黄晓龙,高丽.2016.2014年3.19台州冰雹过程中尺度分析.气象,42(6):696-708.

2014年3.19台州冰雹过程中尺度分析*

黄晓龙 高 丽

浙江省台州气象局,台州 318000

提要:利用常规观测资料、中尺度自动站数据、新一代单站雷达资料及组网拼图产品、FY-2C 红外云图产品及逐 6 h NCEP 再分析资料,对 2014 年 3 月 19 日发生在浙江台州地区的一次大范围冰雹过程进行了中尺度过程分析。研究表明:(1) 通过 环境场条件分析和订正后的探空资料诊断发现:台州地区处于下湿上干层结不稳定,在午后地面温度升高、对流有效位能增 加、且 0~3 和 0~6 km 垂直风切变较大的情况下有利于出现风雹类强对流天气。(2) 根据触发天气尺度对流系统活动的冷 锋移动和演变情况,可以将整个过程分为四个阶段,台州雷雨大风和大范围冰雹过程主要产生于第三阶段。(3) 成熟期根据 系统的回波形态可以分为飑线形成、弓形回波、雹暴单体爆发三个阶段,在各时段的自动站要素和雷达产品上均表现出与其 他时段显著不同的要素特征。(4) 近地层充沛的水汽、较低的抬升凝结高度,南支槽、北方横槽南摆及高空急流出口区左侧造 成的系统性抬升,地面冷锋、中尺度辐合线及地形的触发作用,是飑中系统台州地区爆发加强,从而造成冰雹大风天气的主要 原因。(5) 地市级预报员充分利用本地自动站传输的时效性优势,开展中分析补充订正业务能有效提升临近预报的质量。 关键词:中分析,冰雹,雷雨大风,飑线,弓形回波,超级单体

中图分类号: P458 文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.06.005

Mesoanalysis of a Hail Process in Taizhou on 19 March 2014

HUANG Xiaolong GAO Li

Taizhou Meteorological Office of Zhejiang, Taizhou 318000

Abstract: Using the data of conventional observation, mesoscale automatic station and new generation monostation radar, and networking and mosaic products, FY-2C infrared images and 6 h NCEP reanalysis data, mesoanalysis was taken on the process of widespread hail in Taizhou of Zhejiang on 19 March 2014. The results show that: (1) According to the analysis of environmental field conditions and the corrected sounding data, the lower wet and upper dry structure in Taizhou was unstable. In the situation of increased ground temperature and convective available potential energy and relatively large vertical wind shear at 0-3 km and 0-6 km after noon, wetness was conductive to the formation of severe convective weather such as the gale and hail. (2) According to the movement and evolution of cold front that triggered the movement of synoptic-scale convective system, the whole process could be divided into four stages, and the thunderstorm, gale and widespread hail appeared in the third stage. (3) The mature stage could be divided into three stages of squall line formation, bow echo and outbreak of hailstorm cells due to the echo forms of the system, which revealed the significantly different element characteristics in the automatic station elements and radar products compared to other stages. (4) The abundant vapor in the nearsurface layer, lower lifting condensation level, southern oscillation of southern branch trough and northern transverse trough, systematic lifting on the left of upper-level jet stream exit area, and triggering of cold front near surface, mesoscale convergence line and landform were the main causes for the enhanced

第一作者:黄晓龙,主要从事雷达资料应用研究.Email.huangxiaolong_5@163.com

^{*} 浙江省气象科技计划项目青年项目(2012QN09)资助

²⁰¹⁵年6月9日收稿; 2015年11月5日收修定稿

outbreak of squall system in Taizhou, leading to hail weather with gale. (5) Forecasters make full use of timeliness advantages of automatic stations, carrying out the correction of mesoanalysis work can effective-ly improve the quality of nowcasting.

Key words: mesoanalysis, hail, thunderstorms, squall line, bow echo, supercell

引 言

随着气象探测仪器精度的提高、中尺度模式的 不断进步、预报手段的丰富,我国短时临近预报预警 水平较以前明显提高(李泽椿等,2014)。但由于中 小尺度系统与环境场存在复杂的相互作用(丁一汇, 2005),强对流天气的预报水平仍然不高,和社会需 求存在差距。近年来国内较典型的过程如 2011 年 "4.17 华南强对流"(张涛等,2012)、2012 年 4 月南 方地区大范围冰雹雷雨大风(马中元等,2014)、2013 年"3.28 华南飑线"等(吴晓宏等,2013;农孟松等, 2013),2015 年"6.1 湖北监利龙卷天气事件"(郑永 光等,2016),均造成了人员伤亡和重大财产损失。



2014年3月19日下午起浙江多地出现强对流天 气。杭州、金华、台州和温州相继出现冰雹,其中以 台州受灾最为严重,全市6县3区除三门、温岭、玉 环外均不同程度遭受冰雹袭击,洪家国家气象站测 得冰雹最大直径3.3 cm,此外多地还出现了雷雨大 风记录。图1a和1b分别为记录或报告的冰雹和雷 雨大风受灾地点分布图,数字为灾情发生时间。这 次冰雹及雷雨大风过程共造成农作物受灾面积 3107.3 hm²;倒塌房屋36间,直接经济损失7159.5 万元。对于这次过程,各级台站从短期到短临、预警 均出现不同程度漏报。天气过程本身的复杂性固然 是重要原因,然而主观上中分析是否到位、预报流程 是否合理更是值得探讨的重要环节。

中分析概念最早由藤田哲野提出(Fujita,1955;



图 1 2014 年 3 月 19 日浙江台州地区冰雹落区(a)和过程极大风分布(b) Fig. 1 Distribution of hail area (a) and extremely strong wind (b) in Taizhou of Zhejiang on 19 March 2014

1956)。20世纪 70年代美国人米勒(Miller,1972; Crisp,1979)通过对环境场条件的中尺度分析总结 出"天气型识别法"(流型识别法)。20世纪 90年代 初,美国天气局开始推行地面天气统一分析过程,强 调对干线、边界线等与中尺度系统发生发展相关的 分析(Uccellini,1991)。在我国,流型识别法是应用 较广的一种中分析技术(丁一汇等,1982;郑媛媛等, 2011;2004;郝莹等,2007;2012);最近,许爱华对我 国中东部所有强对流进行了总结,通过 100 个过程 将强对流天气形势分成 5 类配置(许爱华等,2014)。 然而,也有文献指出该方法对局地强天气容易漏报 (王秀明等,2014),易出现实际天气形势难以归类、 流型似是而非(俞小鼎,2011)、暖区影响系统分析困 难(包澄澜,1986)等问题。国家气象中心 2009 年以 来制定《中尺度天气分析业务技术规范》(以下简称 《规范》)后多次修订,其中 2011—2012 年作了重大 修订。新《规范》较老版分析项目更精简,流程更合 理,且对分类强对流的分析预报具有较好的指导。 《规范》的一大特色是在对流环境场分析中的天气图 分析、物理量场诊断,以及中尺度过程的 MCS 环境 条件场分析中均突出了雷暴三要素加垂直风切变分 析的配料法基本思路。"配料法"思想由来已久(陶 诗言,1980),是一种基于强对流产生基本条件而形 成的预报思路(Doswell et al,1996;俞小鼎,2011), 具备较好的动力学基础。随着观测资料的丰富,基 于配料法的强对流分析业务日趋成熟(张小玲等, 2012;张涛等,2013)。尽管存在复杂系统下分类预 报难、配料指标定量化不好把握等困难,仍然具有很 高的业务使用价值。我国的中分析业务起步较晚 (张涛,2014)。早期的一些中分析与有限的中小尺 度观测和预报试验相关(章淹,1965;杨国祥等, 1977;寿绍文等,1993;陶诗言等,1999)。

近年来,中分析在暴雨、强对流预报中越来越受 重视(漆梁波等,2009),分析个例也日趋增多(陈永 仁等,2013;崔春光等,2013;李改琴等,2014;张一平 等,2014;蔡森等,2014)。分析资料也由实况观测数 据向模式同化资料延伸(漆梁波,2015)。然而,受规 范完善性和平台的局限,在内容、流程及环节上仍不 尽统一、合理。目前,尽管中分析个例越来越多,基 于新《规范》的中分析过程相对较少。本文将利用常 规观测数据、中尺度自动站数据及温州、台州新一代 雷达资料和长江流域及华东雷达组网拼图产品从环 境条件分析和中尺度过程分析两个角度、严格遵循 《规范》(2013 版)思路,对这次冰雹过程进行中分 析,探讨过程原因,以期强化中分析思路、完善中分 析流程,提高强对流的预报预警水平。

1 环境场条件分析

对流天气环境场分析主要基于"配料法"思路针 对产生对流天气发生发展的必要条件(水汽、稳定度 和抬升)和增强条件(垂直风切变条件)等,从等压面 分析和局地探空分析两方面对大气环境场的相关气 象要素进行分析,形成反映对流性天气发生发展的 6 h 以外的短时和短期预报综合分析。

1.1 天气图分析

从 08 时的常规资料形势场上分析(图 2),长江 流域及我国南方大部分地区为显著湿区,具备对流 天气发展的基本水汽条件。同时 500 hPa 上在湖北 地区及安徽、浙江一线存在温度露点差>15℃的干 舌区,表明上述区域存在"下湿上干"的不稳定层结。 另外,500 hPa 上我国东部沿海地区为 12 h 显 著降温区控制,其中从山东到广东东部地区有一宽



图 2 2014 年 3 月 19 日 08 时(北京时,下同)台州地区环境场条件中分析 (a)水汽条件,(b)热力不稳定条件,(c)抬升条件,(d)综合分析 Fig. 2 Mesoanalysis about ambient field in Taizhou at 08:00 BT 19 March 2014 (a) vapor condition, (b) thermal instability, (c) lifting condition, (d) comprehensive analysis

广的温度槽。从配置细节上看,浙中南沿海地区为 上述三种不稳定系统配置叠加地区,因此相对来说 不稳定条件最为理想。抬升及垂直风场条件方面, 中纬度地区为横槽,槽前为西北偏西气流,南支槽位 于湖北广西一线。在冷暖气流交汇下,850 hPa 切 变位于苏北、安徽、湖北一线,地面长江以南一线为 静止锋。随着横槽东移南下,850 hPa 切变和地面 静止锋有快速南压的趋势,天气尺度的抬升运动为 中尺度系统的发展创造了有利的条件。从垂直风切 变条件上来看,700 hPa 上从广西到浙江一线有一 条西南气流大风速带,和 500 hPa 的南支槽前的西 南急流几乎重叠,特别地在闽北和浙中南一带,上述 区域和 200 hPa 的高空急流重叠,表明该地区存在 深厚垂直风切变,在不稳定层结和水汽具备的条件 下有利于对流系统的维持和增强。综合上述条件来 看,湖北中东部、安徽及浙江地区相比其他地区处于 最有利于强风暴发展的形势下(图 2d 上紫色虚线所 围区域)。

1.2 探空综合分析

图 3a 为 2014 年 3 月 19 日 08 时台州站探空 图。探空热力学参数为:沙氏指数(SI)-3.75℃, 抬升指数(LI)5.27℃,有利于强雷暴,但湿层低于 850 hPa,近地面层存在逆温,因而 SI、LI 指数可能 失去代表性;K 指数为 23,分析贡献因子: $T_{850} - T_{500}$ 为 28℃,显示中低层大气温度直减率非常大, 850 hPa 露点温度为 12℃,基本满足强对流的水汽 条件,但 700 hPa 温度露点差为 17℃,显示中层明 显偏干。这部分贡献使得 K 指数数值较低,但不能 因此而认为 850~500 hPa 层结稳定。从湿层上看,



2.5 km 以下为湿层,以上为干区,但在4 km 处有一 较薄湿区。总的来看,层结条件为下湿上干的配置, 是有利于强对流发展的。从能量条件来看,对流抑 制能量为0,但 CAPE 值也为0,但这是08 时的资 料,如果用台州地区午后地面温度上升后的气温(19 日 20 时最高温度)和露点作探空订正的话,可以得 出订正后的 CAPE 值接近1300 J•kg⁻¹(图 3b),因 此是适合对流发展的。另外,从该探空订正图上可 以看到,CAPE 多集中于0℃层甚至-20℃层之上, 0℃层位于4 km 左右,这对大冰雹的形成是有利的。

探空动力学分析:近地层风速较小而中高层风 速较大且均存在急流,说明 0~3 和 0~6 km 垂直 风切变均很强(22 和 22.51 m • s⁻¹),在具备较强的 不稳定能量的条件下十分有利于风雹类强对流天气 的产生。但考虑低层的湿度条件不是特别显著,因 此出现强降水类超级单体的可能性不会太大。

综合以上分析:可以得出台州地区下湿上干层 结不稳定的情况下在午后地面温度升高、对流有效 位能增加、且 0~3 和 0~6 km 垂直风切变较大的 情况下是有利于出现风雹类强对流天气的。

2 对流天气中尺度过程分析

2.1 对流系统演变分析

图 4a~4e 是 19 日 08-20 时逐 3 h 华东地区雷



图 3 2014 年 3 月 19 日台州地区探空分析 (a)08 时洪家站(58665)探空,(b)洪家站(58665)经过台州午后 14 时地面订正后的探空 Fig. 3 Sounding analysis in Taizhou on 19 March 2014 (a) sounding of Hongjia (58665) at 08:00 BT,(b) sounding of Hongjia (58665) revised by surface temperature of Taizhou at 14:00 BT

泉

达组网和地面分析的叠加图。从图 4a 可以看出,冷 空气尚未向南爆发,主要地面影响系统为长江流域 以南的静止锋,雷达回波上静止锋雨带在静止锋前 部风速辐合较大处发展得较为旺盛。11时(图4b), 系统东移并逐渐减弱,在回波上对应静止锋雨带发 展到一定程度以后开始减弱;西侧冷空气开始南下, 11 时地面图上安徽铜陵到湖南浏阳一线以北为 3 h 正变压区(图略),在回波上对应于一条冷锋雨带逐 渐由弱(图 4b)变强(图 4c)。与此同时这段时间在 浙江东部(台州)地区午后气温升高,负变压明显,湿 度很大,并且一直维持一条东西向的静止锋辐合线 存在,该系统的存在使该地区的水汽辐合加强,湿度 继续增大。16:30前后回波带呈现出后侧入流缺口 (RIN)、前侧强反射率因子梯度区等弓形回波特征。 表明这期间在发生冰雹的同时伴有雷暴大风过程存 在,17时(图4d),冷空气爆发南下,对应冷锋雨带大 范围南压东移,其中东端回波进入浙江境内中西部 地区时,在层结不稳定增加、垂直风切变增强的条件 下对流活动明显增强;从14时的云图与200hPa流 线的叠加图(图略)上也可以看到,200 hPa 上浙江 地区为分流区,冷锋与之前减弱的静止锋在高空云 系上结合在了一起,其北侧呈现出明显的辐辏状发 散特征。冷锋雨带在继续经过台州地区高温高湿的 环境条件和边界层辐合线的触发作用下继续加强, 呈现有组织的飑线形态(图 4d)。20 时,爆发的飑线 入海维持一段时间后减弱,冷锋继续南压,在移出有

利的环境条件场之后强度逐渐减弱。

2.2 对流系统成熟阶段特征对比

整个回波带在浙江境内东移南压过程中,一共 经历了三段比较明显的成熟特征的时间段(图略)。 第一段是在15时前后系统经过金华城区之后,松散 的回波发展起来,组织成有序的飑线形态,强度在 55~60 dBz。之后回波带分裂成几个单体;第二段 是在经过台州境内后,回波带重新组织,16:20之后 呈现出明显弓形回波特征的后侧入流缺口,其中在 仙居境内的单体强度达到 65~70 dBz,临海永丰自 动站出现 12 级大风(下文简称为飑线型弓形回波阶 段);之后回波带分裂,两侧回波减弱,中间单体爆发 增强到 65~70 dBz,并开始超前于整个飑线回波 带,17:15之后经过台州主城三区(第三段),黄岩、 椒江等地先后出现大范围冰雹(下文简称为雹暴单 体爆发阶段),后此单体略减弱,入海维持一定强度; 18:30 后减弱消散。接下来,运用地面观测数据对 在台州境内后两个阶段的特征做一分析,并对这两 个阶段的观测特征进行简要的对比。

2.2.1 自动站特征对比分析

图 5 是 15—20 时地面瞬时风向风速、气温和海 平面气压的观测要素演变图。其中弓形回波阶段选 取临海本站和永丰站为代表站;雹暴单体爆发阶段 选取洪家基本站为代表站。永丰、临海和洪家的影 响时段分别用黑色、蓝色和红色虚线间隔来表示。从



图 4 2014 年 3 月 19 日 08—20 时逐 3 h 华东地区雷达组网和地面分析叠加图 (a)08 时,(b)11 时,(c)14 时,(d)17 时,(e)20 时 Fig. 4 The 3 h radar Mosaic and surface analysis in 08:00-20:00 BT 19 March 2014 (a) 08:00 BT,(b) 11:00 BT,(c) 14:00 BT,(d) 17:00 BT,(e) 20:00 BT



两个阶段各站要素的变化可以看出如下一些对比特征:首先,从影响时段的瞬时风速来看,第二阶段风力明显大于第三阶段,这显示出弓形回波阶段的主要特征是地面大风。从洪家站风力演变还可以看出

影响时段具有前低后高的不对称双峰分布的特征, 这是因为雹暴单体爆发后超前于飑线回波后先后经 过洪家站所造成的。这一点在之后成熟阶段的雷达 回波特征上也可以看出来。其次,从温度变化看,影 响时段永丰站温度降幅较洪家站要大,而基础温度 较洪家站高。值得一提的是雹暴单体爆发阶段洪家 站温度呈现出先升后降的特征。这也是和飑线大风 阶段所不同的一个特色。再次,由于永丰自动站要 素缺少气压,因此只能选取附近的临海一般站做对 比。从气压变化情况来看,洪家站影响阶段气压呈 典型的先升后降的雷暴高压特征。而临海站的气压 变化以升高为主,波动不太明显。但弓形回波经过 临海站时强度已较之前有所减弱,在飑线成熟阶段 由于中高压和尾流低压的出现气压呈现明显波动虽 然已经得到普遍证实和肯定,但本次飑线型弓形回 波过程的实际气压场细致特征还有待进一步的证实 和探讨。

2.2.2 飑线不同成熟阶段雷达产品特征对比分析

(1) 弓形回波阶段

弓形回波(Fujita,1978)是产生地面非龙卷风灾 害的典型回波结构(Johns et al, 1987; 陶岚等, 2014)。弓形回波具有各种不同尺度,单体可以呈现 弓形回波形态,多单体对流带可以形成普通经典弓 形回波,飑线回波也可以呈现弓形形态(Klimowski et al,2004)。另外,其来源也分几种,可以是松散的 单体、飑线,也可以是超级单体(Klimowski et al, 2004)。本次过程中台州第一阶段造成雷暴大风过 程的弓形回波是在更大背景尺度上的冷锋飑线的一 个部位上发展而成的。从弓形回波发展成熟前的回 波动画上看(图略),该回波进入台州后移速明显加 快,超过了50 km · h^{-1} 。图 6a 是弓形回波发展到 成熟阶段前一个体扫时刻(16:29)的台州雷达 1.5° 仰角反射率因子图,图 6b 是相应时刻沿图 6a 中 AB 方向作的速度剖面。从反射率因子图可以看出以下 一些"显著弓形回波"特征:(1)距离雷达 75 km 处 方位角 300°附近有一高反射率因子梯度区;(2)及 其后侧表明强下沉后侧入流的弱回波通道和中层径 向辐合,这在速度剖面图上得到了很好的印证:中层 人流辐合强度和低层出流强度均超过了 $27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (3)同时,高悬前倾的形态特征表明了弱回波区的存 在;(4)根据径向速度场的符号,还可以在速度剖面 上推测出该弓形回波前侧入流气流运动轨迹,前部 辐合及后部辐散出流的位置。



图 6 2014 年 3 月 19 日弓形回波阶段雷达产品特征 (a)16:29 台州雷达 1.5° 仰角反射率因子 产品(R19), (b)沿(a)中 AB 作的速度垂直剖面 (蓝色箭头为气流流向), (c)温州雷达 16:29 垂直累积液态水产品(VIL), (d)同(c),但为16:34, (e)同(c),但为16:40, (白色箭头指示系统演变情况), (f,g,h)沿 AB作的反射率因子垂直剖面,时间同(c,d,e) Fig. 6 Characteristics of radar products in the bow echo phase on 19 March 2014 (a) reflectivity at 1.5° at 16:29, (b) VCS section along AB in (a) (the blue arrow is for airflow), (c) VIL of Wenzhou Radar at 16:29, (d) same as (c), but at 16:34, (e) same as (c), but at 16:40 (the white arrow indicates the system evolution), (f, g, h) RCS sections along AB, the time is the same as in (c, d, e)

垂直累计液态含水量(VIL)及其演变情况是分 类识别强对流天气类型的有利手段。研究表明(张 涛等,2013),对于冰雹或大冰雹,VIL 一个体扫激增 $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,达到 $40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。而对于雷暴大风, VIL 一个体扫激减 $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,本次过程中弓形回 波成熟阶段前的一个体扫内(图 6d 和 6e),人流气 流最强一侧的区域对应的 VIL,从 60~65 kg · m⁻² 降低到了 $50~55 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,在接下来的一个体扫时 间内 该 VIL 下 降 区 域(临海 永 丰)出 现 了 $35.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的瞬时极大风,时间上相当对应。与此 相反的是,前一个体扫内弓形回波南侧的对流反射 率因子出现了加强,VIL 在一个体扫内出现了 5 kg •m⁻²左右的增加,从观测实况看,弓形回波南侧仙 居境内的冰雹尺寸和影响范围也分别较同一时间段 内临海地区的要大一些和广一些。

雷暴大风的另外一个明显特征是强回波质心的 下降。从极大风观测记录前连续三个体扫的反射率 因子垂直剖面(图 6f、6g 和 6h)可以看出,强回波质 心的高度在两个体扫的时间内下降了 3.5 km,从 16:29 的接近 5 km 左右下降到了 16:41 的1.5 km, 这反映出该区域强盛的下沉气流,预示着近地层下 击暴流或雷暴大风的出现。

(2) 雹暴单体爆发阶段

弓形回波成熟阶段之后,系统组织程度开始减 弱,弓形特征逐渐消散,整个系统逐渐分裂成三个单 体,其中北面单体向东移动,逐渐消亡。而右侧单体 逐渐向中间单体靠拢,合并后明显爆发加强,VIL激 增,从17:15的60~65 kg·m⁻²增加到17:21的70 ~75 kg•m⁻²(图7k和7l)。图7a是中间和右侧单 体合并后发展到成熟阶段(17:27)叠加风暴产品和 风暴属性表后的组合反射率因子图。由图 7a 可见, 椒江、黄岩地区回波发展旺盛,最大反射率因子达到 74 dBz, VIL 为74 kg · m⁻²(本地冰雹阈值 55 kg · m⁻²),均明显超过冰雹的雷达产品特征值范围(胡 胜等,2015;鲁德金等,2015)。回波顶高在 14 km 以上(图 7b)。从低层到高层各仰角的反射率因子 图对比来看(图 7c、7e、7g 和 7i),从下往上回波明显 前倾,0.5°~4.5°位置大约在8~10 km 左右。另 外,图中最明显的特征是 PUP 识别出的位于黄岩和 椒江之间的一个尺度较大的中气旋。从成熟阶段各 仰角的速度图上观察,0.5°风暴前侧为一左侧流入、 右侧流出的正负速度对,为气旋式流场,但正负速度 对连线较纯气旋模式明显顺偏,呈现气旋式辐合速 度场形式;同时在其后侧有一左侧流入、右侧流出的 反气旋式流场。随着仰角的增加,速度对连线逐渐 逆时针偏转,反映出辐合的程度逐渐减弱,在4.3° 仰角(9 km 高度)处,正负速度对连线基本平行于雷 达径向,为纯气旋式旋转。可以看出,该风暴单体的 辐合相当深厚。由于风暴移向和雷达径向交角较 大,因此径向速度大小和相对风暴径向速度的大小 相差不大。在 6° 仰角(12 km高度)(图略)上,正负 速度连线进一步逆转。表明高层有气旋式辐散。根 据成熟中气旋概念模型,在近地层附近,中气旋的径



图 7 2014年3月19日電暴单体爆发阶段雷达产品特征 (a)17:27单体成熟时期叠加中气旋和冰雹指数及风暴属性 表的台州雷达组合反射率因子(CR)产品;(b)17:27回波 顶高产品;(c,e,g,i)17:27雷达仰角3.5°、2.5°、1.5°、 0.5°温州雷达反射率因子(R19)产品 (实线箭头为偏移距离);(d,f,h,j)速度(V27)产品 (黑色矩形框反映中气旋特征);(k,l)17:15—17:21 温州雷达垂直累计液态水产品(VIL); (m,n)沿(a)中黑线作的 RCS和 VCS 剖面

Fig. 7 Characteristic of radar products in the outbreak phase of hailstorm cells on 19 March 2014

(a) Taizhou CR products in mature time at 17:27 overlying with mesocyclone, hail index and storm attribute table,
(b) ET products at 17:27; (c, e, g, i) R19 products of Wenzhou at the elevations of 3.5°, 2.5°, 1.5°, 0.5° at 17:27
(Solid arrows represent the offset distance); (d, f, h, j) V27 products (black rectangle indicates mesocyclone);
(k, l) products VIL of Wenzhou from 17:15 to 17:21;
(m, n) cross-sections of VCS and RCS along black line in (a)



续图 7

向速度特征为辐合式气旋性辐散,到中层为纯粹的 气旋式旋转,到高层则为纯粹辐散。可以看出,该风 暴单体的结构同成熟的中气旋结构基本一致。

该特征也可以从沿图 7a 中黑线作的速度剖面 图(图 7n)上得到印证:图中右侧长形椭圆所标,左 侧负速度,右侧正速度,垂直方向延伸到 10 km,反 映了该风暴成熟时刻深厚的中气旋;左侧小椭圆所 标为风暴后侧低层的反气旋流型。

事实上,根据温州、台州雷达中气旋产品显示和 速度产品分析,从16:40起在弓形回波中部和南部 形成两个中气旋环流,16:57两个中气旋环流开始 合并,并向东移动发展。17:15-17:27 合并后的中 气旋达到成熟阶段。图 8 是统计得到的 16:40-17:27 的逐 6 min 的中气旋旋转速度随高度和时间 的演变,红色数字为风暴合并前北面中气旋转速,黑 色折线为回波顶高度变化,最底层仰角(0.5°)由于 地物及湍流污染未计入统计。但可以看出,即使不 计最底层,整个统计时段内中气旋垂直延伸厚度仍 相当深厚,在5~7 km,远超过风暴垂直尺度的1/ 3;另外,两个识别出的中气旋离雷达站观测距离在 90~110 km;对于核半径由于速度极值点有时不止 占据一个距离库,无法给出精确值,但过程期间两个 中气旋核半径基本在 7~10 km 范围内。因此按传 统中气旋标准,合并前 A0 属于弱中气旋,合并后增 强为中等强度中气旋,总的维持时间接近 50 min。 因而造成黄岩、椒江特大冰雹的雹暴单体从其合并 生成前到减弱消亡拥有深厚、持久的中气旋环流。 而超级单体风暴作为组织程度最高、产生最强烈的 风暴类型,其最本质的特征是具有一个称为中气旋 的持久深厚的 γ 中尺度涡旋(Weisman et al, 1984;

Burgess et al,1990;Doswell et al,1993;俞小鼎等,2006;2012)。虽然从反射率剖面上(图7m)看,该风 暴单体垂直方向为弱回波结构,未形成有界弱回波 结构,仍然可以认为合并后的单体为一个超级单体 风暴。



2.3 飑中系统台州地区发展及加强成因诊断

2.3.1 水汽和不稳定条件

图 9a 和 9b 是 3 月 19 日 15 时冰雹大风过程发 生前华东中南部地区的地面温度和露点温度场。如 图上所示,浙中南地区的温湿条件较北面普遍要高。 温度达到 20℃以上,露点超过 14℃,说明从地面看, 具备了对流发生的基本水汽条件;但温度场高值区 不在台州,一条暖舌从温州西部伸向丽水中东部。 同样,露点条件更好的地区也不在台州,分布在浙江 西南部地区。3月19日14时的再分析资料和17 时的区域快速更新同化模式的诊断表明:天气系统 影响时段浙中南地区的不稳定指数(K 指数)均在 33℃以上,大气层结呈现明显的不稳定状态。在这 样的不稳定层结条件下,对流系统将获得发展。这 次过程系统对浙西南地区如衢州、丽水等影响不大, 而在台州、金华地区却引起了冰雹大风天气。为何 飑线在向东移动的过程中能够维持加强甚至爆发出 超级单体呢?

图 9c 是 3 月 19 日 15 时的温度露点差场,图中 浙西南地区是温度露点差大值区,其中浙闽交界区 达到 14℃以上,说明该地区虽然水汽很高,但是水 汽的饱和程度很低。浙西南以丽水站为代表站,台



 $117.5\ 118.5\ 119.5\ 120.5\ 121.5\ 122.5\ 123.5^\circ E \\ 117.5\ 118.5\ 119.5\ 120.5\ 121.5\ 122.5\ 123.5^\circ E \\ 117.5\ 118.5\ 119.5\ 120.5\ 121.5\ 122.5\ 123.5^\circ E \\ 117.5\ 118.5\ 119.5\ 120.5\ 121.5\ 122.5\ 123.5^\circ E \\ 117.5\ 118.5\ 119.5\ 120.5\ 121.5\ 122.5\ 123.5^\circ E \\ 117.5\ 118.5\ 119.5\ 120.5\ 121.5\ 122.5\ 123.5^\circ E \\ 117.5\ 118.5\ 119.5\ 120.5\ 121.5\ 123.5^\circ E \\ 117.5\ 118.5\ 119.5\ 120.5\ 121.5\ 123.5^\circ E \\ 117.5\ 118.5\ 119.5\ 120.5\ 123.5^\circ E \\ 117.5\ 123.5^\circ E \\ 117.5\ 118.5\ 119.5\ 120.5\ 123.5^\circ E \\ 117.5\ 123.5^\circ E \\ 117.5\ 123.5^\circ E \\ 117.5\ 123.5^\circ E \\ 117.5\ 118.5\ 119.5\ 120.5\ 123.5^\circ E \\ 117.5\ 123.5\ 123.5^\circ E \ 117.5\ 123.5\ 123.5^\circ E \ 117.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\ 123.5\$

图 9 2014 年 3 月 19 日 15 时浙江地区地面自动站水汽及热力条件等值线分布 (a)温度,(b)露点,(c)温度露点差

Fig. 9 Contour distribution of (a) temperature, (b) dew point, (c) dew-point deficit in Zhejiang at 15:00 BT 19 Marth 2014

州地区以洪家为代表站,根据08时的探空资料通过 15时的地面温度露点数据订正计算了两地抬升凝 结高度和自由对流高度见表1。

可以看出,虽然丽水站温湿条件均优于台州,但 由于饱和度较低,因而造成了抬升凝结高度较高,推 迟和削弱了水汽凝结潜热释放反馈的上升作用,因 而限制了对流活动的发展。

2.3.2 抬升触发条件

(1) 天气系统抬升

多数雷暴或冰雹(朱乾根等,2000)的形成都与 系统性辐合及抬升运动相联系。在对流层中,大尺 度上升运动虽只有 1~10 cm • s⁻¹的量级,但持续 作用时间长了就会产生强烈的抬升作用。在本次过 程发生前08时天气图上(图2c),台州上游地区武

表 1 2014 年 3 月 19 日 15 时浙东南和浙西南 地区温度、露点、抬升凝结高度和 自由对流高度情况 「LFC 以衢州(58633)探空计算]

Table 1 Temperature, dew point, lifting condensation height and free convection height in the southeast and southwest of Zhejiang at 15,00 BT 19 March 2014 [LFC is calculated using the sounding of Quzhou (58633)]

台站/要素	温度/℃	露点/℃	抬升凝结高 度 LCL/m	自由对流高 度 LFC/m
丽水(58646)	29.5	16.3	1782	100
洪家(58665)	20.4	15.6	510	≈ 0

汉一桂林一线有一南支槽,北方地区从北京到西宁 一线为一横槽。从形势场的过去演变和温压场的实 况配置结合数值模式可以判断,未来数小时内,南支 槽将快速东移经过皖、浙等地;同时,在北方横槽南



摆作用下,将不断有曲率涡度向南方地区传播,造成 系统性的辐合抬升。通过对每日4次的 NCEP FNL 1°×1°3 月 19 日 14 时的垂直运动场的诊断发 现(图略),500~700 hPa上赣中、闽北、浙南及浙东 沿海地区均为大范围的上升运动;其中在 700 hPa 上的浙闽赣交界处有一 2 $Pa \cdot s^{-1}$ 的峰值区域。综 上所述,南支东移和北方横槽南摆造成的系统性上 升运动为强对流的发生发展提供了必要条件。

(2) 边界层辐合线

以往的研究表明:锋面抬升是最为常见的一种 系统抬升运动之一,锋面降雹是三种典型的降雹天 气形势中的一种;对流天气往往发生在地面锋前的 1~3个纬距(朱乾根,2000;俞樟孝等,1985),这可 能和锋面本身的抬升作用有关,也可能和冷锋前产 生的重力波抬升激发有关。图 10a 是根据地面中尺



图 10 2014 年 3 月 19 日 14-17 时冷锋及辐合线演变(a), 由 NCEP 再分析资料计算的 3 月 19 日 14 时 1000 hPa 流场(b) Fig. 10 Evolution of cold front and convergence line in 14:00-17:00 BT 19 March 2014 (a), flow field at 1000 hPa calculated by using NCEP reanalysis data at 14:00 BT 19 March 2014 (b)

度加密站的要素场作的 14-17 时逐时主观中分析 图。如图所示,分析图上东北一西南向的一条冷锋 由14时逐时推进,冰雹大风天气就发生在东段冷锋 前的1~3个纬距之间。同时大量观测和研究表明, 边界层辐合线是触发对流天气的重要中尺度系统, 对流风暴倾向于在边界层辐合线附近尤其是两条辐 合线的交点附近生成(Wilson et al, 1986; 孙继松 等,2006;俞小鼎等,2012)。俞樟孝等(1985)通过浙 江7次冰雹天气过程的分析发现,浙江地区大范围 降雹与边界层辐合有着十分密切的关系。降雹前, 边界层中都有辐合线的存在;无辐合线,则无大范围 冰雹天气发生。通过对 19 日 14 时 NCEP 地面流 场客观再分析资料(图 10b)的诊断可以看出,降雹 发生前浙江东南部台州到丽水东部一线有一条偏南 气流和东北气流的辐合线存在。从图 10a 的 14-17 时逐时中分析表明,降雹发生前,台州地区维持 一条东西向的中尺度辐合线,并随天气形势的变化 南北略有摆动。当冷锋东移南压时,锋前对流遇到 中尺度辐合线,通过抬升作用和水汽辐合作用,得到 了加强和爆发。

(3) 地形影响

山地迎风坡是对流抬升触发的重要因素之一。

台州地处浙东南沿海,东部为温黄平原,西部山区则 属于浙闽丘陵。从以往经验看,台州西部山区是对 流发生的重要源地。本次过程中,飑线系统为西偏 北走向,与山系形成了近于垂直的交角,这明显地增 加了地形抬升的作用(图 11)。从时间上考察,飑线 于 16:10前后经过天台山系,受地形抬升触发,得到 明显加强,出现了后侧入流的弓形回波特征(图 12a 和 12b);16:50 后移过临海、黄岩等地的浙中南山系 时,由于南部山系走向和系统移动平行,受山系阻 挡,因此南面对流单体向中间移动,和中间对流单体 合并并得到明显加强。而北面山系海拔较低,因此 系统正常移动、减弱,地形作用不是很明显(图 12c 和 12d)。



图 11 地形影响示意图 (空心箭头为风暴移动方向,实心箭头指向 两次触发加强期间的山系) Fig. 11 Diagram of terrain effect

(Hollow arrow shows the direction of storm, solid arrow points to the mountains during the two triggering and strengthing periods)



图 12 两次经过地形抬升及引导作用后回波变化特征对比 (a)16:10,(b)16:30,(c)17:00,(d)17:20 (箭头为系统移动趋势) Fig. 12 Comparison of the variation of echoes affected by uplifting and leading of terrain (a) 16:10 BT,(b) 16:30 BT,(c) 17:00 BT,(d) 17:20 BT (Arrow shows the moving trend of the system)

3 结论与讨论

本文遵循国家气象中心制定的《中尺度天气分 析业务技术规范》(2013内部版)的思路,从环境条 件分析和中尺度过程分析两个方面,利用温州、台州 新一代雷达资料、长江流域及华东雷达组网拼图产 品、中尺度自动站数据及常规观测数据,对 2014年 3月19日发生在浙江台州地区的一次大范围冰雹 过程进行了较为详细的中分析,主要结论如下:

(1)环境场的条件分析表明:在常规天气分析 图上,按照配料法的基本思路,湖北中东部、安徽及 浙江地区相比其他地区处于最有利于强风暴发展的 形势之下;根据上游站和午后资料的订正表明:台州 地区下湿上干层结不稳定的情况下在午后地面温度 升高、对流有效位能增加、且 0~3 和 0~6 km 垂直 风切变较大的情况下有利于出现风雹类强对流天 气。

(2)根据地面系统和雷达拼图演变分析,可以 根据天气尺度影响系统将整个过程分为四个阶段。 第一阶段为准静止锋阶段,主要特征为雷达回波上 静止锋雨带在静止锋前部风速辐合较大处发展得较 为旺盛;第二阶段主要特征为冷空气从江西北部到 湖南东部开始南下,雷达拼图上对应的冷锋雨带开 始形成发展。第三阶段冷空气南下,对应雨带东移, 在浙东南地区经中尺度辐合线爆发加强,呈现出有 组织的飑线型态和弓形回波特征;第四阶段爆发的 飑线入海维持一段时间后减弱,冷锋继续南压,在移

蔡森,周毓荃,蒋元华,等.2014.一次超级单体雹暴观测分析和成雹 区识别研究.大气科学,38(5):845-860.

- 陈永仁,李跃清.2013."12.7.22"四川暴雨的 MCS 特征及对短时强 降雨的影响.气象,39(7):848-860.
- 崔春光,王晓芳,付志康.2013.多源探测资料在一次非线状 MCS 分 析中的综合应用.气象,39(5):556-566.
- 丁一汇.2005.高等天气学.北京:气象出版社,406-408,138.
- 丁一汇,李鸿洲,章名立,等.1982. 我国飑线发生条件研究. 大气科 学,6(1):18-27.
- 郝莹,姚叶青,陈焱.2007.基于对流参数的雷暴潜势预报研究.气象, 33(1):51-56.
- 郝莹,姚叶青,郑媛媛,等.2012.短时强降水的多尺度分析及临近预 警. 气象,28(8):903-912.
- 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):57-58.
- 李改琴,许庆娥,吴丽敏,等.2014. 一次龙卷风天气的特征分析. 气 象,40(5):628-636.
- 李泽椿,毕宝贵,金荣花,等.2014.近10年中国现代天气预报的发展 与应用.气象学报,72(6):1069-1070.
- 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.
- 马中元,苏俐敏,谌芸,等.2014.一次强飑线及飑前中小尺度系统特征分析.气象,40(8):916-929.
- 农孟松, 赖珍权, 梁俊聪, 等. 2013. 2012 年早春广西高架雷暴冰雹天 气过程分析. 气象, 39(7): 874-882.
- 漆梁波.2015.高分辨率数值模式在强对流天气预警中的业务应用进 展.气象,41(6):661-673.
- 漆梁波,陈累.2009.上海局地强对流天气及临近预报要点.气象,35 (9):11-17.
- 寿绍文,刘兴中,王善华,等.1993.天气学分析基本方法.北京:气象 出版社,1-138.
- 孙继松,王华,王令,等. 2006. 城市边界层过程在北京 2004 年 7 月 10 日局地暴雨过程中的作用. 大气科学, 30(2):221-233.
- 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):220-221.
- 陶诗言.1980.中国之暴雨.北京:科学出版社.
- 陶诗言,周秀骥.1999.大气科学,20世纪中国学术大典.福州:福建 教育出版社,1-155.
- 王秀明,俞小鼎,周小刚.2014. 雷暴潜势预报中几个基本问题的讨论. 气象,40(4):397.
- 吴晓宏,谷文龙,黄奕铭,等.2013.2013 年 3 月 28 日华南飑线天气 过程分析.广东气象,35(5):19-23.
- 许爱华,孙继松,徐东蓓,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.气象,40(4):400-402.
- 杨国祥,叶蓉珠,林兆丰,等.1977.一次强飑线的中分析.大气科学,1 (3):206-213.
- 俞小鼎.2011.基于构成要素的预报方法——配料法.气象,37(8): 913-918.
- 俞小鼎,王秀明,周小刚.2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进 展.北京:气象学报,70(3):311-337.

出有利的环境条件场之后强度逐渐减弱。台州地区 的雷雨大风和大范围冰雹主要产生于第三阶段。

(3) 从系统成熟期的回波形态分可以分为飑线 形成、弓形回波、及雹暴单体爆发三个阶段。从自动 站要素上观察,风力上弓形回波阶段明显大于雹暴 单体阶段,而雹暴单体阶段呈现双峰特征,这对应于 单体的发展超前于冷锋飑线;而大风阶段的温度变 换较冰雹阶段明显,这可能与整个系统的强弱有关; 而气压场波动和经典飑线的气压模型有一定区别, 还有待进一步分析。另外,在雷达产品上,造成大风 的弓形回波是从冷锋飑线的一个部位上发展加强而 成。弓形回波形成期间,反射率因子质心和垂直累 积液态水含量明显下降,最旺盛阶段可以分析出弱 回波通道和中层径向辐合等典型特征。而从后期的 中气旋发展演变来看,爆发的雹暴单体可以看成是 一个超级单体。该单体具有强的反射率因子和垂直 累积液态水含量和明显的中气旋结构,正是该超级 单体造成了台州黄岩、椒江地区的特大冰雹。

(4) 近地层充沛的水汽、较高的饱和程度及有 利的层结条件是台州地区飑中系统爆发的水汽条件 和不稳定条件,而南支槽及北方横槽南摆形势下的 正涡度平流造成了系统性上升运动,高空急流出口 区左侧的辐散场形成了高层 300~400 hPa 达-1.5 ×10⁻³ hPa•s⁻¹的强迫抬升;地面冷锋、中尺度辐 合线及地形作用,则是飑中系统台州地区爆发加强, 从而造成冰雹大风天气的触发条件。

(5)通过本次过程中各类观测资料和产品的中分析发现,利用午后地面更新资料开展本地探空站的订正分析以及对各类具有时效性的地面中尺度站资料进行加密中分析能有效提高预警的时效和临近预报的质量。因此,地市级预报员应充分利用本地自动站传输的时效性优势,开展中分析的补充订正业务。另外,在布网密集的雷达组网地区,对于地市级台站,不同PUP产品在观测重叠区域存在一个最合适的台站选择;应对本站雷达近距离盲区及不同地点不同产品的适宜观测站点进行调查总结,以便在短临预警有限的分析时间内在不同地理位置权衡考虑雷达产品的时效和可用性,选择最合适的单站产品进行诊断。

致谢:感谢俞小鼎老师的指导,蓝渝、张涛首席提供的 最新规范。

参考文献

包澄澜.1986.华南前汛期暴雨研究的进展.海洋学报,8(1):32.

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.

气象出版社,314,151.

- 俞樟孝,吴仁广,翟国庆,等.1985.浙江冰雹天气与边界层辐合的关系.大气科学,9(3):268-275.
- 张涛.2014.国家级中尺度天气分析业务技术进展(PPT).2014 年全 国中尺度业务经验交流会.
- 张涛,方翀,朱文剑,等.2012.2011 年 4 月 17 日广东强对流天气过 程分析.气象,38(7):814-818.
- 张涛,蓝渝,毛冬艳,等.2013.国家级中尺度天气分析业务技术进展 I:对流天气环境场分析业务技术规范的改进与产品集成系统 支撑技术.气象,39(7):894-900.
- 张小玲,谌芸,张涛. 2012. 对流天气预报中的环境场条件分析. 气象 学报,70(4):642-654.
- 章淹.1965.中尺度天气分析.北京:农业出版社.1-106.
- 张一平,俞小鼎,孙景兰,等.2014.2012年早春河南一次高架雷暴天 气成因分析. 气象,40(1):48-58.
- 郑永光,田付友,孟智勇,等.2016."东方之星"客轮翻沉事件周边区 域风灾现场调查与多尺度特征分析.气象,42(1):1-13.
- 郑媛媛,姚晨,郝莹,等.2011.不同类型大尺度环流背景下强对流天 气的短时临近预报预警研究.气象,37(7):795-801.
- 郑媛媛,俞小鼎.2004.一次典型超级单体风暴的多普勒雷达观测分 析. 气象学报,62(3):317-328.
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.2000.天气学原理和方法(第四版).北 京:气象出版社,313,332.
- Burgess D W, Lemon L R. 1990. Severe thunderstorm detection by radar// atlas D. Radar in Meteorology. Amer Meteor Soc, 619-647.
- Crisp Msgt Charlie A. 1979. Training guide for severe weather forecasters. AFGWCTN-79/002. United States Air Force, Air Weather Services(MAC), Air Force Global Weather Central.
- Doswell C A III, Brooks H E, Maddox R A. 1996. Flash flood fore-

casting:An ingredients-based methodology. Wea Forecasting,11
(4):560-581.

- Doswell C A, Burgess D W. 1993. Tornadose and tornadic storms: a review of conceptual model// Church C. The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards. Geophysical Monograph 79, Amer Geophys Union, 161-172.
- Fujita T T. 1955. Result of detailed synoptic studies of squallines. Tellus,7(4):405-436.
- Fujita T T. 1956. Mesoanalysis: An important scale in the analysis of weather data. Wea Bureau Res Paper, 39:1-84.
- Fujita T T. 1978. Manual of downburst identification for Project NIMROD. SMRP Research Paper 156, University of Chicago, 104.
- Johns R H, Hirt W D. 1987. Derechos: Widespread convectively induced windstorms. Wea Forecasting, 2:32-49.
- Klimowski B A, Hjelmfelt M R, M J. 2004. Radar observation of the early evolution of bow echoes. Wea Forecasting, 19:727-734.
- Miller R C. 1972. Notes on analysis and severe-storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central, Technical Report 200. Air Weather Service (MAC) United States Air Force.
- Uccellini L W, Corfidi S F, Junker N W, et al. 1991. Report on the surface analysis at the National Meteorological Center in 25-28 March 1991. Bull Amer Soc, 73: 459-471.
- Weisman M L, Klemp J B. 1984. The structure and classification of numerically simulated convective storms in directional varying wind shears. Mon Wea Rev, 112(12):2479-2498.
- Wilson J W and Reum D. 1986. "The hail spike": Reflectivity and velocity signature. Preprints, 23d Conf on Radar Meteorology, Snowmass, CO, Amer Meteor Soc, 62-65.