如:郅秀书等,2003)。因篇幅关系,本文不在这里进行回顾与综述。

2.6 其他观测

目前,雷暴的观测大多使用多普勒天气雷达,观测的是云雨回波,难以探测无云雨区域,天气雷达对雷暴出流入流无回波区及周边环境的精细结构探测显得无能为力。风廓线雷达在雷暴过顶时,能够测量风的垂直分布的演变情况。廖晓农(2009)的研究表明,风廓线仪观测资料是对常规探空的有效补充,有一些雷暴大风的产生与高空水平动量下传有关,在雷暴大风出现前,高空环境风陡增,在雷暴大风产生时到达地面。

卫星合成孔径雷达(SAR)具有很高的空间分辨率,水平分辨率可以达到10 m,甚至更高。SAR对海面粗糙度很敏感,能穿透云雨,对海面成像,是一种研究雷暴底层结构的新方法。甘锡林等(2007)利用星载综合孔径雷达(ERS-2 SAR)的资料,对2002年8月11日发生在台湾海峡的一次雷暴天气进行了分析,结果表明雷暴呈现椭圆形结构(俯视),长短半轴分别为13 km和10 km,风暴中心强降雨区直径达5 km,雷暴移动速度为5.9 m/s,在后部存在有组织的尾状条纹,反映了下降和上升气流有组织的结构。在雷暴外流区,冷空气反气旋式下降,周围的暖空气气旋式上升。

雷暴除了产生可以听见的雷声,还产生次声。使用次声接收器,并结合电磁场的测量,可以对20~30 km距离范围内的雷暴进行自动测量与记录(韩金林,1990)。但问题是强弱雷暴能够产生类似的次声信号,因此难以利用次声测量来预警预报。

3 国外一些雷暴综合观测试验

半个多世纪以来,随着地面气象站网、无线电探空、天气(Doppler)雷达和飞机探测技术的发展,同时随着对强对流天气精细临近预报的要求以及中尺度数值模式发展的需求,国外大气科学家和

气象学家通过综合观测及资料分析,对雷暴云的三维结构和演变规律进行了不断深入的探测研究。

早在1946年和1947年,美国分别在佛罗里达和俄亥俄州开展了“雷暴项目”,在小范围内(8英里×20英里)每隔2英里(1英里=1.609344 km)布设一个自动气象站,每分钟记录温度、湿度、气压(微气压计)、风速和风向测量值,还有雨量筒、气球探空、气象雷达和飞机的观测。Byers and Braham(1948)通过分析该项目在佛罗里达州的观测资料,揭示了对流云单体(cell)结构和演变的三个阶段,即积云、成熟和消散期。在地面资料中看出,下沉气流区对应强烈的水平辐散,而上升气流对应辐合。云中和云外探空资料分析表明,夹卷作用使得云内外的温度递减率很接近。Newton(1950)主要使用俄亥俄州“雷暴项目”观测中的探空、小球测风和地面观测资料(使用的时间序列探空资料时间间隔大于2小时),研究了锋前飑线的三维结构和机制,揭示许多飑线首先出现在冷锋面上,然后移向暖区,高层下沉气流的动能对飑线的维持非常重要。Braham(1952)基于“雷暴项目”的资料,对一个平均的雷暴单体的水和能量收支(包括源和汇)进行了定量估算,他发现以水汽形态进入雷暴的大部分水被用于维持雷暴中的冷下沉气流,伴随下沉气流的重力能量是雷暴的一个主要能量源。Battan(1953)利用1947年俄亥俄州“雷暴项目”的3 cm雷达资料,研究了对流云中降水的形成与扩展,揭示降水始于温度大于0℃的层次。“雷暴项目”产生了大量成果,并为后来的类似试验项目提供了经验。

Kuettner(1950)研究了德国 Zugspitze 气象台三年观测的125个对流云(67个雷暴和58阵雨)云中的电场和气象情况,揭示了雷暴云中电荷的平均位置、空间电荷与降水粒子的关系,以及雷暴云中有尺度小一个量级的单体(气块)。

1960年和1961年,美国多个部门联合在大平原开展了“国家强风暴项目(NSSP)”,其科学目的与1940年代的“雷暴项目”的相同,但探测研究对象主要是大平原上巨雷暴,这些雷暴具有更加有组织的非对称结构。项目使用地面 β 中尺度加密观测网、天气雷达、探空和小球测风(13个站,基本在一条线上),还有电场测量和云照相,几架飞机同时沿不同路径或在不同高度飞行探测,最大飞行高

度超过 15000 m。Newton et al. (1963) 利用该项目资料, 分析给出了一些大雷暴及环境场的结构特征, 结果显示存在干线、湿空气一侧的波状扰动、300~500 m 高度的低空急流、雷暴云顶上的强扰动及上部云侧的强阵风(与垂直阵风强度相当)。

Browning and Ludlam (1962) 和 Browning (1964) 使用之前关于运动雷暴的研究结果, 导出了雷暴气流场的一般性模式。他们还使用了一个特别冰雹雷暴的详细雷达和地面资料来细化模式, 给出了著名的 Wokingham 雷暴气流的三维模式图像。Browning and Donaldson (1963) 使用天气雷达资料分析了一个龙卷雷暴的流场和结构, 揭示强雷达反射率因子之下有一个穹隆(或钩状回波), 对应着强持续上升气流。

雷暴云中除了同时有一定强度的上升和下沉气流外, 还存在有组织的涡旋运动。Donaldson (1970) 利用单部 Doppler 雷达对 1968 年 8 月东马萨诸塞州一次强雷暴(伴随冰雹和龙卷)的观测, 研究给出雷暴云中 1~4 km 存在涡度 0.06 s^{-1} 平均半径 600 m 的涡旋核, 其中心是弱回波区。

在 20 世纪 60 年代末, 美国强风暴实验室(NSSL) 组织开展了“雷暴形态学和动力学项目”, 其中使用的一项技术是, 飞机在大雷暴附近(运动前方和两侧)投撒箔片, 由地面雷达来跟踪。Jes-sup (1972) 对 1969 年 6 月 25 日发生在俄克拉荷马州诺曼市西南方的一次右移雷暴的铝箔播撒的雷达回波进行了解译, 飞机在 15000 英尺(1 英尺 = $3.048 \times 10^{-1} \text{ m}$) 高度、28 km 范围内投出 11 个铝箔包, 每包有 40 万条长 10.5 cm、直径 1 mm 的镀铝玻璃纤维条。观测到其中 9 个进入了雷暴的降水回波, 轨迹跟踪表明在雷暴下风方有涡旋形成。Marwitz (1972) 利用 1970 年联合冰雹研究计划的 S-波段雷达资料、飞机资料以及飞机在弱回波区释放的箔片的跟踪资料, 研究了一个强冰雹云单体的结构和运动, 证实云底钩状回波区是强上升气流, 对 Browning 超级单体模型进行了细化。

Foote and Frankhauser (1973) 主要利用两架飞机在一个中等强度雹云下 3.0 km 和 2.3 km 高度的飞行测量资料, 计算分析了流场和水汽的散度值。Lemon (1976) 研究了强雷暴“尾涡”的雷达回波和地面气压结构, 提出其产生机制可能是中层环境气流使强风暴中主上升气流旋转加速, 次生出

一反气旋尾涡, 并在环境风作用下向下游运动。这一研究有助于解释钩状回波和反气旋龙卷的形成, 但缺少高层详细风场资料佐证。Goff (1976) 利用 461 m 高铁塔多层温度、气压、湿度和风资料, 研究了雷暴风暴前沿下层冷空气出流的一些特征, 给出了出流的两维位温、水平风速和垂直速度的图像; 并指出由于铁塔定点观测研究的个例不够多, 及因铁塔高度有限, 出流的来源无法给出。Ray (1976) 基于双 Doppler 雷达观测资料研究了一次龙卷雷暴过程, 从风场导出了散度和涡度场, 表明最大辐合出现在回波最小处和一对涡度中心之间。

1979 年春季在俄克拉荷马州诺曼市, NSSL 组织开展了“强环境雷暴和中尺度试验 (SESAME)”, 使用了 7 部多普勒雷达进行优化布网 (Ray et al., 1979)。试验获得的资料主要用于验证和发展中尺度模拟式。还有, SESAME 中使用闪电定位探测器的成功经验, 在 NSF 资助的 1981 年夏季“合作对流降水试验 (CCOPE)”中得到应用 (Orville, 2008)。值得一提的是, NSSL 近 40 年来组织或参与了约 30 个有关雷暴探测的外场试验项目。

Lemon and Doswell (1979) 在综合回顾大量发表及未发表的雷达、飞机、摄像和地面观测研究的基础上, 给出了强雷暴的演变合成图像, 提出在旋转上升气流边上将形成一个新的中尺度气旋, 强上升气流梯度区也是强温度梯度区, 并在龙卷形成中起着调制作用。他们指出, 在超级单体模式中还缺乏热动力学(三维)结构和降水充塞区外的动力学特征(注: 降水区中可用 Doppler 雷达探测), 虽然有飞机穿越雷暴测量, 但缺乏足够的时空取样来提供所需的细节。

Heymsfield (1981) 研究了 Illinois 一个雷暴云中的下沉气流和涡旋的演变, 使用了三部多普勒雷达观测资料, 分析结果表明, 强雷暴下沉气流 10~20 m/s, 非强雷暴接近 10 m/s。Knupp and Cotton (1982) 利用 Doppler 观测资料, 研究了一个强、准稳定山区雷暴中的湍流结构, 给出了径向风切变和湍流动能耗散率的估计, 结果表明: 在强雷暴成熟期, 下部为规则的上升和下沉气流, 而在中上部湍流强度在增加, 雷暴中部的湍流尺度达 500 m 以上。Wakimoto (1982) 使用 Doppler 雷达和无线电探空资料研究了雷暴云阵风锋(gust front)(或下击暴流)的演变过程, 一个主要发现是在雷暴强回

波核前存在由阵风锋上翻形成的卷 (horizontal roll), 伴随较弱的降水。

Szoke et al. (1986) 用雷达资料研究了大西洋热带对流云的反射率因子和速度垂直廓线, 给出了近 300 个单体的统计量, 例如, 其平均和核区的上升气流速度分别为 2.9 m/s 和 5.0 m/s (陆地雷暴的为 6.3 m/s 和 11.8 m/s, 飓风的为 3.8 m/s 和 6.7 m/s)。

Vasiloff et al. (1986) 使用高时空分辨率的二个半小时的双多普勒雷达观测资料, 研究了一次小雷暴复合体演变为超级单体雷暴的过程和特征, 资料分析支持这样的观点: 即雷暴类型是连续性的, 而不仅是多单体和超级单体两类。

为了研究中尺度对流系统 MCSs, 1985 年 5~6 月在俄克拉荷马—堪萨斯州开展了“初雷暴项目 (Pre-STORM)” (Cunning, 1986), 采用了多普勒雷达与数字雷达 (8 部)、地面中尺度网站 (80 个)、高空探空 (14 个站)、小球测风 (12 个点)、风廓线 (3 部加一个超声系统)、闪电定位系统 (7 个点)、卫星和研究飞机 (2 架) 来收集获取资料, 作为新技术的风廓线和机载多普勒雷达在协调的观测系统得到了检验。地面中尺度网站相距约 50 km, 资料实时通过卫星传回中心。NOAA 的 P3 飞机通过实地测量和辐射计及多普勒雷达遥感探测 MCSs 的内部结构, 怀俄明大学空中国王飞机主要探测 MCSs 的微物理和流场结构, 以及夜间低空急流。2 个月期间共进行了 16 次联合观测任务, 其中大多数是两天。Brandes (1990) 使用 Oklahoma-Kansas Pre-STORM 试验收集的资料描述了 1985 年 5 月一次中尺度对流系统及其涡旋的演变与结构, 雷暴特征包括飚线、中尺度上升和下沉区、层状降水、波动流和一个 β 中尺度涡旋。

在 NOAA、北达科他州、NSF 等基金支持下, 1989 年 6 月 12 日~7 月 22 日在北达科他州地区开展了“北达科他州雷暴项目 (NDTP)”, 进行高原雷暴的合作研究 (Boe et al., 1992)。项目使用了三部地基 Doppler 雷达、六架飞机和其他仪器, 研究内容包括雷暴结构、动力学, 输送、扩散与夹卷, 云冰的生成与转化, 大气化学和电学。观测试验最大的特点是使用了多种示踪物 (由飞机播撒) 来研究输送、扩散与夹卷及冰云核化等。

Mueller et al. (1993) 使用加密探空和中尺度

网 (8 站, 两两相距 10~15 km) 研究了雷暴的触发, 结果表明探空 (仅空间加密, 每天 2~4 次) 和中尺度网资料提供的不稳定 (能量) 指数与雷暴触发和强度无直接关系, 而深厚的湿层和午后积云有指示意义。Wilson and Mueller (1993) 报告了主要基于天气 Doppler 雷达晴空边界层的观测进行的雷暴出现和演变临近预报的试验。他们认为, 改进临近预报水平需要更多更详细的边界层热动力参量的观测和积云发生与演变的观测, 增加对雷暴形成与演变的基本认识。

Fu et al. (1994) 用探空和 ISCCP 资料分析了海温和海面风场辐散对大气热动力结构和深对流出现的影响, 揭示即使存在正的对流潜势能量 (CAPE), 稳定边界层对对流有抑制作用; 深对流出现与海温有关, 还受到海面风辐散的抑制作用。

Martner (1997) 报告, 用 NOAA/C 多普勒雷达观测一个雷暴的阵风锋和出流, 形成了概念性模型, 而且发现主雷暴区中的强上升气流与下沉气流的过渡区相当小, 即雷达垂直指向观测到, 约在 1.3 km 的高度强上升气流经过 1 分钟后就是同样强度的下沉气流。

Koch and Clark (1999) 使用 COPS-91 (联合 Oklahoma 风廓线研究试验-91) 的资料, 详细地研究了一个冷锋过程, 基于 Doppler 天气雷达、风廓线、RASS、探空等资料的综合分析, 清晰地给出沿冷锋的重力涌流和激波 (gravity current and the bore, 对应细线型雷达反射率回波), 激波向前的传播与低层中尺度小急流 (jetlet) 和强雷暴的发展相联系, 但计算表明限制在浅层的激波的上升强度和持续时间不足以触发深对流, 但联合重力涌流则是可能的。

Lehmiller et al. (2001) 使用一部 404 MHz UHF 风廓线雷达, 测量了一个经过 Oklahoma Lamont 站点的龙卷超级单体中尺度气旋, 通过天气雷达估算并扣除降水粒子速度后得到了 6 分钟时间分辨率的三维风廓线, 首次测得雷暴中最大达 50 m/s 的上升气流速度。综合给出了风场的二维垂直剖面。

Minnis et al. (2005) 使用大气辐射测量项目 (ARM) 的资料, 比较了探空与快速更新循环 40 km 分辨率模式的气象情况和云状况, 虽然两者的温度和湿度高度相关, 但探空云中湿度明显高于模式

的,并给出了云量和云概率的新湿度阈值。

MacGorman et al. (2005) 报告了“强雷暴起电和降水研究 (STEP)”项目 2000 年夏季的气球探空情况,探空测量了超级单体中的矢量电场、温度、湿度和气压,探空首次穿过了雷暴中的上升和下沉气流区,而且在之前没有电场探空与极化雷达和闪电三维成像的同步观测。2003 年和 2004 年 5~6 月在俄克拉荷马州开展了“雷暴起电和闪电试验 (TELEX)” (MacGorman et al., 2008),项目重点研究的是闪电和其他电学雷暴特性与雷暴结构、上升气流和降水形成的关系,具体研究反极性结构和 MCSs 层状云降水区中的电特性,并发展能够监测所有类型闪电的业务应用技术。项目中使用了一部 11 cm 波长的极化多普勒雷达、两部 5 cm 移动多普勒雷达、1 个移动大气探测系统、球载电场仪、1 架装备仪器穿越雷暴的 T-28 飞机和 1 个三维闪电成像网。

当前我们对深对流有了相当好的认识,但是还不知道在高分辨模式中如何更好的表达它们,问题在于我们还没有理解为什么、何时和何地暴发深对流的原因。为了研究这些问题并改进高分辨模式结果,国际上相继在三个地点开展了相互补充的系列外场试验,即 2002 年夏在美国大平原的“国际水项目 (IHOP)”、2003 年和 2004 年夏在南英格兰海上地区的“对流雷暴发生项目 (CSIP)”和 2007 年夏在德国西南部/法国东部的“对流和地形触发降水研究 (COPS)”,这三个项目都重视详细观测初生的对流云 (Browning et al., 2007)。

卫星遥感资料也用于研究雷暴云的动态演变。Adler and Fenn (1979) 使用静止卫星数字红外资料,研究雷暴垂直增长速度及云顶结构与地面出现强天气 (龙卷、冰雹和强风) 的关系,导出了联系垂直增长率与垂直速度及流出层散度的关系式。Ley and Peltier (1981) 使用 NOAA-2 卫星资料详细分析了一次强雷暴后的中尺度云带的传播特性,研究了其形成和传播机制。Mack et al. (1983) 使用 GOES 卫星 3 分钟高时间分辨率立体资料研究了一次飑线过程雷暴云顶的变化,强云泡顶的增长率为 $4.4\sim 7.7$ m/s,其结果还表明,即使 GOES 的短时间间隔资料对于研究雷暴云小尺度特征仍是不够的。随着观测的时空分辨率的提高和卫星资料的增多,有许多研究工作涉及利用卫星资料定量估计

对流云降水、与其他资料融合分析诊断、资料同化并改进数值模式的模拟和预报等。

4 小结与建议

综合以上的回顾可见,对于雷暴的探测已经发展了自动气象站、雷达、卫星、探空、闪电定位等技术手段,地基中尺度加密观测网的观测揭示了雷暴单体过境时各种气要素的变化特征,无线电探空观测给出了雷暴发生和发展的有利的热力与动力学条件,并发展了一些基于探空资料有预报意义的对流指数,早期的飞机穿云和绕云探测对了解雷暴及其环境的温度和风场结构有很大帮助,地基多普勒天气雷达已成为探测雷暴尤其是超级单体风暴的降水和风场演变的有力工具,卫星遥感也在雷暴的监测与研究中的作用越来越大。60 多年来,国内外尤其是美国,组织开展了一系列雷暴和中尺度对流系统的综合观测试验;基于地面加密站网、雷达和飞机等观测资料分析,形成了对流发生、发展和消散的概念图像及动力和微物理场的演变知识,尤其是建立了超级单体和多单体的动力学概念模型。同时,对于孤立单体雷暴、超级单体雷暴、对流云团 (族)、飑线、中尺度对流系统的天气背景有了许多认识,相应地发展了雷暴天气临近预报方法和模式。

但是,由于雷暴发生的时空尺度较小,目前的常规气象探测网和卫星遥感还难以跟踪监测,还缺乏对于雷暴精细结构的探测资料,缺乏对于雷暴生命史的完整测量,尤其是缺乏对雷暴促发机制和环境要素的精细监测,使得当前雷暴的短临预报能力还很低,雷暴冰雹、大风、龙卷风等灾害天气的漏报和虚报率很高。为了提高对强雷暴的监测与预报预警水平,国外正在发展一些更高时间和空间分辨率的探测技术,包括相控阵多普勒天气雷达、静止卫星重点区域快速成像探测技术和密集小功率 X-波段雷达网络技术等。

虽然,我国气象和大气研究者对一些中小尺度雷暴及降水过程个例进行了观测资料分析和模式模拟研究,但是没有充分利用已有的全部资料,没有将资料和模式有机结合起来,缺少个例之间的比较和综合分析,缺少个例新特征的概念性模型的建立。虽然开展了一些暴雨观测试验,但缺少对于不同天气背景下中小尺度对流的综合性外场组网观测

试验, 缺乏有针对性的穿越对流云及周围环境的飞机观测, 缺乏多部雷达雷暴云及其环境场的同步观测资料, 缺少对流云中动力、热力、湿度和微物理场分布的联合多技术实地探测资料, 缺乏新探测技术的整合与资料融合技术。

建议在我国数个典型地区组织并持续开展雷暴和中尺度对流系统的综合观测试验, 采用多部多普勒天气雷达、加密探空和密集中小尺度地面站观测技术, 采用多通道微波辐射计、毫米波多普勒云雷达、GPS 接收机、云成像仪、雷电探测仪、微型无人飞机探空等技术, 开展对流触发和加强机制的探测与理论研究, 加强对产生冰雹、大风、龙卷风等灾害性强雷暴的综合探测研究, 加强雷暴与环境场及对流云与对流云间相互作用的研究, 加强对雷暴微物理和起电机制的研究, 加强资料与模式结合研究, 为雷暴天气的短期和临近预报提供观测技术和诊断分析的基础, 进而综合利用多种观测技术和分析技术, 不断改进雷暴的诊断、识别、跟踪和预报系统及可能引发的灾害预警系统。

致谢 感谢凌超和李军帮助收集部分文献资料。

参考文献 (References)

- Adler R F, Fenn D D. 1979. Thunderstorm intensity as determined from satellite data [J]. *J. Appl. Meteor.*, 18: 502–517.
- Battan L J. 1953. Observations on the formation and spread of precipitation in convective clouds [J]. *J. Meteor.*, 10 (5): 311–324.
- Boe B A, Stith J L, Smith P L, et al. 1992. The North Dakota Thunderstorm Project: A cooperative study of high plains thunderstorms [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 73 (2): 145–160.
- Braham R R Jr. 1952. The water and energy budgets of the thunderstorm and their relation to thunderstorm development [J]. *J. Meteor.*, 9 (4): 227–242.
- Brandes E A. 1990. Evolution and structure of the 6–7 May 1985 mesoscale convective system and associated vortex [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 118: 109–127.
- Browning K A. 1964. Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 21: 634–639.
- Browning K A, Donaldson R J Jr. 1963. Airflow and structure of a tornadic storm [J]. *J. Atmos. Sci.*, 20: 533–545.
- Browning K A, Ludlam F H. 1962. Airflow in convective storms [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 88: 117–135.
- Browning K A, Morcrette C J, Nicol J, et al. 2007. The convective storm initiation project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 88: 1939–1955, doi: 10.1175/BAMS-88-12-1939.
- Byers H R, Braham R R Jr. 1948. Thunderstorm structure and circulation [J]. *J. Meteor.*, 5 (3): 71–86.
- 陈明轩, 俞小鼎, 谭晓光, 等. 2004. 对流天气临近预报技术的发展与研究进展 [J]. *应用气象学报*, 15 (6): 754–766.
- Chen Mingxuan, Yu Xiaoding, Tan Xiaoguang, et al. 2004. A brief review on the development of nowcasting for convective storms [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 15 (6): 754–766.
- 陈秋萍, 冯晋勤, 陈冰, 等. 2003. 新一代天气雷达观测的福建夏季对流云特征 [J]. *应用气象学报*, 2003, 14 (增刊): 180–186.
- Chen Qiuping, Feng Jinqin, Chen Bing, et al. CINRAD observation on convective clouds in summer in South China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 14 (Suppl.): 180–186.
- 陈思蓉, 朱伟军, 周兵. 2009. 中国雷暴气候分布特征及变化趋势 [J]. *大气科学学报*, 32 (5): 703–710.
- Chen Sirong, Zhu Weijun, Zhou Bing. 2009. Climate characteristic and variation tendency of thunderstorm in China [J]. *Chinese Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (5): 703–710.
- Cunning J B. 1986. The Oklahoma-Kansas preliminary regional experiment for STORM-Central [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 67: 1478–1486.
- Donaldson R J Jr. 1970. Vortex signature recognition by a Doppler radar [J]. *J. Appl. Meteor.*, 9: 661–670.
- 冯锦明, 刘黎平, 王致君, 等. 2002. 青藏高原那曲地区雨季雷达回波、降水和部分热力参量的统计特征 [J]. *高原气象*, 21 (4): 368–374.
- Feng Jinming, Liu Liping, Wang Zhijun, et al. 2002. The statistic characteristics of radar echo and precipitation and some thermodynamic variables in Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 21 (4): 368–374.
- Foote G B, Frankhauser J C. 1973. Airflow and moisture budget beneath a Northeast Colorado hailstorm [J]. *J. Appl. Meteor.*, 12: 1330–1353.
- Fu R, Del Genio A D, Rossow W R. 1994. Influence of ocean surface conditions on atmospheric vertical thermodynamic structure and deep convection [J]. *J. Climate*, 7: 1092–1108.
- 甘锡林, 黄韦良, 杨劲松, 等. 2007. 利用合成孔径雷达研究中尺度雷暴的细结构 [J]. *遥感技术与应用*, 22 (2): 246–250.
- Gan Xilin, Huang Weigen, Yang Jingsong, et al. 2007. The study of fine structure of a mesoscale thunderstorm from SAR image [J]. *Remote Sensing Technology and Application (in Chinese)*, 22 (2): 246–250.
- 葛润生, 姜海燕, 彭红. 1998. 北京地区雹暴气流结构的研究 [J]. *应用气象学报*, 9 (1): 1–7.
- Ge Runsheng, Jiang Haiyan, Peng Hong. 1998. Flow structure of hailstorm in Beijing area [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 9 (1): 1–7.
- Goff R C. 1976. Vertical structure of thunderstorm outflow [J].

- Mon. Wea. Rev., 114: 1429–1440.
- 韩金林. 1990. 次声在雷暴探测中的应用 [J]. 应用声学, 9 (2): 1–5. an Jinlin. 1990. Application of infrasounds in thunderstorm detection [J]. Applied Acoustics (in Chinese), 9 (2): 1–5.
- 何文英, 陈洪滨. 2006. TRMM 卫星对一次冰雹降水过程的观测分析研究 [J]. 气象学报, 64 (3): 364–376. He Wenying, Chen Hongbin. 2006. Analyses of evolutionary characteristics of a hailstorm precipitation from TRMM observations [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 64 (3): 364–376.
- Heysfield G M. 1981. Evolution of downdrafts and rotation in an Illinois thunderstorm [J]. Mon. Wea. Rev., 109: 1969–1988.
- Jessup E A. 1972. Interpretations of chaff trajectories near a severe thunderstorm [J]. Mon. Wea. Rev., 100 (9): 653–661.
- 蒋年冲, 刘娟, 胡雯, 等. 2007. 安徽夏季中 γ 尺度对流云的雷达回波特征 [J]. 气象, 33 (10): 9–14. Jiang Nianchong, Liu Juan, Hu Wen, et al. 2007. Summer meso- γ scale convective clouds radar echo characteristics in Anhui [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 33 (10): 9–14.
- Knupp K R, Cotton W R. 1982. An intense, quasi-steady thunderstorm over mountainous terrain. Part III: Doppler radar observations of the turbulent structure [J]. J. Atmos. Sci., 39: 359–368.
- Koch S E, Clark W L. 1999. A nonclassical cold front observed during COPS-91: Frontal structure and the process of severe storm initiation [J]. J. Atmos. Sci., 56: 2862–2890.
- Kuettner J. 1950. The electrical and meteorological conditions inside thunderclouds [J]. J. Meteor., 7: 322–332.
- 郎需兴, 魏鸣, 葛文忠, 等. 2001. 一种新的单多普勒雷达风场反演方法 [J]. 气象科学, 21 (4): 417–424. Lang Xuxing, Wei Ming, Ge Wenzhong, et al. 2001. A new method of retrieving wind field using single Doppler radar [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 21 (4): 417–424.
- Lehmiller G S, Bluestein H B, Neiman P J, et al. 2001. Wind structure in a supercell thunderstorm as measured by a UHF wind profiler [J]. Mon. Wea. Rev., 129: 1968–1986.
- Lemon L R. 1976. Wake vortex structure and aerodynamic origin in severe thunderstorm [J]. J. Atmos. Sci., 33: 678–685.
- Lemon L R, Doswell C A III. 1979. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis [J]. Mon. Wea. Rev., 107: 1184–1197.
- Ley B E, Peltier W R. 1981. Propagating mesoscale cloud bands [J]. J. Atmos. Sci., 38: 1206–1219.
- 李玉林, 杨梅, 曾光平, 等. 2003. 南方夏季对流的降水回波特征分析 [J]. 应用气象学报, 14 (增刊): 126–134. Li Yulin, Yang Mei, Zeng Guangping, et al. 2003. Characteristics of summer convective cloud precipitation echoes in South China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 14 (Suppl.): 126–134.
- 廖晓农. 2009. 北京雷暴大风日环境特征分析 [J]. 气候与环境研究, 14 (1): 54–62. Liao Xiaonong. 2009. The analysis on environmental condition for wind gust in Beijing area [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (1): 54–62.
- 廖玉芳, 俞小鼎, 唐小新, 等. 2007. 基于多普勒天气雷达观测的湖南超级单体风暴特征 [J]. 南京气象学院学报, 30 (4): 433–443. Liao Yufang, Yu Xiaoding, Tang Xiaoxin, et al. 2007. Characteristics of supercell storms in Hunan detected by Doppler weather radars [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 30 (4): 433–443.
- 楼茂园, 沈明玉. 1994. 一个超单体雷暴的结构及其成因分析 [J]. 浙江气象科技, 15 (1): 1–4, 12. Lou Maoyuan, Shen Mingyu. 1994. Analysis on the structure of a supercell thunderstorm [J]. Zhejiang Meteorology Science and Technology (in Chinese), 15 (1): 1–4, 12.
- MacGorman D R, Rust W D, Krehbiel P, et al. 2005. The electrical structure of two supercell storms during STEPS [J]. Mon. Wea. Rev., 133: 2583–2607.
- MacGorman D R, Rust W D, Ziegler C L, et al. 2008. TELEX The Thunderstorm Electrification and Lightning Experiment [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 89: 997–1013.
- Mack R A, Hasler A F, Adler R F. 1983. Thunderstorm cloud top observations using satellite stereoscopy [J]. Mon. Wea. Rev., 111: 1949–1964.
- Martner B E. 1997. Vertical velocities in a thunderstorm gust front and outflow [J]. J Appl. Meteor., 36: 615–622.
- Marwitz J D. 1972. The structure and motion of severe hailstorms. Part I: Supercell storms [J]. J. Appl. Meteor., 11: 166–179.
- Minnis P, Yi Y H, Huang J P, et al. 2005. Relationships between radiosonde and RUC-2 meteorological conditions and cloud occurrence determined from ARM data [J]. J. Geophys. Res., 110: D23204, doi: 10.1029/2005JD006005.
- Mueller C K, Wilson J W, Crook N A. 1993. The utility of sounding and mesonet data to nowcast thunderstorm initiation [J]. Wea. Forecasting, 8: 132–146.
- Newton C W. 1950. Structure and mechanism of the prefrontal squall line [J]. J. Meteor., 7: 210–222.
- Newton C W, Arnett A B, Coleman H L, et al. 1963. Environmental and thunderstorm structures as shown by National Severe Storms Project observations in Spring 1960 and 1961 [J]. Mon. Wea. Rev., 91 (6): 271–292.
- Orville R E. 2008. Development of the national lightning detection network [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 89: 180–190, doi: 10.1175/BAMS-89-2-180.
- 郗秀书, 张广庶, 孔祥贞, 等. 2003. 青藏高原东北部地区夏季雷电特征的观测研究 [J]. 高原气象, 22 (3): 209–216. Qie Xiushu, Zhang Guangshu, Kong Xiangzhen, et al. 2003. Observation on the summer lightning discharge in the Northeastern verge of Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 22 (3): 209–216.
- 秦丽 李耀东 高守亭. 2006. 北京地区雷暴大风的天气—气候学特

- 征研究 [J]. 气候与环境研究, 11 (6): 754–761. Qin Li, Li Yaodong, Gao Shouting. 2006. The synoptic and climatic characteristic studies of thunderstorm winds in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (6): 754–761.
- Ray P S. 1976. Vorticity and divergence fields within tornadic storms from dual-Doppler observations [J]. J. Appl. Meteor., 15: 879–890.
- Ray P S, Stephens J J, Johnson K W. 1979. Multiple-Doppler radar network design [J]. J. Appl. Meteor., 18: 706–710.
- 邵玲玲, 黄宁立, 邹锐, 等. 2006. 一次强飚线天气过程分析和龙卷强度级别判定 [J]. 气象科学, 26 (6): 627–632. Shao Lingling, Huang Ningli, Wu Rui, et al. 2006. The analysis of a strong squall line process and classification of tornado intensity [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 26 (6): 627–632.
- 石定朴, 朱文琴, 王洪庆, 等. 1996. 中尺度对流系统红外云图云顶黑体温度的分析 [J]. 气象学报, 54 (5): 600–611. Shi Dingbu, Zhu Wenqin, Wang Hongqing, et al. 1996. Cloud top blackbody temperature analysis of infrared satellite image for mesoscale convective system [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 54 (5): 600–611.
- 寿绍文, 励申申, 姚秀萍. 2003. 中尺度气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 370pp. Shou Shaowen, Li Shenshen, Yao Xiuping. 2003. Mesoscale Meteorology [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 370pp.
- 孙淑清, 高守亭. 2005. 现代天气学概论 [M]. 北京: 气象出版社, 207pp. Sun Shuqing, Gao Shouting. 2005. Introduction to Modern Synoptic Meteorology [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 207pp.
- Szoke E J, Zipser E J, Jorgensen D P. 1986. A radar study of convective cells in mesoscale systems in GATE. Part I: vertical profile statistics and comparison with hurricanes [J]. J. Atmos. Sci., 43 (2): 182–197.
- Vasiloff S V, E. A. Brandes E A, Davies-Jones R P, et al. 1986. An investigation of the transition from multicell to supercell storms [J]. J. Climate Appl. Meteor., 25: 1022–1036.
- Wakimoto R M. 1982. The life cycle of thunderstorm gust fronts as viewed with Doppler radar and rawinsonde data [J]. Mon. Wea. Rev., 110: 1060–1082.
- 王笑芳, 丁一汇. 1994. 北京地区强对流天气短时预报方法的研究 [J]. 大气科学, 18 (2): 173–183. Wang Xiaofang, Ding Yihui. 1994. Study on method of short-range forecast of severe convective weather in Beijing Area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 18 (2): 173–183.
- Wilson J W, Mueller C K. 1993. Nowcasts of thunderstorm initiation and evolution [J]. Wea. Forecasting, 8: 113–131.
- 肖稳安. 1981. 用地球静止气象卫星云图分析我国几类强雷暴天气 [J]. 大气科学, 5 (4): 398–406. Xiao Wenan, 1981. The analysis of severe thunderstorms in China with GMS pictures [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 5 (4): 398–406.
- 肖稳安, 周咏梅. 1993. 上海暴雨和强对流天气的地面观测分析 [J]. 南京气象学院学报, 16 (1): 61–66. Xiao W, Zhou Y M, 1993. Surface observational analysis of torrential rain and severe convective weather in Shanghai [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 16 (1): 61–66.
- 许焕斌, 段英, 刘海月. 2006. 雹云物理与防雹的原理和设计——对流云物理与防雹增雨 [M]. 北京: 气象出版社, 296pp. Xu Huanbin, Duan Ying, Liu Haiyue. 2006. Hailstorm Physics, and Principle and Design of Hail Suppression—Convective Cloud Physics, Hail Suppression and Precipitation Enhancement [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 296pp.
- 徐亚钦, 翟国庆, 黄旋旋, 等. 2011. 基于雷达和自动站资料研究风暴演变规律 [J]. 大气科学, 35 (1): 134–146. Xu Yaqin, Zhai Guoqing, Huang Xuanxuan, et al. 2011. A study of the evolution regularity of storm based on the data of radar and automatic station [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (1): 134–146.
- 殷占福, 郑国光. 2006. 一次强风暴三维结构的观测分析 [J]. 气象, 32 (9): 9–16. Yin Zhanfu, Zheng Guoguang. 2006. Analysis of three-dimensional structure of a severe hailstorm [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 32 (9): 9–16.
- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 2005. 多普勒天气雷达原理与业务应用 [M]. 北京: 气象出版社, 314pp. Yu Xiaoding, Yao Xiuping, Xiong Tingnan, et al. 2005. Principles and Applications of Doppler Weather Radar [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 314pp.
- 袁野, 杨光, 胡雯, 等. 2007. 利用双多普勒雷达分析对流云垂直运动结构试验 [J]. 应用气象学报, 18 (3): 306–313. Yuan Ye, Yang Guang, Hu Wen, et al. 2007. The upright motion structure in convection cloud by dual-Doppler radar [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 18 (3): 306–313.
- 张翠华, 言穆弘, 董万胜, 等. 2005. 青藏高原雷暴天气层结特征分析 [J]. 高原气象, 24 (5): 741–747. Zhang Cuihua, Yan Muhong, Dong Wansheng, et al. 2005. Analyses on atmospheric stratification characteristics of thunderstorms over Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24 (5): 741–747.
- 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 2001. 雷达气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 499pp. Zhang Peichang, Du Bingyu, Dai Tiepi. 2001. Radar Meteorology [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 499pp.
- 张义军, 华贵义, 言穆弘, 等. 1995. 对流和层状云系电活动、对流及降水特性的相关分析 [J]. 高原气象, 14 (4): 396–405. Zhang Yijun, Hua Guiyi, Yan Muhong, et al. 1995. The correlation analysis of electric activity, convection and precipitation in convective cloud and stratus [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 14 (4): 396–405.
- 郑永光, 陈炯, 陈明轩, 等. 2007. 北京及周边地区 5~8 月红外云

图亮温的统计学特征及其天气学意义 [J]. 科学通报, 52 (14): 1700–1706. Zheng Yongguang, Chen Jiong, Chen Minguan, et al. 2007. Statistical characteristics of satellite IR imagery during May to August in Beijing region and their weather implication [J]. Chinese Science Bulletin, 52 (14): 1200–1706.

朱君鉴, 郑国光, 王令, 等. 2004. 冰雹风暴中的流场结构及大冰雹生成区 [J]. 南京气象学院学报, 27 (6): 735–742. Zhu Junjian, Zheng Guoguang, Wang Ling, et al. 2004. The air flow and the large-hail generation area in hailstorms [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 27 (6): 735–742.