

汤兴芝,俞小鼎,熊秋芬,等,2022. 鄂西南冬末一次罕见的强冰雹过程分析[J]. 气象,48(5):618-632. Tang X Z, Yu X D, Xiong Q F, et al, 2022. Analysis of a rare severe hailstorm event in Southwest Hubei at the end of winter[J]. Meteor Mon, 48(5):518-632(in Chinese).

鄂西南冬末一次罕见的强冰雹过程分析*

汤兴芝¹ 俞小鼎² 熊秋芬² 王秀明² 王文玉¹

¹ 中国气象局气象干部培训学院湖北分院, 武汉 430074

² 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081

提 要: 利用常规观测资料、多普勒天气雷达和风廓线雷达资料,对一次罕见的鄂西南冬季强冰雹(直径 1~3 cm)天气过程进行了分析,结果表明:强冰雹产生在上干冷、下暖湿,低空辐合、高空辐散的环流背景下,地面中尺度辐合和“喇叭口”的有利地形,给冷锋前暖区对流性天气提供了触发机制;地面冷锋南下伴随的垂直风切变增强有利于已经生成的对流风暴的维持和加强。强冰雹分别由孤立的超级单体和超级单体复合体(多单体结构中含有占支配地位的超级单体)产生。比较而言,孤立的超级单体发展更为高大,持续时间更长。风暴具有中气旋、高悬的强回波、低层入流、弱回波区与回波悬垂、中层径向辐合、风暴顶强辐散等超级单体风暴的典型特征;垂直累积液态含水量及其密度分别较长时间维持在 $35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上的冬季高值;新一代天气雷达冰雹探测算法输出的冰雹指数产品预测到高概率的强冰雹。此次过程出现在冬末,虽然对流出之后呈现出典型的风暴结构,可以提前 10~30 min 做出强冰雹的临近预警,但对于对流出之前的提前数小时的强冰雹短时潜势预报而言,常用做判断强降水潜势的探空特征(包括对流有效能、0~6 km 垂直风切变以及融化层高度)关键参数值非常不典型,会误导预报员忽视冰雹潜势的判断,预报员在这种环境背景下进行强对流天气潜势分析时,需要格外慎重和深入分析,才能得到正确预报结果。

关键词: 强冰雹,中尺度辐合,强逆温,超级单体,垂直风切变,冬末

中图分类号: P458, P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.110801

Analysis of a Rare Severe Hailstorm Event in Southwest Hubei at the End of Winter

TANG Xingzhi¹ YU Xiaoding² XIONG Qiufen² WANG Xiuming² WANG Wenyu¹

¹ Hubei Branch of China Meteorological Administration Training Centre, Wuhan 430074

² China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on conventional observation data, Doppler weather radar data and wind profile radar data, a rare severe hailstorm event (1—3 cm in diameter) in Southwest Hubei at the end of winter is analyzed in detail. The results show that the severe hailstorm was produced under the circulation background of upper cold-dry and lower warm-wet and low-altitude convergence and high-altitude divergence. Convective weather was triggered by mesoscale convergence on the ground with favourable terrain at the trumpet and intensified by cold front. Strong vertical wind shear in the lower level was favorable for the formed convective strong storm to maintain and strengthen. The severe hails were produced by isolated supercells and dominant supercells in multicells. In comparison, the isolated supercells were larger and persisted longer. The structures of the supercells reflected typical features such as mesocyclone, high mass center, low-level

* 国家自然科学基金项目(41775044,41875058)共同资助

2021 年 3 月 10 日收稿; 2022 年 1 月 8 日收修定稿

第一作者:汤兴芝,主要从事强对流天气短时临近预报教学与研究. E-mail:382701455@qq.com

通讯作者:俞小鼎,主要从事多普勒天气雷达应用和雷暴与强对流天气短时临近预报技术研究. E-mail:xdyu1962@126.com

inflow, weak echo zone and echo drape, middle-level radial convergence and storm-top divergence, etc. The vertically integrated liquid (VIL) and the VIL density maintained high above $35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ and $4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ for a long time in the winter. The hail index of radar algorithm predicts the severe hail with high probability. This process occurred at the end of winter. The typical storm structure showed up after the emergence of convection, and the early warning of hail could be made 10–30 minutes in advance. However, for the short-time potential forecast of severe hail several hours in advance before the occurrence of severe convection, the key parameters (such as CAPE, 0–6 km vertical wind shear and melting layer height) for judging the potential of severe hail are not typical, which will mislead forecasters to ignore the hail potential judgment. Forecasters need to be extremely cautious and do in-depth analysis when conducting potential analysis of severe convective weather in this environmental background, so as to obtain correct forecast results.

Key words: severe hailstorm, mesoscale convergence, intense inversion layer, supercell, vertical wind shear, the end of winter

引言

冰雹是由发展迅速的中小尺度天气系统造成的一种对流性灾害天气,具有来势迅猛、灾害重、破坏力强等特点,因此成为气象灾害防御的重点,同时也是气象预报预警的难点。针对冰雹的成因分析和临近预报,国内外学者进行了大量深入研究,取得了一系列成果。Greene and Clark(1972)提出利用数字雷达回波资料计算的垂直累积液态含水量(VIL)作为预报因子,建立了VIL与强冰雹可能性之间的关系。Witt and Nelson(1984)探讨了10 km高度上径向辐散气流速度差及高径向切变区与降雹之间的关系。Amburn and Wolf(1997)研究VIL密度与冰雹的关系,得到VIL密度值越大,就越可能包含雹核,当VIL密度值达到一定阈值时会产生强风暴,且VIL密度与冰雹大小之间存在一定的关系。在国内,马晓玲等(2020)、黄晓龙和高丽(2016)、徐芬等(2016)、张小娟等(2019)针对冰雹的时空分布特征、中尺度特征及云系发展演变等开展了研究。陈双等(2011)、王华和孙继松(2008)认为,山区的喇叭口地形和迎风坡抬升作用对局地强对流的发生、入境积云的发展有重要影响;黄荣等(2012)研究表明上游冷池出流边界(阵风锋)伴有的强温度梯度和边界层辐合上升运动是原有局地新生雷暴显著增强的主要原因。周小刚等(2015)探讨了多普勒雷达探测冰雹的算法及业务应用。张秉祥等(2014)发展了基于多个雷暴参数的模糊逻辑冰雹预警方法,张文海和李磊(2019)提出了人工智能冰雹识别及临近预报

方法。俞小鼎等(2020;2012;2006)针对冰雹的基于环境背景参数短时潜势预报和基于多普勒天气雷达的临近预警,总结了强冰雹产生的环境背景和雷达回波特征。

国内学者利用新一代天气雷达资料、风廓线雷达资料针对冰雹的雷达回波特征和相关参数应用开展了广泛研究,范皓等(2019)利用多种观测资料,从强对流单体出现的天气背景、降雹特征、雷达回波演变、大冰雹的形成机制及动力结构等方面对太行山东麓的一次强对流单体降雹天气过程进行了分析。潘佳文等(2020)利用双偏振雷达资料结合双雷达风场反演技术和粒子相态识别算法剖析了大冰雹超级单体的动力结构云物理机制及其演变。杨吉等(2020)利用南京双线偏振雷达观测资料,统计分析了2019年3月20日冰雹过程发展、成熟和降雹阶段的观测特征及微物理过程,探究冰雹和三体散射的双线偏振雷达观测特征;黄海迅等(2021)对X波段双线偏振雷达数据做退折叠、滤波、自适应衰减订正后,系统分析了威宁县的两次典型雹暴过程,探究了贵州省威宁地区雹暴过程中雹胚粒子的演变特征。同时其他学者也取得了不少新成果(李聪等,2017;林文等,2020;王莎等,2019;覃靖等,2017;王秀明等,2009;胡鹏等,2019)。

虽然很多学者对冰雹的形成机理和雷达回波特征进行了大量研究,但主要集中在春夏秋三季的降雹过程,冬季冰雹出现情况稀少,对冬季强冰雹的研究就更为少见。鄂西南是湖北省冰雹天气的高发区,其地形复杂,这种局地性的强冰雹预报难度很大。为了提高冰雹灾害性天气预警服务水平,罗菊

英和谭江红(2019)、李德俊等(2010;2011)、单兴佑等(2010)对冰雹天气的多普勒天气雷达回波特征及临近预警进行了初步研究,但由于没有细分预警指标,其业务应用存在局限。

2020年2月14日鄂西南发生了一次罕见的局地强冰雹天气过程,利用高空、地面常规观测资料、风廓线雷达资料、多普勒天气雷达资料对其进行了详细分析,以期对鄂西南地区建立本地临近预警指标积累样本并提供参考,也为鄂西南尽早识别强冰雹潜势、提前预警并及时开展防雹工作提供一定的科学依据。

1 资料与方法

本文应用2020年2月14日08—18时(北京时,下同)高空、地面常规观测资料、5 min区域站观测资料、秭归固定式L波段边界层风廓线雷达资料,经MICAPS4.0自带的探空资料分析显示系统进行 $T-\ln p$ 图订正后,重点分析了此次对流过程发生发展的环境背景和触发原因,利用宜昌多普勒天气雷达13—18时逐6 min体扫资料详细分析了雷达回波随时间的演变特征。

2 过程概况

2020年2月14日下午到晚上,鄂西南自西南向东北出现了雷雨大风、冰雹、短时强降水天气,其中建始、巴东、秭归出现了直径为1~3 cm的冰雹和 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风(图1)。本次冰雹灾害共造成建始、巴东、秭归3个县(市)23个乡镇3.5万人受灾,农作物受灾面积达 2311 hm^2 ,成灾面积达 1088 hm^2 ,绝收面积达 197 hm^2 ;因灾直接经济损失约为1907万元(含当晚因雪致灾损失)。

3 对流发生发展的环境背景分析

3.1 环流形势及主要影响系统

2月14日08时环流形势(图2),500 hPa为一槽一脊型,在闽中—宜宾一线有小槽,鄂西南处于槽前西南气流中,介于两个温度槽之间,安康到济南一线存在西南急流,鄂西南位于急流轴入口右侧的显著分流区。850 hPa低涡切变线位于鄂西南西部与

重庆交界,鄂西南位于西北、东北和偏南三支不同气流的辐合区,百色至武汉一带存在 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的低空急流,鄂西南位于温度脊前,暖平流强,湿度大,比湿为 $7 \sim 8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。700 hPa鄂西南北部有冷空气入侵,12 h降温达 6°C ,其西南贵州中部有个暖中心,鄂西南位于冷暖交汇区。200 hPa鄂西南位于高空急流核上游的辐散区,风速达 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。整个高低空形势配置为低层暖湿、高层干冷,低层辐合、高空辐散,环境背景中存在明显的垂直上升运动,该垂直上升运动结合低层暖湿条件有利于对流层中低层条件不稳定层结的产生,形成一定大小的对流有效位能(CAPE),并且有利于对流抑制能量(CIN)的减小,从而有利于对流天气的形成。海平面气压场上东北—西南走向的地面冷锋位于廊坊—太原—商洛一线并向南移动,鄂西南处于锋前的暖低压带中,风力较小,湿度大,有轻雾,边界层静力稳定,14日上午冰雹发生地以少云天气为主,受太阳辐射影响,鄂西南14时最高温度达到 18°C ,6 h升温接近 10°C ,地面的快速升温增加了对流层中低层的条件不稳定,从而使得CAPE增加,CIN减小,大大增加了深厚湿对流发生的概率。14时锋面移至开封—南阳—安康一线。

3.2 热力条件和对流不稳定能量

由2月14日08时恩施探空曲线(图3)可见,左侧棕色曲线表示从地面起始绝热气块的状态曲线,其CAPE为零;将气块起始高度订正至最不稳定层755 hPa后,得到最不稳定对流有效位能(MUCAPE)为 $437 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图3中蓝色网格),集中在高空550~280 hPa; CIN较小,只有 $0.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

图3中的温度和露点温度曲线呈“喇叭口”形状,670 hPa以下湿度大, $T-T_d < 3^\circ\text{C}$;670 hPa以上 $T-T_d$ 迅速增大,湿度迅速减小;850~500 hPa温度直减率大,温差达 26.6°C 。这种“上干冷、下暖湿”的层结有利于冰雹、雷暴大风的发生(俞小鼎等,2020)。温度曲线还显示在937~920 hPa及663~647 hPa高度上存在两处逆温,且663~647 hPa逆温强,温差达 6.2°C ,强逆温的存在一方面阻止了上下层水汽和能量的交换,有利于低层积累不稳定能量;另一方面抑制了下方对流向上发展,使对流局限在大气低层,不易形成深对流。但当上升气流足够强,或强逆温层被削弱,具有一定上升速度的气块就能穿透逆温层,使高低层的不稳定能量结合,加速深

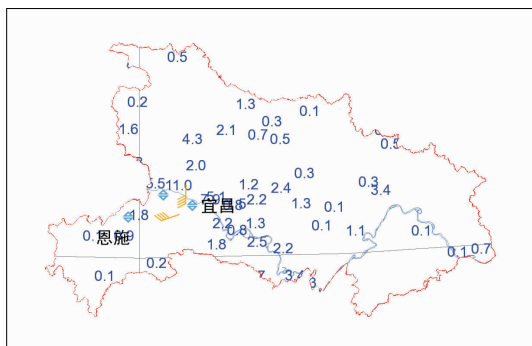


图1 2020年2月14日14—20时湖北省6 h降水量(≥0.1 mm, 数字)、冰雹落区(◇)和大风分布

Fig. 1 Distribution of the 6 h rainfall (≥0.1 mm, number), hail area (◇) and strong wind in Hubei Province from 14:00 BT to 20:00 BT 14 February 2020

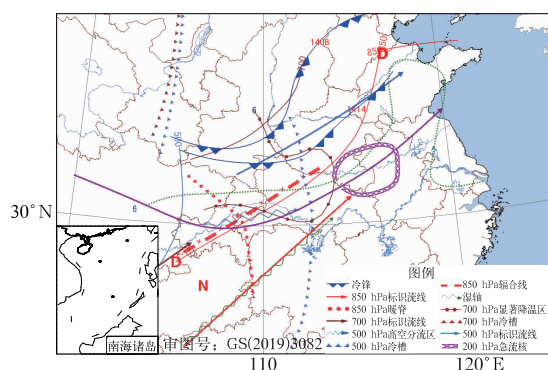


图2 2020年2月14日08时环境场条件中尺度分析及14时冷锋

Fig. 2 The mesoscale analysis at 08:00 BT and cold front at 14:00 BT 14 February 2020

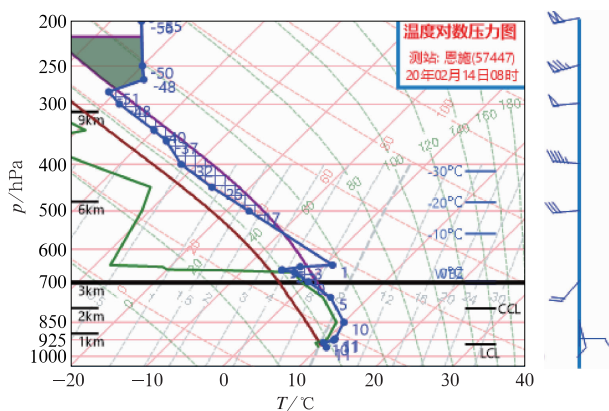


图3 2020年2月14日08时恩施站 T - $\ln p$ 图(蓝线:温度, 绿线:露点温度)

Fig. 3 T - $\ln p$ of Enshi Station at 08:00 BT 14 February 2020

(blue line: temperature, green line: dew-point temperature)

对流的发展。秭归站固定式 L 波段边界层风廓线雷达探测到的风场变化特征可以较好地解释逆温层被削弱的过程。图 4 显示, 14 日 10 时之前, 在 3 km 高度上以西南风为主, 最大风速为 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 10 时风速增加到 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 达到急流标准, 其高度与强逆温层所在高度基本一致; 此后, 急流进一步加强, 13 时风暴生成时, 风速增加到 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。与此同时, 急流向上向下扩展, 厚度增厚, 从西南输送过来的暖湿空气使鄂西南上空长时间增温, 逐步削弱了强逆温层结状态, 为深对流的形成减轻了障碍。另外订正后的自由对流高度(LFC)较低, 距地高度约为 2.6 km, 低层气块较易抬升到这个高度产生强的上升速度从而形成深对流。

2 月 14 日 08 时(表 1)鄂西南上空湿球 0°C 层高度(WBZ)为 3.0 km, -20°C 层高度为 6.0 km, 属于有利于产生强冰雹的高度。衡量大气层结稳定度的重要判别指标 K 指数为 34°C , $0\sim 6 \text{ km}$ 垂直风切变($\text{WSR}_{0\sim 6 \text{ km}}$)为 $12.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, SI 为 -1.3°C , 显示出有深厚对流发展的潜势。

根据垂直上升速度(W_{\max})与 CAPE 之间的关系(Markowski and Richardson, 2010), 即 $W_{\max} = (2\text{CAPE})^{0.5}$, 可计算出上升速度为 $29.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。大多数无组织风暴上升气流的垂直速度通常是 W_{\max} 的 1/2, 而对于结构完整的风暴其上升气流核的垂直速度接近于 W_{\max} , 根据这一关系估算, 风暴一旦形成, 其最大可能上升速度在 $14.8\sim 29.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 根据冰雹增长理论中上升速度与冰雹直径之间的关系: 风暴内上升气流与冰雹下落末速度需要大致相当, 对于直径为 $1\sim 2 \text{ cm}$ 的冰雹, 至少需要 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的强上升气流使得冰雹粒子在空中停留

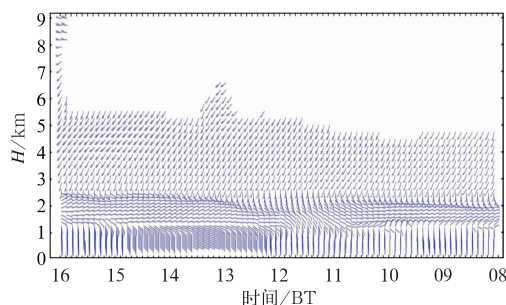


图4 2020年2月14日08—16时秭归站的6 min垂直风廓线

Fig. 4 The vertical profile of wind every 6 min of Zigui Station from 08:00 BT to 16:00 BT 14 February 2020

表 1 2020 年 2 月 14 日 08 时恩施站主要探空参数

Table 1 The main sounding parameters of Enshi Station at 08:00 BT 14 February 2020

$T_{850}-T_{500}$ /℃	T_d /℃	T_{d850} /℃	K 指数 /℃	SI /℃	MUCAPE /(J·kg ⁻¹)	CIN /(J·kg ⁻¹)	WSR _{0~6 km} /(m·s ⁻¹)	$H_{0℃}$ /km	$H_{-20℃}$ /km	WBZ /km
26.6	9.9	8.8	34	-1.3	437	0.7	12.4	3.0	6.0	3.0

足够长时间(俞小鼎等,2020)。这与当天实际产生了直径为 1~3 cm 的冰雹实况基本一致。

3.3 触发条件

鄂西南属于云贵高原的延伸部分,海拔高差悬殊,沟壑纵横,地形地貌总体呈倒 V 形喇叭状。受太阳辐射影响,白天山区盛行谷风。地面加密观测资料显示,2 月 14 日 12 时,在万州北—建始东部一线的山脊上形成了和山脉走向近乎垂直的地面辐合线(图 5 中红色虚线)。当从西南方向输送过来的暖湿空气进入山谷之后,其因地形收缩在谷底不断堆积,而喇叭口地形进一步加强了低层气流辐合,在地面中尺度辐合和地形对上山气流的强迫抬升作用下,触发了本次强对流天气。13 时,宜昌多普勒天气雷达观测到有弱回波在地面辐合线两侧生成(图略),随着雷暴的移动,雷暴所到之处出现温度骤降、气压涌升、风向突变(图 6),雷暴高压在地面形成冷

池和阵风锋。图 7 显示,14 日 15 时雷暴高压造成的 10 min 最大降温为 2℃;17 时,雷暴高压造成的 10 min 最大降温达 3.5℃,比第一次降温更强,这可能与 17 时雷暴正处于强盛期但 15 时雷暴已处于衰减期有关;阵风锋位于冷池一侧,紧贴主体回波移动。分析还发现,此次冰雹源地有两个(图 5),分别位于鄂西的恩施和重庆的万州,在风暴向前运动过程中,源于恩施的风暴沿着山脉向东北方向移动(图 5 中绿线),源于万州的风暴则沿着长江向东移动(图 5 中黄线)。这与李永振等(2005)得到的“冰雹发生后移动路径常沿山脉和河谷移动”结论一致。

3.4 垂直风切变

垂直风切变的大小与雷暴的强弱密切相关,在一定的热力不稳定条件下,垂直风切变的增强将导致对流风暴进一步加强和发展。考虑到 1 km 以下受边界层摩擦影响,在此重点分析 1 km 以上的垂直风切变变化特征。图 4 显示,2 月 14 日 08 时 1 km 高度上为 4 m·s⁻¹ 的偏东风,3.5 km 高度上为 6 m·s⁻¹ 的偏南风,风矢差为 8.7 m·s⁻¹;此后,垂直风切变逐步增强,10 时,1 km 和 3.5 km 高度上分别为 6 m·s⁻¹ 的偏东风和 12 m·s⁻¹ 的西南风,风矢差增大到 15.9 m·s⁻¹;12 时,1 km 和 3.5 km 高度风矢差继续增加到 16.4 m·s⁻¹;同时,低层的风向切变由缓慢顺转变为快速顺转,风向切变角度增大,垂直风切变随着风暴临近持续增强。14 时在 2.5 km 的垂直距离上,风矢差达到 21.4 m·s⁻¹,形成很大的中低层垂直风切变,达到强垂直风切变级别,极有利于超级单体风暴的形成(俞小鼎等,2012;2020)。

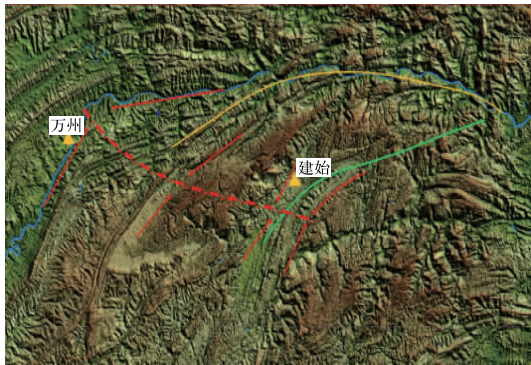


图 5 2020 年 2 月 14 日 12 时地面辐合线、
风雹移动路径及地形
(红色虚线:地面辐合线,红色箭头:风向,
绿线:风雹沿山脉抬升移动路径,
黄线:风雹沿长江河谷移动路径)

Fig. 5 Surface convergence line, moving path
of hailstorm and terrain separately
at 12:00 BT 14 February 2020
(red dotted line: surface convergence line,
red arrow: wind direction, green line: path
of the hailstorm moving along the mountains,
yellow line: path of the hailstorm moving
along the Yangtze River Valley)

4 风暴的雷达回波特征分析

4.1 雷达回波的演变过程

此次强冰雹过程由两个风暴先后影响形成。第一次降雹过程回波演变情况具体为:2 月 14 日 13 时,宜昌雷达探测到恩施境内有大量零散回波生成,

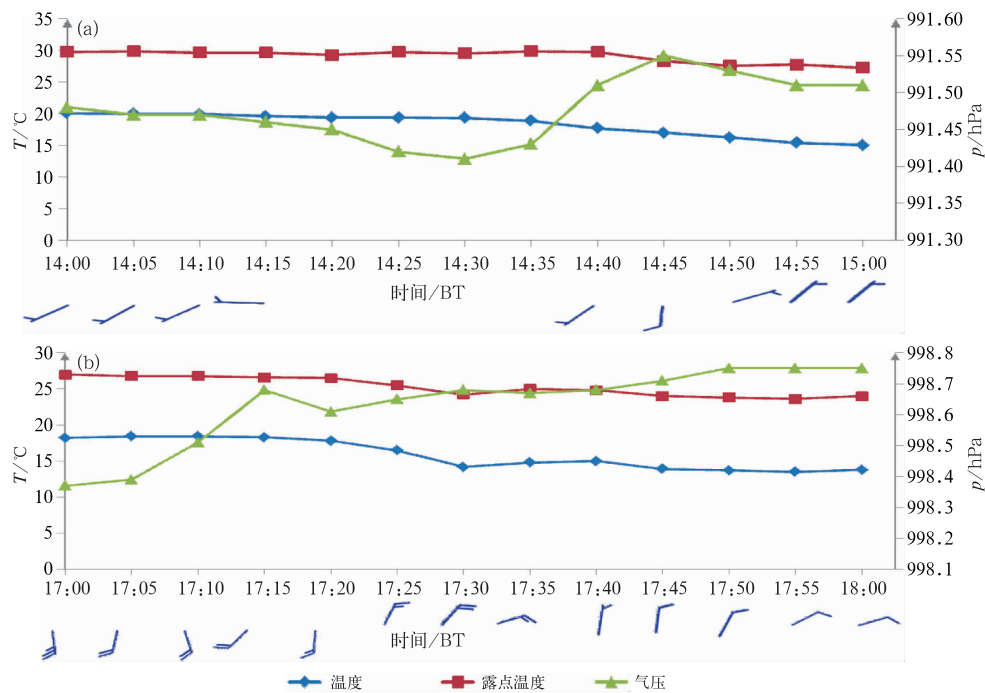


图 6 2020 年 2 月 14 日雷暴移经测站前后气温、露点温度、本站气压和风随时间的变化
(a)14—15 时的沪渝高速 K1313 站,(b)17—18 时的秭归吴家沟站
Fig. 6 Variation characteristics of temperature, dew-point temperature, pressure, and wind before and after the thunderstorm moving across the stations on 14 February 2020
(a) Shanghai-Chongqing Expressway K1313 Station from 14:00 BT to 15:00 BT,
(b) Wujiagou Station in Zigui from 17:00 BT to 18:00 BT

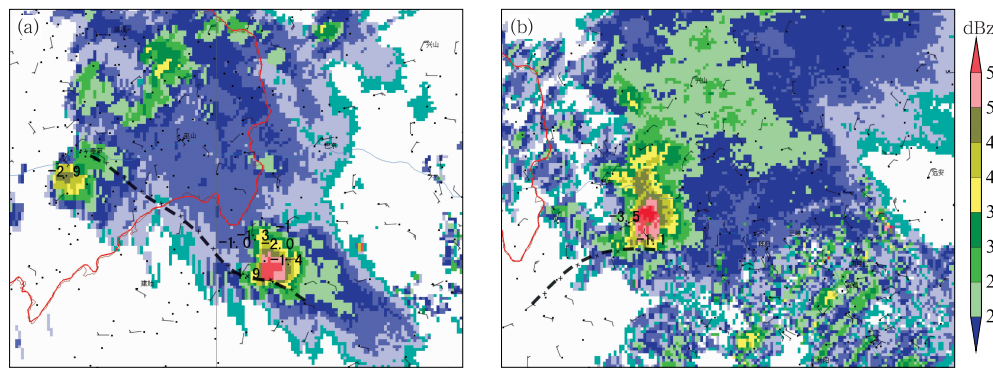


图 7 2020 年 2 月 14 日宜昌站 15 时(a)与 17 时(b)正点前后 10 min 降温(数字,单位: °C)、
雷达回波(填色)及阵风锋(虚线)
Fig. 7 The 10 min temperature drop (number, unit: °C), radar echo (colored) and gust front (dashed line) at Yichang Station before and after 15:00 BT (a) and 17:00 BT (b) 14 February 2020

在向东偏北方向移动过程中合并加强;14 时(图略),回波 A(图 8a)因受喇叭口地形收窄辐合和持续上山地形强迫抬升影响出现爆发式增长,在 4 个体扫时间内最大回波强度从 40 dBz 增加到 58 dBz,14:48 达到最大值(62 dBz),随后 56 dBz 以上强度

维持到 15:30。期间,在 A 单体右后侧的阵风锋上(虽然因山体遮挡未能在 0.5°仰角雷达回波上观测到阵风锋,但从地面加密站风场资料和雷达组合反射率回波叠加可分析出阵风锋,如图 7a)不断生成弱小回波并入 A 单体,维持 A 单体的发展,后随着回

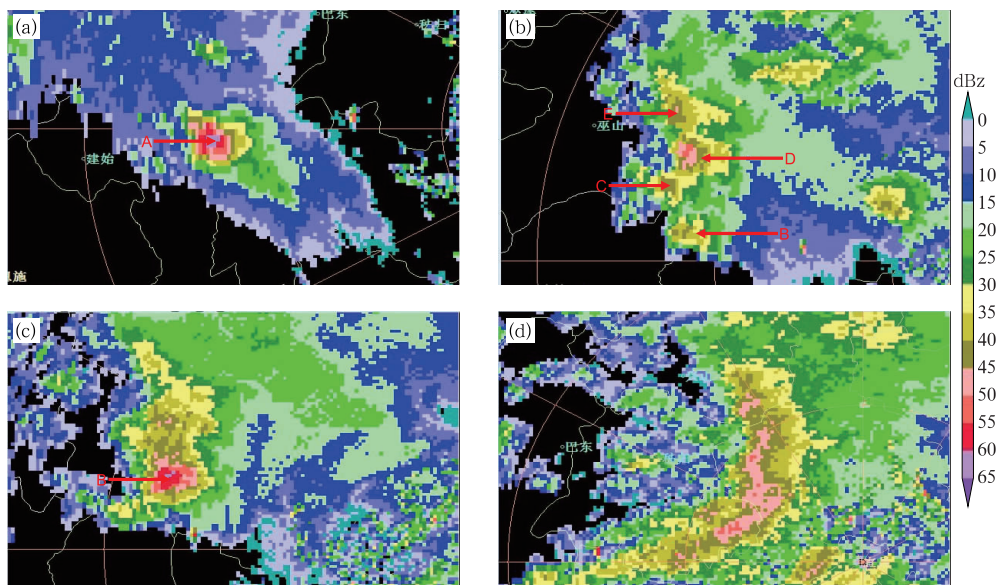


图 8 2020 年 2 月 14 日不同时刻宜昌雷达组合反射率

(a) 14:48, (b) 16:18, (c) 16:48, (d) 17:42

(A~E: 单体)

Fig. 8 Composite reflectivity products of Yichang Radar on 14 February 2020

(a) 14:48 BT, (b) 16:18 BT, (c) 16:48 BT, (d) 17:42 BT

(A-E: cells)

波下山, 回波强度有所减弱, 但强度保持在 50 dBz 以上, 直到 16:06, 反射率因子最大值降低到 45 dBz 以下。第二次降雹过程回波演变情况具体为: 在第一次风暴演变期间, 重庆境内也有大量零星回波生成, 受快速南压的地面冷锋影响, 回波逐渐合并加强, 16:18 进入湖北境内影响鄂西南地区。此时对流回波由呈南北向排列的 B、C、D、E 四块回波构成 (图 8b), 其中, E 单体正由成熟转向消亡阶段, D 单体发展最为旺盛, 最大反射率因子为 51 dBz, B、C 均处于发展阶段。此后, C、D 两块回波先后成熟并逐渐减弱消散, 残余部分并入 B 单体。在此期间, 由于降水拖曳下沉气流在地面形成冷池, 在冷池右后侧的偏北风和周围环境偏东南暖湿气流共同作用下, 阵风锋出现在 B 单体右前方, 与 B 单体同步向东移动, 在阵风锋上生成发展的新单体不断并入 B 单体; 同时, 地面冷锋到达鄂西南和重庆北部一线, 在阵风锋和冷锋的共同影响下, 造成 B 单体迅速发展, 一家独大。16:48, B 单体发展成熟, 最大反射率因子达到 64 dBz, 在前侧偏东气流的作用下, 回波形态开始出现“弓”状特征 (图 8c)。随着后侧冷空气的影响, 减弱后的 B 单体与从东南方向移来的回波组合, “弓”形回波得以形成, 并持续到 17:42 (图 8d), 期间造成地面出现了 7 级强阵风。由以上分析

发现, 阵风锋为新生单体的生成提供了合适的环境, 同时阻断了北侧 C、D、E 等几个老单体的暖湿气流供应, 导致 C、D、E 单体的减弱和消散, 多单体呈现出此消彼长、有序更替的特征。

4.2 风暴成熟时期的垂直结构特征分析

图 9 和图 10 分别为 A、B 风暴成熟时 (14:48, A 风暴; 16:48, B 风暴) 的不同仰角反射率因子。在 1.5° 仰角上, 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 4.3° 仰角, 箭头前侧是超过 45 dBz 的强回波中心, 这样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。图 11 为对应时刻反射率因子垂直剖面, 剖面显示风暴从低往高向低层入流一侧倾斜, 回波强度大, 超过 60 dBz; 强回波高度高, 55 dBz 回波高度在 6 km (-20°C 等温线高度) 以上, 剖面左侧的强回波区对应强冰雹的下降通道, 右边是弱回波区和位于弱回波区之上的回波悬垂, 对比两个风暴, 强度基本一致, 但 A 风暴强回波高度更高, 水平尺度更宽, 持续时间更长。

图 11 还给出了反射率因子垂直剖面与探空 -20°C 、 -30°C 与湿球 0°C 三者高度之间的关系, 14:48, 剖面显示 50 dBz 以上的强回波位置高达

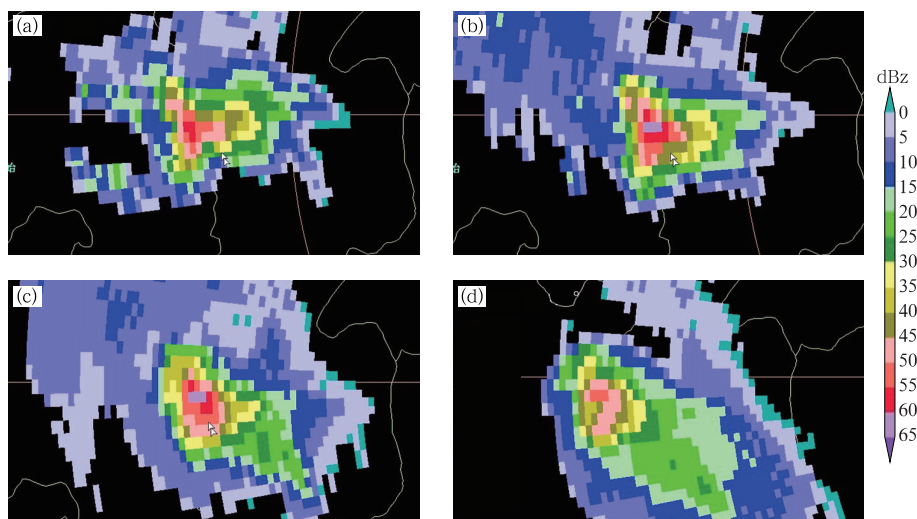


图 9 2020 年 2 月 14 日 14:48 A 风暴宜昌雷达不同仰角反射率因子
(a)1.5°, (b)2.4°, (c)3.4°, (d)4.3°

Fig. 9 A storm reflectivity factor of Yichang Radar at different elevation angles
at 14:48 BT 14 February 2020
(a) 1.5°, (b) 2.4°, (c) 3.4°, (d) 4.3°

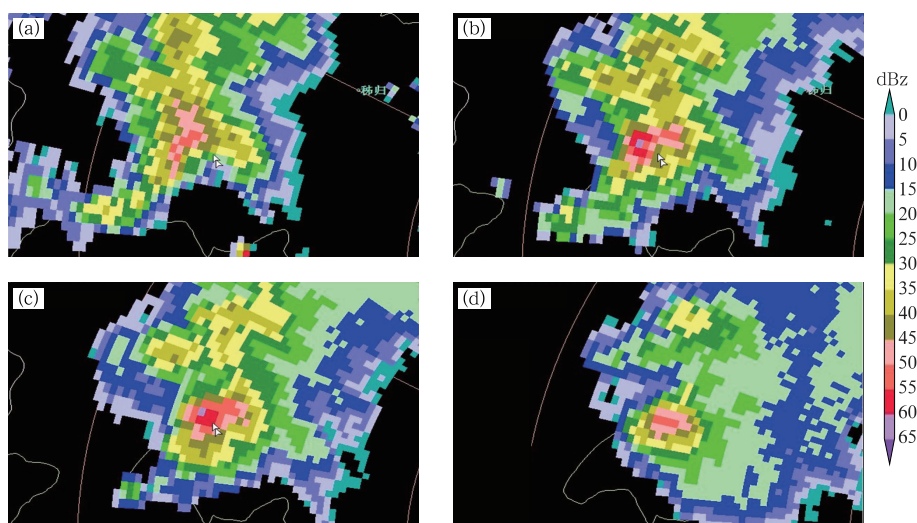


图 10 同图 9, 但为 2 月 14 日 16:48 B 风暴
(a)1.5°, (b)3.4°, (c)4.3°, (d)6.0°

Fig. 10 Same as Fig. 9, but for B storm at 16:48 BT 14 February 2020
(a) 1.5°, (b) 3.4°, (c) 4.3°, (d) 6.0°

8 km, 超过 -20°C 等温线以上 2 km, 超过 -30°C 等温线以上 1 km。16:48, 50 dBZ 强回波高度达到 7 km, 超过 -20°C 等温线以上 1 km, 与 -30°C 等温线持平。说明在冰雹增长层($-30\sim-10^{\circ}\text{C}$)存在丰富的过冷却水滴, 非常有利于大冰雹的产生。Waldvogel et al(1979)、Witt et al(1998)研究显示, -20°C 等温线对应的高度之上有超过 50 dBZ 的反

射率因子, 则有可能产生强冰雹。反射率因子的值越大, 相对高度越高, 产生强冰雹的可能性和严重程度越大; 胡胜等(2015)对广东 12 次大冰雹过程的统计结果表明, -20°C 以上的最大反射率因子在 54 dBZ 以上。鄂西南当天 -20°C 等温线上有超过 55 dBZ 的强回波, 预示有强冰雹发生。

中小尺度的辐合、辐散、旋转与上升气流的强弱

息息相关,而风暴顶辐散则与最大冰雹尺寸有关。图 12 和图 13 分别给出了 14:48 和 16:48 的风暴相

对平均径向速度。图 12 清晰显示了 A 风暴从中下层的气旋性辐合一中层的气旋性旋转—中高层的气

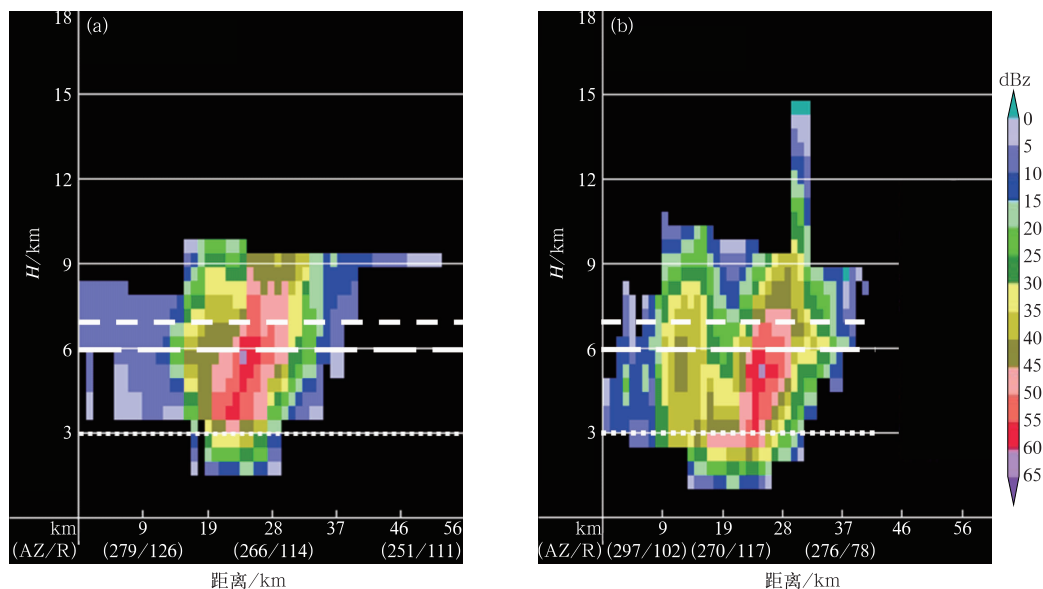


图 11 2020 年 2 月 14 日 14:48 A 风暴(a)和 16:48 B 风暴(b)宜昌雷达反射率因子(填色)垂直剖面
(点线:湿球 0℃高度,长虚线:—20℃高度,短虚线:—30℃高度)

Fig. 11 Vertical profile of reflectivity factor (colored) of Yichang Radar on 14 February 2020

(a) A storm at 14:48 BT, (b) B storm at 16:48 BT

(dotted line: wet bulb 0℃ height, long dashed line: —20℃ height,
short dotted line: —30℃ height)

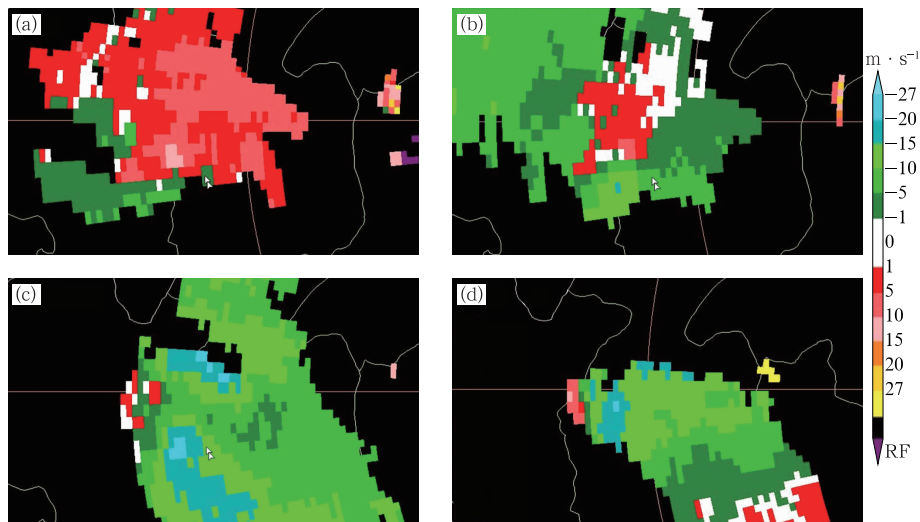


图 12 2020 年 2 月 14 日 14:48 A 风暴宜昌雷达不同仰角风暴相对平均径向速度
(a)1.5°, (b)2.4°, (c)4.3°, (d)6.0°

Fig. 12 A storm average relative radial velocity of Yichang Radar at different
elevation angles at 14:48 BT 14 February 2020

(a) 1.5°, (b) 2.4°, (c) 4.3°, (d) 6.0°

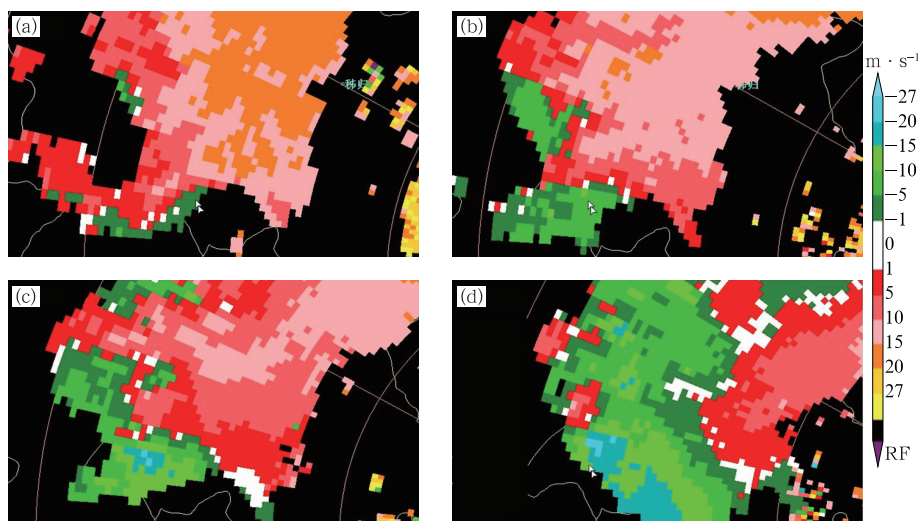


图 13 同图 12, 但为 2 月 14 日 16:48 B 风暴

(a) 2.4° , (b) 3.4° , (c) 4.3° , (d) 6.0°

Fig. 13 Same as Fig. 12, but for B storm at 16:48 BT 14 February 2020

(a) 2.4° , (b) 3.4° , (c) 4.3° , (d) 6.0°

旋性辐散—风暴顶纯辐散的变化过程,中气旋直径约为 8 km。其中, 1.5° 仰角为气旋性辐合特征, $2.4^\circ \sim 3.4^\circ$ 仰角为气旋性旋转,最大旋转速度为 2.4° 仰角的 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 4.3° 仰角为气旋性辐散特征, 6.0° 仰角则为风暴顶纯辐散,辐散正负速度差值为 $36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,由于雷达体扫仰角的不连续,很难找到最强风暴顶辐散对应的仰角,因此实际最大风暴顶辐散应该高于上述值。根据 Witt and Nelson(1984) 风暴顶辐散和落到地面冰雹尺寸之间的关系做计算,风暴 A 下落到地面的冰雹直径应为 2.5 cm。图 13 则清晰显示了风暴 B 中下层的气旋性辐合、中层旋转和中高层的气旋性辐散特征,相应中气旋直径为 8 km。其中 $1.5^\circ \sim 2.4^\circ$ 仰角为气旋性辐合, $3.4^\circ \sim 4.3^\circ$ 仰角为气旋性旋转, 6.0° 仰角为气旋性辐散特征,最大旋转速度在 4.3° 仰角,为 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。因雷达固有的仰角不连续造成未能探测到风暴顶纯辐散特征。这两个时刻的平均径向速度垂直剖面(图 14)显示,在风暴入流一侧存在一支很强的斜升气流从低层流入、高层流出,为风暴输送水汽,维持风暴发展和冰雹长大;在另一侧则对应一支下沉气流,气流从中高层流入风暴,从低层流出,形成地面雷暴高压和冰雹落区。两支气流在 3~6 km 高度上辐合,呈现中层径向辐合特征。另外,按照中气旋判断标准和超级单体的定义,14:48 和 16:48 的 γ 中

尺度涡旋为弱中气旋,因此可判定 A、B 为超级单体风暴。

4.3 风暴跟踪识别及冰雹概率变化特征分析

业务雷达软件风暴跟踪识别算法(SCIT)可以识别单体所在位置并预测未来几个体扫风暴的移动路径,冰雹指数(HI)算法可以根据当天的 0°C 高度和 -20°C 高度等参数预测冰雹概率(POH)、大冰雹概率(POSH)以及预期的最大冰雹直径(D_{\max})。

在第一阶段降雹期间,雷达识别出单体 C0,预报移动方向为偏东方向(图 15a),移动速度在 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。比较预报方向和风暴的实际移动方向,两者之间略有出入,在初期风暴发展阶段预报方向比实际方向偏左,成熟阶段与实际位置接近,消散阶段预报位置则偏向实际位置的右侧。这期间,HI 算法预测值如图 16a 所示。可以看到,14:18—15:42, POH 一直保持在 100%,而 POSH 与 D_{\max} 呈波浪式变化,但 POSH 始终保持在 70% 以上, D_{\max} 在 1.9 cm 以上,其中有两个体扫 D_{\max} 达到 4.4 cm。

在第二阶段降雹期间,SCIT 识别了 U0、X0、T0、F0 等多个单体的追踪信息(图 15b)。预报方向大体一致,均为东北方向,因各单体生命史短,无法定性得出预报偏差。这期间,HI 指数算法预测的冰雹概率及最大直径如图 16b 所示,可以看出,

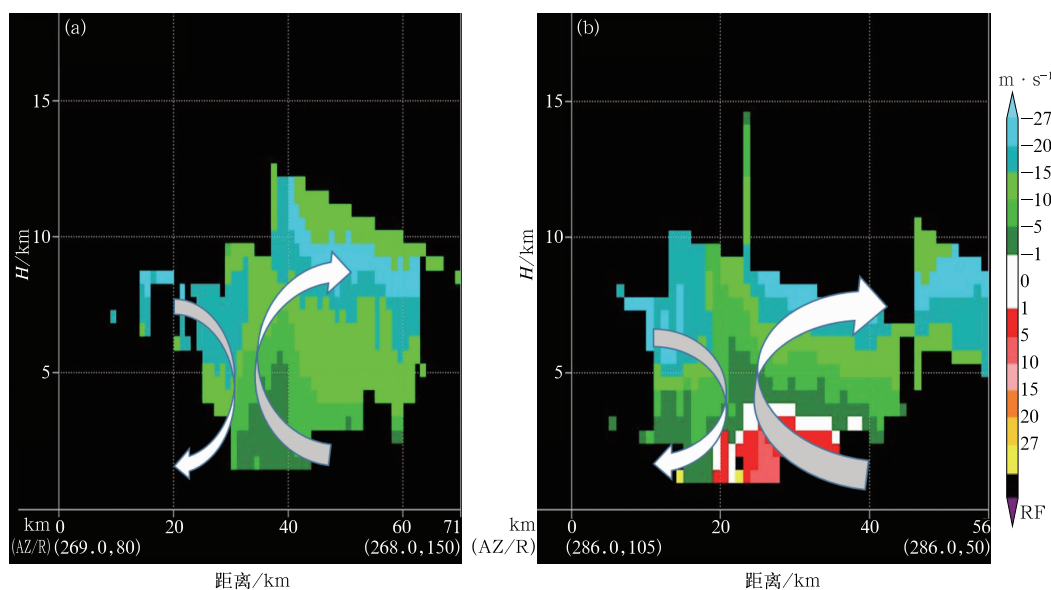


图 14 2020 年 2 月 14 日 14:48 A 风暴(a)和 16:48 B 风暴(b)宜昌雷达平均
径向速度垂直剖面
(箭头:气流方向)

Fig. 14 Vertical profiles of average velocity of Yichang Radar on 14 February 2020
(a) A storm at 14:48 BT, (b) B storm at 16:48 BT
(arrow: airflow direction)

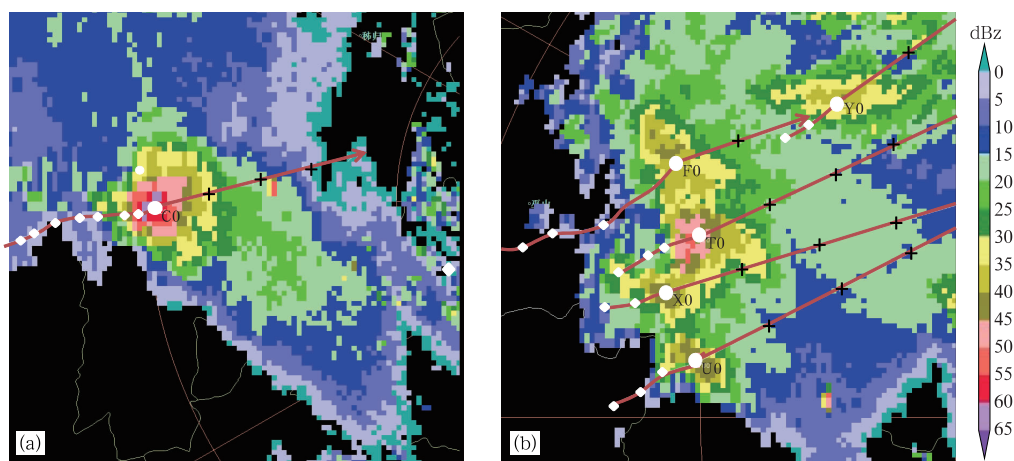


图 15 2020 年 2 月 14 日 15:18 A 风暴(a)和 16:24 B 风暴(b)宜昌雷达
反射率因子叠加的 SCIT 预测的冰雹路径(棕线)

(◆表示单体过去所在位置, ●表示单体现在的位置, +为未来的位置)

Fig. 15 Reflectivity factor and SCIT product characteristics of Yichang Radar on 14 February 2020

(a) A Storm at 15:18 BT, (b) B Storm at 16:24 BT

(brown line: path of hailstorm, ◆: the location of the monomer formerly,

●: the current location of the monomer, +: the future location)

16:42—17:18, POH 持续为 100%, POSH 和 D_{\max} 呈现出先增大再减小的变化趋势, 但始终保持在 $\text{POSH} \geq 80\%$ 、 $D_{\max} \geq 2.5$ cm 的高值。

由上可见, SCIT 较好地预测出此次冰雹的移动方向, HI 算法预测高概率出现大冰雹, 预测结果接近地面实况, 可将二者作为本地冰雹预警的参考。

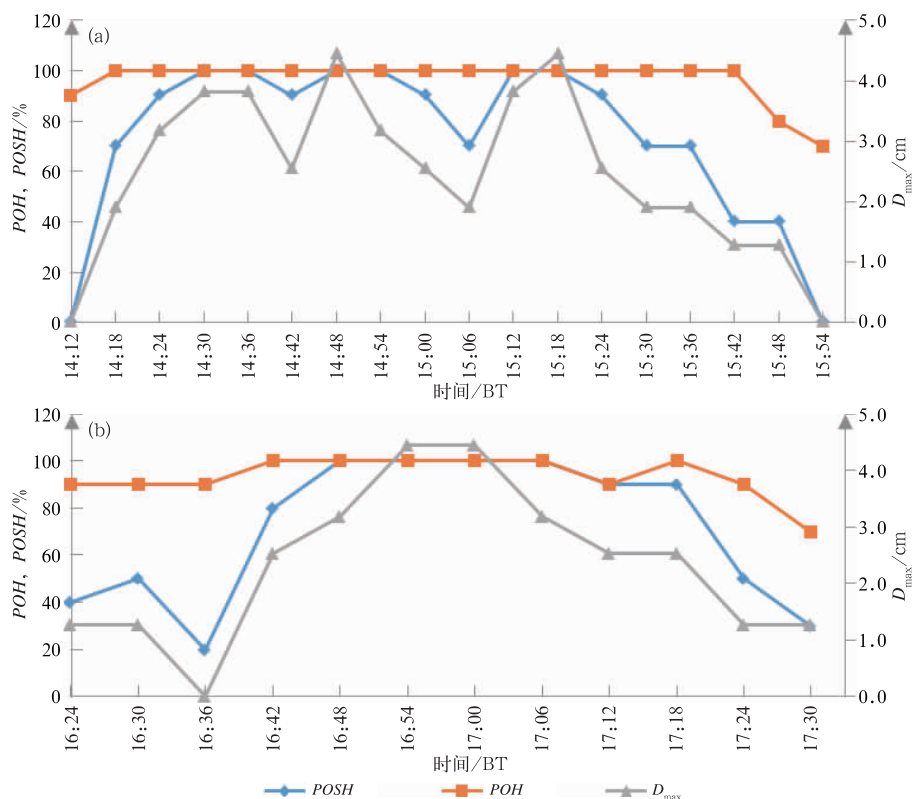


图 16 2020 年 2 月 14 日 A 风暴(a)和 B 风暴(b)的 POH、POSH 及 D_{\max} 变化趋势

Fig. 16 POH, POSH and the largest hail diameter trends of A Storm (a) and B Storm (b) on 14 February 2020

4.4 VIL 和 VIL 密度等物理量变化特征

回波强度强、质心高度高、异常大的 VIL 和 VIL 密度是强冰雹的重要特征。在 2 月,如果 VIL 值超过了 $35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,则产生冰雹的可能性大,如果 VIL 密度超过 $4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,则风暴几乎可以判断会产生直径超过 2 cm 的强冰雹(俞小鼎等,2006);而 VIL 的爆发式增长则意味着冰雹的开始(李秀琳和贾金海,2008)。

为避免风暴快速移动和倾斜对雷达参量的影响,在此采用风暴单体识别算法得到基于单体的相关参数研究其变化特征。图 17 给出了两次冰雹发生期间 A 风暴、B 风暴(含 C、D、E 三个单体)的最大基本反射率(Z_{\max})及其高度($H_{z,\max}$)、VIL 和 VIL 密度随时间的变化曲线。除第二阶段 $H_{z,\max}$ 变化趋势略有不同外,其他雷达参量的变化趋势基本一致。在超级单体 A 发展初期(14:12), Z_{\max} 和 $H_{z,\max}$ 分别为 40 dBz 和 7 km,VIL 和 VIL 密度分别为 $7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $0.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,3 个体扫后(14:30), Z_{\max} 、 $H_{z,\max}$ 、VIL 与 VIL 密度分别跳跃式增加到 59 dBz、

8.2 km、 $41 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $4.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,均超过了胡胜等(2015)、Amburn and Wolf(1997)给出的出现 2 cm 以上冰雹的阈值,随后 $Z_{\max} > 50 \text{ dBz}$, $H_{z,\max} > 5 \text{ km}$, $VIL \geq 35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,VIL 密度 $\geq 3.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ (其中有 3 个体扫超过 $4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,最大值为 $4.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$)的高值一直持续到 15:24,持续时间近 1 h,之后各参量逐渐下降,直到风暴消散。同样,超级单体 B 从 16:36 开始快速发展,此时 Z_{\max} 为 48 dBz, $H_{z,\max}$ 为 4.4 km,VIL 为 $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,VIL 密度为 $1.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$;2 个体扫后, Z_{\max} 、 $H_{z,\max}$ 、VIL、VIL 密度分别跳跃增到 60 dBz、5.4 km、 $44 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $5.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,除 $H_{z,\max}$ 外, Z_{\max} 、VIL、VIL 密度值均维持 60 dBz、 $40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $4.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上的高值到 17:18,持续时长为 40 min,这期间 VIL 和 VIL 密度极值更是分别高达 $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $6.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。随后,VIL 与 VIL 密度出现断崖式下降,2 个体扫内 VIL 从 $40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 降到 $15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,VIL 密度则从 $4.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 降到 $1.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

以上分析显示,14:00—16:12 的降雹主要由一个孤立的超级单体风暴造成,16:12—17:40则是多

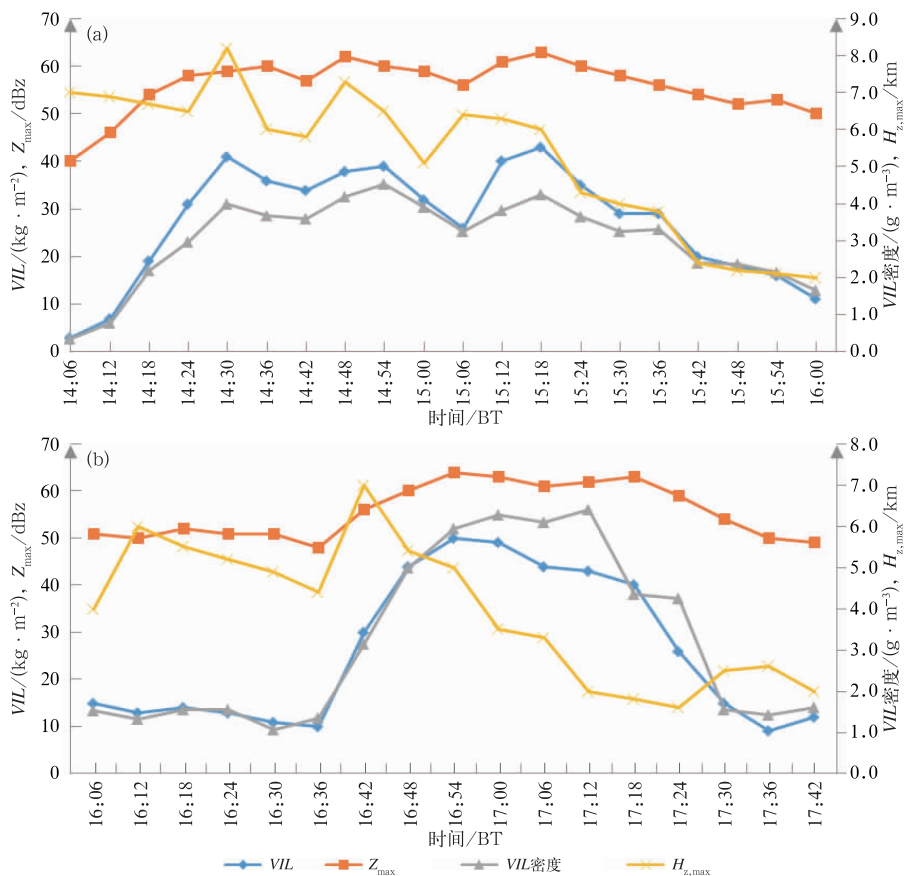


图 17 2020 年 2 月 14 日 A 风暴(a)和 B 风暴(b)基于单体的 Z_{\max} 、 $H_{z,\max}$ 、VIL、VIL 密度随时间的变化趋势

Fig. 17 Z_{\max} , $H_{z,\max}$, VIL, VIL density trends based on cells of A storm in (a) and B storm (b) on 14 February 2020

单体强风暴依次影响造成。雷达回波呈现出强度大、强回波高度高,以及弱回波区和回波悬垂,中小尺度辐合、辐散,气旋性旋转,中层径向辐合等特征。基于单体的 VIL 值和 VIL 密度分别较长时间维持在 $35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上的冬季高值;HI 算法预测高概率的强冰雹最大冰雹直径为 4.4 cm,略高于地面观测到的直径为 3 cm 的实际降雹。

5 结论与讨论

通过分析 2020 年 2 月 14 日鄂西南强冰雹天气过程,得出以下结论:

(1)此次局地强冰雹天气是在高空槽与低空切变线共同作用下,低层暖湿、高层干冷,低层辐合、高空辐散的环流背景下,低层暖湿气流发展,增强了上干冷下暖湿的不稳定层结,同时积累了不稳定能量。在地面中尺度辐合线和“喇叭口”的有利地形下,低

层辐合上升触发了本次强对流过程;冷锋南下使得中低层的垂直风切变加强(通过热成风关系),为强风暴的形成和维持提供了极为有利的条件。

(2)此次局地强冰雹天气,由两个超级单体分别影响,比较而言,孤立的 A 超级单体持续时间更长,发展更为高大;由多单体风暴中的一个单体发展而成的 B 超级单体(或者称为超级单体复合体,即多单体结构的对流风暴中其中一个单体为超级单体并占支配地位)持续时间相对较短,个体相对矮小。但两个超级单体的最大反射率因子均超过 60 dBz, 50 dBz 以上的强回波高度均达到或超过 -30°C 等温线,说明在冰雹增长层 $-30^\circ\text{C} \sim -10^\circ\text{C}$ 存在丰富的过冷却水滴,非常有利于大冰雹的产生。多单体强风暴还表现出了多单体此消彼长、有序更替的典型特征。

(3)此次强对流风暴的垂直结构反映出了高悬的强回波、低层入流、弱回波区与回波悬垂以及中小

尺度的旋转(中气旋)、风暴顶强辐散等超级单体的典型特征;基于单体的 VIL 和 VIL 密度分别较长时间维持在 $35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上的冬季高值,孤立的 A 超级单体 VIL 和 VIL 密度分别高达 $41 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $4.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,而多单体发展而成的 B 超级单体 VIL 和 VIL 密度高达 $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $6.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$;风暴追踪识别算法较好地追踪到了冰雹单体,HI 算法预测到高概率出现直径为 4.4 cm 的强冰雹,略高于地面观测到的直径为 3 cm 的实际降雹。

(4)本次过程出现在冬末,虽然对流出现之后呈现为典型的风暴结构,可以做出强冰雹提前 $10 \sim 30 \text{ min}$ 的临近预警,但对于对流出现之前的提前数小时的强冰雹短时潜势预报而言,常用于判断强降雹潜势的探空特征(CAPE、 $0 \sim 6 \text{ km}$ 垂直风切变以及融化层高度)的关键参数值非常不典型,如未经订正的 CAPE 为零;会误导预报员忽视对冰雹潜势的判断,预报员在这种环境背景下进行强对流天气潜势分析时,需要格外慎重和深入分析,才能得到最佳预报结果。鄂西南作为冰雹常发地,需要建立适用于本地的冰雹预警指标,从而提高预警的准确性。

在此次大冰雹过程分析中还发现,在前侧偏东气流和后侧偏西入流气流的共同影响下,衰减后的多单体风暴与从东南方向西传播的回波组合,形成“弓”形回波,在地面造成了 7 级瞬时大风。此次强冰雹过程出现在冬末强冷空气自北向南影响鄂西南前夕,而非出现在天气形势基本相似、热力条件更好的前一日(2020 年 2 月 13 日),也非强冷空气带来更大降温的后一日(15 日),其成因有待进一步研究。

参考文献

- 陈双,王迎春,张文龙,等,2011. 复杂地形下雷暴增强过程的个例研究[J]. 气象,37(7):802-813. Chen S, Wang Y C, Zhang W L, et al, 2011. Intensifying mechanism of the convective storm moving from the mountain to the plain over Beijing Area[J]. Meteor Mon, 37(7):802-813(in Chinese).
- 范皓,杨永胜,段英,等,2019. 太行山东麓一次强对流冰雹云结构的观测分析[J]. 气象学报,77(5):823-834. Fan H, Yang Y S, Duan Y, et al, 2019. An observational analysis of the cloud structure of a severe convective hailstorm over the eastern foothill of Taihang Mountain[J]. Acta Meteor Sin, 77(5):823-834(in Chinese).
- 胡鹏,焦洋,高帆,2019. 鲁中地区一次超级单体风暴的雷达观测分析[J]. 海洋气象学报,39(2):134-142. Hu P, Jiao Y, Gao F, 2019. Observational case study on a supercell storm in central Shandong Province[J]. J Mar Meteor, 39(2):134-142(in Chinese).
- 胡胜,罗聪,张羽,等,2015. 广东大冰雹风暴单体的多普勒天气雷达特征[J]. 应用气象学报,26(1):57-65. Hu S, Luo C, Zhang Y, et al, 2015. Doppler radar features of severe hailstorms in Guangdong Province[J]. J Appl Meteor Sci, 26(1):57-65(in Chinese).
- 黄海迅,周筠珩,曾勇,等,2021. 基于 X 波段双极化雷达的贵州威宁雹胚演变特征研究[J]. 大气科学,45(3):539-557. Huang H X, Zhou Y J, Zeng Y, et al, 2021. Study on the evolution characteristics of hail embryos in Weining, Guizhou, based on X-band dual linear polarization radar[J]. Chin J Atmos Sci, 45(3):539-557(in Chinese).
- 黄荣,王迎春,张文龙,2012. 复杂地形下北京一次局地雷暴新生和增强机制初探[J]. 暴雨灾害,31(3):232-241. Huang R, Wang Y C, Zhang W L, 2012. Initiating and intensifying mechanism of a local thunderstorm over complex terrain of Beijing[J]. Torr Rain Dis, 31(3):232-241(in Chinese).
- 黄晓龙,高丽,2016. 2014 年 3 月 19 日台州冰雹过程中尺度分析[J]. 气象,42(6):696-708. Huang X L, Gao L, 2016. Mesoanalysis of a hail process in Taizhou on 19 March 2014[J]. Meteor Mon, 42(6):696-708(in Chinese).
- 李聪,姜有山,姜迪,等,2017. 一次冰雹天气过程的多源资料观测分析[J]. 气象,43(9):1084-1094. Li C, Jiang Y S, Jiang D, et al, 2017. Observation and analysis of a hailstorm event based on multi-source data[J]. Meteor Mon, 43(9):1084-1094(in Chinese).
- 李德俊,唐仁茂,熊守权,等,2011. 强冰雹和短时强降水天气雷达特征及临近预警[J]. 气象,37(4):474-480. Li D J, Tang R M, Xiong S Q, et al, 2011. Radar features and nowcasting of severe hail and short-time heavy rainfall[J]. Meteor Mon, 37(4):474-480(in Chinese).
- 李德俊,叶建元,李跃清,等,2010. 恩施山区强冰雹和短时强降水天气落区分析[J]. 高原山地气象研究,30(2):51-54. Li D J, Ye J Y, Li Y Q, et al, 2010. Analysis on falling area of severe hail and short-time heavy rainfall in Enshi Mountain[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 30(2):51-54(in Chinese).
- 李秀琳,贾金海,2008. VIL 产品在人工防雹中的应用[J]. 陕西气象, (3):13-16. Li X L, Jia J H, 2008. Application of VIL products on the artificial hail suppression[J]. J Shaanxi Meteor, (3):13-16(in Chinese).
- 李永振,齐颖,崔莲,等,2005. 吉林省冰雹天气的时空分布[J]. 气象科技,33(2):133-135,141. Li Y Z, Qi Y, Cui L, et al, 2005. Spatial and temporal distribution of hails in Jilin Province[J]. Meteor Sci Technol, 33(2):133-135,141(in Chinese).
- 林文,张深寿,罗昌荣,等,2020. 不同强度强对流云系 S 波段双极化雷达观测分析[J]. 气象,46(1):63-72. Lin W, Zhang S S, Luo C R, et al, 2020. Observational analysis of different intensity severe convective clouds by S-band dual-polarization radar[J]. Meteor Mon, 46(1):63-72(in Chinese).
- 罗菊英,谭江红,2019. 鄂西山区一次早春局地强冰雹过程分析[J].

- 气象科技,47(6):976-985. Luo J Y, Tan J H, 2019. Analysis of a local strong hail process in early spring of 2017 in western Hubei Mountain Area[J]. Meteor Sci Technol, 47(6):976-985(in Chinese).
- 马晓玲,李德帅,胡淑娟,2020. 青海地区雷暴、冰雹空间分布及时间变化特征的精细化分析[J]. 气象,46(3):301-312. Ma X L, Li D S, Hu S J, 2020. Refined analysis of spatio-temporal characteristics of thunderstorm and hail over Qinghai Province[J]. Meteor Mon, 46(3):301-312(in Chinese).
- 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]. Meteor Mon, 46(12):1608-1620(in Chinese).
- 覃靖,潘海,刘蕾,2017. 柳州“4·09”致灾冰雹的超级单体风暴过程分析[J]. 气象,43(6):745-755. Qin J, Pan H, Liu L, 2017. Analysis of supercell storm leading to disastrous hail in Liuzhou on 9 April 2016[J]. Meteor Mon, 43(6):745-755(in Chinese).
- 单兴佑,寿绍文,李德俊,等,2010. “09. 3”鄂西南强对流天气的多普勒雷达特征分析[J]. 暴雨灾害,29(1):59-64. Shan X Y, Shou S W, Li D J, et al, 2010. Characteristics of Doppler radar of “09. 3” severe convective events in southwest of Hubei Province[J]. Torr Rain Dis, 29(1):59-64(in Chinese).
- 王华,孙继松,2008. 下垫面物理过程在一次北京地区强冰雹天气中的作用[J]. 气象,34(3):16-21. Wang H, Sun J S, 2008. Effects of underlying surface physical process on a severe hail event occurred in Beijing Area[J]. Meteor Mon, 34(3):16-21(in Chinese).
- 王莎,沙勇,宋金妹,等,2019. 冀东地区冰雹云多普勒雷达参数特征分析[J]. 气象,45(5):713-722. Wang S, Sha Y, Song J M, et al, 2019. Characteristic analysis of hail cloud Doppler radar parameters in the eastern Hebei Province[J]. Meteor Mon, 45(5):713-722(in Chinese).
- 王秀明,钟青,韩慎友,2009. 一次冰雹天气强对流(雹)云演变及超级单体结构的个例模拟研究[J]. 高原气象,28(2):352-365. Wang X M, Zhong Q, Han S Y, 2009. A numerical case study on the evolution of hail cloud and the three-dimensional structure of supercell[J]. Plateau Meteor, 28(2):352-365(in Chinese).
- 徐芬,郑媛媛,肖卉,等,2016. 江苏沿江地区一次强冰雹天气的中尺度特征分析[J]. 气象,42(5):567-577. Xu F, Zheng Y Y, Xiao H, et al, 2016. Mesoscale characteristics of a severe hail event over the area along Yangtze River in Jiangsu[J]. Meteor Mon, 42(5):567-577(in Chinese).
- 杨吉,郑媛媛,徐芬,2020. 江淮地区一次冰雹过程的双线偏振雷达观测分析[J]. 气象学报,78(4):568-579. Yang J, Zheng Y Y, Xu F, 2020. An analysis of a hail case over the Yangtze and Huai River Basin based on dual-polarization radar observations[J]. Acta Meteor Sin, 78(4):568-579(in Chinese).
- 俞小鼎,王秀明,李万莉,等,2020. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京:气象出版社:224-259. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al, 2020. A Thunderstorm and Severe Convection Nowcasting[M]. Beijing:China Meteorological Press:224-259(in Chinese).
- 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[M]. 北京:气象出版社:145-155. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006. Principle and Operational Applications of Doppler Weather Radar[M]. Beijing:China Meteorological Press:145-155(in Chinese).
- 俞小鼎,周小刚,王秀明,2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报,70(3):311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M, 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. Acta Meteor Sin, 70(3):311-337(in Chinese).
- 张秉祥,李国翠,刘黎平,等,2014. 基于模糊逻辑的冰雹天气雷达识别算法[J]. 应用气象学报,25(4):415-426. Zhang B X, Li G C, Liu L P, et al, 2014. Identification method of hail weather based on fuzzy-logical principle[J]. J Appl Meteor Sci, 25(4):415-426(in Chinese).
- 张文海,李磊,2019. 人工智能在冰雹识别及临近预报中的初步应用[J]. 气象学报,77(2):282-291. Zhang W H, Li L, 2019. A preliminary application of artificial intelligence on the detection and nowcasting of hail weather[J]. Acta Meteor Sin, 77(2):282-291(in Chinese).
- 张小娟,陶玥,刘国强,等,2019. 一次冰雹天气过程的云系发展演变及云物理特征研究[J]. 气象,45(3):415-425. Zhang X J, Tao Y, Liu G Q, et al, 2019. Study on the evolution of hailstorm and its cloud physical characteristics[J]. Meteor Mon, 45(3):415-425(in Chinese).
- 周小刚,费海燕,王秀明,等,2015. 多普勒雷达探测冰雹的算法发展与业务应用讨论[J]. 气象,41(11):1390-1397. Zhou X G, Fei H Y, Wang X M, et al, 2015. Doppler radar hail detection algorithm development and its operational application discussion[J]. Meteor Mon, 41(11):1390-1397(in Chinese).
- Amburn S A, Wolf P L, 1997. VIL density as a hail indicator[J]. Wea Forecasting, 12(3):473-478.
- Greene D R, Clark R A, 1972. Vertically integrated liquid water—A new analysis tool[J]. Mon Wea Rev, 100(7):548-552.
- Markowski P M, Richardson Y P, 2010. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes[M]. Chichester:Wiley-Blackwell.
- Waldvogel A, Federer B, Grimm P, 1979. Criteria for the detection of hail cells[J]. J Appl Meteor, 18:1521-1525.
- Witt A, Nelson S P, 1984. The relationship between upper-level divergent outflow magnitude as measured by Doppler radar and hailstorm intensity[C]//Preprints, Conference on Radar Meteorology, Zurich, Switzerland. Boston:American Meteorology Society:108-111.
- Witt A, Eilts M D, Stumpf G J, et al, 1998. An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D[J]. Wea Forecasting, 13(2):286-303.

(本文责编:何晓欢)