

聂浩浩, 刘奇俊, 马占山. 2016. 高分辨率 GRAPES 模式中云微物理方案对强降水的模拟和诊断研究. 气象, 42(12): 1431-1444.

高分辨率 GRAPES 模式中云微物理方案对强降水的模拟和诊断研究^{*1}

聂浩浩¹ 刘奇俊² 马占山²

1 中国气象科学研究院, 北京 100081

2 国家气象中心, 北京 100081

提 要: 利用高分辨率 GRAPES_Meso 中双参数云微物理方案, 对我国两次强降水过程进行数值模拟, 并与模式中 WSM6 和 NCEP5 方案进行对比分析, 结合多种观测资料, 诊断评估方案的预报性能, 同时研究伴随强对流性降水中的关键云物理过程。个例研究表明, 对流发展旺盛的云团中, 冰相粒子尤其是霰粒子对对流的发展与降水起着主导作用, 霰的融化是强降水的主要来源, 而周围的层状云区域霰粒子的分布极少, 主要受雪的融化与暖云降水的影响。双参数方案模拟的雨带走向、范围和降水强度与实况拟合较好, 同时在对流单体的最大回波高度与强度、冰晶的分布与云砧结构等方面也具有一定优势, 但冰晶含量和回波顶高度略低于观测, 这都为双参数方案的优化与业务应用提供重要的支持。

关键词: 高分辨率, GRAPES 模式, 云微物理方案, 强降水

中图分类号: P456

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.12.001

Simulation and Analysis of Heavy Precipitation Using Cloud Microphysical Scheme Coupled with High-Resolution GRAPES Model

NIE Haohao¹ LIU Qijun² MA Zhanshan²

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: In this study, two heavy precipitation processes are simulated using the two-moment cloud microphysical scheme coupled with high-resolution GRAPES model. The scheme is compared with WSM6 scheme, NCEP5 scheme and a variety of observation data to diagnose the prediction performance and analyze the key cloud microphysics process in deep convective precipitation. The simulation study shows that ice phase particles, especially graupel particles, play a leading role on the convection and precipitation in the deep convection clouds and the melting of graupel is the main source of heavy precipitation, while graupel distributes rarely in the stratiform precipitation region which is mainly affected by the melting of snow and warm cloud precipitation. The results derived from the two-moment scheme fit better with observations on rain belt direction, precipitation range and intensity. The scheme also has certain advantages on the maximum echo height and strength of convective cells, ice content distribution and cloud anvil structure. However, the ice content and echo height are slightly lower than observations. All these results would provide meaningful support for the improvement and operational application of the two-moment scheme.

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506008)和云南省科技惠民计划(2014RA002)共同资助

2016 年 3 月 4 日收稿; 2016 年 8 月 30 日收修定稿

第一作者: 聂浩浩, 主要从事数值模式中云微物理方案研究. Email: niehaohao126@163.com

通信作者: 刘奇俊, 主要从事数值模式中云降水物理过程和参数化研究. Email: liuqj@cma.gov.cn

Key words: high-resolution, GRAPES model, cloud microphysical scheme, heavy precipitation

引 言

强对流天气是一种严重的灾害性天气,一般带来强降水,有时还伴有大风、冰雹、龙卷等天气现象。定量降水一直是数值模式预报的难点,云降水物理过程是定量降水预报的关键物理过程。近年来,利用包含有详细云微物理过程的中尺度模式对强对流性降水的高分辨率模拟研究,已成为研究云物理过程和定量降水的重要手段之一。随着模式水平分辨率的提高(通常为 3~5 km 以上),云微物理过程在格点尺度降水和对流性降水中的准确描述对降水预报的改进作用愈发明显(Hong et al, 2009),云中粒子通过相变潜热和下沉拖曳等反馈作用影响大气的热力和动力结构(Baker, 1997),并直接反映在大气垂直运动和热力方程的源汇项中,进而影响降水的预报。同时,研究表明,高分辨率模式中较强的上升气流能促使对流的垂直输送,使浅对流向深对流的过渡更加平滑自然,进而更加准确地模拟出对流的强度、结构及发展演变过程(Hong et al, 2009; 陈德辉等, 2008),在降水量、云层厚度、静力稳定度、对流单体的尺度以及时间演变等多方面的模拟结果也会随之改变(Petch et al, 2001; Bryan et al, 2003; Lang et al, 2007; Weisman et al, 2008)。因此,利用高分辨率模式中云微物理方案对强对流性降水过程进行模拟和分析,全面了解云的微物理过程及其变化特征,对揭示云降水的机理具有重要的科学意义。

在过去数年里,国内外数值模式中云微物理参数化方案的研究都取得了很大的进展。由于不同的云微物理方案在描述水凝物的谱分布、物理过程和预报变量等方面都存在一定的差异,在实际的数值模拟过程中,不同模式或不同的天气系统下,方案的模拟效果都需要进行诊断评估。目前,国内外的云微物理方案主要通过定量降水预报评分或与多种观测资料(地面加密自动站、飞机观测、雷达、TRMM、CloudSat、FY、MODIS 等卫星)的对比来进行诊断与改进。针对强对流性降水,马严枝等(2012)利用 WRF 模式中七种微物理方案,对一次华北暴雨在不同分辨率条件下进行了敏感性试验,并通过定量降水预报评分,得出由于不同方案模拟的垂直速度、涡度和散度、雨水混合比等存在较大差异,导致了对

暴雨预报能力的差异,在高分辨率下,WSM6 方案对降水的模拟效果最好。Hong 等(2010)也利用 WRF 模式中 WSM6 和 WDM6 两个方案对美国大平原一次飑线过程进行模拟,通过与飞机观测和地基雷达资料对比,显示了 WDM6 方案中数量较多的小粒子由于下落速度较慢使得层云降水区域略微狭窄,且通过蒸发过程的增强有效地抑制了分散的小型降水。考虑到加密自动站、飞机观测与地基雷达受到空间与采样的限制,卫星数据对云水平和垂直分布的评估具有明显的优势。Roh 等(2014)利用 TRMM 资料对热带太平洋中部深对流系统的云顶温度和降水回波顶高度进行评估,并结合观测资料对雨、雪和霰粒径分布进行调整,进而使得层状云和发展深厚的对流云的降水率得到了改进。

目前国内外主要开展了 WRF 和 MM5 模式中云微物理方案的诊断检验,而针对我国科学家自主研发的 GRAPES 中尺度模式中云微物理方案的研究还相对较少(姜晓飞等, 2015)。此外,GRAPES 模式自研发成功以来,随着业务对预报产品要求的提高,在模式分辨率提升的同时也需要不断改进和完善云微物理方案,但模式中使用方案(例如 WSM6、NCEP5、Lin 方案等)大多是从国外引进,且业务区域 GRAPES 模式微物理方案主要采用的是 WSM6 方案,对这些方案的改进和优化都有一定的难度。由国家气象中心自行研发的双参数云微物理方案,是目前 GRAPES 模式中唯一的双参数方案,该方案是在胡志晋等(1986; 1987)和刘奇俊等(2003)双参数方案的基础上发展起来的,最初成功耦合到 HLAFS 数值模式中,随后,陈小敏等(2007)将方案移植到 GRAPES 区域模式中形成人工增雨云系模式,石荣光等(2015)又在原方案的基础上,研究了气溶胶粒子活化过程对云和降水的影响。对该方案在高分辨率 GRAPES 模式中的耦合效果与预报性能,尤其是针对强对流性降水,也需要对个例进行诊断分析,进而为方案的优化和改进提供重要的支持。

本文利用高分辨率 GRAPES_Meso 中双参数云微物理方案,对我国两次不同天气系统下的强降水过程进行数值模拟,并与模式中 WSM6 和 NCEP5 方案进行对比分析,结合地面加密自动站以及 MODIS、CloudSat 卫星和雷达等观测资料,诊断

评估方案的预报性能,为今后 GRAPES 云分辨中尺度模式采用双参数方案提供支撑,同时通过典型个例的研究和分析,进而研究伴随强对流性降水中的关键云物理过程。

1 模式描述和试验设计

1.1 模式描述和方案介绍

GRAPES (Global/Regional Assimilation and Prediction System) 模式是我国自主研发的新一代全球/区域多尺度通用模式,主要物理过程包括:辐射传输、湍流混合、湿对流和格点尺度降水过程、陆表过程及次网格尺度地形重力波拖曳等(薛纪善等, 2008)。本文采用 GRAPES_Meso 4.0 版本,在高

分辨率情况下,结合 WSM6 (Hong et al, 2006; 2009) 和 NCEP5 (Hong et al, 1998) 两个方案,对双参数云微物理方案进行诊断评估。

双参数方案较 GRAPES 模式中其他物理方案,除了对水汽(Q_v)、云水(Q_c)、雨水(Q_r)、冰晶(Q_i)、雪(Q_s)、霰(Q_g)的混合比进行预报外,还预报雨水(N_r)、冰晶(N_i)、雪(N_s)、霰(N_g)的数浓度,同时为了计算云雨自动转化率和冰雪向霰的自动转化率,还引进了云滴谱拓宽度(F_c)、冰晶(F_i)和雪(F_s)的淞附度等 3 个变量,克服了因为固定的粒子谱参数而带来的模拟缺点,在物理过程的描述上具有一定的优势,考虑了包括凝结蒸发、凝华升华、自动转化、碰并、冻结、冰晶核化与繁生等过程。三种方案的具体物理过程如图 1 所示。

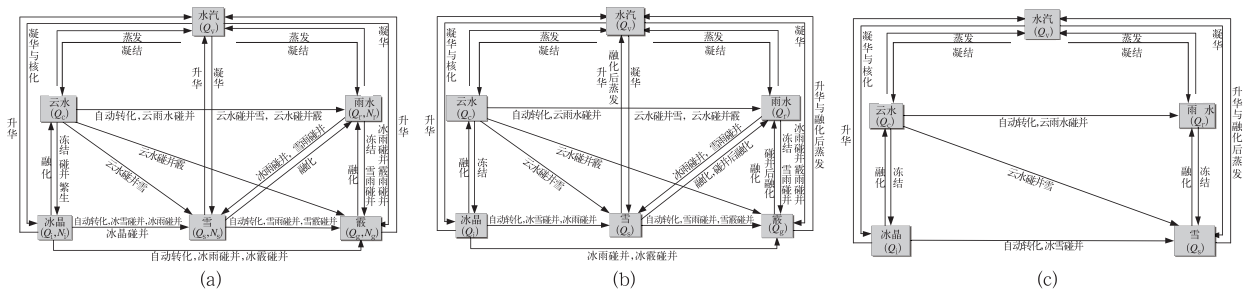


图 1 (a) 双参数方案, (b) WSM6 方案和 (c) NCEP5 方案的物理过程示意图

Fig. 1 Flowchart of the microphysics processes in the (a) two-moment scheme, (b) WSM6 scheme, (c) NCEP5 scheme

1.2 试验设计

个例 1 为 2013 年 7 月 4—6 日(世界时,下同),我国江淮流域出现的一次明显降水过程,受高空槽东移南下的影响,低层配合有较明显的切变辐合系统。模式以 NCEP 和 NCAR 联合发布的 6 h 一次的 FNL 再分析资料作为模式的初始场和侧边界条件,模拟采用双层单向嵌套,即外层的粗网格数据为内层细网格提供模拟的初始场与侧边界条件。粗网格的水平分辨率为 9 km,模拟区域为 $18^{\circ}\sim 44^{\circ}\text{N}$ 、 $102^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$,积分时间步长为 60 s,模拟时间为 2013 年 7 月 4 日 12 时至 6 日 12 时,每 6 h 输出一次结果;细网格分辨率为 3 km,模拟区域为 $26^{\circ}\sim 38^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 124^{\circ}\text{E}$,积分时间步长为 30 s,模拟时间为 2013 年 7 月 4 日 18 时至 6 日 06 时,共积分 36 h,每 1 h 输出一次结果,垂直方向均为 49 层。两重区域采用的其他主要物理过程为 RRTM 长波

辐射方案, Duahia 短波辐射方案, MRF 边界层方案, Noah 陆面过程方案, Monin-Obukhov 近地面层方案以及 Kain-Fritsch (new Eta) 积云对流参数化方案(只对粗网格,细网格关闭)。

个例 2 为 2014 年 8 月 19 日海上的热带低气压与北面的弱冷空气交汇造成浙江、福建地区的暴雨过程。模式同样采用双层单向嵌套,粗细网格模拟初始时间均为 8 月 19 日 00 时,积分 24 h,模拟区域分别为 $17^{\circ}\sim 38^{\circ}\text{N}$ 、 $108^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$ 和 $22^{\circ}\sim 33^{\circ}\text{N}$ 、 $114^{\circ}\sim 124^{\circ}\text{E}$,其他参数设置和方案选取均与个例 1 相同。

2 江淮个例结果分析

2.1 天气形势

2013 年 7 月 4—6 日,江淮流域局地的日降水量超过 200 mm,合肥站的雷暴时间长达 8 h。图 2

为 2013 年 7 月 5 日 00 时到 6 日 00 时的天气形势变化,从图 2a₁ 7 月 5 日 00 时 500 hPa 高空图上可以看出,欧亚中高纬度为“两槽一脊”型,高压脊位于贝加尔湖附近,槽区分别位于巴尔喀什湖以及我国东北地区北部。中低纬度地区,588 dagpm 线位于我国东南沿海地区。由东北冷涡底部南伸的槽线位于辽东半岛—淮河一带,槽后冷空气与副热带高压外围暖湿空气在我国江淮地区交汇。图 2a₂ 7 月 5 日 00 时 850 hPa 高度上也可以看出在江淮地区有一条东北—西南向的切变线生成发展,在切变线北侧的偏北气流使得冷空气能够源源不断地输送至江淮地区,切变线南侧有来自西南丰沛的水汽供应,最大水汽通量在江淮地区达到 $30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,同时 CAPE 值局地达到 $1500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, K 指数达到 35°C 以上(图略);5 日 12 时,低涡切变线系统依旧维持在四川盆地东部至长江中下游一带,至 6 日 00 时,受副热带高压北抬的影响,低层切变线系统稍有北抬,与 500 hPa 槽线都有较好的配置,西南急流依旧提供充足的水汽,图 2c₂ 中水汽通量在湖北东部依然达到 $25 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,这都为暴雨伴随雷暴天气提供较好的背景场,对流发展也比较旺盛。

2.2 降水情况

图 3 为 2013 年 7 月 5 日 06 时至 6 日 06 时江淮流域逐 6 h 实况与模拟的累计降水量及分布,可以看出,雨带呈东北—西南走向,降水主要集中在安徽中南部、江苏南部及湖北东部,各方案基本都模拟出了此次降水的主要落区及雨带走向。7 月 5 日 06—12 时,雨带由淮南南压至长江下游沿江,在安徽中南部产生大面积的强降水,降水分布整体较为均匀,只在安徽东南部有强降水中心初步形成,雨量达到 50 mm 以上;模拟的雨带均较实况偏窄,其中双参数和 WSM6 方案均在安徽中部和江苏中南部模拟出两个强降水中心,但雨量偏大,WSM6 最大降水量较实况偏大至少 50 mm,这与牛俊丽等(2007)的研究结论一致,NCEP5 方案模拟的降水主要集中在江苏中南部,在安徽中南部并未出现强降水。5 日 12—18 时,安徽南部的对流性降水达到最大,6 h 降水超过 75 mm,湖北东部也出现了一个明显的降水中心,这两个降水中心将在之后做具体分析;双参数和 WSM6 方案也模拟出这两个中心,但安徽中南部的降水量均达到 100 mm 以上,而 NCEP5 方案依然没有模拟出安徽南部的降水中心,

在湖北东北部的雨量也超过 100 mm。5 日 18 时至 6 日 00 时,湖北东部的降水中心向东移动,安徽中南部的降水有所减弱,而在湖北东南部又出现新的降水中心,降水量达到 75 mm 以上;双参数方案雨带偏窄,安徽中南部的降水中心开始减弱,与实况一致,但湖北东北部的降水偏强,WSM6 方案模拟的雨带左半部分发生明显倾斜,在湖北东南部和安徽中部有强降水且雨量明显偏大,均达到 100 mm 以上,NCEP5 方案雨带中部开始变窄,雨量减小,降水主要集中在湖北东部。7 月 6 日 00—06 时,雨带随低层切变线的倾斜而略微倾斜,降水中心开始向西部移动,降水主要集中在湖北东部,苏南地区的降水明显减少;双参数方案模拟的雨带左半部分也发生倾斜,只在鄂皖交界处存在降水中心,雨量与实况一致,WSM6 的雨带形状发生明显变化,在安徽中部依然存在虚假的降水中心,雨量偏大,NCEP5 的降水依旧集中在湖北东部,且降水量明显偏大 50 mm 以上,雨带中间发生崩溃现象,导致安徽中部的降水漏报现象严重。总体来看,双参数方案在雨带走向和发展、对流雨团降水的持续时间和雨强方面的模拟都有一定的优势,WSM6 方案的降水强度偏强,且对流性雨团降水的持续时间偏长,NCEP5 方案对强降水位置的模拟不够准确,且雨带的发展与实况也有较大的差异。

2.3 水凝物的时空分布

根据之前降水的分布情况,对 2013 年 7 月 5 日 00 时至 6 日 00 时强降水中心($30^\circ \sim 32^\circ\text{N}$, $114^\circ \sim 120^\circ\text{E}$)的水凝物进行区域平均,可以得到水凝物的垂直廓线及时空演变,如图 4 所示。从图 4a 水凝物的垂直廓线可以看出,由水汽凝华和过冷水冻结等过程产生的冰晶主要分布在 250 hPa 左右,随后通过冰晶的自动转化和与云滴和冰晶的碰并产生雪粒子,雪主要集中在 350 hPa 左右,当冰晶和雪达到一定尺度和数量时就形成霰,并在融化层附近达到极值后开始融化,雨水则由冰相粒子融化生成并在下降过程中伴随蒸发而降落至地面。具体来看,双参数方案较 WSM6 方案中的霰粒子略多,区域平均混合比达到 $0.22 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,且在 0°C 层以上至 250 hPa 存在过冷水,WSM6 模拟的过冷云水在零度层以上迅速冻结成冰晶导致云水含量减少,冰晶含量在 300 hPa 以下略高于双参数方案,同时,WSM6 方案中冷区的雪霰粒子的下落融化,以及雪霰和云水碰并后的融化造成低层降水偏多,固态水凝物总量较

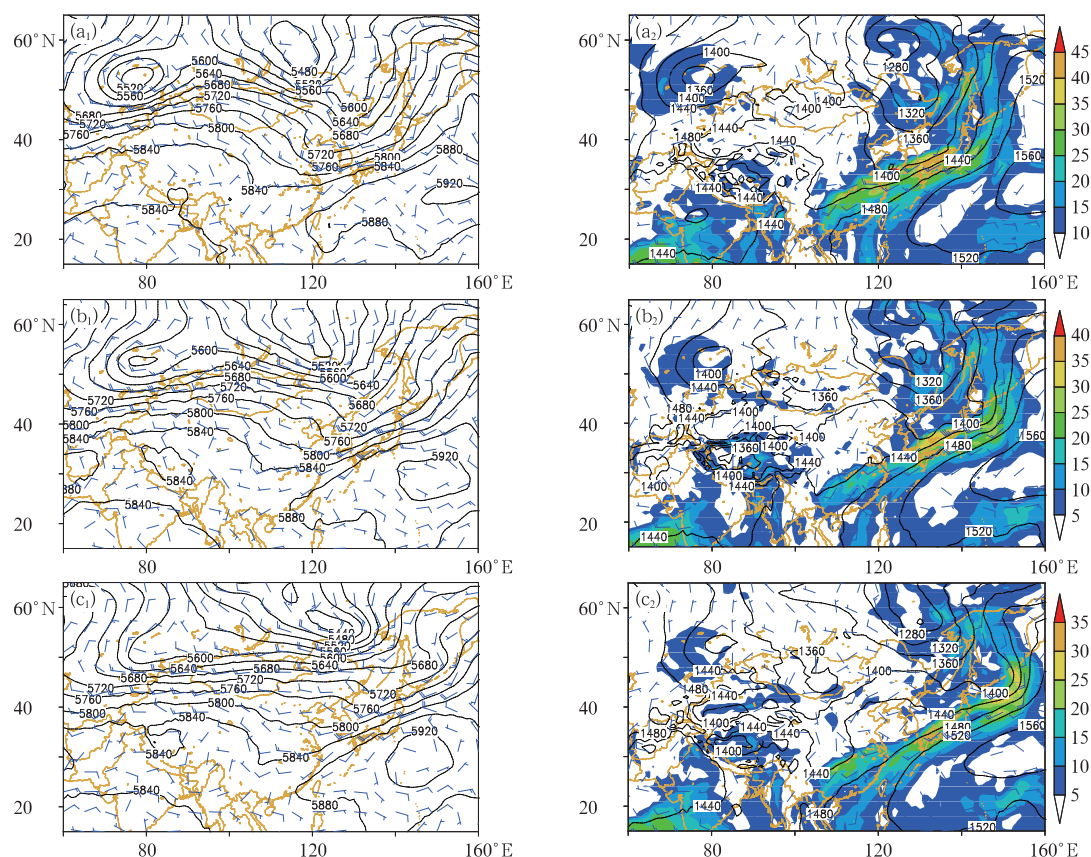


图 2 2013 年 7 月 5 日 00 时(a₁, a₂)、12 时(b₁, b₂)和 6 日 00 时(c₁, c₂)500 hPa(a₁, b₁, c₁)

和 850 hPa(a₂, b₂, c₂)的天气形势变化

(实线为等高线,单位:gpm;风标为矢量风,单位:m·s⁻¹;填色为水汽通量,单位:g·cm⁻¹·hPa⁻¹·s⁻¹)

Fig. 2 Weather situation at (a₁, a₂) 0000 UTC 5, (b₁, b₂) 1200 UTC 5 and (c₁, c₂) 0000 UTC 6 July 2013 at 500 hPa (a₁, b₁, c₁) and 850 hPa (a₂, b₂, c₂)

(height: solid line, unit: gpm; wind vector: barb, unit: m·s⁻¹; vapor flux: shaded, unit: g·cm⁻¹·hPa⁻¹·s⁻¹)

双参数方案偏低。NCEP5 方案中由于缺少霰粒子的存在,当冰晶的质量和粒径达到一定阈值时就转化为雪晶,造成大量雪聚集在高空,区域平均混合比达到 $0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,远超过其他两个方案,冰晶在 350 hPa 以下凝华增长较弱,含量偏少较为明显,且由于冰相粒子与云水的碰并过程较弱,冷区过冷云水存在较多,这与李静(2009)的研究结论一致,过冷云水含量远高于其他方案,达到 $0.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,这也使得云雨转化过程和云雨滴碰并过程增强,雨水在 350 hPa 就开始生成,该方案的雨水主要来自于云雨转化和雪的融化。

图 4b 中填色与实线分别为云水与冰雪晶含量的时空演变,图 4c 中则为雨水和霰粒子的时空演变。同样可以看出,双参数方案的云水以融化层为中心上下递减,在 0°C 层到 250 hPa 存在一定的过

冷云水,WSM6 方案在 450 hPa 以上基本不存在过冷水,而 NCEP5 的过冷水在高层集聚,含量远超过 $0.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,且由于缺少霰粒子,冰雪晶的总量最大达到 $0.96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,明显高于其他两个方案。图 4c 可以看出雨水在两个时间段达到峰值,一个在 5 日 12—18 时,另一个在 6 日 00 时前后,在这两个时间段,双参数方案和 WSM6 方案中霰的含量也达到最大,说明霰粒子的融化对降水有重要的作用。WSM6 方案中霰粒子最大达到 $0.24 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,较双参数方案偏低 $0.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,且整体发展没有双参数方案更加深厚,但是在 6 日 00 时左右,由于大量冰相粒子融化下落,雨水含量远超过双参数方案,且持续时间偏长,这之前地面降水的研究结论一致,说明 WSM6 在云中水凝物和地面降水的配置方面有一定的不合理性。NCEP5 方案中较大的雨水含

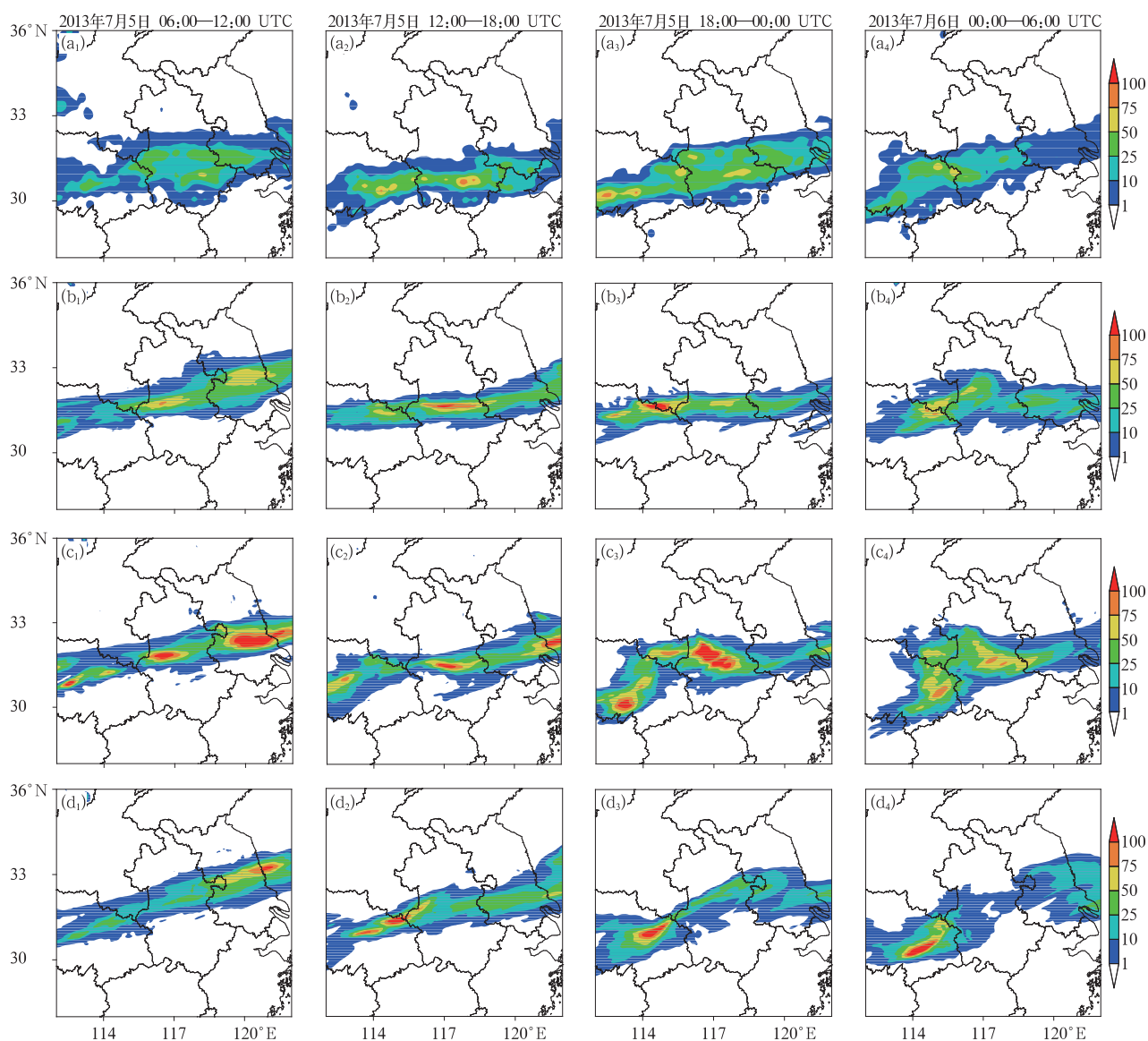


图 3 2013 年 7 月 5 日 06 时至 6 日 06 时观测和模拟的逐 6 h 累计降水量分布(单位:mm)
(a_1, a_2, a_3, a_4) 实况, (b_1, b_2, b_3, b_4) 双参数方案, (c_1, c_2, c_3, c_4) WSM6 方案, (d_1, d_2, d_3, d_4) NCEP5 方案

Fig. 3 Observed and simulated accumulative precipitation every 6 h (unit: mm)
from 0600 UTC 5 to 0600 UTC 6 July 2013

(a_1, a_2, a_3, a_4) observation, (b_1, b_2, b_3, b_4) two-moment scheme,
(c_1, c_2, c_3, c_4) WSM6 scheme, (d_1, d_2, d_3, d_4) NCEP5 scheme

量对应上空冰雪的高值区,且雨水含量比其他方案低 $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,因此并未准确模拟出地面的强降水中心。

2.4 水凝物的水平分布

MODIS 卫星大气产品中云顶温度可以较好地反映云系的覆盖范围和对流的发展情况,一般说来,云团发展越旺盛,对流越强,云顶温度则越低。在模拟时间段内,卫星曾 4 次扫过了降水区域,如图 5 所示,2013 年 7 月 5 日 05 时,云团开始发展,主要集

中在安徽中部,云顶温度最低在 220 K 左右,后来随着切变线南压,云团也向南发展;到 5 日 14:25,云层主要集中在长江中下游沿江地区,且有两个明显的对流云团出现,云顶温度达到 200 K 以下,对应地面也有两个强降水中心,随后,西边的对流云团开始向东移动;至 5 日 18:40 两个云团都集中在安徽南部和湖北东部,云顶温度依然在 210 K 以下,对应地面降水在这段时间里也达到最大;至 7 月 6 日 05:40,云层逐渐消散,强对流云团消失,在湖北东部和江西西北部还有少量浅薄云系。

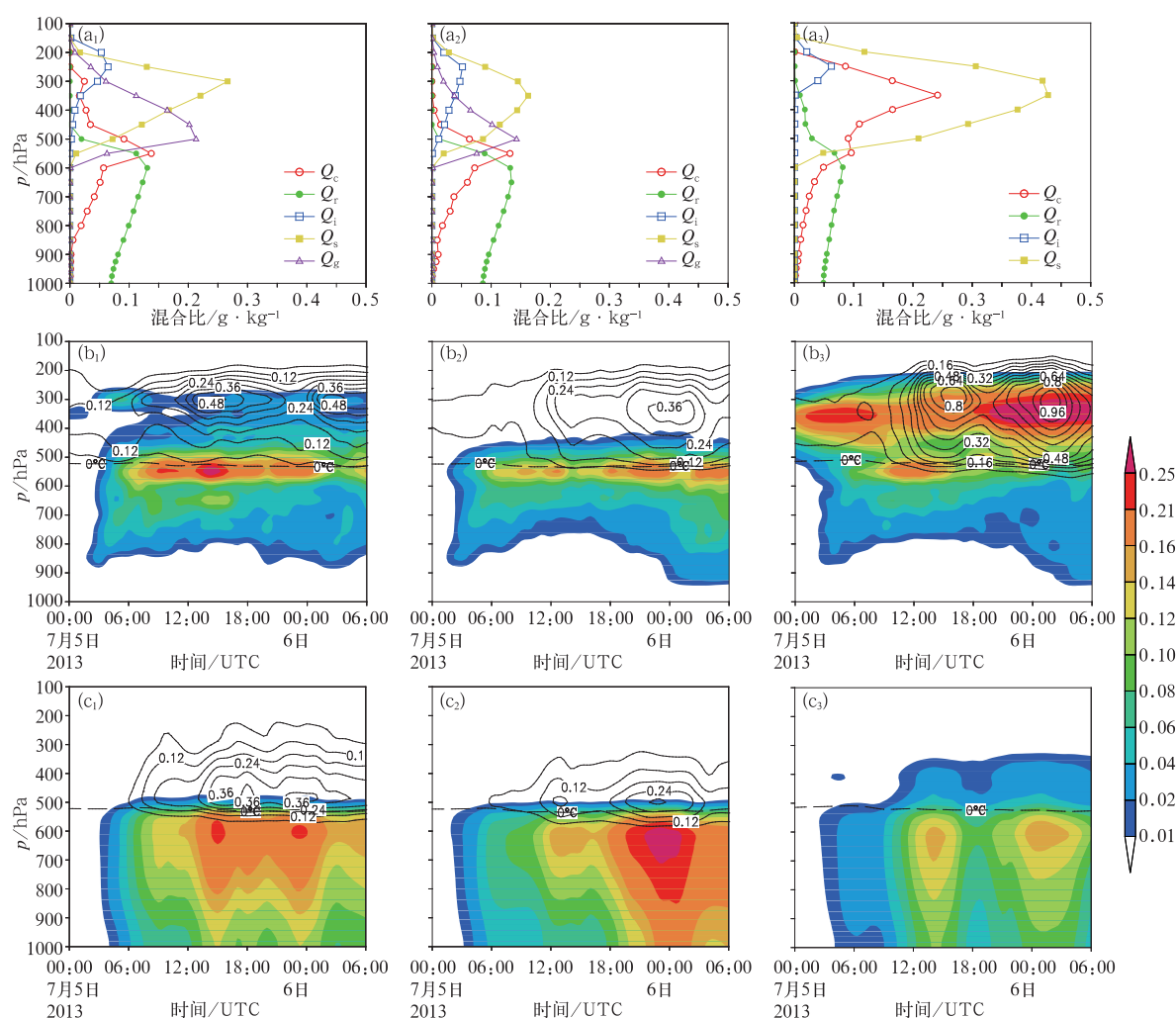


图 4 区域平均水凝物混合比的垂直廓线(a)及时空演变(b,c)

(b)云水(填色)和冰雪晶(实线),(c)雨水(填色)和霰(实线)(虚线为 0°C 线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

(a_1, b_1, c_1) 双参数方案, (a_2, b_2, c_2) WSM6 方案, (a_3, b_3, c_3) NCEP5 方案

Fig. 4 Vertical profiles (a) and temporal evolutions (b, c) of the domain-averaged hydrometeors mixing ratio, (b) cloud water (shaded area) and ice crystals (solid line), (c) rain water (shaded area) and graupel (solid line)

(a_1, b_1, c_1) two-moment scheme, (a_2, b_2, c_2) WSM6 scheme,

(a_3, b_3, c_3) NCEP5 scheme (dashed line: 0°C , unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

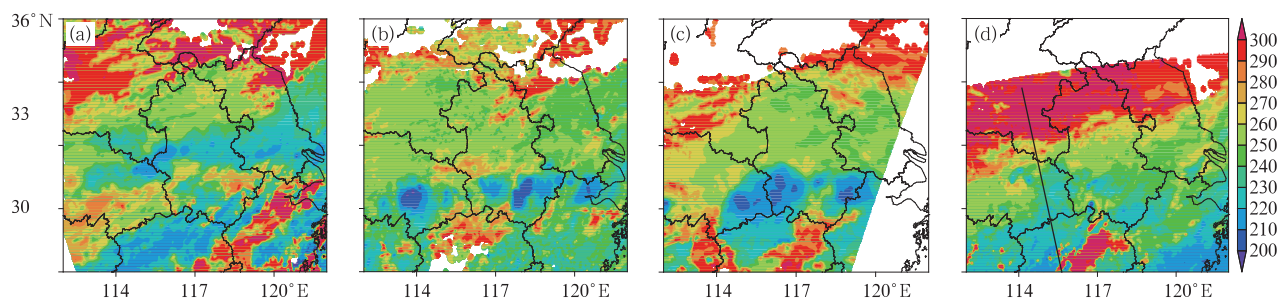


图 5 2013 年 7 月 5—6 日 MODIS 云顶温度实况(单位:K)

(a)5 日 05:00,(b)5 日 14:25,(c)5 日 18:40,(d)6 日 05:40

Fig. 5 Cloud top temperature observed by MODIS (unit: K)

(a) 0500 UTC 5, (b) 1425 UTC 5, (c) 1840 UTC 5 and (d) 0540 UTC 6 July 2013

为了更好地看出各方案对云宏观的模拟效果,选取了对流云团发展最强的 2013 年 7 月 5 日 14 时做具体分析,将各方案模拟的格点水凝物总量达到 $1 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的最高点温度作为该点的云顶温度,如图 6 所示。三个方案均能大致模拟出云的宏观分布与走向,但在对流发展旺盛的云团处,模拟的云团不够深厚,而对于周围层状云区域,云顶温度整

体比实况偏低。双参数方案的云顶温度最低在 220 K 以下,WSM6 方案模拟出两个强对流云团,最低温度在 210 K 以下,依然比实况偏高,NCEP5 方案由于含有丰富的云水,云的覆盖面积比其他两个方案更为广泛,云顶温度最低也达到 210 K 以下,强对流云团的位置不够准确。整体来看,各方案对云团有一定的宏观模拟能力。

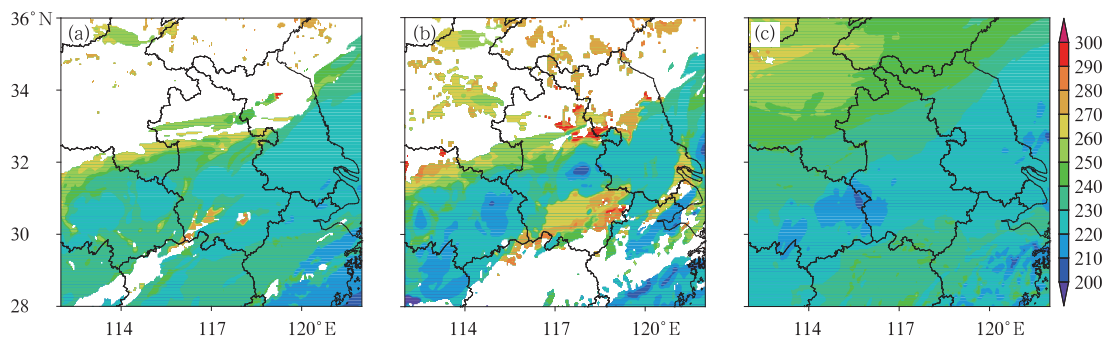


图 6 模拟的 2013 年 7 月 5 日 14 时云顶温度(单位:K)

(a) 双参数方案, (b) WSM6 方案, (c) NCEP5 方案

Fig. 6 Simulated cloud top temperature at 1400 UTC 5 July 2013 (unit: K)

(a) two-moment scheme, (b) WSM6 scheme, (c) NCEP5 scheme

鉴于之前的分析,为了进一步研究不同水凝物粒子在对流云团和层状云降水中所起的作用,根据之前区域平均水凝物空间分布,对 2013 年 7 月 5 日 14 时的各水凝物含量最高的层进行水平分析,如图 7 所示。500 hPa 的云水方面,双参数方案和 NCEP5 方案的分布较为合理,但 WSM6 方案的云水已经开始逐渐变得稀少。850 hPa 的雨水与地面降水有较好的一致性,在之前的实况分析中,地面存在两个强降水中心,对应上空有两个发展非常旺盛的云团,双参数方案和 WSM6 方案模拟的 850 hPa 的雨水也相应的存在两个大值区,含量均达到 $1.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,而 NCEP5 方案的雨水只在湖北东北部存在含量极值区。冰晶在 250 hPa 附近存在极大值,各方案模拟的冰晶分布范围较其他水凝物更加广泛,量值上也相对较为均匀。双参数方案和 WSM6 方案模拟的 350 hPa 高度上的雪,虽然也存在一定的高值区,但与 850 hPa 雨水高值区的位置偏差较大,而 500 hPa 高度上霰,虽然分布范围较小,但对于云顶温度较低,对流发展旺盛的雨团中,霰的含量较高,均达到 $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,同时对应雨水含量的高值区,说明对流发展旺盛的云团中,霰的形成发展对降水十分重要,NCEP5 方案中由于缺少

霰粒子,雪和云水的高值区都与雨水极值区的位置吻合较好,雪的融化和雨云转化起着关键作用。对于对流雨团周围的层云降水区域,主要受暖云降水或雪的融化的影响,霰的含量则相对较少。

2.5 雷达反射率

利用模式中各云微物理方案模拟的水凝物含量计算出的雷达反射率,与实测的雷达回波进行对比,可以直观地看出各方案对云中粒子的分布和发展情况的模拟效果。图 8 为 2013 年 7 月 5 日 14 时江淮流域 13 部雷达联合探测的地面最大反射率回波,可以看出,在梅雨形势下,受低空切变线等中尺度扰动的结果,在湖北武汉、安徽南部以及江浙边界出现对流活动,在梅雨锋层状云系内形成对流云团,雷达回波最大达到 50 dBz 以上,这与之前 MODIS 云顶温度的结果一致。整个回波系统沿着低层辐合线成带状分布,对流云团与层状云系一起构成混合性云系降水,使地面的降水量大幅度增大。三种方案的模拟结果在整个回波带的位置与范围上和实况相近,在强回波的周围都存在大范围的弱回波区,反映出对流回波周围存在层状回波的特点,但强回波中心与实况有一定的偏差,模拟效果均不够准确,双参数

方案的强回波主要集中在湖北东北部和安徽中部,最大回波也达到 50 dBz 以上,WSM6 方案的强回波分布较为广泛,呈零星带状分布,最大回波略强于实

况,NCEP5 方案只在湖北与安徽交界处存在强回波,但模拟的回波强度整体偏低。

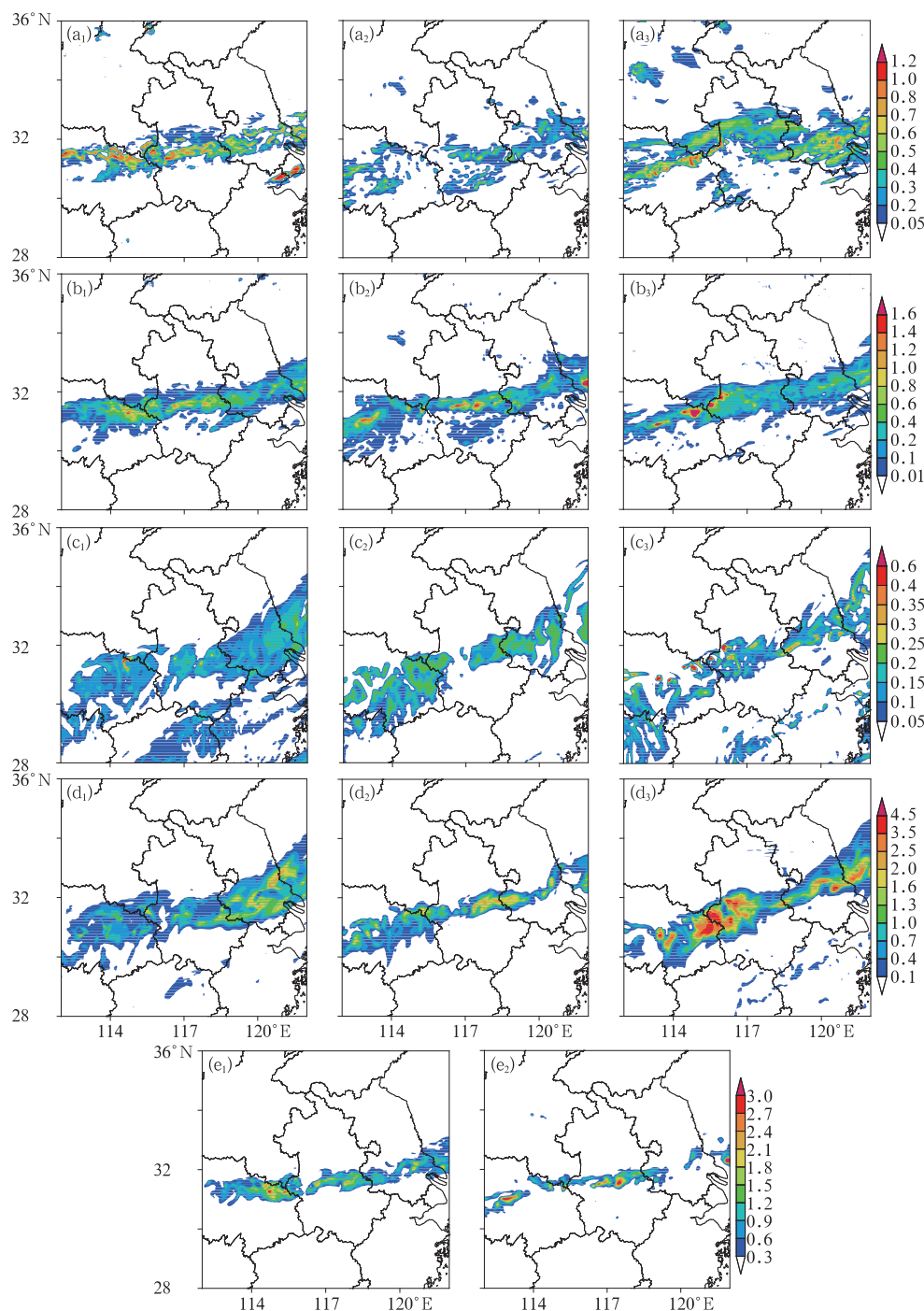


图 7 2013 年 7 月 5 日 14 时各水凝物混合比的水平分布:(a)500 hPa 云水,(b)850 hPa 雨水,(c)250 hPa 冰晶,(d)350 hPa 雪,(e)500 hPa 霰(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

(a_1, b_1, c_1, d_1, e_1) 双参数方案, (a_2, b_2, c_2, d_2, e_2) WSM6 方案, (a_3, b_3, c_3, d_3) NCEP5 方案

Fig. 7 Horizontal distribution of hydrometeors mixing ratio (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) at 1400 UTC 5 July 2013

(a) cloud water at 500 hPa, (b) rain at 850 hPa, (c) ice at 250 hPa, (d) snow at 350 hPa, (e) graupel at 500 hPa
(a_1, b_1, c_1, d_1, e_1) two-moment scheme, (a_2, b_2, c_2, d_2, e_2) WSM6 scheme, (a_3, b_3, c_3, d_3) NCEP5 scheme

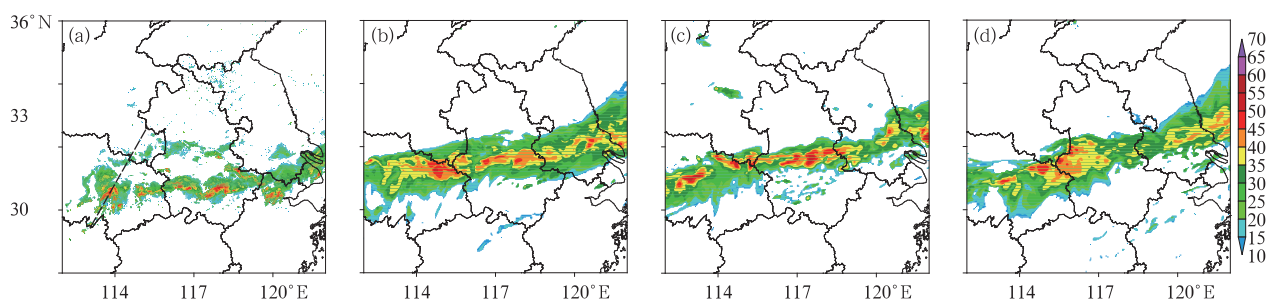


图 8 观测和模拟的 2013 年 7 月 5 日 14 时地面雷达反射率(单位: dBZ)

(a) 实况, (b) 双参数方案, (c) WSM6 方案, (d) NCEP5 方案

Fig. 8 Observed and simulated radar reflectivity (unit: dBZ) at 1400 UTC 5 July 2013

(a) observation, (b) two-moment scheme, (c) WSM6 scheme, (d) NCEP5 scheme

沿图 8a 中虚线对武汉地区发展旺盛的对流云团进行垂直剖面, 如图 9 所示, 可以清楚看到在 31.05°N 、 114.15°E 上空嵌在层状云降水区内的对流云团, 层状云回波强度在 $10\sim 35\text{ dBZ}$, 而对流云团回波最强达到 45 dBZ 以上, 高度主要集中在 $1\sim 8\text{ km}$ 范围内, 整个回波顶的高度伸展到 15 km 附近, 对流云团内冰相粒子含量丰富, 雨滴的碰并增长也更加明显, 对应地面降水量加大。从模拟结果上看, 各方案均能模拟出云的整体形状及云砧结构, 但

低层云的位置较实况略向东北方向偏移, 且云的发展不够深厚, 云顶高度均较实况偏低 $3\sim 5\text{ km}$, 其中双参数方案和 WSM6 方案在对流云最大回波强度方面有较好的优势, 均达到 45 dBZ 以上, 而 NCEP5 方案的回波强度整体偏低, 强回波出现的高度与实况也差异较大, 双参数方案能更好地模拟出对流云内部的两个对流单体, 最大回波主要分布在地面向上至 8 km 高度范围内, 与实况吻合较好, 模拟结果较其他两个方案更为细致。

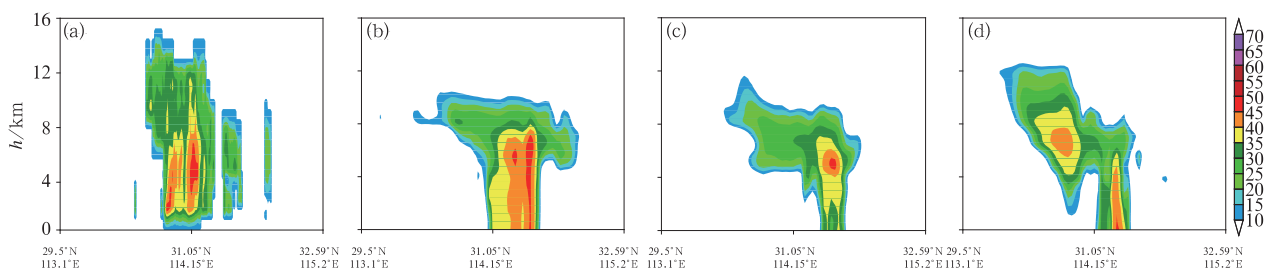


图 9 同图 8, 但为雷达反射率垂直剖面

Fig. 9 Same as Fig. 8, but for vertical structure of radar reflectivity

2.6 CloudSat 冰水含量

CloudSat 卫星上搭载的云廓线雷达 CPR, 可以对全球的云层特征及降水的内部结构进行探测。它提供的数据产品可以更好地反映真实大气的云结构特征, 从而提高对云微物理过程的认知程度与预报能力(花丛等, 2011)。2013 年 7 月 6 日 05 时前后, CloudSat 卫星的扫描轨道经过江淮流域, 如图 5d 中实线所示。图 10 显示了 CloudSat 卫星观测结果及各方案沿卫星轨道所模拟的冰晶含量-高度剖面图。卫星观测显示, 冰晶分布在 29.4°N 、 115.28°E 至 30.1°N 、 114.9°E 区间上空 $5\sim 14\text{ km}$ 的冷区范

围内, 且在 10 km 高度附近冰晶含量达到最大, 最大值达到 $0.3\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上。各方案均能大致模拟出冰晶的空间分布, 模拟的高值区主要集中在 $8\sim 12\text{ km}$, 而最大值的量级均在 $0.1\sim 0.2\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, 较卫星观测的值偏低, 说明各云微物理方案输出的冰水含量还有更细致的改进空间, 这与吴伟(2011)的研究结论一致。当然, 不同的方案也存在一定的差异, 双参数方案模拟的冰晶含量形状与观测最为相似, 云顶的云砧结构较为明显, 但位置略向西北偏移; WSM6 模拟的位置较好, 但冰晶分布的形状差异较大; NCEP5 模拟的位置和形状也较为相似, 但冰晶整体高度较高, 厚度较窄, 在 0°C 层至 8 km 高

度上冰晶含量稀少。

上升气流对云系的形成、发展和维持起着至关重要的作用,云系的分布和发展的强弱与云内气流运动的垂直速度的分布和大小密切相关(Reisner et al, 1998)。通过分析可以看出,在冰晶含量的高值区均存在较强的上升气流,使冰晶得以聚积和生长,云系发展旺盛,对流较强。WSM6 方案的最大上升速度达到 $2.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,明显高于其他两个方案,使

得该方案模拟的冰晶含量高值区厚度较大,从 0°C 层向上延伸到 12 km 以上。NCEP5 方案的最大上升气流为 $0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,略低于双参数方案的 $0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且在 8 km 以下存在一定的下沉气流,这也较好地解释了此段高度内冰晶含量稀少的现象。总体来看,GRAPES_Meso 中各云微物理方案对冰晶含量方面有较好的模拟能力。

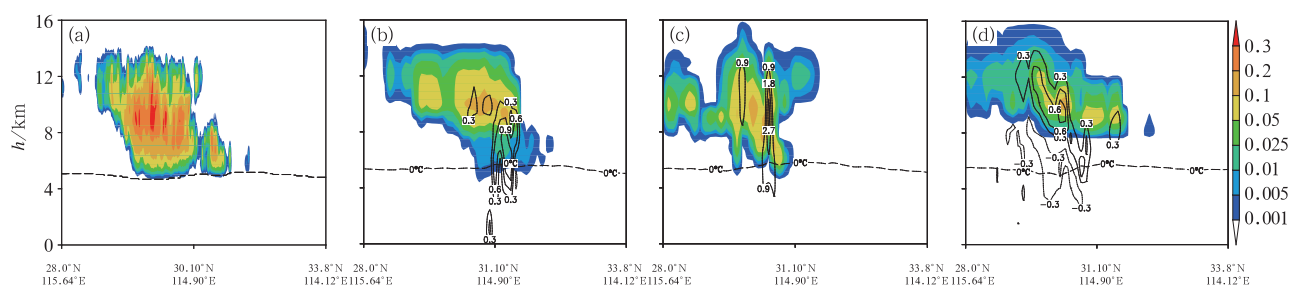


图 10 同图 8, 但为 2013 年 7 月 6 日 05 时冰水含量(填色, 单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)
和垂直速度(实线: 上升, 虚线: 下沉, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)的垂直剖面

Fig. 10 Same as Fig. 8, but for vertical structure of ice water content (shaded area, unit: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)
and vertical speed (solid line: updraft, dashed line: downdraft, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 0500 UTC 6 July 2013

3 浙闽个例结果分析

为了再次验证三种云微物理方案在高分辨率 GRAPES 模式中的预报效果,选取了 2014 年 8 月 19 日浙江福建地区的一次强降水过程,雨带覆盖整个浙闽地区,局地降水超过 150 mm ,三种方案均能大致模拟出降水的主要落区与雨带走向(图略)。为了比较不同云微物理方案及水凝物的成长情况对地面降水的整体影响,对 8 月 19 日 00 时至 20 日 00 时主要降水区域($24^\circ \sim 31^\circ\text{N}$, $115.5^\circ \sim 122.5^\circ\text{E}$)的降水率、液态和固态水凝物的垂直积分作区域平均,得出三个物理量随时间的演变。从图 11 中可以看出,各方案模拟的降水率与加密自动站结果并不是完全的匹配,由于模式的冷启动过程中各云物理变量的初始值为 0,降水相对实况出现时间较晚,随着水凝物含量的增加,降水随时间持续增长,到 19 日 12—15 时左右出现峰值,较实况的峰值均晚 $3 \sim 4 \text{ h}$ 左右,其中双参数方案模拟的降水率峰值介于其他两个方案之间,与实况最为接近,达到 $1.75 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,WSM6 模拟的最大降水率达到 $2.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,远大于实况,随后降水开始减少,至 22 时左右略有峰值随后继续下降,但各方案模拟的降水率依然较实况

偏大,强降水的持续时间都比实况偏长,这与江淮个例的结论略有不同。双参数方案模拟的降水率在后期整体比较平缓,WSM6 方案模拟的降水率的变化幅度则明显强于其他两个方案。

与地面降水的演变一致,水凝物起初也随时间持续增加,在降水率达到峰值的同时,水凝物含量也较高,且固态水凝物的垂直积分高于液态水凝物,固态水凝物的增长趋势也与降水的趋势更为相似,说明固态粒子对降水起着更为重要的作用。具体来看,在最初阶段,双参数方案的水凝物增长相比其他方案更为迅速,降水率也迅速增加,随后变化较为平缓,云中水凝物的含量与地面降水的配合较好,降水强度与实况最为接近。NCEP5 方案由于含有大量的过冷云水,液态水凝物的含量随时间持续增加,峰值达到 $1.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,比其他两个方案高 $0.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上,在 19 日 18 时左右,固态粒子远超其他两个方案,达到 $1.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,对应的降水率又随时间逐渐增强。WSM6 方案由于大量水凝物粒子碰并、融化及下落过程,地面降水率最大,但云中液态和固态水凝物粒子均较少,这与江淮个例的结论一致,WSM6 方案在云中水凝物和地面降水的配置方面存在一定的不合理性。

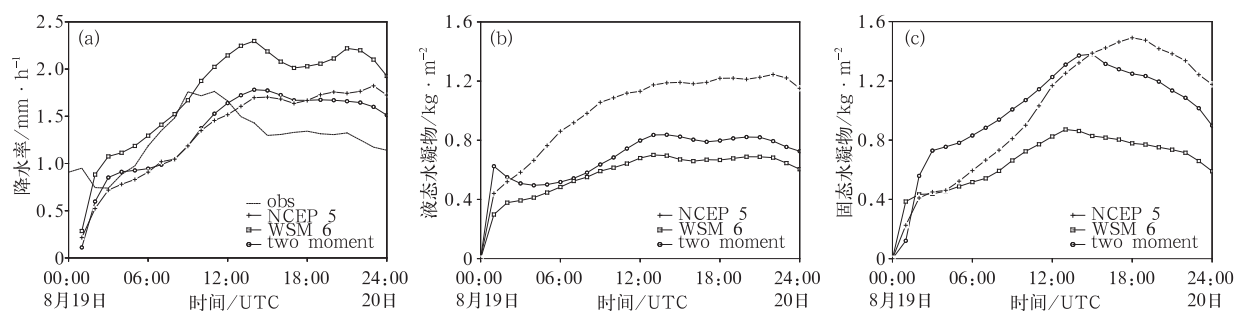


图 11 区域平均的(a)降水率、(b)液态水凝物及(c)固态水凝物随时间的演变

Fig. 11 Time series of the (a) precipitation rate, (b) liquid hydrometeors, (c) solid hydrometeors averaged over the heavy rainfall region

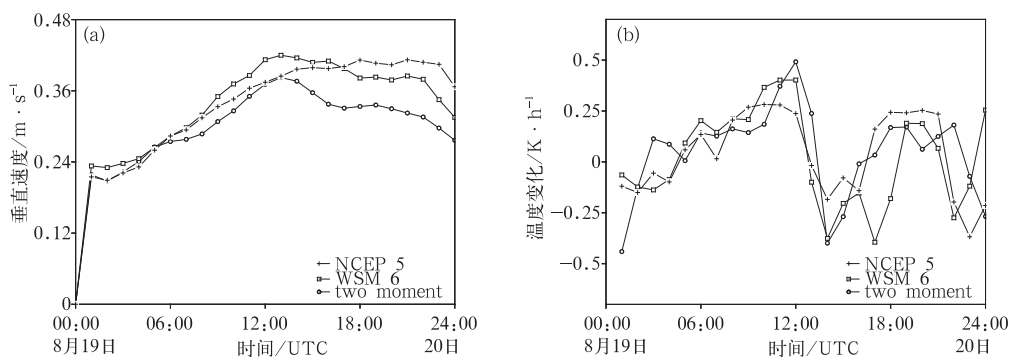


图 12 区域平均的(a)垂直速度和(b)温度变化随时间的演变

Fig. 12 Time series of the (a) vertical speed,

(b) temperature change averaged over the heavy rainfall region

考虑到云中水物质可以通过相变潜热影响大气的动力和热力结构,分析其动力过程和热力反馈随时间的演变特征,可以深入研究不同云微物理方案造成云和降水的差异。与图 11 相似,对主要降水区域的整层垂直速度平均值和温度变化平均值进行计算,给出不同方案模拟的逐时变化情况(图 12)。结合图 11 中降水率和水凝物随时间的变化特征可以看出,最初云体上升发展,绝热膨胀冷却降温,随着云中液态和固态水凝物的生长,通过凝结、凝华和冻结等过程产生的相变潜热,带来了较强的热力反馈,温度变化整体呈上升趋势,上升气流也不断增强,在 19 日 12 时前后达到垂直速度最大值,水凝物得到充分的发展,潜热释放也达到最大,均达到 $0.25 \text{ K} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上,随后大量固态粒子在下落过程中融化蒸发冷却,落至地面形成降水,温度变化瞬间达到最低,对应地面降水也达到最大,在 22 时左右降水率略有峰值,上升气流也略有增加,对应温度又存在明显的负变化。WSM6 方案模拟的上升气

流的最大值达到 $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,高于其他两个方案,对应地面降水也明显偏强。NCEP5 方案中温度的负变化极值较小,说明由固态粒子融化吸收的潜热较少,融化蒸发过程弱于其他两个方案,云中剩余的固态水凝物含量也明显偏高,而云中较强的热力作用,又促进了上升气流的发展,加强了水凝物的生长,因此在 18 时以后 NCEP5 方案模拟的上升气流高于其他两个方案,地面降水又开始增强,但依然未达到 WSM6 的降水强度。双参数方案在模拟最初阶段,水凝物的生长速度明显快于其他两个方案,温度变化也迅速上升,在随后的发展过程中,上升气流和温度变化都较为均衡,降水强度与实况最为接近。总的来看,云中水凝物粒子,尤其是冰相粒子可以通过潜热释放促进上升气流的发展,较强的上升气流又反过来使冰相粒子得到更加充分的生长,进而促进云的发展以及降水的形成,这与江淮个例中冰晶含量的高值区对应较强上升气流的结论一致。

4 结论与讨论

利用高分辨率 GRAPES 区域模式中 NCEP5、WSM6 和双参数云微物理方案,对两次不同天气系统下的强对流性降水过程进行模拟,结合多种观测资料,诊断评估了方案的预报性能,并分析了强降水过程中的关键云物理过程,得到的初步结论如下:

(1)三个云微物理方案均能大致模拟出降水的雨带走向、范围、雷达回波强度与分布,以及云团中的冰晶含量及云砧结构,但回波的位置模拟均不够准确,回波顶的高度偏低,强对流云团的发展不够深厚且冰晶含量较 CloudSat 卫星观测偏低。

(2)双参数方案模拟的降水强度和强降水落区与实况拟合较好,同时在对流单体的最大回波高度与强度、冰晶含量的分布等方面也有一定优势。WSM6 方案的固态水凝物含量偏少,大量冰相粒子的融化及碰并后的融化下落使地面的降水偏大,两者的配置存在一定的不合理性,在 0°C 层以上过冷区明显缺少过冷水。NCEP5 方案中由于云水与冰相粒子的碰并较弱,主要以过冷水的形式集中在冷区,造成冷区液相水凝物含量偏高,而 0°C 层向上至 8 km 冰晶含量很少,雷达回波较实况偏弱。

(3)虽然两次强降水的成因、落区、强度以及持续时间等有所不同,但均是由层状云降水和嵌置其中的对流性云团降水构成。对流性雨团中,冰相粒子对对流的发展与降水起主导作用,尤其是对流发展旺盛的云团中霰粒子的高值区对应有较强的上升气流使其充分长大,地面对应于强降水中心,说明霰的融化是强降水的主要来源(NCEP5 方案中为雪的融化),而周围的层状云降水主要受雪的融化与暖云降水的影响。

(4)水凝物的相变潜热对云的动力和热力场具有重要的反馈作用,水凝物在生成并释放潜热的同时,能促使上升气流的不断发展和对流的垂直输送,温度也会不断上升,当水凝物充分长大融化下落时,吸收大量热量,地面降水也会相应增加。

本文通过两次强降水过程,结合多种观测资料,对高分辨率 GRAPES 模式中的双参数云微物理方案进行诊断评估,并将模拟结果与 WSM6 和 NCEP5 方案进行对比分析,表明双参数方案对强降

水过程的预报具有一定优势的同时,也还存在不足之处,为双参数方案的业务应用和改进工作提供了重要的支持。此外,还需要开展更多试验,结合更多的天气过程及诊断方法,对方案做出更加细致的评估与诊断。

参考文献

- 陈德辉,薛纪善,杨学胜,等. 2008. GRAPES 新一代全球/区域多尺度统一数值预报模式总体设计研究. 科学通报, 53(20): 2396-2407.
- 陈小敏,刘奇俊,章建成. 2007. 祁连山云系云微物理结构和人工增雨催化个例模拟研究. 气象, 33(7): 33-43.
- 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. 气象学报, 45(4): 467-484.
- 胡志晋,严采繁. 1986. 层状云微物理过程的数值模拟(一)——微物理模式. 应用气象学报, 1(1): 37-52.
- 花丛,刘奇俊. 2011. 登陆台风“罗莎”中云物理特征的数值模拟研究. 热带气象学报, 27(5): 626-638.
- 姜晓飞,刘奇俊,马占山. 2015. GRAPES 全球模式浅对流过程和边界层云对低云预报的影响研究. 气象, 41(8): 921-931.
- 李静. 2009. CAMS 云方案和 NCEP 云方案在 GRAPES 区域模式中的检验和对比. 北京:中国气象科学研究院.
- 刘奇俊,胡志晋,周秀骥. 2003. HLAFS 显式云降水方案及其对暴雨和云的模拟(I)云降水显式方案. 应用气象学报, 14(S1): 60-67.
- 马严枝,陆昌根,高守亭. 2012. 8·19 华北暴雨模拟中微物理方案的对比试验. 大气科学, 36(4): 835-850.
- 牛俊丽,闫之辉. 2007. WRF 模式微物理方案对强降水预报的影响. 科技信息, 23(1): 17-20.
- 石荣光,刘奇俊,马占山. 2015. 利用 GRAPES 模式研究气溶胶对云和降水过程的影响. 气象, 41(3): 272-285.
- 吴伟. 2011. 基于 CloudSat 及 MODIS 卫星云产品对 GRAPES 全球模式和 WRF 模式云微物理方案的对比检验. 兰州:兰州大学.
- 薛纪善,陈德辉. 2008. 数值预报系统 GRAPES 的科学设计与应用. 北京:科学出版社, 137.
- Baker M B. 1997. Cloud microphysics and climate. Science, 276(5315): 1072-1078.
- Bryan G H, Wyngaard J C, Fritsch J M. 2003. Resolution requirements for the simulation of deep moist convection. Mon Wea Rev, 131(10): 2394-2416.
- Lang S, Tao W K, Cifelli R, et al. 2007. Improving simulations of convective systems from TRMM LBA: Easterly and westerly regimes. J Atmos Sci, 64(4): 1141-1164.
- Hong S Y, Juang H M H, Zhao Q Y. 1998. Implementation of prognostic cloud scheme for a regional spectral model. Mon Wea Rev, 126(10): 2621-2639.
- Hong S Y, Lim J O J. 2006. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). J Korean Meteor Soc, 42(2): 129-151.

- Hong S Y, Lim K, Lee Y H. 2010. Evaluation of the WRF double-moment 6-class microphysics scheme for precipitating convection. *Adv Meteor*, 2010(1):185-194.
- Hong S Y, Sunny Lim K, Kim J H, et al. 2009. Sensitivity study of cloud-resolving convective simulations with WRF using two bulk microphysical parameterizations: ice-phase microphysics versus sedimentation effects. *J Appl Meteor Climatol*, 48(1):61-76.
- Petch J C, Gray M E B. 2001. Sensitivity studies using a cloud-resolving model simulation of the tropical west Pacific. *Quart J Roy Meteor Soc*, 127(127):2287-2306.
- Reisner J, Rasmussen R M, Bruintjes R T. 1998. Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. *Quart J Roy Meteor Soc*, 124(548):1071-1107.
- Roh W, Satoh M. 2014. Evaluation of precipitating hydrometeor parameterizations in a single-moment bulk microphysics scheme for deep convective systems over the tropical open ocean. *J Atmos Sci*, 71(7):2654-2673.
- Weisman M L, Davis C, Wang W, et al. 2008. Experiences with 0-36-h explicit convective forecasts with the WRF-ARW model. *Wea Forecasting*, 23(3):407-437.

“预报失败案例分析专辑”征稿启事

《气象》是面向气象业务与科研的科技期刊,是气象科研人员和一线预报员大气科学研究、天气分析和机理研究等的学术交流平台。为了更好地使一线预报员提高对实际天气过程的认识,加深对其难点和问题的理解,本刊准备组织出版一期专刊,内容是反映预报员对实际业务中失败案例的分析,将自己预报工作中所经历的挫折和体会进行系统总结和剖析,既有助于自己预报能力的提升,也能使更多的人从中受益。这种过程分析,不仅仅是对天气系统的客观诊断、描述,而是将对失败的原因进行细致的剖析,从而使对理论知识的理解更加贴近实际,使以往掌握的预报技能更能有针对性地解决实际问题。

该专辑将在 2017 年底出版。具体事项通知如下:

- (1) 投稿文章为预报失败案例的分析。
- (2) 文章未在国内外公开发行的刊物发表,不涉及保密问题。
- (3) 稿件要求可见《气象》征稿简则(网址: <http://qxqk.cma.gov.cn>)。投稿时请注明预报失败案例分析专辑。
- (4) 征稿截止日期为 2017 年 2 月 28 日。

真诚地希望我们的计划能够得到广大预报人员的支持,欢迎你们积极参与,踊跃投稿,共同分享在实践中得到的真知与感悟。