

崔新艳, 陈明轩, 秦睿, 等, 2025. 雷暴大风形成机理和临近预报的研究进展[J]. 气象, 51(7): 773-788. Cui X Y, Chen M X, Qin R, et al, 2025. Research advances in the formation mechanisms and nowcasting of thunderstorm gales[J]. Meteor Mon, 51(7): 773-788(in Chinese).

雷暴大风形成机理和临近预报的研究进展*

崔新艳¹ 陈明轩^{1,2} 秦睿¹ 杨璐¹

1 北京城市气象研究院, 北京 100089

2 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

提 要: 雷暴大风是指强对流天气系统引发的风速 $\geq 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风, 是一种产生巨大灾害的中小尺度强对流天气, 了解其形成机理与对其进行精确临近预报和预警是防灾减灾的重点。文章系统性综述了雷暴大风形成机理和临近预报的国内外研究成果, 内容包括发生雷暴大风的天气形势和环境特征、不同种类雷暴大风的形成机理和风暴组织形态以及雷暴大风的临近预报技术。大部分雷暴大风由超级单体、飑线和弓状回波产生, 主要形成机制包括强下沉气流、阵风锋、动量传输、出流与环境风之间的水平气压梯度、中尺度涡旋的动力强迫和累加效应以及上升流对低层暖湿入流的抽吸作用等。在上述回顾基础上, 针对雷暴大风形成机理和临近预报的难点、亟需解决的问题, 进行了讨论。

关键词: 雷暴大风, 形成机理, 临近预报

中图分类号: P445, P457

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.092401

Research Advances in the Formation Mechanisms and Nowcasting of Thunderstorm Gales

CUI Xinyan¹ CHEN Mingxuan^{1,2} QIN Rui¹ YANG Lu¹

1 Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

2 Key Laboratory of Meteorological Disaster Ministry of Education,

Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: Thunderstorm gales refer to strong winds with a wind speed $\geq 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ caused by severe convective weather systems. It is one of mesoscale and microscale severe convective weather causing huge disasters. Understanding their formation mechanisms and conducting accurate nowcasting and early warning are the keys to disaster prevention and mitigation. This article summarizes the existing studies on the formation mechanisms and nowcasting of thunderstorm gales, including synoptic patterns, ambient characteristics, different formation mechanisms and windstorm morphologies, as well as nowcasting technology. It has been found that most thunderstorm gales are generated in supercells, squall lines, and bow echoes through strong downdraft, gust front, momentum transmission, horizontal pressure gradient between outflow and ambient wind, dynamic forcing and superimposed effect of mesoscale vortex, and pumping effect of updraft on low-level warm and moist inflow, etc. On the basis of the above review, the difficulties and much-needed issues of the formation mechanisms and nowcasting of thunderstorm gales are discussed.

Key words: thunderstorm gale, formation mechanism, nowcasting

* 国家重点研发计划(2022YFC3004103)、北京市科技计划课题(Z221100005222012)和中国气象局重点创新团队(CMA2022ZD07)共同资助
2024 年 3 月 1 日收稿; 2024 年 9 月 24 日收修定稿

第一作者: 崔新艳, 主要从事强对流天气诊断及短时临近预报研究. E-mail: xycui@ium.cn

通讯作者: 陈明轩, 主要从事强对流天气演变机理及短时临近预报研究. E-mail: mxchen@ium.cn

引言

雷暴大风是常见的强对流天气之一,通常指由强对流天气系统引发的风速 $\geq 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风(美国 $\geq 50 \text{ kn}$,即 $25.72 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)(Bunkers et al, 2020; 樊李苗和俞小鼎, 2013),常伴随强降水和冰雹发生,是一种可产生巨大灾害的中小尺度强对流天气。雷暴大风会对工农业生产、人民生活、航空、基础设施和应急管理产生重大影响,经常造成重大人员伤亡和经济损失(Doswell III, 2003; Ashley and Mote, 2005; Ashley, 2007; Brown et al, 2023)。例如,2015年6月1日由于强下击暴流导致的湖北监利“东方之星”游轮翻沉事件,造成442人死亡(郑永光等, 2016)。随着全球变暖的不断加剧,雷暴大风的强度和频率有不断上升的趋势,因此提升雷暴大风的临近预报水平具有重大意义(郑永光等, 2015)。但是由于雷暴大风具有局地性、突发性和破坏力大的特点,并且缺少对雷暴大风形成机理的认识,所以目前对雷暴大风的临近预报和预警仍然十分困难(Yang et al, 2017)。

欧美对于雷暴大风的研究起步较早,有大量详细的观测资料和研究成果(Ashley, 2007; Black and Ashley, 2010; Gatzert, 2013; Groenemeijer et al, 2017; Taszarek et al, 2019)。美国的雷暴大风主要发生在落基山脉东部,在大平原地区最为频发(Doswell III et al, 2005),61%的雷暴大风发生在6月和7月的午后(Kelly, 1985),平均每年造成84人死亡(Ashley, 2007)。而欧洲的雷暴大风在欧洲中部特别是波兰最容易出现,夏天出现的频率最高,达到平均每两天一次(Pacey et al, 2021)。

我国关于雷暴大风的研究也取得了一系列丰富成果,但受限于观测还存在较多不足,一方面由于我国缺少针对雷暴大风的大样本详细灾害记录信息;另一方面因为雷暴大风尺度较小,业务天气雷达和中尺度地面观测网无法有效完整地记录灾害信息。费海燕等(2016)统计分析我国的强雷暴大风($> 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)的气候特征,发现中东部地区是强雷暴大风的高发区,3月开始在华南和江南出现,4月进入华中和华东,5月进入华北、东北和西北地区。而Yang et al(2017)发现我国雷暴大风主要发生在东部地区暖季的午后,春季广东出现的频率最高,夏季华北和广东出现的频率都比较高。

为了了解目前国内外关于雷暴大风的研究进展和存在的难题,本文对雷暴大风的形成机理和临近预报进行了系统性回顾。第一部分介绍发生雷暴大风的天气形势和环境特征,第二部分和第三部分分别介绍雷暴大风的形成机理和风暴组织形态,第四部分介绍雷暴大风的临近预报技术,最后一部分探讨了需要进一步解决的问题。

1 天气形势和环境特征

雷暴大风的发生常常受到天气尺度系统、热动力条件和水汽等多种环境因素的影响(廖晓农等, 2008)。识别雷暴大风发生的天气形势和环境特征有利于提高其临近预报水平(Brooks et al, 2011; Hitchens and Brooks, 2014)。关于发生雷暴大风的天气形势国内外已经进行了大量研究(Coniglio et al, 2004; 杨晓霞等, 2014; 杨新林等, 2017)。例如,Coniglio et al(2004)将美国大部分 Derecho 的背景环流分为高空槽型(40%)、高空脊型(20%)和纬向型(12%)。杨晓霞等(2014)将山东雷暴大风的天气形势分为槽前型、槽后型、副热带高压(以下简称副高)边缘型和横槽型。陈晓欣等(2022)将我国 Derecho 的背景环流分为强槽型、弱槽型、副高边缘型和高空干冷平流强迫型,其中强槽型出现的频率最高,高空干冷平流强迫型出现的频率最低。

此外,研究雷暴大风发生的环境特征也有助于提前预警这类灾害性天气(俞小鼎和郑永光, 2020; 郑永光, 2020)。国内外很多学者发现,绝大多数雷暴大风发生时对流层中层存在明显的干层(700~400 hPa),并有较大的垂直风切变和温度直减率(Taszarek et al, 2017; Pacey et al, 2021; Gallus and Duhachek, 2022; 廖晓农等, 2009; 方翀等, 2014; 2015; 费海燕等, 2016)。强的垂直风切变环境有利于对流系统的组织(Schumacher and Rasmussen, 2020),而强组织性对流系统的大面积降水蒸发可以产生沿着系统前边界的强下沉出流和大范围地面大风(Johns and Hirt, 1987)。在有强垂直风切变和一定对流有效位能(CAPE)的环境中,可以产生超级单体风暴和飑线(Doswell III, 2001; 郑媛媛等, 2004)。在有较弱垂直风切变和较大CAPE的环境中,也可能产生脉冲风暴(Wakimoto, 2001),但其生命史一般不超过15 min,初始回波高度明显高于普通雷暴单体,可以产生下击暴流,对其进行临近预报

和预警十分困难。

2 雷暴大风形成机理

目前国内外针对雷暴大风的形成机理做了许多研究,发现雷暴大风可由不同的物理机制产生(Wakimoto, 2001),具有显著的时空变化特征(Brown et al, 2023),主要机制包括:(1)强下沉气流[后侧入流急流(RIJ)或下击暴流](Weisman, 1992);(2)阵风锋(密度流)(Droegemeier and Wilhelmson, 1987);(3)高空向地面的动量传输(Mahoney et al, 2009);(4)出流和环境风之间的水平气压梯度(Richter et al, 2014);(5)超级单体低层中气旋的动力强迫(Trapp and Weisman, 2003);(6)准线状对流系统(QLCS)中涡旋或书端涡的累加效应(Atkins and St. Laurent, 2009a);(7)上升流对低层暖湿入流的抽吸作用(Johns and Doswell III, 1992)等。其中入流区域地面大风较少见,多出现在上升气流很强的风暴附近。有时同一大风过程中会有多个机制同时发生,不同机制可以产生不同量级的风,目前其对雷暴大风的贡献程度很难分离,需进一步量化分析(陈圣劼等, 2022)。雷暴大风平均每年造成美国 19.1 人死亡,欧洲 7.8 人死亡,这两个地区的雷暴大风死亡率量级相同,其中下击暴流大风和 Derecho 是非常强烈的雷暴大风(Schoen and Ashley, 2011; Pacey et al, 2021)。

2.1 下击暴流大风

大多数雷暴大风由对流风暴内的强下沉气流产生(Johns and Doswell III, 1992; 廖晓农等, 2009)。下击暴流是强对流中的强下沉气流,会产生地面辐散型直线或曲线大风(Fujita, 1978; Fujita and Wakimoto, 1983),通常持续时间短,局地性强,一般最大风速超过 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Doswell III, 2001)。关于下击暴流的研究始于 20 世纪 60 年代美国商业客机坠毁事件和美国国家运输安全委员会(NTSB)随后的调查。芝加哥大学的 Fujita (1976)在对 1975 年美国东方航空 66 号航班事故的详细分析之后,假设一个还没被观测到和了解的低层风切变可能是这个事故的原因,他将这个现象称为“下击暴流”。但是 Fujita 关于存在下击暴流的假说遭到了科学界的质疑,随后在 1978 年的伊利诺斯州北部下击暴流气象研究项目(NIMROD)期间,大约有 50 个微下击暴

流被多普勒天气雷达探测到,因此证明了下击暴流的存在(Fujita, 1978)。之后为了更好地研究下击暴流,于 1982 年又开展了联合机场天气研究项目(JAWS)(McCarthy et al, 1982),相关研究描述了下击暴流的成因、结构和演化(Wilson et al, 1984; Fujita, 1985; Mahoney III and Rodi, 1987; Hjelmfelt, 1988),证实了下击暴流与低层垂直风切变之间的联系,并且开发了专门用于探测下击暴流的机场终端多普勒天气雷达(TDWR)网。随后,1986 年在美国东南部也进行了微下击暴流和强雷暴项目(MIST)(Dodge et al, 1986)。

下击暴流通常为 γ 中尺度(约 $2 \sim 20 \text{ km}$),可以分为微下击暴流($< 4 \text{ km}$, 最小可能 $< 100 \text{ m}$)(Wakimoto, 1985; Atkins and Wakimoto, 1991)和宏下击暴流($> 4 \text{ km}$)(Fujita, 1985)。微下击暴流可以产生持续时间不超过 5 min 的大风(Fujita, 1990),宏下击暴流产生的大风可持续至少 45 min,影响路径超过 50 km (Childs et al, 2021)。多个下击暴流同时发生可以形成下击暴流簇或下击暴流群(主轴大于 400 km)(Fujita and Wakimoto, 1981)。另外,还可以根据下击暴流发生期间是否伴有强降水分为干下击暴流(Wakimoto, 1985)和湿下击暴流(Atkins and Wakimoto, 1991)。当对流较弱时,常常出现干下击暴流,即不伴随降水或降水量非常小。美国平原上的下击暴流以干下击暴流为主(Wakimoto, 1985),我国的干下击暴流通常发生在水汽含量较小的春季高原地区,如青藏高原、黄土高原和内蒙古高原。产生干下击暴流时通常边界层较厚,云底较高,云底之下基本为干绝热层,相对湿度很低,下沉气流内的降水蒸发,在云底形成雨幡,但当下沉气流到达地面后仍然可能产生较强的地面大风。虽然产生干下击暴流的雷暴看上去不强,很浅薄,但也会对飞机的起降产生严重威胁(俞小鼎等, 2006a)。湿下击暴流通常发生在美国东南部,环境较湿,边界层较浅(Atkins and Wakimoto, 1991)。湿下击暴流在产生大风的同时也会产生强降水或冰雹(俞小鼎等, 2006b)。当下击暴流的冷池出流显著加强时会形成阵风锋(Wilson and Wakimoto, 2001; Cui et al, 2023),阵风锋也可以产生地面大风(王秀明等, 2023)。此外, Fujita (1981)将下击暴流分为静止型和移动型。当冷的下沉气流聚集在地面附近,并随着时间的推移将最强的出流风转移到地表上方时,就会发生静止型下击暴流。相反,移动型

下击暴流将冷空气和高压区域抛在身后,使最强的风下降到地面。

普通单体风暴多产生单个下击暴流,超级单体风暴和多单体风暴可以产生多个下击暴流(王一童等,2022)。下击暴流主要是由风暴内的强下沉气流在近地面辐散造成,目前基于观测和数值模拟的研究发现,产生下击暴流的机制主要有:垂直扰动气压梯度力、降水的拖曳作用、降水相变(蒸发、融化和升华)的潜热释放、动量下传和水平气压梯度力等(Doswell III, 1982; Mueller and Carbone, 1987; Srivastava, 1987; Vescio and Johnson, 1992; Markowski and Richardson, 2010; Orf et al, 2012)。降水的拖曳作用是云中下沉气流的启动机制,之后在初始阶段最主要的机制是液态水蒸发或冰晶融化引起的中层冷却(Srivastava, 1987),这种负浮力是下沉气流维持甚至加强的重要因素(Wakimoto, 2001),持续的降水拖曳作用是气流下沉到近地面的主要机制(Straka and Anderson, 1993; 刘洪恩, 2001)。在下沉气流到达地面前面的最后阶段,前端入流阻挡形成的高压产生向下的气压梯度力,是下沉气流最终到达地面形成灾害性大风的重要机制(Kessinger et al, 1988)。

2.2 Derecho

Derecho 是由飚线(Hocker and Basara, 2008)和弓状回波(Celiński-Mysław and Matuszko, 2014)等产生的持续数小时的大范围直线大风(Hinrichs, 1888; Johns and Hirt, 1987; Corfidi et al, 2016a; 陈晓欣等, 2022),水平尺度可达几百千米(Fujita and Wakimoto, 1981),移动速度较快。“Derecho”一词最早由 Finley(1888)在一篇关于艾奥瓦州龙卷的文章中提出,但是爱荷华大学的物理学教授 Hinrichs 认为 Finley 列出的艾奥瓦州龙卷事件中混杂了许多直线大风事件(Galway and Finley, 1984),随后他决定使用“Derecho”(西班牙语的意思是“径直的”)来定义这些直线大风(Hinrichs, 1888),这与“Tornado”的引用类似,“Tornado”也起源于西班牙语,表示“旋转的”(Ludlum, 1970)。Johns and Hirt (1987)首先将下击暴流簇或下击暴流群(Fujita and Wakimoto, 1981)导致的直线大风事件称为 Derecho(Fujita and Wakimoto, 1981; Johns and Hirt, 1987),并基于观测风场和风破坏报告总结出识别 Derecho 的六条标准(Weiss et al, 2002; Smith et al,

2013)。前人研究中经常使用的 Derecho 识别标准为 Johns and Hirt(1987)标准(简称 JH87 标准), Bentley and Mote(1998)标准(简称 BM98 标准)和 Coniglio and Stensrud(2004)标准(简称 CS04 标准),这是美国最常用的三种 Derecho 识别标准。而 Corfidi et al(2016a)增加了 Derecho 定义中的强风带长度和宽度阈值,来更好区分 Derecho 事件和一般雷暴大风事件,同时也纳入了产生 Derecho 的风暴结构信息,包括弓状回波、RIJ 和中尺度对流涡旋(MCV)等中尺度对流特征(Weisman, 1993)。陈晓欣等(2022)考虑到我国显著的季风气候特点和地形分布影响,对美国的 Derecho 识别标准进行修正,提出了我国的 Derecho 识别标准,该标准与美国大部分标准的差异主要体现在站点大风记录的阈值上,该标准的阈值为 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而美国大多数标准的阈值为 $33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。表 1 列出了国内外主要的 Derecho 识别标准,虽然不同标准存在分歧,但是所有的定义都表明 Derecho 是大面积(400 km 或更长)的破坏性大风,因此可能会造成巨大的经济损失和人员伤亡(Ashley and Mote, 2005)。

美国的 Derecho 大约每年发生 15 次(Bentley and Mote, 1998; Bentley and Sparks, 2003),风速有时很大(超过 $44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),春季、夏季平均移动路径约为 700 km(Coniglio and Stensrud, 2004)。暖季 Derecho 主要出现在春末和夏季的明尼苏达州—俄亥俄州西部和大平原南部,发生时间主要集中在夜间,而冷季 Derecho 主要出现在密西西比河下游和墨西哥湾沿岸,主要集中在下午到夜间,经常与窄冷锋雨带(NCFR; Gatzen, 2011)有关,暖季 Derecho 多于冷季(Bentley and Mote, 1998; Bentley and Sparks, 2003; Coniglio and Stensrud, 2004)。而且美国的 Derecho 具有群发性,平均每年约有 6 个 Derecho 序列(在 72 h 内形成的连续 Derecho),大多数序列包括 2~3 个 Derecho 事件(Ashley et al, 2005; 2007)。Surowiecki and Taszarek(2020)发现波兰 1.5% 的中尺度对流系统(MCS)和 9.1% 的 QLCS 可以产生 Derecho,暖季 Derecho 比冷季的影响更大,但破坏路径更短。中国的 Derecho 较少,风速大部分为十几到三十几米每秒,影响范围较小(付晓辉等, 2007),主要发生在华北、华东、江南和华南地区,高频区从春季到夏季先向北移动后向南移动,主要出现在 3—8 月的午后到前半夜,6 月的频率最高(陈晓欣等, 2022)。

表 1 五种 Derechos 识别标准

Table 1 Criteria used to identify Derechos

序号	JH87 标准	BM98 标准	CS04 标准	Corfidi16 标准	Chen22 标准
1	必须存在一个超过 $26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的对流性阵风集中区域,区域长轴长至少 400 km	同 JH87 标准	同 JH87 标准	必须存在一个超过 $26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的对流性阵风集中区域,区域长轴长至少 650 km	必须存在一个超过 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的对流性阵风集中区域,区域长轴长大于 400 km
2	风力报告显示事件发生不是随机的,必须按时间顺序演变	同 JH87 标准	同 JH87 标准	同 JH87 标准	同 JH87 标准
3	区域中必须至少有 3 个达到 F1 级损害或阵风超过 $33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风力报告,且每个报告点之间的间隔至少 64 km	不采用此条标准	低级别大风事件不采用此条标准;中级别大风事件同 JH87 标准;高级别大风事件定义为区域中必须至少有 3 个阵风超过 $38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 或相同级别破坏的风力报告,且其中至少 2 个必须发生在此次大风过程中的 MCS 阶段	不采用此条标准	区域中必须至少有 3 个阵风超过 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的国家级观测站,且任意 2 个观测站之间的距离超过 64 km,站点出现大风的时刻与风暴过境的时刻大致对应
4	连续风力报告之间的时间间隔不超过 3 h	连续风力报告之间的时间间隔不超过 2 h	连续风力报告之间的时间间隔不超过 2.5 h	连续风力报告之间的时间间隔不超过 1 h	同 JH87 标准
5	由地面气压场和风场所反映的相关 MCS 必须具有时间和空间连续性	相关 MCS 必须具有时间和空间连续性,且连续风力报告之间的纬度或经度间距不超过 2°	相关 MCS 必须具有时间和空间连续性,且在阵风范围中的每个风力报告必须距离其他风力报告不超过 200 km	相关 MCS 必须具有时间和空间连续性,且在阵风范围中的每个风力报告必须距离其他风力报告不超过 100 km	同 JH87 标准
6	通过雷达图像确认破坏性大风区必须是同一 MCS 的一部分	将对应时刻的事件发生位置绘制在地图上,确认破坏性大风区必须是同一 MCS 的一部分	同 JH87 标准	同 JH87 标准	造成多个大风站点记录的 MCS 在雷达图像或卫星云图上必须属于同一个对流系统

注:引自 Johns and Hirt,1987;Bentley and Mote,1998;Coniglio and Stensrud,2004;Corfidi et al,2016a;陈晓欣等,2022。

Derecho 可以分为单个细长地带的前进型 (76%) 和一系列细长地带的连续型 (24%) (Johns and Hirt,1987)。前进型 Derecho 比连续型 Derecho 移动得快,经常发生在晚春和夏季的暖锋或静止锋附近或北面 (Bentley and Mote,1998;Coniglio and Stensrud,2004;Guastini and Bosart,2016),通常与弱天气尺度系统相关,伴随强烈的低层不稳定性,因此难以预测。常对应一条相对短的飑线(约 60~400 km),有一个或多个弓状回波,可以传播数百千米,风暴的平均移速为 $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,移动方向常相对平均风矢量(850~200 hPa)略偏右(平均 15°)。连续型 Derecho 经常发生在冬末和春季的冷锋前面,常由大范围的飑线产生,飑线的平均移速通常 $\leq 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,移动方向几乎与平均气流方向垂直,常伴随一个强地面低压中心 (Johns and Hirt,1987)。另外,Derecho 也可以分为强强迫型、弱强迫型和混合型 (Evans and Doswell III,2001)。强强迫型

Derecho 出现在有较大低层风和低层垂直风切变,以及较小不稳定性的环境中,而弱强迫型 Derecho 发生在垂直风切变较小和 CAPE 较大的环境中。强强迫出现在大多数连续型 Derecho 中,而弱强迫在前进型 Derecho 中更常见。

与一般的雷暴大风相比,产生 Derecho 的环境有深层垂直风切变(特别是 0~10 km),较大的不稳定性 and 低层湿度,较低的地面露点温度,中高层较干,存在高空急流 (Evans and Doswell III,2001;Coniglio et al,2004;2011;Bentley and Logsdon,2016;Corfidi et al,2016b)。陈晓欣等(2022)发现中国的 Derecho 环境与美国相比,CAPE 明显较小,0~6 km 垂直风切变较大,这是因为中美 Derecho 的季节分布存在差异。一般产生 Derecho 的风暴比平均风移动得快,这样 Derecho 才能长期存在 (Corfidi,2003;Campbell et al,2017)。产生 Derecho 的机制主要有:下沉 RIJ (Weisman,1992)、下击暴流

(Fujita and Wakimoto, 1981)、阵风锋(Wakimoto, 1982)、中高压(Johnson and Hamilton, 1988)和中涡旋(MV)(Evans et al, 2014)。当存在较干的中层环境时,有利于更强的蒸发冷却和下沉运动,下沉RIJ(Weisman, 1992)或下击暴流(Fujita, 1978)更可能导致地面大风(Mahoney and Lackmann, 2011),而MV可以产生狭窄的大风(Atkins and St. Laurent, 2009a),与Derecho产生的最严重风破坏直接相关(Miller and Johns, 2000)。

3 风暴组织形态

大部分雷暴大风由超级单体(Richter et al, 2014)和QLCS(Earl and Simmonds, 2019)产生。QLCS主要包括飚线和弓状回波,雷暴大风多位于QLCS的前沿(李国翠等, 2014)。美国和欧洲冷季的雷暴大风通常由QLCS产生(Gatzen, 2013; Ashley et al, 2019),欧洲暖季的雷暴大风大部分由超级单体产生(Pacey et al, 2021),其他地区则主要由无组织对流或超级单体产生(Smith et al, 2013; Yang et al, 2017)。有时在一个雷暴大风过程中会有多个风暴组织形态出现,例如,2009年6月3日由超级单体风暴演变为弓状回波飚线的过程在河南商丘和安徽产生了大范围雷暴大风,最大风速超过 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,导致32人死亡。超级单体阶段的地面大风由多个超级单体的强下沉气流的冷池合并导致,弓状回波飚线阶段的地面大风由风暴的强下沉气流辐散、强冷池密度流和层状云内的降水粒子蒸发产生(王秀明等, 2012)。

3.1 超级单体大风

我国超级单体造成的雷暴大风事件较多,最大风速可达 $60.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。超级单体可以单独存在或镶嵌在QLCS中。超级单体产生的灾害性大风大多位于后侧下沉出流附近,前侧下沉气流和强烈的上升气流偶尔也会在地面附近产生小范围强风(郑媛媛等, 2004; 吴芳芳等, 2013; 王一童等, 2022)。超级单体风暴的中气旋可以将环境中的干空气夹卷进下沉气流中,降水蒸发形成向下的负浮力,从而产生强下沉气流(王秀明等, 2023)。如果中气旋向地面发展,导致地面气压下降,低压中心与下沉气流在地面附近形成的高压中心之间形成强的气压梯度,当

下沉气流到达地面后,在该水平气压梯度力的作用下地面风速进一步加强,可能产生灾害性地面大风,且一般出现在超级单体钩状回波附近(俞小鼎, 2011)。低层中气旋因为会产生扰动低压,所以过境时会引起地面降压(翟丽萍等, 2019),但应当注意没有中气旋的多单体风暴过境时也会出现类似的地面降压(Mahale et al, 2016)。

超级单体风暴的概念模型如图1所示,地面观测站的风速首先会因前侧阵风锋的过境而增大,而且风向突变。阵风锋过境时一般没有降水,其后是前侧下沉气流(FFD)——第一个近地面大风核。前侧阵风锋与风暴主体的距离在不同的风暴中有一定的差异,有时当阵风锋紧贴风暴主体时,在雷达回波上很难将其分辨出来。在暴雨、冰雹和龙卷等强对流天气之后是后侧下沉气流(RFD)——第二个近地面大风核(Markowski, 2002)。

3.2 飚线大风

飚线和弓状回波属于QLCS,是导致雷暴大风的两种主要对流系统(Smith et al, 2012),回波特征为有低层径向速度大值区、阵风锋和显著的中层径向辐合(MARC)等(俞小鼎等, 2020)。飚线是我国夏季较常见的强对流系统之一,常包含弓状回波结构。即使不出现弓状回波,飚线也会产生雷暴大风,若飚线某一段中出现MARC或中气旋,则该段飚线前沿出现雷暴大风的可能性很大(谢健标等, 2007;

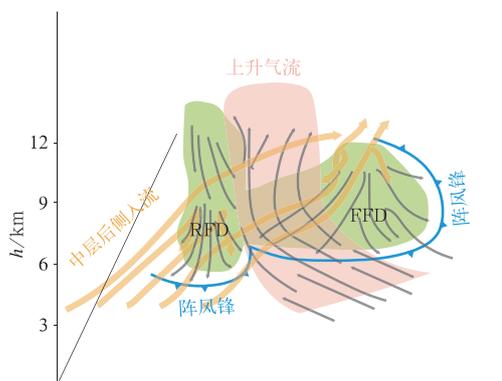


图1 一个超级单体风暴的概念模型
(引自 Lemon and Doswell III, 1979;
Markowski and Richardson, 2010)

Fig. 1 Schematic diagram of a supercell
windstorm (from Lemon and Doswell III, 1979;
Markowski and Richardson, 2010)

俞小鼎,2011)。成熟阶段飚线的典型结构如图 2 所示,地面中尺度气压扰动包括:对流带前侧的中低压、对流带后侧的中高压和层状降雨区后侧的尾流低压。在初始阶段,中高压后面还没有出现尾流低压,发展到成熟阶段,在层状降雨区的后边界地面出现由于下沉加热导致的尾流低压,这时飚线内出现一个从对流线后方 5 km 高度下沉到对流层低层的 RIJ。一般在地面中高压前方形形成地面大风,如果通过宽阔的水域,地面摩擦减小,在尾流低压的附近也可能产生地面大风(Johnson and Hamilton,1988; Vescio and Johnson,1992)。

弓状回波是 MCS 的一种,一个小区域内加速导致雷达回波中出现弓形,经常在顶点处产生雷暴

大风(Johns and Doswell III,1992; Przybylinski,1995;俞小鼎和郑永光,2020)。弓状回波的形成方式主要有以下四种:(1)离散单体合并(Burke and Schultz,2004;Klimowski et al,2004);(2)飚线演变为弓状回波(Burke and Schultz,2004);(3)超级单体演变为弓状回波(王福侠等,2016)和(4)飚线-单体合并(French and Parker,2012;2014)。弓状回波大多数情况下是飚线的一部分,镶嵌在飚线中(廖晓农等,2008),一条飚线有时会包含好几段弓状回波,每一段弓状回波的顶点处通常都会产生地面大风(范玉芬等,2015)。线状对流演变为弓状回波,之后变为逗点云系的详细过程见图 3(Fujita,1978)。弓状回波北部的气旋式书端涡(直径 70~80 km)增强

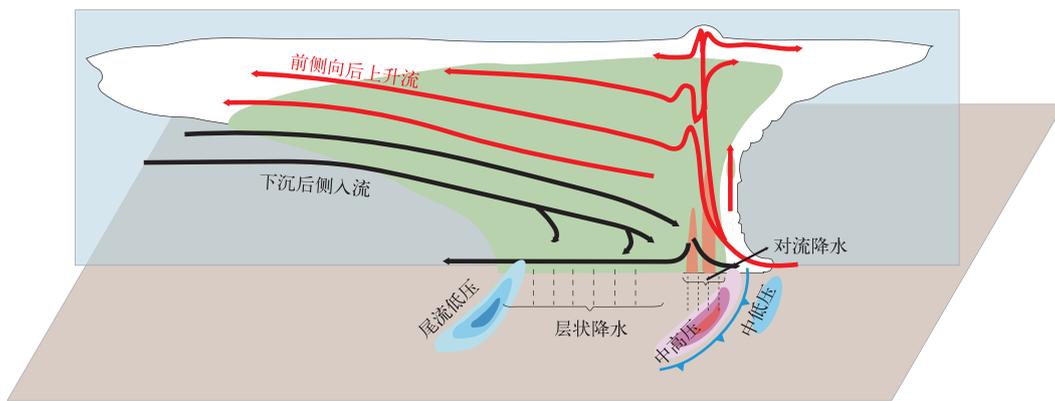
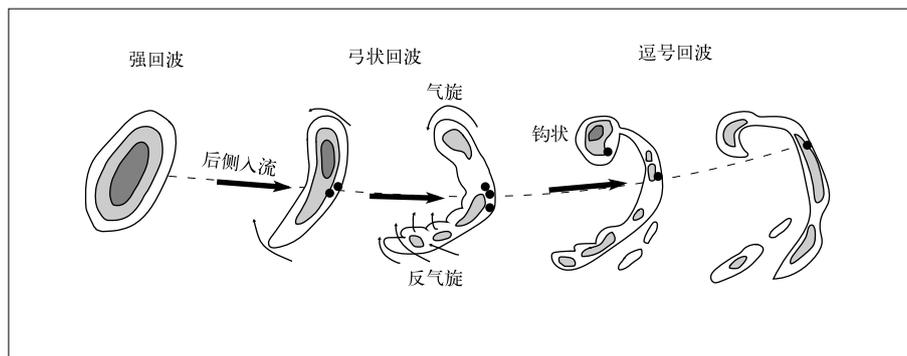


图 2 一个成熟阶段飚线的剖面 and 近地面图

(引自 Johnson and Hamilton,1988; Houze et al,1989; Vescio and Johnson,1992; Wakimoto,2001; Markowski and Richardson,2010)

Fig. 2 Schematic cross-section and surface field during a squall line mature stage (from Johnson and Hamilton,1988; Houze et al,1989; Vescio and Johnson,1992; Wakimoto,2001; Markowski and Richardson,2010)



注:黑色粗箭头表示 RIJ,黑点表示龙卷的位置。

图 3 一个弓状回波生命周期示意图(引自 Fujita,1978; Wakimoto et al,2006b)

Fig. 3 Schematic diagram of the life cycle of a bow echo (from Fujita,1978; Wakimoto et al,2006b)

了 RIJ, 并启动了“弓状过程”, 在弓状回波阶段破坏性大风可能出现在顶点处(Wakimoto, 2001)。之后科氏力作用增强了北部气旋性涡旋(Skamarock et al, 1994), 随着时间的推移产生了一个不对称的系统尺度结构(Houze et al, 1989), 此时弓状回波进入逗号回波阶段, 下击暴流减弱。在逗号回波阶段也可以产生破坏性大风(Pfost and Gerard, 1997; Trapp et al, 1999), 北部气旋性涡旋下降到地面也会增强地面风速(Atkins et al, 2004)。

下降的 RIJ 到达地面是造成弓状回波地面大面积破坏性大风的主要原因(Wheatley et al, 2006), 然而在这些大面积的破坏中嵌入了较小尺度的破坏, 这些较小尺度的破坏是由下击暴流(Wakimoto, 2001)、低层 MV(Trapp and Weisman, 2003; Weisman and Trapp, 2003)或龙卷造成(Forbes and Wakimoto, 1983)。RIJ 由扰动低压引起的水平扰动气压梯度力产生(Lafore and Moncrieff, 1989), 中层 RIJ 源自书端涡, 低层 RIJ 源自地面斜压水平涡度(Meng et al, 2012), 能否产生雷暴大风还要看 RIJ 是否及地(Wakimoto, 2001)。一般 MV 产生向下的垂直扰动气压梯度力, 可以局部增强中低层 RIJ(Xu et al, 2015b), 最强的地面大风出现在 MV 南侧与 RIJ 出流的共同作用区域(Atkins et al, 2005; Wakimoto et al, 2006a; Wheatley et al, 2006)。MV 也可以产生中低压, 从而产生扰动水平气压梯度力来加速地面大风(Trapp and Weisman, 2003; Wakimoto et al, 2006a)。MV 主要通过垂直运动对近地面斜压水平涡度的作用产生(Trapp and Weisman, 2003; Atkins and St. Laurent, 2009a; 2009b), 其强度取决于环境的垂直风切变、冷池强度、科氏力和微物理过程, 也与地面摩擦形成的水平涡度和水平切变不稳定性有关(Xu et al, 2015a; Conrad and Knupp, 2019), 不过水平涡度与垂直运动的关系还需要进一步研究(Parker et al, 2020)。

3.3 其他风暴组织形态大风

除了上述与雷暴大风相关的典型风暴组织形态以外, 还有相当一部分雷暴大风由弱组织或非线状对流系统产生。例如, Klimowski et al(2003)统计美国北部高原地区导致雷暴大风的主要对流组织形态时发现, 49%的雷暴大风由 QLCS 产生, 9%由超级单体产生, 其他的由普通孤立单体和多单体风暴等产生。Yang and Sun(2018)对华北雷暴大风的统

计研究表明, 超过 36%的雷暴大风由普通孤立单体和多单体风暴产生。孤立风暴产生的雷暴高压可以通过水平扰动气压梯度力来增强水平出流, 也可以产生与负浮力方向相反的垂直扰动气压梯度力, 从而减弱下沉气流使其无法及地(Mahale et al, 2016)。郭英莲和孙继松(2019)的统计结果表明造成湖北省地面大风的主要是非线状中尺度对流系统(41.9%), 孤立对流风暴次之(39.3%)。目前关于非典型风暴在什么条件下会产生雷暴大风的研究较少, 这是因为非线状中尺度对流系统中形成的局地大风比较复杂, 常常由两种以上不同尺度的风叠加形成(Wakimoto, 2001)。内部镶嵌的强风暴单体的下沉辐散流出(Miller and Johns, 2000)、阵风锋前沿的 γ 中尺度涡旋(Trapp and Weisman, 2003)、阵风锋后几千米处与开尔文-亥姆霍兹不稳定性(KHI)有关的小尺度强下沉气流(Mahoney III, 1988)、重力内波(Bernardet and Cotton, 1998)和单体局地的动量下传等不同物理过程导致的局地强风机制还需要更加深入细致的研究。当冷池和雷暴高压很强时, 冷池单纯的气压梯度力也可以产生致灾性大风(Markowski and Richardson, 2010)。此外, 也要注意冷池周围的中尺度热低压, 强风一般会出现在雷暴高压与热低压之间, 此处出现的大风可能没有对流回波, 预报和预警难度较大(马中元等, 2009)。

4 雷暴大风临近预报技术

中外学者在雷暴大风的预报和预警方面做了大量研究。已有研究利用常规探空和多普勒天气雷达资料, 对雷暴大风过程的环境条件、多普勒雷达回波特征和雷达衍生参数进行分析, 总结提炼出雷暴大风的预报指标。其中探空 $T-\ln p$ 图和对流参数在雷暴大风的潜势预报中有一定指示意义。例如, 地面露点温度、 0°C 层高度、大气温度直减率、自由对流高度(LFC)、CAPE、深层垂直风切变和沙氏指数(SI)等。多普勒天气雷达因其高时空分辨率, 成为雷暴大风临近预报和预警的重要数据来源。业务上雷暴大风主要通过弓状回波、MARC(通常位于 $2\sim 7\text{ km}$ 高度处, 径向速度差 $> 25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)、低层大风核、低层径向辐散和高质心反射率因子等雷达回波特征来进行识别预警(Schmocker, 1996; 俞小鼎等, 2020)。此外, 也可以根据高分辨率雷达和/或卫星图像检测

到的阵风锋/雷暴速度和阵风锋平均速度与地面阵风峰值比率,发布雷暴大风警告(Sherburn et al, 2021)。目前,国内外多个机构已经研发了不同强对流天气的临近预报算法,包括对雷暴大风的临近预报。例如,美国国家强风暴实验室(NSSL)开发的预警决策支持系统-综合信息系统(WDSS-II)使用多部雷达产品进行风暴单体、冰雹、雷暴大风的识别和追踪,能够进行0~1 h的强对流天气预报(Lakshmanan et al, 2007)。香港天文台从20世纪90年代就开始建设的“小涡旋”临近预报系统(SWIRLS)能够进行风暴的追踪和预报(Li et al, 2000)。另外,国内外学者也根据雷达回波特征研发了多个针对下击暴流的算法,例如,NSSL的破坏性下击暴流预报和探测算法(DDPDA)(Eilts, 1996), Smith et al(2004)的致灾性下击暴流($>26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)预警算法,以及我国学者研发的多个下击暴流算法(陶岚和戴建华, 2011;罗辉等, 2015;肖艳姣等, 2021)。

在多种强对流天气中,雷暴大风的产生往往受多种因素的影响,很难通过多普勒天气雷达中的一个或几个特征指标判断是否会出现雷暴大风,这导致在强对流天气预报中,关于雷暴大风的自动识别算法远少于冰雹和短时强降水的自动识别算法,而且雷暴大风的识别效果也有待提高。除了利用观测数据和数值模式输出数据进行雷暴大风的临近预报之外,近年来图像处理技术和机器学习方法的快速发展也为雷暴大风的临近预报提供了新思路。这是因为一方面将图像处理技术与人工识别经验相结合可以更有效地从雷达图像中自动识别和提取与雷暴大风相关的特征;另一方面使用机器学习方法可以充分挖掘雷达图像提供的观测信息,发现数据中潜在的客观规律,自动给出雷暴大风的临近预报结果。最近很多国内外学者已经开始热衷于研究人工智能在这方面的应用(袁悦, 2020)。周金莲等(2011)和李国翠等(2013; 2014)利用天气雷达的识别特征和模糊逻辑法建立了雷暴大风的识别算法。Lagerquist et al(2017)使用5种机器学习方法对雷达数据和模式输出数据中的几百个特征进行分类,得到雷暴大风识别模型,取得了较好的预报效果。杨璐等(2018)使用支持向量机算法和从雷达反射率因子、径向速度和速度谱宽数据中确定的9个特征,建立了一个雷暴大风预报模型。袁悦(2020)使用图像处理、计算机视觉和机器学习的理论和方法,并与气象学知识和业务经验相结合,设计了预报雷暴大风的

智能算法。上述算法中的很多特征来源于识别强对流天气的特征,专门针对雷暴大风设计的特征较少,因此设计一些与雷暴大风相关的新特征将有助于提高雷暴大风的识别效果。另外,很多机器学习模型是一个“黑箱”系统,只能给出最终的概率预报结果,因此使用人工智能方法设计一个可解释和具有辅助决策能力的模型比一个仅给出最终决策结果的模型对气象预报员更有帮助。这样可以发现更多的预报因子和提高对模型的认知,进而为预报员和决策者提供更准确和及时的指导(Gagne et al, 2019)。

综上所述,关于雷暴大风的临近预报还有很多困难,需要在已有的研究成果和预报员经验的基础上,改进现有预报方法和引入人工智能等新技术方法,不断推动该领域研究和应用的发展。同时,教育公众了解雷暴大风的严重性也很重要,这样他们就可以在风暴接近时采取措施来减轻这些系统的潜在危害。

5 结论和展望

本文回顾了国内外关于雷暴大风形成机理和临近预报的研究成果,主要得到以下结论:

(1)绝大多数雷暴大风发生时的环境特征为对流层中层存在明显的干层,有较大的垂直风切变、温度直递减率和CAPE等。大部分雷暴大风由超级单体和QLCS(主要包括蛇线和弓状回波)产生。

(2)雷暴大风形成机制主要包括:强下沉气流(RIJ或下击暴流)、阵风锋(密度流)、高空向地面的动量传输、出流和环境风之间的水平气压梯度、超级单体低层中气旋的动力强迫、QLCS中涡旋或书端涡的累加效应和上升流对低层暖湿入流的抽吸作用等。

(3)多普勒天气雷达因其高时空分辨率,成为雷暴大风临近预报的重要数据来源,雷达反射率因子和径向速度的典型模态以及其他雷达产品可为预报人员提供预报依据。除了利用观测数据和数值模式输出数据进行临近预报之外,近年来图像处理技术和机器学习方法的快速发展也为雷暴大风的临近预报提供了新思路,能够克服人工预报的主观性,提高预报时效,充分利用雷达数据中的潜在信息,从而做出更准确的预报。

虽然目前国内外在雷暴大风的机理研究和临近预报方面做了一系列工作,并取得了多项研究成果,

但相关工作仍有以下不足和值得深入研究之处:

(1)受制于灾害信息观测,我国目前针对雷暴大风的研究还有很多不足之处,因此需要增加识别雷暴大风的详细观测资料,包括加密自动气象站数据、多种雷达数据(X波段多普勒天气雷达、相控阵天气雷达和双偏振多普勒天气雷达等)、人工和无人机观测报告以及其他观测资料。利用多种天气雷达组网进行协同自适应观测,开展组网技术与观测技术方面的科学探索来提高雷达数据分辨率,并增加雷达近地面扫描来弥补低空探测的不足。通过观测提升来增加雷暴大风的预警时效是有一定上限的,因此还需要综合使用多种观测数据和数值模式输出数据,或对不同数据源的模型进行融合,从而提高对雷暴大风的预报能力。

(2)对雷暴大风形成过程的不断深入理解,可以帮助数值模式对相关物理过程的描述更趋完善,因此需要加强关于雷暴大风发生发展机理的研究。不同风暴以及不同风暴发展阶段的主要物理过程是不同的,下沉辐散流出、阵风锋前沿的 γ 中尺度涡旋、阵风锋后与KHI有关的小尺度强下沉气流、重力内波和动量下传等不同物理过程导致的局地强风机制和复杂的相互作用还需要更加深入细致的研究。灾情调查还发现了很多小范围雷暴大风,目前其形成机制尚不清楚。此外,现在关于非典型风暴在什么条件下会产生雷暴大风的研究还比较少,还需要进一步研究。

(3)多普勒天气雷达反射率因子中的弓状回波和阵风锋等回波形态以及径向速度中的MARC和大风速核等特征与雷暴大风密切相关,对这些特征进行自动化识别的难度较大,有待于进一步深入研究。目前很多业务上的雷暴大风预报预警指标只是针对强对流天气的,并不是专门针对雷暴大风设计的,所以需要进一步研究专门针对雷暴大风的预报预警指标。此外由于雷暴大风的雷达特征和物理参数具有明显的区域性和季节性,我国目前缺乏系统性的分析,所以需要总结提炼出具有广泛适用性的雷暴大风预报预警指标,并在实际应用中不断验证和修改,为雷暴大风的预报和预警提供更好的支持。

(4)近年来图像处理技术和机器学习方法快速发展,可以与人工识别经验相结合来自动识别和提取与雷暴大风相关的特征,充分挖掘数据中的潜在非线性信息,自动给出雷暴大风的临近预报结果,这样能够克服人工预报的主观性,做出更准确的预报。

另外,目前很多机器学习模型是一个“黑箱”系统,只能给出最终的概率预报结果,因此使用人工智能方法设计一个可解释和具有辅助决策能力的模型十分重要,这可以帮助预报员和决策者发现更多的预报因子,提高对模型的认知。此外,预报员也要及时对雷暴大风短时临近预报技术进行总结,促进临近预报能力的持续提升。

参考文献

- 陈圣劼,刘梅,杨梦兮,等,2022.江苏“4·30”强风雹成因及双偏振雷达特征分析[J].气象科学,42(5):638-649. Chen S J, Liu M, Yang M X, et al, 2022. Analysis on causes of ‘4.30’ severe gales and hails event and associated characteristics of dual-polarization radar echoes over Jiangsu[J]. J Meteor Sci, 42(5): 638-649(in Chinese).
- 陈晓欣,俞小鼎,王秀明,2022.中国大范围雷暴大风事件(Derechos)研究:时空分布、环境背景和对流系统形态特征[J].气象学报,80(1):67-81. Chen X X, Yu X D, Wang X M, 2022. Investigation of Derechos in China: spatiotemporal distribution, environmental characteristics, and morphology of Derechos producing convective systems[J]. Acta Meteor Sin, 80(1): 67-81(in Chinese).
- 樊李苗,俞小鼎,2013.中国短时强对流天气的若干环境参数特征分析[J].高原气象,32(1):156-165. Fan L M, Yu X D, 2013. Characteristic analyses on environmental parameters in short-term severe convective weather in China[J]. Plateau Meteor, 32(1): 156-165(in Chinese).
- 范玉芬,陈政豫,杨冬晨,等,2015.桐乡“7.12”飚线和局地龙卷风过程的诊断分析[J].气象科技进展,5(6):13-16. Fan Y F, Chen Z Y, Yang D C, et al, 2015. Diagnostic analysis of a tornado event associated with the squall line in Tongxiang, 12 July 2014[J]. Adv Meteor Sci Technol, 5(6): 13-16(in Chinese).
- 方翀,俞小鼎,朱文剑,等,2015.2013年3月20日湖南和广东雷暴大风过程的特征分析[J].气象,41(11):1305-1314. Fang C, Yu X D, Zhu W J, et al, 2015. Characteristics of the thunderstorm gale process in Hunan and Guangdong on 20 March 2013[J]. Meteor Mon, 41(11): 1305-1314(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[J].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[J]. Meteor Mon, 40(8): 905-915(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[J].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[J]. Meteor Mon, 42(12): 1513-1521(in Chinese).
- 付晓辉,陈少平,龙利民,等,2007.美国Derecho研究简介及中国Derecho现象初探[J].气象科学,27(1):11-16. Fu X H, Chen S

- P, Long L M, et al, 2007. The American Derecho research and a preliminary study on Derecho in China[J]. *J Meteor Sci*, 27(1): 11-16(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[J]. *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[J]. *Chin J Atmos Sci*, 43(3): 483-497(in Chinese).
- 李国翠, 刘黎平, 连志鸾, 等, 2014. 利用雷达回波三维拼图资料识别雷暴大风统计研究[J]. *气象学报*, 72(1): 168-181. Li G C, Liu L P, Lian Z L, et al, 2014. Statistical study of the identification of thunderstorm gale based on the radar 3D mosaic data[J]. *Acta Meteor Sin*, 72(1): 168-181(in Chinese).
- 李国翠, 刘黎平, 张秉祥, 等, 2013. 基于雷达三维组网数据的对流性地面大风自动识别[J]. *气象学报*, 71(6): 1160-1171. Li G C, Liu L P, Zhang B X, et al, 2013. Based on the radar mosaic 3D data and ground automatic wind data, the six main radar identification[J]. *Acta Meteor Sin*, 71(6): 1160-1171(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[J]. *气象*, 35(9): 18-28. Liao X N, Yu B, Lu L H, 2009. Climatology and nowcasting methods for thunderstorm gale in Beijing[J]. *Meteor Mon*, 35(9): 18-28(in Chinese).
- 廖晓农, 俞小鼎, 王迎春, 2008. 北京地区一次罕见的雷暴大风过程特征分析[J]. *高原气象*, 27(6): 1350-1362. Liao X N, Yu X D, Wang Y C, 2008. Analysis on an exceptionally strong wind gust event in Beijing[J]. *Plateau Meteor*, 27(6): 1350-1362(in Chinese).
- 刘洪恩, 2001. 微下击暴流的特征及其数值模拟[J]. *气象学报*, 59(2): 183-195. Liu H E, 2001. Characteristics and numerical simulation of microburst[J]. *Acta Meteor Sin*, 59(2): 183-195(in Chinese).
- 罗辉, 张杰, 朱克云, 等, 2015. 下击暴流的雷达预警量化指标研究[J]. *气象学报*, 73(5): 853-867. Luo H, Zhang J, Zhu K Y, et al, 2015. Study of the radar quantitative index of forewarning downburst[J]. *Acta Meteor Sin*, 73(5): 853-867(in Chinese).
- 马中元, 许爱华, 贺志明, 等, 2009. 九江地区一次无降水致灾大风天气过程分析[J]. *气象与减灾研究*, 32(3): 52-56, 76-77. Ma Z Y, Xu A H, He Z M, et al, 2009. Analysis of a rainless damaging strong wind process[J]. *Meteor Dis Red Res*, 32(3): 52-56, 76-77(in Chinese).
- 陶岚, 戴建华, 2011. 下击暴流自动识别算法研究[J]. *高原气象*, 30(3): 784-797. Tao L, Dai J H, 2011. Research on automatic detection algorithm of downburst[J]. *Plateau Meteor*, 30(3): 784-797(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[J]. *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]. *J Appl Meteor Sci*, 27(3): 342-351(in Chinese).
- 王秀明, 俞小鼎, 费海燕, 等, 2023. 下击暴流形成机理及监测预警研究进展[J]. *气象*, 49(2): 129-145. Wang X M, Yu X D, Fei H Y, et al, 2023. A review of downburst genesis mechanism and warning[J]. *Meteor Mon*, 49(2): 129-145(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[J]. *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[J]. *Plateau Meteor*, 31(2): 504-514(in Chinese).
- 王一童, 王秀明, 俞小鼎, 2022. 产生致灾大风的超级单体回波特征[J]. *应用气象学报*, 33(2): 180-191. Wang Y T, Wang X M, Yu X D, 2022. Radar characteristics of straight-line damaging wind producing supercell storms[J]. *J Appl Meteor Sci*, 33(2): 180-191(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[J]. *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[J]. *Acta Meteor Sin*, 71(2): 209-227(in Chinese).
- 肖艳姣, 王珏, 王志斌, 等, 2021. 基于S波段新一代天气雷达观测的下击暴流临近预报方法[J]. *气象*, 47(8): 919-931. Xiao Y J, Wang J, Wang Z B, et al, 2021. A downburst nowcasting method based on observations of S-band new generation weather radar[J]. *Meteor Mon*, 47(8): 919-931(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[J]. *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]. *J Appl Meteor Sci*, 18(3): 321-329(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[J]. *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[J]. *Meteor Mon*, 44(6): 802-813(in Chinese).
- 杨晓霞, 胡顺起, 姜鹏, 等, 2014. 雷暴大风落区的天气学模型和物理量参数研究[J]. *高原气象*, 33(4): 1057-1068. Yang X X, Hu S Q, Jiang P, et al, 2014. Research of synoptic model and physical quantity parameter of thunder-gust winds impact area[J]. *Plateau Meteor*, 33(4): 1057-1068(in Chinese).
- 杨新林, 孙建华, 鲁蓉, 等, 2017. 华南雷暴大风天气的环境条件分布特征[J]. *气象*, 43(7): 769-780. Yang X L, Sun J H, Lu R, et al, 2017. Environmental characteristics of severe convective wind over South China[J]. *Meteor Mon*, 43(7): 769-780(in Chinese).
- 俞小鼎, 2011. 强对流天气的多普勒天气雷达探测和预警[J]. *气象科技进展*, 1(3): 31-41. Yu X D, 2011. Detection and warnings of severe convection with Doppler weather radar[J]. *Adv Meteor Sci Technol*, 1(3): 31-41(in Chinese).
- 俞小鼎, 王秀明, 李万莉, 等, 2020. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京: 气象出版社: 416. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al, 2020. Thunderstorm and Severe Convection Nowcasting[M]. Beijing: China Meteorological Press: 416(in Chinese).

- 俞小鼎,姚秀萍,熊庭南,等,2006a.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社:314. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al. 2006a. The Principle and Operational Application of Doppler Weather Radar[M]. Beijing: China Meteorological Press: 314 (in Chinese).
- 俞小鼎,张爱民,郑媛媛,等,2006b.一次系列下击暴流事件的多普勒天气雷达分析[J].应用气象学报,17(4):385-393. Yu X D, Zhang A M, Zheng Y Y, et al. 2006b. Doppler radar analysis on a series of downburst events[J]. J Appl Meteor Sci, 17(4): 385-393 (in Chinese).
- 俞小鼎,郑永光,2020.中国当代强对流天气研究与业务进展[J].气象学报,78(3):391-418. Yu X D, Zheng Y G, 2020. Advances in severe convective weather research and operational service in China[J]. Acta Meteor Sin, 78(3): 391-418 (in Chinese).
- 袁悦,2020.基于天气雷达数据的对流性大风智能化临近预报方法研究[D].天津:天津大学:145. Yuan Y, 2020. Research on intelligent nowcasting method of severe convective wind based on weather radar data[D]. Tianjin: Tianjin University: 145 (in Chinese).
- 翟丽萍,农孟松,梁维亮,等,2019.造成临桂极端大风的超级风暴单体观测分析[J].暴雨灾害,38(4):346-353. Zhai L P, Nong M S, Liang W L, et al. 2019. Analysis of the observations for a supercell causing extreme gale in Lingui[J]. Torr Rain Dis, 38(4): 346-353 (in Chinese).
- 郑永光,2020.中国龙卷气候特征和环境条件研究进展综述[J].气象科技进展,10(6):69-75. Zheng Y G, 2020. Review of climatology and favorable environmental conditions of tornado in China [J]. Adv Meteor Sci Technol, 10(6): 69-75 (in Chinese).
- 郑永光,田付友,孟智勇,等,2016.“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[J].气象,42(1):1-13. Zheng Y G, Tian F Y, Meng Z Y, et al. 2016. Survey and multi scale characteristics of wind damage caused by convective storms in the surrounding area of the capsizing accident of Cruise Ship “Dongfangzhixing”[J]. Meteor Mon, 42(1): 1-13 (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[J].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]. J Appl Meteor Sci, 26(6): 641-657 (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[J].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[J]. Acta Meteor Sin, 62(3): 317-328 (in Chinese).
- 周金莲,魏鸣,吴涛,等,2011.对流性大风天气的多普勒雷达资料识别方法研究[C]//2011年第二十八届中国气象学会年会论文集.北京:中国气象学会:1-10. Zhou J L, Wei M, Wu T, et al. 2011. Research on the identification method of Doppler radar data for convective gale weather[C]//Proceedings of the 28th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society in 2011. Beijing: Chinese Meteorological Society: 1-10 (in Chinese).
- Ashley W S, 2007. Spatial and temporal analysis of tornado fatalities in the United States: 1880—2005[J]. Wea Forecasting, 22(6): 1214-1228.
- Ashley W S, Haberlie A M, Strohm J, 2019. A climatology of quasi-linear convective systems and their hazards in the United States [J]. Wea Forecasting, 34(6): 1605-1631.
- Ashley W S, Mote T L, 2005. Derecho hazards in the United States [J]. Bull Amer Meteor Soc, 86(11): 1577-1592.
- Ashley W S, Mote T L, Bentley M L, 2005. On the episodic nature of derecho-producing convective systems in the United States[J]. Int J Climatol, 25(14): 1915-1932.
- Ashley W S, Mote T L, Bentley M L, 2007. The extensive episode of derecho-producing convective systems in the United States during May and June 1998: a multi-scale analysis and review[J]. Meteor Appl, 14(3): 227-244.
- Atkins N T, Arnott J M, Przybylinski R W, et al. 2004. Vortex structure and evolution within bow echoes. Part I: single-Doppler and damage analysis of the 29 June 1998 Derecho [J]. Mon Wea Rev, 132(9): 2224-2242.
- Atkins N T, Bouchard C S, Przybylinski R W, et al. 2005. Damaging surface wind mechanisms within the 10 June 2003 Saint Louis bow echo during BAMEX [J]. Mon Wea Rev, 133(8): 2275-2296.
- Atkins N T, St. Laurent M, 2009a. Bow echo mesovortices. Part I: processes that influence their damaging potential[J]. Mon Wea Rev, 137(5): 1497-1513.
- Atkins N T, St. Laurent M, 2009b. Bow echo mesovortices. Part II: their genesis[J]. Mon Wea Rev, 137(5): 1514-1532.
- Atkins N T, Wakimoto R M, 1991. Wet microburst activity over the southeastern United States: implications for forecasting[J]. Wea Forecasting, 6(4): 470-482.
- Bentley E S, Logsdon J, 2016. An examination of the mesoscale environment and evolution of the northern Indiana/northwest Ohio derecho of 29 June 2012[J]. Electronic J Severe Storms Meteor, 11(1): 1-25.
- Bentley M L, Mote T L, 1998. A climatology of derecho-producing mesoscale convective systems in the central and eastern United States, 1986—95. Part I: temporal and spatial distribution[J]. Bull Amer Meteor Soc, 79(11): 2527-2540.
- Bentley M L, Sparks J A, 2003. A 15 yr climatology of derecho-producing mesoscale convective systems over the central and eastern United States[J]. Climate Res, 24(2): 129-139.
- Bernardet L R, Cotton W R, 1998. Multiscale evolution of a derecho-producing mesoscale convective system[J]. Mon Wea Rev, 126(11): 2991-3015.
- Black A W, Ashley W S, 2010. Nontornadic convective wind fatalities in the United States[J]. Nat Hazards, 54(2): 355-366.
- Brooks H E, Marsh P T, Kowaleski A M, et al. 2011. Evaluation of European storm forecast experiment (ESTOFEX) forecasts[J]. Atmos Res, 100(4): 538-546.
- Brown A, Dowdy A, Lane T P, et al. 2023. Types of severe convective

- wind events in eastern Australia[J]. *Mon Wea Rev*, 151(2): 419-448.
- Bunkers M J, Flegel S R, Grafenauer T, et al, 2020. Observations of hail-wind ratios from convective storm reports across the continental United States[J]. *Wea Forecasting*, 35(2): 635-656.
- Burke P C, Schultz D M, 2004. A 4-yr climatology of cold-season bow echoes over the continental United States[J]. *Wea Forecasting*, 19(6): 1061-1074.
- Campbell M A, Cohen A E, Coniglio M C, et al, 2017. Structure and motion of severe-wind-producing mesoscale convective systems and derechos in relation to the mean wind[J]. *Wea Forecasting*, 32(2): 423-439.
- Celiński-Mysław D, Matuszko D, 2014. An analysis of selected cases of derecho in Poland[J]. *Atmos Res*, 149: 263-281.
- Childs S J, Schumacher R S, Adams-Selin R D, 2021. High-resolution observations of a destructive macroburst[J]. *Mon Wea Rev*, 149(9): 2875-2896.
- Coniglio M C, Corfidi S F, Kain J S, 2011. Environment and early evolution of the 8 May 2009 derecho-producing convective system[J]. *Mon Wea Rev*, 139(4): 1083-1102.
- Coniglio M C, Stensrud D J, 2004. Interpreting the climatology of derechos[J]. *Wea Forecasting*, 19(3): 595-605.
- Coniglio M C, Stensrud D J, Richman M B, 2004. An observational study of derecho-producing convective systems[J]. *Wea Forecasting*, 19(2): 320-337.
- Conrad D M, Knupp K R, 2019. Doppler radar observations of horizontal shearing instability in quasi-linear convective systems[J]. *Mon Wea Rev*, 147(4): 1297-1318.
- Corfidi S F, 2003. Cold pools and MCS propagation: forecasting the motion of downwind-developing MCSs[J]. *Wea Forecasting*, 18(6): 997-1017.
- Corfidi S F, Coniglio M C, Cohen A E, et al, 2016a. A proposed revision to the definition of "derecho"[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 97(6): 935-949.
- Corfidi S F, Johns R H, Darrow M A, 2016b. The Great Basin Derecho of 31 May 1994[J]. *Wea Forecasting*, 31(3): 917-935.
- Cui X Y, Chen M X, Qin R, et al, 2023. The roles of surface convergence line and upper-level forcing on convection initiation ahead of a gust front: a case study[J]. *J Geophys Res Atmos*, 128(3): e2022JD036921.
- Dodge J, Arnold J, Wilson G, et al, 1986. The Cooperative Huntsville Meteorological Experiment(COHMEX)[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 67(4): 417-419.
- Doswell III C A, 1982. The operational meteorology of convective weather. Volume I: operational mesoanalysis[R]. NOAA Technical Memorandum NWS NSSFC-5: 172.
- Doswell III C A, 2001. Severe Convective Storms[M]. Boston: American Meteorological Society.
- Doswell III C A, 2003. Societal impacts of severe thunderstorms and tornadoes: lessons learned and implications for Europe[J]. *Atmos Res*, 67-68: 135-152.
- Doswell III C A, Brooks H E, Kay M P, 2005. Climatological estimates of daily local nontornado severe thunderstorm probability for the United States[J]. *Wea Forecasting*, 20(4): 577-595.
- Droegemeier K K, Wilhelmson R B, 1987. Numerical simulation of thunderstorm outflow dynamics. Part I: outflow sensitivity experiments and turbulence dynamics[J]. *J Atmos Sci*, 44(8): 1180-1210.
- Earl N, Simmonds I, 2019. Sub-synoptic-scale features of the South Australia storm of September 2016—Part II: analysis of mechanisms driving the gusts[J]. *Weather*, 74(9): 301-307.
- Eilts M D, 1996. Severe weather warning decision support system[C]//Proceedings of the 18th Conference on Severe Local Storms. San Francisco: AMS: 536-540.
- Evans C, Weisman M L, Bosart L F, 2014. Development of an intense, warm-core mesoscale vortex associated with the 8 May 2009 "super derecho" convective event[J]. *J Atmos Sci*, 71(3): 1218-1240.
- Evans J S, Doswell III C A, 2001. Examination of derecho environments using proximity soundings[J]. *Wea Forecasting*, 16(3): 329-342.
- Finley J P, 1888. The Tornadoes of Iowa for 51 Years, 1837—1887[M]. Washington: National Bureau of Statistics: 10.
- Forbes G S, Wakimoto R M, 1983. A concentrated outbreak of tornadoes, downbursts and microbursts, and implications regarding vortex classification[J]. *Mon Wea Rev*, 111(1): 220-236.
- French A J, Parker M D, 2012. Observations of mergers between squall lines and isolated supercell thunderstorms[J]. *Wea Forecasting*, 27(2): 255-278.
- French A J, Parker M D, 2014. Numerical simulations of bow echo formation following a squall line-supercell merger[J]. *Mon Wea Rev*, 142(12): 4791-4822.
- Fujita T T, 1976. Spearhead echo and downburst near the approach end of John F. Kennedy Airport runway, New York City[R]. SMRP Research Paper Number 137: 56.
- Fujita T T, 1978. Manual of downburst identification for project NIMROD[R]. SMRP Research Paper Number 156: 111.
- Fujita T T, 1981. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales[J]. *J Atmos Sci*, 38(8): 1511-1534.
- Fujita T T, 1985. The downburst, microburst, and macroburst[R]. SMRP Research Paper Number 210: 128.
- Fujita T T, 1990. Downbursts: meteorological features and wind field characteristics[J]. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 36: 75-86.
- Fujita T T, Wakimoto R M, 1981. Five scales of airflow associated with a series of downbursts on 16 July 1980[J]. *Mon Wea Rev*, 109(7): 1438-1456.
- Fujita T T, Wakimoto R M, 1983. Microbursts in JAWS depicted by Doppler radars, PAM, and aerial photographs[C]//Proceedings of the 21st Conference on Radar Meteorology. Edmonton: AMS: 638-645.
- Gagne D J II, Haupt S E, Nychka D W, et al, 2019. Interpretable deep learning for spatial analysis of severe hailstorms[J]. *Mon*

- Wea Rev, 147(8):2827-2845.
- Gallus W A Jr, Duhachek A C, 2022. Differences in near-storm parameters useful for forecasting intensity of nocturnal and diurnal bow echo winds[J]. *Wea Forecasting*, 37(12):2331-2347.
- Galway J G, Finley J P, 1984. The first severe storms forecaster[R]. NOAA Technical Memorandum ERL NSSL-97:1-32.
- Gatzen C, 2011. A 10-year climatology of cold-season narrow cold-frontal rainbands in Germany[J]. *Atmos Res*, 100(4):366-370.
- Gatzen C, 2013. Warm-season severe wind events in Germany[J]. *Atmos Res*, 123:197-205.
- Groenemeijer P, Püćik T, Holzer A M, et al, 2017. Severe convective storms in Europe: ten years of research and education at the European Severe Storms Laboratory[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 98(12):2641-2651.
- Guastini C T, Bosart L F, 2016. Analysis of a progressive Derecho climatology and associated formation environments [J]. *Mon Wea Rev*, 144(4):1363-1382.
- Hinrichs G, 1888. Tornadoes and derechos[J]. *Amer Meteor J*, 5:341-349.
- Hitchens N M, Brooks H E, 2014. Evaluation of the Storm Prediction Center's convective outlooks from day 3 through day 1[J]. *Wea Forecasting*, 29(5):1134-1142.
- Hjelmfelt M R, 1988. Structure and life cycle of microburst outflows observed in Colorado[J]. *J Climate Appl Meteor*, 27(8):900-927.
- Hocker J E, Basara J B, 2008. A 10-year spatial climatology of squall line storms across Oklahoma[J]. *Int J Climatol*, 28(6):765-775.
- Houze R A Jr, Biggerstaff M I, Rutledge S A, et al, 1989. Interpretation of Doppler weather radar displays of midlatitude mesoscale convective systems[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 70(6):608-619.
- Johns R H, Doswell III C A, 1992. Severe local storms forecasting [J]. *Wea Forecasting*, 7(4):588-612.
- Johns R H, Hirt W D, 1987. Derechos: widespread convectively induced windstorms[J]. *Wea Forecasting*, 2(1):32-49.
- Johnson R H, Hamilton P J, 1988. The relationship of surface pressure features to the precipitation and airflow structure of an intense midlatitude squall line[J]. *Mon Wea Rev*, 116(7):1444-1473.
- Kelly K A, 1985. The influence of winds and topography on the sea surface temperature patterns over the northern California slope [J]. *J Geophys Res:Oceans*, 90(C6):11783-11798.
- Kessinger C J, Parsons D B, Wilson J W, 1988. Observations of a storm containing mesocyclones, downbursts, and horizontal vortex circulations[J]. *Mon Wea Rev*, 116(10):1959-1982.
- Klimowski B A, Bunkers M J, Hjelmfelt M R, et al, 2003. Severe convective windstorms over the northern High Plains of the United States[J]. *Wea Forecasting*, 18(3):502-519.
- Klimowski B A, Hjelmfelt M R, Bunkers M J, 2004. Radar observations of the early evolution of bow echoes[J]. *Wea Forecasting*, 19(4):727-734.
- Lafore J P, Moncrieff M W, 1989. A numerical investigation of the organization and interaction of the convective and stratiform regions of tropical squall lines[J]. *J Atmos Sci*, 46(4):521-544.
- Lagerquist R, McGovern A, Smith T, 2017. Machine learning for real-time prediction of damaging straight-line convective wind [J]. *Wea Forecasting*, 32(6):2175-2193.
- Lakshmanan V, Smith T, Stumpf G, et al, 2007. The warning decision support system-integrated information [J]. *Wea Forecasting*, 22(3):596-612.
- Lemon L R, Doswell III C A, 1979. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis[J]. *Mon Wea Rev*, 107(9):1184-1197.
- Li P W, Wong W K, Chan K Y, et al, 2000. SWIRLS-an evolving nowcasting system[R]. Hong Kong Observatory Technical Note No. 100:33.
- Ludlum D M, 1970. Early American Tornadoes 1586-1870 (the History of American Weather)[M]. Boston: American Meteorological Society:219.
- Mahale V N, Zhang G F, Xue M, 2016. Characterization of the 14 June 2011 Norman, Oklahoma, downburst through dual-polarization radar observations and hydrometeor classification [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 55(12):2635-2655.
- Mahoney K M, Lackmann G M, 2011. The sensitivity of momentum transport and severe surface winds to environmental moisture in idealized simulations of a mesoscale convective system[J]. *Mon Wea Rev*, 139(5):1352-1369.
- Mahoney K M, Lackmann G M, Parker M D, 2009. The role of momentum transport in the motion of a quasi-idealized mesoscale convective system[J]. *Mon Wea Rev*, 137(10):3316-3338.
- Mahoney III W P, 1988. Gust front characteristics and the kinematics associated with interacting thunderstorm outflows[J]. *Mon Wea Rev*, 116(7):1474-1492.
- Mahoney III W P, Rodi A R, 1987. Aircraft measurements on microburst development from hydrometeor evaporation[J]. *J Atmos Sci*, 44(20):3037-3051.
- Markowski P M, 2002. Hook echoes and rear-flank downdrafts: a review[J]. *Mon Wea Rev*, 130(4):852-876.
- Markowski P M, Richardson Y P, 2010. *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd:407.
- McCarthy J, Wilson J W, Fujita T T, 1982. The joint airport weather studies project[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 63(1):15-22.
- Meng Z Y, Zhang F Q, Markowski P, et al, 2012. A modeling study on the development of a bowing structure and associated rear inflow within a squall line over South China[J]. *J Atmos Sci*, 69(4):1182-1207.
- Miller D J, Johns R H, 2000. A detailed look at extreme wind damage in Derecho events[C]// *Proceedings of the 20th Conference on Severe Local Storms*. Orlando: AMS:52-55.
- Mueller C K, Carbone R E, 1987. Dynamics of a thunderstorm outflow[J]. *J Atmos Sci*, 44(15):1879-1898.
- Orf L, Kantor E, Savory E, 2012. Simulation of a downburst-producing thunderstorm using a very high-resolution three-dimensional

- cloud model[J]. *J Wind Eng Ind Aerodyn*,104-106:547-557.
- Pacey G P, Schultz D M, Garcia-Carreras L, 2021. Severe convective windstorms in Europe: climatology, preconvective environments, and convective mode[J]. *Wea Forecasting*, 36(1): 237-252.
- Parker M D, Borchardt B S, Miller R L, et al, 2020. Simulated evolution and severe wind production by the 25–26 June 2015 nocturnal MCS from PECAN[J]. *Mon Wea Rev*, 148(1):183-209.
- Pfost R L, Gerard A E, 1997. “Bookend vortex” induced tornadoes along the Natchez Trace[J]. *Wea Forecasting*, 12(3):572-580.
- Przybylinski R W, 1995. The bow echo: observations, numerical simulations, and severe weather detection methods[J]. *Wea Forecasting*, 10(2):203-218.
- Richter H, Peter J, Collis S, 2014. Analysis of a destructive wind storm on 16 November 2008 in Brisbane, Australia[J]. *Mon Wea Rev*, 142(9):3038-3060.
- Schmocker G K, 1996. Forecasting the initial onset of damaging downburst winds associated with a mesoscale convective system (MCS) using the mid-altitude radial convergence(MARC) signature[C] // *Proceedings of the 15th Conference on Weather Analysis and Forecasting*. Norfolk:AMS:306-311.
- Schoen J M, Ashley W S, 2011. A climatology of fatal convective wind events by storm type[J]. *Wea Forecasting*, 26(1):109-121.
- Schumacher R S, Rasmussen K L, 2020. The formation, character and changing nature of mesoscale convective systems[J]. *Nat Rev Earth Environ*, 1(6):300-314.
- Sherburn K D, Bunkers M J, Mose A J, 2021. Radar-based comparison of thunderstorm outflow boundary speeds versus peak wind gusts from automated stations[J]. *Wea Forecasting*, 36(4):1387-1403.
- Skamarock W C, Weisman M L, Klemp J B, 1994. Three-dimensional evolution of simulated long-lived squall lines[J]. *J Atmos Sci*, 51(17):2563-2584.
- Smith B T, Castellanos T E, Winters A C, et al, 2013. Measured severe convective wind climatology and associated convective modes of thunderstorms in the contiguous United States, 2003–09[J]. *Wea Forecasting*, 28(1):229-236.
- Smith B T, Thompson R L, Grams J S, et al, 2012. Convective modes for significant severe thunderstorms in the contiguous United States. Part I: storm classification and climatology[J]. *Wea Forecasting*, 27(5):1114-1135.
- Smith T M, Elmore K L, Dulin S A, 2004. A damaging downburst prediction and detection algorithm for the WSR-88D[J]. *Wea Forecasting*, 19(2):240-250.
- Srivastava R C, 1987. A model of intense downdrafts driven by the melting and evaporation of precipitation[J]. *J Atmos Sci*, 44(13):1752-1774.
- Straka J M, Anderson J R, 1993. Numerical simulations of microburst-producing storms: some results from storms observed during COHMEX[J]. *J Atmos Sci*, 50(10):1329-1348.
- Surowiecki A, Taszarek M, 2020. A 10-year radar-based climatology of mesoscale convective system archetypes and derechos in Poland[J]. *Mon Wea Rev*, 148(8):3471-3488.
- Taszarek M, Allen J, Pucik T, et al, 2019. A climatology of thunderstorms across Europe from a synthesis of multiple data sources[J]. *J Climate*, 32(6):1813-1837.
- Taszarek M, Brooks H E, Czernecki B, 2017. Sounding-derived parameters associated with convective hazards in Europe[J]. *Mon Wea Rev*, 145(4):1511-1528.
- Trapp R J, Mitchell E D, Tipton G A, et al, 1999. Descending and nondescending tornadic vortex signatures detected by WSR-88Ds[J]. *Wea Forecasting*, 14(5):625-639.
- Trapp R J, Weisman M L, 2003. Low-level mesovortices within squall lines and bow echoes. Part II: their genesis and implications[J]. *Mon Wea Rev*, 131(11):2804-2823.
- Vescio M D, Johnson R H, 1992. The surface-wind response to transient mesoscale pressure fields associated with squall lines[J]. *Mon Wea Rev*, 120(9):1837-1850.
- Wakimoto R M, 1982. The life cycle of thunderstorm gust fronts as viewed with Doppler radar and rawinsonde data[J]. *Mon Wea Rev*, 110(8):1060-1082.
- Wakimoto R M, 1985. Forecasting dry microburst activity over the High Plains[J]. *Mon Wea Rev*, 113(7):1131-1143.
- Wakimoto R M, 2001. Convectively driven high wind events[J]. *Meteor Monogr*, 28(50):225-298.
- Wakimoto R M, Murphey H V, Davis C A, et al, 2006a. High winds generated by bow echoes. Part II: the relationship between the mesovortices and damaging straight-line winds[J]. *Mon Wea Rev*, 134(10):2813-2829.
- Wakimoto R M, Murphey H V, Nester A, et al, 2006b. High winds generated by bow echoes. Part I: overview of the Omaha bow echo 5 July 2003 storm during BAMEX[J]. *Mon Wea Rev*, 134(10):2793-2812.
- Weisman M L, 1992. The role of convectively generated rear-inflow jets in the evolution of long-lived mesoconvective systems[J]. *J Atmos Sci*, 49(19):1826-1847.
- Weisman M L, 1993. The genesis of severe, long-lived bow echoes[J]. *J Atmos Sci*, 50(4):645-670.
- Weisman M L, Trapp R J, 2003. Low-level mesovortices within squall lines and bow echoes. Part I: overview and dependence on environmental shear[J]. *Mon Wea Rev*, 131(11):2779-2803.
- Weiss S J, Hart J A, Janish P R, 2002. An examination of severe thunderstorm wind report climatology: 1970–1999[C] // *Proceedings of the 21st Conference on Severe Local Storms*. San Antonio:AMS.
- Wheatley D M, Trapp R J, Atkins N T, 2006. Radar and damage analysis of severe bow echoes observed during BAMEX[J]. *Mon Wea Rev*, 134(3):791-806.
- Wilson J W, Roberts R D, Kessinger C, et al, 1984. Microburst wind structure and evaluation of Doppler radar for airport wind shear detection[J]. *J Climate Appl Meteor*, 23(6):898-915.

- Wilson J W, Wakimoto R M, 2001. The discovery of the downburst: T. T. Fujita's contribution[J]. Bull Amer Meteor Soc, 82(1): 49-62.
- Xu X, Xue M, Wang Y, 2015a. The genesis of mesovortices within a real-data simulation of a bow echo system[J]. J Atmos Sci, 72(5): 1963-1986.
- Xu X, Xue M, Wang Y, 2015b. Mesovortices within the 8 May 2009 bow echo over the central United States: analyses of the characteristics and evolution based on Doppler radar observations and a high-resolution model simulation[J]. Mon Wea Rev, 143(6): 2266-2290.
- Yang X L, Sun J H, 2018. Organizational modes of severe wind-producing convective systems over North China[J]. Adv Atmos Sci, 35(5): 540-549.
- Yang X L, Sun J H, Zheng Y G, 2017. A 5-yr climatology of severe convective wind events over China[J]. Wea Forecasting, 32(4): 1289-1299.

附表 1 缩略语表

Schedule 1 List of abbreviations

缩略语	英文全称	中文全称
CAPE	convective available potential energy	对流有效位能
DDPDA	damaging downburst prediction and detection algorithm	破坏性下击暴流预报和探测算法
FFD	forward flank downdraft	前侧下沉气流
JAWS	Joint Airport Weather Studies	联合机场天气研究项目
KHI	Kelvin-Helmholtz instability	开尔文-亥姆霍兹不稳定性
LFC	level of free condensation	自由对流高度
MARC	mid-altitude radial convergence	中层径向辐合
MCS	mesoscale convective system	中尺度对流系统
MCV	mesoscale convective vortex	中尺度对流涡旋
MIST	Microburst and Severe Thunderstorm	微下击暴流和强雷暴项目
MV	mesovortex	中涡旋
NCFR	narrow cold-frontal rainband	窄冷锋雨带
NIMROD	Northern Illinois Meteorological Research on Downbursts	伊利诺斯州北部下击暴流气象研究项目
NSSL	National Severe Storm Laboratory	美国国家强风暴实验室
NTSB	National Transportation Safety Board	美国国家运输安全委员会
QLCS	quasi-linear convective system	准线状对流系统
RFD	rear flank downdraft	后侧下沉气流
RJ	rear inflow jet	后侧入流急流
SI	Showalter index	沙氏指数
SWIRLS	Short-range Warning of Intense Rainstorms in Localized Systems	“小涡旋”临近预报系统
TDWR	Terminal Doppler Weather Radar	机场终端多普勒天气雷达
WDSS- II	Warning Decision Support System-Integrated Information System	预警决策支持系统-综合信息系统

(本文责编:俞卫平)