

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. 气象, 42(5):567-577.

江苏沿江地区一次强冰雹天气的中尺度特征分析^{*}

徐 芬¹ 郑媛媛¹ 肖 卉² 慕熙昱¹

¹ 江苏省气象科学研究所, 南京 210009

² 江苏省气候中心, 南京 210009

提 要: 利用常规气象资料、卫星、多普勒天气雷达、风廓线雷达等资料, 对发生在江苏沿江地区一次强冰雹天气形势背景、环境热力条件、强冰雹发生前地区环境场变化、超级单体雷达回波中尺度特征等进行了详细分析。结果表明: (1) 在东北冷涡槽后干冷气流影响下, 中高层干冷、低层暖湿的不稳定层结, 高空急流以及地面辐合系统的配置为此次强对流天气的产生提供了有利热力条件; 高 CAPE 值、逆温层、低层适当水汽条件及较强的深层垂直风切变有利于强冰雹天气的发生。(2) 利用多普勒天气雷达、风廓线仪数据反演垂直分布的物理量场(平均散度、平均垂直速度、相对风暴螺旋度、垂直风切变)能够反映本站上空环境场的快速变化情况: 强对流系统移入本站前雷达站上空逐渐调整为低层辐合、中高层辐散的风场配置结构, 螺旋度和垂直风切变数值逐渐增加, 表明环境场有利于强对流系统的维持发展。(3) 强降雹超级单体除具有三体散射现象、入流缺口等雷达回波中尺度特征外, 持久深厚的中气旋存在造成了显著的有界弱回波区和高悬垂强回波区。应用双多普勒雷达风场反演技术揭示了超级单体内部环流结构: 低层气旋性旋转, 中层旋转加强, 高层风场辐散。超级单体内部涡旋特征的出现和维持有利于支撑空中大冰雹的增长。

关键词: 强冰雹, 雷达中尺度特征, 双多普勒风场反演, 涡旋特征

中图分类号: P458

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.05.006

Mesoscale Characteristics of a Severe Hail Event over the Area Along Yangtze River in Jiangsu

XU Fen¹ ZHENG Yuanyuan¹ XIAO Hui² MU Xiyu¹

¹ Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210009

² Jiangsu Climate Centre, Nanjing 210009

Abstract: A severe hail event occurred along Yangtze River in Jiangsu on 28 April 2015. Based on the data of AWS observation, geostationary satellite, Doppler weather radar and wind profiler radar, this paper analyzes the characteristics of the synoptic weather pattern, thermodynamic conditions, changes of ambient wind field before hailstorm, and structure of the supercell storms. The results show that first, with Northeast vortex and the dry and cold airflow at the back of vortex trough, unstable stratification is formed by the dry and cold airflow in the mid-high level and the warm and humid airflow in the low level, the configuration of the high and low level jet and the surface convergence system provide a favorable thermal condition. The high CAPE values, inversion layer, favorable water vapor in the low layer and the strong deep vertical wind shear are conducive to the occurrence of severe hail weather. Second, the vertical distribution of physical quantity fields, such as average divergence, the mean vertical velocity, relative storm helicity, vertical wind shear, retrieved by the Doppler weather radar and the wind profiler radar data

^{*} 北极阁基金项目(BJG201509)、国家自然科学基金项目(41475042、41575036)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406006)、江苏省气象科研重点项目(KZ201407)和江苏省科技支撑计划-社会发展项目(BE2013730)共同资助

2015 年 7 月 24 日收稿; 2016 年 1 月 18 日收修定稿

第一作者: 徐芬, 主要从事天气雷达数据分析与应用研究. Email: xufen1130@tom.com

通信作者: 郑媛媛, 主要从事雷达气象研究和天气预报研究. Email: zhengyy63@sina.com

can reflect the rapid change of the ambient field, which is gradually adjusted into the pattern of low-level convergence and upper-level divergence, and the values of the helicity and vertical wind shear are gradually increased before the convective system moves into the area of the radar station. Such situation indicates that the ambient field is suitable for the maintenance and development of the severe convective system. Third, besides the TBSS phenomena and the front inflow notch found in the radar echo of the severe hail supercell, the prominent bounded weak echo area and suspended high strong echo area are made by the persistent deep mesocyclone. The inner loop structure of the supercell is revealed by the application of the dual-Doppler radar wind field retrieval technique. The ambient field is cyclonic rotation in the low level while rotation in the middle level is strengthened and the wind field in the high level is diverged. The emergence and maintenance of the vortex in the supercell contribute to the growth of large hail in the air.

Key words: severe hail, radar mesoscale characteristics, dual-Doppler radar wind field retrieval, vortex characteristics

引 言

冰雹是江苏省重要灾害性天气之一,虽然影响范围小、时间短促,但来势迅猛、强度大,并常伴随雷暴大风、短时强降水等灾害性天气。通常将落到地面直径超过 2 cm 的冰雹称为强冰雹(俞小鼎等, 2006),强冰雹天气具有更大破坏力,给农业、交通、通信、城市建筑等造成巨大损失。近年来诸多学者围绕江苏省冰雹天气时空分布、气候特征、天气分析及数值模拟等方面开展了研究工作,取得了明显进展(官莉等, 2012; 吴芳芳等, 2013; 杨程等, 2014; 张备等, 2014; 鲁德金等, 2015)。由于强冰雹天气各种特征空间尺度更小,持续时间更短,给预警和短时临近预报工作带来挑战。

目前具有高时空解析能力的多普勒天气雷达、风廓线仪、闪电定位仪等探测设备的密集布设,以及高时间分辨率的卫星数据传输大大增强了监测预警此类强天气的能力。应用天气雷达数据开展的强冰雹雷达回波特征分析工作开展最为广泛(廖玉芳等, 2007; 吴剑坤等, 2009; 吴芳芳等, 2013; 陈秋萍等, 2015; 胡胜等, 2015; 王萍等, 2016),天气雷达在强对流天气的监测与预警方面具有无可比拟的优势,并已发挥了明显效益。本文仍以多普勒天气雷达作为主要手段进行强冰雹天气的中尺度特征分析,并利用天气雷达、风廓线仪数据反演的具有高时空分辨率的垂直分布物理量变化来揭示强冰雹发生前环境场的变化特征。

2015 年 4 月 28 日午后至上半夜江苏淮河以南地区自西北向东南出现较大范围冰雹、雷暴大风、短

时强降水等强对流天气。灾情显示,6 个测站出现冰雹,27 个测站出现 7 级以上大风。其中沿江地区出现直径超过 2 cm 的强冰雹,六合最大冰雹直径超过 5 cm。下文利用常规观测资料、风云卫星 FY-2F 高时空分辨率可见光资料、江苏省南京、常州多普勒天气雷达、南京风廓线仪等多种观测资料,对此次天气过程的天气形势背景、强对流发生条件、强对流发生前环境场变化、强降雹超级单体雷达回波中尺度特征等方面进行详细探讨。

1 天气形势背景和环境热动力条件

2015 年 4 月 28 日 08 时(北京时,除非特别注明,下同),500 hPa 江苏省处于东北冷涡槽后西北气流中,急流轴自北向南伸至淮北地区与山东交界处;700、850 和 925 hPa 三层均有切变线贯穿于江苏沿江中部地区;湿度场呈现上干下湿的水汽配置:500 和 700 hPa 全省大部分地区处于干区中,850 hPa 以下全省均处于大湿区中;850 hPa 淮北西北部与山东交界处有一干线生成;温度场上,江苏省中西北部地区 850 与 500 hPa 温差超过 28℃(图 1a)。午后,沿江西部地区有地面辐合线生成,该辐合线随着时间推移,逐步增强向西南缓慢推进(图略)。

总体来看,受高空东北冷涡槽后干冷气流影响,配合中低层切变线、干线以及地面辐合系统,高低空风场配置为强对流的产生提供了有利动力抬升条件;中高层干冷、低层暖湿的层结配置易造成大气层结不稳定。该天气形势背景有利于江苏沿江、苏南地区产生冰雹、雷暴大风、短时强降水等强对流天气。

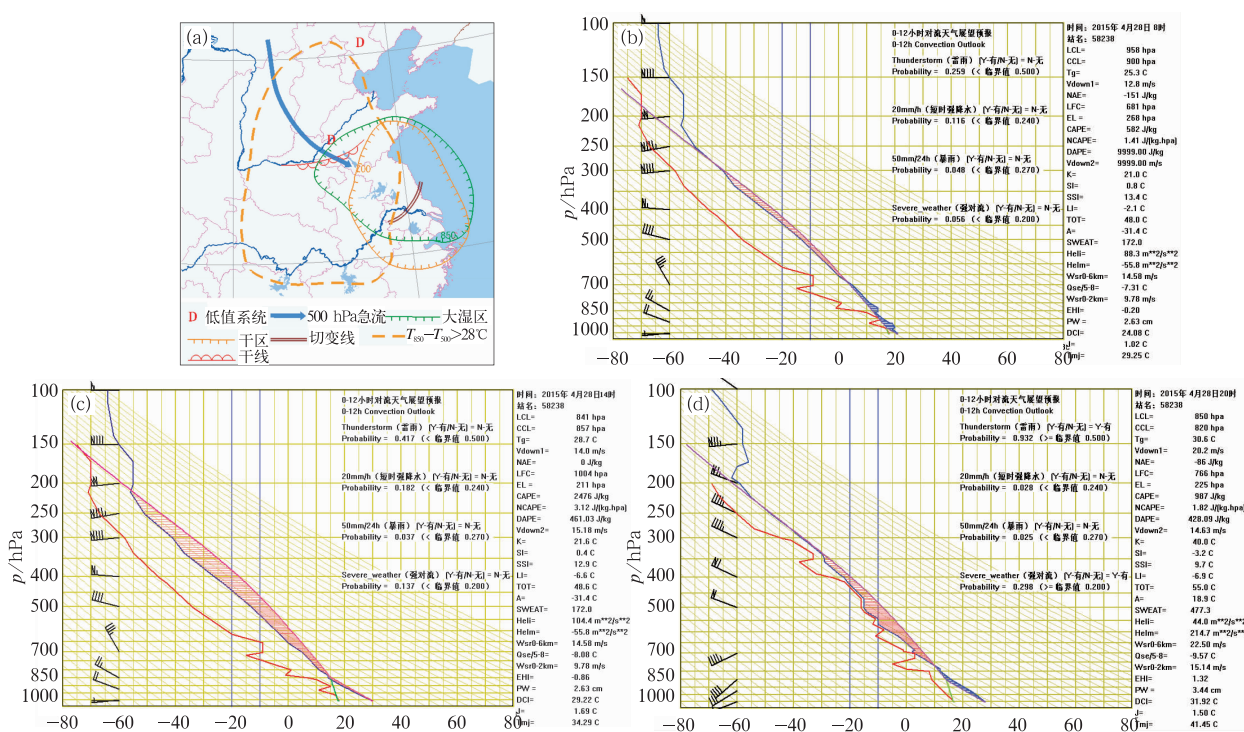


图1 2015年4月28日08时综合分析图(a)与08时(b)、14时(c)和20时(d)南京站探空 T - $\ln p$ 图

Fig. 1 Comprehensive chart at 08:00 BT (a) and T - $\ln p$ diagrams at 08:00 BT (b),

14:00 BT (c) and 20:00 BT (d) 28 April 2015 from Nanjing Station

此次天气过程雹暴单体在安徽中部新生,向东南方向移动发展,影响江苏淮河以南大部地区,尤以沿江地区灾情严重。因此,在分析雹暴环境热动力条件时使用了南京探空站数据。由于强对流天气发生于午后至上半夜,为分析强对流发生前的环境条件,本文采用14时地面温度和露点温度(30°C 、 18°C)结合08时探空数据重新计算了环境参数绘制14时探空图(如图1c),并结合江苏省冰雹天气热动力条件参量统计值进行分析(表1),该统计值是由冰雹发生前临近时刻的再分析资料统计而出。

图1b~1d分别为4月28日08、14和20时南京站探空分析曲线。08时,近地面存在两层逆温层(辐射逆温和下沉逆温),尽管逆温层较薄,但不稳定能量的储存提供了条件;14时,温度急剧升高,逆温层消失,不稳定能量迅速积累。对流有效位能(CAPE)是一种浮力能,可转化为对流上升运动的能量。一般来说,对流有效位能越大,雷暴出现后其内部的上升气流也就越强,因此出现强冰雹天气的可能性随着CAPE的增加而增加。午后CAPE值高达 $2476\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,远高于冰雹天气历史同期气候统计值 $1105\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表1)。从SI指数变化来看,强对流天气发生前夕,SI指数逐渐减小,大气层

结从稳定状态逐步向不稳定状态转变,20时达到了 -3.2°C ,亦高于冰雹天气历史同期气候统计值 -0.96°C 。总指数 T_i 在08时也已超过统计值。08和14时,850与500 hPa两层温差分别达到了 27.5 和 30.9°C 。整层水汽含量 Pw 和低层水汽条件($T-T_d$)₈₅₀也均高于历史统计值。从探空站环境风垂直风切变来看,08时0~6 km垂直风切变已达 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,午后逐渐增至 $17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (由本文2.3节由风廓线仪数据计算所得),20时风切变达到了 $23\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,与统计值持平。深厚又较强的垂直风切变有利于维持雹暴内的强上升气流。

综上,各项层结不稳定指数均表明南京站附近环境场处于不稳定状态下。与发生雷暴大风强对流天气形势相比,强冰雹天气CAPE更高,低层水汽含量更加充沛。正是由于强冰雹天气低层暖湿条件好于一般冰雹天气,此次天气过程的干球 0°C 层和 -20°C 层的高度比冰雹天气统计值均高约 0.7 km ,与苏北盐城地区强冰雹天气高度相近($H_0 = 3.9\text{ km}$, $H_{-20} = 6.9\text{ km}$)(吴芳芳等,2013)。干球 0°C 层高度的变化对冰雹融化影响较大(濮文耀等,2015);但当对流层大气尤其是对流中层或中下层存在明显干层时,WBZ高度明显低于DBZ高度(俞小

鼎,2014)。用 DBZ 作为冰雹融化层近似高度并不合理。因此本文根据文献(俞小鼎,2014)的计算方法,计算出此次天气过程湿球 0℃层高度约为 3 km,比干球 0℃层高度 3.6 km 低约 600 m。计算结果

不仅给出了冰雹融化层的更接近高度,两种 0℃层高度存在一定差异也说明此次环境场对流层中存在干区。较低的 WBZ 和干区的存在均有利于强冰雹天气的发生。

表 1 南京探空站观测和环境参数
Table 1 Observation and environmental factors at Nanjing Station

	SI /℃	T_i /℃	Pw /mm	H_{-20} /m	$K/℃$	H_0/m	$Shr06$ /m·s ⁻¹	$CAPE$ /J·kg ⁻¹	$(T-T)_{d850}$ /℃
冰雹天气统计值	-0.96	45.21	20.92	5900	22.51	3000	23	1105.5	5.59
08 时	0.8	48.0	26.3	6613	21.0	3813	15	582	6.0
14 时	0.4	48.6	/	/	21.6	/	/	2476	/
20 时	-3.2	55.0	34.4	7161	40.0	3671	23	987	7.0

2 强冰雹发生前南京环境场变化分析

通过南京探空站各物理量变化分析可知,此次大的天气环境有利于强对流天气的发生。由于探空资料时间分辨率较低,无法揭示雹暴系统过境前环境场变化情况。此次雹暴系统过境路线恰好位于南京雷达站探测区域 50 km 范围内,通过多普勒天气雷达、风廓线仪数据反演的高时间分辨率垂直分布的物理量场(平均散度、平均垂直速度、相对风暴螺旋度、垂直风切变),可以更清晰地监测强天气来临前,南京上空环境场的变化情况,预测雹暴系统的发展情况。

2.1 环境风场变化

为监测强天气来临前雷达站区域上空环境风场的变化情况,利用多普勒天气雷达径向速度计算雹暴系统进入雷达站 50 km 半径前雷达站上空平均

散度和平均垂直速度(徐芬等,2007a;2007b)。该算法假设风场在一定薄层内均匀不变,强天气过境前本站上空风场满足该算法假设。计算结果绘制如下等值线图(图 2)。风场变化情况代表雷达站上空 50 km 半径范围,时间分辨率为 6 min。

多普勒天气雷达主要用于探测降水回波,高灵敏度的雷达也能探测到部分非降水回波,但当高空大气干层深厚时,无法探测到有效的回波数据,因此图 2 中 400 hPa 以上因没有足够多的有效回波数据而无法反演出物理量。从平均散度随时间和高度变化来看(图 2a),16:00 前低层风场始终维持弱辐合,中高层也为弱辐合状态,整层大气处于稳定状态;16:20 左右低层风场辐合加深加厚,中高层风场由弱辐合转为辐散。在雹暴系统进入测站附近前雷达站上空处于 1000~850 hPa 较强辐合,700~500 hPa 弱辐散的风场配置结构。平均垂直速度场上(图 2b);16:30 前低层为下沉气流,此后逐渐转变为上升气流,上升速度逐渐增强,整层风场都处于上

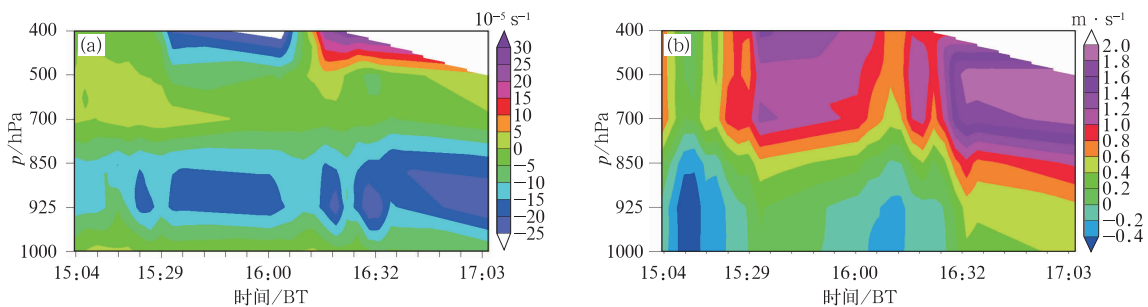


图 2 2015 年 4 月 28 日冰雹发生前夕平均散度(a)和垂直速度(b)随高度和时间变化
Fig. 2 The wind varying with altitude and time on 28 April 2015 before hailstorm
(a) average divergence, (b) vertical velocity

升气流中。由此可见雹暴系统移入雷达本站 50 km 范围内前夕,雷达站上空大气由稳定状态向不稳定状态转变,整层大气处于低层辐合中高层辐散的风场配置结构,环境风场的变化有利于过境雹暴系统的发展。随后雹暴系统移入本站过程中得到了进一步发展增强,1 h 后降强冰雹。

2.2 相对风暴螺旋度

水平螺旋度正值异常增大对应大气的异常状态,与预报强对流风暴的一些参数联系,具有预示性。从量级上看(至少在风暴初期),水平螺旋度比垂直螺旋度大,较大程度上决定了总螺旋度的情况(陆慧娟等,2003)。通常人们计算的螺旋度实质上是水平螺旋度,确切地说是忽略垂直运动水平分布不均匀的相对风暴水平螺旋度。由于水平风场资料较易获取,国外一般将螺旋度值 $>150 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 作为强对流风暴发生发展的临界值(章东华,1994;刘健文等,2005;杜秉玉等,2000)。考虑到风暴入流空气主要来自于对流层低层几千米范围内,可利用单站探空风资料计算低层总体风暴相对螺旋度(Davies-Jones et al,1990),公式如下:

$$H = \int_0^h (\mathbf{V} - \mathbf{C}) \cdot \boldsymbol{\omega} dz \quad (1)$$

式中, $\mathbf{V} = [u(z), v(z)]$ 为环境场水平风矢, $\mathbf{C} = (C_x, C_y)$ 为风暴水平移动速度矢, $\mathbf{V} - \mathbf{C}$ 为入流矢, $\boldsymbol{\omega} \cong \mathbf{k} \times \frac{d\mathbf{V}}{dz}$ 为水平涡度矢量, $\mathbf{k}$ 为单位矢量, h 为气层厚度。

实际工作中可将上式转换为

$$H = \sum_{n=0}^{N-1} [(u_{n+1} - C_x)(v_n - C_y) - (u_n - C_x)(v_{n+1} - C_y)] \quad (2)$$

式中, (u_n, v_n) 为各高度层上的水平风, (C_x, C_y) 为风暴移动速度。因为流入风暴的气流来自低层,一般取 $h = 3 \sim 4 \text{ km}$ 。本文采用多普勒天气雷达二次产品 VWP 风场资料计算,取 3 km, n 为 13 层,计算前风场资料做相应质量控制(徐芬等,2007b)。由于风暴的移动主要受中低层平流运动和自身传播效应的共同影响,本文以各高度层的平均风风向右移 30° ,风速的 75% 来确定风暴的移动速度(李耀东等,2005)。雹暴系统来临前雷达站上空 0~3 km 相对风暴螺旋度计算结果如下图 3 所示。

15:30 前环境场螺旋度处于 $40 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 低值

区,随后螺旋度波动上升,16:00 升至 $50 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 左右。随着 3 km 低层风场的大幅度调整(图略),半小时内螺旋度冲高至 $91.4 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 后又急剧下降到 $23.0 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$,10 min 后冲高至 $154.8 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$,到 17:10 前夕,雷达站附近环境场基本处于 $90 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 以上大值区内。由于相对风暴螺旋度不仅表征了环境场的旋转程度,还表示输入到对流系统中环境涡度的多少。具有高螺旋度特征的强对流风暴进入具有旋转性的大气中,可从环境场中获得并在浮力效应下进一步得到增强,可以说稳定的强对流风暴常发生在螺旋度值大的环境场中(Lilly, 1986),因此雷达站上空螺旋度的变化为随后移入该区域的雹暴系统的进一步发展增强提供了有利的环境场。

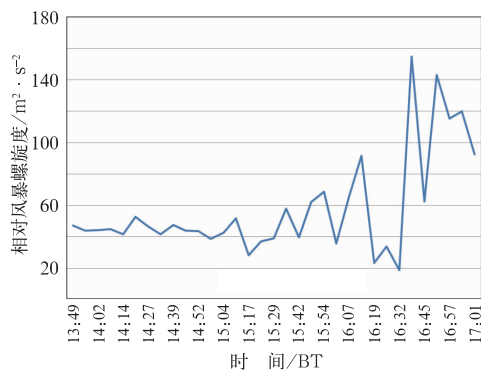


图3 2015年4月28日冰雹前夕
相对风暴螺旋度变化

Fig. 3 Variation of storm relative helicity with
time on 28 April 2015 before hailstorm

2.3 垂直风切变

较强的垂直风切变是维持较长时间的雷暴内强上升气流的环境因素之一,深层垂直风切变(0~6 km)已经作为判断有利于强冰雹天气发生的关键因子之一(俞小鼎等,2006)。本文采用南京风廓线仪数据根据式(3)来计算雹暴系统过境前夕 0~6 km 垂直风切变 $|\Delta V|$ (胡明宝,2015)。

$$|\Delta V| = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2\cos D} \quad (3)$$

式中, V_1 为 0 km 高度层风速, V_2 为 6 km 高度层风速, D 为 V_1, V_2 两层的风向差。

雹暴系统来临前,环境场垂直风切变数据计算和分析如下:雹暴系统移入本站前夕(16:18)垂直风切变 $|\Delta V|$ 为 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;16:42 左右风速继续增加

(图4), $|\Delta V|$ 增至 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 垂直风切变的增大主要由上下层风速差增大所致。由图4变化趋势可知, 16:42 中高层风速大值区(深蓝色区域自右向左)增强增厚, 并进一步下探, 中高层动量随时间向下传播, 为环境场积聚能量。环境场垂直风切变的变化有利于雹暴系统的维持发展。

综上所述, 在雹暴系统进入本站附近前夕, 本站上空环境场也发生着变化, 无论从高低空辐合辐散配置、相对风暴螺旋度变化、垂直风切变变化等均表明环境场向着有利于强对流系统发生发展的趋势而变化, 为随后移入该区域的雹暴系统的维持发展提供了有利的环境场。

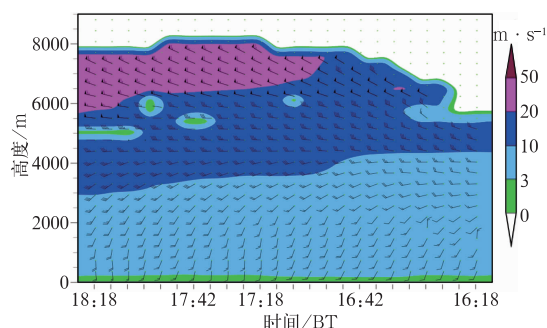


图4 2015年4月28日冰雹前夕
风场垂直变化

Fig. 4 Vertical variation of wind field on
28 April 2015 before hailstorm

3 强冰雹天气的雷达回波中尺度特征分析

此次影响江苏沿江地区多地的强对流系统 28 日下午 15:00 左右在安徽蚌埠附近生成发展, 向东缓慢移动。15:48 左右该对流系统分裂为两块, 一块继续向东偏北移动, 另一块向东南方向移动, 并迅速发展成超级单体, 中心反射率因子大于 65 dBz 。该超级单体边移动边继续发展, 17:20 左右进入南京雷达站测站 50 km 范围内, 迅速发展加强, 大于 55 dBz 的强反射率区域进一步增大, 从雷达回波图像中观测到了典型的有界弱回波区、入流边界、钩状回波、中气旋等中尺度特征。该超级单体给途经之地(六合、仪征等)带来了强冰雹天气。超级单体继续向东南方向移动给沿线均造成了强对流灾害性天气, 直到 22:30 左右移出苏州后强度才有所减弱。由于该超级单体在南京雷达站附近造成了强冰雹天

气, 因此下文重点分析造成强冰雹时段的超级单体特征。从雷达反射率和径向速度垂直剖面、多仰角 PPI、基于双多普勒反演风场的涡旋特征分析等角度较为全面地分析此次强冰雹天气的雷达回波中尺度特征。

3.1 垂直剖面特征分析

为观测降雹时期超级单体的垂直结构, 对 09:47 UTC 时刻 1.5° 雷达回波沿图 5a 白色虚线做垂直剖面, 该剖面贯穿两个中气旋区域(图 5a 黑色圆圈)、低层入流区域及钩状回波区域。反射率因子垂直剖面 and 径向速度垂直剖面分别如图 5b 和图 6。第三节图文时间均为世界时。

产生强冰雹的超级单体最显著特征体现在反射率因子高值区向上扩展到较高的高度。从图 5b 可见 7 km (-20°C 高度) 垂直高度以上有超过 55 dBz 的反射率因子, 最大超过了 65 dBz 。且 65 dBz 大值区最高达到了 9 km 的高度。垂直剖面前侧 3 km 以下为宽广的入流弱回波区域, 水平尺度约 20 km 左右, 弱回波区上空对应强回波悬垂结构, 有界弱回波区域深厚, 垂直高度上从 3 km 延伸至 8 km 左右, 宽度在 8 km 左右, 风暴顶位于有界弱回波区上空。有界弱回波区左侧强回波区域对应强冰雹下降通道, 回波强度超过 60 dBz 。反射率垂直剖面有界弱回波区和强回波悬垂结构特征的出现说明该超级单体内部旋转强烈, 图 6 径向速度垂直剖面也可清晰地看出单体内部的旋转特征。

如图 6a 垂直剖面环形箭头所示, 低层 3 km 气旋式环形箭头对应图 6b 中气旋 A, 中气旋 A 底高约 2.6 km , 顶高 3.7 km , 转动速度约为 $12.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 为中等强度中气旋; 中层气旋式环形箭头对应图 6 中气旋 B, 比起中气旋 A, B 在垂直方向发展更加深厚(底高 1.6 km , 顶高 7.0 km), 转动速度达 $18.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 达到了强中气旋程度。在该气旋式环形箭头上空约 9 km 为反气旋式环形箭头, 结合图 5b 相应位置, 该径向速度垂直分布正对应了风暴顶辐散特征。强中气旋特征与文献(吴芳芳等, 2012)统计的江苏盐城地区产生直径 40 mm 及以上强冰雹的中气旋特征相似(平均顶高 $6.0 \sim 7.7 \text{ km}$, 平均顶高位于 -20°C 等温线高度附近及以上)。由于冰雹增长只发生在 0°C 等温线高度以上, 并且强冰雹增长大都发生在 -10°C 层等温线高度以上(俞小鼎等, 2006), 因此较高的中气旋易产生强冰雹。

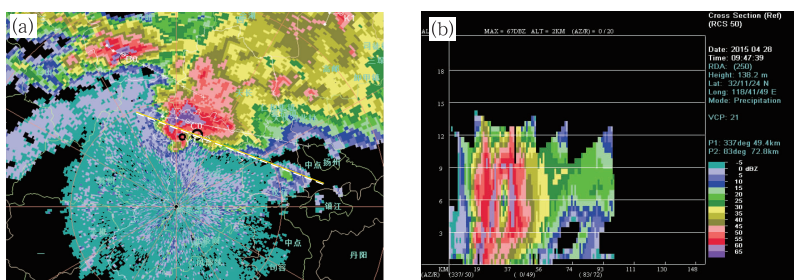


图5 2015年4月28日09:47 UTC反射率图

(a) 1.5°PPI, (b) 垂直剖面

Fig. 5 Reflectivity chart at 09:47 UTC 28 April 2015

(a) 1.5°PPI, (b) cross section

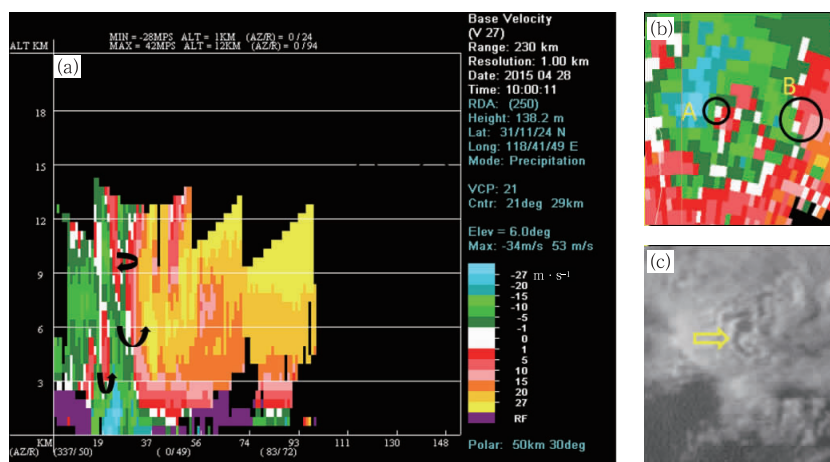


图6 2015年4月28日09:47 UTC速度图

(a) 垂直剖面, (b) 4.3°PPI, (c) 卫星云图

Fig. 6 Velocity chart at 09:47 UTC 28 April 2015

(a) cross section, (b) 4.3° PPI, (c) satellite cloud image

由上分析可知,正是由于中气旋B强烈旋转造成了图5b显著的有界弱回波区和强回波悬垂结构特征的出现。强烈的旋转也是该超级单体在较长时间内得以维持发展的重要原因之一。该旋转特征甚至在高分辨率FY-F可见光云图中也观测到了类似螺旋云区,如图6c箭头所指。为了更好地认识强中气旋结构,本文3.4利用双多普勒雷达反演的风场试图揭示其内部环流情况。

3.2 四分屏显示特征分析

尽管垂直剖面的方式更加直观,但由于天气雷达垂直方向分辨率较低,垂直剖面插值数据平滑较为严重,小尺度细节特征易被平滑。本节通过原始PPI四分屏显示方式来观测雹暴特征。对应于垂直剖面图5和图6的四分屏显示如下图7所示。图7a~7d分别为3.4°径向速度图、6.0°反射率因子图、

2.4°反射率因子图、0.5°反射率因子图。

0.5°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,在6.0°反射率图对应位置,箭头前方是超过60 dBZ的强回波中心,所以低层入流缺口对应的弱回波区域之上为强回波悬垂结构。而6.0°反射率图箭头右侧出现的缺口位置对应中气旋位置(图7a),由于强烈的旋转在中高层反射率图中也呈现出缺口特征,且弱回波的“弱性”比入流缺口弱回波区更明显,反射率因子最低为0 dBZ。对应垂直剖面的有界弱回波区和强回波悬垂结构特征。

3.3 三体散射现象

三体散射现象的出现是存在强冰雹的充分非必要条件(吴剑坤等,2009)。利用多部雷达联合探测超级单体有助于发现此类弱回波特征。如图8a所

示,南京雷达观测时,由于超级单体(图 8a 白色方框内)径向方向存在大片对流性降水回波,无法观测三体散射现象。利用常州雷达看同一超级单体时(图 8b 白色方框),观测到了明显的三体散射现象(白色箭头所指),长钉长度约为 15 km,初始高度为 2.3 km,产生长钉的最大反射率因子强度在 65 dBz。除三体散射回波外,还观测到了旁瓣回波(黄

色箭头所指),两种由散射现象产生的虚假回波的出现,从另一面说明该超级单体内含有大于 2 cm 以上的强冰雹。由于长钉回波强度较弱且易受其他回波干扰,因此寻找三体散射现象出现与降雹起始时间的对应关系,以及三体散射强度与冰雹强度的关系并不易实现。

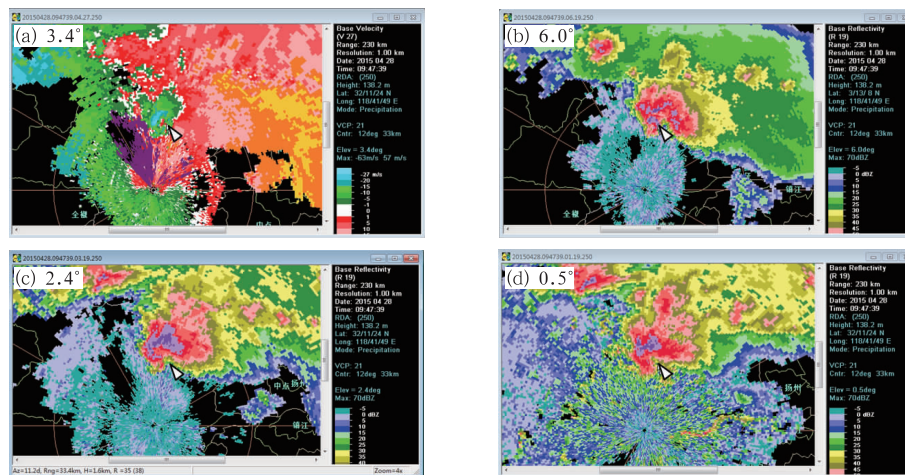


图 7 2015 年 4 月 28 日 09:47 UTC 四分屏显示

(a) 3.4° VPPI, (b) 6.0° ZPPI, (c) 2.4° ZPPI, (d) 0.5° ZPPI

Fig. 7 Four screen charts at 09:47 UTC 28 April 2015

(a) 3.4° VPPI, (b) 6.0° ZPPI, (c) 2.4° ZPPI, (d) 0.5° ZPPI

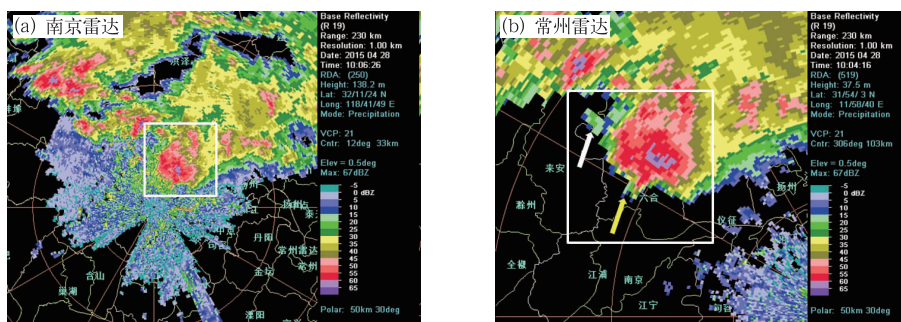


图 8 南京雷达(a)和常州雷达(b)的三体散射现象探测

Fig. 8 TBSS detected by Nanjing Radar (a), Changzhou Radar (b)

3.4 涡旋特征分析

如前所述,此次给沿江地区带来强冰雹灾害的超级单体中气旋强烈,发展深厚。中低层具有明显的涡旋特征,顶部出现了强烈的风暴顶辐散,上升气流速度很强,有利于大冰雹的生长。但无论是径向速度垂直剖面还是 PPI 平面结构,都只能看到涡旋特征的一部分结构。为了能更加清晰看清中气旋环流结构,本节通过双多普勒雷达风场反演产品来观

测涡旋结构特征。双多普勒雷达风场反演技术能够观测到中小尺度强对流系统内部风场演变特征,为揭示雷暴系统内部的涡旋、辐合、辐散等风场结构提供了可能(陶岚等,2014;2016;孙敏等,2015)。本文利用南京和常州双雷达数据对此次超级单体的三维风场进行了反演分析,风场反演产品来自江苏省气象科学研究所研发的双风场反演系统,该系统针对江苏省多普勒天气雷达径向速度存在的普遍问题进行了包括孤立杂点、噪声剔除、退一次速度模糊等质

量控制;针对双多普勒雷达覆盖区域特点确定了水平方向 1 km、垂直方向 2 km 的空间分辨率设置。结果如图 9 所示。

图 9 显示了不同高度反演风场(矢线)叠加反射率因子 CAPPI 产品的图像。从图可清晰看出超级单体内部风场分布和随高度演变情况:在低层 1~3 km(图 9a~9c)涡旋特征位于超级单体入流缺口反射率因子梯度大值区域。由于超级单体随高度略有前倾,3 km 涡旋叠加于强回波区域。与图 10a~10c

径向速度图像对比来看,对应位置均表现为气旋性旋转特征。从反演风场来看,3 km 气旋右侧风速略高于 1~2 km 相应位置风速,而图 10c 4.3°径向速度图像上(约 2.7 km)离开雷达站的正速度区域风速也高于低仰角相应位置风速。随着高度的增加,涡旋特征减弱,4~6 km 高度相应位置处风场呈现为风向性辐合特征(图 9d~9f),对应径向速度图像特征(图 10e),也呈现为辐合特征。接近风暴顶端(图 9g~9h),风场呈现出风向性辐散特征,随着高

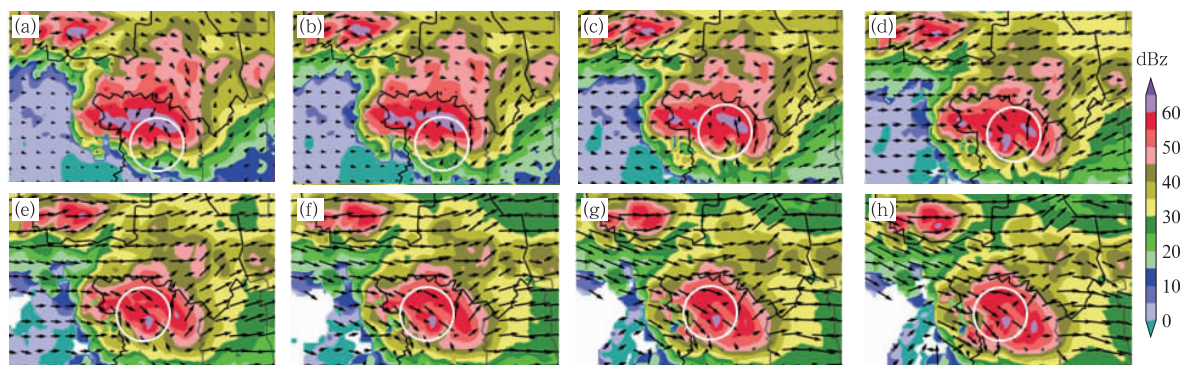


图 9 2015 年 4 月 28 日 10:00 UTC 不同高度反射率因子和反演风场(矢线)

(a) 1 km, (b) 2 km, (c) 3 km, (d) 4 km, (e) 5 km, (f) 6 km, (g) 7 km, (h) 8 km

Fig. 9 Reflectivity and the wind retrieved (vector) at 10:00 UTC 28 April 2015

(a) 1 km, (b) 2 km, (c) 3 km, (d) 4 km, (e) 5 km, (f) 6 km, (g) 7 km, (h) 8 km

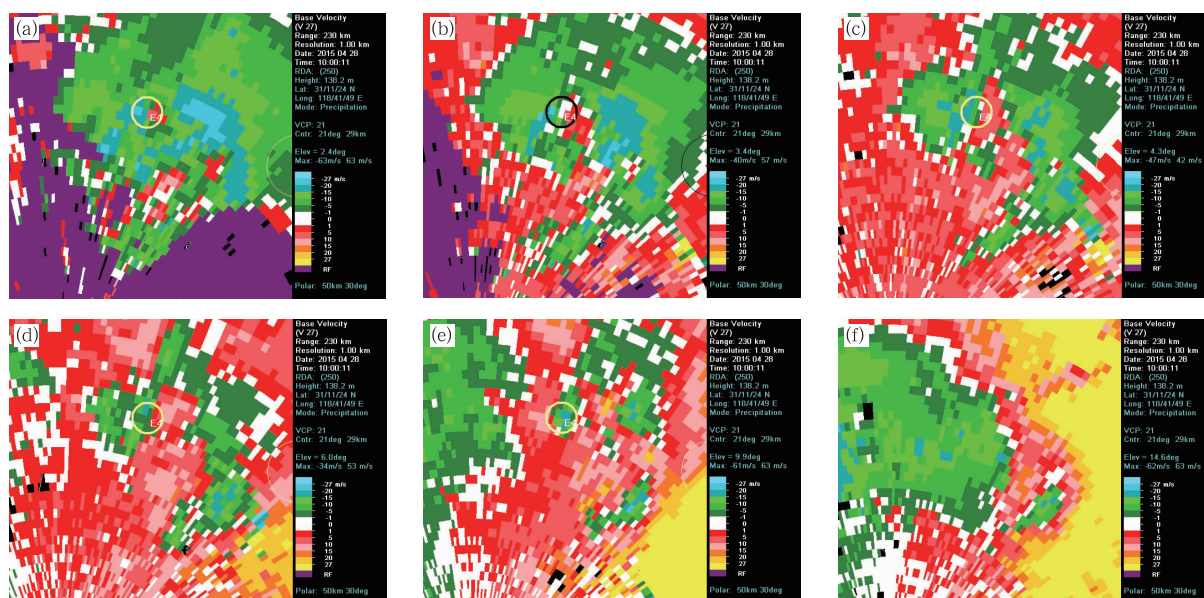


图 10 2015 年 4 月 28 日 10:00 UTC 不同仰角径向速度图

(a) 2.4°, (b) 3.4°, (c) 4.3°, (d) 6.0°, (e) 9.9°, (f) 14.6°

Fig. 10 Radial velocity charts at different elevations at 10:00 UTC 28 April 2015

(a) 2.4°, (b) 3.4°, (c) 4.3°, (d) 6.0°, (e) 9.9°, (f) 14.6°

度增加,辐散程度略有增加。从径向速度场来看,由于随着仰角的增加,高层垂直分辨率急剧下降,无法有一一对应高度的图像,最接近仰角 14.6° 对应垂直高度约9 km,径向速度场分布也呈现出了明显的辐散特征(图10f)。

由上分析可见,双多普勒雷达风场反演产品清晰地揭示了此次超级单体内部风场环流特征(图11):低层风场呈现涡旋特征,随着高度增加旋转强度有所加大。 $4\sim 5$ km中层开始随着高度增加涡旋特征减弱消失,风场转为风向性辐合风场,接近风暴顶端时($9\sim 12$ km),风场为辐散风场。超级单体内部涡旋特征的出现对维持和发展超级单体起着至关重要的作用,它保证了一支强上升气流支撑空中大冰雹的增长。比起径向速度风场特征,反演风场更加直观清晰。

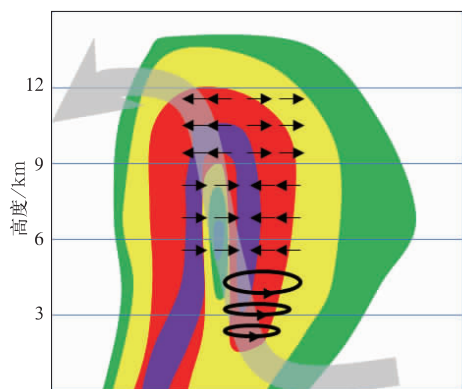


图11 强冰雹超级单体中尺度动力结构模型

Fig. 11 The mesoscale dynamic structure model of severe hail supercells

4 结 论

利用常规气象资料、卫星、多普勒天气雷达、风廓线雷达等资料,对发生在江苏沿江地区一次强冰雹天气形势背景、环境热动力条件、强冰雹发生前地区环境场变化、超级单体雷达回波特征等进行了详细分析。结果表明:

(1) 本次强冰雹天气过程是发生在高空东北冷涡槽后干冷气流影响、中低层切变线、干线以及地面辐合抬升的大背景形势下;中高层干冷、低层暖湿的层结配置造成了大气层结不稳定;高低空急流配置为强对流天气的产生提供了有利动力条件。相较于其他强对流天气,高CAPE值、适宜的底层水汽条

件配合、略高于普通冰雹天气的 0°C 、 -20°C 层高度、较强的深层垂直风切变以及较低的湿球 0°C 层高度更有利于强冰雹天气的发生。

(2) 多普勒天气雷达、风廓线仪数据反演的物理量场(平均散度、平均垂直速度、相对风暴螺旋度、垂直风切变)具有高时间分辨率、高垂直空间分辨率的特性。能够揭示强天气来临前本站上空环境场的快速调整情况。强天气系统移入本站前:雷达站上空环境场从稳定转变为不稳定状态,整层大气处于低层辐合中高层辐散的风场配置结构并具有一定旋转性;深层垂直风切变也有所增加。物理量数值变化均表明强天气来临前环境场朝着有利于强对流天气维持发展的趋势而变化,为随后移入该区域的超级单体风暴的维持发展提供了有利的环境场。

(3) 强降雹超级单体雷达回波除具有三体散射现象、入流缺口等典型中尺度特征外,由于持久深厚的中气旋强烈的旋转,在反射率因子垂直剖面图上呈现出显著的有界弱回波区和强回波悬垂结构特征。应用双多普勒雷达风场反演技术揭示了造成强烈旋转的超级单体内部环流结构:低层气旋性旋转,中层旋转强度加大,随着高度增加旋转有所减弱,接近风暴顶端时,风场为辐散风场。超级单体内部涡旋特征的出现对维持和发展超级单体起着至关重要的作用,保证了一支强上升气流支撑空中大冰雹的增长。比起径向速度风场特征,双多普勒雷达反演风场产品更加直观清晰。

致谢:感谢国家卫星气象中心刘年庆高工为本文提供了卫星资料。

参考文献

- 陈秋萍,陈齐川,冯晋勤,等. 2015. “2012. 4. 11”两个强降雹超级单体特征分析. 气象, 41(1): 25-33.
- 杜秉玉,官莉,等. 2000. 上海地区强对流天气短时预报系统. 南京气象学院学报, 23(2): 242-250.
- 官莉,王雪芹,黄勇. 2012. 2009年江苏一次强对流天气过程的遥感监测. 大气科学学报, 35(1): 73-79.
- 胡明宝. 2015. 风廓线雷达探测与应用. 北京: 气象出版社, 151.
- 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. 应用气象学报, 26(1): 57-65.
- 李耀东,刘健文,高守亭. 2005. 螺旋度在对流天气预报中的应用研究进展. 气象科技, 33(1): 7-11.
- 廖玉芳,俞小鼎,吴林林,等. 2007. 强雹暴的雷达三体散射统计和个例分析. 高原气象, 26(4): 812-820.
- 刘健文,郭虎,李耀东,等. 2005. 天气分析物理量计算基础. 北京: 气象出版社, 127-132.

- 鲁德金,陈钟荣,袁野,等. 2015. 安徽地区春夏季冰雹云雷达回波特征分析. 气象, 41(9):1104-1110.
- 陆慧娟,高守亭. 2003. 螺旋度及螺旋度方程的讨论. 气象学报, 61(6):684-691.
- 濮文耀,李红斌,宋煜,等. 2015. 0℃层高度的变化对冰雹融化影响的分析和应用. 气象, 41(8):980-985.
- 孙敏,戴建华,袁招洪,等. 2015. 双多普勒雷达风场反演对一次后向传播雷暴过程的分析. 气象学报, 73(2):247-262.
- 陶岚,戴建华,孙敏. 2016. 一次雷暴单体相互作用与中气旋的演变过程分析. 气象, 42(1):14-25.
- 陶岚,袁招洪,戴建华,等. 2014. 一次夜间弓形回波特征分析. 气象学报, 72(2):220-236.
- 王萍,高毅,李聪. 2016. 50 km 以内雷暴系统的分类识别方法研究. 气象, 42(2):230-237.
- 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.
- 吴芳芳,俞小鼎,张志刚,等. 2013. 苏北地区超级单体风暴环境条件与雷达回波特征. 气象学报, 71(2):209-227.
- 吴剑坤,俞小鼎. 2009. 强冰雹天气的多普勒天气雷达探测与预警技术综述. 干旱气象, 27(3):197-206.
- 徐芬,夏文梅,胡志群,等. 2007a. 多普勒天气雷达风场产品在螺旋度计算中的应用. 气象科学, 27(5):495-501.
- 徐芬,夏文梅,吴蕾,等. 2007b. 多普勒天气雷达 PPI 图散度分布信息提取. 气象, 33(11):21-27.
- 杨程,宋金杰,王元,等. 2014. 热带气旋影响下江苏强对流天气指数分析. 热带气象学报, 30(3):559-566.
- 俞小鼎. 2014. 关于冰雹的融化层高度. 气象, 40(6):649-654.
- 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.
- 张备,尹东屏,孙燕,等. 2014. 一次寒潮过程的多种相态降水机理分析. 高原气象, 33(1):190-198.
- 章东华. 1994. 螺旋度概念及其在强对流风暴预报中的应用试验. 空军气象学院学报, 15(1):20-27.
- Davies-Jones R, Burgess D, Foster M. 1990. Test of helicity as a tornado forecast parameter. Preprints, 16th Conf on Severe Local Storms, Amer Meteor Soc, 588-592.
- Lilly D K. 1986. The structure and propagation of rotation convective storm, Part 2: Helicity and storm. J Atmos Sci, 43(2):126-140.