

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. 气象, 41(11): 1305-1314.

2013 年 3 月 20 日湖南和广东雷暴大风过程的特征分析^{* 1}

方 翀¹ 俞小鼎² 朱文剑¹ 尹忠海³ 周康辉¹

1 国家气象中心, 北京 100081
2 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081
3 湖南省气象台, 长沙 410007

提 要: 利用常规探空资料、多普勒天气雷达资料和风廓线雷达资料对 2013 年 3 月 19 日夜里到 20 日凌晨发生在湖南中南部和广东北部的一次区域性雷暴大风天气进行了分析, 发现本次强对流天气过程的天气尺度背景是北支高压脊的崩溃和南支槽的建立, 槽前出现较强的低空急流和切变线并在湖南中南部和广东北部形成了上干冷下暖湿的温湿配置结构下发生并强烈发展的; 地面自动站观测显示北风侵入到前期露点温度较高的贵州黄平地区并形成风向辐合触发了对流, 之后对流单体东移进入前期地面辐合线和露点锋相配合, 同时 500 hPa 极为干冷的湖南中部偏南地区不断发展加强成对流带; 雷达观测显示 19 日夜里在湖南西部不断出现对流单体并在其东移南下过程中最终形成飑线结构, 该飑线中存在多个超级单体; 通过多普勒天气雷达的中气旋产品与雷暴大风出现时间对应比较发现: 大多数由中气旋引发的雷暴大风, 在雷暴大风出现前 2~3 个体扫, 其中气旋底高不断下降至 2 km 左右或以下, 且在雷暴大风出现前 1~2 个体扫, 中气旋的最强切变高度显著下降至中气旋底高位置附近; 通过风廓线雷达数据与雷暴大风出现时间对应比较发现: 底层大气折射率结构常数(C_n^2)大幅度的跃升通常在雷暴大风出现前 10~15 min 左右出现, 其对雷暴大风的出现可能具有一定的指示意义。

关键词: 雷暴大风, 超级单体, 中气旋, 大气折射率结构常数

中图分类号: P458 **文献标志码:** A **doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2015. 11. 001

Characteristics of the Thunderstorm Gale Process in Hunan and Guangdong on 20 March 2013

FANG Chong¹ YU Xiaoding² ZHU Wenjian¹ YIN Zhonghai³ ZHOU Kanghui¹

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081
2 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081
3 Hunan Meteorological Observatory, Changsha 410007

Abstract: Based on the conventional sounding observation data, Doppler radar data and wind-profiling radar data, a thunderstorm gale process that occurred in Hunan and Guangdong from the night of 19 to the morning of 20 March 2013 is analyzed. The results show that the background of this strong convective weather process is the collapse of the northern branch ridge and the establishment of the southern branch trough. Strong low-level jet and the shear line appear before the trough, which causes the dry and cold air above the level of the warm and humid air and makes the convection develop strongly. The automatic observation shows that the convective cell is triggered when the north wind enters into Huangping Guizhou (where the dew point temperature is higher than the surrounding areas) and forms wind convergence. After that, the convective cells moves into the south region of Hunan where there is a convergence line

^{*} 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406002 和 GYHY201206084)共同资助
2014 年 11 月 18 日收稿; 2015 年 9 月 5 日收修定稿
第一作者: 方翀, 主要从事中小尺度强对流天气研究. Email: fangchong@cma. gov. cn

matching a dew point front and strengthens to a severe convective zone while it is extremely cold and dry at 500 hPa. Over the night of the 19th many convective cells emerge in the western Hunan, forming a squal line at last. There are many supercells in the squal line. By comparing the mesocyclone product of the radar with the time of the thunderstorm gale, it is found that the bottom of the mesocyclones continues dropping to below 2 km about 2—3 volume scans before the appearance of the most thunderstorm winds resulting from the mesocyclone, and the strongest shear height drops to the bottom height of mesocyclone about 1—2 volume scans before the appearance of the thunderstorm gale. In addition, after comparing the wind profiler radar data with the time of thunderstorm gale, we also get conclusion that a substantial jump of the bottom refraction index structure constant (C_n^2) always appears about 10—15 min before the time of thunderstorm wind, which is probably indicative to the appearance of wind.

Key words: thunderstorm gale, supercell, mesocyclone, refraction index structure constant

引 言

在对流风暴产生的灾害性天气现象中,雷暴大风因发生频率高、持续时间短、致灾性强且预报预警难度大等特征,其产生的环境条件、触发机制和临近预警一直是强对流灾害性天气研究中的重要内容之一。在大多数情况下,雷暴大风是由强对流风暴(超级单体或多单体风暴或飑线)中处于成熟阶段单体中的下沉气流,在近地面处向水平方向扩散,形成的辐散性阵风而产生(俞小鼎等,2006),有时还有冷池密度流和高空水平动量下传的作用。从预报的角度研究雷暴大风包括潜势预报和临近预报,潜势预报包括中尺度环境场分析和探空特征分析,临近预报则需要重点分析高时空分辨率的观测资料,包括以多普勒天气雷达观测为主的风暴特征结构的识别和中尺度系统分析。Johns 等(1992)指出中到强风垂直切变下产生雷暴大风的风暴模态有 4 种类型,其中超级单体造成的尺度最小,而弓形回波造成的尺度大,大范围的雷暴大风大多由沿着飑线的弓形回波造成。由于弓形回波等有组织的风暴系统可持续 3~6 h,甚至更长,因而对风暴的发展、维持及移动预警时效长,对弓形回波及相应飑线的形成、维持、发展,尤其是其中镶嵌有多个强单体的飑线和弓形回波的分析研究就尤为重要。

随着我国多普勒雷达网的建成和风廓线仪等新型观测手段的应用,国内的气象学者从环境条件、组织类型、结构特征等方面对引发雷暴大风的超级单体风暴和弓形回波系统进行了一些研究,罗建英等(2006)对 2005 年 3 月 22 日华南地区飑线过程进行了分析,指出飑线系统在低空增温、增湿与对流层中

层干侵入的相互作用下形成,姚叶青等(2008)利用多普勒雷达资料研究了飑线发展过程中垂直结构演变特征,姚建群等(2005)也发现飑线强单体出流边界对其南侧的强单体有明显的加强作用,并使得单体的路径发生向右的偏移,王秀明等(2012)深入探讨了 2009 年 6 月 3 日造成河南商丘灾害性地面大风的飑线系统发展、维持及灾害性大风成因,指出商丘飑线灾害性地面大风由高空水平风动量下传、强下沉气流辐散和冷池密度流造成,戴建华等(2012)使用多普勒天气雷达、风廓线仪等资料对 2009 年 6 月 5 日的一个飑线前超级单体风暴进行了详细分析,指出飑前超级单体在飑线主体移动和演变的临近预报中有重要指示意义,吴芳芳等(2012)统计分析江苏盐城 SA 雷达中气旋探测算法识别的中气旋特征发现,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暴大风,邵玲玲等(2006)通过飑线回波带的组成、移动、变化,讨论了飑线与前方线状回波的交汇在飑线发展加强和弓状回波形成中的作用,潘玉洁等(2012)使用双多普勒雷达对华南一次飑线系统的中尺度结构特征进行了分析,俞小鼎等(2006)、于庚康等(2013)、马中元等(2014)、伍志方等(2014)也对飑线发生发展、传播机制和组织结构等特征进行了研究。这些研究为雷暴大风的预报预警提供了有效的参考。

2013 年 3 月 19 日夜间至 20 日凌晨,湖南省中南部到广东省北部出现了一次以大范围雷暴大风天气为主的强对流天气过程,湖南和广东两省共有 23 个县(市)出现雷暴大风,其中湖南道县瞬时最大风速达 $30.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,造成了多人死伤。为此,本文一方面应用常规观测资料,分析该过程引起雷暴大风发生发展的环境条件及触发机制,另一方面应用雷

达和风廓线等非常规资料,尝试分析探讨雷暴大风临近预警的着眼点,旨在为提高此类致灾性强对流天气预报预警能力提供参考依据。

1 天气背景和环境条件

华南和江南中南部地区是我国强对流天气的多发区,相比我国中东部其他区域,其季节分布较广,从春季到秋季都有区域性强对流天气发生,且出现强对流天气的时间较早,一般在 3 月就可能出现区域性强对流天气,其原因在于春季华南等地的热力条件已显著改善,南支槽开始活跃,槽前的正涡度平流有利于该区域低空急流的发展和低涡切变的形成,从而改善了低层的水汽条件,并提供了强对流天气发生发展的动力条件,而此时北方的冷空气依然比较强大,能够影响到华南地区,其与南方暖湿气流的交汇触发了强对流天气的发生发展。相对而言,华南等地的雷暴大风天气过程一般集中在春季。这是由于与夏季相比,一方面华南地区春季的水汽积累仍然不是非常充分,另一方面中层的冷空气侵入更加频繁,更容易形成上干冷下暖湿的有利于雷暴大风发生发展的层结结构。

2013 年 3 月 19 日,200 hPa 高空急流从华南西部延伸至华东沿海,急流核位于江南中东部,江南中南部到华南地区处于 200 hPa 急流入口区右侧(图 1),急流核的右后侧,强烈的高空辐散有利于强对流天气的发生发展。亚欧中高纬 500 hPa 为两槽一脊结构,从东西伯利亚到我国东北地区为一较深低槽,巴尔喀什湖北部为高压脊,受到黑海和里海北部较深低槽东移侵袭的影响,巴尔喀什湖北侧的高压脊开始崩溃,北支上不断有小槽东移并携带冷空气南下侵入西南、华南和江南西部地区;而从青藏高原到孟加拉湾 18 日 08 时就建立了南支槽,该南支槽不断东移,槽前暖湿气流 19 日开始影响我国华南和西南地区。一方面,青藏高原东移的浅槽携带的小股冷空气与南支槽携带的暖湿空气交汇,另一方面,该浅槽与南支槽位相叠加造成了低槽振幅的加大,槽前暖湿气流、正涡度平流和上升气流均加强,水汽条件的改善和静力不稳定度的增强有利于强对流天气的发生发展。而在 850 hPa 上,19 日 08 时江南中西部到华南地区开始出现西南急流并迅速增强,同时从四川盆地移出的低涡切变北侧的弱冷空气与其南侧的低空急流交汇并楔入暖湿气流的下

方,触发了对流天气的发生。该形势一直维持至 24 日 08 时,副热带高压脊线西伸至孟加拉湾附近,南支槽消失,同时从江汉、江南到华南地区的低槽东移,24 日 20 时巴尔喀什湖附近的脊也开始重建,大尺度的环流形势不再有利于强对流天气发生。

从 19 日 20 时的中尺度环境条件配置(图 1)看,850 hPa 切变线位于湖南北部到贵州一带,地面冷锋位于江西中部到湖南南部一线,作为初始对流出现的贵州、湖南交界略偏北地区,地面为冷区,湖南邵阳 20 时的探空图(图略)也显示,850 hPa 以下有逆温层存在,对流不稳定的层次主要位于 850 hPa 以上,即初始对流是由 850 hPa 切变线触发的高架雷暴,触发后对流单体不断东移南下并在进入湖南南部后逐渐转为地基雷暴。温度场上,500 hPa 从湖南西部到广东西部为一显著冷槽,冷中心位于湖南与贵州交界处,对应 850 hPa 温度场从广西东部伸向湖南南部到江西等地为一暖脊,暖中心位于湖南南部。850 hPa 到 500 hPa 的温度差显示,大值中心位于湖南西南部、南部及广东北部地区。同时湖南怀化和郴州 500 hPa 的温度露点差分别达到 39 和 41℃,说明该区域中层极干的湿度环境。以上分析表明,湖南西南部、南部和广东北部等地中低层存在明显的暖中心而高层处于干冷的温度槽中,此时欧洲数值模式的分析场表明湖南南部 CAPE 达到 $1800\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,另外湖南郴州探空图(图略)也显示,其 $0\sim6\text{ km}$ 的垂直风切变达到大约 $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,而在 NCEP 数值预报模式分析场中,湖南南部 WINDEX 指数值超过 50。北部生成的较弱

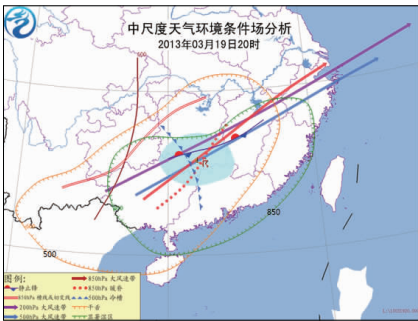


图 1 2013 年 3 月 19 日 20 时中尺度环境条件场分析
(显著湿区:相对湿度 $>80\%$;干区:相对湿度 $<30\%$;
绿色带雷暴符号区域为集中出现雷暴大风的区域;
棕色线为 500 hPa 槽线)
Fig. 1 Analysis of mesoscale environmental conditions at 20:00 BT 19 March 2013

的对流风暴移入该区域后,较强的热力不稳定、上干冷下暖湿的垂直结构配合强的垂直风切变非常有利于伴有雷暴大风天气的强风暴(包括超级单体风暴)的组织化发展。

总而言之,高层存在从华南西部到华东沿海的急流,中层在西南地区东南部附近有低槽东移,低层在华南到江南中南部存在低空急流且在其北侧存在切变线,三者共同构成了产生强对流天气的动力条件,配合中层冷槽、低层暖脊的不稳定的热力条件,及上干下湿的水汽垂直结构,加上切变线和冷锋的触发作用,是在低空急流附近及其与 850 hPa 切变线之间的区域,即江南中南部到华南地区春季出现强对流天气,尤其是雷暴大风天气的典型模型结构。

2 强对流风暴的触发和演变原因及结构特征分析

在 19 日 12 时的地面自动站观测图(图略)上,贵州的黄平到凯里地区基本受西南风影响,露点温度大约为 15~16℃,由于西南气流的维持,黄平西

南部到凯里西部的露点温度 15 时上升至 17℃左右,并在之后继续略有上升,说明该地区底层的温湿条件不断改善,且相对于周边,该地区为露点温度的高值中心,有利于对流天气的发生。16 时,黄平本站由弱的偏南风转为偏北风,其后偏北风区域缓慢向南扩展,17—18 时黄平和凯里交界处开始转为北风,显示冷空气侵入到前期底层温湿条件最好的区域,触发了对流发展。对应于雷达图,19 日 18:07,贵州黄平以西开始出现对流回波(图略),之后对流回波不断向东偏北方向移动。18—20 时,台江南部到雷山地区的西南气流继续加强,与台江北部和凯里等地形成一个较为明显的涡旋,此后雷达回波加强也较为明显,19:40 左右在贵州东部形成了三个较为明显的对流单体并继续东移,中心强度均达到或超过 60 dBz,北侧单体 20 时左右进入地面有弱反气旋结构的区域逐渐减弱,南侧分别位于剑河和锦屏的两个对流单体(A 和 B)则在东移过程中略有扩展加强,20:36 中心强度超过 60 dBz(图 2a)。而在 20 时的地面自动站观测图上,从靖州苗族侗族自治县经武冈到祁东一线为风向辐合区,同时也是露点

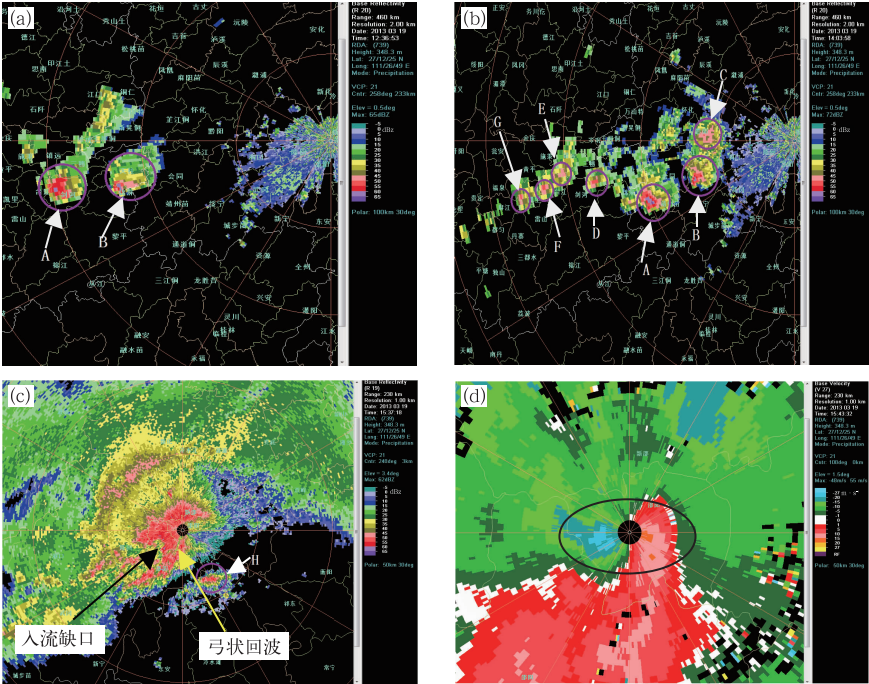


图 2 2013 年 3 月 19 日夜间邵阳雷达基本反射率与速度场
(a) 0.5°基本反射率(20:36), (b) 0.5°基本速度场(22:03),
(c) 3.4°基本反射率(23:37), (d) 1.5°基本速度场(23:43)

Fig. 2 The base reflectivity and base velocity of Shaoyang Radar on 19 March 2013
(a) 0.5° base reflectivity (20:36 BT), (b) 0.5° base velocity (22:03 BT),
(c) 3.4° base reflectivity (23:37 BT), (d) 1.5° base velocity (23:43 BT)

锋区,有利于对流单体的触发加强,而在该地区的中层又恰为干冷区域,故对流单体在 21 时前后东移进入该区域后范围不断扩展,并且在其右后侧不断有新单体生成,同时在单体 B 的东北侧也触发生成了一个新单体 C,从而逐渐形成一条不太连续的对流回波带(图 2b)。单体 B 和单体 C 在移入海拔高度较低、下垫面相对平坦的邵阳及以东地区后发展更为明显,23:37 在邵阳附近两单体连接形成弓状结构并在弓状结构前缘速度场上开始出现中气旋,后侧出现入流缺口(图 2c),在速度场上从 23:24 开始在邵阳和隆回交界处则显示为朝向雷达的低层大风速中心(超过 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)不断向邵阳雷达站附近移动并继续增大,23:43 到达邵阳雷达站,速度场上显示为雷达两侧底层对应的牛眼结构(图 2d),风速达

到 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,相对应的重要天气报显示 23:49 出现了 $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的雷暴大风天气。

B、C 两单体在结合转变为弓形回波后,与其前侧新生成的对流单体 H(图 2c)合并继续加强,速度场上的大风速中心在移过邵阳后继续增大,并在其弓状回波的凸起处底层出现极强的风速辐合和一定的风速切变,并再次探测到中气旋结构。同时,图 2a 中的单体 A 也在东移过程中继续发展,并于 00:02 在新宁西北部出现了类似钩状回波结构,同时在速度场上有中气旋存在(图 3),显示其已经发展为超级单体风暴。在此过程中,湖南西侧仍然继续有新的单体生成发展并向东移动,在图 2b 的基础上逐渐连接成一条略有断续的对流回波带,该回波带中镶嵌了多个超级单体风暴和非超级单体强风暴。

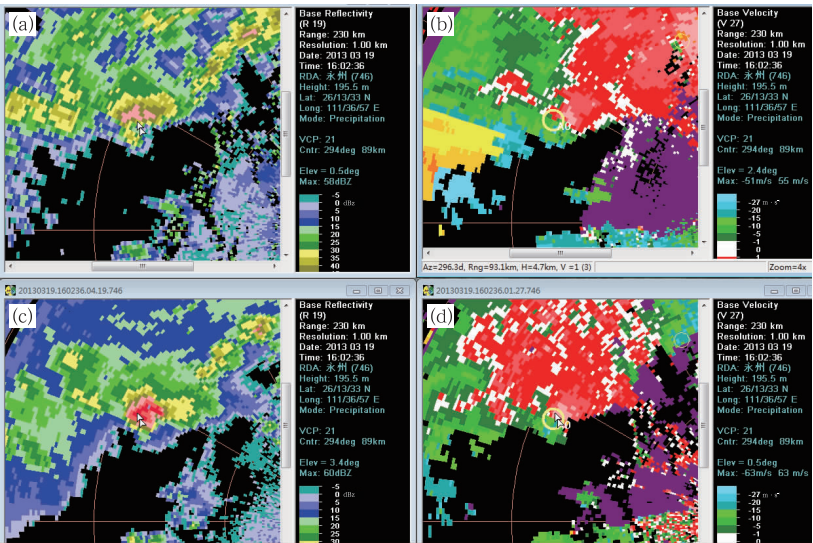


图 3 2013 年 3 月 20 日 00:02 永州雷达基本反射率与速度场四分屏图

(a) 0.5°基本反射率, (b) 2.4°基本速度场, (c) 3.4°基本反射率, (d) 0.5°基本速度场

Fig. 3 The base reflectivity and base velocity of Yongzhou Radar at 00:02 BT 20 March 2013

(a) 0.5° base reflectivity, (b) 2.4° base velocity, (c) 3.4° base reflectivity, (d) 0.5° base velocity

在地面自动站观测图上,21—23 时从衡阳经祁阳到东安一线露点温度开始下降,23 时永州附近由偏南风转为偏北风,说明冷空气开始逐渐南下,与此相对应,对流回波带在 20 日 00 时前后从以向东移动为主转为以向南移动为主,并继续略有发展。至 00:51,湖南中部偏南地区已基本形成一条飑线,在飑线上和飑线西侧存在多条弓形回波和多个超级单体风暴(图 4),其中弓形回波 A 即由图 2c 中的弓形回波发展而来,而弓形回波 B 则由图 3 中的超级单体发展而来。需要指出,飑线是指长度约为 150~

300 km,宽度为几至几十千米的带状雷暴群,而弓形回波是指飑线在雷达图上显示出的向前凸起、形状如弓的部分,一条飑线上可能存在一个或多个弓形回波,弓形回波中常常也存在超级单体风暴,最强的天气尤其是雷暴大风或龙卷天气常常都出现在弓形回波的顶点附近。从图 5 中看到,在飑线东北侧等地出现弓形回波的同时,湖南西侧的对流单体在城步苗族自治州附近也发展成为超级单体风暴,该对流单体强回波中心位于中高仰角,且 3.4°仰角的回波中心越过 0.5°仰角回波中心而位于其前方的

无回波区,显示该单体有显著的弱回波区和回波悬垂结构,且其 3.4° 仰角的回波形态显示该回波单体后侧中层有明显的弱回波通道,对应速度图上显示后侧入流,该后侧入流与其北部的离开雷达的正速度构成中气旋。对应 0.5° 和 3.4° 仰角的速度场,其 3.4° 仰角朝向雷达的强气流前缘显著超前于 0.5° ,说明其回波单体位于前倾槽前,中层的干冷空气超前于低层侵入该地区,其上干冷下暖湿的结构有利于强对流单体风暴的发生发展。该中气旋自 00:45 开始维持 5 个体扫,并于 01:00 造成城步苗族自治州的 $22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的雷暴大风天气。

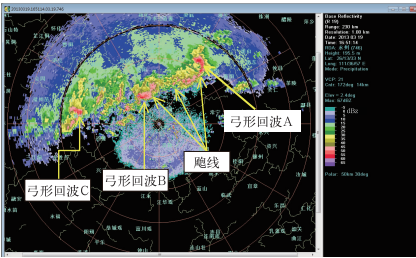


图 4 2013 年 3 月 20 日 00:51 永州
雷达 2.4° 仰角基本反射率图

Fig. 4 The base reflectivity (2.4°) of Yongzhou
Radar at 00:51 BT 20 March 2013

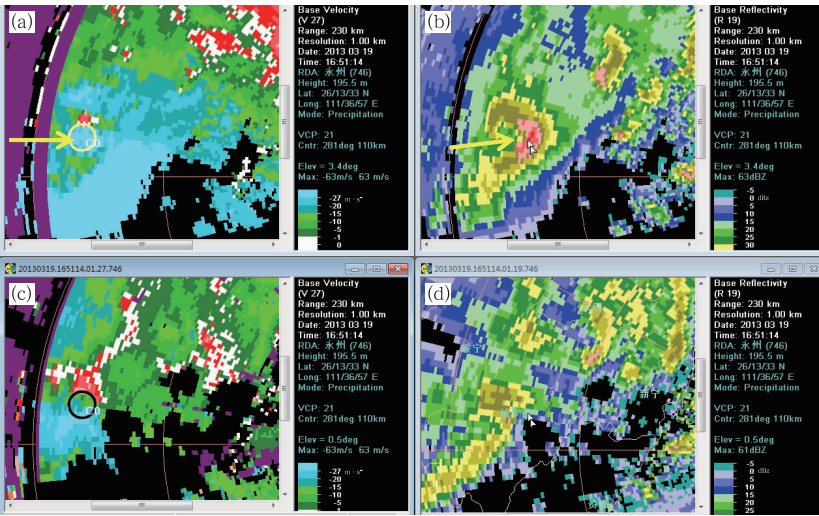


图 5 2013 年 3 月 20 日 00:51 永州雷达基本反射率与速度场四分屏图

(a 图中箭头所指为后侧入流, b 图中箭头所指为弱回波通道)

(a) 3.4° 基本速度场, (b) 3.4° 基本反射率, (c) 0.5° 基本速度场, (d) 0.5° 基本反射率

Fig. 5 The base reflectivity and base velocity of Yongzhou Radar

at 00:51 BT 20 March 2013

(The arrow in Fig. a is the rear inflow, the arrow in Fig. b is the weak echo channel)

(a) 3.4° base velocity, (b) 3.4° base reflectivity, (c) 0.5° base velocity,

(d) 0.5° base reflectivity

之后该回波带继续东移南下,回波带中的多个超级单体风暴和非超级单体强风暴陆续造成永州、双牌、安仁、道县、嘉禾、新田等多地的雷暴大风天气。在雷暴大风经过永州时,从速度场(图 6)上可以看到低层有一对南北对应的牛眼,偏北气流达到约 $23.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,而到一定高度后则转为较强的西略偏南气流,两者之间较强的垂直风切变也有利于组织完好的对流系统如强烈多单体强风暴和超级单体风暴的发生发展(俞小鼎,2012),并且在一定条件下有利于强炮线的发生发展。

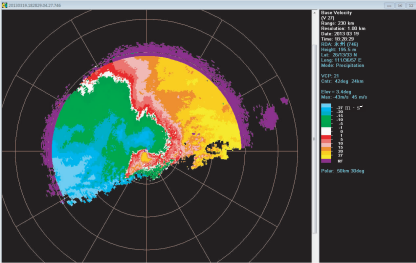


图 6 2013 年 3 月 20 日 02:28 永州
雷达基本速度场(3.4° 仰角)

Fig. 6 The base velocity (3.4°) of Yongzhou
Radar at 02:28 BT 20 March 2013

3 中气旋产品特征统计

中气旋产品是表征是否为超级单体风暴的最重要的因子,对邵阳、永州和韶关雷达的中气旋产品统计表明,本次过程出现的中气旋非常多,持续 3 个体扫以上的中气旋超过 24 个。但由于并非所有出现雷暴大风的站点都发布重要天气报,仅有发布重要

天气报的站点能够确定大风出现的具体时间,故大多数中气旋与出现雷暴大风的站点难以完全对应,最终仅选出了城步苗族自治州 01:00(对应永州雷达中气旋 C0)、道县 03:16(对应永州雷达中气旋 V2)、仁化 05:36(对应韶关雷达中气旋 F3)、南雄 06:11(对应韶关雷达中气旋 S8)出现的雷暴大风数据与中气旋数据进行对比(表 1),试图找出有意义的预警指标。

表 1 中气旋产品特征值与雷暴大风出现时间对照表
Table 1 The characteristic value of mesocyclone and the time for thunderstorm gale

地点(时间)	体扫时间/BT	底高/km	顶高/km	最强切变高度/km	最强切变值/ 10^{-3} s^{-1}
城步苗族自治州(01:00)	00:45	2.5	6.8	6.8	15
	00:51	2.2	6.5	6.5	11
	00:57	2	6.2	2	18
	01:03	1.9	7.4	7.4	15
	01:09	1.7	7.3	7.3	19
	02:52	2.9	7	4.2	19
道县(03:16)	02:58	3.8	6.9	5.1	17
	03:04	2.1	4.4	3.2	18
	03:10	2	3.1	2	16
	03:17	3	6.6	5.1	14
	05:12	2	4.7	3.1	13
仁化(05:36)	05:24	1.5	6.1	1.5	25
	05:30	0.6	5.8	0.6	25
	05:36	1.7	6.2	1.7	72
	05:42	2.1	5.9	3.1	12
	06:00	3.8	4.9	3.8	11
南雄(06:11)	06:06	1	4.7	1	41
	06:12	1.1	6.8	1.1	40

由表 1 可以看到,一方面,城步苗族自治州、道县和仁化三站在雷暴大风发生前的 2~3 个体扫,其中气旋底高都是在不断下降的,南雄的中气旋数据时间较短,但 06:00—06:06 其中气旋底高也出现了显著下降,即很可能大多数的雷暴大风与中气旋的降低密切相关,在雷暴大风出现前 2~3 个体扫,其中气旋底高不断下降至 2 km 左右或以下;另一方面,城步苗族自治州的中气旋在 00:45—00:51 期间,其最强切变高度接近中气旋顶高,但从 00:51—00:57,其最强切变高度突然下降至中气旋底高位置,01:00 出现雷暴大风,01:03 最强切变高度再度上升至中气旋顶高高度,道县和仁化的中气旋也比较类似,在发生雷暴大风 1~2 个体扫以前,其最强切变高度都处于中间层次,道县在 03:04—03:10 其最强切变高度降至中气旋底高位置,03:16 出现雷暴大风,仁化则是在 05:12—05:24 最强切变高度显著下降至中气旋底高位置,05:36 出现雷暴大风,南

雄站 06:00 其最强切变高度即底高高度,但 06:00—06:06 最强切变高度也随着中气旋底高一起显著下降,06:11 出现雷暴大风,故可以得出以下结论:大多数由中气旋引发的雷暴大风,其在雷暴大风出现前 1~2 个体扫,中气旋的最强切变高度会显著下降至中气旋底高位置(或跟随中气旋底高一起下降),雷暴大风发生后迅速回升。

关于中气旋与雷暴大风的关系,尝试解释如下:雷暴内下沉气流到达地面附近导致雷暴高压,而中气旋降低导致大气地面附近气压降低,在下沉气流导致的雷暴高压和中气旋下沉导致的地面进一步降低的低压之间具有最强的气压梯度力,进而在该气压梯度力作用下出现强风。而下沉气流向周边辐散和动量下传也是导致地面大风的机制。有时,雷暴高压与中气旋低压之间的方向与雷暴移动方向相近,也就是与动量下传导致的大风方向相近,两者叠加可能是导致极端的地面大风的重要机制之一。

另外,对这几次中气旋的最强切变值分析发现,部分中气旋在雷暴大风发生前 1~2 个体扫,其最强切变值增大明显(如南雄),但道县却在减小,说明最强切变值的变化对雷暴大风的发生虽然可能有一定的预警价值,但例外的情况还是具有相当比例。

4 风廓线的折射率结构常数(C_n^2)变化分析

由于本次过程中,广东北部的连州(05:52)和南雄(06:11)均出现了雷暴大风天气,而这两个站点均有风廓线雷达,故能够对这两个站点的风廓线雷达数据进行研究探讨,找寻有利于进行雷暴大风预警的结论。需要指出的是,由于南雄站的资料问题,其风廓线资料仅到 06:05。

对流层中,大气湍流运动明显,湍流运动导致的折射率随机不均匀分布是风廓线雷达回波信号产生的主要机制。在一定的假设条件下,大气的折射率结构函数 $D_n(r) = C_n^2 r^{2/3}$,其中 $C_n^2 = b^2 C_e^2 + a^2 C_T^2 - 2abC_{T_g}^2$, C_e^2 、 C_T^2 和 $C_{T_g}^2$ 分别为湿度、温度和温湿结构常数,故 C_n^2 依赖于大气的温、压、湿状况(何平, 2006)。而风廓线雷达探测可以实时得到 C_n^2 数据,本文尝试利用连州和南雄风廓线雷达的 C_n^2 数据变

化和雷暴大风出现时间进行对比,找寻可能有益于临近预警的规律。

首先,我们选取这两个站在出现雷暴大风之前 2 h 及之后 1 h 的 C_n^2 记录,由于风廓线数据为每 5 min 一份记录,故将后 5 min 减去前 5 min,得到的值除以前 5 min 的值作为该层次该时段的 C_n^2 变化幅度。其次,由于风廓线雷达的探测层数较多,从最底层 100 m 高度开始,到最高层 4960 m,总共 82 层,需要将一定的层次进行平均计算。我们的数据处理方式是:从 100 m 的层次开始往上,每 8 层(最后一个平均层为 10 层的平均)计算平均的 C_n^2 变化幅度,得到从底层往上总共 10 个平均层的数据,观察各平均层 C_n^2 在雷暴大风发生前 2 h 及发生后不久的变化幅度。

分析连州风廓线各平均层的 C_n^2 变化幅度(图 7)发现,连州雷暴大风出现前大约 15 min 左右,从 05:35—05:40,最底层的 C_n^2 有一个非常大幅度的跃升,雷暴大风出现之后,最底层的 C_n^2 有一个较小幅度的跃升,而在第二层,虽然 05:35—05:40 的跃升幅度与底层类似,但其雷暴大风出现后的跃升幅度更大,第四层其雷暴大风出现后的跃升幅度之大已经使得 05:35—05:40 的跃升难以在图表上表现,最高层也是在雷暴大风出现后才出现一定程

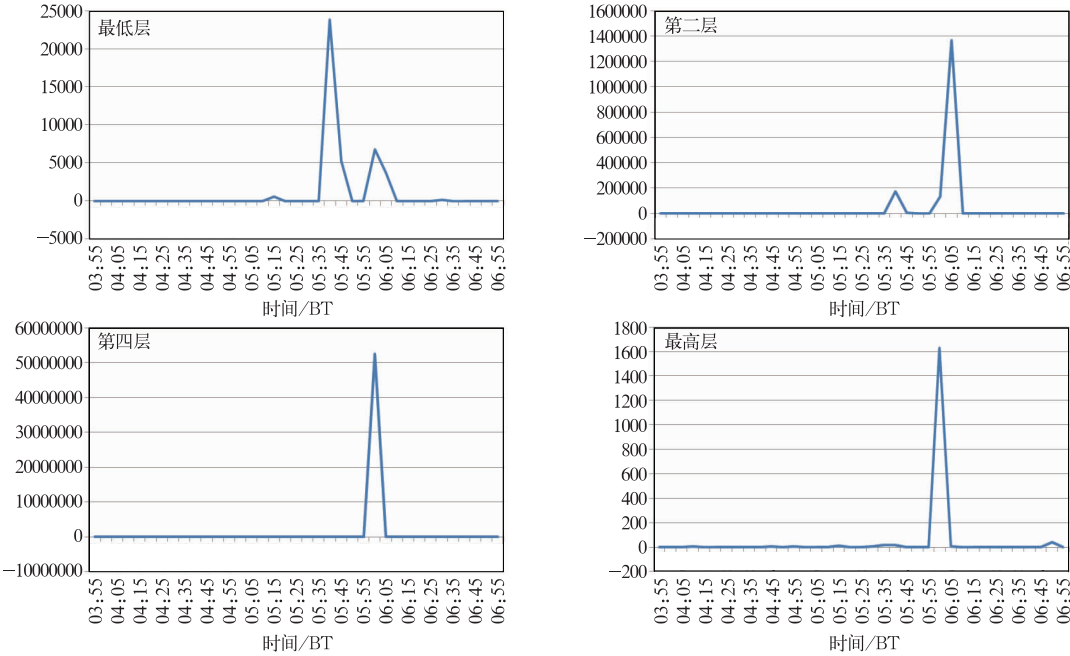


图 7 2013 年 3 月 20 日 03:55—06:55 广东连州风廓线各层 C_n^2 变化幅度
Fig. 7 The C_n^2 variation at different levels from 03:55 to 06:55 BT 20 March
of Lianzhou wind profiler in Guangdong

度的跃升。故可能对雷暴大风的出现有一定指示性的仅在最底层。南雄 06:05 之后的资料缺失,但在考察 06:05 之前最底层的 C_n^2 变化情况(图 8)时,也发现在在雷暴大风出现之前 10 min 左右的 06:00—06:05 出现了大幅度的跃升,说明底层 C_n^2 的变化幅度对于雷暴大风的出现很可能有一定的指示性,其大幅度的跃升通常在雷暴大风出现前 10~15 min 左右出现。

这个大气折射率结构常数在大气低层的跃升应该是由对流系统前阵风锋的经过所导致的,然后通过重力波向上传播,因此导致各层先后都出现该值的跃升。由于在地形复杂地区不见得很容易在雷达上探测到阵风锋,因此通过低层大气折射率结构常数的跃升可以判断阵风锋的到来,意味着即将起大风,具有一定预警作用。

需要指出的是,由于本次过程雷暴大风发生的站点仅有连州和南雄有风廓线布网,故上述得到的结论仍需要更多的数据来进行验证。

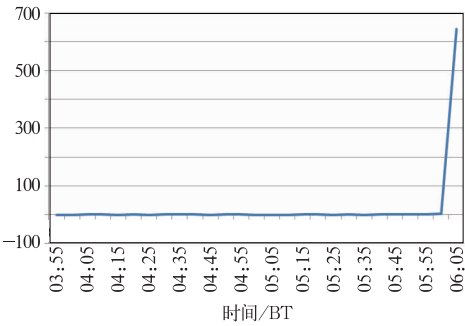


图 8 2013 年 3 月 20 日 03:55—06:05 广东南雄风廓线底层 C_n^2 变化幅度
Fig. 8 The C_n^2 variation at the bottom level from 03:55 to 06:05 BT 20 March Nanxiong wind profiler in Guangdong

5 结论和讨论

本文对 2013 年 3 月 19 日夜间至 20 日凌晨发生在湖南和广东的一次区域性雷暴大风过程的常规观测资料、多普勒天气雷达和风廓线雷达资料进行了分析,主要获得如下结论:

(1) 本次强对流天气过程的天气尺度背景是北支高压脊的崩溃和南支槽的建立,槽前低层出现较强的暖湿急流和切变而高层出现了较强的辐散,深层和低层垂直风切变大,大气斜压性强,冷暖空气在

华南对峙。

(2) 地面自动站观测和雷达回波的对比分析显示,贵州北部南下的冷空气侵入到前期地面露点温度高值中心黄平到凯里附近并形成风向辐合触发了对流,随后对流单体东移进入前期地面辐合线和露点锋相配合、同时 500 hPa 极为干冷的湖南中部偏南地区不断扩展并触发新单体,最终形成了飚线结构,该飚线中镶嵌有多个超级单体并造成了多站的雷暴大风天气。

(3) 本次过程中多普勒天气雷达算法识别的与镶嵌在飚线中的超级单体相联系的中气旋产品与雷暴大风出现时间对应比较发现:大多数由中气旋引发的雷暴大风,在雷暴大风出现前 2~3 个体扫,其中气旋底高不断下降至 2 km 左右或以下;其在雷暴大风出现前 1~2 个体扫,中气旋的最强切变高度会显著下降至中气旋底高位置,雷暴大风发生后迅速回升;可以用中气旋高度降低作为大风预警指标之一。

(4) 关于中气旋与雷暴大风的关系,尝试解释如下:雷暴内下沉气流到达地面附近导致雷暴高压,而中气旋降低导致大气地面附近气压降低,在下沉气流导致的雷暴高压和中气旋下沉导致的地面进一步降低的低压之间具有最强的气压梯度力,进而在该气压梯度力作用下出现强风。而下沉气流向周边辐散和动量下传也是导致地面大风的机制。有时,雷暴高压与中气旋低压之间的方向与雷暴移动方向相近,也就是与动量下传导致的大风方向相近,两者叠加可能是导致极端的地面大风的重要机制之一。

(5) 本次过程中风廓线雷达的数据与雷暴大风出现时间对应比较发现:低层 C_n^2 的变化幅度对于雷暴大风的出现很可能有一定的指示性,其大幅度的跃升通常在雷暴大风出现前 10~15 min 左右出现;低层 C_n^2 的跃升其实反映了雷暴阵风锋的到来,由于在地形复杂地区常常不容易在雷达回波上看到阵风锋,因此上述折射率结构常数的跃升可以看作是阵风锋的到来,而大风区常常就在阵风锋之后,因此可以用来预警大风。

需要指出的是,由于样本较少,以上结论仅是初步探讨结果,较为确定的结论则需要对更多样本进行分析研究。

参考文献

戴建华,陶岚,丁扬,等.2012.一次罕见飚前强降雹超级单体风暴特

征分析. 气象学报, 70(4): 609-627.

何平. 2006. 相控阵风廓线雷达. 北京: 气象出版社, 43-45, 49.

罗建英, 廖胜石, 梁岱云, 等. 2006. 2005 年 3 月 22 日华南飊线的综合分析. 气象, 32(10): 70-75.

马中元, 苏俐敏, 湛芸, 等. 2014. 一次强飊线及飊前中小尺度系统特征分析. 气象, 40(8): 916-929.

潘玉洁, 赵坤, 潘益农, 等. 2012. 用双多普勒雷达分析华南一次飊线系统的中尺度结构特征. 气象学报, 70(4): 736-751.

邵玲玲, 黄宁立, 邬锐, 等. 2006. 一次强飊线天气过程分析和龙卷强度级别判定. 气象科学, 26(6): 627-632.

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. 高原气象, 31(2): 504-514.

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

伍志方, 庞古乾, 贺汉青, 等. 2014. 2012 年 4 月广东左移和飊线内超级单体的环境条件和结构对比分析. 气象, 40(6): 655-667.

姚建群, 戴建华, 姚祖庆. 2005. 一次强飊线的成因及维持和加强机制分析. 应用气象学报, 16(6): 746-754.

姚叶青, 俞小鼎, 张义军, 等. 2008. 一次典型飊线过程多普勒天气雷达资料分析. 高原气象, 27(2): 373-381.

于庚康, 吴海英, 曾明剑, 等. 2013. 江苏地区两次强飊线天气过程的特征分析. 大气科学学报, 36(1): 47-59.

俞小鼎. 2012. 强对流天气临近预报. 北京: 中国气象局气象干部培训学院, 5-6.

俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京: 气象出版社, 122-123, 169.

Johns R H, Doswell C A III. 1992. Severe local storms forecasting. Wea Forecasting, 7: 588-612.