盛志军，邓超，周雨，等. 2016. 江西省北部地区一次致灾冰雹天气环境条件和特征分析[J]. 气象与减灾研究，39(3)：190-197.
Sheng Zhijun, Deng Chao, Zhou Yu, et al. 2016. Analysis on environmental conditions and characteristics of a disastrous hail event in northern of Jiangxi[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research，39(3)：190-197.

江西省北部地区一次致灾冰雹天气环境条件和特征分析

盛志军[1]，邓　超[2]，周　雨[3]，朱星球[1]

1. 江西省气象台，江西 南昌　300096
2. 成都信息工程大学 大气科学学院，四川 成都　610225
3. 江西省气象服务中心，江西 南昌　330096

摘 要：利用常规气象观测资料、天气雷达资料、FY-2E 卫星 TBB 资料和 NCEP 1°×1°再分析等资料，对 2015 年 4 月 2 日发生在江西省北部地区的冰雹强对流天气环境条件和特征进行了分析。结果表明：1）高空槽、低层切变线和地面锋面共同影响，导致此次冰雹强对流天气过程，冷锋及其附近的中尺度地面辐合线是主要触发系统。2）降雹前 6—12 h，江西省北部地区对流层中低层西南风速跃增，并且 500 hPa 高度层存在干急流轴，干空气卷入能使雨滴脱离上升气流，减弱雨滴的拖曳作用，形成“上干冷、下暖湿”对流不稳定温湿层结。3）江西省北部地区边界层有假相当位温能量锋区维持；且处于水汽通量辐合区中心，低层维持较强水汽辐合和输送，为冰雹云内雹胚的形成和生长提供了充足的水汽条件。4）风暴单体具有有界弱回波区、高悬的强反射率因子、强回波伸展至 -20 ℃层高度之上、高 VIL 密度、强中气旋等大冰雹回波特征。TBB 分布反映了一个 MCS 的演变，降雹地点与 TBB 小于 -52 ℃的冷云区及其北侧 TBB 大梯度区对应较好。

关键词：冰雹天气，环境条件分析，卫星 TBB，雷达回波
中图分类号：P458.1^{+}21.2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1007-9033(2016)03-0190-08
doi：10.12013/qxyjzyj2016-026

Analysis on Environmental Conditions and Characteristics of a Disastrous Hail Event in Northern of Jiangxi

Sheng Zhijun[1], Deng Chao[2], Zhou Yu[3], Zhu Xingqiu[1]

1. *Meteorological Observatory of Jiangxi Province, Nanchang, 330096, China*
2. *College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Science and Technology, Chengdu 610225, China*
3. *Meteorological Service Center of Jiangxi Province, Nanchang, 330096, China*

Abstract: A hail event occurred in the northern Jiangxi in the afternoon of April 2, 2015 is analyzed with conventional upper air data, automatic weather station data, Nanchang Doppler radar data, images from FY-2E satellite TBB and NCEP 1 °×1° reanalysis data. The results show that this hail event was triggered by the upper trough, low-level shear line and the ground front together. Cold front and the mesoscale convergence line were the main trigger systems. The wind speed in the lower troposphere in the northern Jiangxi increased rapidly 6 to 12 hours before the hail dropping. The dry jet stream located at northern Jiangxi in front of the 500hPa trough. Dry air can be involved in the rain from the rising air, weaken the drag of the rain, and form the unstable convective stratification of “dry cold air upper and warm wet air down”. A pseudo equivalent potential temperature energy front maintained in the boundary layer in northern Jiangxi, in which was the water vapor convergence center. In

收稿日期：2016-06-20；**修订日期**：2016-07-22.
基金项目：2016 年省气象局预报员专项“2015 年汛期赣北两次强对流过程对比分析研究”；2015 年省局重点项目“强对流天气的格点化预报方法研究”；江西省气象局强对流创新团队项目(编号：JXQDL20140010).
作者简介：盛志军，工程师，主要从事短临天气预报和预报业务与技术研究，E-mail:94644112@qq.com.

the low layer, strong water vapor convergence and transportation remained, which provided adequate moisture conditions for the formation of hail cloud and hail embryo growth. Some characteristics of large hail echoes were found on the radar echo images, such as BWER, high hanging strong reflectivity, strong echo stretching up to −20 ℃ layer height, high VIL density, and a strong mesocyclone. Hail dropping locations were related with the evolution of a MCS , and they corresponded well with cold cloud area below −52 ℃ or the north of large TBB gradient area.

Key words: hail weather; environment condition analysis; satellite TBB analysis; radar echo characteristic

0 引 言

冰雹是由雨滴形成的固态降水物,是我国多发的强对流类型灾害性天气之一。气候统计显示,春、夏季 3—5 月是江西省冰雹灾害发生最多的月份。冰雹常造成人员受伤、农作物减产、供电设施受损等严重灾害。近年来,江西省气象业务研究人员对江西冰雹天气特征和预报做了大量工作。支树林等(2008,2009)分别对一次弱降雹过程的雷达产品特征及识别方法研究和江西省 2003—2008 年冰雹天气发生期间闪电活动特征进行了分析。郭艳和彭义峰(2008)对江西省 2002—2007 年局地强对流天气的多普勒天气雷达产品特征进行了研究。刘献耀等(2009)使用统计方法对江西省春夏季强对流天气气候特征进行了研究。以上成果多是单一分析冰雹等强对流天气雷达回波特征或者是仅使用统计分析的研究方法,而没有对冰雹强对流天气的对流潜势环境条件、触发机制、水汽分布等机理进行研究。国内一些学者也对不同区域的冰雹天气事件做了深入研究。钟晨等(2014)发现使用双偏振多普勒天气雷达资料,在降雹前可以对云中的雹区进行直接有效的判断,对冰雹的预报有重要的指示意义。曾数军等(2013)分析一次冰雹天气过程,发现中等偏强的风速垂直切变和高空辐散为强风暴形成和维持提供了动力条件。李晔和宋雪明(2008)对一次局地冰雹天气的多普勒雷达回波特征进行了分析。阎雍等(2010)分析了武汉强冰雹天气过程,指出干冷空气的侵入和台风外围暖湿气流强烈辐合是冰雹天气的触发机制。韦增岸等(2015)分析了 17 个降雹样本,指出降雹出现在闪电密度最大中心的下风方右侧。姚日升等(2015)分析了 2 次冰雹过程边界层气象要素变化,发现拖曳作用削弱了抽吸作用,近地层各气象要素均有短时间的反向变化。郑艳等(2015)对海南岛 22 次冰雹过程进行了统计,得到 4 种冰雹概念模型。刘晓莉和水旭琼(2015)等分析青海 2 次多单体降雹过程的雹谱分布特征,指出云水、雨水的比含水量随雹云的发展呈先增长后减少的特点。

在全球气候变暖的背景下,每年春夏季冰雹灾害事件不断增多,但应用多种资料提炼江西冰雹特征及成因的研究工作仍不够充分,特别是“斜压锋生类”冰雹强对流天气在江西春夏季多发且容易致灾,但此类个例研究较少,其成因及特征研究工作仍需进一步开展,且冰雹天气过程在不同的环境条件和形势下,其成因及特征也不尽相同。因此,有必要对冰雹天气过程的多种资料仔细分析,挖掘其成因及特征规律。文中,利用常规气象观测资料、多普勒雷达资料、FY-2E 卫星 TBB 资料以及 NCEP 1°×1°再分析资料,对 2015 年 4 月 2 日午后到傍晚发生在江西省北部地区的区域性冰雹天气的成因及特征进行探讨,以期为此类冰雹天气的预报预警提供参考。

1 天气实况

2015 年 4 月 2 日 14—21 时,江西省北部地区出现了一次罕见的冰雹强对流天气过程,安义、进贤、九江、德兴、南昌等 5 个县(市)先后观测到冰雹(图 1),其中德兴市降雹直径最大,为 10 mm。但是,多家新闻媒体报道宜丰、高安、万年、九江等县

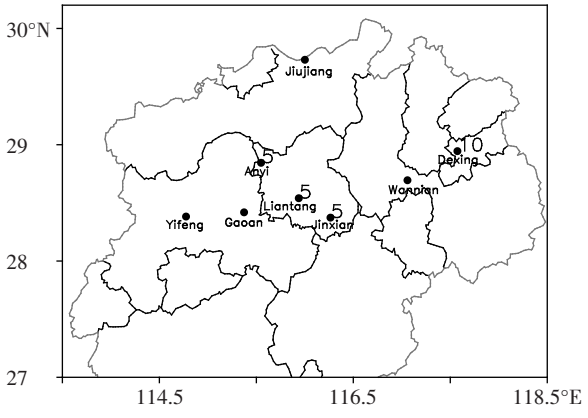


图 1 2015 年 4 月 2 日江西省北部地区地面降雹站点(数值为冰雹观测直径,单位:mm;未标数值者为新闻媒体报道有降雹的站点)

Fig. 1 Distribution of northern Jiangxi ground hail site in on 2 April 2015 (numbers are hail diameters, unit: mm; the hail site with unmarked number means media reported)

(市)出现直径超过 20 mm 的大冰雹。另外,此次降雹过程还伴随大风和短时强降水等灾害性天气,修水、婺源出现短时 8 级(17.2—20.8 m/s)雷暴大风,景德镇、吉安、九江、南昌、上饶、宜春等地出现强度大于 30 mm/h 的短时强降水。

2 环境条件

2.1 环流背景

图 2 分别给出了 2015 年 4 月 2 日 08 和 14 时 500 hPa 高度场和 850 hPa 风场。分析发现,2 日 08 时,地面冷锋东移至湖北省东南部到湖南省中部地区,江西省北部地区处于地面倒槽暖区的偏南气流中。925 hPa 切变线与地面冷锋位置重合。850 hPa 切变线位置落后于地面冷锋,位于湖北省中部到湖南省北部。850 hPa 温度脊位于江西省北部,有 2 ℃的正变温,江西省北部地区低层的热力条件较好。500 hPa 与 700 hPa 高度层的西风槽位置几乎重合,位于陕西省到四川省东部,落后于低层切变线。2 日 14 时,高空槽逐渐东移,850 hPa 高度层江西省北部仍受西南急流影响,但强度有所减弱。

许爱华等(2014)提出我国强对流天气的 5 种基本类别,而此次冰雹强对流天气过程是受后倾高空槽、低层切变线和地面锋面共同影响下发生的,属于"斜压锋生"类强对流天气。

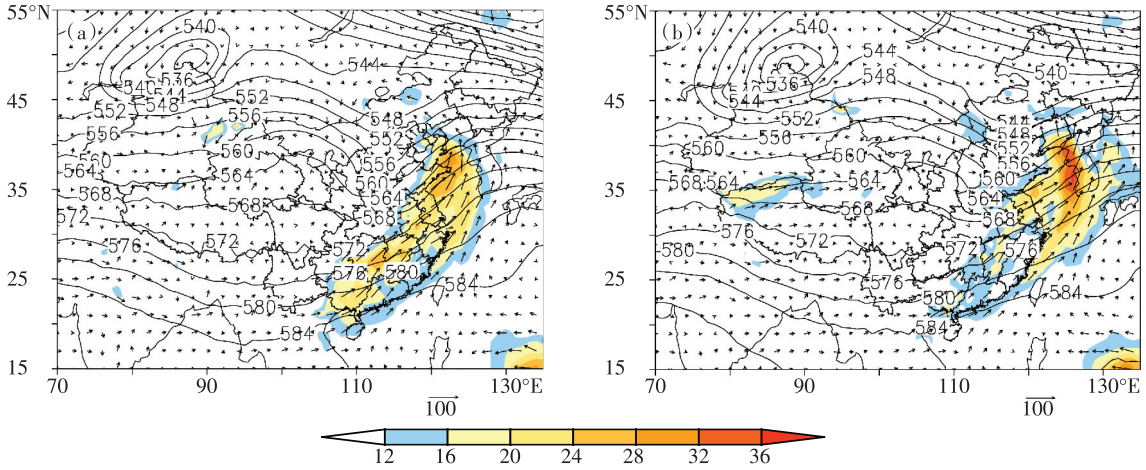


图 2 2015 年 4 月 2 日 08 时(a)和 14 时(b)500 hPa 高度场(等值线;单位:dagpm)和 850 hPa 风场(矢线,单位:m/s;阴影为风速>12 m/s 的急流区)

Fig. 2 500 hPa geopotential height (unit: dagpm) and 850 hPa wind fields (unit: m/s, shaded area for jet stream region with wind speed >12 m/s) at 08:00 BST (a) and 14:00 BST (b) 2 April 2015

2.2 对流层中低层西南急流作用

高空槽引导对流层中低层西南急流逐渐影响江西,南昌地区上空 1 日 20 时—2 日 08 时(图略)西南风速跃增。925、850、700、500 hPa 高度层南昌西南风速分别增加到 16、24、16、26 m/s,其中 850 和 500 hPa 高度层风速增幅均为 10 m/s。500 hPa 急流轴上(从湖南省延伸到江西省北部)温度露点差普遍大于 25 ℃,而南昌达 35 ℃,表明 500 hPa 槽前有一支干急流影响江西省。

对流层中低层西南风速的跃增,有利于低层水汽的输送,并在江西省北部地区形成和维持对流不稳定层结环境条件。强低空急流可以引起低层扰动,加强江西省北部地区底层的上升气流,触发已建立的对流不稳定层结能量的释放。500 hPa 干急流的卷入能使雨滴脱离上升气流,减弱雨滴的拖曳作用,500 hPa 高度层以下西南急流的增强还可以使垂直风切变增强,而这有利于对流单体风暴向有组织的多单体、超级单体、飑线等强风暴发展。

用1 000 hPa 层与 500 hPa 层的风矢量差近似替代 0—6 km 高度的垂直风切变。结果表明,2 日 08 时(图略),江西省北部地区维持在中等垂直风切变阈值(15 m/s)以上,最强垂直风切变达 30 m/s,达到强垂直风切变阈值(>20 m/s)。中等到强垂直风切变环境是江西省北部地区对流风暴发展成有组织强风暴或超级单体风暴的一个重要因素。

3 环境对流参数特征

3.1 探空资料分析

冰雹的产生需要垂直层结不稳定、水汽和抬升触发机制等条件。此外,冰雹的增长还要求环境大

气的对流有效位能(CAPE)和垂直风切变较大,这有利于雷暴内较强上升气流的形成和维持(俞小鼎等,2006)。图 3a 给出了 2015 年 4 月 2 日 08 时南昌站探空曲线。分析发现,南昌温度—露点廓线都呈现"喇叭口"形状,表明南昌地区上空垂直方向上的水汽分布呈"上干下湿"结构。500 hPa 高度层 24 h变温为 -3 ℃,850 hPa 层与 500hPa 层的温度差为 26 ℃,江西省北部地区形成"上冷下暖"的温度层结,这表明江西省北部地区环境大气有明显对流不稳定潜势。

合适的 0 ℃层(4 km 左右)既可以减少冰雹在降落到地面过程中融化成雨滴,也不会限制对流云发展的高度(朱乾根等,2007)。对比分析南昌站和赣州站对流参数值发现,江西省北部对流潜势优于南部地区,2 日 08 时南昌上空冰雹增长层(-20—0 ℃层厚度)为 2.77 km,0 ℃层高度为 4.4 km,比合适的 0 ℃层高度(4 km)略高,这增加了冰雹降落过程中在暖云中融化的时间,会使降落到地面的冰雹直径变小,不利于大冰雹降落到地面。值得一提的是,用 14 时南昌站的气压、温度和露点修正 08 时的 t-ln$p$ 图后,对流有效位能从 292.3 J/kg 增至 1 786 J/kg,而 NCEP 资料显示 14 时江西省北部地区有明显的 CAPE 高值区(图 3b),南昌、宜春、上饶处高值区中,中心值超过2 400 J/kg。这表明,午后随着近地面层温度升高,自由对流高度和对流抑制高度迅速降低到 0 km,CAPE 值迅速增大,江西省北部地区大气层结热力不稳定度条件较好。

3.3 冰雹触发机制分析

触发抬升机制是冰雹云生成的必要条件。一般雷暴云的主要触发机制包括锋面、干线和边界层辐合线、重力波和地形抬升等(俞小鼎等,2006)。4 月 2 日 08 时,地面冷空气开始从九江沿江一带侵入江西省北部地区,锋面附近有中尺度辐合线。图 4 给出了 2015 年 4 月 2 日 12—20 时地面中尺度辐合线演变。分析发现,12 时中尺度辐合线位于宜春中部到南昌北部、九江南部地区,14—20 时地面辐合线逐渐东移南压至上饶南部地区,辐合线两侧为偏北风和偏南风的辐合,表明冷、暖空气在江西省北部地区辐合线附近形成对峙之势,辐合线两侧存在明显温度锋区。除冷空气影响之外,降水也会加大锋区温度梯度,辐合线温度梯度普遍为 5—8 ℃,地面中尺度辐合线冷暖空气的交汇强迫近地面层气流的抬升,释放环境大气对流不稳定层结能量,触发对流云的生成,并沿着西南引导气流东移发展成雹云。因此,冷锋锋面及其附近的地面中尺度辐合线是此次冰雹天气过程的主要触发系统。

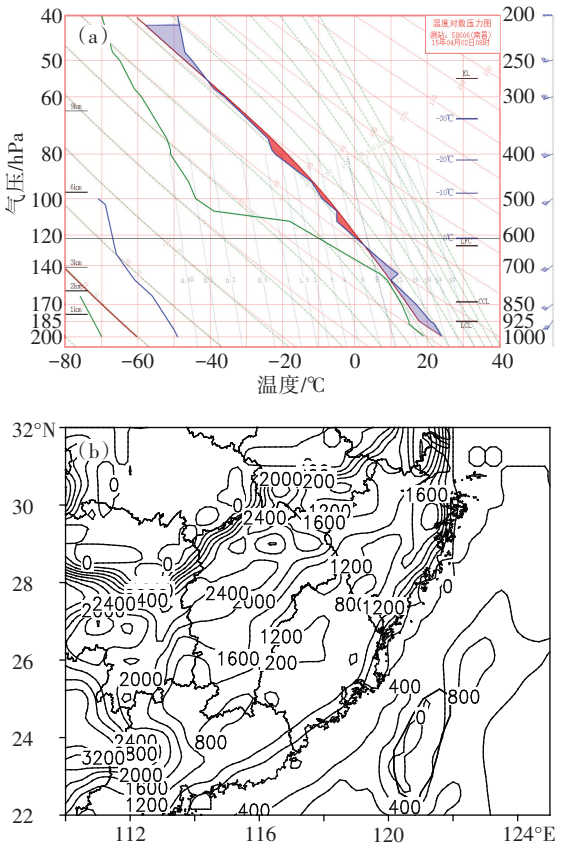


图 3 2015 年 4 月 2 日 08 时南昌站探空曲线(a)和 14 时 CAPE 分布(b;单位:J/kg)

Fig. 3 Nanchang t-ln$p$ chart at 08:00 BST of April 2, 2015 (a) and distribution of CAPE at 14:00 of April 2, 2015 (b; unit:J/kg)

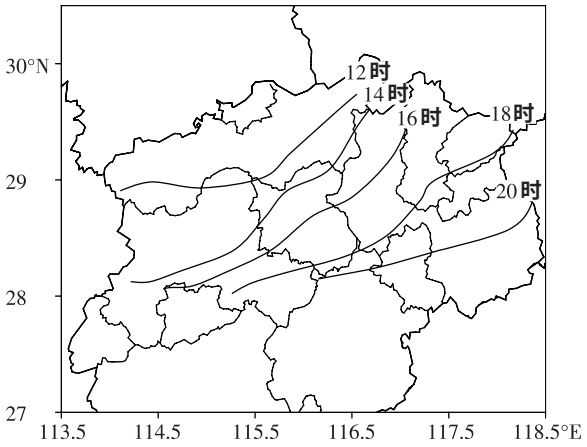


图 4 2015 年 4 月 2 日 12—20 时地面中尺度辐合线

Fig. 4 The surface mesoscale convergence line (black curve) during 12:00 - 20:00 BST of April 2, 2015

4 能量条件和水汽特征

假相当位温(θ_{se})是一个综合了气压、水汽的凝结和蒸发对温度影响的衡量气层对流稳定度的物理量(朱乾根等,2007)。垂直方向气层$\partial\theta_{se}/\partial p>0$,则一般认为气层为对流性不稳定状态。此次冰雹天气过程发生前的4月2日08—14时(图略),湖南省中南部地区有θ_{se}为76 ℃的高能舌伸向江西省中北部地区,使其θ_{se}快速增加到72 ℃。20时江西省北部地区θ_{se}维持在70—74 ℃,且850 hPa高度层出现明显的能量锋区。图5给出了2015年4月2日14和20时θ_{se}沿116°E的垂直剖面。分析发现,垂直方向上θ_{se}的分布也不均匀。2日14—20时江西省北部地区1 000—500 hPa高度层$\partial\theta_{se}/\partial p>0$,$\theta_{se}$最大值为80 ℃,表明对流层中层以下环境大气具有明显的对流性不稳定特征。700 hPa高度层以下θ_{se}梯度较大,边界层大气对流不稳定特征更加明显。28°—30°N区域的θ_{se}能量锋区较强,江西省北部地区上空θ_{se}能量锋区维持。因此,江西省北部地区700 hPa高度层以下大气持续对流不稳定,尤其是边界层强θ_{se}能量锋区的维持是此次冰雹天气过程的重要特征。

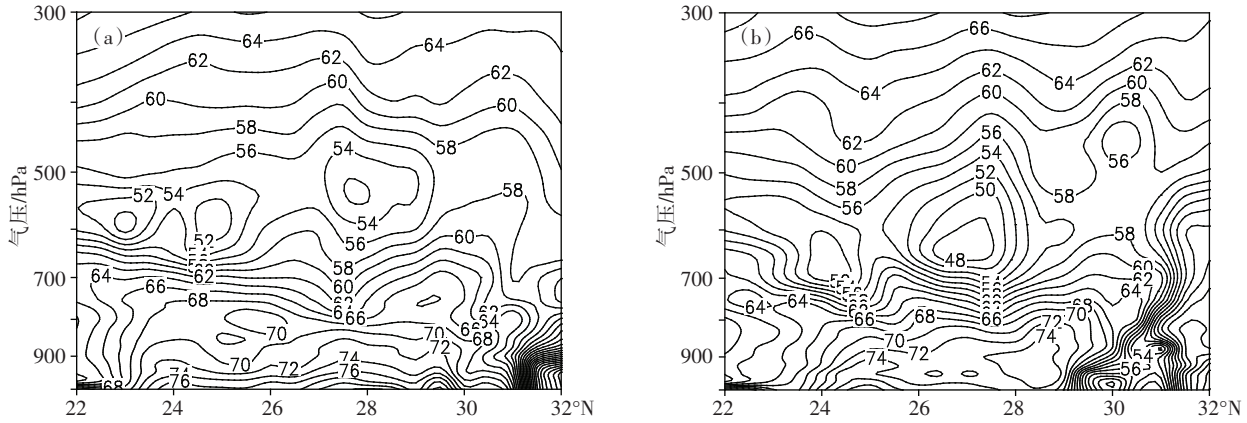


图5 2015年4月2日14时(a)、20时(b)假相当位温θ_{se}沿116°E的垂直剖面(单位:℃)

Fig. 5 Equivalent potential temperature profile along the vertical direction of 116°E at 14:00 BST (a) and 20:00 BST (b) of April 2, 2015 (unit:℃)

冰雹云的生成发展必须要有足够的水汽供应,而对流云的水汽是由上升气流从大气低层向上层输送的,水汽主要来自低层。分析2015年4月2日08—14时850 hPa水汽通量和水汽通量散度分布(图略)发现,随着850 hPa西南急流东移,来自孟加拉湾和南海的水汽向东北方向输送,江西省北部地区处于水汽通量辐合区中心,水汽通量最大值为30 g/(cm·hPa·s),水汽通量散度最大值达-5×10^{-67} g/(cm^2·hPa·s)。可见,2日08—14时为冰雹云的生成发展阶段,江西省北部地区低层维持较强水汽辐合和输送,为冰雹云内雹胚的形成和生长提供了充足的水汽条件。

5 中尺度超级单体风暴系统演变特征

5.1 中尺度对流系统(MCS)的生成和发展

黑体亮温(TBB)是用同辐射量的黑体温度表示物体的辐射能量,TBB值越低,云发展的越高,云中上升气流越强。图6给出了2015年4月2日16—19时TBB分布。2日14时(图略)宜春和上饶上空有局地对流云团生成并向东发展,16时几个对流云团逐渐连接合并,对流云逐渐发展,-32 ℃冷云罩面积变大。17时形成一条由准东西向中-α尺度对流云带系统,冷云罩面积继续变大,南昌南部、宜春东部、上饶中部等地出现-52 ℃冷云区,上饶中部地区TBB值小于-60 ℃,表明上述地区有强烈的上升运动,上冲云顶较高,MCS处于成熟期。冰雹云发展成熟,安义、进贤、南昌县和德兴等县(市)先后出现5—10 mm直径的冰雹,冰雹和短时强降水主要出现在-52 ℃冷云区中心及其北侧的TBB大梯度区附近。18时MCS东段东移减弱,西段仍影响南昌南部地区。19时MCS东段进入浙江省继续发展,MCS西段东移减弱影响上饶市。

此次冰雹天气过程对应一个由多个中-β尺度对流云团组成的中-α尺度对流系统的发展演变,从生成发展到减弱共维持了4 h左右。降雹地点在-52℃冷云区及其北侧的TBB大梯度区附近,

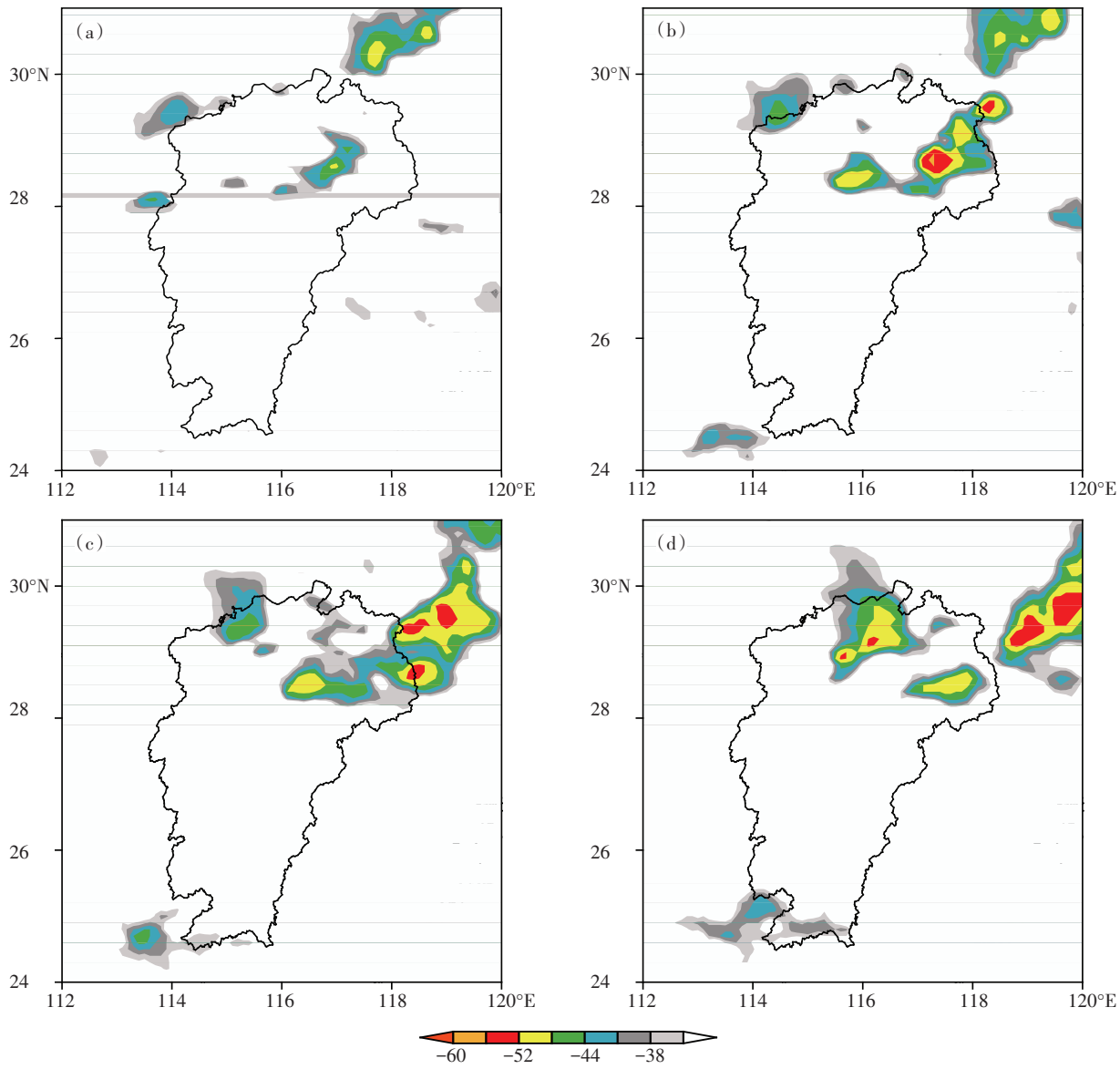


图 6 2015 年 4 月 2 日 16 时(a)、17 时(b)、18 时(c)、19(d)时 FY-2E 卫星 TBB 分布(单位:℃)

Fig. 6 Distribution of FY-2E satellite TBB at 16:00 BST (a), 17:00 BST (b), 18:00 BST (c) and 19:00 BST (d) of April 2, 2015 (unit:℃)

−60 ℃的 TBB 中心与德兴 10 mm 直径降雹对应较好。

5.2 中尺度超级单体风暴及演变

与上升气流的强度和区域有关的强度回波特征和速度回波特征是很有价值的冰雹增长特征指标(俞小鼎等,2006)。下面主要对强度和速度回波特征进行讨论。

图 7 给出了 2015 年 4 月 2 日 16:45 南昌雷达组合反射率和 4 个冰雹云生成时间和移动路径。分析发现,此次降冰雹天气过程主要由图 7a 中 A、B、C、D 这 4 个冰雹云导致,它们沿着引导气流向东北方向移动,经历分裂、合并等过程,影响江西省北部地区。分析 4 个冰雹云的生成时间和移动路径(图 7b)发现,C 冰雹云生成时间最早,为 2 日 14:01;A 冰雹云生成时间最晚,为 16:21。A 和 C 冰雹云生命史为 2—3 h,B 和 D 冰雹云生命史更长,超过4 h,影响区域更大,灾害也更重。B 冰雹云于 14:42 在万载县西部地区生成,此后向偏东方向移动,经过宜丰县和高安市,逐渐发展成强风暴,16:39 其垂直积分液态水含量(VIL)超过 80 kg/m^2,VIL 密度为 6 g/m^3,高于大冰雹 VIL 密度阈值(4 g/m^3)。

图 8 给出了 4 个冰雹云的径向速度和 B、D 冰雹云反射率的垂直发布。根据中气旋识别的转动速度判据(俞小鼎等,2006),B 和 D 冰雹云的最大转

动速度达到强中气旋级别,A 和 C 冰雹云的最大转动速度达到弱中气旋级别。B 冰雹云回波高度超过 15 km,最强回波强度大于 65 dBz,有高悬的反射率因子核;反射率因子为 65 dBz 的区域伸展高度超过 7 km,55 dBz 的区域伸展高度超过 11 km,有弱回波区(WER)和有界弱回波区(BWER)。B 冰雹云内上升气流发展十分强烈,能承托住下落的冰雹雹胚在冰雹生长层成长为大冰雹,表明可能生成直径大于 20 mm 的降雹,这与宜丰、高安等地新闻报道的降雹大小一致。B 冰雹云符合超级单体风暴特征,并维持了 30 min 左右,之后 60 dBz 以上强回波区域伸展高度逐渐降低,BWER 逐渐消失,上升气流减弱,17:26 的 VIL 值逐渐下降为 65 kg/m^2 以下。此后,B 冰雹云东移入南昌县,最大回波强度仍超过 60 dBz,但已无大冰雹回波结构特征,VIL 最大值下降为 50 kg/m^2 以下,但仍有冰雹降落到地面,直径明显减小,18:06 南昌县观测站观测到的冰雹直径为 5 mm。D 与 B 冰雹云结构类似,造成德兴市于 18:03 出现 10 mm 冰雹。

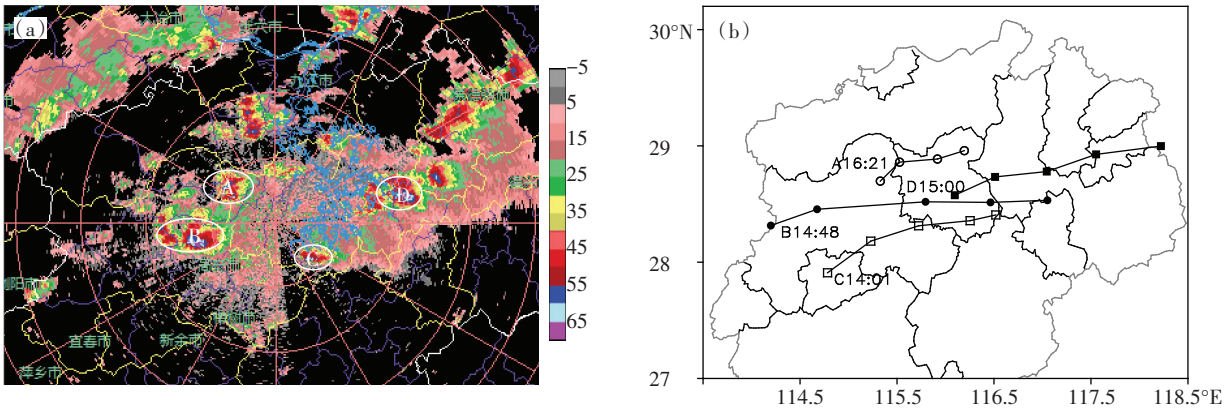


图 7 2015 年 4 月 2 日 16:45 南昌雷达组合反射率(a,单位:dBz)和 4 个冰雹云生成时间和移动路径(b)

Fig. 7 Nanchang radar CR at 16:45 BST of April 2, 2015(a; unit:dBz), and generation time and moving path of 4 hail storms during April 2, 2015 (b)

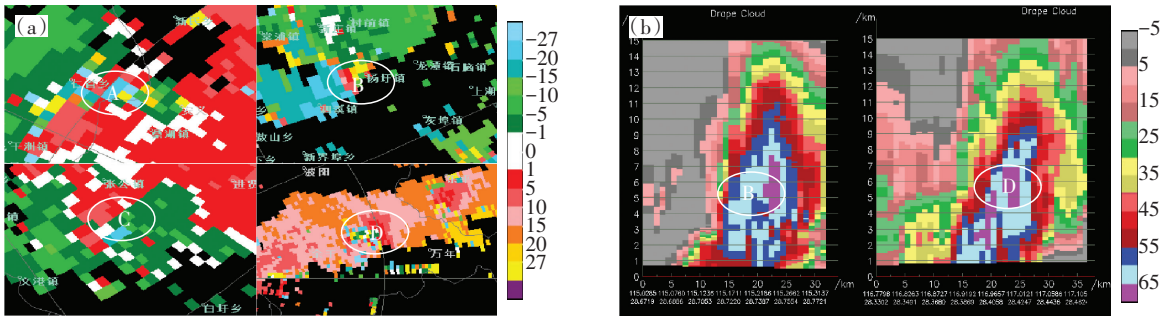


图 8 图 7a 中 A、B、C、D 冰雹云分别于 2015 年 4 月 2 日 16:45、16:33、16:50、16:45 的径向速度(a;单位:m/s;A、C 为 2.4°仰角,B、D 为 1.5°仰角)和 B 冰雹云 16:45、D 冰雹云 16:56 的反射率因子垂直分布(b;单位:dBz)

Fig. 8 Radial velocities of storm A at 16:45 BST, storm B at 16:33 BST, storm C at 16:50 BST, and storm D at 16:45 BST(a; unit: m/s; A, C on with 2.4° elevation, and B, D with 1.5° elevation), and reflectivity cross section of storm B at 16:45 BST, storm D at 16:56 BST (b; unit:dBz) of April 2, 2015

6 结 论

利用常规气象观测资料、多普勒雷达观测资料、TBB 资料和 NCEP 再分析资料,对 2015 年 4 月 2 日发生在江西省北部地区的冰雹强对流天气进行分析,得到以下主要结论:

1) 高空槽、低层切变线和地面锋面共同影响,导致此次冰雹强对流天气发生,冷锋及其附近的中尺度地面辐合线是主要的触发系统。

2) 降雹前 6—12 h,江西省北部地区对流层中

低层西南风速跃增,且 500 hPa 层存在干急流轴,干空气卷入能使雨滴脱离上升气流,减弱雨滴的拖曳作用,形成"上干冷、下暖湿"对流不稳定温湿层结。

3) 江西省北部地区边界层有假相当位温能量锋区维持;且处于水汽通量辐合区中心,低层维持较强水汽辐合和输送,为冰雹云内雹胚的形成和生长提供了充足的水汽条件。

4) 风暴单体回波显示有高悬的强反射率因子、有界弱回波区、强回波伸展至 -20 ℃层高度之上、高 VIL 密度、强中气旋等大冰雹回波特征。TBB 分布反映了一个 MCS 的演变,降雹地点与 TBB 小于 -52 ℃冷云区及其北侧 TBB 大梯度区对应较好。

参考文献(References)

郭艳,彭义峰. 2008. 江西局地强对流天气的多普勒天气雷达产品特征[J]. 气象与减灾研究,31(2):48-52. Guo Yan, Peng Yifeng. 2008. Doppler weather radar products characteristics of emaergent local convections in Jiangxi[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 31(2): 48-52. (in Chinese)

刘献耀,许爱华,刘芳. 2009. 江西省春夏季强对流天气气候特征[J]. 气象与减灾研究,32(4):50-56. Liu Xianyao, Xu Aihua, Liu Fang. 2009. Climatic characteristics of severe convective weather in spring and summer in Jiangxi[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 32(4): 50-56. (in Chinese)

刘晓莉,水旭琼. 2015. 青海两次多单体降雹过程的雹谱分布特征[J]. 大气科学学报,38(6):845-854. Liu Xiaoli, Shui Xuqiong. 2015. The hail size distribution characteristics of two multi-cell hail processes in Qinghai[J]. Trans Atmos Sci, 38(6): 845-854. (in Chinese)

李晔,宋雪明. 2008. 一次冰雹天气多普勒雷达回波特征分析[J]. 气象与减灾研究,31(3):70-73. Li Ye, Song Xueming. 2008. Doppler radar echo characteristics of a hail process[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 31(3): 70-73. (in Chinese)

韦增岸,何飞,邹光源,等. 2015. 广西冰雹云闪电变化特征分析及其防雹应用[J]. 气象研究与应用,36(4):38-44. Wei Zengan, He Fei, Zou Guangyuan, et al. 2015. Characteristics analysis on lightning variation of hail cloud and its application in artificial hail suppression in Guangxi[J]. J Meteor Res Appl, 36(4): 38-44. (in Chinese)

许爱华,孙继松,许东蓓,等. 2014. 中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J]. 气象,40(4):400-411. Xu Aihua, Sun Jisong, Xu Dongbei, et al. 2014. Basic synoptic situation classification and element character of severe convection in China[J]. Meteor Mon, 40(4): 400-411. (in Chinese)

阎雍,黄艳芳,姚志国,等. 2010. 武汉一次强冰雹天气过程分析[J]. 广东气象,32(6):25-28. Yan Yong, Huang Yanfang, Yao Zhiguo, et al. 2010. Analysis of a heavy hail weather process in Wuhan[J]. Guangdong Meteor, 32(6): 25-28. (in Chinese)

姚日升,涂小萍,杜坤,等. 2015. 两次冰雹过程别淅层气象要素变化特征[J]. 高原气象,34(6):1677-1689. Yao Risheng, Tu Xiaoping, Du Kun, et al. 2015. Characteristics of two hail cases in boundary layer[J]. Plateau Meteor, 34(6): 1677-1689. (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:145-154. Yu Xiaoding, Yao Xiuping, Xiong tingnan, et al. 2006. The principle and application of Doppler weather radar[M]. Beijing: China Meteorology Press: 145-154. (in Chinese)

曾数军,荣利香,杨亚钦,等. 2013. 4.12 花都冰雹天气过程分析[J]. 广东气象,35(6):23-27. Zeng shujun, Rong Lixiang, Yang Yaqin, et al. 2013. Analysis of the hail weather process in Huadu 4.12[J]. Guangdong Meteor, 35(6): 23-27. (in Chinese)

郑艳,刘丽君,吴春娃. 2015. 近 10a 海南岛冰雹天气分析统计特征与概念模型[J]. 气象研究与应用,36(4):15-20. Zheng Yan, Liu Lijun, Wu Chunwa. 2015. Statistical characteristics and conceptual modual of hail weather in Hainan Island during recent 10 years[J]. J Meteor Res Appl, 36(4): 15-20. (in Chinese)

支树林,汤达章. 2008. 一次弱降雹过程的雷达产品特征及识别方法[J]. 气象与减灾研究,31(2):36-43. Zhi Shulin, Tang Dazhang. 2008. Characteristics of radar products and its identification in a weak hail event[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 31(2): 36-43.(in Chinese)

支树林,娄桂杰. 2009. 江西冰雹天气期间的闪电活动特征[J]. 气象与减灾研究,32(3):36-41. Zhi Shulin, Lou Guijie. 2009. Characteristics of lightning activity accompanying with hail in Jiangxi[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 32(3): 36-41.(in Chinese)

钟晨,张羽,高建秋,等. 2014. 双偏振多普勒天气雷达在冰雹识别中的应用[J]. 广东气象,36(4):76-80. Zhong Chen, Zhang Yu, Gao Jianqiu, et al. 2014. Application of dual polarization doppler weather radar in hail recognition[J]. Guangdong Meteor, 36(4): 76-80.(in Chinese)

朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 2007. 天气学原理和方法(第四版)[M]. 北京:气象出版社:398-410. Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2007. Principles and methods of synoptic meteorology (Fourth Edition)[M]. Beijing: China Meteorology Press: 398-410. (in Chinese)