

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.

# 一次冰雹天气过程的多源资料观测分析\*

李 聪 姜有山 姜 迪 李 力 张蓬勃

南京市气象局,南京 210019

**提 要:** 利用地基微波辐射计、风廓线雷达和雨滴谱仪等观测资料,对 2015 年 4 月 28 日发生在南京的一次冰雹天气进行了分析,探讨新型探测资料在冰雹监测预警中的应用。结果表明:(1)华北冷涡后部冷空气南下,与低层暖湿气流交汇,是产生这次冰雹的天气背景;高空冷平流叠加在低层暖湿气流之上,使得对流层中低层形成不稳定层结;地面辐合中心及辐合线是降雹的触发机制。(2)微波辐射计监测显示,降雹期间冰雹云中上升气流将底层空气的感热和潜热向上输送,导致 2 km 以上大气有明显升温,由于低层水汽聚集及冰雹在近地层融化造成降雹时近地层相对湿度、水汽密度增大。冰雹发生在云液态水含量快速增长的波峰上,对冰雹的发生具有较好指示意义。(3)对比南京 3 站风廓线雷达资料表明各站上空环境风场存在一定差异,六合地区降雹前 6 km 高度高空急流有利于六合上空形成有利的辐散形势,降雹时 0~6 km 存在较深厚的垂直风切变,配合地面中尺度低压,降雹最为强烈;南京站降雹时,对流层中下层有一槽过境,而高淳地区冰雹由近地面垂直风切变激发。(4)六合站、高淳站雨滴谱仪分析表明不同降水相态对应的滴谱特征有差异,两站雨滴谱型分别呈指数型、多峰型分布。高淳站雨滴谱仪监测到直径达到 15 mm 的冰雹粒子,六合站冰雹直径最大为 5 mm。两站速度谱大致为单峰型,在较强降水时刻,粒子下落峰值速度在  $3\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。(5)影响六合的超级单体存在钩状回波、回波悬垂、三体散射等雷达回波中尺度特征,地面中尺度低压系统、中低层的中气旋及高层的辐散环流配置造成了雹云中维持较强的旋转上升气流,有利于出现大冰雹。

**关键词:** 冰雹,微波辐射计,风廓线雷达,激光雨滴谱仪

**中图分类号:** P412

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.09.006

## Observation and Analysis of a Hailstorm Event Based on Multi-Source Data

LI Cong JIANG Youshan JIANG Di LI Li ZHANG Pengbo

Nanjing Meteorological Bureau, Nanjing 210019

**Abstract:** The hailstorm process in Nanjing on 28 April 2015 is analyzed by using microwave radiometer, wind-profiling radar, laser precipitation particle spectrometer and other automatic observation data. The results show that: (1) The combination of cold air associated with cold vortex over North China stretching towards the south and lower-level moisture air was found to be the circulation background of the severe hailstorm in Nanjing. The transportation of upper-level cold advection and lower-level warm advection strengthened the formation of the extreme unstable atmosphere stratification. The lasting of surface medium-scale convergence center and convergence line played the triggering role in the hail weather. (2) In the hail clouds, strong updraft transport of low-level air sensible heat and latent heat led to significant increase of ambient temperature above 2 km altitude observed by microwave radiometer. When the hailstorm was in progress, continuous convergence of low-level moisture air and the hail fell into the melting area, causing an increase in low-level relative humidity and vapor density. Integrated liquid water (ILW) showed doublepeak

\* 江苏省气象局预报员专项(JSYBY201411)和华东区域气象科技协同创新基金合作项目(QYHZ201604)共同资助

2016 年 2 月 29 日收稿; 2017 年 4 月 25 日收修定稿

第一作者:李聪,主要从事天气预报与服务研究. Email:linuist@163.com

通信作者:姜有山,主要从事强对流天气的短期监测预警服务技术方法研究. Email:jysnjsqxt@163.com

structure. When the hailstorm process was initiated, ILW increased rapidly and reached maximum, which indicates the beginning of severe convective weather. (3) Comparing wind-profile radar products in 3 stations, various vertical wind fields were observed in different regions. The hailstorm process in Luhe was closely related to the deep vertical wind shear at 0—6 km and the upper-level jet stream, incorporating with the mesoscale cyclone on the ground and middle-level mesocyclone, which made the hail process very intensive. The east movement of trough in lower troposphere was observed when Nanjing was hailing, while the vertical wind shear at lower-level forced continuous hail shooting at Gaochun. The conclusion makes a further understanding of environment condition about vertical structure during this heavy hailstorm event. (4) The micro-structure characteristics of the precipitation at Luhe and Gaochun is discussed by using the laser precipitation spectrometers. The different droplet spectra characteristics corresponding with different precipitation types, the raindrop size distribution pattern in two stations basically showed the form of exponential distribution and multi-peak structure respectively. Gaochun monitored hail with maximum diameter of 15 mm and Luhe was 5 mm. The raindrop velocity distribution both showed single-peak type, and the terminal speed of particles during the severe raining period was between 2 and  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . (5) The severe hail supercell storm at Luhe showed typical features of hook-shaped echo, suspended high strong echo area and TBSS.

**Key words:** hailstorm, microwave radiometer, wind-profiling radar, laser precipitation particle spectrometer

## 引 言

华北冷涡是东亚阻塞形势下在华北地区形成的较为深厚的冷性低值系统,在春、夏季易导致我国东部地区出现雷雨大风、冰雹等突发性强对流天气(Zhang et al, 2008)。冰雹天气发生时间短、局地性强,国内气象工作者已从环流形势、物理量特征等方面对华北冷涡造成的华北、山东等地冰雹天气进行了研究(耿力力,1992;李江波等,2011;郁珍艳等,2011)。据南京地区近10年气候资料统计,4—6月华北冷涡也易造成南京出现强对流天气,在冷涡发展南掉阶段,南京一般处于冷涡南伸的低槽前部,随着冷涡后部冷空气南下,易造成南京发生冰雹天气(如2005年4月、2007年5月、2010年3月等)。沈树勤和李会英(1994)将江苏省降雹天气形势分为4类,其中就包括华北冷涡型,并指出利用探空资料统计的水汽参数、稳定度参数有一定的预报效果。仇娟娟和何立富(2013)通过统计华北冷涡背景下苏浙沪地区冰雹天气的物理量阈值,指出华北冷涡造成的冰雹高发区位于江苏北部,冰雹天气时空急流强盛且偏南,上干下湿呈干对流风暴特征,冰雹由低层不连续线触发。

近年来,新型遥感观测设备已经应用到强对流

天气的分析和监测中,风廓线雷达可以全天不间断获得测站上空大气风场等气象要素随高度、时间的变化,多通道地基微波辐射计能够实时监测地面到高空的温度、湿度等连续垂直廓线,反演的积分水汽和云液水含量能反映大气中水汽变化特征(Knupp et al, 2012; Ware et al, 2003),激光雨滴谱仪可实现对各种降水过程的自动识别,能全天候自动记录降水粒子微结构演变特征,新型探测仪器的观测数据比传统气象观测仪器更具有优势,在天气预报中发挥越来越重要的作用。利用上述新型探测资料,气象工作者针对我国不同地区的暴雨、冰雹等灾害性天气也进行了研究。黄治勇等(2014;2015)利用微波辐射计、风廓线雷达分析了湖北咸宁一次冰雹天气过程中云降水粒子的固、液、气三态动态变换过程,验证了过冷云系统中混合相态的贝吉隆过程理论。刘志雄等(2009)研究表明微波辐射计探测到的对流层低层到高层温度、水汽急剧变化特征可作为诊断强对流系统剧烈发展的参考依据。唐仁茂等(2012)对湖北咸宁两次冰雹天气个例进行了对比,指出降雹前后微波辐射计监测的大气液态水含量有显著变化,对冰雹预警有指示意义。周志敏等(2010)利用风廓线雷达分析了一次冰雹过程,指出风廓线雷达能早于天气图获知冷空气入侵时间,并精细地分析出槽脊过境、冷暖平流等天气系统。激

光雨滴谱资料被用来分析暴雨等天气中降水粒子的微结构特征(陈磊等,2013;周黎明等,2015)。李德俊等(2013)利用雨滴谱仪对武汉一次暴雪天气演变特征也进行了分析。多普勒天气雷达也被广泛应用到致雹的强风暴单体演变及结构特征的研究中(陈秋萍等,2015;黄晓龙和高丽,2016;鲁德金等,2015;徐芬等,2016;郑艳等,2014;周泓等,2014),在短时临近预报中发挥愈发重要的作用。

利用多源观测资料对南京地区冰雹等灾害性天气发生发展以及触发机制的研究工作仍不多见,因此,本文利用地面及高空探测资料、南京地区微波辐射计、风廓线雷达、雨滴谱、多普勒雷达等资料,对2015年4月28日南京冰雹天气发生前后环境条件演变、中尺度对流特征和降雹原因等方面进行分析。探讨新资料在冰雹天气监测预警中的应用,加深对南京地区冰雹发生机制和强风暴演变特征的认识,为今后此类天气的监测预警及相关研究提供参考。

## 1 资料和方法

本文所使用的资料主要有冰雹发生当日高空与地面天气图资料,南京(江宁)国家基准气象站地基微波辐射计资料,南京站、六合观测站、高淳观测站风廓线雷达资料,六合站、高淳站雨滴谱资料及南京站多普勒雷达资料,图1为各类探测仪器的地理分布。

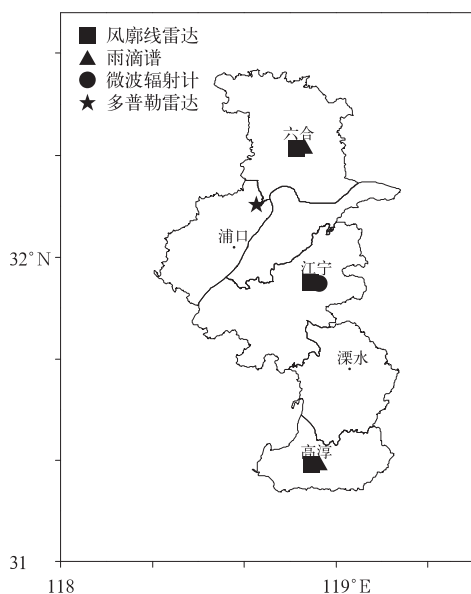


图1 南京各类探测仪器地理分布

Fig. 1 Geographical distribution of meteorological detection instruments in Nanjing

微波辐射计型号为MP-3000A,测量水平面到10 km大气层的气温、相对湿度、水汽以及液态水等垂直廓线,6 min扫描一次。微波辐射计反演出的廓线数据分为58层,0~500 m高度上每50 m输出一个数据,500~2000 m高度上每100 m输出一个数据,2~10 km每250 m输出一个数据。

OTT Parsivel2型激光雨滴谱仪是以激光测量为基础的高级光学粒子测量仪器,可以对探测到的降水粒子进行分类,并同时测量和计算降水粒子的尺度和速度。Parsivel降水粒子谱测量系共有32个尺度通道和32个速度通道,其中粒子尺度测量数据范围为0.2~25 mm,粒子速度测量范围为0.2~20 m·s<sup>-1</sup>,采样间隔为1 min。根据各种观测参数的综合信息,Parsivel能反演计算出瞬时降水强度、降水粒子总数、累积降水量、降水时的能见度和雷达反射因子等。

## 2 天气实况及环流背景

2015年4月28日18:00—21:00南京自北向南出现了剧烈的冰雹天气,各区5个气象观测站中,有3站人工监测到冰雹(表1),为近年罕见。南京全市普遍出现8级以上大风,有自动气象站阵风风速达10级(最大24.8 m·s<sup>-1</sup>)。部分地区出现短时强降水,溧水站小时雨强超过20 mm·h<sup>-1</sup>,六合地区自动站累计雨量超过30 mm,给南京市交通、农业和居民生命财产带来了严重损失。

从28日08时500 hPa高空图来看(图2a),我国大陆中西部为发展的高压脊,华北地区被高空冷涡控制,其中心(564 hPa,-20℃)位于河北东部(38°N、116°E),冷温度槽落后于冷涡低压槽,该冷涡处于发展阶段,冷涡西侧有一横槽维持,白天不断有冷空气沿西北气流渗透,南京地区位于高空冷涡底部的西北气流中。850 hPa上(图2b)山东与安徽交界处有一低值系统存在,低涡后部风向切变明显,白天该涡与南掉的华北冷涡合并加强;华中地区到江南东部一带在暖脊内,回温明显。地面图上(图略),整个华东地区受暖低压控制,南京当天最高气温超过30℃,高层干冷空气叠加在低层暖湿空气上,大气层结处于不稳定状态,为降雹提供了有利的热力条件。

20时(图略)高空华北冷涡中心南掉至山东南部黄海以西洋面,中高层有冷空气扩散南下,

表 1 2015 年 4 月 28 日南京各气象观测站降雹实况

Table 1 The hail event in Nanjing on 28 April 2015

	六合	浦口	江宁	溧水	高淳
降雹时间	18:06—18:10	/	19:56—19:58	/	20:26—20:52
最大冰雹直径/mm	50	/	9	/	23

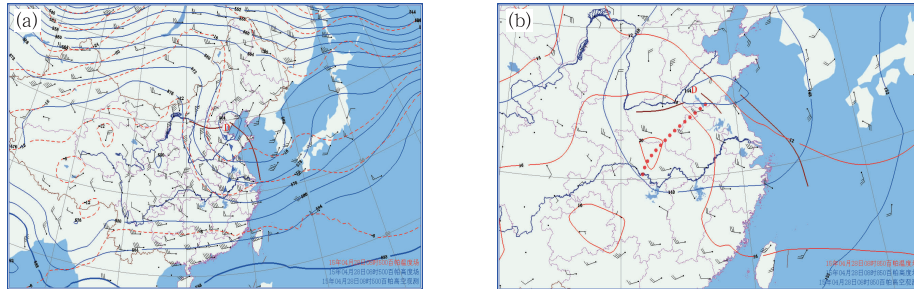


图 2 2015 年 4 月 28 日 08 时 500 hPa(a)、850 hPa(b)高空图

Fig. 2 Situation field of 500 hPa (a), 850 hPa (b) at 08:00 BT 28 April 2015

500 hPa、700 hPa 的  $T-T_d$  均小于  $2^{\circ}\text{C}$ , 表明湿层深厚。在冰雹产生过程中, 低空急流也起着关键作用, 850 hPa 冷涡底部存在东北风与西南风的冷式切变, 南京位于低涡底部西南风中(最大风速  $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 西南急流带来充沛的水汽;  $\Delta T_{850-500}$  达  $31^{\circ}\text{C}$ , 西南急流使近地面层增温增湿, 促使了大气层结不稳定的增强。分析表明, 此次降雹天气发生在低层大尺度暖脊之中, 对流层中高层华北冷涡后部冷空气入侵、低空急流加强等天气系统的合理配置为触发突发性冰雹提供了十分有利的天气尺度背景条件。20 时南京站探空曲线表明(图略), CAPE 值为  $1048\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ , K 指数为  $40^{\circ}\text{C}$ , 对流储存能量大, 层结不稳定明显。0~6 km 风速差达到  $22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 0~3 km 风切变  $>5\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ , 为对流系统的发展创造了条件。由此可见, 较大的对流不稳定能量和相对强的深层垂直风切变构成了强冰雹产生的有利环境条件。

### 3 微波辐射计监测分析

微波辐射计监测显示, 19:20 起低层冷空气开始渗透, 地面气温下降明显(图略)。强对流系统得以发生、发展和维持要有丰富的水汽供应, 这是风暴的主要能量来源, 从积分水汽含量随时间演变(图 3c)可以看出, 整层水汽在 20 时前维持在 4 cm, 呈小幅波动, 强对流天气发生后由于形成冰雹或地面降水, 导致整层水汽减少, 监测显示积分水汽含量开始下降, 随着降雨的减弱 21 时后降至 3 cm。

图 3d 云液态水含量表明, 在强对流发生前水汽有一个聚集增加的过程, 19:30 液态水含量达到第一个峰值  $5.5\text{ mm}$ , 该时次并未有降雨, 这说明南京站上空云系正处于降水产生的发展阶段。随后上升气流将低层液态水带到过冷层, 由于贝吉隆过程和冰晶增长过程消耗液态水, 冰晶增多变大, 导致整层液态水回落至最低值, 图 3c 显示同时次整层积分水汽含量也相应减小。降雹时, 由于冰晶在下落过程中融化、蒸发, 造成液态水含量突然再次快速增长至  $7\text{ mm}$ 。20:40 液态水含量减小为  $0\text{ mm}$ , 对流云团移出南京站上空。

利用微波辐射计反演计算得到的 K 指数, 可以指示对流天气大气层结不稳定条件(李睿劼和李宏宇, 2008; Chan, 2009)。由图 3b 可以看到, 18—21 时 K 指数有很多波动, 呈多个波峰波谷结构, 表明这次冰雹过程大气一直处于不稳定状态, 变化非常迅速。几乎是在降雹开始时的同一时刻, K 指数有急剧上升, 达到一个波峰( $34^{\circ}\text{C}$ 左右), 并且维持约 10 min, 一直持续到降雹结束, 随后 K 指数呈小幅波动下降。

由此可见, 在整个对流天气发生时, 南京上空整层水汽充沛, 由于周围大量水汽不断聚集输送, 积分水汽一直维持较高值, 云液态水含量在降雹开始前降至最低值、降雹时突然增加, 对强对流天气发生有很好的指示意义。

从微波辐射计观测的南京上空整层气温时间剖面来看(图 4), 降雹前半小时起, 近地面气温开始下降, 高空 2 km 以上大气有明显升温, 等温线凸起,

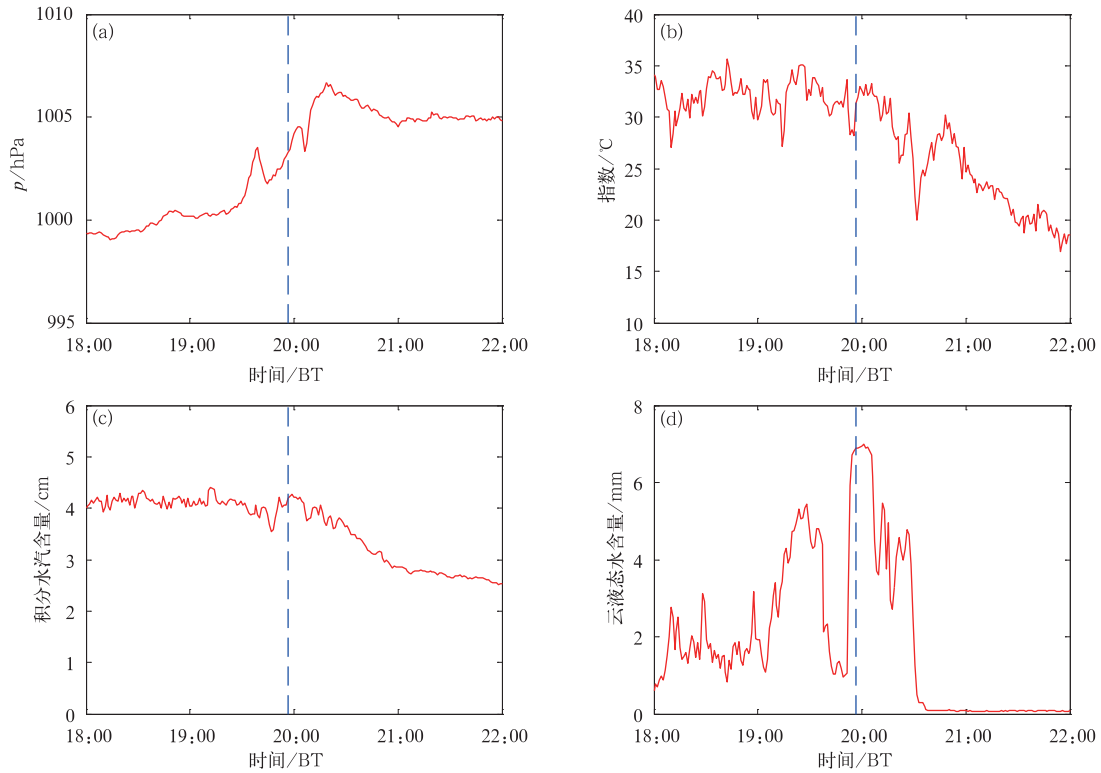


图 3 2015 年 4 月 28 日 18—22 时南京微波辐射计观测要素时间序列

(a)地面气压,(b)K 指数,(c)积分水汽含量,(d)云液态水含量  
(虚线为冰雹开始时刻)

Fig. 3 Time series of the radiometer data measured at Nanjing in 18:00–22:00 BT 28 April 2015

(a) surface pressure, (b) K index, (c) integrated water vapor, (d) integrated liquid water  
(Dashed line is the onset time of hails)

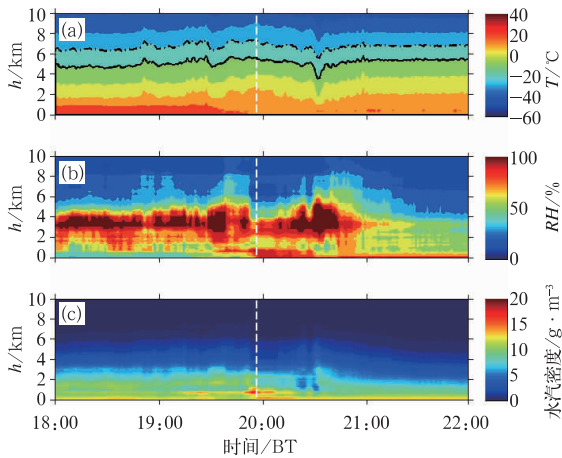


图 4 2015 年 4 月 28 日 18—22 时南京微波辐射计观测数据剖面图

(a)气温,(b)相对湿度,(c)水汽密度  
(白色虚线为冰雹开始时刻)

Fig. 4 Time-height plots of the radiometer data measured at Nanjing in 18:00–22:00 BT 28 April 2015

(a) temperature, (b) relative humidity, (c) vapor density  
(White dashed line is the onset time of hails)

其原因是:在天气系统动力抬升作用下,低层湿空气达到饱和,在抬升凝结高度以上,湿空气按湿绝热上升凝结成水滴释放潜热造成周围环境的温度升高。20 时前后降雹时,高层大气增温最为显著,雹云中较强上升气流将低层空气的感热和潜热向上输送导致等温线上抬;降雹结束后由于南京上空冷空气的入侵,同时在雨滴下落过程中给环境大气降温,水滴蒸发也吸收一部分热量,整层大气开始降温。

在相对湿度图上,降雹前整层大气相对湿度呈 5 km 以上层相对湿度小、0~5 km 层相对湿度大的“上干下湿”结构,4 km 附近大气接近饱和,同时近地面相对湿度维持在 50%左右。降雹前 10 min 开始,近地层相对湿度增大,接近饱和,说明受到西南风急流输送暖湿空气影响,近地面的水汽有明显的汇聚。同时高空冷空气开始侵入,3 km 以上相对湿度迅速减小,3 km 以下在降雹期间,呈“上下湿、中间干”的 3 层结构,1~2 km 处存在的明显干层,21 时以后整层大气相对湿度减小。

在整个降雹过程中,水汽密度超过  $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  的高度集中在  $3 \text{ km}$  以下,冰雹临近时,与 19:50 起近地面相对湿度增大出现时间相同步,  $1 \text{ km}$  处水汽密度在降雹前出现超过  $15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  大值区,表明大气中水汽饱和程度很高。降雹时,近地面水汽密度也接近  $15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  并且一直持续到降雹结束,降雹后  $3 \text{ km}$  以下水汽密度减小。

图 5 为南京站降雹前(19:46)、降雹时(19:57)、降雹后(20:09)的气温、相对湿度、水汽密度垂直廓线,可以看到,水汽的感热和潜热向上输送导致  $1 \sim 4 \text{ km}$  高度的气温在降雹时略上升,  $0, -10$  和  $-20^\circ\text{C}$  层高度分别在  $4.0, 5.5$  和  $7.0 \text{ km}$ , 适宜的  $0$  和  $-20^\circ\text{C}$  层高度有利于冰雹胚胎在生长层内不断增大。降雹前、后  $1 \sim 3 \text{ km}$  高度相对湿度变化不大,  $3 \text{ km}$  以上层相对湿度降雹时减小与冷空气的侵入有关,由于低层水汽聚集及冰雹在近地层融化,近地面相对湿度降雹时接近饱和。图 5c 表明降雹前  $1 \text{ km}$  以下水汽密度在  $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 降雹时  $1.5 \text{ km}$  以下水汽密度有明显的增大,是由于冰晶增大下落至  $0^\circ\text{C}$  以上区融化层时,冰晶融化增加液态水,形成冰雹或降雨,导致近地层水汽密度增大。

### 4 风廓线资料分析

为了了解冷空气活动情况及南京上空风场垂直结构变化,本小结分析了观测高度为  $9 \text{ km}$ 、间隔  $6 \text{ min}$ 、冰雹发生过程中六合站、南京站、高淳站风廓线雷达特征。

图 6a 为六合站风廓线雷达随时间演变,其中  $6.5 \text{ km}$  高度以上 17:12—17:48 探测资料有缺失,故绘图时未能显示出该时段内风场。可以看出在  $6 \sim 8 \text{ km}$  高度上,17:48 由西南风转为西北风,最大风速超过  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,说明降雹前  $20 \text{ min}$  在  $6 \text{ km}$  高度附近存在西北风高空急流,  $500 \text{ hPa}$  高空槽携带强冷空气渗透下来,引起干冷空气下传,使得上下层大气不稳定性增大。六合站降雹时间为 18:06—18:10,在  $4 \text{ km}$  高度以下,18:00 开始从东南风转为偏北风并持续至 18:36,风速加大,由此可见,在六合站降雹时,中低层之间有一低槽过境,  $700 \text{ hPa}$  以下冷空气影响时间略晚于高层。通过分析  $0 \sim 6 \text{ km}$  风切变(图略)可以发现,18:00 时风切变达到  $2.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,随后  $0$  和  $6 \text{ km}$  风矢夹角减小,风切变降至

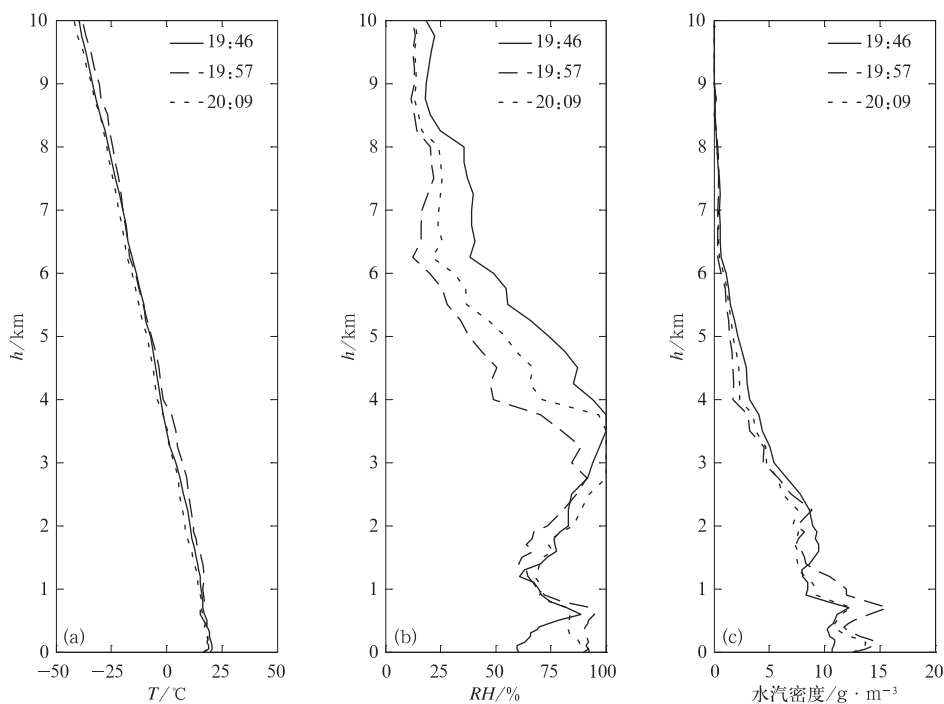


图 5 微波辐射计观测的气温(a)、相对湿度(b)、水汽密度(c)垂直廓线  
 Fig. 5 Profiles of temperature (a), relative humidity (b) and vapor density (c) observed by radiometer at Nanjing Station

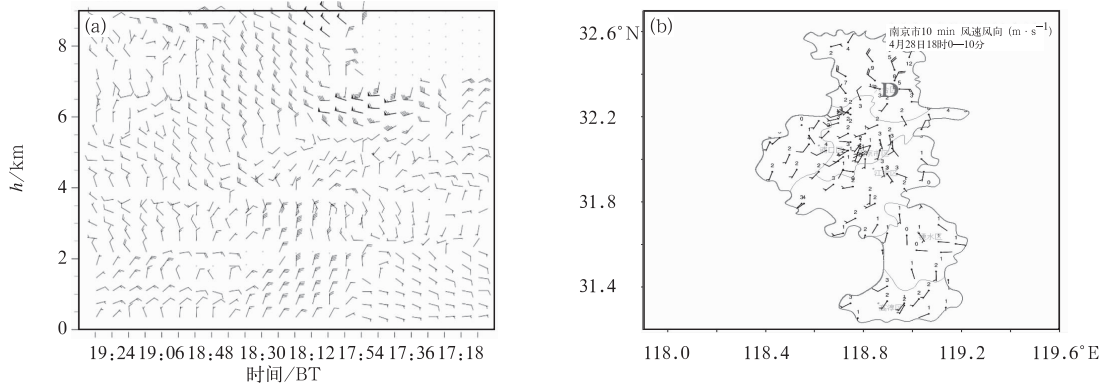


图 6 2015 年 4 月 28 日 (a)17:12—19:30 六合站风廓线雷达演变, (b)18:00 南京地区地面风场  
 Fig. 6 (a) Vertical distribution of wind profile radar data at Luhe Station in 17:12—19:30 BT, (b) surface wind field of Nanjing Region at 18:00 28 April 2015

$1.2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , 随着降雹的开始风切变又增至  $2.1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ; 同时在  $0 \sim 4 \text{ km}$  垂直方向上风向逆转, 说明六合地区降雹开始的时间发生在  $4 \text{ km}$  高度以下被冷平流控制之后、 $0 \sim 6 \text{ km}$  垂直风切变增大的时刻。

由 28 日 18 时南京地面风场发现(图 6b), 六合地区存在明显的气旋性低值系统, 该天气系统在降雹时始终维持, 地面中尺度低压造成冷暖空气的强烈辐合, 触发了不稳定能量的释放。图 6a 中  $6 \text{ km}$  高度 17:48 出现的高空急流维持了高空辐散、底层低值系统辐合的有利形势, 引起强烈的上升运动, 高低空冷暖空气耦合也是造成六合地区冰雹最严重的重要机制。

图 7 南京站风廓线雷达资料显示, 19:36 之前,  $0 \sim 9 \text{ km}$  为一致的偏西风, 风向随高度顺时针变化, 表明南京站上空为暖平流控制,  $3 \text{ km}$  以上西风急流输送暖湿空气明显。19:42 开始, 低层  $0 \sim 3 \text{ km}$  出现偏北风, 表明冷空气开始从低层入侵,  $3 \text{ km}$  以上的暖平流叠加在冷平流以上。随后冷空气不断向高空扩展, 19:48—20:00 在  $3 \sim 5 \text{ km}$  高度监测到有一槽过境, 这说明南京站冰雹发生在中层槽线过境时刻, 冷空气的入侵与暖湿气流的交汇造成了南京站 19:56 出现冰雹, 20:06 之后, 南京站上空基本为冷平流控制, 冷空气达到强盛阶段, 降水区也有所南压。

不同于以上两站的垂直风场结构, 高淳站(图 8)在降雹前, 地面到高层被一致的偏南风场、暖平流控制, 在 20:26 降雹开始时,  $1 \text{ km}$  高度上出现南风 and 北风的垂直切变, 同时在地面上也配合有东西向辐合线(图略)。由此可见高淳发生冰雹的环境

风场和其他两站有所差别, 其主要原因是高淳位于  $\alpha$  中尺度对流系统的西南侧外围, 高淳地区冰雹是

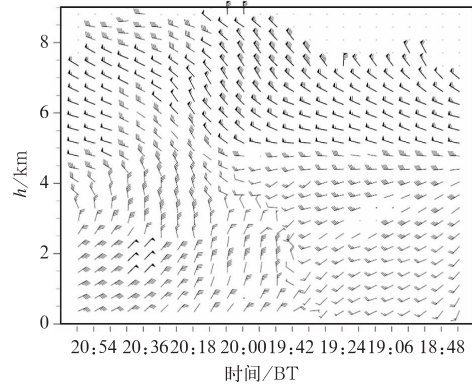


图 7 2015 年 4 月 28 日 18:42—21:00 南京站风廓线雷达演变

Fig. 7 Vertical distribution of wind-profiling radar data at Nanjing in 18:42—21:00 BT 28 April 2015

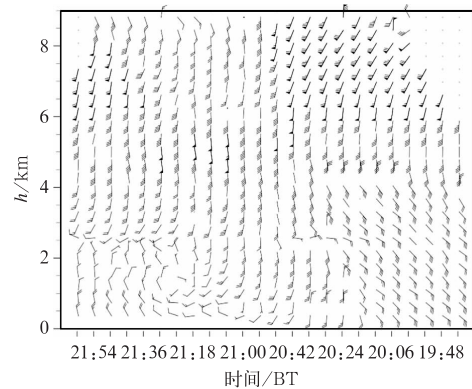


图 8 同图 7, 但为 19:42—22:00 高淳站  
 Fig. 8 Same as Fig. 7, but for Gaochun in 19:42—22:00 BT

暖区中由近地层的冷空气侵入激发的。

## 5 雨滴谱特征分析

雨滴谱特征参量能体现出降水的一些微物理特征,如粒子直径、数浓度、含水量、降水强度等。本文选取数浓度来表征单位体积内某种降水粒子的数量,其中定义雨滴谱数浓度为单位直径间隔内单位体积粒子数目,而速度谱数浓度为单位速度间隔内单位体积粒子数目,进而对整个降雹天气过程中雨滴直径大小和雨滴下落速度加以分析研究。

图9为六合站、高淳站降水粒子雨滴谱数浓度、速度谱数浓度随时间分布,通过分析降水粒子的雨滴数浓度、速度谱数浓度特征,可反映出某一特定尺度雨滴在整个降水过程中发挥的作用。图9a六合降水分为3个部分:18时至降雹结束雨强小,粒子数较少,且小粒子居多,大多只有0.5~2 mm,最大直径为5 mm左右且持续时间较短。19和20时降水强度增大,雨滴谱宽加大,大雨滴数目明显增多,

雨滴最大直径达到9 mm,雨强的增大是由雨滴数密度的增多和滴谱的变宽两者引起的。3个降水阶段中,粒子数浓度峰值都出现在0.6 mm左右,最大数浓度超过 $1000 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,75%的粒子直径在1 mm以下。

同一次降水过程中不同地区降水的微结构参量也有一定的差异,图9b显示高淳站降水时间集中,直径<2 mm的粒子占大多数,这一特征与六合站相近,但是雨滴谱数浓度峰值明显高于六合站,在20:34—20:48,直径为0.4 mm的雨滴谱数浓度达到 $9800 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。同时,高淳站大直径粒子的浓度高于六合,直径>2 mm的粒子数占总数浓度的7%,可见积雨云降水强度大主要是大雨滴和较大雨滴的贡献。高淳谱宽最大达到15 mm左右,说明高淳站雨滴谱仪捕捉到了大直径粒子(冰雹)。图9c、9d分别为六合站、高淳站速度谱分布,两站降水粒子速度< $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度谱数密度占总数密度的比例分别为60%和80%,可见六合站降水粒子的平均下落速度高于高淳站。在降水强度最大时,两

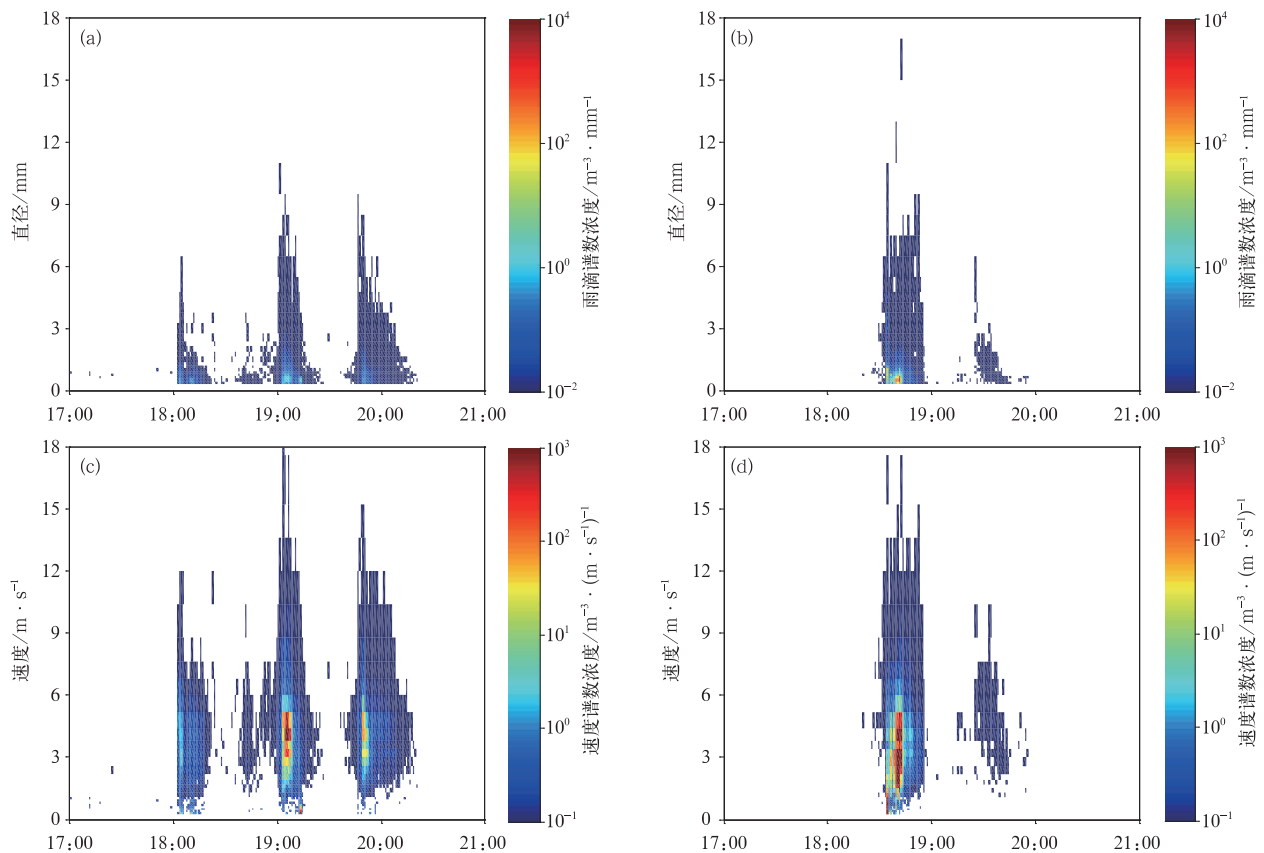


图9 六合站(a, c)和高淳站(b, d)降雹天气过程中雨滴谱(a, b)、速度谱(c, d)随时间演变

Fig.9 Evolution of raindrop size distribution (a, b) and raindrop velocity spectrum (c, d) at Luhe (a, c) and Gaochun (b, d) during the hailing process



站大多数粒子下降末速度在  $3 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 速度谱宽最大都超过了  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

表 1 显示六合站降雹时间为 18:06—18:10, 18:10 之后以降雨为主, 人工观测的冰雹最大直径达到 50 mm, 在图 9a 中该时段内探测到的冰雹最大直径(5 mm)比人工观测要小。19 时后六合站雨滴最大直径多次超过 8 mm, 是由于积雨云内对流加强, 降水强度增大, 从而导致雨滴间相互碰并剧烈, 有利于形成大直径雨滴。高淳站在 20:26—20:52 断断续续观测到降雹, 这段时间内降雨和降雹同时发生, 人工观测最大冰雹直径为 23 mm; 结合图 9b 和 9d 来看, 在 20:30 以后捕捉到了最大直径为 15 mm 的粒子, 并且具有很大的下降末速度(约  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 可以推断当时高淳雨滴谱仪也观测到冰雹。

将六合降水过程分为 3 个阶段, 其中 18:00—18:30 为降雹, 18:30—19:30、19:30—20:30 以降雨为主, 高淳站 20:20—21:00 雨雹共存, 分析六合、高淳不同降水类型时平均雨滴谱、速度谱分布特征(图 10)。

从图 10a 看到, 六合站降雹时, 1 mm 以内的小粒子数浓度超过  $100 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ , 随着粒子直径的增大, 数浓度明显减小; 第二个降水阶段, 雨滴谱最

宽, 数浓度较其他两个时段明显增大; 最后一个降水阶段, 雨滴最大直径达 8 mm, 雨滴谱型呈波动下降; 从谱型来看六合站 3 个降水阶段均呈指数分布, 其中降雹时雨滴谱线下降趋势剧烈。高淳站雨强较六合大, 各尺度档雨滴数浓度也比六合多, 高淳站谱线呈多峰结构, 特别是 6~8 mm 直径段粒子数浓度有一明显峰值, 说明整个降雹过程大气处于不稳定状态。图 10b 平均速度谱表明整个降水阶段两站速度谱起伏变化趋势基本一致, 六合降雹时粒子下落平均速度最小, 高淳站雨雹下落平均速度为  $3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。各谱线上粒子浓度在  $1 \sim 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  存在峰值, 峰值位置略有差异, 六合站 3 个降水阶段粒子速度在  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  附近数密度最大, 而高淳站粒子速度在  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时数目居多, 下降末速度大于  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的粒子数目均显著减少。

## 6 雷达监测的超级单体特征

利用南京多普勒雷达分析这次降雹过程可以发现, 15 时起在江苏中北部地区已形成两条东南—西北向带状对流回波, 对流单体在南移过程中发展加强。图 11a 显示 17:53 起超级单体(编号 1)移至南京市六合上空, 回波中心强度达到 65 dBz, 低层反

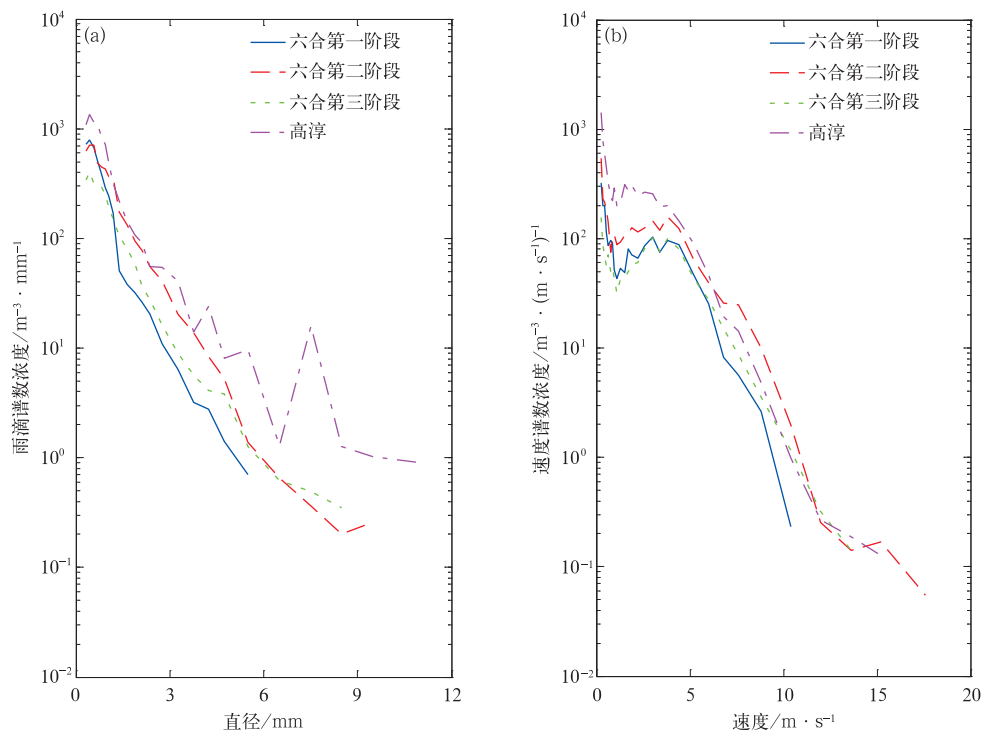


图 10 六合站与高淳站平均雨滴谱(a)、速度谱(b)

Fig. 10 Comparison of average raindrop size distribution (a) and raindrop velocity spectrum (b) between Luhe and Gaochun Stations

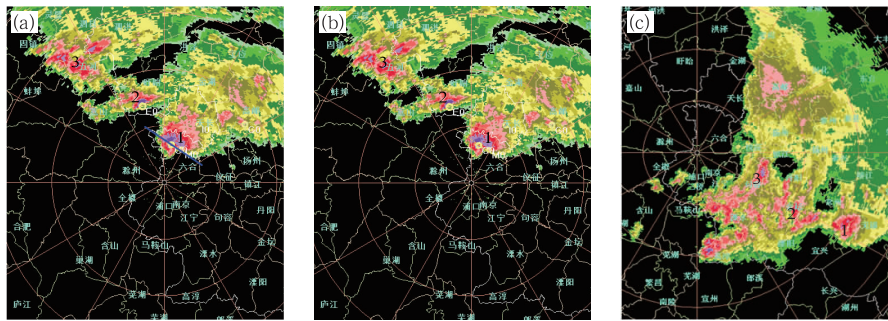


图 11 2015 年 4 月 28 日南京 1.5°仰角基本反射率因子  
(a)17:53, (b)19:58, (c)20:30

Fig. 11 Base reflectivity at elevation 1.5° in Nanjing on 28 April 2015  
(a) 17:53 BT, (b) 19:58 BT, (c) 20:30 BT

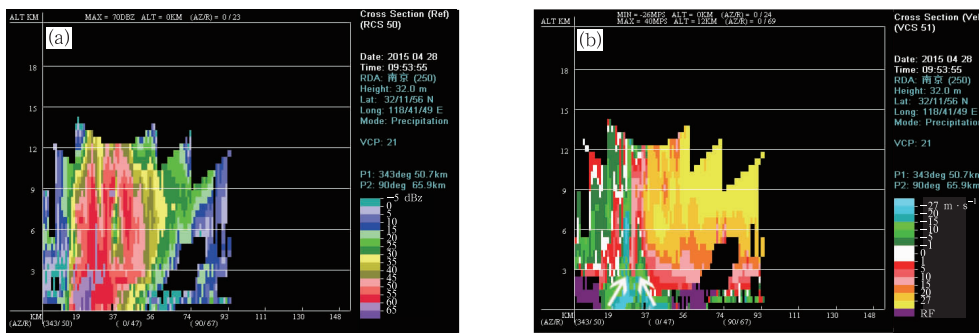


图 12 沿图 11a 中蓝线处作的反射率因子垂直剖面(a)和速度径向垂直剖面(b)  
Fig. 12 Cross section of base reflectivity (a) and base velocity (b)  
along the blue line in Fig. 11a

射率因子呈现明显的倒“V”字型入流缺口,在其入流方向右侧有钩状回波,这也是超级单体风暴的典型特征之一。速度场中识别出风暴中存在两个中气旋,此时六合地面风场存在中尺度低压系统(图 6b),这一超级单体造成六合出现大冰雹,常州雷达在风暴进入其探测范围不久即六合境内时,探测到该单体存在大冰雹的三体散射长钉回波特征(图略)。

沿图 11a 中六合超级单体的反射率因子垂直剖面(图 12a)显示,风暴顶高伸展至 12 km,高悬的强回波中心(>60 dBz)已降至地面,对应强冰雹下降通道,垂直剖面前侧呈现出有界弱回波区和有界弱回波区左侧的回波墙。图 12b 速度剖面显示中气旋发生在超级单体低层“V”字型缺口的上方,风暴内部风场中,两支强的入流气流(箭头处)进入中气旋的上升气流,这种强烈的上升气流非常有利于雹胚成长为强冰雹,风暴顶为反气旋辐散区。

六合地区发生冰雹之后,超级单体 1 逐渐移出南京市,2 号单体在移动中与西南侧分散性对流单

体合并,形成自东北向西南的有序多单体波列(图 11b),19:58 造成江宁降雹的超级单体中心回波强度在 53 dBz 以上,比超级单体 1 弱。随着超级单体过境,引起图 3a 中微波辐射计监测的南京站气压涌升、气温骤降等气象要素的剧烈变化,图 5a 温度廓线显示江宁降雹时 0 和 -20℃层高度分别为 4.0 和 7.0 km,适宜的 0 和 -20℃层高度有利于产生冰雹。

2 号多单体波列西南侧的回波在移动中逐渐加强,对流风暴发展强盛,20:30 起导致高淳出现冰雹的超级单体回波强度也达到 60 dBz 以上(图 11c)。从此时该超级单体剖面可以看出(图略),60 dBz 回波高度在 3 km,强回波略向前倾,存在明显的回波悬垂和有界弱回波区,50 dBz 回波扩展到 -20℃等温线以上,回波顶高在 14~15 km。

### 7 结 论

本文利用多种新型观测资料,对 2015 年 4 月

28 日发生在南京市的冰雹天气进行了分析,主要有以下结论:

(1) 这次冰雹天气过程发生在华北冷涡南掉背景之下,冷涡后部干冷空气叠加在低层大尺度暖脊上,西南急流输送大量的暖湿空气,致使大气层结具有很强的不稳定性;较强的垂直风切变,低层足够的水汽供应,为降雹发生发展提供了有利的环境条件。

(2) 微波辐射计监测显示南京站积分水汽含量维持在 4 cm 左右,水汽密度演变表明大量水汽聚集在 3 km 以下,3 km 以下相对湿度呈“上下湿、中间干”的 3 层结构。云液态水变化呈双峰结构,在降雹前迅速增长,随后回落至低值,降雹时随着水汽辐合输送过来大量水汽,同时冰晶增大下落至融化层后开始融化、蒸发,导致近地层相对湿度、水汽密度比降雹前有所增大,也造成液态水含量突然再次快速增长,冰雹发生在其增长的波峰上,降雹后迅速回落,对预报强对流天气的发生与增强起到很好的指示作用。

(3) 对比南京 3 部风廓线仪资料表明,六合地区降雹前高空前倾槽叠加于地面暖空气之上,增加了大气的对流不稳定性,6 km 高度高空急流有利于六合地区上空形成有利的辐散形势;降雹时 0~6 km 风切变为  $1.2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,伴随地面中尺度低压及 700 hPa 以下冷空气过境,降雹最为强烈。南京站降雹时,对流层中下层有一槽过境,而高淳地区冰雹由近地面垂直风切变激发;在南京站和高淳站降雹时,地面中尺度辐合线也是产生冰雹的主要触发机制,超级单体风暴正是在此辐合线上发展加强。六合站、南京站降雹开始时间发生在 2 km 以下冷空气入侵之后,能为短临预报提供一些依据。

(4) 比较六合站、高淳站雨滴谱仪发现,降雹、降雨、雹雨共存这三种降水相态对应不同雨滴谱型:高淳站谱线呈多峰结构,六合站在 3 个降水阶段雨滴谱呈指数分布。两站速度谱大致为单峰型,在较强降水时刻,降水粒子峰值速度在  $3 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。六合站、高淳站雨滴谱仪分别探测到直径为 5 和 15 mm 的冰雹粒子。

(5) 造成南京市降雹的强风暴为超级单体,其中六合和高淳的超级单体尺度范围、强度高于江宁。六合雷达探测到了超级单体降雹时的典型特征,如风暴低层的入流缺口、勾状回波和有界弱回波区、三体散射等,与之对应的中低层伴有较深厚的中气旋。

## 参考文献

- 陈磊,陈宝君,杨军,等,2013. 2009—2010 年梅雨锋暴雨雨滴谱特征[J]. 大气科学学报,36(4):481-488.
- 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[J]. 气象,41(1):25-33.
- 耿力力,1992. 华北冷涡降雹特征[J]. 山东气象,(3):16-20.
- 黄晓龙,高丽,2016. 2014 年 3. 19 台州冰雹过程中尺度分析[J]. 气象,42(6):696-708.
- 黄治勇,徐桂荣,王晓芳,等,2014. 基于地基微波辐射计资料对咸宁两次冰雹天气的观测分析[J]. 气象,40(2):216-222.
- 黄治勇,周志敏,徐桂荣,等,2015. 风廓线雷达和地基微波辐射计在冰雹天气监测中的应用[J]. 高原气象,34(1):269-278.
- 李德俊,熊守权,柳草,等,2013. 武汉一次短时暴雪过程的地面雨滴谱特征分析[J]. 暴雨灾害,32(2):188-192.
- 李江波,王宗敏,王福侠,等,2011. 华北冷涡连续降雹的特征与预报[J]. 高原气象,30(4):1119-1131.
- 李睿劼,李宏宇,2008. 微波辐射计计算准 K 指数对降水的反应[J]. 气象,34(S1):185-190.
- 刘志雄,戴泽军,彭菊香,等,2009. 基于 LAPS 的一次局地强冰雹过程分析[J]. 暴雨灾害,28(4):313-320.
- 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[J]. 气象,41(9):1104-1110.
- 仇娟娟,何立富,2013. 苏沪浙地区短时强降水与冰雹天气分布及物理量特征对比分析[J]. 气象,39(5):577-584.
- 沈树勤,李会英,1994. 江苏冰雹强对流天气条件分析及其物理解释[J]. 气象,20(9):25-29.
- 唐仁茂,李德俊,向玉春,等,2012. 地基微波辐射计对咸宁一次冰雹天气过程的监测分析[J]. 气象学报,70(4):806-813.
- 徐芬,郑媛媛,慕熙昱,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.
- 郁珍艳,何立富,范广洲,等,2011. 华北冷涡背景下强对流天气的基本特征分析[J]. 热带气象学报,27(1):89-94.
- 郑艳,李云艳,蔡亲波,等,2014. 海南一次罕见强冰雹过程环境条件与超级单体演变特征分析[J]. 暴雨灾害,33(2):163-170.
- 周泓,段玮,赵爽,等,2014. 滇中地区冰雹的多普勒天气雷达及闪电活动特征分析[J]. 气象,40(9):1132-1144.
- 周黎明,王庆,龚佃利,等,2015. 山东一次暴雨过程的云降水微物理特征分析[J]. 气象,41(2):192-199.
- 周志敏,万蓉,崔春光,等,2010. 风廓线雷达资料在一次冰雹过程分析中的应用[J]. 暴雨灾害,29(3):251-256.
- Chan P W, 2009. Performance and application of a multi-wavelength, ground-based microwave radiometer in intense convective weather[J]. Meteor Z,18(3):253-265.
- Knupp K R, Ware R, Cimini D, et al, 2012. Ground-based passive microwave profiling during dynamic weather conditions[J]. J Atmos Ocean Technol,26(6):1057-1073.
- Ware R, Carpenter R, Güldner J, et al, 2003. A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid[J]. Radio Science,38(4):8079.
- Zhang C, Zhang Q, Wang Y, et al, 2008. Climatology of warm season cold vortices in East Asia: 1979—2005[J]. Meteor Atmos Phys,100(1):291-301.