

冯晋勤, 汤达章, 王新强, 等. 新一代天气雷达超级单体风暴中气旋特征分析[J]. 大气科学学报, 2010, 33(6): 738-744.

Feng Jin-qin, Tang Da-zhang, Wang Xin-qiang, et al. Mesocyclone features of supercell storms from CINRAD/SA[J]. Trans Atmos Sci, 2010, 33(6): 738-744.

新一代天气雷达超级单体风暴中气旋特征分析

冯晋勤^{1,2}, 汤达章¹, 王新强², 马钊²

(1. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044; 2. 龙岩市气象局, 福建 龙岩 364000)

摘要: 超级单体风暴常伴随着冰雹、雷雨大风等强对流天气, 最本质的特征是有一持久深厚的几千米尺度的涡旋——中气旋。利用 2003—2009 年福建龙岩新一代天气雷达观测到的 32 次超级单体风暴, 分析了超级单体风暴中气旋的时空分布、结构特征以及旋转速度大小、中气旋顶和底的高度、伸长厚度以及切变值等特征量。结果表明: 90% 以上的超级单体中尺度气旋是与冰雹、雷雨大风、短时强降水等强对流天气相联系的。统计 8 次有详细灾情的雷雨大风或冰雹天气过程发现, 中气旋强度不断加强, 中气旋厚度加大, 最强切变中心突降时将产生大风或冰雹等强对流天气。

关键词: 新一代天气雷达; 中气旋; 超级单体风暴; 强对流

中图分类号: P421.25 文献标识码: A 文章编号: 1674-7097(2010)06-0738-07

Mesocyclone Features of Supercell Storms from CINRAD/SA

FENG Jin-qin^{1,2}, TANG Da-zhang¹, WANG Xin-qiang², MA Chuan²

(1. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. Longyan Meteorological Bureau, Longyan 364000, China)

Abstract: The supercell storm often accompanies with the hails, thunderstorms and other severe convective weather, and its most essential feature is a mesocyclone, which is a lasting and deep vortex on several kilometers scale. Based on the 32 supercell storm data observed by Longyan CINRAD/SA radar from 2003 to 2009, the mesocyclone products are statistically analyzed. Results show that more than 90% of the supercell storm's mesocyclone is well related with severe convective weather such as hail, thunderstorm, short-time strong rainfall and so on. The paper analyses the spatial and temporal distributions, structure features, rotational velocity, heights of base and top, thickness of elongation and shear value of the supercell storm's mesocyclone. Based on the eight weather processes with hails or thunderstorms, it shows that the hail, thunderstorms and other severe convective weather will occur when the mesocyclone constantly strengthens, the thickness of mesocyclone increases and the center of strongest shear suddenly drops.

Key words: CINRAD/SA; mesocyclone; supercell storm; strong convection

0 引言

超级单体是 Browning 于 1962 年首次提出, 它是对流风暴中发展最为强烈的一种, 常伴随着冰雹、雷雨大风等强对流天气产生。超级单体风暴与其他

强风暴的本质区别在于超级单体风暴含有一个持久深厚的中气旋, 中气旋是与强对流风暴的上升气流和后侧下沉气流紧密相联的小尺度涡旋, 该涡旋已满足或超过一定的切变、垂直伸展和持续性判据^[1]。在 20 世纪 70 年代多普勒雷达的研究中, 超

级单体风暴的旋转特性被充分揭露出来,1970年 Donaldson 首次利用多普勒天气雷达观测到超级单体的“龙卷气旋”^[2],也就是最早由 Fujita 提出,现在广泛使用的所谓“中气旋”。随后在超级单体三维模式中,表明了上升气流从右前方进入风暴,到高层作气旋式扭转进入云砧区,下沉气流在对流层中层从风暴右边进入,在左后方低层离开风暴。国外在对超级单体风暴的研究中也建立了超级单体风暴的回波结构及径向速度特征的模型和相应中气旋的判别指标,如美国 Oklahoma 州建立了中气旋核的判据^[1]。

近年来,国内的广大气象工作者对一些超级单体风暴个例进行了中气旋特征分析^[3-7],并对新一代天气雷达的中气旋产品进行研究。邵玲玲等^[8]研究了多普勒天气雷达中气旋产品在强风预报中的应用。朱君鉴等^[9]进行了中气旋产品与强对流天气关系的初步研究。方翀和郑媛媛^[10]利用5 a 安徽雷达资料统计中气旋产品的特征与强对流天气相互关系进行了分析总结。

本文利用福建龙岩新一代天气雷达资料对2003—2009年观测到的32个超级单体风暴的中气旋特征进行统计分析。通过分析超级单体风暴的中气旋结构特征、强弱及变化规律,出现强对流天气时中气旋的特征及其判别指标等,为预报员进行雷雨大风、冰雹等强对流天气的短临预报提供参考依据。

1 资料选取及超级单体中气旋识别

1.1 资料选取

选取2003—2009年福建龙岩新一代天气雷达观测到32次超级单体风暴,判断超级单体风暴的中气旋标准分为两种:一是利用美国 Oklahoma 州中气旋核统计为标准,即:1)核区直径(最大入流速度和最大出流速度间的距离)小于等于10 km;转动速度(即最大入流速度和最大出流速度绝对值之和的二分之一)超过图1^[11]中弱中气旋的数值;2)垂直延伸厚度大于等于3 km;3)上面两类指标都满足的持续时间至少为两个个体扫。另一个是以新一代天气雷达的中气旋产品为参考,对持续两个个体扫以上中气旋特征的风暴,根据风暴的结构、反射率因子等特征进行综合判断。统计中气旋产品个数时,对判定属于同一风暴,但在不同时间出现的中气旋以一个中气旋计。

1.2 超级单体风暴中气旋特征的识别

经统计32个超级单体风暴出现在13个天气过

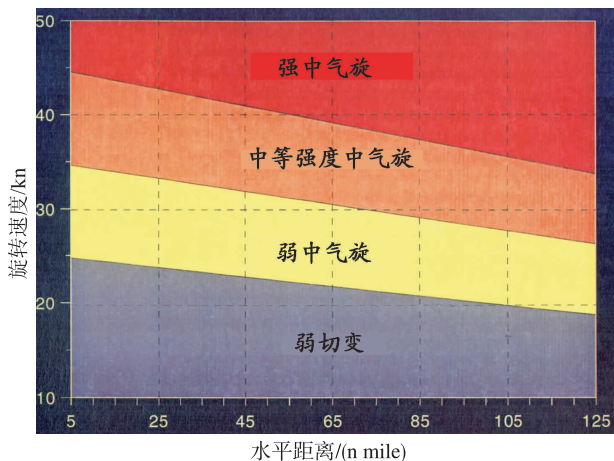


图1 中气旋识别判据(1 kn = 1 n mile/h = 1.852 km/h)

Fig. 1 Identification criterion of mesocyclone (1 kn = 1 n mile/h = 1.852 km/h)

程中,12次出现冰雹天气,14次出现雷雨大风天气,6次出现短时强降水天气,2次天气实况未知。以第一种判别指标共识别出个31中气旋,一个超级单体风暴未能识别出中气旋主要是伸长高度达不到3 km的指标;以第二种判别指标识别出31个中气旋,一个超级单体中气旋产品未能识别出主要是因为新一代天气雷达RPG软件速度退模糊失败。

1.3 雷达产品对中气旋识别的影响

应用第一种判别指标统计中气旋过程时,发现雷达产品对中气旋识别有影响有以下几种情况:1)风暴运动速度影响,中气旋识别需通过风暴相对速度产品进行判断,因为所谓中气旋是相对风暴而言的,即把风暴看作相对静止时的径向速度图,风暴相对平均径向速度产品是对每个0.25 km距离库上的平均径向速度矢量减去一个估计的风暴移动矢量^[1],并取四个0.25 km距离库中的最大值,生成0.25 km × 1°空间分辨的产品。这个估计的风暴移动矢量来自于风暴单体识别(SCIT)识别的所有风暴的平均运动速度。当SCIT算法在230 km范围内没有探测到风暴单体,则使用UCP上用户输入的风暴单体移向移速缺省值(225°, 13 m/s)。因此,假如减去的风暴移动矢量不代表被监测的风暴移动信息,该产品描述的风暴相对气流将有较大误差。2)速度模糊影响,超级单体风暴是发展强烈的稳定对流单体,入流和出流速度大,在速度图上经常出现模糊现象,在32个超级单体风暴中,其中27个超级单体风暴出现速度模糊现象,经退模糊后,仍有7个超级单体风暴在某些时次出现退模糊不成功现象,影响中气旋特征的判断;通过退模糊与不退模糊速

度相比较发现,当退模糊后速度大于 27 m/s 只用一种色标表示(在 RPG 软件处理过程中大于 27 m/s 只用一种色标表示),无法得知其确切的速度大小,影响了中气旋强度的判断。3) 距离折叠的影响,在处理距离模糊时,当 R 处的回波和 $(R - 150 \text{ km})$ 处的回波功率相当时,在 R 和 $(R - 150 \text{ km})$ 处用紫色色标表示,无法得知风暴的相对速度,即无法判别中气旋,其中有 6 个超级单体风暴在个别时次出现该现象。4) 中气旋伸长高度的影响,第一个判别指标需垂直延伸厚度大于等于 3 km,由于本站雷达高度近 1 500 m,在 0.5° 仰角大于 100 km 处高度即大于 3 km,即无法得到 3 km 以下的风暴相对径向速度图进行中气旋特征的判断,一定程度影响了中气旋的识别。

中气旋产品是用来显示与非相关切变、三维相关切变及中气旋三种切变识别的有关信息。只有在两个仰角探测到切变并且是对称性的称为中气旋。在应用中气旋产品进行超级单体风暴中气旋特征判断时发现中气旋产品的误判率比较高,占中气旋总数的 44%。分析原因主要有以下几种:一是在 146 km 处低仰角(0.5° 或 1.5° 仰角)有一速度区相反小块,共有 125 个错误,占有中气旋总数的 35.8%,这可能是由于 150 km 为 CINRAD/SA 在低仰角探测时的最大不模糊距离,在该处处理速度数据距离折叠问题时引起中气旋识别的误判^[1];二是地物杂波未去除干净引起的误判,共有 9 个错误;三是由于未经速度退模糊,正负速度最大值对误判为中气旋而引起的错误,共有 16 个错误。因此,在应用中气旋产品进行短临预报时,首先应结合速度图、反射率等资料进行人为判定该中气旋正确与否。

从中气旋产品算法分析,对超级单体风暴中气旋的判断也有以下几种影响:一是进行中气旋产品判断时要求中气旋的中心高度不超过 8 km(1.5° 仰角 215 km 外超过 8 km),因此,215 km 以外中气旋产品就不能识别;二是时间连续性差,算法没有同时使用两个体扫描的资料;三是垂直伸展仅需在任意两个仰角上,并没有要求超过 3 km;四是只探测气旋式旋转,不包括反气旋式旋转;五是不适当的速度退模糊及距离折叠也影响到中气旋的识别。

1.4 两种判别方法的比较

综合以上分析,在进行超级单体中气旋特征判断时,不能单纯依靠速度产品或中气旋产品进行判断,而应结合风暴径向速度图、反射率等资料对风暴的结构及发展阶段进行综合分析,在应用中气旋产

品时首先要进行产品正确与否的判断,中气旋产品中有中气旋的顶、底的高度,伸长厚度以及切变值等特征量的描述可以对中气旋发展强度进行判断。

2 超级单体风暴的中气旋特征

2.1 超级单体风暴中气旋特征的时空分布

据统计,32 个超级单体分别出现在 2—5 月和 11 月,27 个超级单体中气旋出现在 4 月、5 月,28 个超级单体中气旋出现在 12:00—00:00(北京时间,下同),4 个出现在 00:00—08:00(表 1),午后易出现强对流,这主要是白天低层大气的辐射增热对于强对流的产生起了重要作用^[12]。90.6% 的超级单体风暴中气旋出现在 30~110 km 处,这主要是因为本站雷达海拔高度高,在远距离处低仰角扫描的高度已离地面较高,以及雷达探测远距离处波束宽度增大,对于直径较小的中低层中气旋无法探测到。而在近距离处,由于雷达静锥区的影响,有可能探测不到中气旋的顶和底,从而影响中气旋的识别。同时,经统计形成超级单体的风暴中有 96.9% 的风暴持续时间超过 1 h,最长达 5.5 h;超级单体风暴在风暴形成后 20~120 min 时间发展起来,中气旋特征在超级单体风暴成熟阶段出现,中气旋特征持续最长时间达 60 min,最短为 18 min。

表 1 超级单体风暴中气旋出现的月份和时段分布

Table 1 The appearance month and time period of supercell mesocyclone

时段	2月	3月	4月	5月	11月	总计
12:00—00:00	2	2	13	10	1	28
00:00—08:00	0	0	2	2	0	4
总计	2	3	17	10	1	32

2.2 超级单体风暴中气旋的结构特征

32 个超级单体风暴中,以对流单体形式出现的有 3 个,以多单体风暴形式发展的有 19 个,以中尺度对流系统中发展起来的单体共 10 个。超级单体风暴在回波形态上表现为钩状、弓状、人字形和块状回波为主,3 个超级单体出现三体散射现象,垂直结构上呈现有界弱回波区或是弱回波区。超级单体最大反射率因子平均达 59 dBZ,与本站统计的强对流强回波中心平均值一致^[11],最强达 72 dBZ,最小为 40 dBZ。基于风暴的垂直累积液态含水量平均值达 $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,最强达 $70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,垂直累积液态含水量平均密度值达 $3.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,最强达 $7.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。若以冰雹、雷雨大风及强降水分类统计,

最大反射率因子平均达 67.4、63 和 55 dBZ,垂直累积液态含水量平均密度值分别达 4.0、3.1 和 $1.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

中气旋的生命史分为生成阶段、成熟阶段及消亡阶段。其一般表现为:中气旋从中层(5 km)发展起来,后分别向上向下发展,随着中气旋进一步发展进入成熟阶段时,低层表现为辐合旋转,中层为旋转,中上层为辐散旋转,高层为辐散,消亡阶段则中气旋高度下降,旋转速度减小,最终消亡^[1]。从资料统计来看,中气旋从 4~5 km 的高度上发展起来,仅有两例在 2.7 到 3.0 km 高度上(中气旋顶高度 6 km 左右)发展起来。从中层发展起来后中气旋分别向上向下发展,进入成熟阶段,旋转半径缩小,旋转速度加大,中气旋产品识别基本上出现在这个阶段。中气旋减弱的表现方式也不尽相同,有从低层或高层先减弱,后中层强度再减弱(8 个),有从高层开始向低层减弱(16 个),也有低层或高层减弱,中层强度维持后又再次加强形成第二次中气旋,最后再由高层向低层减弱(8 个),此类中气旋第一次发展成中气旋的高度较高,第二次高度较低。

以不同形态出现的超级单体其中气旋的位置也不同,以钩状回波出现的超级单体,中气旋大部分出现在超级单体的入流区,即钩状回波的上方,并且随高度向入流一侧倾斜。弓状回波或飚线中突出的位置(移动最快的部位或是头部)出现中气旋的可能性最大。

2.3 超级单体风暴中气旋的特征量

中气旋特征量包括旋转速度大小、中气旋的顶、底的高度,伸长厚度以及切变值等。经统计,32 个超级单体中中层以气旋性旋转为主占 28 例,气旋与反气旋共存有 4 例,说明中层存在双涡式结构,即在风暴右前侧存在气旋性旋转,右后侧存在反气旋性旋转,风暴能维持较长时间^[4]。根据中气旋识别的转动速度判据(图 1)计算 32 个中气旋成熟阶段 164 次的中气旋强度,共有 24 次达强中气旋,81 次中等强度中气旋、59 次弱中气旋标准,可以看出达中等以上强度的中气旋只占 64%。若以最大转动速度来判断,有 6 个达强中气旋、15 个达中等强度中气旋、11 个达弱中气旋,中等以上强度的中气旋达 65.6%。91.6% 以上的冰雹天气的中气旋达中等强度以上,64.2% 以上的雷雨大风天气的中气旋达中等强度以上,而强降水天气达中等以上强度仅为 23.8%。81% 的中气旋底在 4 km 以下,顶在 3 km 以上、10 km 以下。伸长厚度平均达 4.1 km,出现

冰雹天气中气旋厚度达 4.5 km,雷雨大风天气中气旋厚度为 4 km,强降水天气为 3.9 km。超级单体中气旋切变为 $(|V_{\max}| + |V_{\min}|) / \Delta D$ (D 为两个速度最大值之间的距离),切变平均值达 $1.4 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$,41.4% 的超级单体中气旋切变大于 $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$,最大值的切变达 $3.9 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。将超级单体出现的强对流天气按冰雹、雷雨大风及强降水分类统计计算,冰雹过程平均切变达 $11.4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,雷雨大风的平均切变为 $9.9 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,而强降水的平均切变为 $7.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。

2.4 超级单体风暴中气旋与强对流天气的对应关系

经统计,32 个超级单体中出现雷雨大风或冰雹强对流天气共有 26 个,其中冰雹 12 次,雷雨大风 14 次,6 次短时强降水,2 个收集不到实况以未知定,出现雷雨大风或冰雹强对流天气占 81.3%,若将短时强降水加入则强天气占 93.8%。与美国的 90% 的中尺度气旋总是与某种形式的强天气(如冰雹、暴雨、灾害性大风等)联系在一起的判据基本一致。

统计 8 次有详细灾情的雷雨大风或冰雹天气过程中发现,中气旋强度不断加强,中气旋厚度加大,最强切变中心突降时将产生大风或冰雹等强对流天气。下文以 2004 年 11 月 10 日冰雹及 2005 年 3 月 22 日飚线大风为例进行分析。

2004 年 11 月 10 日受西南暖湿气流和低空切变共同影响,上杭县先后有十几个村庄出现冰雹,冰雹直径为 3~4 cm,降雹最大直径达 4.5 cm,新罗区苏坂乡出现了 10 级以上的大风和冰雹,冰雹直径达 1.5~3 cm,漳平最大冰雹直径达 2 cm。该风暴经历两次加强过程。在第一次过程中,13 时 46 分在风暴的入流区即钩状回波处,中气旋首先从 1.5° 仰角(中层 5 km)处发展起来,由于仅有一个仰角出现旋转,中气旋产品未能识别,14 时 23 分 2.4° 仰角(约 5.6 km)风暴相对径向速度图上出现旋转并出现速度模糊现象,说明中气旋向高处发展起来,但由于速度退模糊失败,中气旋仍未识别出来。到 14 时 36 分 0.5° 仰角也出现旋转,中气旋进一步向低层发展,此时超级单体进入强盛阶段,此后中气旋持续了 42 min 特征,中气旋发展的高度不断上升,最强切变中心随之上升,15 时 06 分中气旋发展到 6.2 km 处(图 2),中气旋厚度达 4 km,最强切变中心有一突降过程,切变的顶高也随之下降(图 3),实况于 15 时 10 分开始地面出现密集的降雹,冰雹直径也

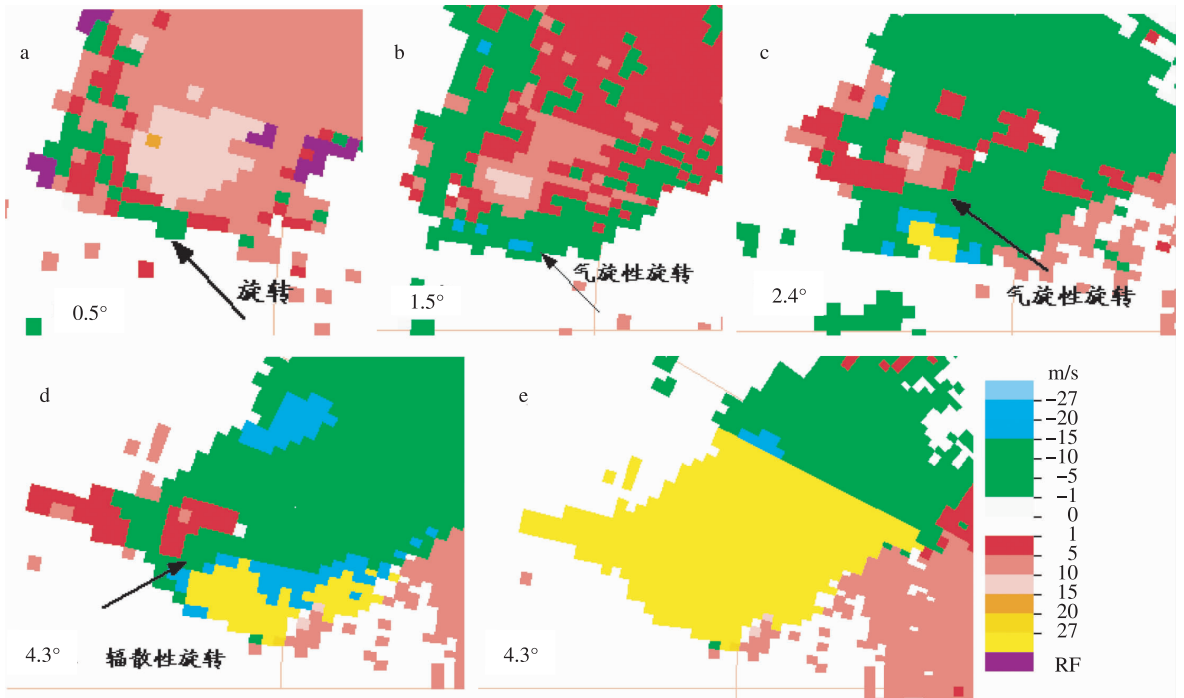


图 2 2004 年 11 月 10 日 15 时 06 分风暴相对径向速度图(a-d 分别为 0.5°、1.5°、2.4°和 4.3°仰角的速度未退模糊,e 为 4.3°仰角的速度退模糊失败)

Fig. 2 Relative radial velocity images of storm at 15:06 BST 10 November 2004 (a-d are the velocity un-dealiasing at 0.5°, 1.5°, 2.4° and 4.3° elevation angles, respectively, and e is the failure of velocity dealiasing at 4.3° elevation angle)

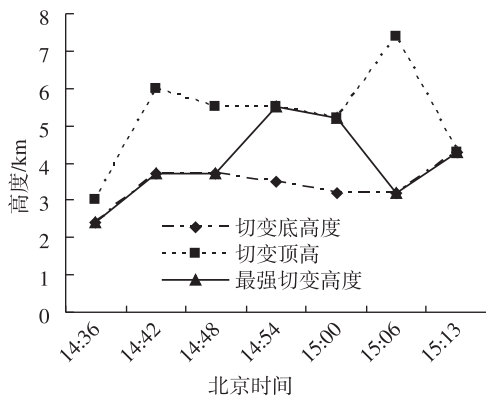


图 3 2004 年 11 月 10 日中气旋顶、底及最强切变高度的变化

Fig. 3 The base and top of mesocyclone, and the height variation of strongest shear of mesocyclone on 10 November 2004

达 3 ~ 4 cm。15 时 06 分后,高层和低层的中气旋旋转减弱,中层旋转维持,旋转速度为 15.5 m/s。在第 1 次过程,平均强回波中心达 69 dBZ,最强达 72 dBZ,过程平均切变达 $12.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。从转动速度计算达强中气旋标准。垂直累积液态含水量平均密度值分别达 $5.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,符合垂直累积液态含水量平均密度超过 $4.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 产生大雹的判据。

15 时 49 分 4.3°和 6.0°仰角上(3.9 km 和 4.8 km 高度)再次出现旋转特征,中气旋产品识别出三维切变,后低层出现辐合,5.5 km 以上出现辐散,说明中气旋再次加强发展,但高度(5 km 左右)明显低于第一次发展过程,16 时 14 分旋转已伸至 0.5°仰角(1.8 km 高度)上,中气旋进入成熟阶段,到 16 时 32 分(图 4),气旋式旋转转为反气旋性旋转,实况于 16 时 20 分到 17 时出现降雹,并出现了明显的大风天气,在风暴最强时期,风力 10 级以上,大面积的屋顶被掀掉,树木折断,冰雹的直径达 1.5 ~ 3 cm,受损异常严重。后反气旋旋转的高度迅速降低,强度减弱,风暴进入消亡阶段。在第二次加强发展过程中,中气旋产品仅在 15 时 49 分出现三维切变,主要是因为旋转速度小,属弱切变;低层以反气旋为主中气旋产品无法识别。但从分析中仍可以看出,气旋旋转向低层发展,顶高迅速降低,预示着强天气的产生。

2005 年 3 月 22 日受高空槽东移、低层切变南压及地面锋区南压影响,一南北向的飊线经过上杭、永定、龙岩、漳平,出现了 8 级以上大风。飊带头部超级单体在强盛阶段中气旋持续 30 min 的特征主要为:14 时 38 分中气旋生成时顶高高度已发展到

8.4 km 处(图 5),最强切变区也在此高度,旋转速度达 22 m/s,属强中气旋,中高层(3.4°仰角)气旋与反气旋共存,说明中高层出现双涡式结构,后中气旋顶高开始下降,最强切变中心也随之下降。上杭 14 时 51 分出现了 $19.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 大风,旋转速度仍有 $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,属强中气旋,双涡式结构也仍存在,但风暴旋转半径变大,中气旋顶已降至 6.7 km(图 6),

最强切变高度降至 5.4 km。后随着爬线头部减弱,中部加强,头部中气旋旋转半径进一步加大,旋转速度减小,中层双涡式结构消失,中气旋特征消失(图 7)。中气旋过程平均强回波中心达 57 dBZ,最强达 61 dBZ,过程平均切变达 $12.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。由转动速度计算表明,达中等强度中气旋标准。

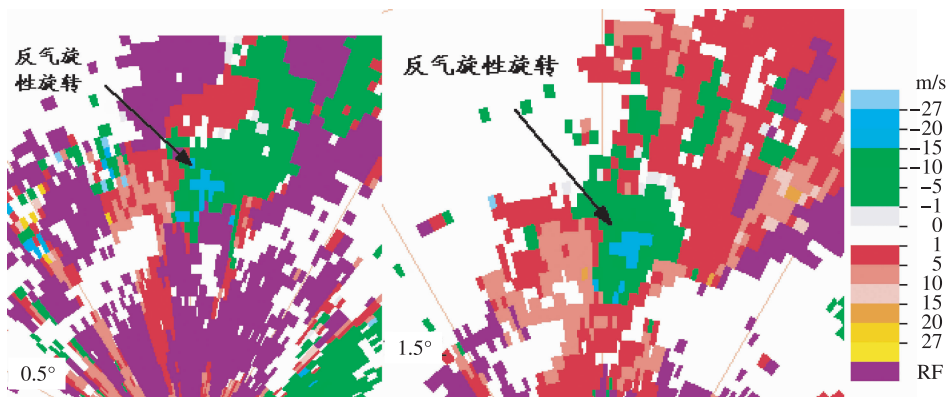


图 4 16 时 32 分风暴相对径向速度图

Fig.4 The relative radial velocity images of storm at 16:32 BST

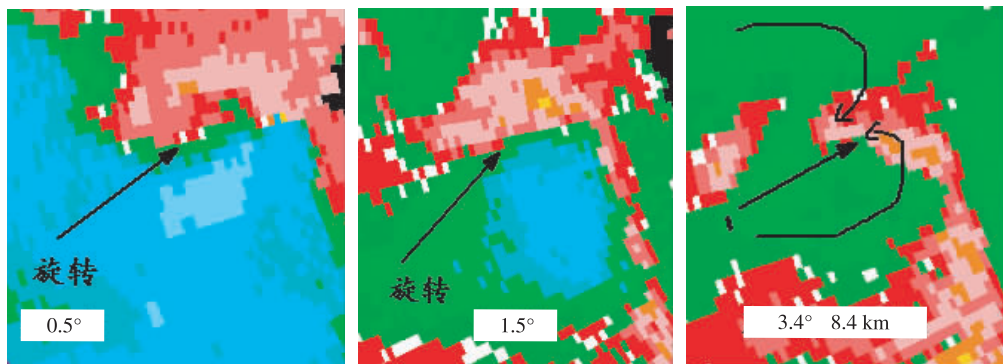


图 5 14 时 38 分风暴相对径向速度图

Fig.5 The relative radial velocity images of storm at 14:38 BST

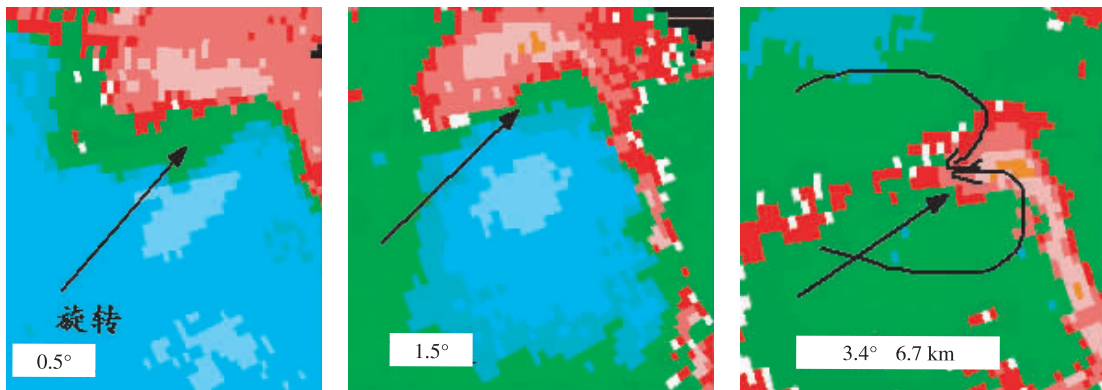


图 6 14 时 51 分风暴相对径向速度图

Fig.6 The relative radial velocity images of storm at 14:51 BST

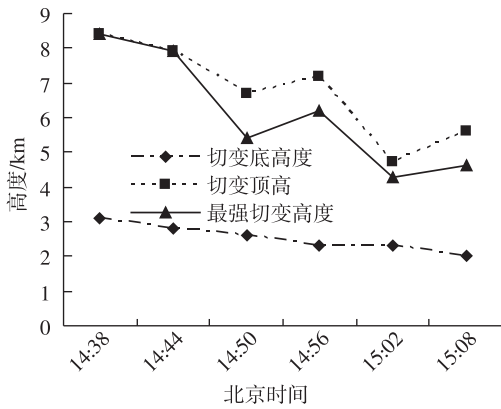


图7 2005年3月22日中气旋顶、底及最强切变高度的变化

Fig.7 The base and top of mesocyclone, and the height variation of strongest shear of mesocyclone on 22 March 2005

3 结论

1) 在进行超级单体中气旋特征判断时,应结合风暴径向速度图、反射率等资料对风暴的结构及发展阶段进行综合分析,在应用中气旋产品时要进行产品正确与否的判断,中气旋的顶、底的高度,伸长厚度以及切变值等特征量可以对中气旋发展强度进行判断。

2) 大部分超级单体风暴的中气旋出现在4—5月,生成时段出现在12:00—20:00及30~110 km处,维持时间大于3个体扫。中气旋一般从中层发展起来,后向上向下发展,当高层或低层的中气旋强度减弱,而中层强度维持时,中气旋有再次加强的可能。中气旋产品出现在中气旋发展的成熟阶段,中气旋一般出现在超级单体风暴的入流区或在弓状回波的头部或中部(即移动较快的部位)。

3) 超级单体风暴的中气旋特征表现在:中气旋底一般在4 km以下,顶在3 km以上、10 km以下;将强对流天气分类统计,从过程平均切变及转动速度计算,冰雹最大,雷雨大风次之,而强降水最小。根据中气旋识别的转动速度统计,中等以上强度的中气旋达64%。91.6%以上的冰雹天气的中气旋达中等强度以上,64.2%以上的雷雨大风天气的中

气旋达中等强度以上,而强降水天气达中等以上强度仅为23.8%。

4) 93.8%的超级单体中尺度气旋总是与冰雹、雷雨大风、短时强降水等强天气相联系,个例分析表明,冰雹、大风此类强对流天气出现时在中气旋特征上表现为:中气旋强度不断加强,中气旋厚度加大,最强切变中心突降,因此,在预报中应对中气旋的初生和发展阶段进行跟踪,并结合风暴的移向及时做出预报。

参考文献:

- [1] 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,2006:116-120;207-209.
- [2] Brook E M. The tornado cyclone[J]. Weatherwise, 1949, 2(2): 32-33.
- [3] 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(8): 433-443.
- [4] 刁秀广,朱君鉴,刘志红.三次超级单体风暴雷达产品特征及气流结构差异性分析[J].气象学报,2009,67(1):133-146.
- [5] 夏文梅,徐芬,吴海英,等.多普勒天气雷达探测中气旋分析[J].气象科学,2007,27(6):655-660.
- [6] 李文娟,郑国光,朱君鉴,等.一次中气旋冰雹天气过程的诊断分析[J].气象科技,2006,34(3):291-295.
- [7] 刁秀广,杨晓霞,朱君鉴,等.一次长寿命风暴的CINRAD/SA雷达反射率及中气旋产品特征与流场结构分析[J].高原气象,2008,27(3):657-667.
- [8] 邵玲玲,孙婷,郭锐,等.多普勒天气雷达中气旋产品在强风预报中的应用[J].气象,2005,31(9):34-38.
- [9] 朱君鉴,王令,黄秀韶,等.CINRAD/SA中气旋产品与强对流天气[J].气象,2007,31(2):38-42.
- [10] 方翀,郑媛媛.新一代天气雷达中气旋产品特征值统计和个例分析[J].气象,2007,33(11):16-20.
- [11] Andra D L. The origin and evolution of the WSR-88D mesocyclone recognition nomogram[C]//Preprints, 28th Conf on Radar Meteorology. Austin, Tx: Amer Meteor Soc, 1997:364-365.
- [12] 冯晋勤,林若钟,肖秀珠.新一代天气雷达资料在闽中南强对流天气预报中的应用[C]//龙岩新一代天气雷达重大科研课题论文集.北京:气象出版社,2004:19-24.

(责任编辑:倪东鸿)