

● 中国气象局培训中心继续教育丛书 >>>

新 一 代

天气雷达业务应用 论文集

俞小鼎 主编

气象出版社

中国气象局培训中心继续教育丛书

新一代天气雷达业务应用论文集

俞小鼎 主编

气象出版社

图书在版编目(CIP)数据

新一代天气雷达业务应用论文集/俞小鼎主编. —北京:气象出版社,2008.5
ISBN 978-7-5029-4468-1

I. 新… II. 俞… III. 气象雷达—文集 IV. TN959.4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 023697 号

出版发行:气象出版社

地 址:北京中关村南大街 46 号

邮政编码:100081

网 址:<http://cmp.cma.gov.cn>

E-mail:qxcsbs@263.net

电 话:总编室 010-68407112,发行部 010-68409198

责任编辑:张 斌

终 审:章澄昌

封面设计:博雅思企划

责任技编:都 平

责任校对:浩民图文

印 刷 者:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:30

字 数:768 千字

印 数:1—1000

版 次:2008 年 5 月第 1 版

印 次:2008 年 5 月第 1 次印刷

定 价:120.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部联系调换

前 言

由 158 部多普勒天气雷达构成的中国气象局新一代天气雷达网的建设已经完成了大半。自从 1999 年第一部业务多普勒天气雷达在安徽合肥开始运行以来,先后举办过三次新一代天气雷达业务应用的研讨班,分别是 2003 和 2005 年中国气象局预测减灾司在北京和天津举办的新一代天气雷达应用研讨会及中国气象局培训中心于 2006 年在北京举办的新一代天气雷达业务应用研讨讲习班。本文集的内容主要选自这三次研讨会参加者的论文,同时还有一些特邀的论文,基本上反映了我国新一代天气雷达的业务应用情况和水平。文集收录的 54 篇论文来自全国 30 个省、自治区、直辖市、计划单列市和香港特别行政区,其中 21 篇来自地市级气象台的最基层业务人员。内容包括了强冰雹、龙卷、雷雨大风、暴雨的多普勒天气雷达监测和预警,定量降水估计,雷暴路径和降水的临近预报,雷达数据质量控制,雷达数据三维拼图等。加拿大气象局的 Paul Joe 博士在编者特邀他撰写的论文中对于如何监测雷达的数据质量提出了建设性的方案,并且使用“世界气象组织天气研究计划 2008 年北京奥运会临近预报展示计划”测试试验期间北京和天津 SA 雷达的数据进行了方法演示。中国气象科学研究院的刘黎平研究员、安徽省气象台的首席预报员郑媛媛正研高工、江西省气象台的首席预报员许爱华正研高工、山东省气象台的朱君鉴正研高工、上海气象局的邵玲玲正研高工、广东省气象台的冯业荣正研高工、上海气象台首席预报员戴建华、湖南省气象局廖玉芳、香港天文台杨汉贤博士、北京城市气象研究所陈明轩副研究员、武汉暴雨所肖艳娇博士应编者邀请提供了论文,在此表示衷心的感谢。

本文集的全部论文都经过俞小鼎教授审阅,对大部分论文提出了修改意见,作者都根据意见进行了认真的修订。袁薇博士协助做了大量与作者联络的工作,特别致谢。

编者

2007 年 11 月

目 录

前言

强对流天气的多普勒天气雷达探测和预警	俞小鼎(1)
A First Look at Radar Data Quality for the Beijing 2008 Forecast Demonstration Project	Paul Joe(19)
长江流域梅雨锋暴雨过程的中尺度结构个例分析	刘黎平 阮 征 章丹宇(33)
一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析	郑媛媛 俞小鼎 方 翀等(42)
珠江三角洲前汛期强对流天气潜势算法研究	冯业荣 汪 瑛 彭涛涌等(55)
一次冰雹风暴的 CINRAD/SA 产品分析	朱君鉴 刁秀广 黄秀韶(67)
安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析	俞小鼎 郑媛媛 张爱民等(77)
一次系列下击暴流事件的多普勒天气雷达分析	俞小鼎 张爱民 郑媛媛等(88)
多普勒天气雷达中气旋产品在强风预报中的应用	邵玲玲 孙 婷 郭 锐等(99)
江西冰雹和短时强降水的多普勒雷达产品的对比分析	许爱华 应冬梅 黄祖辉(105)
利用等温雷达反射率因子的闪电临近预报方案	杨汉贤 黎守德(116)
一次强飑线的成因及维持和加强机制分析	姚建群 戴建华 姚祖庆(124)
安徽“020824”飑线过程分析	姚叶青 俞小鼎 魏 鸣等(133)
区域雷达网同步观测对比分析	肖艳姣 刘黎平 杨洪平(142)
宁波夏季对流性短时暴雨和台风短时暴雨的雷达回波特征对比分析	何彩芬 朱龙彪 董杏燕等(153)
强烈雹暴的雷达三体散射统计与个例分析	廖玉芳 俞小鼎 吴林林等(159)
安徽新一代天气雷达中气旋产品特征值统计和个例分析	方 翀 郑媛媛(169)
2005 年淮北主汛期持续性暴雨雷达分析	刘 娟 宋子忠 张 健等(175)
北京地区雹云多普勒天气雷达回波特征	王 令 郑国光 康玉霞等(184)
B08FDP 各系统 2007 年汛期的使用评述	孔 荣 王迎春 俞小鼎等(194)
北京“040710”突发性对流强降水的雷达回波特征分析	陈明轩 俞小鼎 谭晓光等(208)
天津两次超级单体风暴的雷达回波特征对比分析	胡 玲 张殿江(221)
鄂尔多斯一次冰雹暴雨回波演变过程的多角度特征分析	段景瑞 郭 晟(230)
河北一次大暴雨天气过程不同阶段的多普勒雷达资料分析	赵玉广 裴宇杰(237)

强风暴单体的临近预报方法分析	李 茜 张卫中(245)
一次致灾冰雹的多普勒雷达产品资料分析	李智才 李毓富 马星芬(253)
台风降水 Z-R 关系研究	何宽科 范其平 李开奇等(260)
2006 年 6 月 10 日浙江雷暴大风过程分析	陈淑琴(265)
0418 号热带风暴“艾利”多普勒雷达定位方法的探讨	吴陈锋 郑秀云(271)
台风“艾利”多普勒速度特征分析	施碧霞 汤达章 郭 林(277)
一次弓形回波过程多普勒雷达资料特征分析	李淑玲 臧传花(285)
济南“7.18”特大暴雨多普勒雷达回波特征分析	刁秀广 车军辉 张少林等(295)
山东半岛冷流暴雪的多普勒雷达特征分析	杨成芳(301)
多普勒雷达产品在强对流天气临近预报中的应用	徐正敏 王世枢 孙建印等(308)
苏北一次强降水过程中的 β 中尺度和 γ 中尺度结构分析	吴芳芳 王 慧 吴 莹(314)
福建 050322 强飑线过程的中小尺度特征分析	冯晋勤 童以长 林河富等(321)
广东 050322 飑线强破坏事件的多普勒雷达分析	贺汉清(328)
桂林一次强飑线天气的新一代天气雷达探测和临近预报	李向红(335)
一次强雷暴过程中不同结构类型的雷达特征分析	牛淑贞 乔春贵 康雯瑛(346)
鄂东台风大暴雨的多普勒雷达回波特征分析	刘火胜 浦燕鸿(354)
湖南超级单体风暴的统计特征	廖玉芳 俞小鼎 唐小新等(359)
吉林 050713 强对流天气雷达回波特征	王铁岩 赵玉新 郭淑芳等(373)
2006 年 7 月 14 日辽宁强对流天气过程的成因分析	金 巍 曲 岩(379)
利用多普勒天气雷达资料分析大兴安岭地区飑线	赵 玲 李树岭 陈 方等(389)
陕西中部一次下击暴流的多普勒雷达回波特征	毕 旭 罗 慧 刘 勇(399)
陕北地区一次区域性暴雨过程的多普勒回波分析	刘慧敏 毕 旭 张小军等(406)
甘肃“050530”强对流风暴的 CINRAD/CC 特征分析	李晓霞 王有生 朱拥军等(413)
宁夏一次连续性大到暴雨过程的新一代天气雷达资料分析	陈晓娟 沈 阳 穆建华等(422)
北疆准噶尔盆地南缘两例强冰雹天气的对比分析	张 燕 程相儒 康永义等(428)
四川省南部一次暴雨天气过程的多普勒雷达资料分析	何 军 谢 键 胡红兵(436)
云南昭通一次经典的超级单体风暴个例	詹正杰 余加贵(442)
滇南一次弓状回波带过程的分析	黄海波 汪 德 杨松福等(449)
2005 年 5 月 2 日一次强冰雹过程雷达回波资料分析	李明元 陈明林 雷登林等(453)
BJ-ANC 系统在 B08FDP 第二次测试期间的应用	陈明轩 王迎春 俞小鼎等(460)

强对流天气的多普勒天气雷达探测和预警

俞小鼎

(中国气象局培训中心,北京 100081)

提 要

本文简要介绍了强对流天气(包括强冰雹、龙卷、雷雨大风和暴洪)的多普勒天气雷达识别和预警技术。

关键词:多普勒天气雷达 强对流 识别与预警

1 引言

强对流天气是造成气象灾害的主要天气类型之一,主要包括冰雹、龙卷风、雷雨大风和暴洪。天气雷达从半个多世纪前开始应用于气象领域,一直是监测和预警强对流天气的主要工具。天气雷达发射一系列脉冲电磁波,电磁波遇到云雨等气象目标会向四面八方散射,其中后向散射波被雷达接收。传统天气雷达只能提取回波中的强度(反射率因子)信息,而多普勒天气雷达除了提取反射率因子信息外,还可以从雷达回波中提取云雨目标沿雷达径向的运动速度和相应的谱宽的信息,大大加强了天气雷达的监测和预警能力。我国正在建设的新一代天气雷达网全部由多普勒天气雷达构成。新一代天气雷达比传统雷达具有更高的空间分辨率和探测灵敏度,可以探测到传统雷达通常探测不到的晴空回波。美国于1996年完成了150多部新一代天气雷达的布网工作。中国气象局计划在2010年以前完成158部新一代天气雷达的布网工作,到目前为止已完成130余部雷达的布网。我国的新一代天气雷达共有S(10 cm)和C(5 cm)两个波段七种型号,其中CINRAD-SA型和SB型多普勒天气雷达与美国的WSR-88D在结构和应用软件方面几乎完全相同,是我国东部沿海地区、长江流域、淮河流域、黄河下游和珠江流域的主要布网雷达。已布设的新一代天气雷达已发挥了明显效益。新一代天气雷达的应用领域主要包括对流天气的探测和预警、降水估计、雷达上方大气垂直风廓线的估测和通过对雷达反射率因子和径向速度数据的同化为高分辨率数值预报模式提供初始场。本文将对利用新一代天气雷达进行强对流天气的识别和预警的技术进行简要的介绍。

2 对流风暴(雷暴)的分类及其产生的环境条件

2.1 强对流风暴的分类

任何对流风暴(雷暴)都是由对流单体构成,对流单体在雷达反射率因子图上表现为一个个分立的密实区域。对流单体分为普通单体和超级单体^[1]。普通单体的生命史通常经历

三个阶段^[2],即塔状积云阶段、成熟阶段和消散阶段。各个阶段约为 7~10 分钟,整个生命史一般在 20~30 分钟左右。在某些特殊的有利天气条件下,单体的成熟阶段可处于一种动态平衡的准稳定状态,可持续 30 分钟以上甚至数小时。这种长时间持续的处于准稳定状态的对流单体称为超级单体。Marwitz(1972)^[3]和 Chisholm(1973)^[4]将对流风暴划分为多单体风暴、超级单体风暴、强烈剪切风暴和飑线。Browning (1978)^[1]将对流风暴划分为孤立单体风暴、多单体风暴和线风暴(飑线),其中孤立单体风暴既可以是普通单单体风暴也可以是孤立的超级单体风暴,而构成多单体风暴和飑线的对流单体既可以是普通单体也可以是超级单体。雷达气象学界在 1990 年代重新定义超级单体为具有深厚持久的中气旋的雷暴单体^[5]。目前雷达气象学的研究人员倾向于将对流风暴划分为超级单体风暴和非超级单体风暴两大类,而从事强对流天气预报的业务人员仍然习惯于将对流风暴划分为普通单单体风暴、多单体风暴、超级单体风暴和飑线。其中多单体风暴通常指由几个呈团状分布的普通单体构成的雷暴,而超级单体风暴既可以是孤立的超级单体风暴,也可以是由一个超级单体和几个普通单体紧密相连构成的团状多单体雷暴,其中超级单体占支配地位。也就是说,如果多单体风暴中有一个单体是占支配地位的超级单体,更倾向于将整个多单体风暴归类为超级单体风暴。在超级单体风暴和强烈多单体风暴之间的区别并不是非常明显的,所谓的“超级单体”风暴多数情况下也具有一定程度的“多单体”结构,其最本质的特征是具有一个持久深厚的中气旋。超级单体风暴划分为经典超级单体、强降水超级单体和弱超级单体^[6]。飑线是多个单体呈线状排列构成的线风暴(直线、弧线或波形线),其 35 dBZ 以上回波部分的长宽之比要求超过 5:1,并且长度最少为 50 km。天气学上的飑线概念通常还要求有两个以上测站的气压涌升、温度下降、风速增大和风向突变。构成飑线的单体可以有超级单体,也就是镶嵌在飑线内的超级单体风暴。普通单单体风暴、多单体风暴、超级单体风暴和飑线是根据其雷达回波形态确定的雷暴类型,而有些强对流类型如中尺度对流复合体(MCC)是根据其卫星云图特征定义的,MCC 从雷达回波判断有时呈现飑线结构,有时是多个多单体风暴、超级单体风暴、飑线和层状云降水区(或层状云、积状云混合降水区)的集合体。

2.2 强对流风暴产生的环境条件

决定对流产生的三个要素是大气层结的垂直稳定性、水汽条件和抬升(触发)机制。大气层结垂直稳定度和水汽条件代表的雷暴潜势通常通过两个重要的参数——对流有效位能 CAPE 和对流抑制 CIN 来代表(见图 1)。

抬升机制主要由边界层辐合线、重力波和中尺度地形抬升作用产生。边界层辐合线可以是锋面、干线,也可以是中尺度的雷暴出流边界(阵风锋)和海陆风辐合线等。边界层辐合线是触发雷暴的重要机制^[7,8]。美国国家大气研究中心(NCAR)的雷暴临近预报系统 Auto-nowcaster 主要建立在识别边界层辐合线的基础上^[9]。边界层辐合线在雷达回波上表现为晴空窄带回波,强度在 5~20 dBZ 之间,回波产生的原因可能是一些生物目标(例如昆虫)在辐合线上浓度的相对集中,也有学者认为是辐合线附近相对强的湍流造成的回波。前一种说法更流行,证据更充分一些^[10]。在不少情况下,中尺度地形的迎风坡也可以为雷暴的生成提供必要的抬升触发机制。重力波也是触发对流的一种机制,只是不容易观测到它的存在,因此也很难为雷暴起始的预报提供有效的线索。

决定雷暴的组织结构和强弱的关键因子之一是风向风速随高度的变化,即垂直风切变。表示深层垂直风切变最简便的方式是根据 6 km 和地面之间风矢量之差的绝对值(也可以

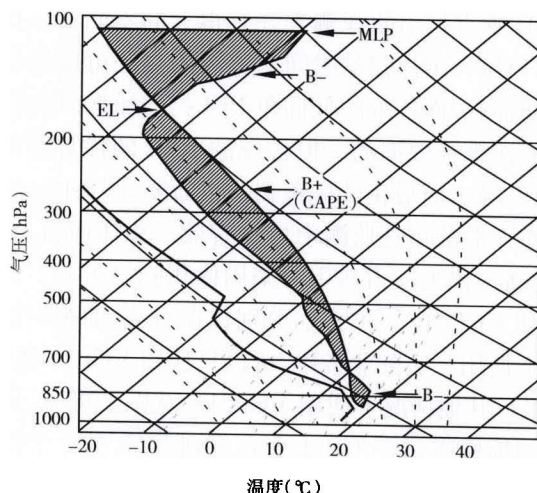


图1 T - $\ln P$ 图中分析对流潜势,其中 CAPE 和 CIN 分别如图中 B_+ 和 B_- 所示

用 500 hPa 和地面之间风矢量差)。若该值超过 20 m/s,则属于较强垂直风切变;若该值在 15~20 m/s 之间,则属于中等偏上强度垂直风切变;若该值在 12 m/s 以下,则是比较弱的垂直风切变。上述阈值只提供一个大致参考,具体的划分需要根据局地气候条件进行修正。在垂直风切变较弱时,一般只会出现单单体对流风暴或组织松散的多单体风暴;在中到强度垂直风切变条件下,有利于组织完好的多单体强风暴和飚线的出现;如果垂直风切变加强,并且风向在低空的顺时针旋转比较明显,则有利于超级单体风暴的产生^[4]。因此,强的对流不稳定、中等到强的垂直风切变和充沛的低层水汽供应加上适当的抬升条件是强对流风暴产生的有利环境。

需要指出的是,上述对流前环境的确定目前主要依靠探空,而探空的时空分辨率很低,时间上每隔 12 小时一次,空间相隔 200~300 km,利用其判断风暴前环境很不可靠。尤其是大气水汽的空间和时间变率很大,而水汽的分布对大气稳定性影响很大。对于午后深层垂直风切变的估计,500 hPa 的风场可以利用数值预报模式结果,地面风观测目前至少 3 小时一次,密集的自动站观测甚至 10 分钟 1 次,这样可以估计午后的垂直风切变。在雷达周边有大片降水的情况下,其 VAD 风廓线产品可以比较好地给出雷达上空垂直风廓线,并且每 6 分钟更新一次,可以用来判断垂直风切变。对于午后对流有效位能 CAPE 的估计需要在对 08 时探空进行订正的基础上进行估计。订正主要根据简单的法则结合局地经验进行。例如在冷暖平流不明显时,可以用预报的午后最高地面气温和 08 时边界层的平均比湿来估计午后的对流有效位能 CAPE。

3 强对流天气的雷达识别与预警

强对流天气指的是直径 2 cm 以上的冰雹、除水龙卷之外的所有龙卷、瞬时风速 8 级以上的雷雨大风(美国天气局雷雨大风标准是 10 级以上瞬风)和暴洪。暴洪往往由对流暴雨过程所导致。另外雷电时常造成人员伤亡,是否列入强对流天气视具体情况确定。

3.1 新一代天气雷达的观测方式

新一代天气雷达以体积扫描方式作为主要的观测方式,这与传统雷达采用的低层 PPI

扫描加上对强回波的 RHI 垂直扫描的观测方式有很大的不同。体扫可以给出回波相对完整的三维结构,而一个体扫接一个体扫的时间上连续的观测可以提供一个比较完整的四维基数据(三维空间加一维时间),而传统的低仰角 PPI 扫描加强回波垂直 RHI 扫描的方式是无法提供这样相对完整的四维基数据的。但传统的 RHI 的优势是可以对强回波进行快速扫描,约 30 秒钟左右更新一次,而最快的体积扫描也需要 5 分钟左右更新一次,因此传统的观测方式或许在人工消雹作业的雷达监测中更加有效。总体而言,体积扫描的优势远远超过传统的扫描方式,因此新一代天气雷达主要采用体积扫描方式。新一代天气雷达的体扫方式有 VCP11、VCP21 和 VCP31 三种方式,分别在强对流、非强对流的显著性降水 and 无降水(包括微量降水情况)下使用。实际业务中,可以只使用 VCP11 和 VCP21 两种体扫模式,强对流情况下使用 VCP11,其他情况下使用 VCP21。从图 2 可见,VCP11 从最低 0.5°到最高 19.5°共由 14 个仰角扫描构成,而 VCP21 由 0.5°到 19.5°的 9 个仰角扫描构成,在距离雷达达 150 km(80 n mile*)以内时,VCP11 在高空比 VCP21 具有高得多的垂直分辨率,这就是

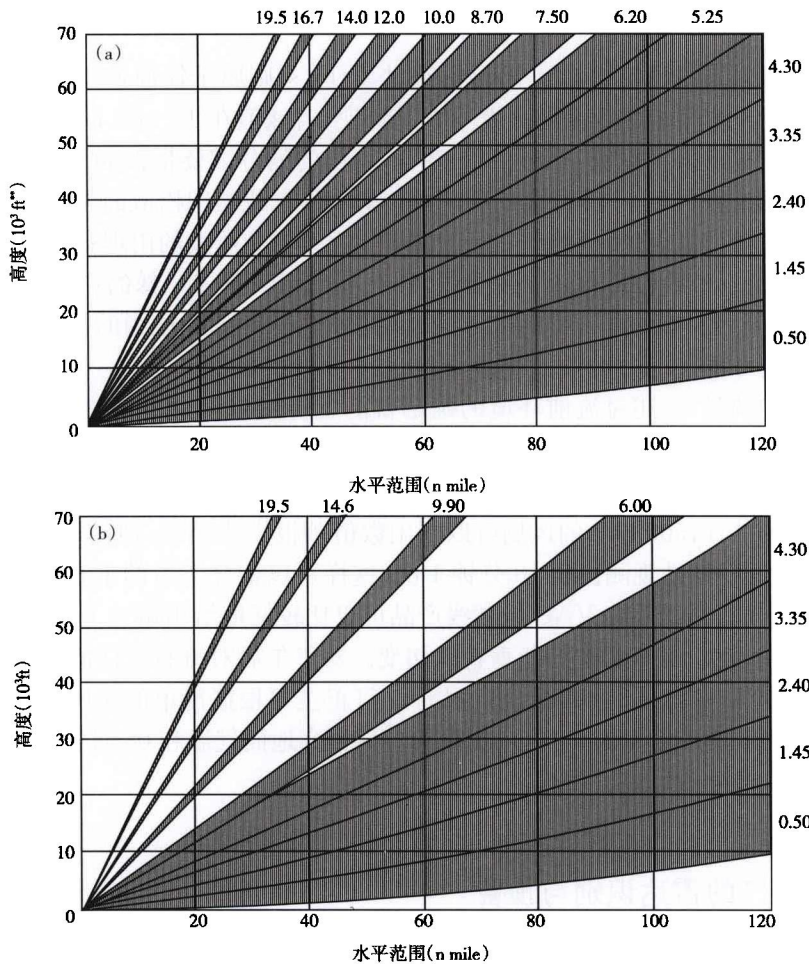


图 2 (a)VCP11 和(b)VCP21 体积扫描模式

* 1 n mile=1852 m
** 1 ft=0.3048 m

在强对流情况下要求使用 VCP11 体扫模式的主要原因。另外一个原因是 VCP11 一个体扫所需时间为 5 分钟,而 VCP21 所需时间为 6 分钟,即 VCP11 比 VCP21 具有更快的更新周期,更适合于观测强对流风暴。最高仰角设定为 19.5° 的主要原因是超过该角度,垂直速度对径向速度的贡献将不能忽略,而 19.5° 以下可以忽略垂直气流对径向速度的贡献,只将径向速度解释为风(水平气流)在雷达径向上的投影,具有清晰的物理意义,便于解释和应用。这样, 19.5° 以上就没有观测,该区域称为静锥区。由于静锥区的存在,当雷暴到雷达距离在 20 km 以内时,其位于 6 km 以上的部分是无法观测到的。另外,在远离雷达的地方,雷达波束的线宽度变得较大,同时由于地球曲率的影响,最低仰角波束中心到地面高度变得较大,雷暴下半部分不能观测到。因此,雷达对于雷暴的最佳探测距离通常在 20—120 km 之间(对于强雹暴,有效的探测距离可以达到 300 km 以上)。

3.2 中气旋

中气旋是与强对流风暴相联系的最重要的雷暴尺度速度场特征。自 20 世纪 70 年代以来,多普勒天气雷达先是在研究中使用,后来随着 WSR-88D 在美国全国的布网而开始在业务中广泛使用。对流风暴的径向速度回波的资料逐步积累。从较大范围的径向速度场特征可以判断环境风场随高度变化情况,对于确定风场环境是否有利于强对流风暴的发展非常有用。小尺度的径向风速特征如旋转、辐合和辐散可用来判断对流风暴的强弱和进一步的发展趋势。超级单体风暴是对流风暴中最为猛烈的。大量观测和数值模拟表明^[1,15],超级单体风暴总是与径向速度场上称为“中气旋(mesocyclone)”^[12]的小尺度涡旋相伴随,这个“中气旋”与最早由 Brooks(1949)^[13]通过分析龙卷周围的地面气压场得出的龙卷母气旋基本上是同一个概念。为了业务上使用中气旋来预警强对流风暴和龙卷,美国天气局制定了中气旋识别判据^[11],要求在速度切变、垂直伸展和时间持续性三个方面都满足一定指标的小尺度涡旋才能被认定为中气旋。中气旋分为强、中等和弱三个等级。一旦识别出中气旋,要立即发布强对流天气警报;而一旦识别出强中气旋,要立即发布龙卷警报。在出现中气旋时,强冰雹、龙卷和雷雨大风三种强对流天气中至少出现一种的概率在 90% 以上,在出现强中气旋时,龙卷发生概率为 40%。中气旋往往最先出现在超级单体风暴的中层,然后分别向上下发展。但也并非总是如此。图 3 给出了成熟阶段中气旋的概念模型。在对流风暴的低层,风场特征为辐合型气旋式旋转(图 3a),中低层为纯粹气旋式旋转(图 3b),中高层为辐散型气旋式旋转(图 3c),高层风暴顶为纯粹辐散(图 3d)。

在我国一些地区新一代天气雷达开始应用以来,观测到不少超级单体及其相应的中气旋个例^[11,14,23,30,31,43],每个个例都产生了强烈天气,主要是灾害性大风、大冰雹和龙卷。这些个例中的一些超级单体中气旋的结构与图 3 中的概念模型基本相符^[14,43]。

3.3 大冰雹的雷达探测与预警

冰雹是我国分布很广、危害最大的强对流灾害,每年我国都因为雹灾而遭受巨大损失,其中大冰雹的危害最大。

大冰雹是指降落到地面时直径超过 2 cm 的冰雹。要产生大冰雹,雷暴中的上升气流要足够大,并且强的上升气流需要持续一段时间。

有利于大冰雹产生的环境条件是:1)比较大的对流有效位能 CAPE,尤其是位于 -10°C 和 -30°C 等温线之间的对流有效位能比较大;2)0—6 km 之间的垂直风切变较大;3)0℃层

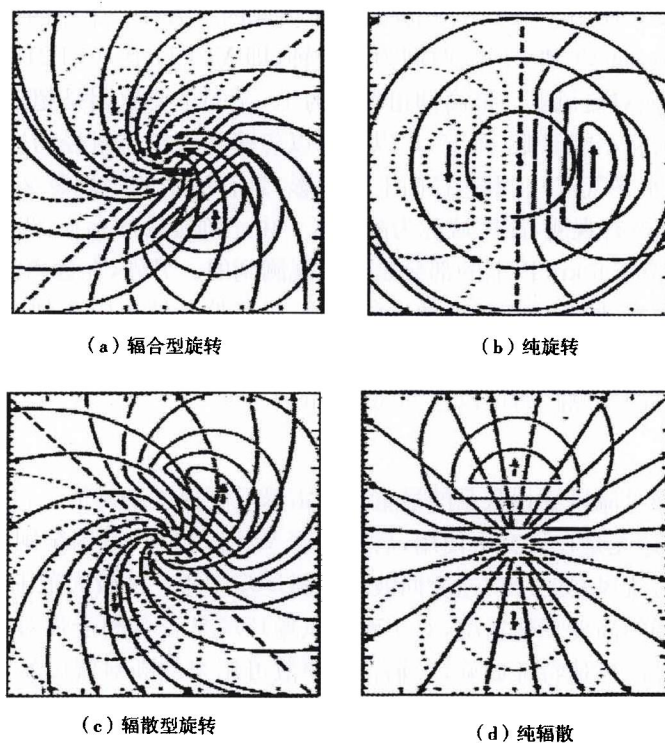


图3 成熟阶段中气旋的概念模型

距地面的高度不是太高。

产生大冰雹的强对流风暴的最显著的特征体现在反射率因子高值区向上扩展到较高的高度。具体地讲,如果 -20°C 等温线对应的高度之上有超过 50 dBZ 的反射率因子,则有可能产生大冰雹。相应反射率因子的值越大,相对高度越高,产生大冰雹的可能性和严重程度越大^[16]。一般而言,如果 50 dBZ 的回波扩展到 -20°C 等温线以上高度,同时 0°C 层距地面的高度不超过 4.5 km,可以考虑发布强冰雹预警。

图 4 根据在加拿大观测的数据给出了 50 dBZ 最大高度、 0°C 层距地面的高度与冰雹直径之间关系的散点图。总体上看,50 dBZ 最大高度越大,冰雹直径越大;当 0°C 层距地面的高度增加时,要降同样直径的冰雹则需要 50 dBZ 最大高度也增加。但个例之间差异很大,例如图中 3 个 6 cm 以上直径降雹个例中,2 个个例 50 dBZ 最大高度在 11 km 左右,而第三个个例中 50 dBZ 最大高度只有 8.3 km,3 个个例中, 0°C 层距地面的高度都在 3 km 左右。从图中注意到,在所有降雹直径在 2 cm 以上的个例中, 0°C 层距地面的高度都不超过 4.1 km。需要指出的是,图 4 是根据在加拿大的一些观测给出的图,并不能代表我国各地的情况。因此,在每一个地区,都可以根据当地的数据制作一幅与图 4 类似的图,对当地的冰雹预警是非常有参考价值的。

大冰雹形成要求的强烈上升气流速度多数情况下在中等以上垂直风切变情况下才能达到。有时在较弱垂直风切变情况下也可以产生大冰雹,此时产生强对流天气的雷暴称为脉冲风暴。脉冲风暴通常是多单体风暴,其中一个或几个单体可以发展为强单体,其主要特征是初始回波高度比较高,通常在 6~9 km 之间,回波中心强度超过 50 dBZ。脉冲风暴可以

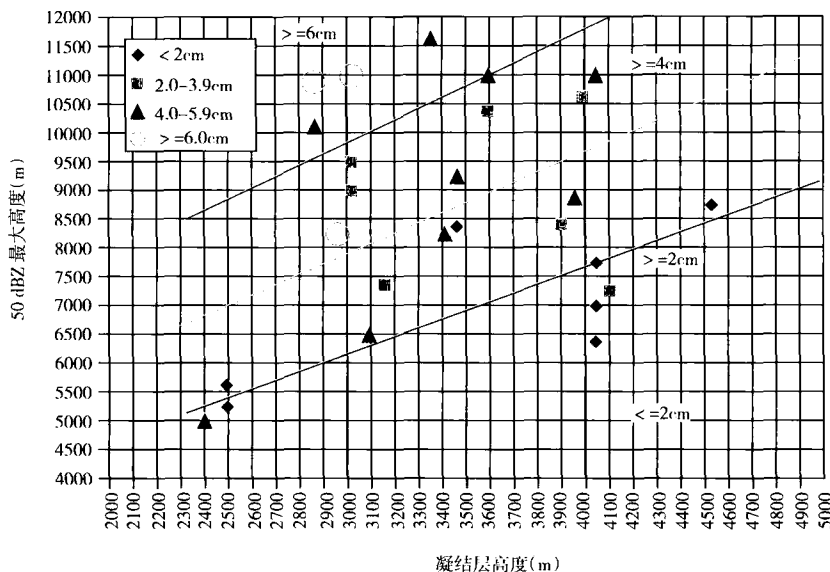


图4 50 dBZ 高度、0℃层距地面的高度与冰雹直径之间关系的实测数据散点图(Paul Joe 提供)

产生边际尺度(2 cm 左右)的大冰雹,但持续时间较短,预警相对困难。

1970 年代后期,Lemon(1980)^[17]提出了一种在中等以上垂直风切变环境中识别雷暴内上升气流强弱的概念模型,受到美国强对流天气预警业务人员的欢迎。该模型强调风暴的三维结构。图 5 中的三张示意图,代表不同类型上升气流强度不同的风暴。对于多单体风暴,图中的风暴单体代表其中发展最强盛的风暴单体。每种风暴类型由高中低层反射率因子平面综合图和沿风暴低层入流方向通过回波单体核心的相应垂直剖面来表示。平面图上,阴影区表示低层回波反射率因子等值线,虚线表示中层回波强度超过 20 dBZ 的范围,白色小圆点代表风暴顶的位置。线段 AB 给出相应垂直剖面的位置。图 5a 所表示的非强对流风暴,上升气流强度不大,高中低层反射率因子高值区在垂直方向上相互重叠,没有倾斜,低层反射率因子四周梯度均匀,风暴顶位于低层反射率因子区域的中心,垂直剖面上没有弱回波区或有界弱回波区。图 5b 对应非超级单体强风暴,低层反射率因子等值线在入流的一侧出现很大的梯度,风暴顶位于低层反射率因子在入流一侧的强梯度区之上,中层回波强度轮廓线的靠低层入流一侧的下部出现弱回波区。也就是说,回波自低往高向低层入流一侧倾斜,呈现出弱回波区和弱回波区之上的回波悬垂结构。这一点从垂直剖面上可以看得更加清楚。图 5c 对应超级单体风暴。此时,风暴低层反射率因子出现明显的钩状回波特征,入流一侧的反射率因子梯度进一步增大,中低层出现明显的有界弱回波,其上为回波悬垂,风暴顶位于低层反射率因子梯度区或有界弱回波区上空。上述概念模型代表三种不同类型风暴的反射率因子结构,即非强对流风暴、非超级单体强风暴和超级单体风暴。这个概念模型同时也可代表超级单体风暴发展的三阶段模型。大多数对流风暴只发展到第一阶段就消亡了,一小部分对流风暴可以发展到第二阶段,成为非超级单体强风暴(大多为多单体强风暴),只有极少数能够发展到第三阶段,成为超级单体风暴。根据上述概念模型,可以根据低层、中层和高层的对流风暴雷达回波反射率因子特征及其相互配置进行雷暴内上升气流强度的识别和预警。通常可以通过在屏幕上同时显示 4 幅不同仰角的反射率因子的形式来确

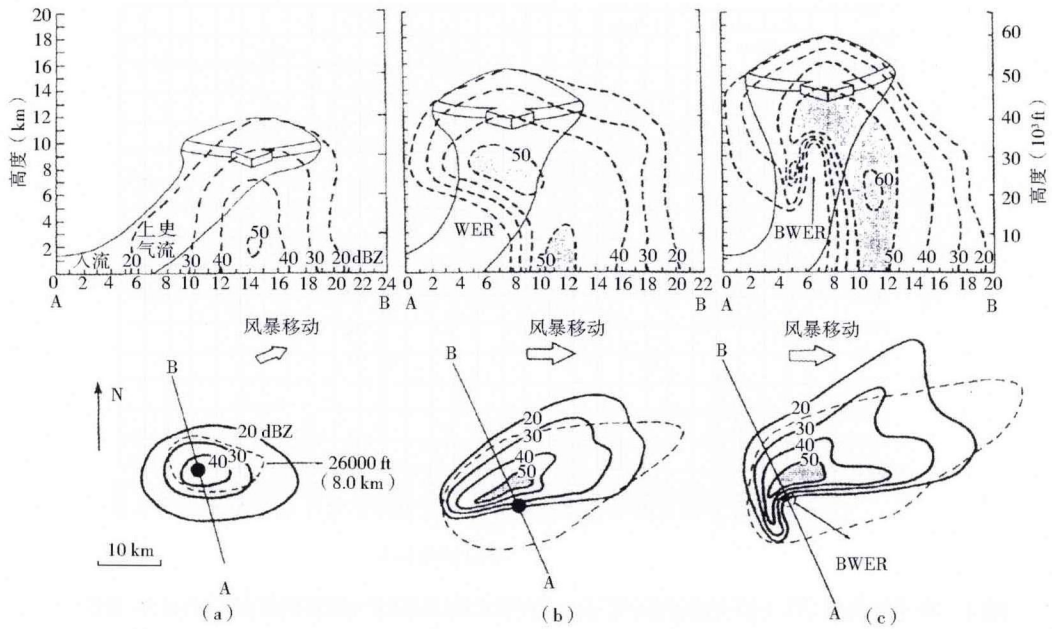


图5 (a)非强对流风暴、(b)非超级单体强对流风暴及(c)超级单体风暴的反射率因子特征

定雷暴的结构和强弱,称为四分屏显示。图6给出了2005年6月15日凌晨发生在安徽北部强烈雹暴雷达回波得四分屏显示。注意到 0.5° (左上)和 6.0° (右下)仰角的反射率因子图上的双箭头指示同样的地理位置,在 0.5° 仰角上(左上),双箭头指向风暴的低层入流缺口,箭头前方是构成入流缺口的一部分低层弱回波区,而在 6.0° 仰角(右下),箭头前面是超过

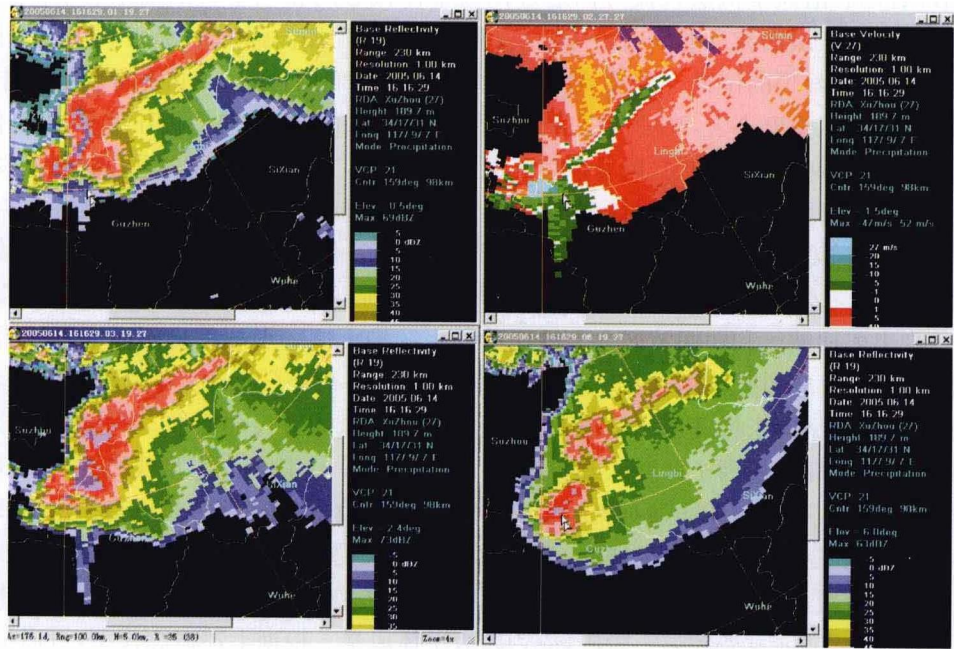


图6 2005年6月15日0时16分徐州SA雷达显示的 0.5° (左上)、 2.4° (左下)、 6.0° (右下)仰角的反射率因子和 1.5° (右上)仰角的径向速度图(图中的双箭头指示同样的地理位置)

60 dBZ的强回波中心,也就是说在低层与入流缺口对应的弱回波区之上有一个强回波悬垂结构。因此,通过这种四分屏显示方式,不必做垂直剖面就可以判断出对流风暴雷达回波的垂直结构。上述雹暴在15日0时30分左右在安徽固镇降下了直径达12 cm的巨大冰雹。

因此,对于大冰雹的雷达回波识别,除了第一条高悬的强反射率因子之外,在中等以上垂直风切变条件下可以进一步考虑雷暴回波的三维结构,通过四分屏显示方式判断有无低层反射率因子高梯度区、低层入流缺口、弱回波区、回波悬垂、有界弱回波区等代表强上升气流的特征。在第一个条件(50 dBZ最大高度在 -20°C 等温线高度以上,并且 0°C 等温线距离地面高度不超过4.5 km)满足的情况下,上述代表强上升气流的回波形态特征部分出现,则出现大冰雹的概率会明显增加,大冰雹警报的发出可以更果断。

用来判断对流风暴强度的一个十分有用的参量是垂直累积液态含水量VIL,其定义为液态水混合比的垂直积分。液态水混合比是通过雷达测量的反射率因子和雨滴之间的经验关系:

$$M=3.44\times 10^{-3}Z^{4/7}$$

进行计算的。对上式进行垂直积分即可得到垂直累积液态水含量VIL(该参量在CINRAD-SA和SB型新一代天气雷达中是日常产品)。VIL如果大大高于相应季节的对流风暴的平均VIL值,则发生大冰雹的可能性很大。根据美国俄克拉何马州的统计,5月份对应于出现大冰雹的垂直累积液态含水量VIL的阈值为 55 kg/m^2 ,6、7、8月份的相应阈值为 65 kg/m^2 。Amburn和Wolf(1997)^[18]定义VIL与风暴顶高度之比为VIL密度。他们的研究表明,如果VIL密度超过 4 g/m^3 ,则风暴产生直径超过2 cm的大冰雹的概率很大。需要指出,在距离雷达30 km以内和150 km以外,雹暴的VIL值会有较大的估计误差。

用来判断大冰雹的另一个指标是风暴顶辐散。Witt和Nelson(1984)^[19]给出了风暴顶正负速度差值与地面降雹尺寸之间的经验关系。产生大冰雹的正负速度差值的阈值为38 m/s。按照该经验关系,2002年5月27日皖北超级单体风暴最强盛时的风暴顶正负速度差值为 63 m/s ^[14],这样强的风暴顶辐散与高尔夫球大小的降雹相对应,即冰雹直径为40~50 mm左右。遗憾的是该结果没有得到证实。

S波段雷达回波中三体散射^[20,21]的出现表明对流风暴中存在大冰雹。三体散射现象是指由于云体中大冰雹散射作用非常强烈,由大冰雹侧向散射到地面的雷达波被散射回大冰雹,再由大冰雹将其一部分能量散射回雷达,在大冰雹区向后沿雷达径向的延长线上出现由地面散射造成的虚假回波,称为三体散射回波假象。S波段雷达回波中三体散射的出现是存在大冰雹的充分条件而非必要条件。C波段雷达回波中出现三体散射的机会更多一些,但并不一定表明大冰雹的存在。在C波段条件下,小冰雹也有可能产生三体散射。在研究了数个三体散射个例后,Lemon^[22]指出,在观测到三体散射后的10~30分钟内地面有可能出现直径大于25 mm的降雹,同时往往伴随有地面的灾害性大风。廖玉芳等^[23,24]对发生在我国的三体散射进行了全面的分析,发现几乎所有三体散射个例都伴随有大冰雹。图6中的雹暴也产生了明显的三体散射,在 1.5° 和 2.4° 仰角尤其明显。

3.4 龙卷的雷达探测与预警

龙卷是对流云产生的破坏力极大的小尺度灾害性天气,最强龙卷的地面风速介于110—150 m/s之间。当有龙卷时,总有一条直径从几十米到几百米的漏斗状云柱从对流云云底盘旋而下,有的能伸达地面,在地面引起灾害性的风称为龙卷;有的未及地面或未在地

面产生灾害性风的称为空中漏斗;有的伸达水面,称为水龙卷。龙卷漏斗云可有不同形状,有的是标准的漏斗状,有的呈圆柱状或圆锥状,有的呈粗而不稳定且与地面接触的黑云团,有的呈多个漏斗状的。绝大多数龙卷都是气旋式旋转,只有极少数龙卷是反气旋式旋转。一般用 Fujita 等级^[25]来确定龙卷风的大小,Fujita 等级是基于建筑物或地面植物的损坏情况的龙卷灾害等级,类似于地震的烈度。除了确定龙卷级别外,Fujita 等级也可以用来确定雷雨大风(包括下击暴流)的等级。表 1 给出了 Fujita 等级的描述。

表 1 Fujita 龙卷等级(引自文献[25])

F 等级	估计最大风速(m/s)	损害描述
F0	18~33	轻微损害。烟囱会有一些损害,一些树枝被刮掉,树根浅的树可能被刮倒,指路牌被损坏。
F1	33~50	中等程度损害。可以刮掉房屋屋顶的表面,将移动房屋刮离地基或侧翻,正在行驶的汽车被推离公路。
F2	50~70	相当大的损害。框架结构的屋顶被刮掉,移动房屋被摧毁,集装箱卡车侧翻,大树被折断或被连根拔起,轻的物体快速飞到空中。
F3	70~92	严重损害。屋顶严重损坏,一些结构比较结实的房屋的墙被刮倒,火车被刮翻,森林里大多数树木被连根拔起,汽车被掀离地面并被抛到一定距离以外。
F4	92~117	巨大损害。较结实的房屋被夷平,一些房屋部件被抛到一定距离以外,汽车被抛到空中,一些大的物体高速飞入空中。
F5	117~143	难以想象的损害。非常结实的房屋被推离地基并被带到相当距离之外碎成几块。汽车大小的物体以超过 100 m/s 的速度被抛入空中,会发生难以置信的现象。

我国的龙卷主要发生在东部的平原地区,包括江淮流域、两湖平原、华北平原、东北平原,还有华南的珠江三角洲和丘陵地区。每年我国有记录的龙卷在 50~80 个之间(实际数量可能大大超过这个数字),其中 F2 级以上的强龙卷大约为 5~6 个。我国龙卷发生的频率远低于美国(美国每年有记录的龙卷约为 1300 个)。

龙卷分为超级单体龙卷和非超级单体龙卷两大类。超级单体龙卷发生在中气旋内,其反射率因子回波的主要特征是低层的钩状回波。需要指出的是,并非所有的超级单体都呈现出典型的钩状回波,大多数情况下都是由风暴主体向着低层入流方向伸出的一个突出物,Fujita(1973)给出了常见的超级单体钩状回波的 5 个变种^[26]。超级单体发生前的环境往往为中等到强的对流不稳定能量和中等到强的相对风暴的螺旋度。此外,0—6 km 垂直风切变通常超过 20 m/s,低层风切变矢量有较大的气旋式曲率。并非所有超级单体风暴都产生龙卷,在龙卷超级单体和非龙卷超级单体的钩状回波之间并没有非常明显的区别^[27]。

研究表明,有利于 F2 级以上强龙卷产生的有利环境是强烈的低层(0—1 km)垂直风切变和低的抬升凝结高度^[28,29]。

多普勒天气雷达提供了径向速度场图像,可以通过识别中气旋来进行龙卷预警。统计表明,大约只有 20%左右的中气旋能够产生龙卷。所以只有当观测到强中气旋时才发布龙卷警报,此时探测概率会大大增加,大约接近 40%,但漏报和空报还是时有发生。2002 年 5 月 27 日皖北的一个超级单体风暴伴随一个强中气旋,但只产生了狂风和大冰雹,没有产生龙卷^[14]。而 2003 年 7 月 8 日安徽无为强烈龙卷^[30]、2005 年 7 月 30 日安徽灵璧强烈龙卷^[31]和 2007 年 7 月 3 日安徽天长和江苏高邮强烈龙卷都伴随有强中气旋,从强中气旋出

现到龙卷产生的间隔时间在上述个例中分别为 8 分钟、40 分钟和 0 分钟。龙卷有时伴随的另一个径向速度特征是龙卷涡旋特征 TVS^[11]。它是一个比中气旋还要小的强烈涡旋,在径向速度图上表现为像素到像素的沿着雷达方位角方向的很大的气旋式切变^[30]。如果在一个中气旋中心识别出一个龙卷涡旋特征,则不论中气旋是否是强中气旋都要立即发布龙卷警报。大多数的 F2 级以上强烈龙卷都是超级单体龙卷。

非超级单体龙卷中的一部分产生于大气边界层中的辐合切变线^[32]。当上升速度区与切变线上预先存在的涡度中心重合时,上升速度使涡管迅速伸长,导致旋转加快而形成龙卷。非超级单体龙卷的母气旋(通常称做微气旋)一般局限于大气边界层内,因此几乎不可能在 50 km 以外探测到。加之这种微气旋生命史很短,所以这种龙卷的预警相当困难。

3.5 雷雨大风的雷达探测与预警

这里雷雨大风是指除了龙卷以外的直线型风害,主要由对流风暴的强烈下沉气流所造成。其中,下击暴流造成的危害最为严重。下击暴流^[33]是指能在地面产生 18 m/s 以上辐散风的一股强下沉气流。下击暴流分为微下击暴流和宏下击暴流。微下击暴流是指水平尺度小于 4 km,时间尺度小于 10 分钟的下击暴流。宏下击暴流指水平尺度超过 4 km,持续时间超过 10 分钟的下击暴流,简称下击暴流。微下击暴流可导致很大的水平风切变,对飞机起飞、降落威胁很大。宏下击暴流强烈时可造成与龙卷类似的风害。下击暴流可以通过多普勒天气雷达 0.5°仰角的径向速度图进行识别,局限于距离雷达 60 km 以内区域,呈现为低层明显的辐散。在雷达回波静止或移动缓慢时,下击暴流低层辐散场基本对称,比较容易从雷达上进行识别。当产生下击暴流的强对流系统,如飑线,移动较快时,下击暴流造成的低层辐散场不对称,通常比较难识别,此时下击暴流的发生需要通过灾后实地调查来确定。沿着一条飑线常常会产生很多个下击暴流,从雷达回波上很难一一识别,可以统称为雷雨大风。除了下击暴流以外,雷雨大风还可以由多个雷暴下沉气流汇合在一起的冷空气堆的前沿阵风锋产生,偶尔还可以由雷暴的即将进入上升气流的低层入流产生。因此下击暴流只是雷雨大风的一种类型,往往最强的雷雨大风都是由下击暴流导致的。

由于雷雨大风主要由雷暴内的下沉气流产生,因此有利于其产生的有利环境条件是中高对流层有相对干层以及 500 hPa 以下大气的温度直减率比较大^[34]。

在垂直风切变较弱的环境下,下击暴流通常由脉冲风暴产生^[11]。Roberts 和 Wilson (1989)^[35]在研究了 31 个发生在美国科罗拉多州的由脉冲风暴产生的微下击暴流及其相应的风暴后,发现下降的反射率因子核同时伴随雷暴云中某一高度处(2~6 km)或云底附近不断增加的径向辐合是重要的下击暴流预报线索;若同时伴有雷暴云的旋转和侧向入流槽口,则可以更加肯定地预报下击暴流,预报提前时间为 0~10 分钟。受到 Roberts 和 Wilson (1989)的启发,Eilts et al. (1996)^[36]作了类似的工作。他们研究了发生在美国佛罗里达州、俄克拉何马州、亚利桑那州和科罗拉多州的下击暴流,得到的下击暴流预兆与 Roberts 和 Wilson 发现的类似。这些预兆是:1)一个迅速下降的反射率因子核;2)强并且深厚的中层辐合(2~6 km AGL);3)产生下击暴流的反射率因子核往往开始出现在比其他雷暴单体核更高的高度。上面三点是最重要的。其次还有两点:4)中层旋转;5)强烈的风暴顶辐散。他们根据上述发现开发了一个称为灾害性下击暴流预报和探测算法(DDPDA),该算法的总体表现平平,可以平均提前 6 分钟作出下击暴流的预报。

在中等以上垂直风切变环境下,下击暴流或雷雨大风可出现在任何类型的对流风暴中,