

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, 2019. Study on the evolution of hailstorm and its cloud physical characteristics[J]. Meteor Mon, 45(3):415-425 (in Chinese).

一次冰雹天气过程的云系发展演变及 云物理特征研究^{*}

张小娟¹ 陶 玥² 刘国强¹ 彭宇翔¹

¹ 贵州省人工影响天气办公室, 贵阳 550081

² 中国气象科学研究院中国气象局人工影响天气中心, 北京 100081

提 要: 利用中尺度数值模式 WRF(Weather Research and Forecasting)的数值模拟,结合 NECP/FNL 再分析资料、地面、探空、多普勒雷达基数据和卫星产品等观测资料,综合分析了 2014 年 3 月 30 日发生在贵州省西南部的一次冰雹天气过程。研究了有利于冰雹发生的环流特征和环境条件,分析了冰雹云系的发展演变特征、云微物理结构特征,初步分析了冰雹形成的云物理机制。结果表明:此次冰雹天气是典型的低压辐合线型降雹类型,地面降雹位置位于 700 hPa 切变线和近地面辐合线附近及南侧;发生此次冰雹过程的对流云系经历了对流云系的初生阶段、合并加强阶段、成熟降雹阶段和东移阶段。贵州地区上空对流云系的微物理结构具有混合相云特征,高层为冰晶、雪,中层为云水、霰,低层为雨水、冰雹。霰和云水是形成雨水和冰雹的主要来源,霰碰撞过冷云水和霰的自动转化是冰雹形成的主要微物理机制。

关键词: WRF, 数值模拟, 云物理机制, 冰雹

中图分类号: P426.5, P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.03.011

Study on the Evolution of Hailstorm and Its Cloud Physical Characteristics

ZHANG Xiaojuan¹ TAO Yue² LIU Guoqiang¹ PENG Yuxiang¹

¹ Weather Modification Office of Guizhou Province, Guiyang 550081

² CMA Weather Modification Centre, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: In this study, a hailstorm that occurred in southwest of Guizhou Province on 30 March 2014 is simulated using the mesoscale model WRF (Weather Research and Forecasting). Combined with NCEP/FNL reanalysis data, ground, sounding, Doppler radar data, satellite products and other observation data, this hailstorm process is comprehensively analyzed. In addition, the characteristics of the hailstorm and its environmental conditions, the evolution characteristics of the hailstorm and the characteristics of the cloud microphysical structure, the cloud physical mechanism of the hailstorm are analyzed. The results show that this hailstorm was a typical low-pressure convergence line hailstorm, and the hail position on surface was at (or southern to) shear line at 700 hPa, closing to the ground convergence line. The convective cloud of this process underwent the initial stage, the consolidation stage, the mature-hail stage and the eastward shift stage. Thus, the microphysical structure of convective cloud over Guizhou Province has the

^{*} 贵州省工程技术研究中心建设项目(黔科合 G[2013]4001 号)、中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2015M53)和黔省专合字(2011)11 号共同资助

2017 年 12 月 5 日收稿; 2018 年 12 月 21 日收修定稿

第一作者: 张小娟, 从事人工影响天气技术研究. Email: zhxj19890103@sina.com

通信作者: 陶玥, 从事云降水物理和人工影响天气研究. Email: taoyuedemail@163.com

characteristics of mixed phase cloud with ice crystal and snow in upper layer, cloudwater and graupel in mid-layer, and rainwater and hail in lower layer. The most important sources for the rainwater and hail are the graupel and cloudwater. During the process of hail formation, the accretion between graupel and supercooled cloudwater, and the automatic conversion of graupel are the main microphysical mechanism.

Key words: WRF (weather research forecast), numerical simulation, cloud physical mechanism, hail

引 言

贵州省位于中国西南部的高原山地,地势西高东低,自中部向北、东、南三面倾斜,包括高原、山地、丘陵和盆地四种基本类型,高原山地居多。由于地形复杂,天气多变,是自然灾害高发区,有“无灾不成年”之说,在所有自然灾害造成的损失中,冰雹最为严重。冰雹天气是贵州省春季经常发生的一种天气现象。贵州的冰雹天气具有生成发展快、降雹频次高、影响范围广、局部灾害重、防范难度大的特点,其空间分布方面具有西多东少、中部地区多、边缘地区少的特点。贵州冰雹较多,冰雹灾害较重,对农业生产危害很大,据统计,每年因冰雹造成农作物受灾面积达 100 万亩(1 亩 $\approx 666.7\text{ m}^2$)以上,仅夏收作物减产就达 5 万吨左右。贵州省的冰雹天气主要集中在春季,占全年降雹日总数的 71.5%左右(周永水和汪超,2009;汪丽,2010),因此,对春季产生冰雹天气的影响系统及其形成机理的研究非常有必要。

20 世纪 70 年代以来,数值模拟成为研究冰雹云形成和发展的重要手段。80 年代以后我国学者开始进行一维冰雹云模式及二维冰雹云模式的研究。毛节泰等(1982)用一维积云模式预报冰雹。许焕斌和王思微(1985a;1985b)引入了雨水、冻雨和冰雹浓度连续方程,并重新给定了冻雨、冰雹的谱形式,建立了一个新的一维时变参数化模式,较好地描述了水凝物粒子间的相互作用和 0°C 层以下雹谱的演变过程。胡志晋和何观芳(1987)提出了一个比较完整的积雨云参数化模式,包括了积雨中主要的 26 种微物理过程。20 世纪 90 年代以后三维云模式在冰雹研究方面得以广泛使用,如洪延超(1998)考虑了冰雹云中详细的微物理过程,发展了一个三维弹性冰雹云催化模式,该模式可以分别计算作为雹胚的冻滴和霰,以冻滴和霰为胚胎的雹块的数量,并有催化功能。郭学良等(2001)建立和发展了一个包括云滴、云冰、雨滴、雪团、霰(雹)的 5 种云中水成物

及凝结、撞冻等 37 种主要微物理过程的三维冰雹分档强对流云数值模式,该模式能够提供冰雹的增长和分布信息。近年来,国内不少研究者采用冰雹云数值模式在冰雹形成机理方面做了很多工作(洪延超等,2002;刘术艳等,2004;蒋瑛等,2016;张德林和马雷鸣,2010;宋斌等,2008;丁建芳等,2014)。冰雹云数值模式可以模拟研究冰雹云的形成机理,但初始场一般采用单站探空,对流启动采用热泡方式,没有考虑地形或采用理想地形,很难再现实际冰雹云的形成和发展过程(黄美元和徐华英,1999;胡金磊等,2014)。随着中尺度数值模式的发展,更为复杂的冰雹云微物理方案应用于中尺度模式,由于中尺度模式在初始场、地形、辐射过程、下垫面状况等方面考虑更为全面,采用高分辨率、可分辨云方案的中尺度数值模式,对于模拟和再现实际冰雹云过程具有较大的优势,已成为研究冰雹云形成、演变的重要手段(隋东等,2005;周嵬等,2006;王秀明等,2009;周永水和汪超,2009;胡金磊等,2014;付烨等,2016)。

本文利用中尺度数值模式 WRF 模拟了 2014 年 3 月 30 日的一次强冰雹天气过程,研究了有利于冰雹发生的环流特征和环境条件,分析了冰雹云系的发展演变特征、云微物理结构特征及冰雹形成的云物理机制。

1 冰雹天气过程实况分析

2014 年 3 月 30 日 17:40(北京时,下同)至 23:30,贵州西南部的安顺、黔南、六盘水共 6 个市(县)出现了降雹天气,降雹点自西北向东南方向移动,地面降雹呈带状分布(图 1)。

1.1 天气背景分析

从 3 月 30 日 20 时 500 hPa 环流形势图(图 2)上可以看到亚洲中高纬为一槽一脊型,贵州受青藏高原东侧东移的高空槽的影响。另外,贵州还受 700 hPa 低涡切变线影响,低涡系统位于四川东部,

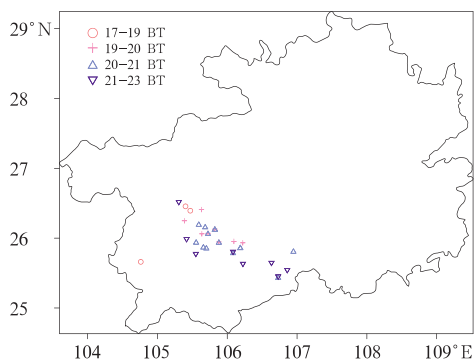


图1 2014年3月30日贵州省降雹分布图

Fig. 1 Observed hail in Guizhou Province
on 30 March 2014

切变线位于贵州省的西北部,低涡切变较为深厚并继续东移南压,且切变线附近有较强的水汽辐合抬升,对应850 hPa形势图上有近地面辐合线,位于贵州中部地区。由此可见,此次冰雹天气过程的主要影响系统是低涡切变线,属于典型的低压辐合线型降雹。低压辐合线型降雹天气是贵州省春季常见的降雹类型之一,占春季降雹的33.8%,一般地面辐合线和切变线南侧是最易降雹的区域。

从威宁探空站30日20时的温度对数压力图(图3)上,可以看出700~400 hPa有暖平流,400~250 hPa有冷平流,当时的CAPE为 $954.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,SI指数为 -5.08°C ,热力条件有利于对流发

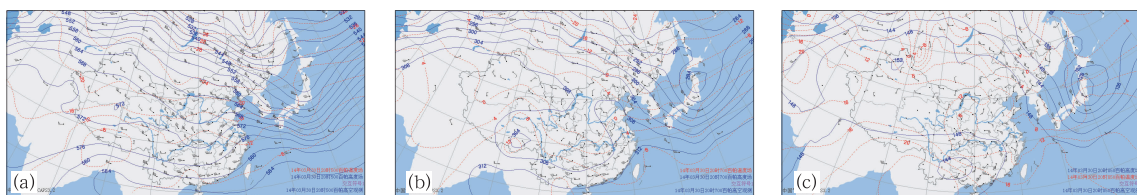


图2 2014年3月30日20时(a)500 hPa,(b)700 hPa和(c)850 hPa天气形势图

Fig. 2 (a) 500 hPa, (b) 700 hPa and (c) 850 hPa synoptic charts
at 20:00 BT 30 March 2014

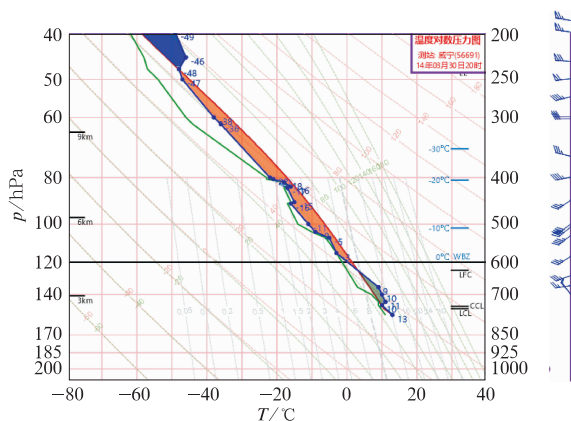


图3 2014年3月30日20:00威宁站T-logp

(红色实线:状态曲线;蓝色实线:温度层
结曲线;绿色实线:露点层结曲线)

Fig. 3 T-logp diagram at Weining Station
at 20:00 BT 30 March 2014

(red solid line: state curve, blue solid line;
temperature stratification curve, green
solid line: dew point stratification curve)

1.2 云系的演变特征

从FY-2E卫星反演产品相当黑体亮度温度(black-body temperature, TBB)(图4)中可以看到:发生冰雹的对流云系经历了初生阶段、合并加强阶段、成熟降雹阶段和东移阶段这四个不同的发展阶段。30日16时贵州省西北部的威宁县附近开始有三个对流云团生成并逐渐发展、合并,自西北向东南方向移动,移速约 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。随着对流云团的移动,云体发展旺盛,云团不断向周围发展,覆盖范围逐渐变大,中心加强,云层变厚,云顶温度降低,最低可达 -55°C 以下。从18—23时影响贵州省中部以西以南地区且地面伴有降雹。31日03时对流云完全移出贵州省。

1.3 雷达回波演变特征

选用了贵州毕节(Z9857)、贵阳(Z9851)、兴义(Z9859)和云南昭通(Z9870)四个雷达站所提供的6 min一次雷达基数据,采用中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室所开发的CinradMosaic软件对四个站点雷达观测进行组网,将基数据转化

生。 0°C 层、 -20°C 层、 -30°C 层高度分别在4420、7308、8500 m,均为低压辐合线型降雹的有利高度。

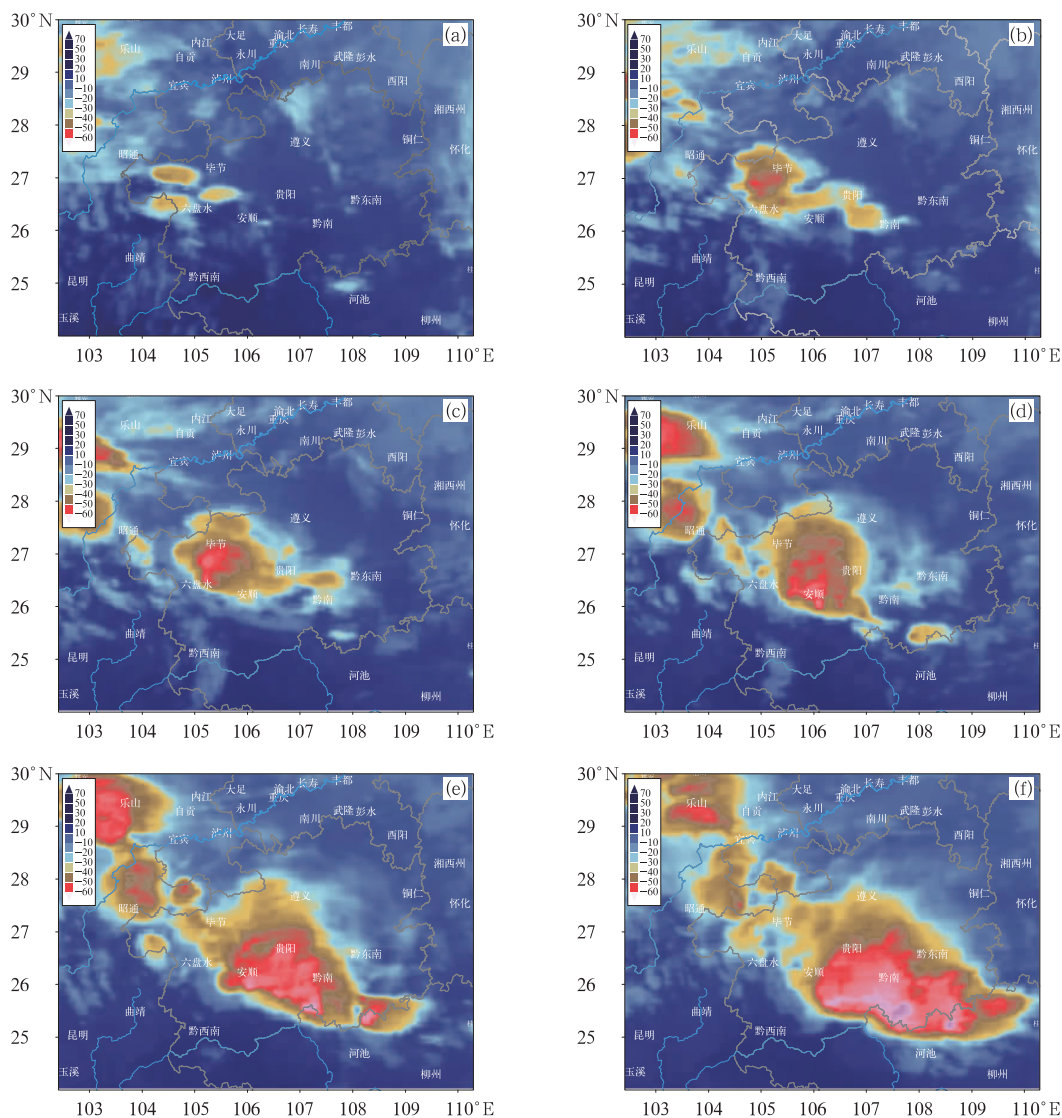


图 4 2014 年 3 月 30 日(a)17 时,(b)18 时,(c)19 时,(d)20 时,(e)21 时,
(f)22 时 FY-2E 卫星的 TBB 分布(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 4 Black-body temperature (TBB, unit: $^{\circ}\text{C}$) from satellite FY-2E
at (a) 17:00 BT, (b) 18:00 BT, (c) 19:00 BT, (d) 20:00 BT,
(e) 21:00 BT, (f) 22:00 BT 30 March 2014

成格点数据,然后使用贵州雷达团队开发的雷达系统客户端进行显示。图 5 给出了对流云系发展不同阶段典型时刻的雷达回波拼图,从图中发现:16:24 威宁县周边有多个对流单体生成发展,其中北部的云团向东移动,南部的云团向东偏北方向移动;18 时左右三块云团合并,并继续向东移动;19 时左右云团向东南方向移动;00 时云团基本移出贵州,继续南下移入广西。

2 冰雹天气过程的数值模拟

2.1 模式设计和资料介绍

本文使用的是 WRF3.5 版本,采用双向三层嵌套网格,网格嵌套以及区域设计如图 6 和表 1 所示。采用了 Milbrandt-Yau 双参数化微物理方案

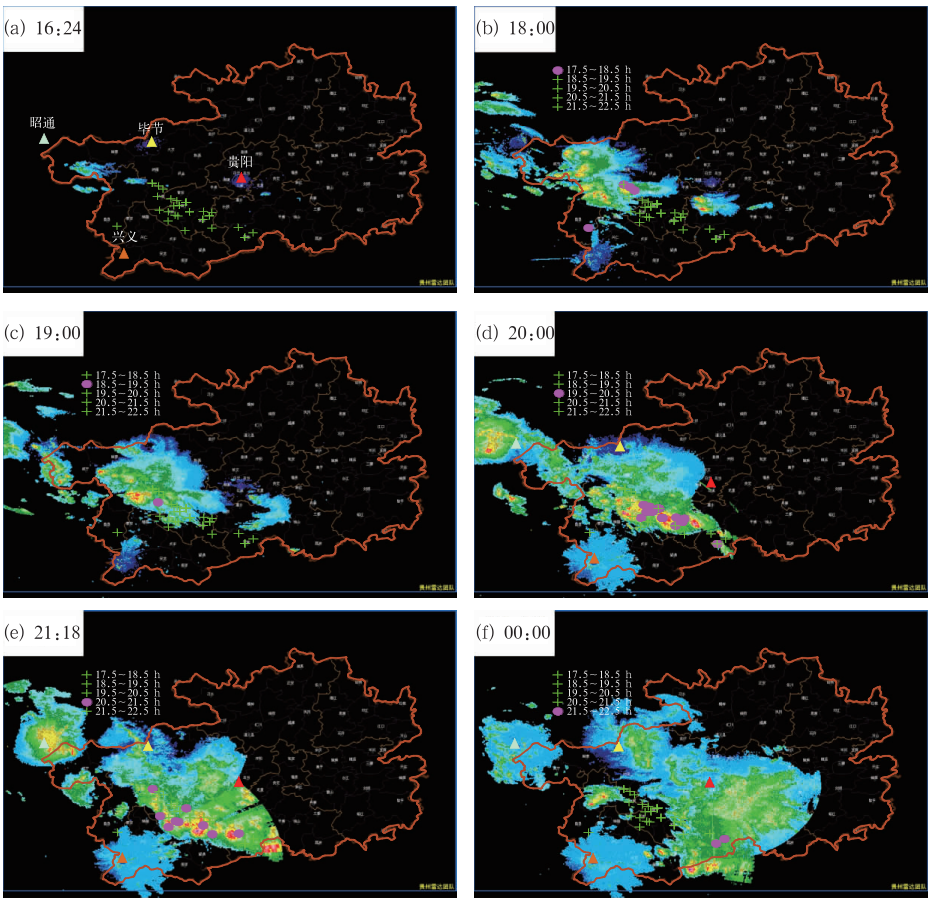


图 5 2014 年 3 月 30 日几个典型时刻的雷达回波拼图
(白色△:昭通雷达站,黄色△:毕节雷达站,红色△:贵阳雷达站,橙色△:兴义雷达站)
Fig. 5 Several typical moments of radar echo on 30 March 2014
(White, yellow, red and orange △ represent Zhaotong, Bijie, Guiyang and Xingyi Radar Stations, respectively)

表 1 WRF-ARW 模式模拟参数设置
Table 1 Configuration of WRF-ARW model parameters

	网格一	网格二	网格三
水平分辨率	9 km 241×157	3 km 364×328	1 km 598×376
积分时间	30 日 08 时至 31 日 08 时	30 日 08 时至 31 日 08 时	30 日 08 时至 31 日 08 时
微物理过程	Milbrandt-Yau 双参数化方案	Milbrandt-Yau 双参数化方案	Milbrandt-Yau 双参数化方案
积云对流参数化	Kain-Fritsch 方案	无	无
长波辐射方案	RRTM 方案	RRTM 方案	RRTM 方案
短波辐射方案	Dudhia 方案	Dudhia 方案	Dudhia 方案

注:RRTM: Rapid Radiative Transfer Model scheme。
Note: RRTM: Rapid Radiative Transfer Model scheme.

(Milbrandt and Yau, 2005a; 2005b; 2006a; 2006b),此方案是Milbrandt和Yau在2005年建立的一个全新的微物理显式方案,于2010年被引入WRF3.2版本中,该方案包含云水、雨水、冰晶、雪晶、霰、雹6种水成物过程,区分霰与雹。输出参量包括上述6种水成物的混合比和数浓度,以及水汽

混合比。模式初始场和边界场采用NCEP/NCAR提供的1°×1°FNL再分析资料,每6h更新一次。模式积分时间为24h,积分时间步长为60s。为验证模式模拟效果,选用兴义站(站号:Z9859)每6min一次的多普勒雷达基数据资料、气象自动站观测数据以及威宁站探空数据。

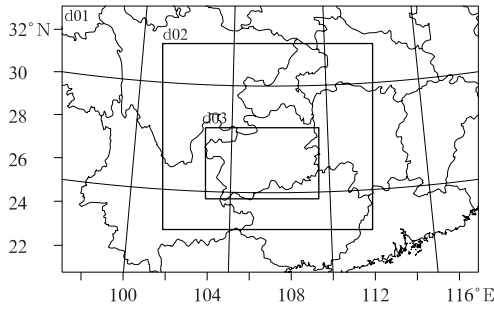


图 6 WRF 模式三层嵌套模拟区域
(d01、d02、d03 分别代表 1、2、3 层模拟区域)
Fig. 6 The triple nested simulation domains
used in WRF model
(d01, d02, d03 represent the 1st, 2nd and
3rd simulated areas respectively)

2.2 模拟结果验证

本文首先对此次冰雹过程进行了数值模拟,并对雹云形成发展的模拟结果进行了验证分析。表 2 给出了模拟雹云部分宏观特征与观测结果的比较,其中模拟雹云最大回波强度在 60 dBz 以上,与雷达观测的最大回波强度接近,同时最大云顶高度与观测也较为一致。另外,在雹云源地方面,模拟雹云与实际雹云一致,都为威宁县周边。但是,模拟雹云的移向为自西北向东南方向移动,比实况略偏东,模拟云团的初生时间为 17 时左右,比实况晚了约 1 h,并且模拟云团的生命史较观测结果长,地面冰雹的落

表 2 模拟的冰雹云与观测结果比较

Table 2 Comparison of observed hailstorms with simulated hailstorm

	雹云源地	雹云生命史 (经过贵州)/h	雹云移动方向	最大回波 /dBz	最大云顶 高度/km	对流云团生 成时间/h	冰雹落区
模拟	威宁	12	西北—东南且略偏东	>60	>12	17	省的西南部
实况	威宁	8	西北—东南	约 65	12.5	16	省的东北部

区较实况有偏差。

分别过实况和模拟降雹时刻的降雹点做垂直剖面(图 7)。从图 7 中可知,雷达观测降雹时的雷达回波顶高可以达到 12 km 以上,45 dBz 以上回波顶高达到了 8 km 左右,最大回波强度达到 60 dBz 以上,位于 3~5 km 高度。模拟雹云降雹时回波顶高在 12 km 以上,45 dBz 以上回波顶高也达到了 11 km 左右,最大回波强度达到 60 dBz 以上,介于 3~5 km,由此可见模拟雹云较实际偏强。

从 24 h 累计降水(图 8)来看,实测地面 24 h 降水量最大可达 75 mm 以上,且降水中心位于贵州省

西南部和东南部;模拟结果显示地面 24 h 降水量最大为 100 mm 左右,25 mm 以上的雨带呈西北—东南走向的带状分布,可见模拟的降水落区与实况基本一致,且强度相当。可见,WRF 较好地模拟出了此次强降水过程,雨强和雨区位置与实况较为一致。

对比图 1 和图 9 发现:实况中 35 个降雹点呈西北—东南走向的带状分布,冰雹落区主要位于贵州的西南部,最大冰雹直径为 5 cm;模拟冰雹落区位于贵州东南部地区;与实况相比,模拟的降雹点位置偏东,分布也比较分散(图 9)。这可能与模拟的冰雹云主要由地面辐合线上启动有关。

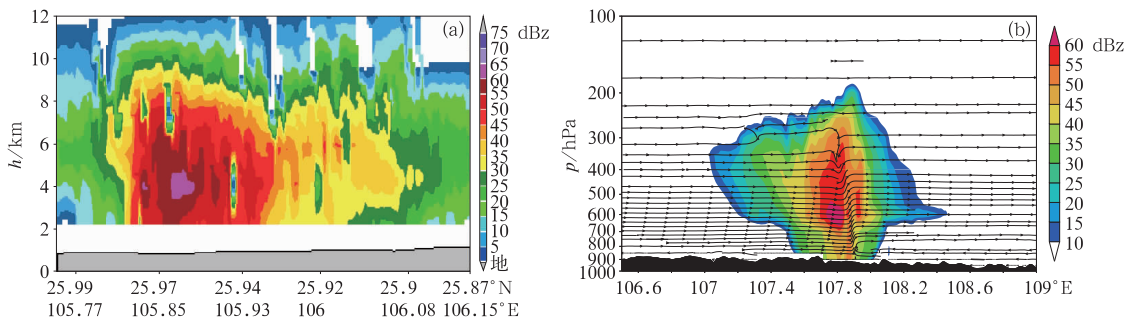


图 7 2014 年 3 月 30—31 日降雹时刻雷达回波垂直剖面结构

(a)30 日 20:01 雷达观测,(b)31 日 02:00 模式模拟

Fig. 7 Evolution comparison of observed and simulated hailstorms in 30—31 March 2014

(a) radar echo vertical section at 20:01 BT 30, (b) radar echo vertical section
at 02:00 BT 31 March 2014

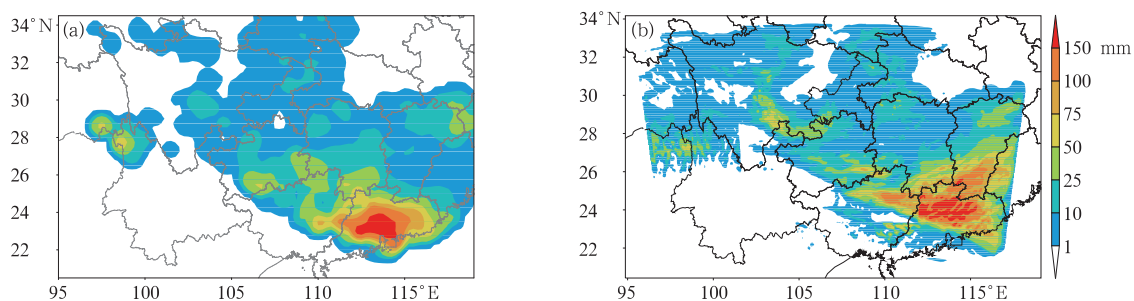


图8 2014年3月30日08时至31日08时(a)实况,(b)模拟地面24 h降水量

Fig. 8 Observed (a) and simulated (b) 24 h rainfall from 08:00 BT 30 to 08:00 BT 31 March 2014

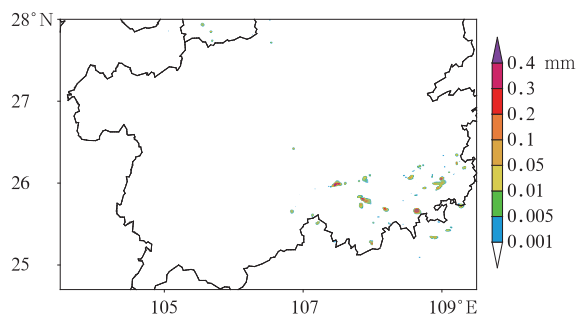


图9 模式模拟的2014年3月31日00—05时地面降雹分布图

Fig. 9 Distribution of simulated hails on surface from 00:00 BT to 05:00 BT 31 March 2014

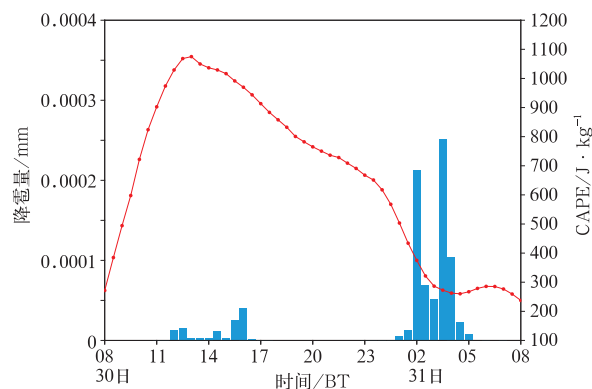


图10 2014年3月30日08时至31日08时CAPE与地面降雹量随时间变化

Fig. 10 Variation of CAPE and accumulated hail on surface from 08:00 BT 30 to 08:00 BT 31 March 2014

3 模拟结果分析

3.1 环境背景场分析

从地面降雹量和CAPE随时间的变化图(图10)中可以看到:08—13时CAPE逐渐累积,13时达到最大;12—17时地面有弱降雹出现,不稳定能量得以释放,CAPE逐渐减小;30日17时至31日05时雹云生成发展,降水降雹出现,CAPE继续减小,31日01—05时随着地面降雹的出现,CAPE急剧减小;降雹结束以后,不稳定能量重新累积,CAPE又缓慢增大。

对比800和250 hPa的散度场(图略)可以发现,800 hPa的辐合区与250 hPa的辐散区分布基本一致,说明这些区域的云层较厚,且云的底层辐合与高层辐散相配合,有利于云系的垂直向上发展。从散度场大值区的垂直速度场上也可以发现,从800~250 hPa均为上升气流区,可见,云体的垂直发展非常旺盛。从各个高度层的水汽场上可以发现:从低层到高层水汽含量逐渐递减,水汽混合比

最大可达 $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上。结合散度场发现,散度较大的区域水汽混合比也较大,即低层水汽被垂直向上输送到高层,补给了云体发展所需的水汽,促进了云的垂直发展。

3.2 模拟云系的发展演变特征

将云系的发展演变过程分为四个阶段:初生发展阶段(30日17—21时)、合并加强阶段(30日21时至31日00时)、成熟降雹阶段(31日00—05时)和东移减弱阶段(31日05时以后)。分别讨论这四个阶段模拟云系的水平分布特征和垂直结构特征、雷达回波水平分布和垂直结构特征。

30日17时起贵州西北部的威宁周边开始有多个对流云团生成,并逐渐发展,自西北向东南方向移动,云区覆盖范围的面积也逐渐增大(图11a)。从21时至降雹前夕(31日00时,图11b),对流云团不

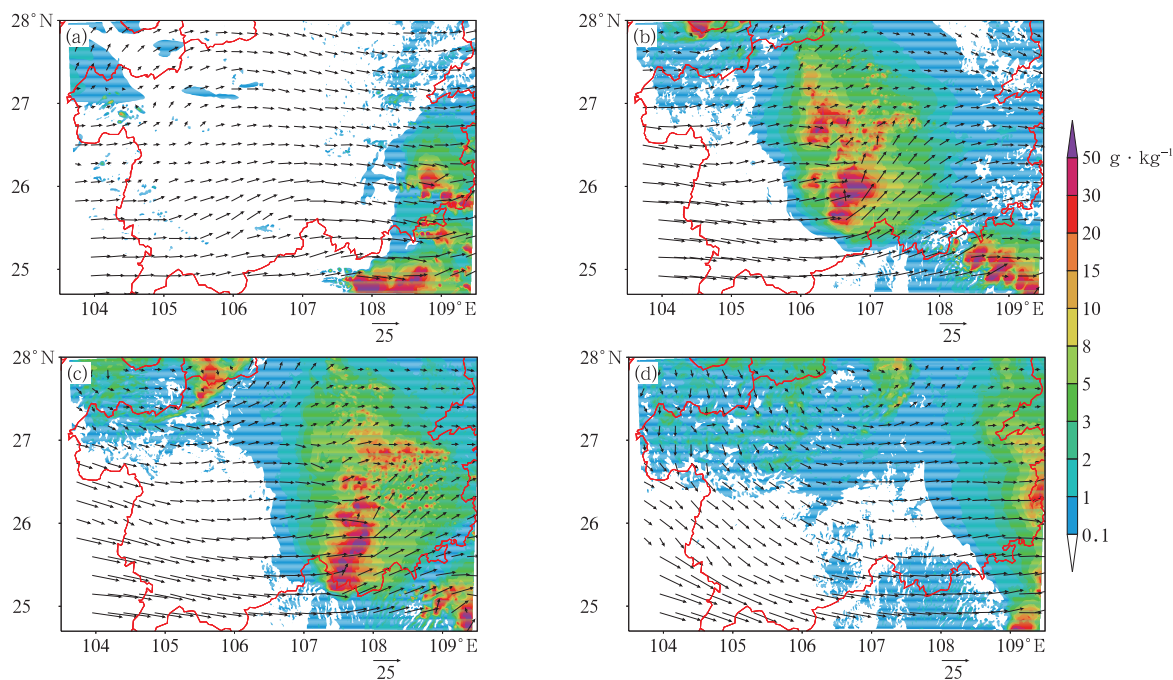


图 11 2014 年 3 月(a)30 日 17 时,(b)31 日 00 时,(c)31 日 02 时,(d)31 日 05 时
模拟云系总水凝物含水量和 700 hPa 风场分布特征

Fig. 11 Water content of total hydrometeors for simulated cloud system and wind at 700 hPa
at (a) 17:00 BT 30, (b) 00:00 BT 31, (c) 02:00 BT 31, (d) 05:00 BT 31 March 2014

断合并加强,云系发展非常旺盛,云内比含水量最大值由 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增大至 $50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,且大值区域面积也增大;31 日 00—05 时,随着云系的东移南下,云系发展成熟,云内比含水量最大值在 $50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,云水含量大值区不断拉长,并且地面出现降雹。从 30 日 17 时至 31 日 05 时影响贵州威宁至黔东南一线以南地区,05 时以后云系基本东移移出贵州(图 11d)。

从雷达回波水平分布图中(图略)也可以看到,17 时威宁县附近有 3 小块雷达回波生成,回波强度在 35 dBz 以下,回波位于 6~10 km,且云体的后部有一上升气流区,云体继续发展;随着云体不断发展、合并,雹云逐渐发展旺盛,至 31 日 00 时,雷达回波已经横跨 2 个经度,回波强度最大为 65 dBz,45 dBz 以上强回波中心顶高达到 12 km;05 时降雹结束以后,云体衰减,回波顶高降至 9 km 以下,强回波面积缩减。

4 云系的微物理结构特征

4.1 不同发展阶段云中水凝物的垂直结构特征

模拟云系初生阶段 17 时(图 12a)穿过比含水

量高值中心(26.87°N)自西向东的垂直结构特征:云水含量最大可达 $4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,冰晶数浓度可达 $2 \times 10^4 \text{ L}^{-1}$,冰相粒子(雪+霰)含量最大可达 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,云内以上升气流为主,最大上升速度达 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

模拟云系降雹前云系发展最旺盛(31 日 00 时,图 12b)时,云内最大上升速度增加到 $21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,云水含量小于 $3.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,冰晶数浓度为 $3.5 \times 10^4 \text{ L}^{-1}$,且地面有降水;冰相粒子比含水量增加到 $9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,600~500 hPa 高度层有雹粒子生成,雹粒子比含水量为 $8 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。总的来说,降雹前云内以上升气流为主,随着云的发展,上升速度变大,云水含量和冰相粒子含量都增加。

图 12c 为模拟云系成熟降雹阶段典型时刻(31 日 02 时)过降雹中心(25.8°N)自西向东的垂直剖面结构,其中云水含量最大为 $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,冰晶数浓度约 $2.5 \times 10^4 \text{ L}^{-1}$,地面有降水,以冷云降水为主;冰相粒子含量最大为 $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,位于 700~300 hPa,地面至 350 hPa 高度有雹粒子,雹粒子比含水量介于 $0.035 \sim 0.14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。且云中有明显的上升和下沉气流,以上升气流为主,上升速度为 $16 \sim 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。总的来看,成熟阶段云中以冰相粒子为主,且云内以上升气流为主。

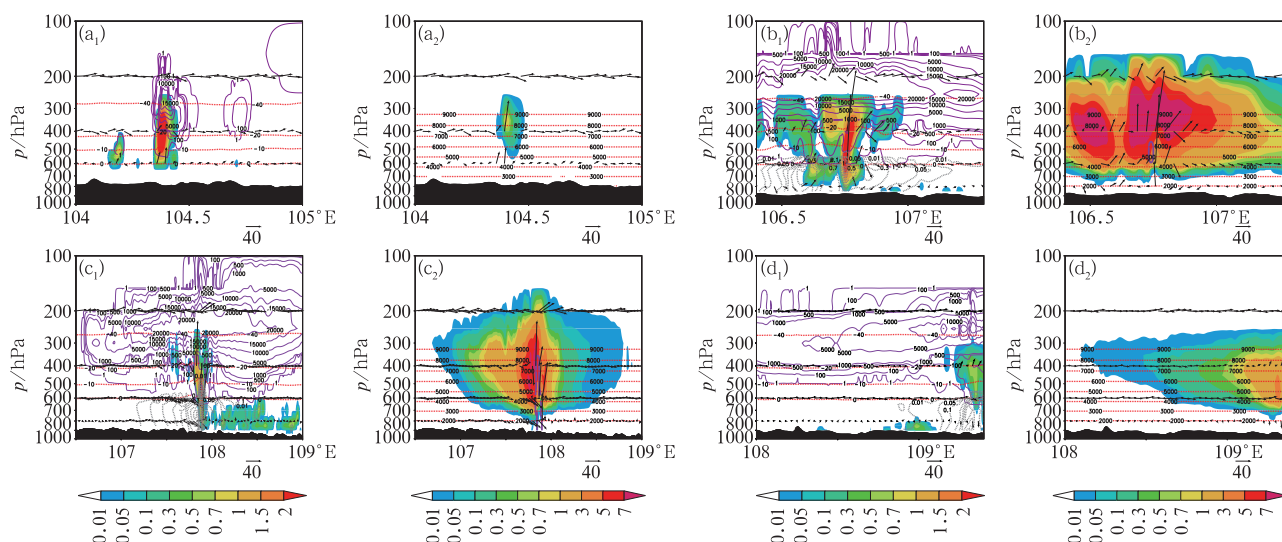


图12 通过不同发展阶段云系比含水量高值中心自西向东的垂直剖面:

(a) 30日17时; (b) 31日00时; (c) 31日02时; (d) 31日05时

(a₁, b₁, c₁, d₁) 云水含水量(彩色阴影, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 冰晶数浓度(蓝色实线, 单位: L^{-1})和雨水含水量(灰色虚线, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) (红线: 等温线, 单位: $^{\circ}\text{C}$; 箭头: 风场, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a₂, b₂, c₂, d₂) 雪+霰含水量(彩色阴影, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 雹含水量(紫色实线, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) (红线: 等高线, 单位: m ; 箭头: 风场, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 12 Vertical sections of water content hydrometeors in simulated cloud at different stages of development

(a) 17:00 BT 30, (b) 00:00 BT 31, (c) 02:00 BT 31, (d) 05:00 BT 31 March 2014

(a₁, b₁, c₁, d₁) cloud water (shaded, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), ice crystal (blue solid line, unit: L^{-1}), and rain (gray dotted line, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) (red line: isotherm, unit: $^{\circ}\text{C}$, arrow: wind field, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

(a₂, b₂, c₂, d₂) snow with graupel (shaded, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and hail (purple solid line, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) (red line: isohypse, unit: m , arrow: wind field, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

降雹结束后, 模拟云系减弱移出贵州省, 600 hPa 以上为上升气流, 600 hPa 以下为下沉气流, 且上升和下沉气流较弱; 云水含量较小, 在 $0.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下, 地面有降水; 冰相粒子比含水量小于 $3.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。即移出减弱阶段云内的云水、霰和雪晶含量均减小。

4.2 不同发展阶段云系微物理结构特征

通过计算云内含水量中心或地面降雹点附近 20 km 水平范围的平均值, 分析不同发展阶段云系的不同高度水凝物粒子的分布情况(图 13)。

云系形成初期云中水凝物以云水为主, 云水、霰粒子和冰晶都呈单峰态分布, 峰值在 400~300 hPa 高度层, 且各水凝物粒子的比含水量都小于 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, q_s 最小; 云中尚未生成雨水和雹粒子。而在降雹前夕, 云中水凝物以霰粒子为主, 极大值达到 $7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 峰值位于 300 hPa 高度; q_c 、 q_i 均在 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右, q_s 仍旧较小; 550 hPa 以下有雨水生成,

且地面有降水; 600~450 hPa 有雹粒子生成。可见, 降雹前随着云系的发展旺盛, 云中的霰粒子在不断的增加, 云体从以云水为主逐渐发展为以霰为主, 云水、冰晶和雪晶含量变化不大。

云系降雹时, 云中水凝物粒子仍以霰粒子为主, 极大值分布在 500~400 hPa 高度, 且极值小于 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; q_c 、 q_s 均小于 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, q_i 小于 $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 500 hPa 以下有雨水生成, 且地面有降水; 400 hPa 高度以下有冰雹生成, 并且地面伴有降雹。从云系移出贵州后减弱阶段的水凝物廓线图中可知, 云中水凝物粒子仍以霰粒子为主, 极大值出现在 550 hPa, 极大值约为 $2.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; q_c 、 q_s 、 q_i 都小于 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 地面至 550 hPa 高度层有雨水, 雹粒子为 0。

降雹前后, q_g 和 q_c 一直减少, q_s 一直增加, q_r 和 q_i 均先增加后减少, q_g 减小约 $4.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, q_c 减小约 $0.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, q_i 减小约 $0.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。600 hPa 以上, 冰雹处于上升气流区(图 12c₂), 冰雹粒子被

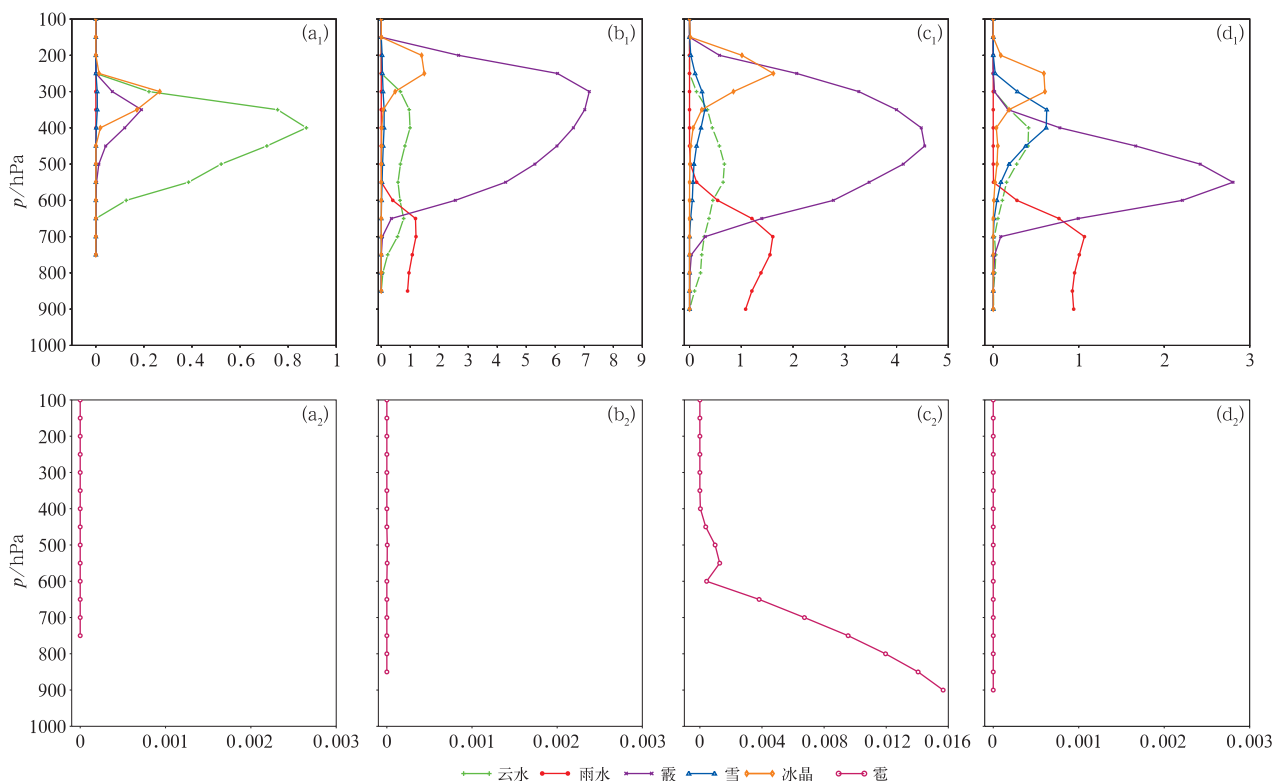


图 13 2014 年 3 月 30—31 日不同发展阶段水凝物含量: (a₁, b₁, c₁, d₁) 云水、雨水、霰、雪、冰晶和 (a₂, b₂, c₂, d₂) 雹(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的垂直廓线
(a) 30 日 17 时(初生发展阶段), (b) 31 日 00 时(合并加强阶段),
(c) 31 日 02 时(成熟降雹阶段), (d) 31 日 05 时(移出减弱阶段)

Fig. 13 Vertical profiles of total content of hydrometeors (a₁, b₁, c₁, d₁) q_c : cloud water, q_r : rain water, q_g : graupel, q_s : snow, q_i : ice crystal and (a₂, b₂, c₂, d₂) q_h : hail at different developing stages
(a) 17:00 BT 30, (b) 00:00 BT 31, (c) 02:00 BT 31,
(d) 05:00 BT 31 March 2014

输送到云水和霰粒子富集区,冰雹增长主要是由收集云水和霰粒子自动转化而来,上升气流托不住时,会下落到 600 hPa 以下的下沉气流区。因此,霰和云水是形成雨水和冰雹的主要来源。

5 结 论

(1) 此次冰雹天气是低压辐合线型降雹类型,这种天气形势是贵州春季常见的降雹类型之一,占春季降雹的 33.8%。700 hPa 切变线和地面辐合线附近及南侧的六盘水、安顺和黔南 6 个县(市)出现冰雹。从卫星和雷达产品的演变特征分析可见,发生冰雹的对流云系经历了 4 个不同的发展阶段,即对流云系的初生阶段、合并加强阶段、发展旺盛阶段和东移阶段。

(2) 模拟云系降雹前,云内以上升气流为主,随

着云的发展旺盛,云内上升速度变大,云水含量和冰相粒子含量均增加;降雹时,云中以冰相粒子为主,且云内以上升气流为主;降雹后,云内的云水、霰和雪晶含量均减小。

(3) 贵州地区上空对流云系的微物理结构具有混合相云特征。高层为冰晶、雪,中层为云水、霰,低层为雨水、冰雹;云中水凝物的含水量由高到低依次为霰、冰晶、云水、雨水、雪、雹,云中水凝物粒子以霰为主。霰和云水的撞冻增长和霰的自动转化过程是冰雹形成的源项,霰和过冷云水的撞冻增长过程形成雹胚,雹胚被上升输送到中高层过冷云水和霰聚集区,撞冻过冷云水和霰自动转化使得雹胚长大成冰雹。

(4) WRF 模式比较好地再现了此次冰雹天气过程,由于本文只进行了一个个例研究得到的初步结果,贵州省冰雹形成微物理机制还需要进一步全

面深入研究。

参考文献

- 丁建芳,杜春丽,鲍向东,等,2014.一次冰雹云过程及其冰雹形成机制的模拟研究[J].气象与环境科学,37(2):49-57. Ding J F, Du C L, Bao X D, et al, 2014. Simulation study on a hail cloud course and formation mechanism[J]. Meteor Environ Sci, 37(2):49-57(in Chinese).
- 付焱,刘晓莉,丁伟,2016.一次冰雹过程及雹云物理结构的数值模拟研究[J].热带气象学报,32(4):546-557. Fu Y, Liu X L, Ding W, 2016. A numerical simulation study of a severe hail event and physical structure of hail cloud[J]. J Trop Meteor, 32(4):546-557(in Chinese).
- 郭学良,黄美元,洪延超,等,2001.三维冰雹分档强对流云数值模式研究 I. 模式建立及冰雹的循环增长机制[J].大气科学,25(5):707-720. Guo X L, Huang M Y, Hong Y C, et al, 2001. A study of three-dimensional hail-category hailstorm model Part I: model description and the mechanism of hail recirculation growth[J]. Chin J Atmos Sci, 25(5):707-720(in Chinese).
- 洪延超,1998.三维冰雹云催化数值模式[J].气象学报,56(6):641-653. Hong Y C, 1998. A 3-D hail cloud numerical seeding model[J]. Acta Meteor Sin, 56(6):641-653(in Chinese).
- 洪延超,肖辉,李宏宇,等,2002.冰雹云中微物理过程研究[J].大气科学,26(3):421-432. Hong Y C, Xiao H, Li H Y, et al, 2002. Studies on microphysical processes in hail cloud[J]. Chin J Atmos Sci, 26(3):421-432(in Chinese).
- 胡金磊,郭学良,侯灵,2014.下垫面对雹云形成发展的影响[J].气候与环境研究,19(4):407-418. Hu J L, Guo X L, Hou L, 2014. Effect of underlying surface on the formation and evolution of hail cloud[J]. Climatic Environ Res, 19(4):407-418(in Chinese).
- 胡志晋,何观芳,1987.积雨云微物理过程的数值模拟——(一)微物理模式[J].气象学报,45(4):467-484. Hu Z J, He G F, 1987. Numerical simulation of microprocesses in cumulonimbus clouds (I) microphysical model[J]. Acta Meteor Sin, 45(4):467-484(in Chinese).
- 黄美元,徐华英,1999.云和降水物理[M].北京:科学出版社:291. Huang M Y, Xu H Y, 1999. Physics of Cloud and Precipitation [M]. Beijing: Science Press, 291(in Chinese).
- 蒋瑛,朱克云,张杰,2016.贵州地区冰雹云微物理过程及发展机制数值模拟研究[J].气象,42(8):920-933. Jiang Y, Zhu K Y, Zhang J, et al, 2016. Microphysical process of hail cloud in Guizhou and numerical simulation research on its dynamic developing mechanism[J]. Meteor Mon, 42(8):920-933(in Chinese).
- 刘术艳,肖辉,杜秉玉,等,2004.北京一次强单体雹暴的三维数值模拟[J].大气科学,28(3):455-470. Liu S Y, Xiao H, Du B Y, et al, 2004. Three-dimensional numerical simulation of a strong convective storm in Beijing[J]. Chin J Atmos Sci, 28(3):455-470(in Chinese).
- 毛节奏,盛裴轩,田珍富,1982.用积云数值模式预报冰雹的探讨[J].气象学报,40(1):73-79. Mao J T, Sheng P X, Tian Z F, 1982. An approach of the hail forecast with a numerical model of cumulus[J]. Acta Meteor Sin, 40(1):73-79(in Chinese).
- 宋斌,李泽椿,刘奇俊,等,2008.山东省一次冰雹云过程的数值模拟[J].气象,34(2):3-9. Song B, Li Z C, Liu Q J, et al, 2008. Numerical simulation of a hail storm in Shandong[J]. Meteor Mon, 34(2):3-9(in Chinese).
- 隋东,沈桐立,张涛,2005.沈阳地区一次冰雹天气过程形成机制的数值模拟[J].气象,31(7):20-23. Sui D, Shen T L, Zhang T, 2005. Numerical simulation of a hail event form mechanism in Shenyang, Liaoning Province[J]. Meteor Mon, 31(7):20-23(in Chinese).
- 汪丽,2010.贵州冰雹灾害及其防御[J].贵州气象,34(5):16-18. Wang L, 2010. Hail disaster and its prevention in Guizhou[J]. J Guizhou Meteor, 34(5):16-18(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).
- 许焕斌,王思微,1985a.一维时变冰雹云模式研究(一)——反映雨和冰雹谱的双参数演变[J].气象学报,43(1):13-25. Xu H B, Wang S W, 1985a. A numerical model of hail-bearing convective cloud (1): biparameter evolution of size distribution of raindrops, frozen raindrops and hailstones[J]. Acta Meteor Sin, 43(1):13-25(in Chinese).
- 许焕斌,王思微,1985b.一维时变冰雹云模式研究(二)反映融化对雹谱双参数演变的影响[J].气象学报,43(2):162-171. Xu H B, Wang S W, 1985b. A numerical model of hail-bearing convective cloud (2): hailstone biparameter size-distribution evolution caused by melting[J]. Acta Meteor Sin, 43(2):162-171(in Chinese).
- 张德林,马雷鸣,2010.“0730”上海强对流天气个例的中尺度观测分析及数值模拟[J].气象,36(3):62-69. Zhang D L, Ma L M, 2010. Mesoscale observation and simulation on 30 July 2005 severe convective case in Shanghai[J]. Meteor Mon, 36(3):62-69(in Chinese).
- 周崑,张强,康凤琴,2006.数值模拟青藏高原东北边缘冰雹云形成的中尺度环境——个例研究[J].干旱气象,24(3):5-13. Zhou W, Zhang Q, Kang F Q, 2006. Numerical simulation on a strong hailstorm case over the Northeast Qinghai-Xizang Plateau[J]. Arid Meteor, 24(3):5-13(in Chinese).
- 周永水,汪超,2009.贵州省冰雹的时空分布特征[J].贵州气象,33(6):9-11. Zhou Y S, Wang C, 2009. Hail climatic characteristics of Guizhou Province[J]. J Guizhou Meteor, 33(6):9-11(in Chinese).
- Milbrandt J A, Yau M K, 2005a. A multimoment bulk microphysics parameterization. Part I: analysis of the role of the spectral shape parameter[J]. J Atmos Sci, 62(9):3051-3064.
- Milbrandt J A, Yau M K, 2005b. A multimoment bulk microphysics parameterization. Part II: a proposed three-moment closure and scheme description[J]. J Atmos Sci, 62(9):3065-3081.
- Milbrandt J A, Yau M K, 2006a. A multimoment bulk microphysics parameterization. Part III: control simulation of a hailstorm[J]. J Atmos Sci, 63(12):3114-3136.
- Milbrandt J A, Yau M K, 2006b. A multimoment bulk microphysics parameterization. Part IV: sensitivity experiments[J]. J Atmos Sci, 63(12):3137-3159.