文章编号: 1004-4965(2010)03-0379-06

两类强对流天气过程的模式模拟及其比较

周后福^{1,2,3}, 郭品文¹, 翟菁^{2,3}

(1. 南京信息工程大学大气科学学院, 江苏 南京 210044; 2. 安徽省气象科学研究所, 安徽 合肥 230031; 3. 安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘 要:基于雷达探测数据和地面天气现象,应用 MM5 模式对冰雹大风和龙卷两类强对流天气过程进行 数值模拟,分析模式模拟回波和雷达实际回波,研究模拟的微物理和动力特征,探讨两类强对流天气微物理 和动力特征差异之间的可能原因。结果表明: (1) 在雷达回波的模拟方面,两类强对流天气过程的模拟效 果较好,模拟的雷达回波具有一定的可靠性。(2) 冰雹大风过程的微物理模拟说明,雪晶位于0℃层以上; 与雨水情况相对应的回波带等值线较为密集;云水含量主要分布在0 ℃层以下,呈分散分布形态;雨水含量 在0℃层上下皆有分布。由龙卷过程的微物理模拟可知,云水含量主要分布在0℃层以下,基本连片分布; 雨水含量在0℃层以下有所分布,但主要分布在0℃层以上,且数值大,等值线密集;云冰含量也是呈现零 星分布。(3) 从动力特征的模拟来看,强对流天气过程对应于强的上升运动,但是较强的上升运动区域并 不分布在回波带的固定位置。

关 键 词: 气象学; 强对流天气; MM5 模式; 微物理; 动力; 原因 中图分类号: P458.1.21.2 文献标识码: A Doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2010.03.016

1 引 言

2010 年 06 月

强对流天气主要包括冰雹、雷电、雷雨大风、 龙卷、短时强降水、下击暴流等,它的特点是空间 尺度小、生命史短、突发性强、发展演变迅速、破 坏力大,因此倍受人们的关注^[1-4]。由于强对流天 气的中小尺度特性及其发生发展的复杂性,其影响 机理、微物理过程以及与大型系统的相互作用等难 以有效把握,目前缺乏强对流天气的客观预报方法, 其预报技术难以满足社会需求,因此有必要加大力 度对各类强对流天气的数值模拟研究。目前对于灾 害性天气的微物理、动力学方面已经取得一些模拟 结果。Schecter等^[5]运用次声波的绝热形式对类龙卷 风进行了数值研究,得到空间距离10m的雷暴模拟 结果。文莉娟等⁶⁰的暴雨云微物理过程的模拟研究 表明,华南暴雨云微物理场的MM5模拟没有雪的出 现,各微物理量的变化与每小时降水量的趋势一致。 孙晶等^[7]的降雪过程的微物理、动力过程的模拟研 究说明,云中水成物相态分布与温度有密切关系, 雪的产生主要来自于水汽凝华增长和雪收集冰晶增 长,冰相粒子融化促进雨的形成;降雪过程对热力、 动力过程具有一定的反馈影响,相变潜热对上升运 动和降水有正反馈作用,降水粒子下落拖曳力对上 升运动和降水有负反馈作用。冰雹的微物理、动力 过程模拟研究表明,水分和动力条件是冰雹形成和 增长的重要因素,并决定冰雹云的强度和冰雹的大 小;冰雹形成和增长过程中的微物理过程决定了冰 雹云的消亡^[8]。王在志等^[9]的研究说明,加入水成物 的初始条件不仅对模式整体预报能力有明显影响, 而且由于动力场和热力场更加协调,可减少模式初 始启动时间,提高模式短时预报能力。上述研究说 明,有关微物理量的研究很少涉及到龙卷天气数值 模拟,可能是由于龙卷过程出现的几率太小,同时 涉及到两类强对流天气的数值模拟及其对比工作则 更少见。本文工作涉及到一次龙卷天气,并对两类 强对流天气的模拟结果进行对比。具体为基于2006

收稿日期: 2008-11-06; 修订日期: 2009-03-09

基金项目:国家自然科学基金项目(40675001);安徽省科技攻关计划(07010202058);安徽省气象局项目(KM0604)共同资助

通讯作者:周后福,男,安徽省人,在读博士研究生,高级工程师,主要从事灾害性天气分析和模拟研究。E-mail: zhf ahqx@vahoo.com.cn

年4月一次冰雹和2007年7月一次龙卷天气过程,用 MM5模拟两类强对流天气,比较模拟的雷达回波和 实况的雷达回波,分析模拟的微物理量特征和动力 特征,探究微物理量场和动力场之间的异同点及其 可能原因。MM5模式采用3层嵌套方案,最小空间 分辨率为3 km,输出时效1 h;积云参数化方案采用 Grell方案,显式微物理方案采用Reisner霰方案,霰 方案可给出云水、云冰、雪晶、雨水、霰5种微物理 量的模拟结果。

2 冰雹大风过程

2.1 天气实况

2006年4月3—4日,安徽省自北向南出现了 雷雨、大风、冰雹、强降水和降温天气。图1为本 次强对流天气过程降水量及大风、冰雹发生的主要 位置。图中冰雹用"△"标示,大风用"F"标示。 由图1可见,5个市县出现8级以上持续时间较长 的大风,主要集中在沿淮西部。降水多为小到中雨, 沿淮一带较大,与大风区域大体接近。15个市县的 部分乡镇出现冰雹,主要分布在淮河以北和沿淮西 部,蒙城坛城镇出现最大直径50mm的冰雹,冰雹 集中出现在3日15:30—23:30、4日17:30—19:00 的2个时间段,具有自西北向东南的移动路径。



大风和冰雹出现地点

2.2 雷达回波的验证

采用 MM5 模式进行模拟, 初始场为实况资料, 起报时间为 4 月 3 日 20 时。为了验证模式模拟的雷 达回波的准确性, 采用与实际雷达回波进行比较。 为尽可能接近平面输出效果, 利用最低仰角 0.5°的 实际雷达探测数据。验证模拟回波和实际回波之间 的相似性, 有回波分布相似性和移动相似性两种。

从4月3—4日的合肥实际雷达回波可以清楚地 看出,回波有明显自北到南的移动倾向。由 MM5 模式模拟的雷达回波可以看出,模拟回波也有类似 移动情况,说明此时模拟出的雷达回波大体逼近实 际雷达回波。图 2 是 4 月 4 日 06 时雷达回波及其模 拟回波。图 2a 显示,实际雷达回波的分布主要有两 大区域,一个在沿淮到大别山地区,最强回波约为 60 dBz;一个在江淮东部地区,最强回波约为 40 dBz,比西部地区强。模拟的雷达回波(图 2b)也 大致分成两大区域,一个在沿淮、大别山到合肥以 西地区,最强回波强度约 40 dBz;一个在安徽东部 地区,最强回波强度约 50 dBz,东部回波强度比西 部强。模拟回波与实际回波的分布区域大致对应, 强度也是西弱东强,最强回波数值大体逼近,反映 出两种雷达回波的主要分布特点。

2.3 微物理量特征

为了对微物理量进行空间结构方面的探讨,选择如图2b所示的AB、CD连线进行垂直剖面分析(图 3)。图3中坐标单位为km,蓝色线表示0℃层,蓝 色数据代表冰晶,红色线代表雨水,绿色线代表云 水,紫色线代表雪晶,黄色线代表霰,单位g/kg。 冰晶的等值线间隔0.1 g/kg,其他微物理量的等值线 都是0.2 g/kg;黑色底图代表比湿,单位也是g/kg。 图3给出主要的回波带用数字标示。

由图3a可知,其0 ℃层约在3.7 km,在回波带4 之处0 ℃层有所抬高,此处伴随有上升气流,约在 4 km左右。雨水有4处,每个回波带对应一处雨水, 回波带2和回波带3的雨水没有接地,说明雨水没有 降落到地面。回波带4的等值线较为密集。云水情况 大约有4处,主要位于4 km以下,也以回波带4附近 云水较为集中。雪晶位于0 ℃层以上,对应于回波 带1、2、4,回波带2的雪晶浓度较低(最大值约0.75 g/kg),回波带1、4的雪晶浓度较高,超过1.3 g/kg。

由图 3b 可知,其0 ℃层在 3.3~3.8 km。雨水 有 4 处,每个回波带对应一处雨水,回波带 2 的雨 水没有接地。云水情况显示,大约有 4 处,和图 3a 不同在于,其云水位置不仅出现在 4 km 以下,4 km 以上也有。云水以回波带 1、2 附近较为集中。雪晶 位于 0 ℃层以上,对应于回波带 3、4,回波带 3 的雪晶浓度较低(最大值约 1.1 g/kg),回波带 4 的雪晶浓度较高,达到 2.1 g/kg。气流上升区主要 在回波带 1、2、3 之处。雨水情况中回波带 4 等值 线较为密集,这种分析结果与图 4b 的分析情况一 致。

2.4 动力特征

MM5 模拟出的风场分布见图 3 中的风矢。由图 3a 可知,对应于回波带 1,在其 0 ℃层以上的右侧 位置存在较为强烈的上升运动区;对应于回波带 2, 在其 0 ℃层以下的左侧位置存在较为强烈的上升 运动区;对应于回波带 3,0 ℃层以上的主体位置 和 0 ℃层以下右侧位置存在较为强烈的上升运动 区;对应于回波带 4,则在其主体位置上存在较为 强烈的上升运动区。由图 3b 可知,回波带 1 主体位 置存在较为强烈的上升运动区;回波带 2、3 的 0 ℃ 层以上存在较为强烈的上升运动区;回波带 4 的 0 ℃层以上则存在较弱的上升运动区。总之,从风场 的分布来看,每个较强的回波带对应于较强的上升 运动,反映出强回波与上升气流的一致性。但是较 强的上升运动区域并不分布在回波带的中心位置。







3 龙卷过程

3.1 龙卷实况

2007年7月3日16时许,在安徽天长和江苏高邮 两省交界处遭遇较强龙卷袭击。因灾死亡14人,151 人受伤,转移安置3 318人。直接经济损失2 899万 元。由龙卷过程的降水分布图(略)可知,7月3日16— 17时降水零散分布在合肥以北地区。江淮之间金寨 到滁州一线降水较大,其中金寨20.9 mm、肥东21.2 mm、滁州28.7 mm,较强降水主要在滁州地区。

3.2 雷达回波的对比

运用MM5模式对本次龙卷过程进行数值模拟, 起报时间为3日08时。由于模式输出的时间步长为 1 小时,给出的是每小时一次的模拟结果,因此分 析整点时次的雷达回波。为了对模拟的雷达回波效 果进行检验,选择最近时次、最低仰角(0.5°)的 合肥多普勒雷达反射率因子回波作比较。图 5(见 383页)为7月3日16时模拟得到的雷达回波和最 近时次(16:00:12)的实况回波。从实际雷达反射 率回波图(图 5b)可以看出,在合肥以北地区有一 个明显的条状回波带,大致呈现西南-东北走向,且 东部地区的回波宽度大于西部地区,最大回波强度 超过 50 dBz。从模拟雷达反射率回波(图 5a)可看 出,主要的回波带位于合肥以北地区,也是东部地 区的回波宽度大于西部地区,最大回波强度为 45 dBz。进一步分析发现,模拟回波的宽度大于实际 回波宽度,最大回波强度没有实际回波强度大,而 且走向与实际回波略有差异。不过总的来看, MM5 模式对于本次龙卷过程 16 时的雷达回波模拟效果 较好。

3.3 微物理特征

图 4 为 7 月 3 日微物理量的垂直结构剖面图。 图中坐标单位为 km,绿色表示云水含量,蓝色表示 云冰含量,红色表示雨水含量。AB 剖面图中的蓝 色线条表示 0 ℃层。其单位同上。由图 4a 可见,0 ℃层大约位于 5.5 km;云水含量主要分布在 0 ℃层 以下,有 2 片云水含量集中分布区,一片分布区域 较小,在 3~4 km 的高度上;一片分布在右侧,范 围大、深度厚;雨水含量在 0 ℃层以下有所分布, 但主要分布在 0 ℃层以上,且数值大、等值线密集; 云冰含量有零星分布。由图 4b 可见,云水含量主要 分布在 5.5 km 以下,基本连片分布,有几个大值区; 雨水含量在 5.5 km 以下有所分布,但主要分布在 5.5 km 以上,且数值大、等值线密集;云冰含量也呈现 零星分布,在11~12 km 处有一个集中分布区。

3.4 动力特征

针对本次龙卷天气过程,应用 MM5 中尺度数 值预报模式进行散度、涡度、风的动力学特征数值 模拟。图 6 为 MM5 模式模拟的 2007 年 7 月 3 日散 度场。安徽省的经纬度范围为 114.9~119.6°E, 29.7~34.6°N。由图 6 (见 383 页)可知,安徽省 大部分地区散度值在 0 附近; 16 时 850 hPa 高度上 天长、高邮附近有一个散度负值区,其数值在-0.000 8 s⁻¹左右; 16 时 500 hPa 高度上合肥以北地区有一 个近似于纬向分布的散度负值带; 16 时 300 hPa 高 度上天长附近有一个散度正值区。因此对于 16 时的 散度垂直分布来看,安徽天长、江苏高邮附近呈现 低层辐合、高层辐散的状况。由图 4a 的风场模拟可 知,在雷达回波的大部分地区为上升运动。

4 两类强对流天气的异同点及可能 成因

基于两类强对流天气的微物理和动力特征的模 拟及其分析,其共同点主要有:(1) 云水含量主 要分布在 0 ℃层以下,雨水含量在 0 ℃层上下皆 有分布。(2) 从风矢的分析可知,强对流天气往 往对应于强的上升运动,表现出垂直运动与对流天 气的一致性。而它们的差异有:(1) 冰雹大风天 气过程中 0 ℃层较低,龙卷天气过程的 0 ℃层较 高;(2) 冰雹大风过程中0 ℃层在上升区抬升, 龙卷过程中没有抬升运动;(3) 冰雹大风过程中 雨水含量在 0 ℃层以下,龙卷过程中雨水含量在 0 ℃层上下皆有分布。

对于两类强对流天气的微物理和动力特征的差 异,其解释的理由或可能原因是:(1)冰雹大风 强对流天气过程中0℃层较低,出现时间在4月; 而龙卷天气过程中0℃层较高,其出现时间为7月。 7月的温度较高,所以0℃层的高度要比4月高; 还有一个可能的原因是龙卷发生时的上升运动强 烈,低层湍流通量加大,空气上下得以充分混合, 因此0℃层的高度抬升。(2)冰雹大风天气过程 中0℃层在上升区抬升,它是由于强对流天气发生 时低层湍流通量明显加大,导致空气在垂直方向上 充分混合,因而0℃层的高度有所增加;龙卷天气 过程中没有抬升运动,这种现象可能是由于龙卷内

在 0 ℃上下层皆有分布, 在 0 ℃层以上出现的可 能原因在于强烈的空气上升运动把 0 ℃层以下的 雨水输送至 0 ℃层以上。



动方向和强度分布与实际回波基本相同,因此模拟 的雷达回波具有一定的可靠性。

(2)冰雹大风过程的微物理模拟说明,0℃ 层位于 3.3~3.8 km之间;雪晶位于0℃层以上; 和雨水情况相对应的回波带等值线较为密集;云水 含量主要分布在0℃层以下,呈分散分布形态;雨 水含量在0℃层上下皆有分布。龙卷过程的微物理 模拟说明,0℃层位于 5.5 km;云水含量主要分布 在0℃层以下;雨水含量主要分布在0℃层以上, 且数值大、等值线密集;云冰含量也是呈现零星分 布。

(3)从动力特征的模拟来看,强对流天气过 程对应于强的上升运动。冰雹大风过程的风场分布 表明,每个较强的回波带对应较强的上升运动。龙 卷过程前散度垂直分布来看,安徽省的天长和江苏 省的高邮附近呈现低层辐合、高层辐散的状况。伴 随着强烈的空气运动导致局地龙卷的产生。

参考文献:

- [1] 王艳兰,汤达章,唐伍斌,等. 多普勒雷达径向散度与强对流回波变化特征分析[J]. 热带气象学报, 2007, 23(6): 659-663.
- [2] 周后福,邱明燕,张爱民,等. 基于稳定度和能量指标作强对流天气的短时预报指标分析[J]. 高原气象,2006,25(4):716-722.
- [3] 姚叶青, 俞小鼎, 郝莹, 等. 两次强龙卷过程的环境背景场和多普勒雷达资料的对比分析[J]. 热带气象学报, 2007, 23 (5): 483-490.
- [4] 郑媛媛, 俞小鼎, 方翀, 等. 2003 年 7 月 8 日安徽系列龙卷的新一代天气雷达分析[J]. 气象, 2004, 30 (1): 38-40; 45.
- [5] SCHECTER D A, NICHOLLS M E, PERSING J, et al. Infrasound emitted by tornado-like vortices: Basic theory and a numerical comparison to the acoustic radiation of a single-cell thunderstorm[J]. J Atmos Sci, 2008, 65(3): 685-713.

[6] 文莉娟,程麟生,左洪超,等. "98.5"华南前汛期暴雨云微物理场数值模拟分析[J]. 高原气象, 2006, 25(3): 423-429.

[7] 孙晶,王鹏云,李想,等. 北方两次不同类型降雪过程的微物理模拟研究[J]. 气象学报,2007,65(1):29-44.

[8] 康凤琴,张强,渠永兴,等. 青藏高原东北侧冰雹微物理过程模拟研究[J]. 高原气象, 2004, 23 (6): 735-742.

[9] 王在志, 闫敬华. 水成物分析及在数值模式中的应用综述[J]. 热带气象学报, 2007, 23 (1): 85-89.

SIMULATION AND COMPARISON OF TWO KINDS OF SEVERE CONVECTIVE WEATHER PROCESSES

ZHOU Hou-fu^{1, 2, 3}, GUO Pin-wen¹, ZHAI Jing^{2, 3}

(1. Atmospheric Science College, Nanjing University of Information Sciences & Technology, Nanjing 210044, China;
2. Anhui Institute of Meteorological Science, Hefei 230031, China;

3. Key Laboratory of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing, Anhui Province, Hefei 230031, China)

Abstract: Based on radar data and ground weather phenomena, two kinds of severe convective weather, hail and gale and tornado, are simulated using the model MM5. The simulated radar and actual radar echo are analyzed. Simulated microphysical and dynamic characteristics are researched. Possible reasons for the difference in microphysical and dynamic characteristics between the two kinds of weather are discussed. The results are as follows. (1) With regard to radar echo, simulations of both weather types are reliable to some extent. (2) That snow crystal is located above the 0 $\,^{\circ}$ C level is shown by the microphysical simulation of hail processes. The isolines of echo bands, corresponding to those of rainwater content, are densely distributed. The cloud-water content mainly scatters below the 0 $\,^{\circ}$ C level. The rainwater content is found both below and above the 0 $\,^{\circ}$ C level. That cloud-water content distributes continuously below the 0 $\,^{\circ}$ C level is shown by the microphysical simulation of tornado processes. The rainwater content distributes below the 0 $\,^{\circ}$ C level than above it. The value is also large and the isoline is densely distributed. The cloud-ice content also shows scattering distribution. (3) The severe convective weather process corresponds to the strong lifting movement, as shown in the simulation of dynamic characteristics, but the region of strong lifting movement does not locate in specific positions of the echo band.

Key words: meteorology; severe convective weather; MM5 model; microphysics; dynamics; reasons