

吴芳芳,俞小鼎,张志刚,等. 对流风暴内中气旋特征与强烈天气[J]. 气象,2012,38(11):1330-1338.

对流风暴内中气旋特征与强烈天气^{*1}

吴芳芳¹ 俞小鼎² 张志刚¹ 周小刚² 韦莹莹¹

1 江苏省盐城市气象局,盐城 224005

2 中国气象局气象干部培训学院,北京 100081

提 要: 利用江苏盐城 CINRAD-SA 新一代天气雷达 2005—2008 年的资料分析盐城及周边地区对流风暴内中气旋和各种强对流天气的关系。对 SA 雷达中气旋探测算法识别的中气旋特征进行统计分析,发现带有中气旋的高顶高底的对流风暴易产生大冰雹;低底和带有较小直径的中气旋的对流风暴有利于龙卷的产生;后侧入流急流进入风暴有时会导致中气旋切变剧增、中气旋的底和顶降低而产生雷雨大风;低底和含有较低旋转速度的前侧中气旋容易导致短时暴雨。含有中气旋的对流风暴通常产生在对流有效位能较高和垂直风切变较大的环境条件下。

关键词: 中气旋,强对流天气,新一代天气雷达,统计分析

The Characteristics of the Mesocyclone and Severe Weather Associated with Convective Storms

WU Fangfang¹ YU Xiaoding² ZHANG Zhigang¹ ZHOU Xiaogang² WEI Yingying¹

1 Yancheng Meteorological Office of Jiangsu Province, Yancheng 224005

2 CMA Training Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on 4-year observation data (2005—2008) acquired by Doppler weather radar located at Yancheng, the relationship between mesocyclones and the severe convective weather is analyzed. The results show: (a) There is a high probability of large hail occurring on the right flank of the storms with high top and bottom of mesocyclones; (b) A storm with lower bottom and smaller diameter of mesocyclone is favorable for tornado; (c) Rear-inflow jet can intensify the wind shear of mesocyclone, make the mesocyclone descending, thus produce downdraft and strong wind; (d) The mesocyclones located on the front flank of storm with lower bottom and weaker wind shear usually cause heavy rain. Convective storm containing mesocyclone usually occurs in the environment with high CAPE and strong vertical wind shear.

Key words: mesocyclone, severe convection, statistics, CINRAD, statistical analysis

引 言

强对流天气包括强冰雹、龙卷、雷暴大风和短时强降水,是造成气象灾害的主要天气类型之一。强对流的形成及预报是气象学家们关注的重点^[1-3]。中气旋是雷暴尺度的涡旋,带有中气旋的对流风暴具有产生龙卷、冰雹、雷暴大风和短时强降水等强对

流天气的很高概率,因此中气旋的出现是强对流天气即将发生的明显信号和主要预警指标。中气旋在径向速度图上呈现为一沿方位角方向相隔不远的正负速度对,其尺度通常小于 10 km,平均值在 6 km 左右。中气旋的径向速度特征如旋转、辐合和辐散可用来判断对流风暴的强弱和发展趋势。据统计,约 90% 的中气旋和局地龙卷、雷暴大风或强冰雹相联系^[4]。为了业务上使用中气旋来预警龙卷等强对

* 国家自然科学基金(41175043)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906003)共同资助

2012 年 2 月 23 日收稿; 2012 年 7 月 16 日收修定稿

第一作者:吴芳芳,主要从事短期和临近天气预报研究。Email:wuff102@163.com

流天气,美国天气局制定了中气旋识别判据^[5],要求在速度切变、垂直伸展和时间持续性三方面都满足一定指标的小尺度涡旋才能被认定为中气旋。由于多普勒天气雷达可以测量降水粒子沿着雷达的径向速度,从而识别出对流风暴内重要的强烈天气信号之一中气旋。随着中国新一代多普勒天气雷达布网,一系列研究发现强冰雹、龙卷、雷雨大风(直线型大风,下同)、极端短时强降水与中气旋密切相关^[6-10]。俞小鼎等研究表明,强烈龙卷与中气旋和比中气旋尺度更小的龙卷涡旋特征(Tornadic Vertex Signature,简称 TVS)紧密相连^[11-12],TVS 尺度通常在 2 km 以下^[13],在观测到中气旋的基础上再探测到 TVS,则龙卷发生概率从 15% 提高到 50% 以上^[14]。江苏位于亚洲大陆东岸中纬度地带,苏北地区地势低洼平坦,东临黄海,具有明显季风气候,介于亚热带和暖温带的气候过渡带,兼受西风带、副热带和低纬东风带等天气系统影响。特殊的地理环境和季风气候特征导致中尺度对流系统(mesoscale convective system,简称 MCS)经常发生。郑永光等普查分析了 1993 年 7—8 月黄海及周边地区 MCS、2003 年淮河大水期间 MCS、2007 年江淮流域 MCS 发生频率的时间和空间分布,统计表明淮河流域到黄海为 MCS 活跃区域^[15-17]。MCS 从雷达判断多由对流风暴群组成,剧烈天气(强冰雹、极端雷暴大风、龙卷和极端强降水)常常与含有中气旋的对流风暴相伴。淮河下游盐城多普勒天气雷达 2005—2008 年探测到苏北有相应地面气象灾情记录的 Fujita 龙卷等级^[18] F1 级以上的龙卷超过 20 个,这些产生龙卷、大冰雹、超过 $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 极端短时强降水以及 10 级以上雷雨大风的对流风暴多数都伴有长生命史的中气旋。因此,分析新一代天气雷达所识别的对流风暴内中气旋产品的特征,对预报员提高强对流灾害性天气预警能力有重要意义。

1 盐城地区强对流天气分布特征与主要天气流型

1.1 资料

盐城地区强对流天气实况资料来源于盐城 8 个县气象站 2001—2010 年地面自动站、重要天气报以及地面气象报表灾情记录等资料,短时强降水统计气象站点正点前 1 小时雨量 $\geq 20.0 \text{ mm}$ 出现的次

数和产生时间,以 20 时(北京时,下同)为日界统计产生的天数;根据重要天气报以及地面气象报表,统计气象站点 8 级($\geq 17.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)及以上雷暴大风出现的次数和产生时间;冰雹和龙卷根据重要天气报、地面气象报表纪要、灾害性天气记录(包括目击者观测)统计各县境内出现的次数和产生时间。CINRAD/SA 多普勒天气雷达中气旋探测算法(MDA)^[5]识别范围为 0~230 km,MDA 识别的中气旋有三类:(1)非相关切变,为仅有一个仰角上能探测到 γ 中尺度气旋环流;(2)三维相关切变,为二个以上仰角存在 γ 中尺度气旋环流,但对称特征少于二个;(3)中气旋 M,为至少二个仰角存在 γ 中尺度气旋环流且是对称的,匹配产品显示中气旋顶和底的高度、中气旋直径(径向和切向)、最强切变所在的高度及相应的切变值等信息^[5]。本文通过盐城多普勒天气雷达观测资料普查,对盐城及周边地区雷达探测范围内具有连续 3 个及以上体扫中气旋的对流风暴进行中气旋产品统计,其中部分雹暴、距离盐城雷达 100 km 外龙卷过程等参考盐城周边多普勒天气雷达观测的中气旋产品资料,对于同一对流风暴或小雷暴团,在同一体扫中 MDA 算法识别出 2 个或 2 个以上中气旋,计一个中气旋,强对流天气事件来源于地面气象报表、气候影响评价以及相关的包括目击者报告的情报等资料,气象灾情为不完全统计。

1.2 强对流天气年变化和日变化特征

图 1 为 2001—2010 年盐城强对流天气发生频率的年变化和日变化分布。图 1a 中短时强降水(1 小时雨量 20 mm 以上)10 年间共产生 424 次,其中最大一次 $100.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 出现在 2001 年 7 月 31 日 18 时东台气象站。年(内)变化中最早出现的短时强降水发生在 2005 年 4 月 25 日 18 时射阳站,最迟出现在 2004 年 11 月 10 日 21 时射阳站,分布特征呈现单峰型,峰值出现在 7 月,达 164 次,8 月次之,为 146 次,4 月和 11 月发生次数很少,分别为 2 次和 1 次;短时强降水日变化分布特征(图 1b)显示最主要易发区间为午后到上半夜,主峰值在 16—17 时(30 次),第二个易发区间从下半夜到上午,次峰值在 8 时(28 次)前后,呈现出明显的双峰型,与祁秀香等^[17]通过云图分析得出的淮河流域的 MCS 大多数形成于午后到傍晚,上午 09 时也有较明显次峰值的结论一致。主峰区间 14 时至次日 01 时 12 小时

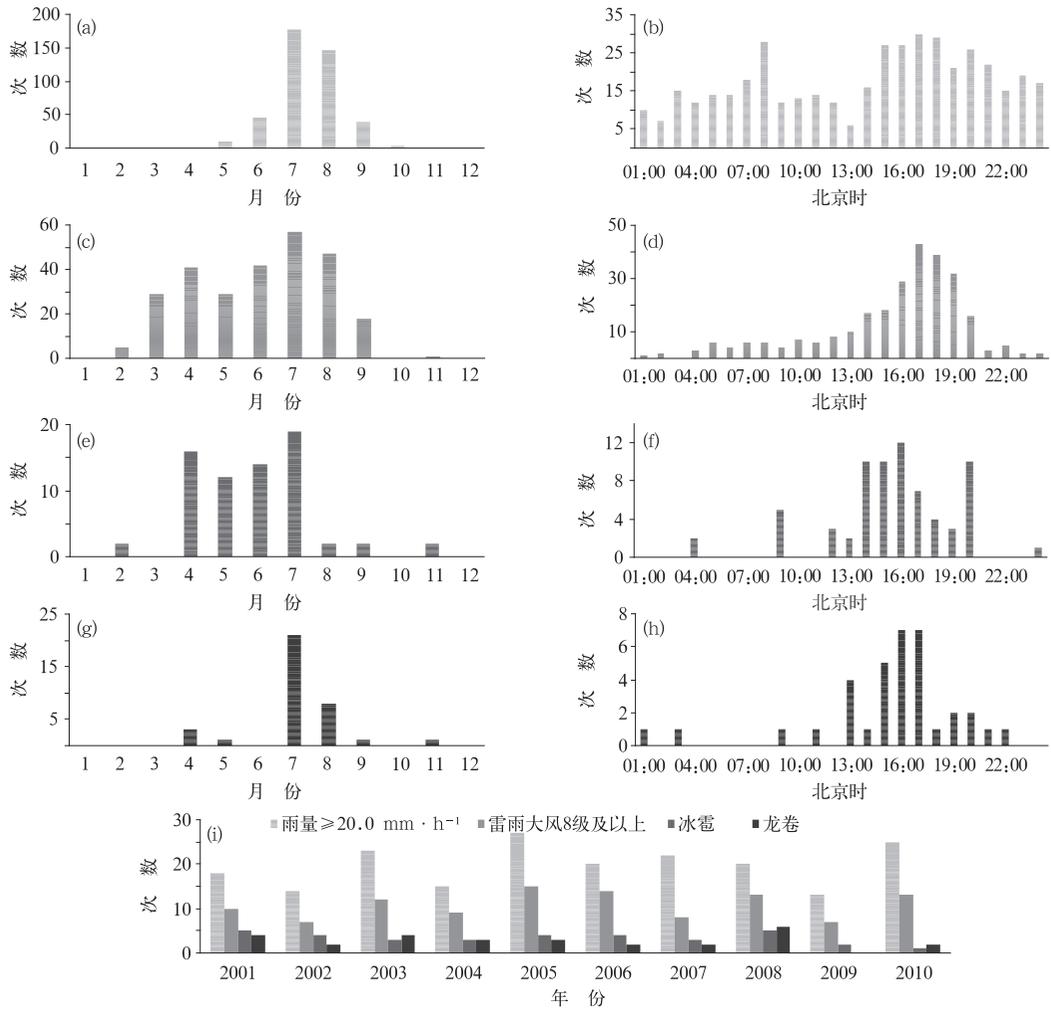


图 1 江苏省盐城市 8 个县气象站 2001—2010 年短时强降水(a,b)、雷暴大风(c,d)、冰雹(e,f)和龙卷(g,h)发生频率的年变化和日变化分布图,以及 10 年间 4 种强对流天气发生天数的年际变化(i)

Fig. 1 The annual and diurnal variations of flash heavy precipitation (a,b), convective wind gust (c,d), hail (e,f), and tornadoes (g,h) and the interannual variation of the number of various severe convection days in Yancheng area based on the 10-year long observational data from 2001 to 2010 (i)

内短时强降水次数占全天总次数的 61%。

图 1c 显示雷暴大风年(内)变化,其中 8 级及以上雷暴大风 10 年间共出现 269 次,观测到的最大风速为 $36.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,发生在 2006 年 6 月 28 日 18 时 39 分东台气象站。雷暴大风事件年变化中最早出现在 2010 年 2 月 28 日射阳站,最晚结束于 2006 年 11 月 1 日射阳站,主要集中在 3—9 月,其中峰值出现在 7 月(57 次)。图 1d 为雷暴大风日变化,分布特征呈现单峰型,峰值频率出现在 16—17 时(43 次),与短时强降水时分布的主峰值频率对应。图 1e 给出了冰雹年变化,10 年间共出现 69 次,10 年

中就发生季节而言最早产生在 2010 年 2 月 28 日建湖气象站点(2 次,相隔 53 min),最晚发生于 2006 年 11 月 1 日滨海县和响水县,主要集中在 4—7 月,峰值频率为 19 次出现在 7 月。图 1f 为盐城地区冰雹日变化,主要集中在午后到上半夜发生,峰值频率为 12 次出现在 15—16 时,下半夜到上午发生的次数很少,只占总数的 10%。图 1g 为盐城地区 F1 级以上龙卷发生频率年(内)变化,10 年间共出现 35 次,从出现季节看最早产生于 2005 年 4 月 20 日建湖县,最晚发生于 2004 年 11 月 9 日东台市,主要集中在 7—8 月,其中 7 月出现次数最多。图 1h 显示

龙卷日变化,主要集中在 13—22 时,峰值出现在 16—17 时。图 1 显示盐城地区短时强降水和龙卷年(内)变化中峰值区间几乎重合,都是 7—8 月。主要原因在于盐城盛夏产生对流暴雨时通常低层露点高,低层相对湿度也大,抬升凝结高度低,常有低空急流。低层露点高、抬升凝结高度低以及低空急流的存在有利于短时强降水,而同时抬升凝结高度低和低空急流导致的低层强烈垂直风切变也非常有利于龙卷产生^[5]。从图 1 中还注意到,盐城地区 8 月短时强降水次数最多而冰雹次数剧降,原因之一是环境空气 0℃层高度的变化,8 月盐城 0℃层高度通常在 5 km 以上,有利于“热带降水型”的产生^[19],但冰雹降落过程中通过 0℃层高度之下的融化层路径长,冰雹在下降过程中融化掉的几率很大,不利于地面观测到冰雹特别是大冰雹。

图 1i 给出了盐城 8 个气象站 2001—2010 年 4 类强对流天气出现天数的年际变化。从图中可以看出,短时强降水出现的天数最多,年平均达 19.7 d,其中 2005—2008 年平均达 22.3 d,2005 年多达 27 d;其次是雷暴大风,年平均 10.8 d,其中 2005—2008 年平均达 12.5 d,2005 年多达 15 d;冰雹和龙卷产生的天数较少,年平均分别为 3.4 和 2.8 d,其中 2005—2008 年平均分别为 4.0 和 3.3 d,2008 年分别出现了 5.0 和 6.0 d,为 10 年中最多。图 1 显示盐城是强对流天气多发地区,在 2001—2010 年 10 年中,2005—2008 年是多种强对流天气相对频发年份。

1.3 主要天气流型

将 2001—2010 年盐城地区强对流天气对应的天气流型,根据 500 hPa 形势可分为 4 类:东北或华北等冷涡类西北气流型、副热带高压西北侧槽前或西风带槽前类西南气流型、台风或台风(热带风暴等)前部型以及副热带高压边缘型。冷涡类西北气流型约占总数的 17%,主要特征为对流层中高层有干冷的西北风急流,低层暖湿,深层垂直风切变大,中低层温度直减率大,环境对流有效位能 CAPE 值较大,多产生雷暴大风、冰雹以及龙卷等,有时伴有短时强降水。槽前类西南气流型约占总数的 45%,主要特征为中低空有暖湿的西南风急流,有时低层有与远距离热带气旋相关的偏东风急流,具有较大的 CAPE 值,抬升凝结高度较低,深层和低层垂直风切变大,能够产生区域性短时强降水以及雷暴大

风和龙卷天气。台风前部型约占总数的 8%,主要特征是台风常常在闽浙一带登陆西行北上,低空有东风或东南风急流,低层垂直风切变大、抬升凝结高度低,易产生短时强降水和龙卷天气。副热带高压边缘型约占总数的 30%,主要特征中高层有冷空气渗透,低层高温高湿,有时伴有与热带气旋相关的偏东气流,一般垂直风切变不是很大但 CAPE 很高,多产生局地突发性短时强降水、雷暴大风以及龙卷、冰雹天气。

图 1 中盐城强对流天气主要集中在 4—9 月暖季,峰值都出现在 7 月。该月是盐城全年地面温度和露点最高的月份,因此也是全年 CAPE 达到最大的月份。日变化特征为强对流主要集中在午后到上半夜,峰值频率都出现在 16—17 时,此时段地面温度和露点达到最高,CAPE 达到最大,对流抑制 CIN 最小^[20]。分析盐城地区强对流天气对应的 4 类天气流型,共同特征是对流层常常出现急流。急流的出现意味着垂直风切变较大,表明较大的 CAPE 和垂直风切变是强对流风暴发生发展的重要条件。

2 中气旋特征与强烈天气

2005—2008 年是多种强对流天气频发年份(图 1i),盐城及周边苏北地区极端对流性天气频繁产生,盐城多普勒天气雷达探测到各种极端对流天气常常由含有中气旋的对流风暴所产生,中气旋的出现与强烈天气的产生密切相关。

2.1 中气旋与大冰雹

图 1 显示冰雹出现的频率不高。2005—2008 年共有 16 天产生冰雹,其中带有中气旋并产生大冰雹(降落到地面时直径超过 2 cm 的冰雹)的雹暴多数出现在 4—6 月,与一般降雹(降落到地面时冰雹直径 < 2 cm)的对流风暴相比,主要特征体现在对流风暴具有中气旋,并且中气旋通常位于雹暴的右后侧(相对于风暴移动方向),反射率因子垂直剖面图上具有高悬的高值区,因此雹暴质心很高,垂直伸展高度高,多普勒天气雷达可以探测到远距离的雹暴。2005—2008 年盐城雷达在测站周围 206 km 内探测到有直径 40 mm 及以上冰雹观测记录的雹暴 8 个(表 1)。以距离雹暴最近的射阳探空资料计算,环境 0℃层等温线高度平均位于 3.9 km, -20℃层等温线高度平均位于 6.9 km。

图 2 为 8 个雹暴产生直径 40 mm 及以上冰雹所对应的最大质心高度、中气旋平均底和顶的高度、平均最大切变(旋转)高度、0℃层和-20℃层等温线高度。从图中可以看出中气旋平均顶高分布在 6.0~7.7 km,其中有 7 例平均顶高位于-20℃层等温线高度附近及以上,中气旋平均底高位于 0℃层等温线高度及以上有 6 例。由于冰雹增长只发生在 0℃层等温线高度以上,并且强冰雹的增长大都发生在一 10℃等温线高度以上^[5],因此较高的中气旋易产生大冰雹。图 2 雹暴中气旋平均最大切变高度都在 0℃层等温线高度以上,有利于雹暴形成高悬的高反射率因子核心区,8 个雹暴质心最高高度/反射率因子分布(7.6~10.4 km)/(52~71 dBz),均位于-20℃层等温线之上,当强回波区扩展到-20℃等温线之上时,强降雪的可能性明显增加^[21]。对比分析 8 个雹暴 SCIT 算法输出产品,强冰雹出现概率(POSH)均为 100%;最大预期冰雹尺寸(MEHS)在 8 cm 以上,其中一个雹暴质心最大反射率因子/高度为 75 dBz/7.3 km,11 个体扫算法给出的预期冰雹直径 MEHS 为 10 cm(MEHS 上限)。图 2 显示强雹暴内中气旋最强切变平均高度在 4.7~7.3 km,其中 3 例位于-20℃层等温线高度及以

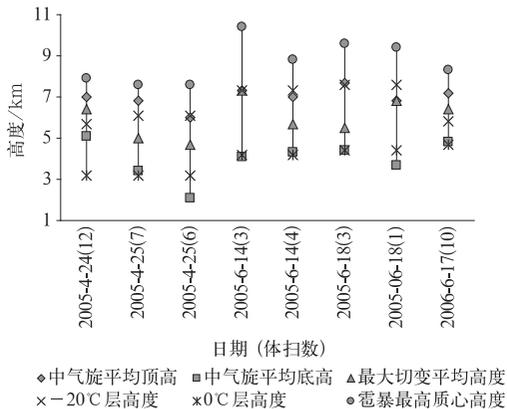


图 2 2005—2008 年盐城地区产生直径 40 mm 及以上冰雹的雹暴最高质心高度,以及雹暴内中气旋平均底高、顶高、最大切变平均高度,0℃层等温线高度、-20℃层等温线高度

Fig. 2 The peak centroid height of the hailstorms with hail diameter exceeding 40 mm, the mesocyclones of severe hail storm occur in 2005—2008 with hails whose diameter, the average heights of bottom, top and the maximum shear of mesocyclones associated with the hailstorms, 0℃ and -20℃ level heights of the environment

上,这 3 个例子中的雹暴均产生了直径 45 mm 以上的冰雹。图 2 中有 2 例雹暴内中气旋平均顶高和最大切变平均高度均位于-20℃层等温线高度之上,这类雹暴典型特点是以降大冰雹为主,例如 2005 年 4 月 24 日傍晚到夜里,强烈雹暴在赣榆、连云港、灌南、灌云、响水、滨海、射阳沿海一带一路南下降下大冰雹,其中 20 时 40 分在射阳境内开始降雹,密度较大,最长持续时间 40 分钟,冰雹最大直径 5 cm,最大积厚 5~8 cm,至 25 日 10 时还有尚未化掉直径为 1.5 cm 的冰雹。以上分析表明对流风暴中含有高底高顶的中气旋且最大切变(旋转)高度高易产生强冰雹。

2.2 中气旋与龙卷

图 1 显示盐城地区 2001—2010 年发生龙卷的日数为 28 d,分布于 4—11 月,主要集中在 7—8 月,其中有 24 天气象站点有短时强降水,表明盐城地区龙卷通常伴有短时强降水。2005—2008 年盐城雷达在测站周围 150 km 范围的苏北境内探测到(指探测到低层中气旋或 TVS)有相应地面气象灾情记录的 F1~F3 龙卷有 20 个(见表 1,实际产生的龙卷数目超过此数,一是雷达探测到但没有相应的地面气象记录,二是有地面气象记录但距离雷达测站较远的低层龙卷雷达难以分辨)。20 个龙卷产生于 18 个龙卷风暴中,龙卷风暴形态多样,风暴顶(30 dBz 达到的高度)范围为 6.6~17.3 km,表明苏北龙卷可以产生在各种形态、不同高度的对流风暴中。2005—2008 年盐城雷达探测的龙卷风暴主要可分为 4 类:一类产生于孤立的对流单体中,一类产生于镶嵌在飚线上的对流单体中,这两类对流单体通常含有较长生命史的中气旋,一般中气旋内含 TVS;另两类中一类产生于以含有中气旋的对流单体为主并有多数单体组成的雷暴团中,该雷暴团有与中气旋等对应的有界弱回波区 BWER/弱回波区 WER,有时中气旋与 TVS 相伴产生,即 TVS 出现在中气旋之外的低层入流缺口处;还有一类产生于热带气旋前部或江淮暴雨天气型中低顶的对流单体中,风暴移动速度较快,在低仰角速度图 TVS 周围可以分辨出清晰的中气旋环流,并能产生强烈龙卷。例如 2008 年 8 号台风凤凰西行北上过程中^[9],位于热带气旋前部的苏北地区,生成多个低顶的龙卷风暴,反射率因子不高,但产生了系列 F1~F2 级龙卷,造成严重的生命财产损失。

上述 4 类龙卷风暴,盐城雷达均识别出中气旋或 TVS。下面考察一下龙卷发生前后中气旋各项特征的演变趋势。以龙卷接地或以 TVS 的最大切变出现在最低层为当前体扫 n ,统计每个个例前 3 次体扫($n-3$)到前 1 次体扫($n-1$)、当前体扫(n)、后一次体扫($n+1$)对应的中气旋输出产品,分析中气旋直径(径向和切向的平均)、中气旋底高(中气旋环流的最低高度)、最大切变、最大切变高度特征。图 3a~3d 分别为每个个例 $n-3$ 至 $n+1$ 次体扫中气旋输出产品中直径、底高、最大切变和最大切变高度平均值时序图。从图 3a 中可以看出, $n-3$ 体扫到 $n-2$ 体扫中气旋平均直径增大,从 4.8 km 上升至 5.6 km, $n-2$ 体扫到 n 体扫从 5.6 km 迅速下降至 3.4 km, $n+1$ 体扫上升到 3.8 km。图 3b 中气旋平均底高从 $n-3$ 体扫到 $n-1$ 体扫由 1.6 km 高度

缓慢上升至 2 km 高度,此后快速下降,到 n 体扫降至 1 km 高度, $n+1$ 体扫上升到 2.2 km。图 3c 表明中气旋平均最大切变 $n-3$ 体扫到 $n-1$ 体扫从 $12 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 缓慢升至 $13 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,此后快速上升,到 n 体扫上升到 $21 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, $n+1$ 体扫下降到 $17 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。图 3d 显示切变平均高度从 $n-3$ 体扫到 $n-1$ 体扫缓慢下降, $n-1$ 体扫到 n 体扫明显下降,由 $n-3$ 体扫的 3.3 km 高度下降到 n 体扫的 2.1 km 高度。分析图 3 龙卷风暴中气旋特征演变,显示中气旋最强切变高度经常出现在中气旋底部,表明龙卷触地与中气旋底高降低、直径缩小、最强切变增大、高度明显下降密切相关。中气旋向下发展向地面降低且直径减小、转速加快,出现龙卷的可能性较大。

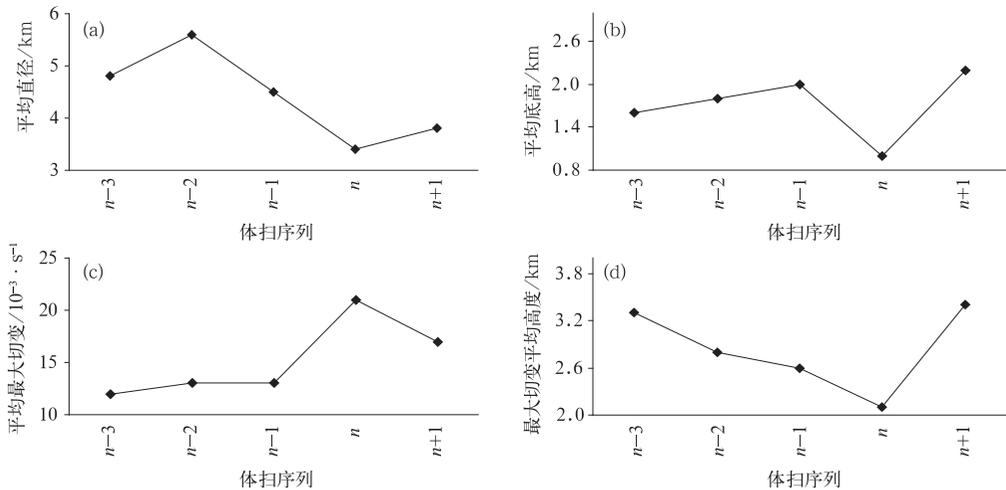


图 3 2005—2008 年盐城龙卷风暴中气旋平均直径(a)、平均底高(b)、平均最大切变(c)和最大切变平均高度(d)演变

Fig. 3 The evolution of the average diameter (a), the height of bottom (b), the maximum shear (c) and its height (d) associated with the mesocyclones of tornadic storms during 2005—2008 period in Yancheng area

2005—2008 年盐城雷达探测到中气旋的 20 例龙卷中,雷达识别出 TVS 有 19 个,另外 1 例兴化龙卷^[23]从低仰角速度图上中气旋环流中可以分辨出像素到像素类 TVS 涡旋,可能由于低于阈值 TVS 算法没能识别出 TVS。识别的 20 例导致龙卷的中气旋中,内含 TVS 的有 10 例,1 例盐城龙卷基数据有缺失,不能确定,其余龙卷风暴低仰角速度图上 TVS 周围有清晰地达不到中气旋标准的弱的 γ 中尺度环流,表明中气旋内含 TVS 或达不到中气旋标准的弱的 γ 中尺度环流内含 TVS 可以作为很好

的龙卷预警指标。表 1 显示位于 1 km 高度以上的 TVS 涡旋最大切变出现在 2006 年 7 月 3 日 21 时 57 分,为 $13.7 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ (在轴对称涡旋假定下,相应的垂直涡度为 $27.4 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$),位于 1 km 高度以下最大 TVS 涡旋最大切变值出现在 2005 年 4 月 20 日 16 时 38 分,为 $10 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ (相应的垂直涡度为 $20.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$),这两次龙卷风都达 F2 级以上,产生了严重的灾情。表 1 显示不同距离和高度的 TVS 有 19 例,不同距离对最大切变影响较大,TVS 算法中最大切变为最大速度差与沿方位库到库距离

d 的比值, d 随测距变化而变化, 最大切变随之改变, 最大速度差不受此影响, 但最大速度差出现在不同高度。表 1 中 TVS 最大速度差等于低层速度差有 13 例, 占 TVS 总数的 68%, 选取低层速度差与龙卷等级对应分析, 表 1 显示对于 TVS 底高 0.2~1.5 km 范围内, 相应的低层速度差范围为 11~52 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 其中最大 1 例低层速度差为 52 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, TVS 底高 0.8 km, 产生了 F3 级龙卷。底

高在 0.1~0.2 km 有 3 例, 速度差为 14~26 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 都产生 F2 级龙卷; TVS 底高在 0.3~1.5 km 有 15 例, 相应速度差范围为 11~48 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 产生 F1~F2 级龙卷。上述分析表明 TVS 低层速度差越大、TVS 底高越低, 产生龙卷的级别可能就高。也就是说, 发生龙卷的强弱与雷达探测到的 TVS 强度有密切关系。

表 1 中气旋、TVS 切变值与灾害性天气

Table 1 Hazardous events associated with mesocyclones and the maximum wind shear of TVS

日期	灾害	过程切变、速度差峰值/距离、高度		灾害性天气类型	
时间	灾情	切变 中气旋/距离 ($\times 10^{-3} \text{s}^{-1}/\text{km}$)	低层速度差 TVS/高度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}/\text{km}$)	冰雹 (最大直径 mm)	龙卷 (Fujita 等级)
2005-04-20T15:43	龙卷等		27/1.5		F1
2005-04-20T16:38	龙卷, 5 人死亡		14/0.2		F2
2005-04-24T23:16	大冰雹等	49/65		50	
2005-04-25T16:42	大冰雹雷雨大风	12/78		40	
2005-04-25T17:06	大冰雹雷雨大风, 8 人死亡	28/32		40	
2005-06-14T19:11	大冰雹等	16/194		50	
2005-06-14T21:26	大冰雹等, 8 人死亡	25/135		50 以上	
2005-06-18T18:25	大冰雹等	13/183		45	
2005-06-18T18:43	大冰雹等	9/206		50	
2005-07-08T20:51	龙卷等		17/0.8		F1
2005-08-10T18:52	龙卷等, 1 人死亡		16/1.3		F1
2005-08-30T01:04	龙卷等		22/0.7		F1
2005-09-02T14:51	龙卷等, 3 人死亡	5/141	44/0.3		F2
2006-06-17T23:36	大冰雹等	36/87		45	
2006-07-03T19:23	龙卷等		36/1.4		F1
2006-07-03T20:07	龙卷等, 1 人死亡		46/0.7		F2
2006-07-03T20:38	龙卷等		36/0.8		F1
2006-07-03T21:57	龙卷等, 4 人死亡		24/0.2		F2
2006-08-06T15:29	龙卷等		48/1.4		F2
2007-07-03T16:19	龙卷等	14/35	11/0.6		F1
2007-07-03T16:49	龙卷, 14 人死亡	26/131	52/0.8		F3
2007-07-03T17:31	龙卷等	12/63			F1
2008-07-04T19:23	龙卷等		29/1.2		F1
2008-07-22T17:21	龙卷等		35/0.4		F1
2008-07-30T14:56	龙卷等, 4 人死亡		20/1.2		F2
2008-07-30T16:22	龙卷等		39/0.8		F1
2008-08-17T11:02	龙卷等		26/0.1		F2
2008-08-17T15:06	龙卷等		29/0.3		F2

2.3 中气旋与雷暴大风

图 1 显示雷暴大风出现的频数多且季节分布广, 2—11 月均可产生。雷达探测表明雷暴大风有很多类型, 弱垂直风切变下由脉冲单体产生的下击暴流导致的雷暴大风极少与中气旋相联系。与中气旋相关的雷暴大风通常出现在超级单体钩状回波附近以及弓形回波顶部(凸部)附近。区域性雷暴大风

出现在弓形或线型回波凸部, 2005—2008 年盐城雷达在测站周围苏北地区探测到 3 次区域性 9 级以上雷暴大风都和弓形或线型回波有关。典型的弓形回波通常产生区域性风灾达 10 级以上, 弓形回波后有弱回波区通道, 表明后侧入流急流进入风暴向前下沉进入中气旋内, 中气旋高度迅速下降, 切变增大导致地面直线型大风产生。例如雷达探测到的与雷暴大风相联系的 100 km 内中气旋最强切变是 2006

年 4 月 28 日 20 时 09 分,为 $5.8 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$,产生在弓形回波顶部,与弱回波区通道后侧入流急流进入风暴形成下沉气流有关。统计镶嵌在弓形回波顶部的 4 个中气旋产生 $23 \text{ m} \cdot \text{ s}^{-1}$ 以上地面大风前后体扫特征,中气旋底高平均 0.8 km ,顶高平均 2.4 km ,最大切变高度平均为 1.4 km ,切变值平均为 $5.3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。大风产生时,中气旋向下发展,下沉气流触地后,中气旋减弱或消失,此后在弓形回波顶部前沿又重新出现中气旋,地面最大风出现在沿着这个弓形回波凸部中气旋移动的路径上。需要指出的是,只有部分弓形回波凸出部分附近存在中气旋。这意味着中气旋的出现只是使得雷暴大风的出现概率增加,系统生命史延长,但并不是飏线上或弓形回波上雷暴大风产生的必备要素。

2.4 中气旋与短时强降水

沿淮地区是短时强降水高发区,统计表明安徽淮北是极端短时强降水易发区^[24],雷达等分析表明强降水回波在辐合中心上发生发展^[25],风暴具有质心低、移动缓慢特征^[26]。图 1 显示短时强降水出现的频率最高,2005—2008 年共有 87 个气象站点出现了短时强降水,其中 1 小时雨量 $\geq 50.0 \text{ mm}$ 的强烈短时强降水事件共有 11 次,发生在 11 天中,其中出现中气旋的占 7 次。2005—2008 年有 3 次非正点 1 小时雨量 $> 100.0 \text{ mm}$ 的极端强降水事件(2 次出现在气象站点,一次出现在乡镇自动站),都与中气旋相伴,表明中气旋与极端短时强降水密切相关。产生短时强降水的对流风暴如果存在中气旋,中气旋通常位于风暴前侧,中气旋后侧低层是一个粗胖的高反射率因子($> 50 \text{ dBz}$)凸状回波区,风暴尺度一般比经典超级单体大^[7]。盐城雷达 2005—2008 年探测的以短时强降水为主要特征的含有中气旋的对流风暴超过 12 个,对应实况降水一般超过 $50 \text{ mm} \cdot \text{ h}^{-1}$ 。对 12 个个例进行中气旋相关参数统计,生命史通常超过半小时,最长达 29 个体扫。以短时强降水为主要特征对流风暴的中气旋直径通常较大,其中最大的中气旋 27 个体扫径向直径平均为 9.5 km ,切向直径平均为 7.5 km ,其中连续 5 个体扫径向直径平均为 16.5 km 。与短时强降水相联系的中气旋最低底高平均在 $0.5 \sim 2.2 \text{ km}$,大部分在 2 km 以下,对应的最大切变值较低。从中气旋特征演变分析,低底($< 2 \text{ km}$)和低切变的中气旋有利于短时强降水的产生。中气旋有助于强降水的一个主

要因素是使得风暴更具组织性,持续时间明显增加,如果风暴移动不快,则导致极端强降水的可能明显超过不带有中气旋的对流风暴。

2.5 远距离中气旋特征

由于受多普勒天气雷达取样特性的影响,雷达识别的远距离中气旋数量明显减少。2005—2008 年盐城雷达探测的距离雷达 120 km 之外的中气旋约占总数的 8% ,但这部分远距离中气旋产生重大灾害的比例很高(表 1)。盐城雷达观测的 120 km 外中气旋特征,持续时间和切变大小与龙卷、冰雹和雷雨大风的级别密切相关。 120 km 外中气旋高切变持续时间最长的为 2007 年 7 月 3 日安徽天长和江苏高邮龙卷风暴,连续 5 个体扫切变值在 $2.5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以上,最大达 $2.6 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ (相应的垂直涡度为 $5.2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$),该风暴产生 F3 级龙卷,持续大约 20 分钟^[22],袭击了安徽天长、江苏高邮,造成 14 人死亡,100 多人受伤。2005 年 6 月 14 日江苏泗阳县雹暴过程中,中气旋高切变连续两个体扫维持 $2.5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ (相应的垂直涡度为 $5.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$),该雹暴产生最大直径超过 50 mm 冰雹(有目击者称 $16 \sim 17 \text{ cm}$)并伴有瞬时风力 $38.5 \text{ m} \cdot \text{ s}^{-1}$,在泗阳县造成 8 人死亡和严重的财产损失。统计表明远距离中气旋一旦识别,如果切变较大,往往产生极端的强对流天气。盐城雷达观测到最远的含有中气旋的对流风暴是 2005 年 6 月 18 日 18 时 55 分的雹暴,前三个体扫中气旋距雷达站平均距离为 202 km ,平均切变值只有 $0.9 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$,产生直径 50 mm 大冰雹并伴有雷雨大风。对于距离雷达远近不同但产生灾情类似的风暴,距离远的中气旋切变值小,主要原因是雷达取样体积随测距增加,因为平滑作用而导致径向速度减少,同等强度的中气旋,多普勒天气雷达探测的距离远的中气旋切变值变小,因此,远距离的中气旋切变值虽小,但可能导致很强的对流天气,这是需要特别注意的。

3 小结与讨论

本文首先利用 2001—2010 年盐城地区 8 个测站观测资料统计了 10 年间盐城地区强冰雹、龙卷、雷暴大风和短时强降水的年变化和日变化特征,重点部分是利用盐城多普勒天气雷达观测的 2005—2008 年资料,对探测范围内对流风暴中出现连续 3

个及以上体扫的中气旋进行统计,详细分析中气旋产品特征与强对流天气的对应关系,主要结果有以下几点:

(1)距离雷达 20~120 km 区域雷达识别的中气旋最多;距离雷达 120 km 外的区域识别的中气旋数量明显减少,但远距离中气旋一旦识别,如果切变较大,往往产生很强的对流天气。

(2)在 100 km 内观测到中气旋的基础上再探测到 TVS,能够对龙卷警报的发布提供重要的信息,TVS 转速越大,高度越低,产生龙卷的级别可能就高。

(3)产生大冰雹的含有中气旋的雹暴,中气旋通常位于右后侧并且雹暴质心较高。

(4)中气旋产品对雷雨大风也有很好的预警作用,利用探测到产生在弓形回波顶部的中气旋,根据其移动路径预警雷雨大风。

(5)以产生短时强降水为主要特征含中气旋的对流风暴,中气旋通常位于前侧并且移动较慢。

(6)受中气旋算法一些阈值的影响,与大冰雹相联系的高层中气旋和与龙卷相联系的矮小的中气旋经常不能被算法识别,需要从基本径向速度产品主观分析判别中气旋。

(7)需要特别指出的是,对流风暴内中气旋的特征只是判断强烈天气可能出现的一个方面的指标,还需要和雷达回波的其他特征结合,特别是反射率因子回波特征。识别出对流风暴的形态,才能更准确判断要出现的强烈天气。像产生大冰雹的含中气旋的雹暴,中气旋特征只是其中的一个辅助指标,还要结合雹暴雷达反射率因子回波主要特征:高悬强回波、宽阔的弱回波区和有界弱回波、风暴顶强烈辐散以及合适的 0℃层高度。在雷暴大风识别中,中气旋的出现的确是一个重要指标,同时还要与中层径向辐合等特征结合,才能更全面地识别雷暴大风。只有在龙卷识别和预警中,中气旋几乎是唯一的指标。在产生短时强降水的含中气旋的对流风暴中,中气旋的出现只是说明对流风暴具有较高的组织性和比没有中气旋时持续更长时间,还要结合对流风暴雷达反射率因子回波高值区在 0℃层高度附近及以下低层,风暴质心较低且移动缓慢的前提下才会导致短时暴雨。

参考文献

- [1] 俞小鼎. 基于构成要素的预报方法——配料法[J]. 气象, 2011, 37(8):913-919.
- [2] 陶祖钰. 基础理论与预报实践[J]. 气象, 2011, 37(2):129-135.
- [3] 孙继松,陶祖钰. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J]. 气象,2012,38(2):164-173.
- [4] OTB/OSF/NWS: WSR-88D Operations Course, 1996.
- [5] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社,2006.
- [6] 郑媛媛,俞小鼎,方翀,等. 一次超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析[J]. 气象学报, 2004, 62(3):317-328.
- [7] 吴芳芳,俞小鼎,王慧,等. 一次强降水超级单体风暴多普勒天气雷达特征[J]. 大气科学学报, 2010,33(3):285-298.
- [8] 冯晋勤,汤达章,俞小鼎,等. 新一代天气雷达中气旋识别产品的统计分析[J]. 气象,2010,36(8):47-52.
- [9] 蒋义芳,吴海英,沈树勤,等. 0808 号台风凤凰前部龙卷的环境场和雷达回波分析[J]. 气象,2009,35(4):68-75.
- [10] 廖玉芳,俞小鼎,唐小新,等. 基于多普勒天气雷达观测的湖南超级单体风暴特征[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(4): 433-443.
- [11] 俞小鼎,郑媛媛,张爱民,等. 安徽一次强烈龙卷过程的多普勒天气雷达研究[J]. 高原气象,2006,25(5),914-924.
- [12] 俞小鼎,郑媛媛,廖玉芳,等. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究[J]. 大气科学,2008,32(3),387-402.
- [13] Brown R A, Lemon L R, Burgess D W. Tornado detection by pulsed Doppler radar[J]. Mon Wea Rev, 1978, 106:29-38.
- [14] Doswell C A. Severe convective storms: An overview[J]. Meteor Monogr, 2001, 50: 1-26.
- [15] 郑永光,陶祖钰,王洪庆. 黄海及周边地区中尺度对流系统发生的环境条件[J]. 气象学报,2002,60(5):317-328.
- [16] 费增坪,郑永光,王洪庆. 2003 年淮河水大期间 MCS 的普查分析[J]. 气象,2005,31(12):18-22.
- [17] 祁秀香,郑永光. 2007 年夏季川渝与江淮流域 MCS 分布与日变化特征[J]. 气象, 2009,35(11):17-28.
- [18] Fujita T T. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales[J]. J Atmos Sci,1981,38:1511-1534.
- [19] 俞小鼎. 新一代天气雷达业务应用论文集[M]. 北京:气象出版社,2008:9-13.
- [20] 梁爱民,张庆红,申红喜,等. 北京地区雷暴大风预报研究[J]. 气象, 2006,32(11):73-80.
- [21] Witt A, et al. An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D[J]. Wea Forecasting,1998,13:286-303.
- [22] 刘娟,朱君鉴,魏德斌,等. 070703 天长超级单体龙卷的多普勒雷达典型特征[J]. 气象, 2009,35(10):32-39.
- [23] 曹治强,方宗义,方翔. 2007 年 7 月皖苏北部龙卷风初步分析[J]. 气象,2008,34(7):15-19.
- [24] 郝莹,姚叶青,郑媛媛,等. 短时强降水的多尺度分析及临近预警[J]. 气象,2012,38(8):903-912.
- [25] 王令,王国荣,孙秀忠,等. 应用多种探测资料对比分析两次突发性局地强降水[J]. 气象,2012,38(3):281-290.
- [26] 柯文华,俞小鼎,林伟旺,等. 一次由“列车效应”造成的致洪暴雨分析研究[J]. 气象,2012,38(5):552-560.
- [27] 俞小鼎. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨成因分析[J]. 气象, 2012,38(11):1313-1329.