

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

摘要: 雷暴大风是指强对流天气系统引发的风速 $\geq 17 \text{ m s}^{-1}$ 的大风, 是一种产生巨大灾害的中小尺度强对流天气, 了解其形成机理和对其进行精确临近预报和预警是防灾减灾的重点。论文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和亟需解决的问题, 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

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, China Meteorological Administration, 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 $\geq 17 \text{ m s}^{-1}$ caused by strong convective weather systems, which are one of meso-scale and micro-scale strong convective weather that causes huge disasters. Understanding their formation mechanisms and conducting accurate nowcasting and early warning are the keys to disaster prevention and mitigation. This paper summarizes the existing studies on the formation mechanisms and nowcasting of thunderstorm gales, including synoptic patterns, environmental characteristics, different formation mechanisms and windstorm morphologies, as well as nowcasting technology. 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 above review, the difficulties and much-need issues of the formation mechanisms and nowcasting of thunderstorm gales are

* 国家重点研发计划课题 (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

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

32 discussed.

33 **Key words:** thunderstorm gales, formation mechanisms, nowcasting

34 引言

35 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 $\geq 17 \text{ m s}^{-1}$ 的大
36 风(美国 $\geq 50 \text{ kt}$, 即 25.72 m s^{-1}) (Bunkers et al, 2020; 樊李苗和俞小鼎, 2013), 常伴随强
37 降水和冰雹发生, 是一种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、
38 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
39 (Doswell III, 2003; Ashley and Mote, 2005; Ashley, 2007; Brown et al, 2023)。例如,
40 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
41 死亡。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
42 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
43 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
44 预报和预警仍然十分困难(Yang et al, 2017)。

45 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;
46 Black and Ashley, 2010; Gatzen, 2013; Groenemeijer et al, 2017; Taszarek et al, 2019)。
47 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),
48 61%的雷暴大风发生在六月和七月的午后(Kelly, 1985), 平均每年造成84人死亡(Ashley,
49 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
50 平均每两天一次(Pacey et al, 2021)。

51 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
52 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
53 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
54 计分析了我国强雷暴大风($> 25 \text{ m s}^{-1}$)的气候特征, 发现中东部地区是强雷暴大风的高发区,
55 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
56 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,
57 夏季华北和广东出现的频率都比较高。

58 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
59 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
60 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
61 近预报技术, 最后一部分探讨了需要进一步解决的问题。

62 1 天气形势和环境特征

63 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

64 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
65 (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
66 经进行了大量研究 (Coniglio et al, 2004; 杨晓霞等, 2014)。例如, Coniglio et al (2004)
67 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%)。
68 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、副高边缘型和横槽型。
69 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
70 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。

71 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
72 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
73 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;
74 Pacey et al, 2021; Gallus and Duhachek, 2022; 廖晓农等, 2009; 费海燕等, 2016; 方翀等,
75 2014; 2015)。强的垂直风切变环境有利于对流系统的组织 (Schumacher and Rasmussen, 2020),
76 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
77 面大风 (Johns and Hirt, 1987)。在有强垂直风切变和一定对流有效位能 (convective available
78 potential energy, CAPE) 的环境中, 可以产生超级单体风暴和飚线 (Doswell III, 2001; 郑
79 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,
80 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
81 击暴流, 对其进行临近预报和预警十分困难。

批注 [A1]: 本条文献在文后文献中未体现

删除的内容: 7

82 2 雷暴大风形成机理

83 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
84 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:
85 (1) 强下沉气流 (后侧入流急流 (rear inflow jet, RIJ) 或下击暴流) (Weisman, 1992), (2)
86 阵风锋 (密度流) (Droegemeier and Wilhelmson, 1987), (3) 高空向地面的动量传输 (Mahoney
87 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
88 低层中气旋的动力强迫 (Trapp and Weisman, 2003), (6) 准线状对流系统 (quasi-linear
89 convective system, QLCS) 中涡旋或书端涡的累加效应 (Atkins and St. Laurent, 2009a) 和
90 (7) 上升流对低层暖湿入流的抽吸作用等 (Johns and Doswell III, 1992)。其中入流区域地
91 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
92 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
93 量化分析 (陈圣劫等, 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,
94 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
95 风 (Schoen and Ashley, 2011; Pacey et al, 2021)。

96 2.1 下击暴流大风

98 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
99 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,
100 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 m s^{-1}
101 (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
102 美国国家运输安全委员会 (National Transportation Safety Board, NTSB) 随后的调查。芝加
103 哥大学的 Fujita 教授在对 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
104 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”
105 (downburst) (Fujita, 1976)。但是 Fujita 关于存在下击暴流的假说遭到了科学界的质疑,
106 随后在 1978 年的伊利诺斯州北部下击暴流气象研究项目 (Northern Illinois Meteorological
107 Research on Downbursts, NIMROD) 期间, 大约有 50 个微下击暴流被多普勒天气雷达探测
108 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
109 年又开展了联合机场天气研究项目 (Joint Airport Weather Studies, JAWS) (McCarthy et al,
110 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;
111 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
112 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 (Terminal Doppler
113 Weather Radar, 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
114 目 (Microburst and Severe Thunderstorm, MIST) (Dodge et al, 1986)。

115 下击暴流通常为 γ 尺度 (约 2-20 km), 可以分为微下击暴流 (microburst, <4 km, 最
116 小可能 <100 m) (Wakimoto, 1985; Atkins and Wakimoto, 1991) 和宏下击暴流 (macroburst, >4
117 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),
118 宏下击暴流产生的大风可以持续至少 45 min, 影响路径超过 50 km (Childs et al, 2021)。多
119 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
120 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
121 (Wakimoto, 1985) 和湿下击暴流 (Atkins and Wakimoto, 1991)。当对流较弱时, 常常出
122 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
123 (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
124 高原、黄土高原和蒙古高原。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
125 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
126 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
127 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
128 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
129 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
130 (Wilson and Wakimoto, 2001; Cui et al, 2023), 阵风锋也可以产生地面大风 (王秀明等,
131 2023)。此外, Fujita (1981) 将下击暴流分为静止型 (stationary) 和移动型 (traveling)。当

132 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
133 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
134 降到地面。

135 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
136 （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
137 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
138 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
139 [III](#), 1982; Mueller and Carbone, 1987; Srivastava, 1987; Vescio and Johnson, 1992; Markowski
140 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
141 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），
142 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
143 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
144 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
145 到达地面形成灾害性大风的重要机制（Kessinger et al, 1988）。

146 2.2 Derecho

147 Derecho 是由爬线(Hocker and Basara, 2008)和弓状回波(Celiński-Mysław and Matuszko,
148 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
149 et al, 2016a; 陈晓欣等, 2022)，水平尺度可达几百千米(Fujita and Wakimoto, 1981)，移
150 动速度较快。“Derecho”一词最早由 Finley 在一篇关于爱荷华州龙卷的文章中提出(Finley,
151 1888)，但是爱荷华大学的物理学教授 Hinrichs 认为 Finley 列出的爱荷华州龙卷事件中混杂
152 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
153 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，
154 “tornado”也起源于西班牙语，表示“旋转的”(Ludlum, 1970)。Johns and Hirt (1987)
155 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
156 derecho(Fujita and Wakimoto, 1981; Johns and Hirt, 1987)，并基于观测风场和风破坏报告
157 总结出识别 derecho 的 6 条标准(Weiss et al, 2002; Smith et al, 2013)。前人研究中经常使
158 用的 derecho 识别标准为 Johns and Hirt (1987) 标准(简称 JH87 标准)，Bentley and Mote
159 (1998) 标准(简称 BM98 标准)和 Coniglio and Stensrud (2004) 标准(简称 CS04 标准)，
160 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
161 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
162 derecho 的风暴结构信息，包括弓状回波、RIJ 和中尺度对流涡旋(mesoscale convective vortex,
163 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
164 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
165 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

删除的内容: n

167 25 m s^{-1} , 而美国大多数标准的阈值为 33 m s^{-1} 。表 1 列出了国内外主要的 derecho 识别标准，
 168 虽然定义 derecho 的标准存在分歧，但是所有的定义都表明 derecho 是大面积（400 km 或更
 169 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）。
 170 表 1 五种 derechos 识别标准（引自 Johns and Hirt, 1987; Bentley and Mote, 1998; Coniglio and Stensrud,
 171 2004; Corfidi et al, 2016a; 陈晓欣等, 2022）

172 Table 1 Criteria used to identify derechos. JH87 refers to Johns and Hirt (1987), BM98 refers to Bentley and Mote
 173 (1998), CS04 refers to Coniglio and Stensrud (2004), Corfidi16 refers to Corfidi et al (2016a), and Chen22 refers
 174 to Chen et al (2022)

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 m 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 m 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 m 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 m 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；中等级别大风事件同 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 m 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 m s^{-1} 的国家级观测站，且任意两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 wind 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它风力报告不超过 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它风力报告不超过 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	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

175 美国的 derecho 大约每年发生 15 次(Bentley and Mote, 1998; Bentley and Sparks, 2003),
176 风速有时很大(超过 44 m s^{-1}), 春夏季平均移动路径约 700 km(Coniglio and Stensrud, 2004)。
177 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
178 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
179 午到夜间, 经常与窄冷锋雨带(narrow cold-frontal rainband, NCFR; Gatzen, 2011)有关,
180 暖季 derecho 多于冷季(Bentley and Mote, 1998; Bentley and Sparks, 2003; Coniglio and
181 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
182 h 内形成的连续 derecho), 大多数 derecho 序列包括 2-3 个 derecho 事件(Ashley et al, 2007;
183 2005)。Surowiecki and Taszarek(2020)发现波兰 1.5%的中尺度对流系统(mesoscale convective
184 system, MCS)和 9.1%的 QLCS 可以产生 derecho, 暖季 derecho 比冷季的影响更大, 但破
185 坏路径更短。中国的 derecho 较少, 风速大部分为十几到三十几 m s^{-1} , 影响范围较小(付晓
186 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
187 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)。

188 Derecho 可以分为单个细长地带的前进型(progressive, 76%)和一系列细长地带的连
189 续型(serial, 24%)(Johns and Hirt, 1987)。前进型 derecho 比连续型 derecho 移动得快,
190 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
191 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
192 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
193 回波, 可以传播数百千米, 风暴的平均移速为 23 m s^{-1} , 移动方向常相对平均风矢量(850-200
194 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
195 的飑线产生, 飑线的平均移速通常 $\leq 15 \text{ m s}^{-1}$, 移动方向几乎与平均气流方向垂直, 常伴随一
196 个强地面低压中心(Johns and Hirt, 1987)。另外, derecho 也可以分为强强迫型(strong forcing)、
197 弱强迫型(weak forcing)和混合型(hybrid)(Evans and Doswell III, 2001)。强强迫型 derecho
198 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
199 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
200 弱强迫在前进型 derecho 中更常见。

201 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
202 大的不稳定性和低层湿度, 较低的地面露点温度, 中高层较干, 存在高空急流(Evans and
203 Doswell III, 2001; Coniglio et al, 2004, 2011; Bentley and Logsdon, 2016; Corfidi et al, 2016b)。
204 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
205 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
206 动得快, 这样 derecho 才能长期存在(Corfidi, 2003; Campbell et al, 2017)。产生 derecho
207 的机制主要有: 下沉 RIJ(Weisman, 1992)、下击暴流(Fujita and Wakimoto, 1981)、阵风

删除的内容: 1

删除的内容: :

210 锋 (Wakimoto, 1982)、中高压 (Johnson and Hamilton, 1988) 和中涡旋 (mesovortex, MV)
211 (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
212 RIJ (Weisman, 1992) 或下击暴流 (Fujita, 1978) 更可能导致地面大风 (Mahoney and Lackmann,
213 2011), 而 MV 可以产生狭窄的大风 (Atkins and St. Laurent, 2009a), 与 derecho 产生的最
214 严重风破坏直接相关 (Miller and Johns, 2000)。

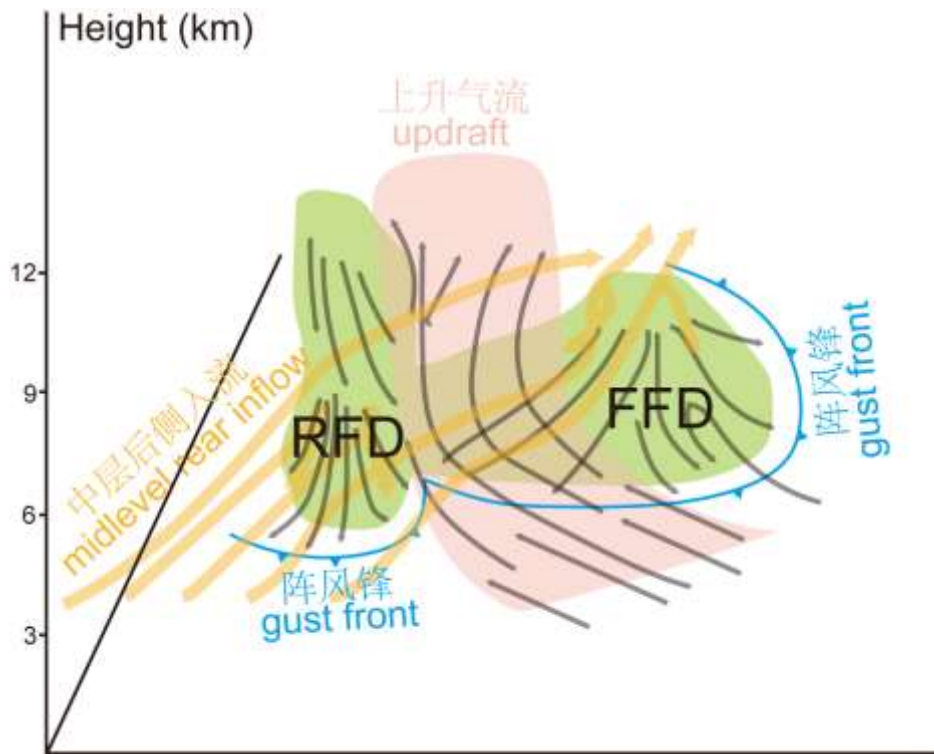
215 3 风暴组织形态

216 大部分雷暴大风由超级单体 (Richter et al, 2014) 和 QLCS (Earl and Simmonds, 2019)
217 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)。
218 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
219 暖季的雷暴大风大部分由超级单体产生 (Pacey et al, 2021), 其它地区则主要由无组织对流
220 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
221 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
222 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 m s^{-1} , 导致 32 人死亡。超级
223 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
224 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,
225 2012)。

226 3.1 超级单体大风

227 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 m s^{-1} 。超级单体可以单独
228 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
229 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,
230 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,
231 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
232 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
233 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
234 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
235 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
236 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)。

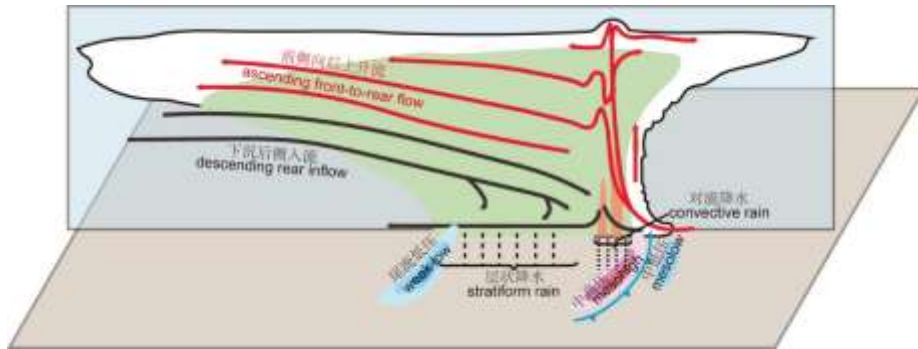
237 超级单体风暴的概念模型如图 1 所示, 地面观测站的风速首先会因前侧阵风锋的过境而
238 增大, 而且风向突变。阵风锋过境时一般没有降水, 它的后面是前侧下沉气流 (forward flank
239 downdraft, FFD) —— 第一个近地面大风核。前侧阵风锋与风暴主体的距离在不同的风暴中
240 有一定的差异, 有时当阵风锋紧贴风暴主体时, 在雷达回波上很难将其分辨出来。在暴雨、
241 冰雹和龙卷等强对流天气之后是后侧下沉气流 (rear flank downdraft, RFD) —— 第二个近
242 地面大风核 (Markowski, 2002)。



243 图 1 一个超级单体风暴的概念图 (引自 Lemon and Doswell III, 1979; Markowski and Richardson, 2010)
 244
 245 Fig. 1 Schematic representation of a supercell windstorm (from Lemon and Doswell III, 1979; Markowski and
 246 Richardson, 2010)

247 3.2 飏线大风

248 飏线和弓状回波属于 QLCS, 是导致雷暴大风的两种主要对流系统 (Smith et al, 2012),
 249 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 (mid-altitude radial
 250 convergence, MARC) 等 (俞小鼎等, 2020)。飏线是我国夏季较常见的强对流系统之一,
 251 常包含弓状回波结构。即使不出现弓状回波, 飏线也会产生雷暴大风, 若飏线某一段中出现
 252 MARC 或中气旋, 则该段飏线前沿出现雷暴大风的可能性很大 (谢健标等, 2007; 俞小鼎,
 253 2011)。成熟阶段飏线的典型结构如图 2 所示, 地面中尺度气压扰动包括: 对流带前侧的中
 254 低压 (mesolow)、对流带后侧的中高压 (mesohigh) 和层状降雨区后侧的尾流低压 (weak low)。
 255 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
 256 面出现由于下沉加热导致的尾流低压, 这时飏线内出现一个从对流线后方 5 km 高度下沉到
 257 对流层低层的 RIJ。一般在地面中高压前方形成地面大风, 如果通过宽阔的水域, 地面摩擦
 258 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
 259 Johnson, 1992)。

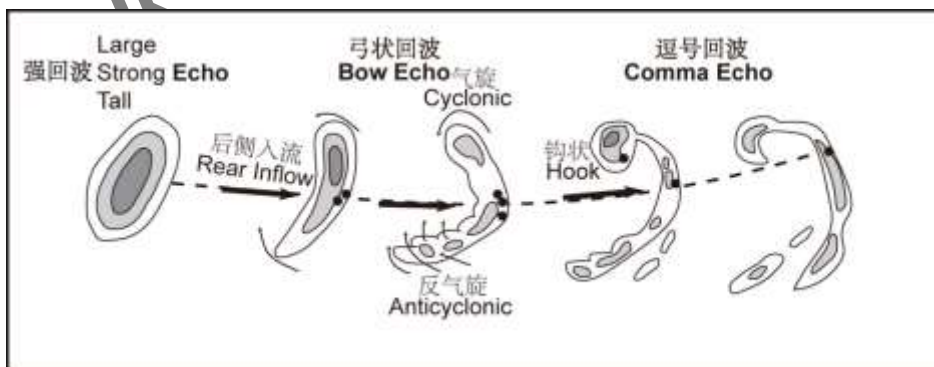


260
261 图 2 一个成熟阶段飚线的剖面图和近地面图(引自 Johnson and Hamilton, 1988; Houze et al, 1989; Vescio and
262 Johnson, 1992; Wakimoto, 2001; Markowski and Richardson, 2010)

263 Fig. 2 Schematic cross section and surface fields during a squall line mature stage (from Johnson and Hamilton,
264 1988; Houze et al, 1989; Vescio and Johnson, 1992; Wakimoto, 2001; Markowski and Richardson, 2010)

265 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
266 产生雷暴大风 (Johns and Doswell III, 1992; Przybylinski, 1995; 俞小鼎和郑永光, 2020)。
267 弓状回波的形成方式主要有以下几种:(1)离散单体合并 (Burke and Schultz, 2004; Klimowski
268 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
269 弓状回波 (王福侠等, 2016) 和 (4) 飚线-单体合并 (French and Parker, 2012,2014)。弓状
270 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
271 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)。
272 线状对流演变为弓状回波, 之后变为逗点云系的详细过程如图 3 所示 (Fujita, 1978)。弓状
273 回波北部的气旋式书端涡 (直径 70-80 km) 增强了 RIJ, 并启动了“弓状过程”, 在弓状
274 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
275 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
276 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
277 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
278 会增强地面风速 (Atkins et al, 2004)。

删除的内容: :



279
280 图 3 一个弓状回波生命周期示意图, 黑色粗箭头表示 RIJ, 黑点表示龙卷的位置(引自 Fujita, 1978; Wakimoto

282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316

et al, 2006a)

Fig. 3 Schematic diagram of the life cycle of a bow echo. Black bold arrows and black dots represent the location of the RIJ and tornadoes, respectively (from Fujita, 1978; Wakimoto et al, 2006a)

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) 或龙卷造成的(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, 2006b; 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, 2006b)。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)。

删除的内容: ;

3.3 其它风暴组织形态大风

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, 其它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出流(Miller and Johns, 2000)、阵风锋前沿的中 γ 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(Kelvin-Helmholtz instability, 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, 强风一般会出现雷暴高压与热低压之间, 此处出现的大风可能没有对

318 流回波, 预报和预警难度较大(马中元等, 2009)。

319 4 雷暴大风临近预报技术

320 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
321 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,
322 总结提炼出雷暴大风的预报指标。其中探空 T-lnP 图(T log-P diagram)和对流参数在雷暴
323 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、
324 自由对流高度(level of free condensation, LFC)、CAPE、深层垂直风切变和沙氏指数
325 (Showalter Index, 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
326 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2-7 km高度
327 处,径向速度差 $>25\text{ m s}^{-1}$)、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
328 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
329 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
330 大风警告(Sherburn et al, 2021)。目前,国内外多个机构已经研发了不同的强对流天气临
331 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(National Severe
332 Storm Laboratory, NSSL)开发的预警决策支持系统-综合信息系统(Warning Decision Support
333 System-Integrated Information system, WDSS-II)使用多部雷达产品进行风暴单体、冰雹、
334 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
335 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(Short-range Warning of
336 Intense Rainstorms in Localized Systems, SWIRLS)能够进行风暴的追踪和预报(Li et al, 2000)。
337 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
338 坏性下击暴流预报和探测算法(Damaging Downburst Prediction and Detection Algorithm,
339 DDPDA)(Eilts, 1996), Smith et al (2004)的致灾性下击暴流($>26\text{ m s}^{-1}$)预警算法,以
340 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)。

341 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
342 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
343 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
344 也有待提高。对于雷暴大风的临近预报,除了利用观测数据和数值模式输出数据进行的临近
345 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
346 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
347 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
348 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
349 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)
350 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

删除的内容:

352 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
353 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
354 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
355 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
356 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
357 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
358 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”
359 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
360 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
361 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
362 et al, 2019)。

363 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
364 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
365 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
366 取措施来减轻这些系统的潜在危害。

367 5 总结和展望

368 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:

369 (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
370 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 (主要包括飚线
371 和弓状回波) 产生。

372 (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)、
373 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
374 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。

375 (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
376 达反射率因子和径向速度的典型模态以及其它雷达产品可为预报人员提供预报依据。对于雷
377 暴大风的临近预报, 除了利用观测数据和数值模式输出数据进行的临近预报之外, 近年来图
378 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
379 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。

380 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
381 研究成果, 但相关工作仍有以下不足和值得深入研究之处:

382 (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
383 要增加识别雷暴大风的详细观测资料, 包括加密自动站数据、多种雷达数据 (X 波段多普勒
384 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它

385 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
 386 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
 387 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
 388 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。

389 (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
 390 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
 391 段的主要物理过程是不同的，下沉辐散出流、阵风锋前沿的中 γ 尺度涡旋、阵风锋后与 KHI
 392 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
 393 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
 394 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，
 395 还需要进一步研究。

396 (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
 397 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，
 398 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，
 399 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。
 400 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
 401 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
 402 断验证和修改，为雷暴大风的预报和预警提供更好的支持。

403 (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
 404 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
 405 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
 406 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
 407 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
 408 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
 409 总结，促进临近预报能力的持续提升。

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
RJJ	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
T-lnP	T log-P diagram	温度-对数压力图
WDSS-II	Warning Decision Support System-Integrated Information system	预警决策支持系统-综合信息系统

412 参考文献

413 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,
414 Yang M X, et al, 2022. Analysis on causes of ‘4.30’ severe gales and hails event and associated characteristics of dual-polarization
415 radar echoes over Jiangsu[J]. [J Meteor Sin](#), 42(5): 638-649 (in Chinese).

416 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,
417 80(1): 67-81. Chen X X, Yu X D, Wang X M, 2022. Investigation of Derechos in China: spatiotemporal distribution, environmental
418 characteristics, and morphology of Derechos producing convective systems[J]. Acta Meteor Sin, 80(1): 67-81 (in Chinese).

419 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.
420 Characteristic analyses on environmental parameters in short-term severe convective weather in China[J]. Plateau Meteor, 32(1):
421 156-165 (in Chinese).

422 范玉芬, 陈政豫, 杨冬晨, 等, 2015. 桐乡“7.12”飊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
423 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
424 Meteor Sci Technol, 5(6): 13-16 (in Chinese).

425 [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
426 X D, Zhu W J, et al, 2015.Characteristics of the thunderstorm gale process in Hunan and Guangdong on 20 March
427 2013\[J\]. Meteor Mon, 41\(11\):1305-1314\(in Chinese\).](#)

428 [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,
429 G Lin Y J, et al, 2014.Classification and characteristics of cloud patterns triggering regional thunderstorm
430 high winds\[J\]. Meteor Mon, 40\(8\):905-915\(in Chinese\).](#)

431 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,

删除的内容: Sci Meteor Sin

删除的内容:

带格式的: 字体: (默认) 宋体, (中文) 宋体, 六号

带格式的: 缩进: 左侧: 0 厘米, 悬挂缩进: 2 字符, 首行缩进: -2 字符

带格式的

带格式的: 字体: (默认) 宋体, (中文) 宋体, 六号

带格式的

带格式的: 左, 缩进: 左侧: 0 厘米, 悬挂缩进: 2 字符, 首行缩进: -2 字符, 行距: 最小值 21 磅, 孤行控制

删除的内容: .

438 Zhou X G, et al, 2016. Climatic characteristics and environmental parameters of severe thunderstorm gales in China[J]. Meteor Mon,
439 42(12): 1513-1521 (in Chinese).

440 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,
441 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
442 (in Chinese).

443 郭英莲, 孙继松, 2019. 湖北三类组织形态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,
444 2019. Characteristics of strong convective wind events caused by three types of convective systems in Hubei Province[J]. Chin J
445 Atmos Sci, 43(3): 483-497 (in Chinese).

446 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,
447 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
448 identification[J]. Acta Meteor Sin, 71(6): 1160-1171 (in Chinese).

449 李国翠, 刘黎平, 连志鸞, 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
450 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
451 Meteor Sin, 72(1): 168-181 (in Chinese).

452 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,
453 Wang Y C, 2008. Analysis on an exceptionally strong wind gust event in Beijing[J]. Plateau Meteor, 27(6): 1350-1362 (in Chinese).

454 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.
455 Climatology and nowcasting methods for thunderstorm gale in Beijing[J]. Meteor Mon, 35(9): 18-28 (in Chinese).

456 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
457 simulation of microburst[J]. Acta Meteor Sin, 59(2): 183-195 (in Chinese). (查阅网上资料, 不确定标黄部分是否正确,
458 请确认)

459 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,
460 2015. Study of the radar quantitative index of forecasting downburst[J]. Acta Meteor Sin, 73(5): 853-867 (in Chinese).

461 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,
462 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
463 Chinese).

464 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
465 detection algorithm of downburst[J]. Plateau Meteor, 30(3): 784-797 (in Chinese).

466 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,
467 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
468 Meteor Sci, 27(3): 342-351 (in Chinese).

469 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
470 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
471 Chinese).

删除的内容: Automatic identification of ground thunderstorm gale based on the radar mosaic 3D data

删除的内容: 9

删除的内容: 9

带格式的: 突出显示

带格式的: 字体: 小五, 加粗

删除的内容: 5

删除的内容: aster

删除的内容: uction

删除的内容: 5

删除的内容:

删除的内容:

删除的内容: “

删除的内容: ”

485 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,
486 et al, 2023. A review of downburst genesis mechanism and warning[J]. Meteor Mon, 49(2): 129-145 (in Chinese).

487 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
488 D, 2022. Radar characteristics of straight-line damaging wind producing supercell storms[J]. J Appl Meteor Sci, 33(2): 180-191 (in
489 Chinese).

490 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
491 D, Zhang Z G, et al, 2013. A study of the environmental conditions and radar echo characteristics of the supercell-storms in northern
492 Jiangsu[J]. Acta Meteor Sin, 71(2): 209-227 (in Chinese).

493 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,
494 Wang J, Wang Z B, et al, 2021. A downburst nowcasting method based on observations of S-band new generation weather radar[J].
495 Meteor Mon, 47(8): 919-931 (in Chinese).

496 谢健标, 林良助, 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,
497 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):
498 321-329 (in Chinese).

499 杨璐, 韩丰, 陈明轩, 等, 2018. 基于支持向量机的雷暴大风识别方法[J]. 应用气象学报, 29(6): 680-689. Yang L, Han F, Chen M X,
500 et al, 2018. Thunderstorm gale identification method based on support vector machine[J]. J Appl Meteor Sci, 29(6): 680-689 (in
501 Chinese).

502 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
503 Q, Jiang P, et al, 2014. Research of synoptic model and physical quantity parameter of thunder-gust winds impact area[J]. Plateau
504 Meteor, 33(4): 1057-1068 (in Chinese).

505 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
506 al, 2006a. The Principle and Operational Application of Doppler Weather Radar[M]. Beijing: China Meteorological Press: 314 (in
507 Chinese). **(查阅网上资料, 未找到本条文献英文信息, 请确认)**

508 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,
509 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
510 (in Chinese).

511 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
512 severe convection with Doppler weather radar[J]. Adv Meteor Sci Technol, 1(3): 31-41 (in Chinese).

513 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.
514 Thunderstorm and Severe Convection Nowcasting[M]. Beijing: China Meteorological Press: 416 (in Chinese). **(查阅网上资料,**
515 **未找到本条文献英文信息, 请确认)**

516 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
517 severe convective weather research and operational service in China[J]. Acta Meteor Sin, 78(3): 391-418 (in Chinese).

518 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

删除的内容: a

带格式的: 字体: 小五, 加粗

删除的内容: a

带格式的: 字体: 小五, 加粗

删除的内容: b

522 intelligent nowcasting method of severe convective wind based on weather radar data[D]. Tianjin: Tianjin University: 145 (in
523 Chinese).

524 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,
525 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
526 (in Chinese).

527 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,
528 Sheng J, et al, 2015. Advances in techniques of monitoring, forecasting and warning of severe convective weather[J]. J Appl Meteor
529 Sci, 26(6): 641-657 (in Chinese).

530 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
531 climatology and favorable environmental conditions of tornado in China[J]. Adv Meteor Sci Technol, 10(6): 69-75 (in Chinese).

532 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
533 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):
534 317-328 (in Chinese).

535 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
536 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
537 for convective gale weather[C]//Proceedings of the 28th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society in 2011. Beijing:
538 Chinese Meteorological Society: 1-10 (in Chinese). **(查阅网上资料, 未找到本条文献英文信息, 请确认)**

539 Ashley W S, Mote T L, 2005. Derecho hazards in the United States[J]. Bull Amer Meteor Soc, 86(11): 1577-1592.

540 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
541 Climatol, 25(14): 1915-1932.

542 Ashley W S, 2007. Spatial and temporal analysis of tornado fatalities in the United States: 1880-2005[J]. Wea Forecasting, 22(6):
543 1214-1228.

544 Ashley W S, Mote T L, Bentley M L, 2007. The extensive episode of derecho-producing convective systems in the United States during
545 May and June 1998: a multi-scale analysis and review[J]. Meteor Appl, 14(3): 227-244.

546 Ashley W S, Haberte A M, Strohm J, 2019. A climatology of quasi-linear convective systems and their hazards in the United States[J].
547 Wea Forecasting, 34(6): 1605-1631.

548 Atkins N T, Wakimoto R M, 1991. Wet microburst activity over the southeastern United States: implications for forecasting[J]. Wea
549 Forecasting, 6(4): 470-482.

550 Atkins N T, Arnott J M, Przybylinski R W, et al, 2004. Vortex structure and evolution within bow echoes. Part I: single-Doppler and
551 damage analysis of the 29 June 1998 Derecho[J]. Mon Wea Rev, 132(9): 2224-2242.

552 Atkins N T, Bouchard C S, Przybylinski R W, et al, 2005. Damaging surface wind mechanisms within the 10 June 2003 Saint Louis bow
553 echo during BAMEX[J]. Mon Wea Rev, 133(8): 2275-2296.

554 Atkins N T, St. Laurent M, 2009a. Bow echo mesovortices. Part I: processes that influence their damaging potential[J]. Mon Wea Rev,
555 137(5): 1497-1513.

带格式的: 字体: 小五, 加粗

删除的内容: 1

557 Atkins N T, St. Laurent M, 2009b. Bow echo mesovortices. Part II: their genesis[J]. *Mon Wea Rev*, 137(5): 1514-1532.

558 Bentley E S, Logsdon J, 2016. An examination of the mesoscale environment and evolution of the northern Indiana/northwest Ohio
559 derecho of 29 June 2012[J]. *Electronic J Severe Storms Meteor*, 11(1): 1-25.

560 Bentley M L, Mote T L, 1998. A climatology of derecho-producing mesoscale convective systems in the central and eastern United States,
561 1986-95. Part I: temporal and spatial distribution[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 79(11): 2527-2540.

562 Bentley M L, Sparks J A, 2003. A 15 yr climatology of derecho-producing mesoscale convective systems over the central and eastern
563 United States[J]. *Climate Res*, 24(2): 129-139.

564 Bernardet L R, Cotton W R, 1998. Multiscale evolution of a derecho-producing mesoscale convective system[J]. *Mon Wea Rev*, 126(11):
565 2991-3015.

566 Black A W, Ashley W S, 2010. Nontornado convective wind fatalities in the United States[J]. *Nat Hazards*, 54(2): 355-366.

567 Brooks H E, Marsh P T, Kowaleski A M, et al, 2011. Evaluation of European storm forecast experiment (ESTOFEX) forecasts[J]. *Atmos*
568 *Res*, 100(4): 538-546.

569 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):
570 419-448.

571 Bunkers M J, Flegel S R, Grafenauer T, et al, 2020. Observations of hail-wind ratios from convective storm reports across the
572 continental United States[J]. *Wea Forecasting*, 35(2): 635-656.

573 Burke P C, Schultz D M, 2004. A 4-yr climatology of cold-season bow echoes over the continental United States[J]. *Wea Forecasting*,
574 19(6): 1061-1074.

575 Campbell M A, Cohen A E, Coniglio M C, et al, 2017. Structure and motion of severe-wind-producing mesoscale convective systems and
576 derechos in relation to the mean wind[J]. *Wea Forecasting*, 32(2): 423-439.

577 Celiński-Mysław D, Matuszko D, 2014. An analysis of selected cases of derecho in Poland[J]. *Atmos Res*, 149: 263-281.

578 Childs S J, Schumacher R S, Adams-Selin R D, 2021. High-resolution observations of a destructive macroburst[J]. *Mon Wea Rev*, 149(9):
579 2875-2896.

580 Coniglio M C, Stensrud D J, 2004. Interpreting the climatology of derechos[J]. *Wea Forecasting*, 19(3): 595-605.

581 Coniglio M C, Stensrud D J, Richman M B, 2004. An observational study of derecho-producing convective systems[J]. *Wea Forecasting*,
582 19(2): 320-337.

583 Coniglio M C, Corfidi S F, Kain J S, 2011. Environment and early evolution of the 8 May 2009 derecho-producing convective system[J].
584 *Mon Wea Rev*, 139(4): 1083-1102.

585 Conrad D M, Knupp K R, 2019. Doppler radar observations of horizontal shearing instability in quasi-linear convective systems[J]. *Mon*
586 *Wea Rev*, 147(4): 1297-1318.

587 Corfidi S F, 2003. Cold pools and MCS propagation: forecasting the motion of downwind-developing MCSs[J]. *Wea Forecasting*, 18(6):
588 997-1017.

589 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):
590 935-949.

删除的内容: n

删除的内容: i

593 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.

594 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
595 gust front: a case study[J]. J Geophys Res Atmos, 128(3): e2022JD036921.

596 Dodge J, Arnold J, Wilson G, et al, 1986. The cooperative Huntsville meteorological experiment (COHMEX)[J]. Bull Amer Meteor Soc,
597 67(4): 417-419.

598 Doswell III C A, 1982. The operational meteorology of convective weather. Volume I: operational mesoanalysis[R]. NOAA Technical
599 Memorandum NWS NSSFC-5: 172.

600 Doswell III C A, 2001. Severe Convective Storms[M]. Boston: American Meteorological Society.

601 Doswell III C A, 2003. Societal impacts of severe thunderstorms and tornadoes: lessons learned and implications for Europe[J]. Atmos
602 Res, 67-68: 135-152.

603 Doswell III C A, Brooks H E, Kay M P, 2005. Climatological estimates of daily local nontornadic severe thunderstorm probability for the
604 United States[J]. Wea Forecasting, 20(4): 577-595.

605 Droegemeier K K, Wilhelmson R B, 1987. Numerical simulation of thunderstorm outflow dynamics. Part I: outflow sensitivity
606 experiments and turbulence dynamics[J]. J Atmos Sci, 44(8): 1180-1210.

607 Earl N, Simmonds I, 2019. Sub-synoptic-scale features of the South Australia storm of September 2016—Part II: analysis of mechanisms
608 driving the gusts[J]. Weather, 74(9): 301-307.

609 Eilts M D, 1996. Severe weather warning decision support system[C]//Proceedings of the 18th Conference on Severe Local Storms. San
610 Francisco: AMS: 536-540.

611 Evans C, Weisman M L, Bosart L F, 2014. Development of an intense, warm-core mesoscale vortex associated with the 8 May 2009
612 “super derecho” convective event[J]. J Atmos Sci, 71(3): 1218-1240.

613 Evans J S, Doswell III C A, 2001. Examination of derecho environments using proximity soundings[J]. Wea Forecasting, 16(3): 329-342.

614 Finley J P, 1888. The Tornadoes of Iowa for 51 Years, 1837-1887[M]. Washington: National Bureau of Statistics: 10. (查阅网上资料,
615 未找到本条文献出版信息, 请确认)

616 Forbes G S, Wakimoto R M, 1983. A concentrated outbreak of tornadoes, downbursts and microbursts, and implications regarding vortex
617 classification[J]. Mon Wea Rev, 111(1): 220-236.

618 French A J, Parker M D, 2012. Observations of mergers between squall lines and isolated supercell thunderstorms[J]. Wea Forecasting,
619 27(2): 255-278.

620 French A J, Parker M D, 2014. Numerical simulations of bow echo formation following a squall line-supercell merger[J]. Mon Wea Rev,
621 142(12): 4791-4822.

622 Fujita T T, 1976. Spearhead echo and downburst near the approach end of John F. Kennedy airport runway, New York City[R]. SMRP
623 Research Paper Number 137: 56.

624 Fujita T T, 1978. Manual of downburst identification for project NIMROD[R]. SMRP Research Paper Number 156: 111.

625 Fujita T T, 1981. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales[J]. J Atmos Sci, 38(8): 1511-1534.

626 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):

删除的内容: III

删除的内容: III

删除的内容: J

删除的内容: Meteor Monogr, 28(50):
1-26.

删除的内容: III

删除的内容: III

删除的内容: associated with extreme
surface gusts during

删除的内容: -

删除的内容: III

删除的内容: Iowa

删除的内容: pp

带格式的: 字体: 小五, 加粗

删除的内容: f

641 1438-1456.

642 Fujita T T, Wakimoto R M, 1983. Microbursts in JAWS depicted by Doppler radars, PAM, and aerial photographs[C]//[Proceedings of the](#)

643 21st Conference on Radar Meteorology. Edmonton: AMS: 638-645.

644 Fujita T T, 1985. The downburst, microburst, and macroburst[R]. SMRP Research Paper Number 210: 128.

645 Fujita T T, 1990. Downbursts: meteorological features and wind field characteristics[J]. [J Wind Eng Ind Aerodyn](#), 36: 75-86.

646 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](#),

647 147(8): 2827-2845.

648 Gallus W A Jr, Duhachek A C, 2022. Differences in near-storm parameters useful for forecasting intensity of nocturnal and diurnal bow

649 echo winds[J]. [Wea Forecasting](#), 37(12): 2331-2347.

650 Galway J G, Finley J P, 1984. The first severe storms forecaster[R]. NOAA Technical Memorandum ERL NSSL-97: 1-32.

651 Gatzen C, 2011. A 10-year climatology of cold-season narrow cold-frontal rainbands in Germany[J]. [Atmos Res](#), 100(4): 366-370.

652 Gatzen C, 2013. Warm-season severe wind events in Germany[J]. [Atmos Res](#), 123: 197-205.

653 Groenemeijer P, Púčík T, Holzer A M, et al, 2017. Severe convective storms in Europe: ten years of research and education at the

654 European Severe Storms Laboratory[J]. [Bull Amer Meteor Soc](#), 98(12): 2641-2651.

655 Guastini C T, Bosart L F, 2016. Analysis of a progressive derecho climatology and associated formation environments[J]. [Mon Wea Rev](#),

656 144(4): 1363-1382.

657 Hinrichs G, 1888. Tornadoes and derechos[J]. [Amer Meteor J](#), 5: 341-349. (查阅网上资料, 不确定页码信息是否正确, 请确

658 认)

659 Hitchens N M, Brooks H E, 2014. Evaluation of the Storm Prediction Center's convective outlooks from day 3 through day 1[J]. [Wea](#)

660 [Forecasting](#), 29(5): 1134-1142.

661 Hjelmfelt M R, 1988. Structure and life cycle of microburst outflows observed in Colorado[J]. [J Climate Appl Meteor](#), 27(8): 900-927.

662 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.

663 Houze R A Jr, Biggerstaff M I, Rutledge S A, et al, 1989. Interpretation of Doppler weather radar displays of midlatitude mesoscale

664 convective systems[J]. [Bull Amer Meteor Soc](#), 70(6): 608-619.

665 Johns R H, Hirt W D, 1987. Derechos: widespread convectively induced windstorms[J]. [Wea Forecasting](#), 2(1): 32-49.

666 Johns R H, Doswell III C A, 1992. Severe local storms forecasting[J]. [Wea Forecasting](#), 7(4): 588-612.

667 Johnson R H, Hamilton P J, 1988. The relationship of surface pressure features to the precipitation and airflow structure of an intense

668 midlatitude squall line[J]. [Mon Wea Rev](#), 116(7): 1444-1473.

669 Kelly K A, 1985. The influence of winds and topography on the sea surface temperature patterns over the northern California slope[J]. [J](#)

670 [Geophys Res: Oceans](#), 90(C6): 11783-11798.

671 Kessinger C J, Parsons D B, Wilson J W, 1988. Observations of a storm containing mesocyclones, downbursts, and horizontal vortex

672 circulations[J]. [Mon Wea Rev](#), 116(10): 1959-1982.

673 Klimowski B A, Bunkers M J, Hjelmfelt M R, et al, 2003. Severe convective windstorms over the northern High Plains of the United

674 States[J]. [Wea Forecasting](#), 18(3): 502-519.

删除的内容: i

删除的内容: (1)

带格式的: 字体: 小五, 加粗

带格式的: 字体: 小五, 加粗

删除的内容: III

678 Klimowski B A, Hjelmfelt M R, Bunkers M J, 2004. Radar observations of the early evolution of bow echoes[J]. *Wea Forecasting*, 19(4):
679 727-734.

680 Lafore J P, Moncrieff M W, 1989. A numerical investigation of the organization and interaction of the convective and stratiform regions of
681 tropical squall lines[J]. *J Atmos Sci*, 46(4): 521-544.

682 Lagerquist R, McGovern A, Smith T, 2017. Machine learning for real-time prediction of damaging straight-line convective wind[J]. *Wea*
683 *Forecasting*, 32(6): 2175-2193.

684 Lakshmanan V, Smith T, Stumpf G, et al, 2007. The warning decision support system – integrated information[J]. *Wea Forecasting*, 22(3):
685 596-612.

686 Lemon L R, Doswell III C A, 1979. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis[J]. *Mon Wea*
687 *Rev*, 107(9): 1184-1197.

688 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:
689 33.

690 Ludlum D M, 1970. Early American Tornadoes 1586-1870 (the History of American Weather)[M]. Boston: American Meteorological
691 Society: 219.

692 Mahale V N, Zhang G F, Xue M, 2016. Characterization of the 14 June 2011 Norman, Oklahoma, downburst through dual-polarization
693 radar observations and hydrometeor classification[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 55(12): 2635-2655.

694 Mahoney K M, Lackmann G M, Parker M D, 2009. The role of momentum transport in the motion of a quasi-idealized mesoscale
695 convective system[J]. *Mon Wea Rev*, 137(10): 3316-3338.

696 Mahoney K M, Lackmann G M, 2011. The sensitivity of momentum transport and severe surface winds to environmental moisture in
697 idealized simulations of a mesoscale convective system[J]. *Mon Wea Rev*, 139(5): 1352-1369.

698 Mahoney III W P, Rodi A R, 1987. Aircraft measurements on microburst development from hydrometeor evaporation[J]. *J Atmos Sci*,
699 44(20): 3037-3051.

700 Mahoney III W P, 1988. Gust front characteristics and the kinematics associated with interacting thunderstorm outflows[J]. *Mon Wea Rev*,
701 116(7): 1474-1492.

702 Markowski P M, 2002. Hook echoes and rear-flank downdrafts: a review[J]. *Mon Wea Rev*, 130(4): 852-876.

703 Markowski P M, Richardson Y P, 2010. *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd: 407.

704 McCarthy J, Wilson J W, Fujita T T, 1982. The joint airport weather studies project[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 63(1): 15-22.

705 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
706 within a squall line over South China[J]. *J Atmos Sci*, 69(4): 1182-1207.

707 Miller D J, Johns R H, 2000. A detailed look at extreme wind damage in derecho events[C]//Proceedings of the 20th Conference on
708 Severe Local Storms. Orlando: AMS: 52-55.

709 Mueller C K, Carbone R E, 1987. Dynamics of a thunderstorm outflow[J]. *J Atmos Sci*, 44(15): 1879-1898.

710 Orf L, Kantor E, Savory E, 2012. Simulation of a downburst-producing thunderstorm using a very high-resolution three-dimensional
711 cloud model[J]. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 104-106: 547-557.

删除的内容: -

删除的内容: III

带格式的: 字体: 小五, 加粗

删除的内容: The history of American weather:

删除的内容: scale

删除的内容: III

删除的内容: III

删除的内容: 1

720 Pacey G P, Schultz D M, Garcia-Carreras L, 2021. Severe convective windstorms in Europe: Climatology, preconvective environments,
721 and convective mode[J]. *Wea Forecasting*, 36(1): 237-252.

722 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
723 MCS from PECAN[J]. *Mon Wea Rev*, 148(1): 183-209.

724 Pfost R L, Gerard A E, 1997. "Bookend vortex" induced tornadoes along the Natchez Trace[J]. *Wea Forecasting*, 12(3): 572-580.

725 Przybylinski R W, 1995. The bow echo: observations, numerical simulations, and severe weather detection methods[J]. *Wea Forecasting*,
726 10(2): 203-218.

727 Richter H, Peter J, Collis S, 2014. Analysis of a destructive wind storm on 16 November 2008 in Brisbane, Australia[J]. *Mon Wea Rev*,
728 142(9): 3038-3060.

729 Schmocker G K, 1996. Forecasting the initial onset of damaging downburst winds associated with a mesoscale convective system (MCS)
730 using the mid-altitude radial convergence (MARC) signature[C]//[Proceedings of the 15th Conference on Weather Analysis and](#)
731 [Forecasting](#). Norfolk: AMS: 306-311.

732 Schoen J M, Ashley W S, 2011. A climatology of fatal convective wind events by storm type[J]. *Wea Forecasting*, 26(1): 109-121.

733 Schumacher R S, Rasmussen K L, 2020. The formation, character and changing nature of mesoscale convective systems[J]. *Nat Rev*
734 *Earth Environ*, 1(6): 300-314.

735 Sherburn K D, Bunkers M J, Mose A J, 2021. Radar-based comparison of thunderstorm outflow boundary speeds versus peak wind gusts
736 from automated stations[J]. *Wea Forecasting*, 36(4): 1387-1403.

737 Skamarock W C, Weisman M L, Klemp J B, 1994. Three-dimensional evolution of simulated long-lived squall lines[J]. *J Atmos Sci*,
738 51(17): 2563-2584.

739 Smith B T, Castellanos T E, Winters A C, et al, 2013. Measured severe convective wind climatology and associated convective modes of
740 thunderstorms in the contiguous United States, 2003-09[J]. *Wea Forecasting*, 28(1): 229-236.

741 Smith B T, Thompson R L, Grams J S, et al, 2012. Convective modes for significant severe thunderstorms in the contiguous United States.
742 Part I: storm classification and climatology[J]. *Wea Forecasting*, 27(5): 1114-1135.

743 Smith T M, Elmore K L, Dufin S A, 2004. A damaging downburst prediction and detection algorithm for the WSR-88D[J]. *Wea*
744 *Forecasting*, 19(2): 240-250.

745 Srivastava R C, 1987. A model of intense downdrafts driven by the melting and evaporation of precipitation[J]. *J Atmos Sci*, 44(13):
746 1752-1774.

747 Straka J M, Anderson J R, 1993. Numerical simulations of microburst-producing storms: some results from storms observed during
748 COHMEX[J]. *J Atmos Sci*, 50(10): 1329-1348.

749 Surowiecki A, Taszarek M, 2020. A 10-year radar-based climatology of mesoscale convective system archetypes and derechos in
750 Poland[J]. *Mon Wea Rev*, 148(8): 3471-3488.

751 Taszarek M, Brooks H E, Czernecki B, 2017. Sounding-derived parameters associated with convective hazards in Europe[J]. *Mon Wea*
752 *Rev*, 145(4): 1511-1528.

753 Taszarek M, Allen J, Púčík T, et al, 2019. A climatology of thunderstorms across Europe from a synthesis of multiple data sources[J]. *J*

删除的内容: 3

755 Climate, 32(6): 1813-1837.

756 Trapp R J, Mitchell E D, Tipton G A, et al, 1999. Descending and nondescending tornadic vortex signatures detected by WSR-88Ds[J].
757 Wea Forecasting, 14(5): 625-639.

758 Trapp R J, Weisman M L, 2003. Low-level mesovortices within squall lines and bow echoes. Part II: their genesis and implications[J].
759 Mon Wea Rev, 131(11): 2804-2823.

760 Vescio M D, Johnson R H, 1992. The surface-wind response to transient mesoscale pressure fields associated with squall lines[J]. Mon
761 Wea Rev, 120(9): 1837-1850.

762 Wakimoto R M, 1982. The life cycle of thunderstorm gust fronts as viewed with Doppler radar and rawinsonde data[J]. Mon Wea Rev,
763 110(8): 1060-1082.

764 Wakimoto R M, 1985. Forecasting dry microburst activity over the High Plains[J]. Mon Wea Rev, 113(7): 1131-1143.

765 Wakimoto R M, 2001. Convectively driven high wind events[J]. Meteor Monogr, 28(50): 225-298.

766 Wakimoto R M, Murphey H V, Nester A, et al, 2006a. High winds generated by bow echoes. Part I: overview of the Omaha bow echo 5
767 July 2003 storm during BAMEX[J]. Mon Wea Rev, 134(10): 2793-2812.

768 Wakimoto R M, Murphey H V, Davis C A, et al, 2006b. High winds generated by bow echoes. Part II: the relationship between the
769 mesovortices and damaging straight-line winds[J]. Mon Wea Rev, 134(10): 2813-2829.

770 Weisman M L, 1992. The role of convectively generated rear-inflow jets in the evolution of long-lived mesoconvective systems[J]. J
771 Atmos Sci, 49(19): 1826-1847.

772 Weisman M L, 1993. The genesis of severe, long-lived bow echoes[J]. J Atmos Sci, 50(4): 645-670.

773 Weisman M L, Trapp R J, 2003. Low-level mesovortices within squall lines and bow echoes. Part I: overview and [dependence on](#)
774 [environmental shear](#)[J]. Mon Wea Rev, 131(11): 2779-2803.

775 Weiss S J, Hart J A, Janish P R, 2002. An examination of severe thunderstorm wind report climatology: 1970-1999[C]//[Proceedings of the](#)
776 [21st Conference on Severe Local Storms](#). San Antonio: AMS.

777 Wheatley D M, Trapp R J, Atkins N T, 2006. Radar and damage analysis of severe bow echoes observed during BAMEX[J]. Mon Wea
778 Rev, 134(3): 791-806.

779 Wilson J W, Roberts R D, Kessinger C, et al, 1984. Microburst wind structure and evaluation of Doppler radar for airport wind shear
780 detection[J]. J Climate Appl Meteor, 23(6): 898-915.

781 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.

782 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):
783 1963-1986.

784 Xu X, Xue M, Wang Y, 2015b. Mesovortices within the 8 May 2009 bow echo over the central United States: analyses of the
785 characteristics and evolution based on Doppler radar observations and a high-resolution model simulation[J]. Mon Wea Rev, 143(6):
786 2266-2290.

787 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):
788 1289-1299.

删除的内容: -

删除的内容: , severe convective storms

删除的内容: sensitivity to environmental vertical wind shear

删除的内容: : 11B. 2

删除的内容: ing

796 | Yang X.L., Sun J.H., 2018. Organizational modes of severe wind-producing convective systems over North China[J]. Adv Atmos Sci,
797 35(5): 540-549.
798

气象学报