邓朝平,唐明晖,苏涛,等. 2024.湖南衡阳“4.04”强下击暴流预警关键点及环境条件分析[J].暴雨灾害,43(2):158-167. DENG Chaoping, TANG Minghui, SU Tao, et al. 2024. Analysis of key warning points and environmental conditions for the ‘4.04’ strong downburst event in Hengyang of Hunan [J]. Torrential Rain and Disasters,43(2):158-167 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-137

湖南衡阳“4.04”强下击暴流预警关键点及环境条件分析

邓朝平[1],唐明晖[1],苏涛[1],罗源[1],吴亚昊[1],汤宇[2]
(1. 湖南省气象台,长沙 410118;2. 湖南省气象灾害防御技术中心,长沙 410053)

摘　要:2023年4月4日下午湖南衡阳出现一次强下击暴流过程(简称“4.04”强下击暴流),造成严重灾害。利用常规气象观测、多普勒天气雷达、NCEP 1°×1°再分析等资料对该过程极端大风的预警关键点与环境条件进行分析。结果表明:(1)“4.04”强下击暴流发生在“斜压锋生类”天气系统配置下,地面冷锋提供了触发条件。探空曲线上干下湿特征明显、大气对流参数及订正后的对流有效位能表现出明显的不稳定特征,垂直风切变强,利于极端大风发生。(2)中尺度对流系统(MCSs)弓状回波扫过衡阳,造成区域性下击暴流;极端大风发生在对应风暴单体快速移动时,最大反射率因子达60 dBz,垂直积分液态水含量及质心高度快速下降;反射率因子具有明显倾斜结构,弓状回波、后侧入流急流、径向速度模糊特征明显;低仰角“非对称速度大值区”和“速度对纯辐散”是极端大风预警关键点。(3)强下击暴流对流潜势明显,低层水汽通量辐合强、比湿大;具备一定的热力不稳定及垂直上升运动条件,且有低层辐合、高层辐散与之配合;冷空气对本次过程发生发展起到了重要作用。

关键词:下击暴流;非对称速度;后侧入流急流;弓状回波
中图法分类号:P425.6+1　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.12406/byzh.2023-137

Analysis of key warning points and environmental conditions for the ‘4.04’ strong downburst event in Hengyang of Hunan

DENG Chaoping[1], TANG Minghui[1] SU Tao[1], LUO Yuan[1], WU Yahao[1], TANG Yu[2]

(1. *Hunan Meteorological Observatory, Changsha* 410118;2. *Hunan Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Changsha* 410053)

Abstract: On the afternoon of 4 April, 2023, an intense downburst event (referred to as the ´4.04´ strong downburst) occurred in Hengyang, Hunan, causing serious disasters. This study analyzes the key warning indicators and environmental conditions for extreme strong winds using conventional meteorological observations, Doppler weather radar, and NCEP 1°×1° reanalysis data. The results are as follows: (1) The ´4.04´ strong downburst occurred under a ´baroclinic frontogenesis´ weather system configuration, with a surface cold front providing the triggering conditions. The Skew-T plots clearly showed characteristics of high-level dryness and low-level moisture, unstable atmospheric convective parameters, and corrected convective available potential energy (CAPE), along with strong vertical wind shear, all conducive to the occurrence of extreme strong winds. (2) A mesoscale convective system (MCS) with bow echoes swept through Hengyang, causing regional downbursts. Extreme strong winds occurred when the corresponding storm cells moved rapidly, with maximum reflectivity factors reaching 60 dBz. The vertical integrated liquid water content and centroid height rapidly decreased. The reflectivity factors displayed a noticeable tilted structure, with clear features of bow echoes, rear-inflow jets, and radial velocity ambiguity. The low elevation asymmetric high-speed regions and velocity convergence are key warning indicators for extreme strong winds. (3) The strong downburst exhibited significant convective potential, with strong low-level moisture flux convergence and high specific humidity. There were conditions of thermal instability and vertical upward motion, along with low-level convergence and upper-level divergence. Cold air played an important role in the occurrence and development of this downburst event.

Key words: downburst; asymmetric high-speed; rear-inflow jet; bow echo

收稿日期:2023-07-03;**定稿日期**:2023-12-30
资助项目:湖南省自然科学基金重大项目(2021JC0009);湖南省气象局创新发展专项(CXF72023-FZZX28);中国气象局复盘总结专项(FPZJ2024-090)
第一作者:邓朝平,主要从事短临天气预报技术研究。E-mail:75107149@qq.com
通信作者:唐明晖,主要从事天气预报技术研究。E-mail:3617176@qq.com
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

引　言

2023年4月4日湖南南部(以下简称湘南)部分地区出现7~11级雷暴大风天气，导致衡阳岳屏镇东湖村因房屋倒塌4人死亡，事后调查小组经过现场走访、无人机航拍以及气象资料综合分析，认定为局地性下击暴流造成。下击暴流为对流风暴发展到成熟阶段后，雷暴云中冷性下沉气流达到相当大的强度，到达地面形成外出流引起的雷暴大风，具有强局地性、突发性特征(Fujita and Byers，1977；Fujita，1985)。马淑萍等(2019)对我国15 a极端雷暴大风天气进行统计，得到了有利于极端大风产生的关键环境特征，指出极端雷暴大风的对流有效位能、对流层中下层垂直温度递减率和垂直风切变均明显大于普通雷暴事件的相应值。但常规探空由于受时空分辨率限制，未必能准确判断对流潜势，因此对下击暴流预报预警更多需要发挥多普勒天气雷达监测作用。Robert和Wilson(1989)通过研究31个发生在美国科罗拉州的下击暴流及其相应的风暴单体指出，利用下降的反射率因子核、反射率槽口、雷暴云中径向辐合以及旋转可预警下击暴流。此外，下击暴流与超级单体、多单体、弓状回波有关(毕旭等，2007；吴芳芳等，2009；王秀明等，2023)，速度图上后侧入流急流的发展加强并伴随云底以上的速度辐合的特征是弓状回波形成的前兆(俞小鼎等，2006)。

以上研究成果对下击暴流预报预警业务具有重要意义，然而下击暴流发生发展原因极为复杂，尤其是极端性大风。“4.04”强下击暴流预报预警服务中，短期预报将出现较强对流天气，临近时段主要开展了冰雹预警服务，对雷暴大风预警能力不足。因此，本文对“4.04”强下击暴流预警关键点及环境条件进行分析，以期提高下击暴流的预报预警能力。

1　资料说明

本文采用的资料主要包括：(1) 国家气象中心提供的2023年4月4日08∶00—5日08∶00 (北京时，下同)湘南48个气象站(含国家站和区域站) 2 min平均风向风速、极大风向风速、分钟降水量、高空观测资料，用于此次强对流过程实况以及强对流发生的天气形势和背景分析；(2) 湖南省气象信息中心提供的2023年4月4日12∶00—20∶00湖南衡阳S波段多普勒天气雷达(海拔高度203 m、雷达扫描模式为VCP21，以下简称衡阳雷达)、长沙S波段双偏振多普勒天气雷达(海拔高度622 m、雷达扫描模式为VCP21，以下简称长沙雷达)资料，用于下击暴流预警特征分析；(3) 2023年4月3日08∶00—5日08∶00 NCEP 1°×1°逐6 h再分析资料(https://cds.climate.copernicus.eu/)，用于此次强对流触发机制以及强对流发展过程中水汽、动力等物理量特征分析。

2　天气实况

2023年4月4日下午，湘南出现了区域性强对流天气，45站出现雷暴大风、11站出现冰雹(图1a)。本次强对流天气虽有冰雹发生，但最大冰雹仅1 cm，相对而言雷暴大风特征更明显；强对流最强时段发生在午后，衡阳雁峰区岳屏镇金桥站15∶08录得36.1 m·s^{-1}(12级，打破历史极值)大风；距离金桥站2.5 km东湖村遭受下击暴流影响，导致4人死亡；东湖村20 km范围周家坳站(15∶17)、车江站(15∶19)分别录得了19 m·s^{-1}、25.8 m·s^{-1}大风(图1b)。

3　极端大风的雷达回波特征

3.1　反射率因子演变特征

结合间隔30 min的组合反射率因子演变对极端

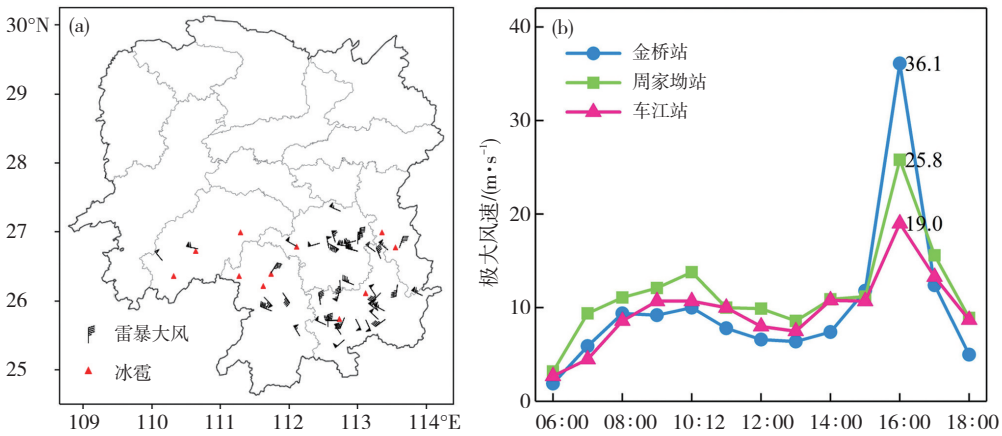


图1 2023年4月4日08∶00—5日08∶00湖南强对流天气实况的空间分布(a)和4日06∶00—18∶00金桥、周家坳、车江站极大风速的逐小时演变(b)

Fig.1 (a) Spatial distribution of strong convection in Hunan from 08∶00 BT 4 to 08∶00 BT on 5 April 2023 and (b) hourly evolution of maximum wind speed at Jinqiao, Zhoujia 'ao and Chejiang stations from 06∶00 BT to 18∶00 BT on 4 April 2023

大风发生前后的回波特征进行分析。13∶14 (图2a),距离岳屏镇东湖村(图2黑方框)偏西南方向120~140 km范围内有线状对流风暴A和块状对流风暴B (强回波中心达60 dBz)发展,它们在引导气流作用下东移北上,移动速度达18~21 m·s^{-1};13∶43 (图2b),线状对流风暴A移入衡阳,在有利对流条件下,对流风暴移动方向前侧不断有回波新生(图2b黑色椭圆);14∶13 (图2c),线状对流风暴A、块状对流风暴B、新生的回波构成了中尺度对流系统MCSs (图2c红椭圆),南侧的线状对流风暴A演变成块状、强度增强;14∶43 (图2d),MCSs快速东移北上,MCSs中的对流风暴A强回波中心达60 dBz;15∶12 (图2e),对流风暴A演变成弓状,快速扫过衡阳造成区域性雷暴大风,给岳屏镇东湖村带来致灾性大风(36.1 m·s^{-1});随着MCSs继续东移北上,仍有60 dBz强回波发展(图2f),给下游地区带来雷暴大风天气。

对反射率因子追踪后发现,MCSs中风暴A的单体(雷达产品软件标记为D0)和岳屏镇东湖村极端大风密切相关,D0 12∶50生成、15∶30消亡,生命史长达2.7 h (27个体扫),对单体D0的移动速度(MVMT)、最大反射率因子(dBzM)、质心高度(HT)、垂直积分液态水含量(VIL)演变特征进行分析(图3)可知,MVMT 13∶02仅为11 m·s^{-1},13∶37增至17 m·s^{-1},后期移动速度加快达17~19 m·s^{-1};dBzM大于50 dBz,14∶31后均超过60 dBz;VIL 13∶26开始在波动中上升,14∶25达到最强,为49 kg·m^{-2},14∶25—15∶06在波动中下降,其中14∶49—15∶06持续下降,降幅达23 kg·m^{-2};HT 15∶00—15∶05陡降2.4 km。综上,极端大风发生在单体D0快速移动、dBzM超过60 dBz、VIL及HT快速下降时,以上特征与王一童等(2022)等统计的致灾性雷暴大风的预警特征符合。

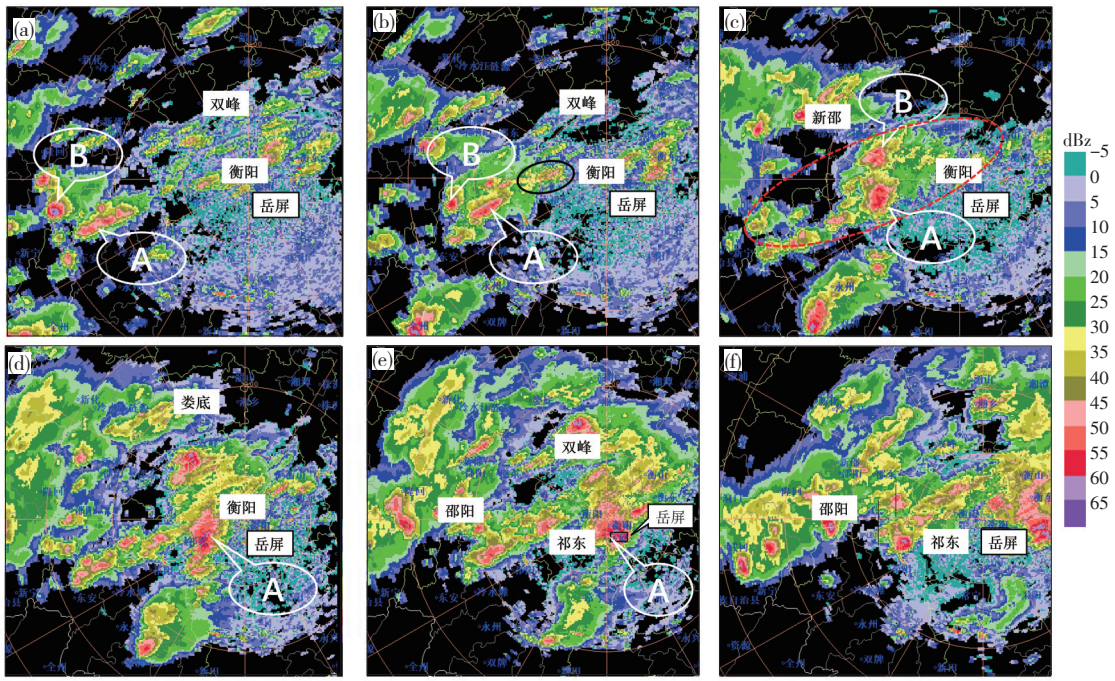


图2 2023年4月4日13∶14 (a)、13∶43 (b)、14∶13 (c)、14∶43 (d)、15∶12 (e)、15∶42(f)衡阳雷达组合反射率因子(A、B分别为线状对流风暴、块状对流风暴所在位置,图b黑椭圆为回波新生所在位置,图c红椭圆为MCSs所在位置,图e黑色方框为极端大风发生区域)

Fig.2 The composite reflectivity factors at (a) 13∶14 BT, (b) 13∶43 BT, (c) 14∶13 BT, (d) 14∶43 BT, (e) 15∶12 BT and (f) 15∶42 BT on 4 April 2023 (A and B denote the positions of linear convective storms and clustered convective storms, black ellipses in Fig.2b indicate areas of new echo generation, red ellipses in Fig.2c mark the locations of MCSs, and black boxes in Fig.2e indicate the area where the downburst occurred)

3.2 径向速度演变特征

俞小鼎等(2020)研究表明下击暴流最明显特征是低层辐散,表现为对称的或不对称的辐散。结合0.5°仰角径向速度图对MCSs中的风暴A进行分析。14∶19及之前的径向速度偏弱(图4a),最大仅为10 m·s^{-1};14∶25 (图4b),负速度绝对值最大增至16 m·s^{-1}(对应高度为0.87 km),范围仅为2个距离库大小,表现为单个“牛眼”结构,为“非对称速度大值区” (王秀明等,2023);14∶31—14∶49 (图4c—f),负速度绝对值大值区快速东移北上;14∶55 (图4g),其左侧出现正速度大值区(16 m·s^{-1}),整体表现出“速度对纯辐散”特征(王秀明等,2023);15∶00—15∶06 (图4h—i),“速度对纯辐散”继续东移北上;15∶12 (图4j),正速度大值区强度继续加强,出现速度模糊;15∶18—15∶24 (图4k—l),“速度对纯辐散”特征继续维持,强下沉气流给车江、东阳渡分别带来19 m·s^{-1}、25.8·m·s^{-1}大风;15∶30—15∶42

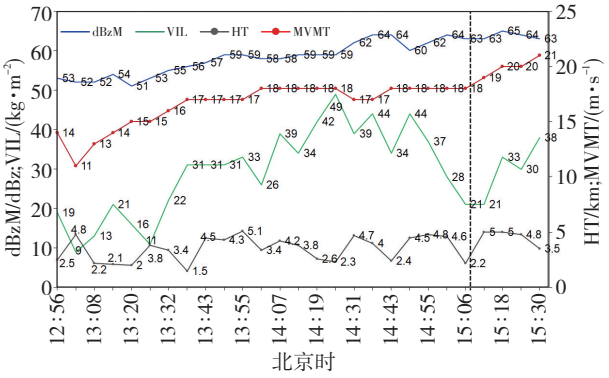


图3 2023年4月4日12:56—15:30衡阳雷达追踪的对流单体D0的最大水平反射率因子(dBzM)、质心高度(HT)、垂直积分液态水含量(VIL)、移动速度(MVMT)时间演变(黑虚线为强下击暴流发生时间)

Fig.3 The time evolution of maximum horizontal reflectivity factor (dBzM), centroid height (HT), vertically integrated liquid (VIL), and movement speed (MVMT) of convective cell D0 tracked by Hengyang radar from 12:56 BT to 15:30 BT 4 April 2023 (Black dashed line denotes the time of the strong downburst event)

(图4m—o)，又演变成“单个牛眼”结构，继续影响下游区域。以上分析表明，“4.04”强下击暴流较早表现出“速度大值区”特征，15:08岳屏镇东湖村的极端大风预警提前量可达40 min以上。因此，低仰角“非对称速度大值区”和“速度对纯辐散”是本次极端大风的预警关键点。

3.3 弓状回波特征

岳屏镇东湖村极端大风发生前2 min (15:06)，0.5°仰角基本反射率因子(图5a)显示岳屏镇处于MCSs弓状回波梯度大值区前沿，弓状回波反射率因子达60 dBz；抬高仰角，对应反射率回波往东北方向倾斜(图略)，6.0°仰角(图5b)岳屏镇处于弓状回波的头部(1.7 km高度)。0.5°仰角径向速度对应有速度对纯辐散(图5d)，正负最大速度绝对值分别达17 m·s^{-1}、23 m·s^{-1}，处于0.3—0.4 km高度；仰角6.0°(图5e)对应有明显的RIJ，符合Fujita (1985)提出的弓状回波概念模型。Weisman (1993)指出弓状头部极端大风由强RIJ动量下传及地产生，弓状头部RIJ往往预示着强下沉辐散即将产生。15:12 0.5°仰角基本反射率因子(图5c)暴雨岳屏镇已处于弓状回波头部(0.33 km高度)，回波倾斜结构仍维持(图略)；0.5°仰角(图5f)强速度对纯辐散位置东移，岳屏镇处于正速度大值区且出现速度模糊，退模糊后速度达到30.5~34.0 m·s^{-1}，6.0°仰角RIJ消失(图略)，充分证明了极端大风已经发生，实况是15:08岳屏镇金桥站已录得12级大风(36.1 m·s^{-1})。沿着极端大风所在区域(图5c黑色直线)做垂直剖面，该区域位于衡阳雷达站30 km范围以内，由于受静锥区影响中高层回波被截断，但低层强回波达55~60 dBz (图6a)；

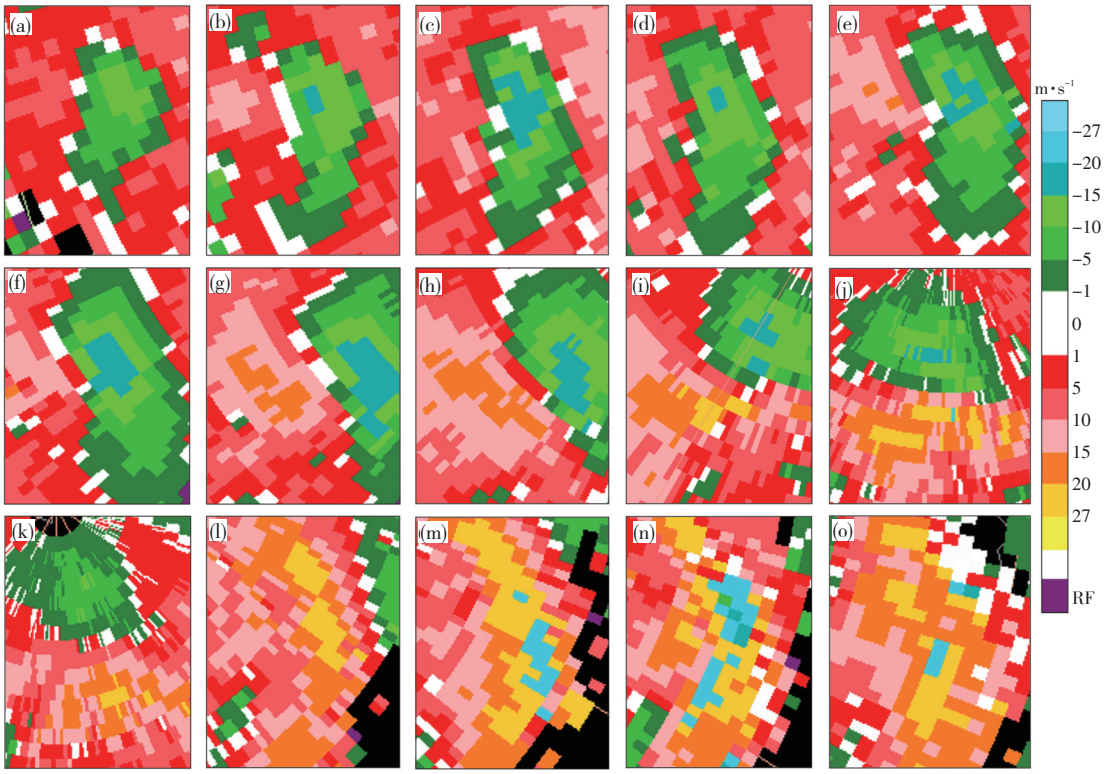


图4 2023年4月4日14:19 (a)、14:25 (b)、14:31 (c)、14:37 (d)、14:43 (e)、14:49 (f)、14:55 (g)、15:00 (h)、15:06 (i)、15:12 (j)、15:18 (k)、15:24 (l)、15:30 (m)、15:36 (n)、15:42 (o)衡阳雷达0.5°仰角径向速度

Fig.4 The radial velocities at 0.5° elevation from Hengyang radar station at (a)14:19 BT, (b) 14:25 BT, (c) 14:31 BT, (d) 14:37 BT, (e) 14:43 BT, (f) 14:49 BT, (g) 14:55 BT, (h) 15:00 BT, (i) 15:06 BT, (j) 15:12 BT, (k) 15:18 BT, (l) 15:24 BT, (m) 15:30 BT, (n) 15:36 BT, (o) 15:42 BT on 4 April 2023

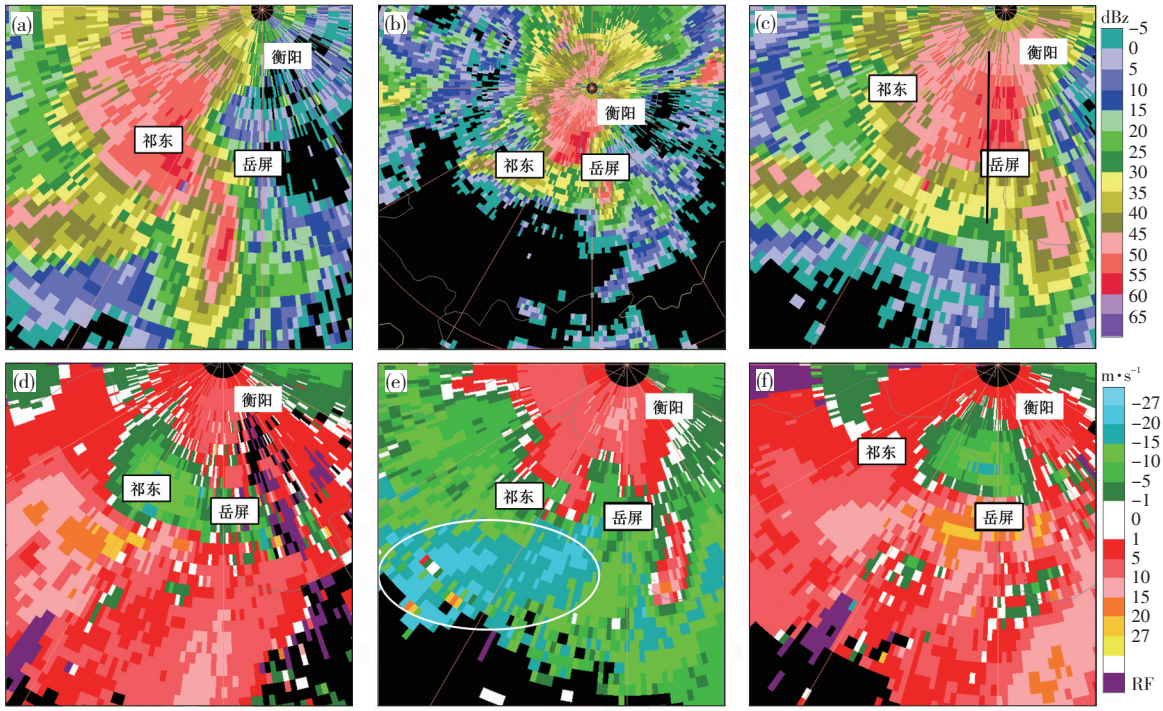


图5 2023年4月4日衡阳雷达15:06 0.5°仰角(a, d)、15:06 6.0°仰角(b, e)、15:12 0.5°仰角(c, f)基本反射率因子(a—c)和径向速度(d—f) (图5c黑线为图6垂直剖面沿线,图5e白色椭圆为后侧入流急流所在位置)

Fig.5 The (a–c) base reflectivity factors and (d–f) radial velocities from Hengyang radar station on (a, d) 0.5° elevation at 15:06 BT, (b, e) 6.0° elevation at 15:06 BT, (c, f) 0.5° elevation at 15:12 BT on 4 April 2023 (Black line in Fig.5c represents the location of the vertical profile of in Fig.6, and white ellipse marks the position of the rear-inflow jet in Fig.5e)

径向速度垂直剖面低层则表现出明显辐散(图6b)。一般来说,反射率因子越强,冰雹或大雨滴含水量越大,产生的重力拖曳作用越大,出现强下沉气流的可能性越大(王一童等,2022)。

综上可知,极端大风发生前,0.5°仰角强速度对纯辐散、RIJ、弓状回波均是强下沉气流的直观反应;极端大风发生区域与速度大值区对应较好、处于MCSs弓状回波的头部。

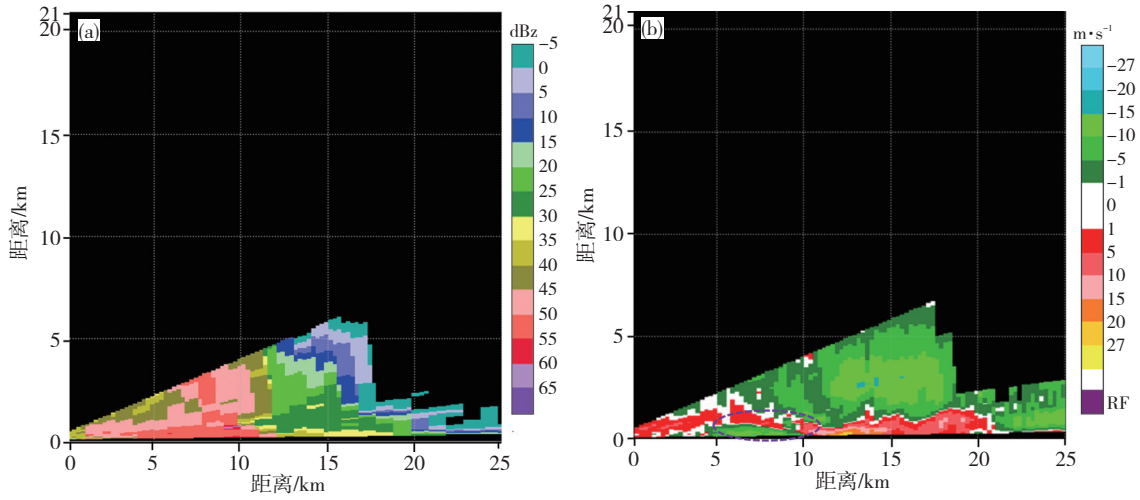


图6 2023年4月4日15:12衡阳雷达基本反射率因子(a)、径向速度(b)沿图5c黑线的垂直剖面

Fig.6 Vertical cross-section of (a) basic reflectivity factor and (b) radial velocity along the black line in Fig.5c from Hengyang Radar at 15:12 BT on 4 April 2023

3.4 双偏振参量特征

偏振雷达观测表明偏振参量对分类强对流预报预警有一定的指示性(刁秀广和郭飞燕,2021;陈龙等,2023;王冠等,2023),选取长沙雷达(距离出事地点185 km)对极端大风发生区域(图7紫色圆圈,高度为4.3 km)的双偏振参量做进一步分析。0.5°仰角岳屏镇所在区域强回波达到55~60 dBz (图7a圆圈),对应Z_{DR}值偏强,达到1~3 dB (图7b圆圈),对应K_{DP}达到0.5°·km^{-1}以上,部分地区高达1.7~2.4°·km^{-1} (图7c圆圈),说明为冰雹与数浓度高的液态水混合(潘佳文等,2020),

对应CC偏低小于0.85 (图7d)，即降水粒子均一性差。沿着下击暴流所在区域(图7黑色直线)做剖面分析可知，Z_{DR}柱(1 dB)、Z_{DR}槽分别对应上升气流、下沉气流区域(王秀明，2023)；4—6 km高度出现60 dBz强回波(图7e紫色圈)，对应Z_{DR}值为0.2~1 dB(图7f紫色圈)，可判断为水膜覆盖的冰雹且含水量大，随着高度的下降，冰雹进一步融化。强下击暴流发生地离长沙雷达相距较远，导致湿球零度层(WBZ)高度(3.8 km)以下回波未被探测到，但实况监测到岳屏镇镇金桥站15：07—15：08、15：08—15：09分钟雨量达0.8 mm、1.1 mm，说明在重力作用下强降水拖曳加剧了极端大风的产生。以上分析也说明冰雹融化、增发冷却形成的固液混合态粒子对下击暴流形成有重要作用(Kuster et al.，2016；Mahale et al.，2016；Kuster et al.，2021)。

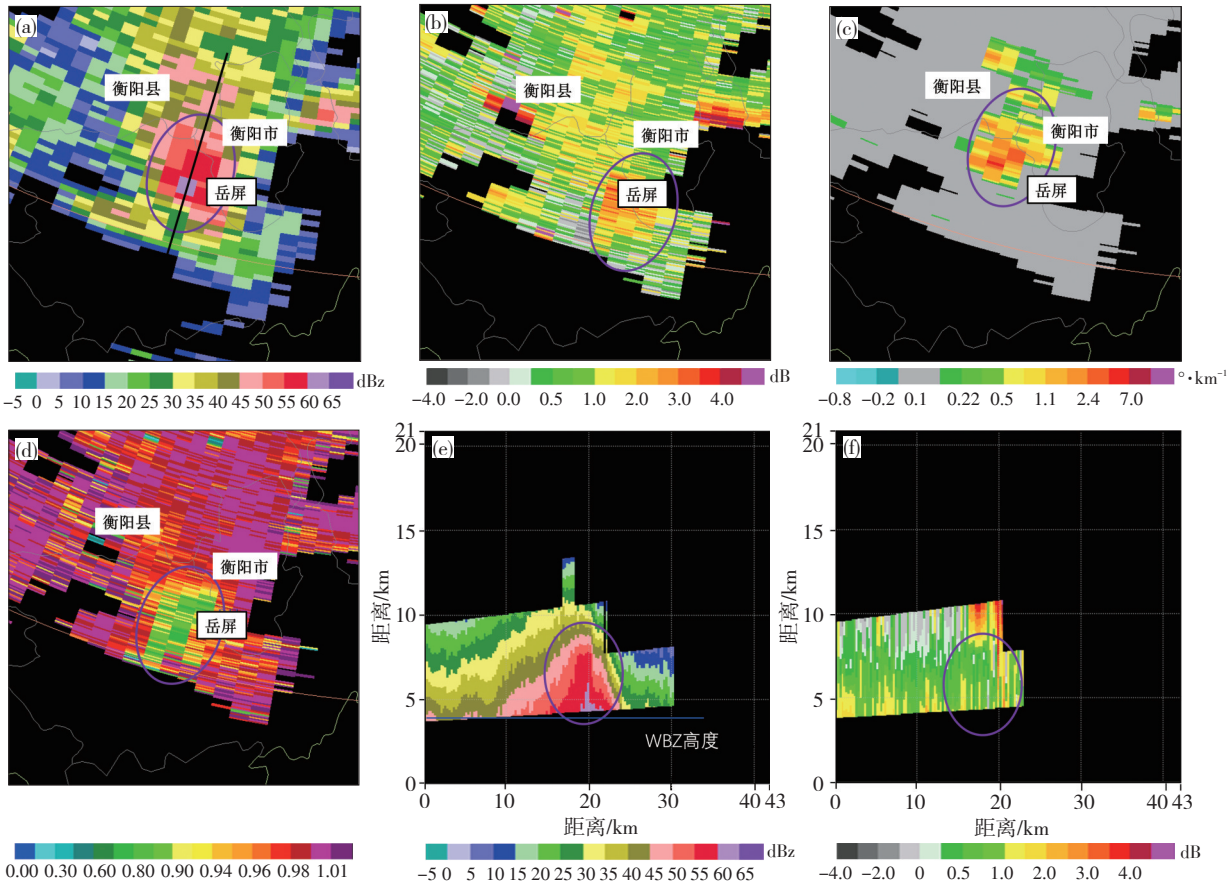


图7　2023年4月4日15：05长沙雷达0.5°仰角反射率因子Z_H(a)、差分反射率因子Z_{DR}(b)、差分相移率K_{DP}(c)、相关系数CC (d)以及反射率因子Z_H(e)、差分反射率因子Z_{DR} (f)沿图7a黑线的垂直剖面 (紫色圈为55~60 dBz强回波所在位置，图7a黑线为图7e、f剖面沿线，图7e蓝线为湿球零度层WBZ所在位置)

Fig.7 The (a) reflectivity factor (Z_H), (b) differential reflectivity (Z_{DR}), (c) specific differential phase (K_{DP}), (d) correlation coefficient (CC) at 0.5° elevation, and vertical cross-section of (e) reflectivity factor (Z_H) and (f) differential reflectivity (Z_{DR}) along the black line in Fig.7a from Changsha Radar at 15:05 BT on 4 April 2023. The purple circles indicate the location of strong echoes (55–60 dBz), and the black line in Fig.7a represents the positions of the profiles in Fig.7e and Fig.7f. The blue line denotes the location of the wet bulb zero-degree level (WBZ) in Fig.7e

4　环境条件

4.1　环流背景和探空曲线特征

2023年4月4日08:00(图8a) 500 hPa南支槽位于云南-贵州-四川，湖南受槽前西南气流影响；500 hPa、700 hPa、850 hPa急流伸至江西-安徽-浙江交界处，湘南处于急流轴上，925 hPa超低空急流伸至江西中部；850 hPa、925 hPa切变线在湘南重合；湘南处于850 hPa暖脊控制，且850 hPa和500 hPa温差大于25 ℃，可见“4.04”强下击暴流发生前，湘南的水汽条件、热力不稳定条件具有强对流天气发生的潜势，且低层切变线为其发生提供了动力抬升条件。分析地面图(图略)可知，08：00冷锋位于湘中区域，11：00—14：00南压75 km左右，移动速度缓慢，和冷锋相伴随有明显地面辐合线，可见冷空气扩散至湘南形成辐合线与强对流的触发密切相关。综上，“4.04”强下击暴流发生在高空槽前，西南暖湿气流活跃，地面冷锋提供了触发机制，为典型的斜压锋生类(许爱华等，2014)强对流天气。

从08：00天气系统(图8a)可见，700 hPa及以上均为较强西南风，根据探空资料分析需遵循的时空临近

原则，选取08∶00桂林站探空曲线(图8b)对环境条件(表略)进行分析。可见桂林站探空曲线呈现典型的上干下湿特征，对流层中层存在明显的干层，有利于干空气夹卷进入雷暴使雨滴迅速蒸发，从而导致下沉气流降温(王艳春等，2022；孙晓磊等，2023)；*K*指数、最优抬升、SI指数分别为40.6 ℃、-5.9 ℃、-5.59 ℃，具有明显的层结不稳定；850 hPa和500 hPa温差、700 hPa和500 hPa温差分别为26.6 ℃、15.1 ℃，表明对流发生前对流层中下层具有明显的条件不稳定(王艳春等，2022)；对流有效位能(CAPE)为300.7 J·kg^{-1}。从回波演变分析(图略)可知，“4.04”强下击暴流的对流系统最初生成于12∶00左右，生成地点为永州东安，温度为29.2 ℃、露点为19.7 ℃，对桂林站08∶00探空进行订正，订正后CAPE为972 J·kg^{-1}；0—1 km、0—3 km、0—6 km垂直风切变为14.5 m·s^{-1}、27.4 m·s^{-1}、28.8 m·s^{-1}，远超出了极端大风发生关键环境参数值(马淑萍等，2019)。Weisman (1993)研究表明风垂直切变越强，越有利于弓形回波后侧入流急流(RIJ)发展。上述对流参数、探空曲线特征的分析表明，此次过程达到雷暴发生的环境参数条件，尤其是强的垂直风切变有利于极端大风的发生。

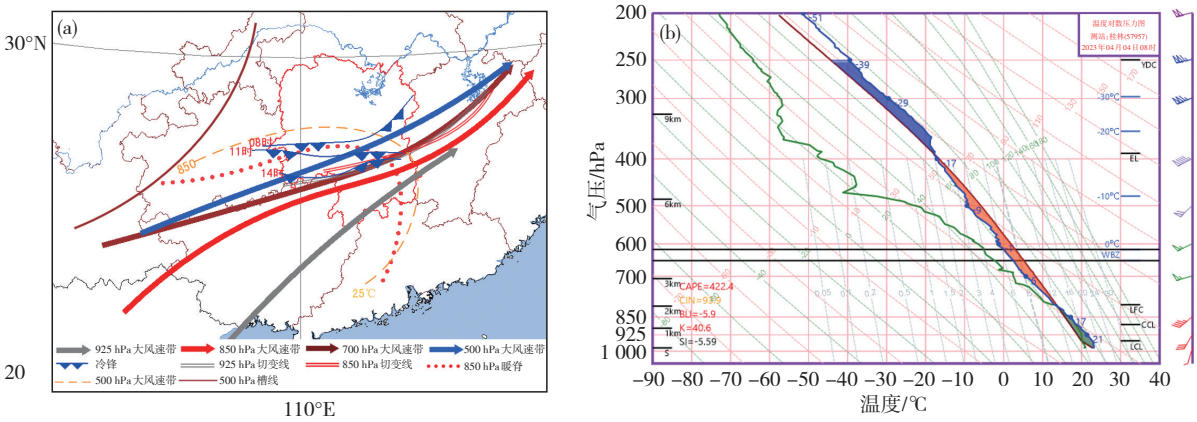


图8 2023年4月4日08∶00天气系统配置示意图(a)和桂林站探空曲线(b)

Fig.8 (a) Weather system analysis and (b) radiosonde profile from Guilin sounding station at 08∶00 BT on 4 April 2023

4.2 对流潜势

4.2.1 水汽及热力条件

由08∶00比湿分布(图9a)可见，湘南850 hPa比湿大于10 g·kg^{-1}，水汽通量散度大值区位于湘南偏西区域，表明存在水汽强辐合。随着4日上午时段西南风增强(图略)，水汽通量散度负值中心有所东移(图略)。从下击暴流发生区域(112°—113°E，26.3°—27.3°N，下同)比湿的高度-时间剖面(图9b)可见，3日夜间至4日白天中低层比湿均大于10 g·kg^{-1}，且存在明显的水汽通量散度负值中心(10^{-5} g·m·kg^{-1}·s^{-2})，时间维持至少

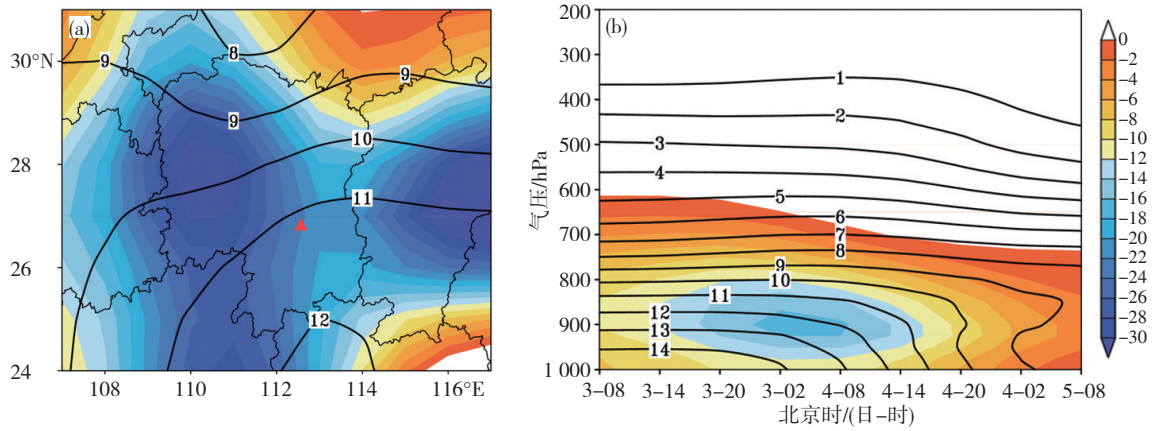


图9 2023年4月4日08∶00 850 hPa水汽通量散度(阴影，单位：10^{-6} g·m·kg^{-1}·s^{-2})和比湿(等值线，单位：g·kg^{-1})场(a，三角形为极端大风发生区域，下同)；3日08∶00—5日08∶00水汽通量散度(阴影，单位：10^{-6} g·m·kg^{-1}·s^{-2})和比湿(等值线，单位：g·kg^{-1})沿(112.6°E，26.8°N)经极端大风发生地的高度-时间剖面(b)

Fig.9 The (a) water vapor flux divergence (shaded, unit: 10^{-6} g·m·kg^{-1}·s^{-2}) and specific humidity (contour, unit: g·kg^{-1}) fields at 850 hPa at 08∶00 BT on April 4 (The triangle represents the area where extreme gale occurs, same hereinafter). The (b) height-time cross-section of water vapor flux divergence (shaded, unit: 10^{-6} g·m·kg^{-1}·s^{-2}) and specific humidity (contour, unit: g·kg^{-1}) through extreme gale position along (112.6°E, 26.8°N) from 08∶00 BT on April 3 to 08∶00 BT on April 5 in 2023

18 h，水汽通量散度负值中心位于800 hPa以下，且和比湿大值区相配合，表征了较好的水汽辐合条件，为“4.04”强下击暴流发生提供了水汽条件。湘南大部分*K*指数达36 ℃ (图略)，表明下击暴流发生前大气层结已具有一定热力不稳定条件。

4.2.2 *动力抬升及触发机制*

沿(112.6°E，26.8°N) 经强下击暴流中心作垂直速度和散度经向剖面(图10a)，分析可知，4日08∶00湘南地区(26°—28°N)存在一个较深厚的垂直运动区，伸展至600 hPa，强上升中心超过8.0×10^{-2} m·s^{-1}；有合适的散度场与之配合，辐合层位于600 hPa以下，400 hPa以上存在辐散中心。将下击暴流发生区域垂直速度和散度进行区域平均，对高度–时间剖面(图10b)进行分析可知，4日02∶00开始，中低层垂直速度由此前的负值转为正值、900 hPa以下为散度负值区，说明有利的动力抬升条件已开始出现；4日白天更表现出强上升运动(垂直速度中心值达8.0×10^{-2} m·s^{-1})，且低层辐合、高层辐散配置主要出现在该时段，说明有利的上升运动为“4.04”强下击暴流产生提供了可能，使得对流系统持续发展加强。

天气形势分析表明，冷空气对“4.04”强下击暴流有触发作用，下面对湘南区域(109°—114°E，25°—27°N)与湘北区域(109°—114°E，29°—31°N)的平均气温差值(以下简称南北温差)分布和演变以及锋生函数进行分析。南北温差的剖面显示4—5日冷空气南下影响湖南的过程(图11a)，温差随时间的变化主要位于800 hPa以下，说明冷空气相对浅薄，主要影响低层；4日14∶00有一正温差中心，表明此时南北温差加大，已有冷空气开始影响湖南北部；随后温差逐渐减小，意味着冷空气南下影响湘南。锋生函数也显示4日08∶00湖南、江西、福建一带为显著的锋生区(图11b)，表明上述

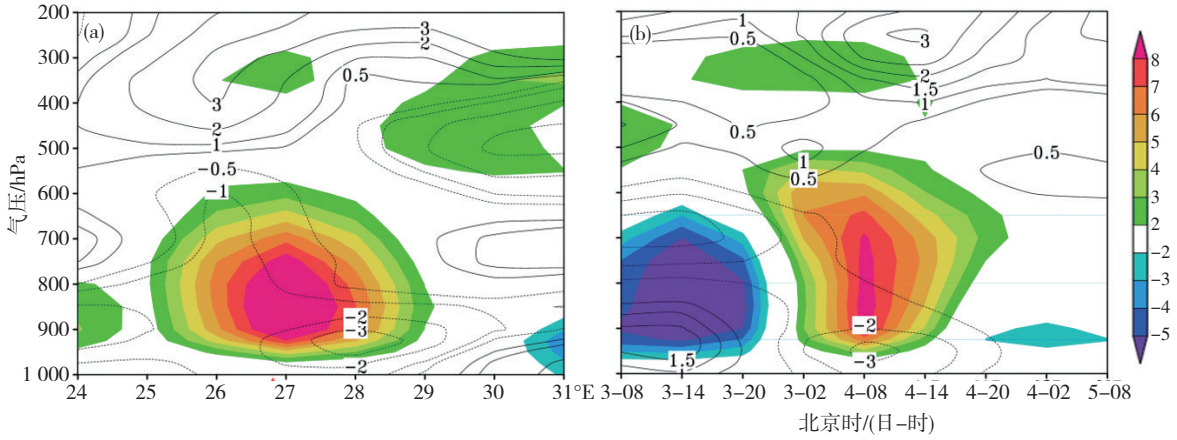


图10　2023年4月4日08∶00沿(112.6°E, 26.8°N)经极端大风发生地的垂直速度(阴影，单位:10^{-2} m·s^{-1})和散度(等值线，单位:10^{-5} s^{-1})经向垂直剖面(a)以及3日08∶00—5日08∶00区域(112°—113°E, 26.3—27.3°N)平均的垂直速度(阴影，单位:10^{-2} m·s^{-1})和散度(等值线，单位:10^{-5} s^{-1})高度–时间剖面图(b)

Fig.10 The (a) meridional cross–section of vertical velocity (shaded, unit: 10^{-2} m·s^{-1}) and divergence (contour, unit: 10^{-5} s^{-1}) at 08∶00 BT on April 4, and (b) height–time cross–section of average vertical velocity (shaded, unit: 10^{-2} m·s^{-1}) and divergence (contour, unit: 10^{-5} s^{-1}) of the region (112°–113°E, 26.3°–27.3°N) from 08∶00 BT on April 3 to 08∶00 BT on April 5 in 2023

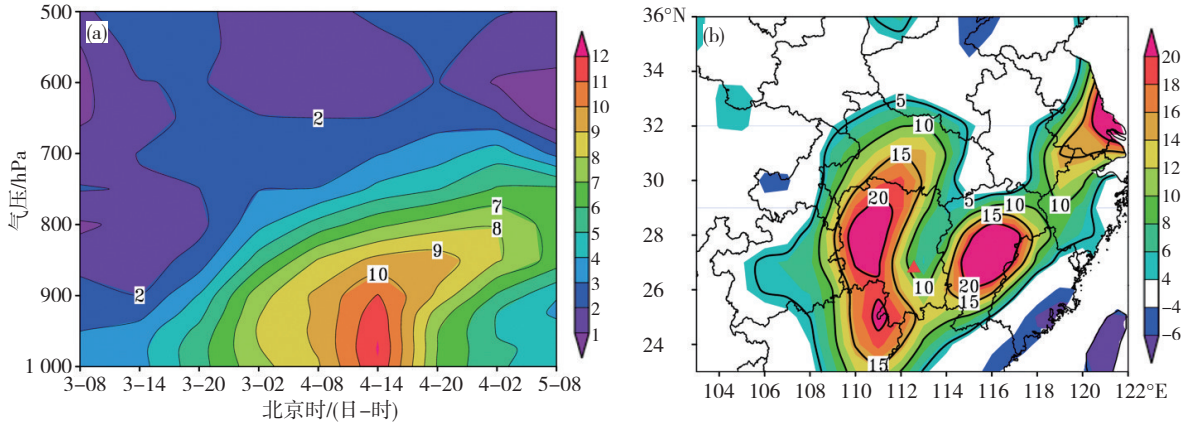


图11 2023年4月3日08∶00—5日08∶00南北温差(单位:℃)高度–时间剖面图(a)以及4日08∶00 850 hPa低层水平锋生函数(b，单位: 10^{-10} K·m^{-1}·s^{-1})的空间分布

Fig.11 The (a) height–time profile of average north–south temperature difference (unit: ℃) from 08∶00 BT on April 3 to 08∶00 BT on April 5, and (b) spatial distribution of the frontogenesis function at 850 hPa at 08∶00 BT on 4 April 2023 (unit: 10^{-10} K·m^{-1}·s^{-1})

地区存在冷暖空气交汇。因此南下的冷空气与西南暖湿气流汇合，在低层形成风场辐合，为强对流提供了有利初始扰动条件(冯文等，2023；齐道日娜等，2023)，随着午后CAPE增强，不稳定能量释放触发下击暴流。

5 结论与讨论

利用多普勒雷达资料、常规气象观测资料、NCEP 1°×1°再分析资料，对“4.04”强下击暴流预警关键点及环境条件进行了分析，得出主要结论如下：

(1) 衡阳雷达资料分析表明，MCSs东移北上、MCSs中弓状回波扫过衡阳，造成区域性下击暴流；极端大风发生在单体D0快速移动时期，dBzM达到60 dBz，VIL、HT快速下降；强反射率因子具有明显的倾斜结构，弓状回波、RIJ特征、径向速度模糊特征明显；低仰角“非对称速度大值区”和“速度对纯辐散”是极端大风预警关键点。

(2) 长沙雷达双偏振资料分析表明，强下击暴流区域强回波区域对应ZDR值偏强、KDP偏大，说明为冰雹与数浓度高的液态水混合，对应CC偏低说明降水粒子均一性差；ZDR柱(1 dB)、ZDR槽分别对应上升气流、下沉气流；60 dBz强回波对应为水膜覆盖的冰雹、且含水量大，随着冰雹融化，在重力作用下，强降水拖曳加剧了极端大风的产生。

(3)“4.04”强下击暴流发生在高空槽前，受深厚西南风控制，低空暖湿急流活跃，地面冷锋为强对流的产生提供了触发机制，为典型的斜压锋生类。探空曲线上干下湿特征明显，物理量及订正后的CAPE表现出明显的不稳定特征，垂直风切变非常强，极有利于下击暴流的发生。

(4) 环境物理量潜势特征明显，有较深厚的垂直上升运动，低层辐合、高层辐散与之相配合；强下击暴流发生在低层水汽通量辐合区和比湿大值区，同时具有一定的热力不稳定条件；南北温差、低层水平锋生函数分析表明南下冷空气与西南暖湿气流汇合，在低层形成风场辐合，触发了“4.04”强下击暴流发生。

间隔12 h的常规探空曲线不能代表下击暴流发生的环境，虽然利用下击暴流发生前的温度露点对08时桂林的探空曲线已进行了订正，但对下击暴流发生前对流潜势判断可能还不够准确。另外，不同于王秀明等(2023)、王一童等(2022)和其他学者统计的致灾性大风预警特征，本次极端大风过程中层径向辐合、高层辐散特征并不明显。

参考文献(References)：

毕旭,罗慧,刘勇.2007.陕西中部一次下击暴流的多普勒雷达回波特征[J].气象,31(3):70-73. Bi X, Luo H, Liu Y. 2007. Doppler radar echo features of a downburst in central part of Shaanxi province [J]. Meteorological monthly,31(3):70-73 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2007.01.011

陈龙,唐明晖,唐佳,等.2023.湘东北一次降雹超级单体过程的双偏振雷达回波特征[J].暴雨灾害,42(2):211-222. Chen L, Tang M H, Tang J, et al. 2023. Dual-polarization radar echo characteristics of a hail supercell event in northeastern Hunan [J]. Torrential Rain and Disasters, 42(2):211-222 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2021-235

齐道日娜,王秀明,俞小鼎,等.2023.河南“21.7”极端暴雨过程天气尺度系统发展维持机制分析[J].气象学报,81(1):1-18. Chyi D R N, Wang X M, Yu X D, et al. 2023. Analysis of the mechanisms for development and maintenance of synoptic-scale weather systems during the 19-21 July extreme heavy rainfall in Henan,China [J]. Acta Meteorologica Sinica,81(1):1-18 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2023.20220014

刁秀广,郭飞燕.2021. 2019年8月16日诸城超级单体风暴双偏振参量结构特征分析[J].气象学报,79(2):181-195. Diao X G, Guo F Y. 2021. Analysis of polarimetric signatures in the supercell thunderstorm occurred in Zhucheng on 16 August 2019 [J]. Acta Meteorologica Sinica,79(2):181-195 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2021.010

冯文,吴冰雪,杨薇.2023.海南岛秋汛期特大暴雨局地锋生的特征及其对对流系统发展的影响[J].大气科学学报,46(2):271-282. Feng W, Wu B X, Yang W. 2023. Characteristics of local frontogenesis and its impact on the development of convective system during the autumn flood season over Hainan Island [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 46(2):271-282 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20211207001

马淑萍,王秀明,俞小鼎.2019.极端雷暴大风的环境参量特征[J].应用气象学报,30(3):292-301. Ma S P, Wang X M, Yu X D. 2019. Characteristics of environmental parameters of extreme thunderstorms and gales [J]. Journal of Applied Meteorological Science,30(3):292-301 (in Chinese). doi:10.11898-73130304

潘佳文,魏鸣,郭丽君,等.2020.闽南地区大冰雹超级单体演变的双偏振特征分析[J].气象,46(12):1608-1620. Pan J W, Wei M, Guo L J, et al. 2020. Dual-polarization radar characteristic analysis of the evolution of heavy hail supercell in Southern Fujian [J]. Meteorological Monthly, 46(12):1608-1620 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2020.12.008

孙晓磊,王科,左涛,等.2023.引发“6.25”天津极端雷暴大风的超级单体与中尺度对流系统分析[J].暴雨灾害,42(3):312-323.Sun X L, Wang K, Zuo T, et al. 2023. Analysis of supercell and meso-scale convective system causing an extreme thunderstorm gale in Tianjin on 25 June 2020 [J]. Torrential Rain and Disasters,42(3):312-323 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022-093

王冠,郑石,侯畅,等.2023.一次东北冷涡天气过程双偏振雷达降水粒子相态识别[J].沙漠与绿洲气象,17(4): 45-52. Wang G, Zheng S, Hou C, et al. 2023. Hydrometeors classification by dual-polarization radar in a cold vortex process over Northeast China [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(4): 45-52 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2023.04.007

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, et al. 2023. A review of downburst genesis mechanism and warning [J]. Meteorolog-

ical monthly,49(2):129–145 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2022.100301

王艳春,尉英华,张楠,等. 2022. 2017年夏季天津一次下击暴流事件的成因初探[J].暴雨灾害,41(5):556–563. Wang Y C, Wei Y H, Zhang N, et al. 2022. Preliminary study on the causes of a downburst event in Tianjin in the summer of 2017 [J]. Torrential Rain and Disasters,41(5):556–563 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2021–112

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 D. 2022. Radar characteristics of straight–line damaging wind producing supercell storms [J]. Journal of Applied Meteorological Science,33(2):180–191 (in Chinese). doi:10.11898/1001–7313.20220205

吴芳芳,王慧,韦莹莹.2009.一次强雷暴阵风锋和下击暴流的多普勒雷达特征分析[J].气象,35(1):55–64. Wu F F, Wang H, Wei Y Y, et al. 2009. Analysis of a strong gust front and downburst with doppler weather radar data [J]. Meteorological monthly,35(1):55–64 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2009.1.007

许爱华,孙继松,许东蓓,等.2014.中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J].气象,40(4):400–411.Xu A H, Sun J S, Xu D B, et al. 2014. Basic synoptic situation classification and element character of severe convection in China [J]. Meteorological Monthly,40(4):400–411 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2014.04.002

俞小鼎,王秀明,李万莉,等.2020.雷暴和强对流临近预报[M].北京:气象出版社:67–99. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al. Thunderstorm and severe convection approaching forecast [M]. Beijing: China Meteorological Press: 67–99 (in Chinese)

俞小鼎,张爱民,郑媛媛,等.2006.一次系列下击暴流事件的多普勒雷达分析[J].应用气象学报,17(4):385–392. Yu X D, Zhang A M, Zheng Y Y, et al. 2006. Doppler radar analysis on a series of downburst events [J]. Journal of Applied Meteorological Science,17(4):385–392 (in Chinese). doi:10.11898/1001–7313.20060401

Fujita T T, Byers H R. 1977. Spearhead echo and downbursts in the crash of an airliner [J]. Monthly Weather Review,105:579–589. doi:10.1175/1520–0493(1977)1052.0.CO;2

Fujita T T. 1985. The downburst, microburst, and macroburst [R]. Satellite and Mesometeology Research Paper Number:210

Kuster C M, Bowers B R, Carlin J T, et al. 2021.Using K_{DP} cores as a downburst precursor signature [J]. Weather and Forecasting,36(4):1183–1198. doi:10.1175/WAF–D–21–0005.1

Kuster C M, Heinselman P L, Schuur T J. 2016. Rapid–update radar observations of downbursts occurring within an internse multicell thudnderstorm on 14 June 2011 [J]. Weather and Forecasting,31(3):827–851. doi:10.1175/WAF–D–15–0081.1

Mahale V N, Zhang G F, Xue M. 2016. Characterization of the 14 June 2011 Norman, Oklanhoma, downburst through dual–polari–zation radar obsevations and hydrometeor classification [J]. Journal of Applied Meteorology And Climatology,55(12):2635–2655. doi:10.1175/JAMC–D–16–0062.1

Robert R D, Wilson J W. 1989. A proposed microburst nowcasting procedure using Single–Doppler Radar [J]. Journal of Applied Meteorology,28(4):285–303. doi:10.1175/1520–0450(1989)028<0285:APMNPU>2.0.CO;2

Weisman M L. 1993. The genesis of severe, long–lived bow echoes [J]. Atomspheric Science,50(4):645–670. doi:10.1175/1520–0469(1993)0502.0.CO;2

（责任编辑　唐永兰）