

# 不同微物理方案对一次梅雨锋暴雨过程模拟的影响<sup>\* 1</sup>

孙 晶 楼小凤 史月琴  
SUN Jing LOU Xiaofeng SHI Yueqin

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

*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Weather Modification Center of China Meteorological Administration,  
Beijing 100081, China*

2009-12-28 收稿, 2010-04-29 改回.

**Sun Jing, Lou Xiaofeng, Shi Yueqin, 2011. The effects of different microphysical schemes on the simulation of a meiyu front heavy rainfall. *Acta Meteorologica Sinica*, 69(5): 799-809**

**Abstract** The convective parameterization and microphysical scheme are two main approaches in a mesoscale atmospheric model to describing cloud and precipitation processes. When the grid scale of the model is small enough to distinguish the convective cloud scale, the microphysical scheme becomes more important. In this study, a case of heavy rainfall of Meiyu front happened on July 7-9, 2007 in China is simulated using the GRAPES mesoscale model. The effects of the different microphysical schemes (the Ncepcloud3 simple ice scheme, the Ncepcloud5 mixed phase scheme, the CAMS double moment mixed phase scheme) on heavy rainfall simulating are analyzed combining with the observations of precipitation, the radar echoes and hydrometeors patterns. The results show that for this heavy rainfall case, the simulations using the CAMS scheme are better for the classes of light rain and moderate rain, and the Ncepcloud3 scheme and the Ncepcloud5 scheme are of higher TS for the torrential rain and the class above it. The maximum of the heavy rainfall center simulated using the CAMS scheme is close to the observation. The simulated results of mesoscale convective system developing processes are different using these schemes from each other. The area of weak convective echoes simulated by the Ncepcloud5 scheme is small. The CAMS scheme simulated a bigger area of weak convective echo which is basically consistent with observations. The vertical distributions of the mass content and number concentration of ice particles calculated by the CAMS dual parameters scheme are similar to the CloudSat observations. The ice particles calculated by the Ncepcloud3 scheme and Ncepcloud5 scheme are larger than the observation with no number concentration of theirs covered. The reasons of the simulative difference caused by using different schemes are preliminarily analyzed. During the forming stage of convective system, the simulative difference is mainly produced by dynamical process. While during both the developing and mature stage, the microphysical processes affect simulation results significantly.

**Key words** Microphysical scheme, Meiyu heavy rainfall, Numerical simulation

**摘 要** 中尺度模式中描述湿物理过程的方案主要有对流参数化方案和云微物理方案, 当网格距达到可以分辨积云对流尺度时, 云微物理方案对描述云和降水物理过程的作用将变得更为重要。利用 GRAPES 高分辨率中尺度数值模式对 2007 年 7 月 7—9 日中国梅雨锋暴雨过程进行了数值模拟, 从降水量、雷达回波、水成物分布方面结合观测资料, 分析了 NCFP 简单冰相方案(Ncepcloud3)、复杂冰相方案(Ncepcloud5)、中国气象科学研究院(CAMS)双参数复杂冰相微物理方案对梅雨锋暴雨模拟结果的影响。研究表明, 对于这次暴雨过程, CAMS 方案对小雨、中雨和大雨的模拟最好, Ncepcloud3 和 Ncepcloud5 方案在暴雨以上的 TS 评分较高, CAMS 方案模拟的暴雨中心最大值最接近实况; 不同微物理方案对中尺度对流系统形成发展的模拟有差别, Ncepcloud5 方案模拟的弱回波范围偏小, CAMS 方案在强回波两侧的弱回波区范围虽比实况偏大, 但反映了对流回波周围存在层状回波的特点; CAMS 双参数方案能够模拟出与 CloudSat 卫星实测资料相似的冰粒子含水量和数浓度大值

\* 资助课题: 国家自然科学基金项目(40805003)和中国气象科学研究院基本科研业务研究专项(2007Y003)。

作者简介: 孙晶, 主要从事云物理学和人工影响天气研究。E-mail: sunj@cams.cma.gov.cn

区的垂直分布特征, Ncepcloud3 和 Ncepcloud5 模拟结果更强, 并且, 不包含冰粒子数浓度; 初步分析了微物理方案模拟差异的原因, 在对流系统初始阶段, 模拟差异主要由动力过程产生, 在对流系统发展成熟阶段, 微物理过程对模拟结果有重要影响。

**关键词** 微物理方案, 梅雨锋暴雨, 数值模拟

**中图法分类号** P426.62 P435

## 1 引言

数值模式中的湿物理过程对数值预报的准确性具有非常重要的影响(张大林, 1998)。中尺度模式中描述湿物理过程的方案主要有对流参数化方案和云微物理方案(楼小凤等, 2003)。对流参数化方案处理的是次网格尺度降水过程, 通过一些假设定义对流触发函数, 估计次网格尺度降水以及由对流造成的网格尺度的动力热力效应。云微物理方案(也称显式方案)是直接格点上计算网格尺度的降水, 即大气中水汽和水成物的产生、平流以及相互作用等用格点上的预报方程直接计算。目前, 中尺度数值模拟中, 水平格距在 5 km 以上时一般结合使用对流参数化方案和微物理方案(王建捷等, 2005; 徐国强等, 2005), 有很多学者对两种方案相互协调问题进行了研究(Molinari, et al, 1992; 张曼等, 2006)。随着计算能力和模式分辨率的提高, 当网格距达到可以分辨积云对流的尺度时, 云微物理方案对描述云和降水物理过程的作用变得更为重要, 在格距小于 5 km 时往往单独使用微物理方案, 已能模拟出几千米的对流单体及其组成的各种中尺度对流云系(Chen, et al, 1998; Zhu, et al, 2004, 2006)。

中尺度数值模式中显式方案存在一定差别。根据模式预报变量的不同, 可分为单参数方案和双参数方案。单参数方案只预报水成物比质量, 双参数方案除比质量外还可预报水成物数浓度。根据云微物理过程的复杂程度, 可以分为暖云方案、简单冰相方案和复杂冰相方案(史月琴等, 2006)。在数值模拟时采用不同的显式方案, 由于微物理过程的物理描述和处理方法不同, 将得到不同的云物理量场, 从而有不同的潜热释放和降水粒子拖曳影响到模拟的动力场和温度场, 进而影响云系结构和降水结果(楼小凤等, 2003)。Morrison 等(2009)比较了中尺度天气数值模式 WRF 中单参数方案和双参数方案对层状云区模拟的影响, 结果显示双参数方案模拟的层云范围比单参数方案的宽, 主要原因是两个方案在层云区的雨滴蒸发率上存在差异。Hong 等

(2009)对 WRF 模式中两个复杂冰相方案的冰相微物理过程和下落速度进行了比较, 指出霰粒子下落速度的差异可以影响到对流风暴形成时间和强度。楼小凤等(2004)对中尺度模式 MM5 中 3 种显式方案进行了对比, 分析了台风模拟结果的差异。这些研究结果均表明, 在用高分辨率中尺度模式时显式方案的选择对模拟结果有重要影响。对这一问题的研究将有助于更好地把握不同显式方案的模拟性能, 为改进微物理方案提供参考依据。

由中国科学家自行研制的 GRAPES 中尺度数值模式近年来得到了显著发展, 并被广泛应用(陈德辉等, 2008; 马旭林等, 2009; 朱红芳等, 2007), 在物理过程方面也在不断改进和完善(徐国强等, 2008)。其中所包含的微物理方案既有从其他国家引进的, 也有中国自主研发的(楼小凤, 2002; 刘奇俊等, 2003); 既有暖云方案, 也有简单冰相、复杂冰相方案。本文选取 GRAPES 中尺度数值模式中多种微物理方案, 对 2007 年 7 月 8 日中国梅雨锋暴雨过程进行高分辨率数值模拟, 分析不同微物理方案对梅雨锋暴雨过程模拟结果的影响。

## 2 GRAPES 中尺度模式中的 3 种微物理方案介绍

### 2.1 NCEP 简单冰相云方案(Ncepcloud3)

Ncepcloud3 方案(Hong, et al, 1998)中有 3 类水成物预报量: 云水/冰晶、雨水/雪、水汽。液态水与固态水根据温度进行区分:  $0^{\circ}\text{C}$  以上时为云水、雨水,  $0^{\circ}\text{C}$  以下时为冰晶、雪。考虑的微物理过程主要包括: 水汽的凝结与云水的蒸发、云水向雨水的自动转换、雨水与云水的碰并、雨水的蒸发、冰晶向雪的自动转换、冰晶的生成、雪与冰晶的碰并、冰晶和雪的升华凝华、冰雪的融化和云雨的冻结、冰晶、雪、雨的下落速度参数化等。该方案尽管也考虑了液态水与固态水之间的相变过程, 但较为简单, 称为简单冰相方案。

### 2.2 NCEP 复杂冰相云方案(Ncepcloud5)

Ncepcloud5 方案以 Ncepcloud3 方案为基础,

有 5 类水成物预报量:云水、云冰、雨水、雪和水汽。Ncepcloud5 方案考虑了较为复杂的相变过程,允许过冷水存在,液态水与固态水间可交叉碰并;Ncepcloud3 简单冰方案和 Ncepcloud5 复杂冰方案的区别在于:简单冰方案的冻结和融化只在冻结层(0℃层)的相邻层发生,由于相变潜热的作用在冻结层附近可能会出现温度反馈的不连续;复杂冰方案中雪的冻结和融化允许在一定厚度的模式大气中发生,温度反馈的分布也更加连续、合理。

### 2.3 CAMS 复杂冰相双参数云方案

CAMS 复杂冰相双参数云方案由中国气象科学研究院开发(Hu, 2005;楼小凤, 2002),是以早期的对流云模式(胡志晋等, 1987)和层状云模式(胡志晋等, 1986)为基础发展而来的一套准隐式格式的混合相双参数微物理雪晶方案。该方案考虑了云水、雨水、冰晶、雪和霰 5 种水成物,包括 11 个云物理预报量,分别为水汽、云水的比质量( $Q_v$ 、 $Q_c$ ),雨水、冰晶、雪和霰的比质量和数浓度( $Q_r$ 、 $Q_i$ 、 $Q_s$ 、 $Q_g$ ;  $N_r$ 、 $N_i$ 、 $N_s$ 、 $N_g$ )以及云滴谱拓宽度  $F_c$ 。考虑了碰并、凝华(升华)和凝结(蒸发)、自动转化、核化和繁生及冻结和融化共 31 种云物理过程。该方案对凝结、云雨转化、雪晶淞附、雨滴冻结、冰晶核化、繁生等过程的描述具有一定特色,如冰晶核化过程考虑了水汽过饱和度和温度变化速率,云雨自动转化过程则根据 Berry 的模拟结果,计算云滴谱拓宽度,不采用  $Q_c$  的阈值等。物理过程的描述符合外场的观测或室内实验结果,并尽量减少人为调节的参数,使物理过程适用不同的天气系统和不同的区域使用。该方案的计算特点是对微物理预报量的汇项采用准隐式格式计算,可以保证计算稳定、正定、守恒。该方案已经与 GRAPES 中尺度模式动力框架相耦合(孙晶等, 2008),与 GRAPES 模式其他微物理方案相比,CAMS 方案则增加了对雨滴、雪、霰的数浓度和云滴谱拓宽度的预报,考虑了较全面的物理过程。

## 3 降水过程概况及试验方案设计

### 3.1 降水过程实况

2007 年 7 月 7—9 日,淮河流域出现连续 3 d 暴雨,多站日降水量超过 200 mm。在此期间,淮河流域正好位于高空急流入口区右侧以及低空急流出口区左侧(图略),这种高低空急流叠加区有利于上升

运动增强,偏南的暖湿气流将水汽源源不断地输送并集中到淮河流域的暴雨区。雨带上降水中心分布并不均匀,这与对流层低层中尺度低涡(扰动)的发生发展有关。中尺度云团和雨团是强降水的直接影响系统,在中尺度涡旋(扰动)有利的环境下,使这些云团和雨团此起彼伏,频繁生消,引发了大暴雨(赵思雄等, 2007)。

### 3.2 数值试验方案设计

利用 GRAPES 中尺度模式对 2007 年 7 月 7 日 20 时—8 日 20 时(北京时,下同)的淮河暴雨进行数值模拟,采用双层单向套网格结构,水平分辨率分别为 16 和 6 km,格点数分别为  $314 \times 233$ 、 $401 \times 201$ ,模拟区域分别为 ( $10^\circ$ — $47.1^\circ$  N,  $92^\circ$ — $142^\circ$  E) 和 ( $27^\circ$ — $38^\circ$  N,  $105^\circ$ — $127^\circ$  E)。模式初始场为分辨率  $1^\circ \times 1^\circ$  的 Ncepcloud 分析场资料,并同化了常规地面和探空观测资料。物理过程选项为 rrtm 长波辐射方案、swrad 短波辐射方案、sfclay 近地面过程方案、slab 陆面过程方案、mrf 边界层方案,第 1 层模式选用 KF-Eta 对流参数化方案和 CAMS 复杂冰相双参数云方案,第 2 层模式不选用对流参数化方案。在其他物理方案选项不变的情况下,对 6 km 的模拟进行不同微物理方案选项的试验,分别为 Ncepcloud3 简单冰相方案、Ncepcloud5 复杂冰相方案和 CAMS 复杂冰相双参数云方案。

## 4 降水模拟结果

### 4.1 模拟的 24 h 降水分布

由 2007 年 7 月 7 日 20 时—8 日 20 时观测和第 2 层套网格不同方案模拟的降水分布(图 1)可见,实况雨带(图 1a)呈倒 V 形,分布于湖北东北部—安徽北部—江苏南部地区,最大降水中心位于安徽寿县,降水量达 262 mm,在湖北东北和江苏南部也存在 100 mm 以上的大暴雨中心。不同微物理方案模拟结果表明,Ncepcloud3 方案(图 1b)和 Ncepcloud5 方案(图 1c)模拟的雨带宽度接近实况,而位置有一定偏差,CAMS 方案(图 1d)模拟的雨带范围偏大,但包括了实况雨带分布范围;3 个方案都模拟出了安徽西北部的大暴雨中心,CAMS 方案模拟的暴雨区范围比实况略小,Ncepcloud3 和 Ncepcloud5 方案模拟的暴雨区范围略大,Ncepcloud5 方案和 CAMS 方案模拟出了湖北东北部的暴雨中心,CAMS 方案对江苏南部暴雨中心的模拟略好于

Ncepcloud3 和 Ncepcloud5 方案; Ncepcloud3、Ncepcloud5、CAMS 方案模拟的降水最大值为

350、450、300 mm, 均比观测值偏大, 而 CAMS 方案模拟的降水最大值较为接近实况。

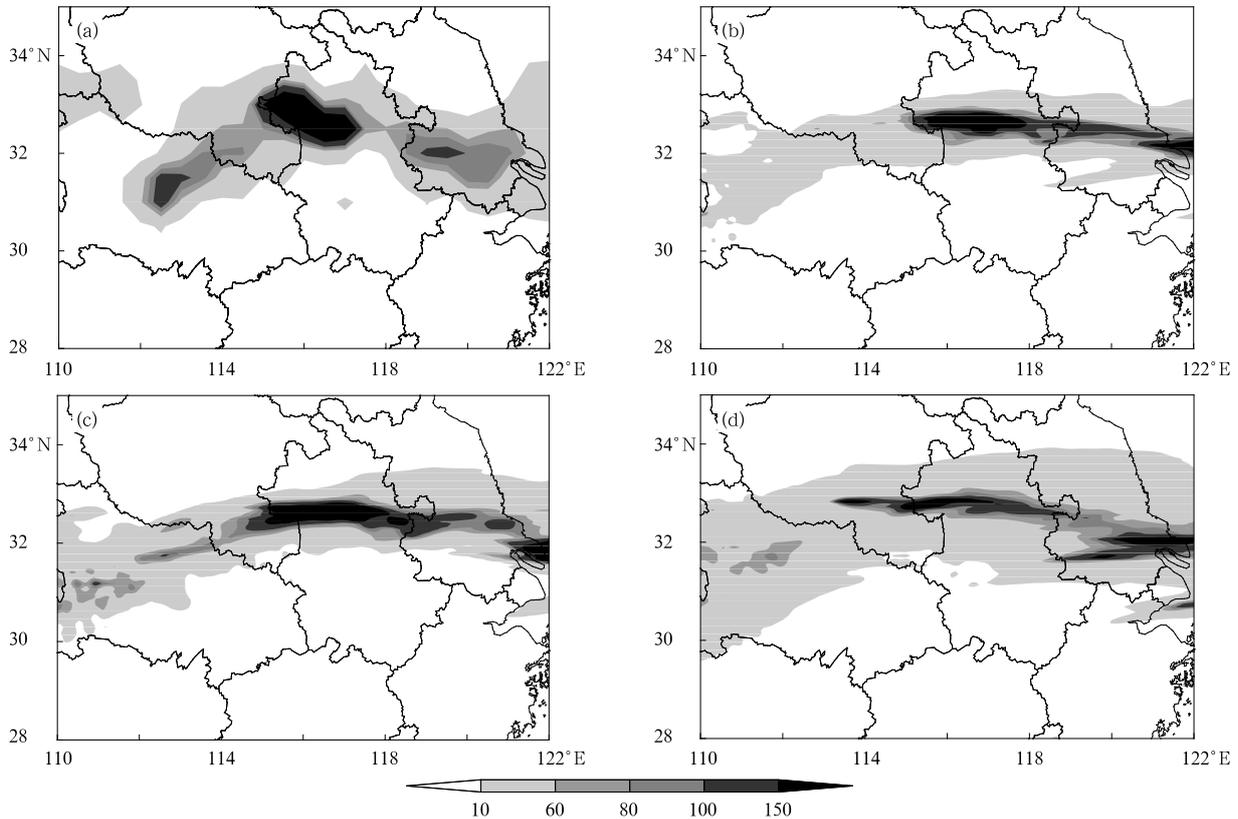


图 1 2007 年 7 月 7 日 20 时—8 日 20 时降水

(a. 观测, b. Ncepcloud3, c. Ncepcloud5, d. CAMS 方案模拟, 单位: mm)

Fig. 1 Observed (a) and simulated (b-d) rainfalls from 20:00 BT 7 July to 20:00 BT 8 July 2007

(b. Ncepcloud3 scheme, c. Ncepcloud5 scheme, d. CAMS scheme; unit: mm)

#### 4.2 24 h 降水量的评分

为了定量客观地反映上述不同微物理方案的降水模拟效果, 对 24 h 降水量进行统计检验。选取 (28°—35°N, 110°—122°E) 范围内 498 个台站 2007 年 7 月 7 日 20 时—8 日 20 时地面降水资料作为降水检验的指标站, 采用双线性插值方法将模式格点数据插值到站点位置得到站点预报值。采用累加量级检验方法, 降水等级分为小雨以上 ( $\geq 0.1$  mm)、中雨以上 ( $\geq 10$  mm)、大雨以上 ( $\geq 25$  mm)、暴雨以上 ( $\geq 50$  mm) 和大暴雨以上 ( $\geq 100$  mm) 5 个等级, 采用 TS 评分、漏报率、空报率 3 个降水检验统计量。

从 TS 评分结果来看(图 2a), 对于小雨、中雨和大雨以上量级, CAMS 方案的 TS 评分最高, 而对于暴雨和大暴雨的模拟 Ncepcloud3 方案的评分最高。

在漏报率方面(图 2b), CAMS 方案除大暴雨以上的漏报率最高外, 其余等级均为最低, Ncepcloud3 方案对小雨、中雨和大雨以上的漏报率最高。在空报率方面(图 2c), 除暴雨外, CAMS 方案对其余等级的空报率最高, Ncepcloud3 方案对各个等级的空报率都最低。

从综合评分结果和降水水平分布来看, CAMS 方案对小雨至大雨等级的 TS 评分最高, 漏报率低、空报率高, 说明 CAMS 方案对大雨以下等级的模拟较 Ncepcloud3 和 Ncepcloud5 方案好, 雨带范围略偏大, 而 Ncepcloud3 和 Ncepcloud5 方案对雨带范围模拟偏小; Ncepcloud3 和 Ncepcloud5 方案对大暴雨以上等级的 TS 评分较高, 漏报率和空报率较 CAMS 方案低, 说明这两个方案对大暴雨中心的模拟较 CAMS 方案好, 但模拟的大暴雨量值偏强。

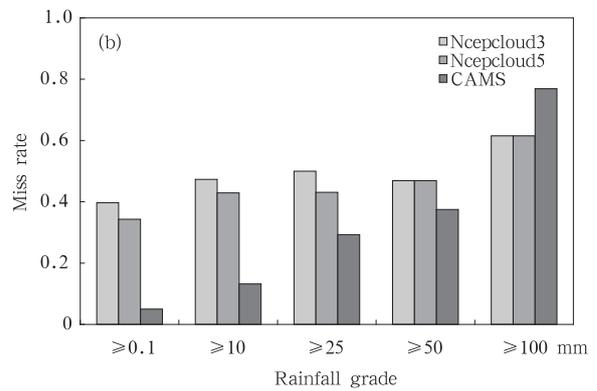
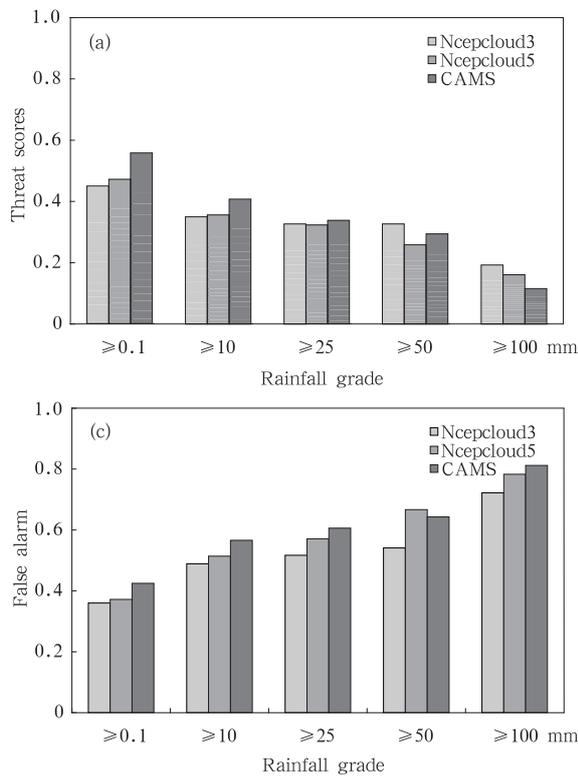


图 2 不同微物理方案的 24 h 降水预报检验  
(a. TS 评分, b. 漏报率, c. 空报率)

Fig. 2 Tests for the 24 h accumulated precipitation experiments using the different microphysical schemes (a. threat scores (TS), b. miss rate, c. false alarm ratio)

### 5 中尺度对流回波模拟结果

24 h 降水分布的比较虽能反映不同微物理方案对累积降水模拟的影响,但还不足以完全显示微物理方案的模拟效果。利用微物理方案模拟的水成物含量计算雷达回波,并与实测的雷达回波进行比较,可以作为对微物理方案模拟水成物结果的一个间接验证。对第 2 层套网格即水平分辨率为 6 km 的模拟雷达回波进行计算,并与合肥实测雷达回波进行对比(图 3)。

由实测雷达回波可知,7 日 20 时—8 日 20 时合肥以北有中尺度对流系统发生发展。其中,8 日 04 时(图 3a),合肥北部已出现对流回波区,回波区南北宽约 150 km,东西长约 250 km,在大范围弱回波中间分散着多个 45 dBz 以上的强回波,另外,在江苏西南部存在另一个中尺度对流回波区;此后,江苏西南部的对流回波向东发展逐渐移出合肥雷达观测区(图 3b);而合肥以北对流回波区的范围不断扩大,强对流回波向东南方向移动发展,并且,在西北方向有新的回波移入,回波之间发生合并,最终形成西北—东南走向的长约 350 km、宽约 100—200 km 的强对流回波带。这一对流带在安徽北部维持时间超过 7 h。

3 个微物理方案对中尺度对流回波结构的模拟有一定差别(图 3c—f),Ncepcloud3 和 Ncepcloud5 方案模拟的雷达回波分布基本相似,故略去 Ncepcloud3 方案回波图。在中尺度对流回波带形成初期(8 日 04 时),Ncepcloud5 方案(图 3c)模拟的雷达回波位于合肥西北部,回波区长约 250 km、宽约 50 km,与实测相比回波范围明显偏窄;而 CAMS 方案(图 3e)模拟的合肥西北部雷达回波区长约 300 km、宽约 100 km,回波范围与实测更为接近;并且, CAMS 方案模拟出了江苏西南部的对流回波区。8 日 04—07 时, Ncepcloud5 方案和 CAMS 方案模拟的合肥北部对流回波均自西向东发展,于 07 时在合肥以北地区形成中尺度对流回波带;Ncepcloud5 方案模拟的对流回波带呈东西走向,南北宽 50—100 km,与实测相比弱回波区的范围偏小; CAMS 方案模拟的对流回波带呈西北—东南走向,南北宽约 200 km,与实测相比略宽;Ncepcloud5 和 CAMS 方案模拟的 35 dBz 以上强回波带的分布范围比较相似,主要区别在于 30 dBz 以下的弱回波, Ncepcloud5 方案的弱回波范围小,呈向强回波集中的特点,而 CAMS 方案在强回波的南北两侧都存在大片弱回波区,从实测回波来看,在 40 dBz 强回波带的北侧分布着大片弱回波区, CAMS 方案模拟的结果

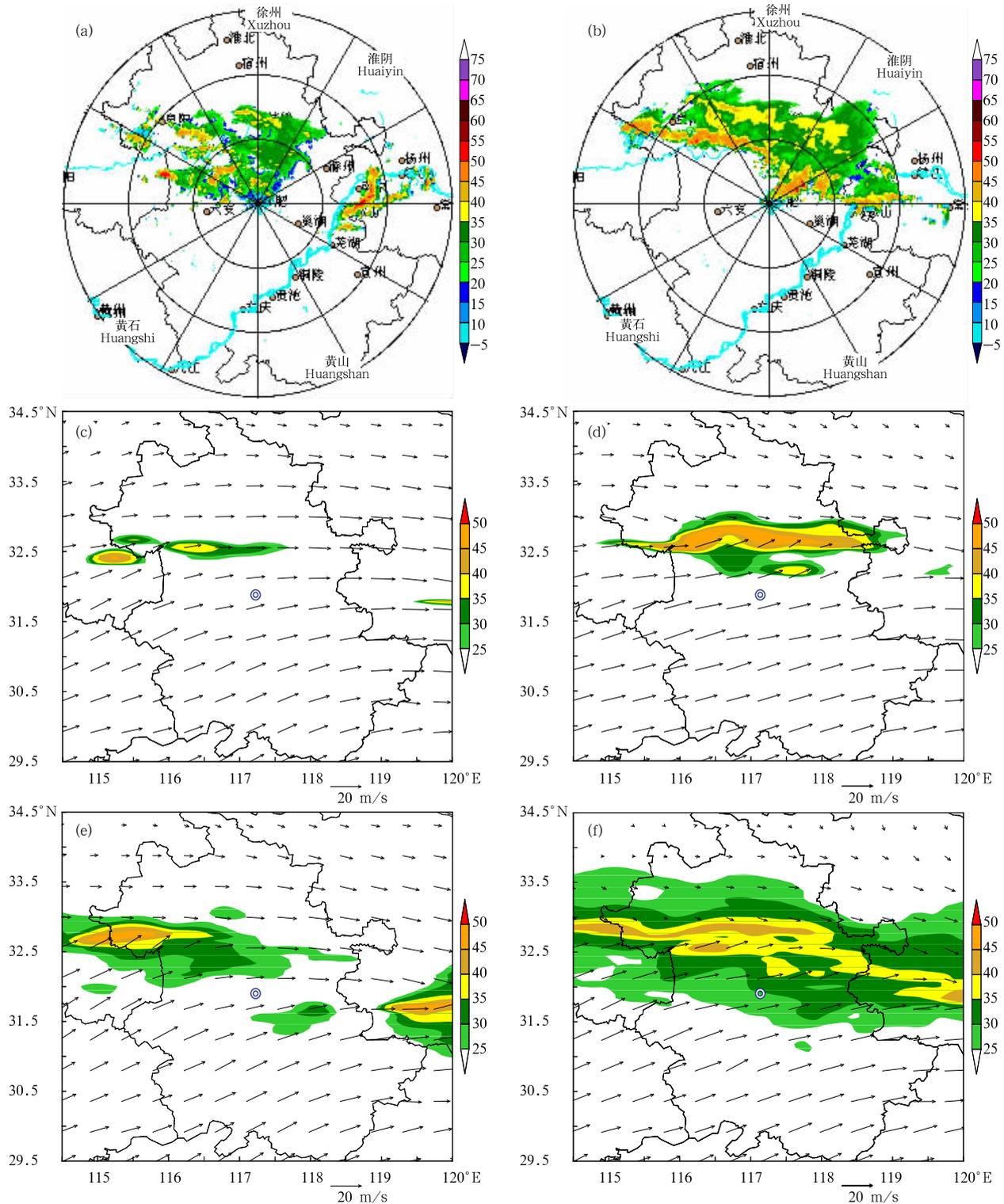


图3 2007年7月8日04时(a,c,e)、07时(b,d,f)合肥雷达观测的3 km高度雷达回波(a,b)和Ncepcloud5方案(c,d)、CAMS方案(e,f)模拟的850 hPa雷达回波(a,b中圈距为92 km,蓝色曲线为河流;c-f中圆圈为合肥位置;单位:dBz)

Fig. 3 Observed radar reflectivity of Hefei at the height of 3 km (a - b) and simulated radar reflectivity at 850 hPa using the Ncepcloud5 scheme (c - d) and the CAMS scheme (e - f) at 04:00 BT(a,c,e), 07:00 BT(b,d,f) 8 July 2007 (distance of each circle in (a - b) is 92 km, blue curve in (a - b) is river, the blue circle in (c - f) is for the position of Hefei; unit: dBz)

比 Ncepcloud5 方案更能表现这一特征。以上对比表明,CAMS 方案和 Ncepcloud5 方案对对流回波形成发展的时间和位置的模拟与实况基本吻合,而就对流回波带分布范围来说,Ncepcloud5 方案的回波带偏窄,没有明显的弱回波区,CAMS 方案的模拟结果更接近实况一些。

## 6 云系微物理结构

### 6.1 垂直结构

CloudSat 卫星是美国“地球观测系统科学探路者(ESSP)”计划的一部分(Stephens, et al, 2002),

于 2006 年 4 月发射,主要探测仪器为 94 GHz 的云剖面雷达(CPR),主要目的是提供云垂直结构观测数据。由于 CPR 波长的原因,其对云滴等液相粒子的探测能力不高,但冰相粒子的数据产品较好。2007 年 7 月 8 日 13 时 30 分,CloudSat 卫星观测正好穿越梅雨锋云带,利用观测数据对云的内部结构进行了分析,并与模式结果进行对比。

从 FY-2C 的 8 日 13 时云顶辐射亮温(TBB)(图 4a)可知,梅雨锋云带呈东西向覆盖安徽北部和江苏中部,安徽北部的云顶亮温较低,在  $-60^{\circ}\text{C}$  以下,CloudSat 卫星在  $(31.5^{\circ}-34.3^{\circ}\text{N})$  的观测路径

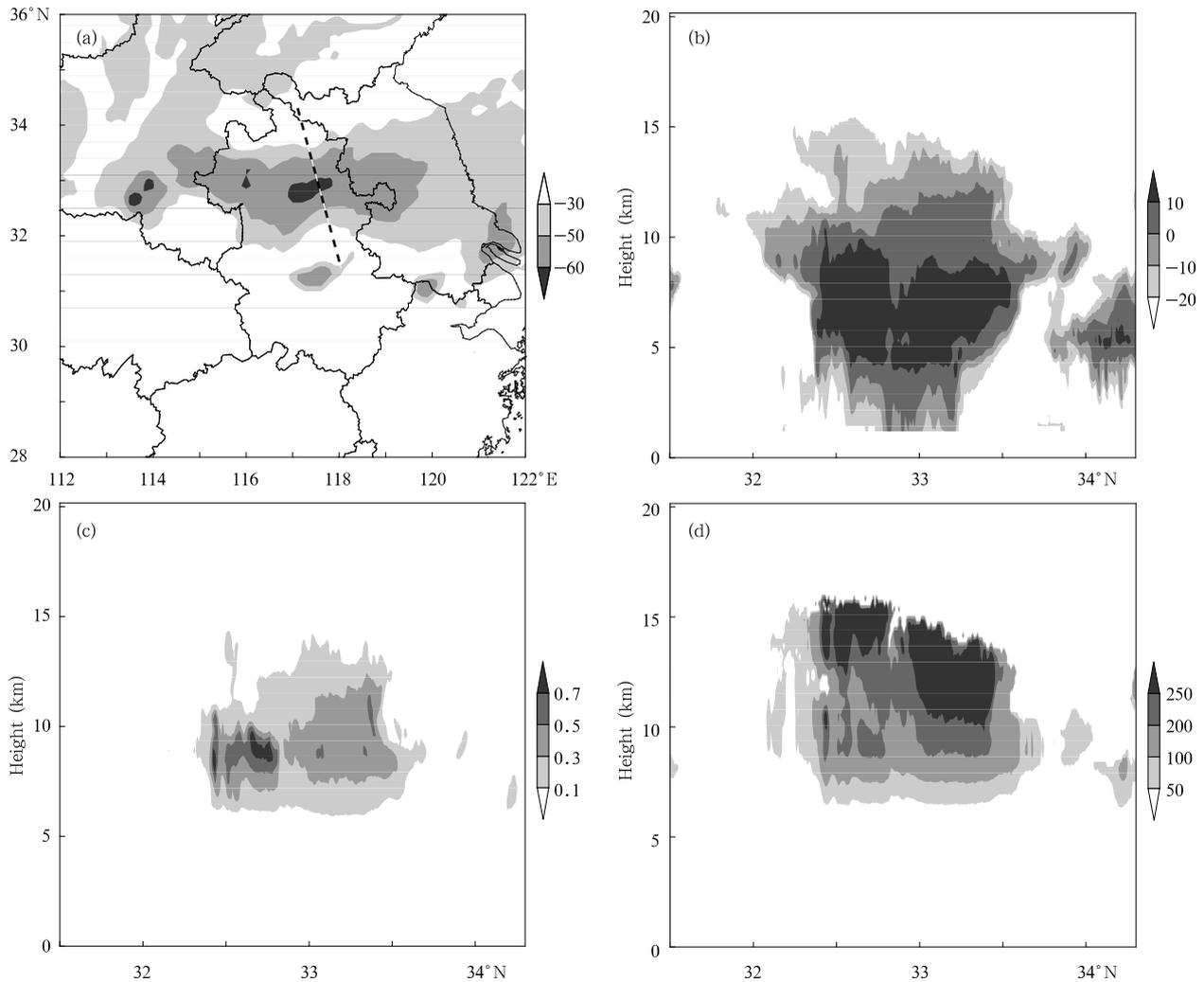


图 4 2007 年 7 月 8 日 13 时 FY-2C 观测的云顶辐射亮温(a,单位:  $^{\circ}\text{C}$ )和 13 时 30 分 CloudSat/CPR 观测的云带垂直结构  
(b. 雷达回波,单位: dBz; c. 冰粒子含水量,单位:  $\text{g}/\text{m}^3$ ; d. 冰粒子数浓度,单位:  $\text{L}^{-1}$ )

Fig. 4 Observations of the cloud top brightness temperature from the FY-2C (a, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) at 13:00 BT and the vertical distribution of cloud observed by the CloudSat at 13:30 BT 8 July 2007

(b. radar reflectivity, unit: dBz; c. mass content of ice phase particles, unit:  $\text{g}/\text{m}^3$ ; d. number concentration of ice phase particles, unit:  $\text{L}^{-1}$ )

如虚线所示。CloudSat/CPR 在这一路径观测的云中水成物雷达回波垂直结构显示(图 4b),梅雨锋云带上对流云发展旺盛,云顶高度达到 15 km,0°C 层高度约位于 5 km(图略),雷达回波大值区位于 4—10 km,在 7 km 以下高度回波南北向宽度逐渐变窄,在 7 km 以上云体伸展较宽,这与冰相粒子的分布有关。由图 4c、d 可见,梅雨锋云带含有大量的冰粒子,冰水含量大值区位于 8—10 km,最大值在 0.7 g/m<sup>3</sup> 以上,但冰粒子数浓度大值区位于 11—15 km,最大值在 250 L<sup>-1</sup> 以上。这种分布说明高层以大量的小尺度的冰粒子为主,虽然数目多但整体含水量不高,而在 10 km 以下冰粒子尺度增大、含水量增加,为促进降水发展提供了有利条件。

将 CloudSat 卫星在(31.5°—34.3°N)的冰水含量和冰粒子数浓度的观测结果进行平均,并与 3 个方案在这一路径的平均结果进行比较,Ncepcloud3 和 Ncepcloud5 方案为单参数云物理方案,不包含冰

粒子数浓度的预报。因此,无法与 CloudSat 的数浓度进行对比。从图 5a 可见,CloudSat 观测到的冰水含量主要位于 5—15 km 高度,最大平均值为 0.2 g/m<sup>3</sup>(位于 9 km),而模拟结果与观测值相比均偏强,模拟的冰粒子含水量大值区位于 5—10 km,CAMS 方案、Ncepcloud3 方案、Ncepcloud5 方案的最大值分别为 0.5、1.0、1.2 g/m<sup>3</sup>,Ncepcloud3 和 Ncepcloud5 方案在 17 km 有次大值,这与观测并不相符。CAMS 方案冰粒子数浓度的模拟结果与 CloudSat 的对比(图 5b)表明,二者数浓度平均值的大值区均位于 9—14 km,CAMS 方案的模拟最大值为 61 L<sup>-1</sup>,小于观测值 110 L<sup>-1</sup>。对比结果表明,CAMS 双参数方案能够模拟出与实测相似的冰粒子含水量和数浓度大值区垂直分布特征,在量值上与实测略有偏差;Ncepcloud3 和 Ncepcloud5 单参数方案也能模拟出冰水含量大值区的分布,但强度偏强较多。

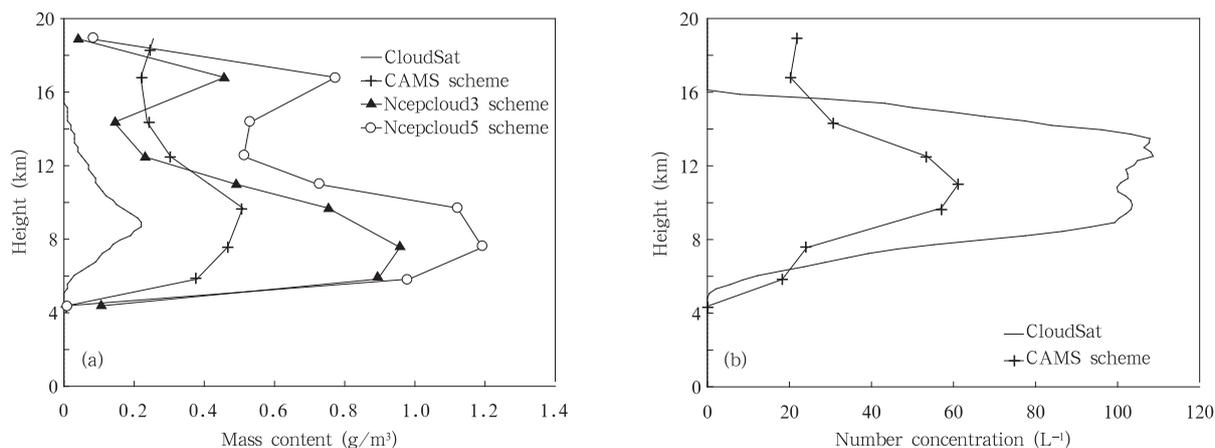


图 5 2007 年 7 月 8 日 13 时 30 分 CloudSat 卫星观测和 8 日 14 时模式模拟结果对比

(a. 冰水含量, b. 冰粒子数浓度)

Fig. 5 Comparison between the CloudSat observations at 13:30 BT and the model outputs at 14:00 BT 8 July 2007 using the different schemes

(a. mass content of ice phase particles, b. number concentration of ice phase particles)

## 6.2 微物理量及其热力反馈随时间演变分析

降水是在一定热力动力条件下经由云中微物理过程产生,而微物理过程的相态变化也会对热力动力过程产生反馈影响,其中,凝结潜热释放最为重要(Kuo, et al, 1982)。微物理过程和热力动力过程存在着相互作用,并且,这种相互作用随着云的发展而表现不同。分析微物理过程及其热力反馈以及动力过程随时间演变特征,可以进一步得出不同微物理

方案模拟造成云发展差异的原因。

由图 3 可知, 31.5°—33.5°N, 115°—119°E 是 CAMS 和 Ncepcloud5 微物理方案模拟的对流系统主要演变区域,对这一区域的液相和冰相粒子含水量平均值、凝结潜热释放的温度反馈平均值、上升速度平均值进行计算,给出其逐时变化对比情况(图 6)。可将对流系统的发展分为 3 个阶段:7 日 20 时—8 日 00 时为第 1 阶段,8 日 01—05 时为第 2 阶

段,8日06—20时为第3阶段。第1阶段为模式启动阶段,由于模式冷启动,水成物变量初值均为0,在第1阶段云的发展主要受动力过程影响,两个方案的上升速度都较小且差别不大(图6d),微物理方案计算出的液相和冰相粒子含水量都还接近于0(图6a、b),云体刚刚生成,凝结潜热的温度反馈也比较小(图6c),这一阶段两个微物理方案对对流系统模拟影响不大。第1阶段末两个方案动力条件基本相似,而在第2阶段两个微物理方案模拟的对流系统发展出现差异,01时上升速度平均值首先发生变化,CAMS方案比Ncepcloud5方案大(图6d),此时水成物含量无明显差别,此后CAMS方案的上升运动较Ncepcloud5方案强,液相和冰相粒子含水量比较大(图6a、b),相应的凝结潜热释放较多(图6c),这一阶段CAMS方案模拟产生的初始对流回波范围较大(图3c、e),与实况接近,因此,这一阶段主要由于上升运动差异造成水成物及凝结加热反馈

的差异。随着对流系统的发展(第3阶段),两个方案的模拟结果与前一阶段相反,CAMS双参数冰相方案的液相和冰相粒子含水量明显小于Ncepcloud5方案(图6a、b),凝结潜热和上升运动也小于Ncepcloud5方案(图6c、d),与图3d、3f结合分析可知,CAMS方案模拟的对流回波范围大而中心强度稍弱,Ncepcloud5方案模拟的对流回波范围小而中心强度大,Ncepcloud5方案模拟的各水成物含水量大,说明Ncepcloud5方案模拟的云体范围小、强度大,使凝结潜热释放和上升运动都强很多,但从模拟冰相粒子含量与CloudSat观测结果对比可知(图5a),Ncepcloud5方案模拟的冰相粒子含量与实测偏强很多,说明Ncepcloud5方案模拟的水成物含量过多,产生了较强的热力反馈,也增强了上升运动。综合上述分析,在对流系统初始阶段,微物理方案的模拟差异主要由动力过程产生,CAMS双参数冰相方案上升运动略大,使区域平均的各水成物含量和

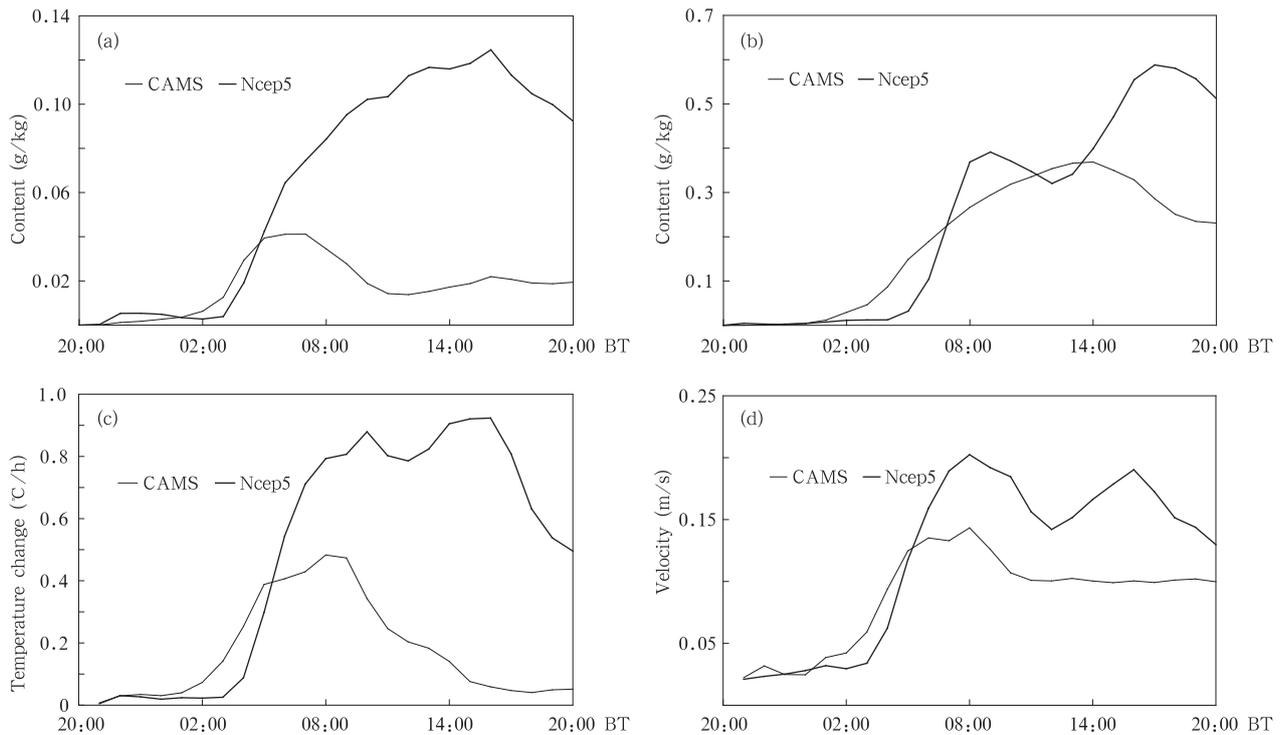


图6 2007年7月7日20时至8日20时31.5°—33.5°N,115°—119°E区域平均的CAMS和Ncepcloud5微物理方案模拟物理量逐时变化

(a. 液相粒子含水量, b. 冰相粒子含水量, c. 凝结潜热产生的温度变化, d. 上升速度)

Fig. 6 Simulative results output by using the CAMS and Ncepcloud5 microphysical schemes averaged over the region (31.5°—33.5°N, 115°—119°E) from 20:00 BT 7 July to 20:00 BT 8 July 2007

(a. mass content of liquid phase particles, b. mass content of ice phase particles, c. temperature change caused by condensation, d. velocity of updraft)

热力反馈略大,回波范围较 Ncepcloud5 方案宽但与实测接近;在对流系统发展成熟阶段,模拟差异受到微物理过程影响,Ncepcloud5 单参数冰相方案模拟的回波带相对集中,各水成物含量和产生的凝结加热过强,使区域内上升运动发展更强,而 CAMS 双参数冰相方案模拟的水成物含量与实测更接近,凝结加热反馈也促进了上升运动的发展。

## 7 结 论

本文利用 GRAPES 中尺度数值模式中 Ncepcloud3 简单冰相、Ncepcloud5 复杂冰相、CAMS 双参数复杂冰相微物理方案,对 2007 年 7 月 8 日梅雨锋暴雨过程进行高分辨率数值模拟,从降水量、雷达回波、水成物分布方面结合观测资料,分析不同微物理方案对梅雨锋暴雨过程模拟结果的影响,主要结论如下:

(1) 3 个方案对降水模拟结果各有优缺点。CAMS 双参数方案模拟的雨带范围偏大,但包括了实况雨带分布范围,Ncepcloud3 方案和 Ncepcloud5 方案模拟的雨带宽度接近实况,而位置与实况有一定偏差。3 个方案的暴雨中心量值比实况偏大,CAMS 方案模拟的最大值较为接近实况。CAMS 方案对小雨、中雨和大雨的模拟最好,其 TS 评分最高,漏报率低、空报率高,而 Ncepcloud3 和 Ncepcloud5 方案在暴雨以上等级的 TS 评分较高,漏报率和空报率较低,但暴雨中心量值偏强。

(2) CAMS 双参数方案和 Ncepcloud5 单参数方案对流回波形成发展时间和位置的模拟与实况基本吻合。CAMS 方案对流回波范围的模拟更接近实况。两个方案的主要区别在于 30 dBz 以下的弱回波,Ncepcloud5 方案的弱回波范围小,呈向强回波集中的特点,CAMS 方案在强回波的两侧都存在大片弱回波区,范围虽比实况偏大,但反映了对流回波周围存在层状回波的特点。

(3) CloudSat 观测结果揭示了梅雨锋云带中含有丰富的冰相粒子,高层以大量小尺度冰粒子为主,而在 10 km 以下冰粒子尺度增大、含水量增加;CAMS 双参数方案能够模拟出与实测相似的冰粒子含水量和数浓度大值区垂直分布特征,在量值上与实测略有偏差;Ncepcloud3 和 Ncepcloud5 单参数方案也能模拟出冰水含量大值区的分布,但强度偏强较多,并且不包含冰粒子数浓度。

(4) 在对流系统初始阶段,微物理方案的模拟差异主要由动力过程产生,CAMS 双参数冰相方案上升运动略大,使得区域平均的各水成物含量和热力反馈略大,回波范围较 Ncepcloud5 方案与实测接近;在对流系统发展成熟阶段,微物理过程对模拟结果产生重要影响,Ncepcloud5 单参数冰相方案模拟的回波带相对集中,在很小的区域内产生了与实测相比过多的水成物,释放了更多凝结潜热使区域内上升运动发展更强。

综合以上分析,不同的微物理方案对梅雨锋暴雨过程的降水、对流系统形成发展、微物理特征等多个方面都有影响,评价一个方案要从多个角度综合考虑与实测资料进行比较。对本次梅雨锋暴雨过程个例模拟来说,复杂冰相微物理方案要比简单冰相方案模拟效果好,双参数方案的微物理特征比单参数方案模拟结果更为合理。

## 参考文献

- 陈德辉,薛纪善,杨学胜等. 2009. 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
- 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. 中国气象科学研究院院刊, 1(1): 37-52
- 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
- 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(增刊): 60-67
- 楼小凤. 2002. MM5 模式的新显式云物理方案的建立和耦合及原微物理方案的对比分析[D]. 北京: 北京大学地球物理系, 120pp
- 楼小凤,胡志晋,王鹏云等. 2003. 中尺度模式云降水物理方案介绍. 应用气象学报, 14(增刊): 49-59
- 楼小凤,周秀骥,胡志晋等. 2004. MM5 模式显式微物理方案的对比分析. 气象科技, 32(1): 6-12
- 马旭林,庄照荣,薛纪善等. 2009. GRAPES 非静力数值预报模式的三维变分资料同化系统的发展. 气象学报, 67(1): 50-60
- 史月琴,楼小凤. 2006. 显式云物理方案的研究进展. 气象科技, 34(5): 513-520
- 孙晶,楼小凤,胡志晋等. 2008. CAMS 复杂云微物理方案与 GRAPES 模式耦合的数值试验. 应用气象学报, 19(3): 315-325
- 王捷捷,周斌,郭肖容. 2005. 不同对流参数化方案试验中凝结加热的特征及对暴雨中尺度模拟结果的影响. 气象学报, 63(4): 405-417
- 徐国强,黄丽萍,薛纪善等. 2005. 中国冬夏季模式降水方案的应用分析研究. 气象学报, 63(1): 49-63
- 徐国强,陈德辉,薛纪善等. 2008. GRAPES 物理过程的优化试验

- 及程序结构设计. 科学通报, 53(20):2428-2434
- 张大林. 1998. 各种非绝热物理过程在中尺度模式中的作用. 大气科学, 22(4):548-561
- 张曼, 王昂生, 季仲贞等. 2006. 不同降水方案对“03.7”一次暴雨过程模拟的影响. 大气科学, 30(3):441-451
- 赵思雄, 张立生, 孙建华. 2007. 2007年淮河流域致洪暴雨及其中尺度系统特征的分析. 气候与环境研究, 12(6):713-727
- 朱红芳, 王东勇, 管兆勇等. 2007. 不同初始场条件对GRAPES模式数值预报的影响. 气象学报, 65(4):493-502
- Chen Shoujun, Kuo Yinghua, Wang Wei, et al. 1998. A modeling case study of heavy rainstorms along the Meiyu front. *Mon Wea Rev.* 126(9):2330-2351
- Hong S-Y, Juang H H-M, Zhao Q. 1998. Implementation of prognostic cloud scheme for a regional spectral model. *Mon Wea Rev.* 126(10):2621-2639
- Hong S-Y, Lim S K-S, 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
- Hu Zhijin. 2005. CAMS cloud resolving model system. *Chinese Academy of Meteorological Sciences Annual Report*, 18-20
- Kuo Y-H, Anthes R A. 1982. Numerical simulation of a Meiyu system over southeastern Asia. *Pap Meteor Res.* (5):15-35
- Molinari J, Dudek M. 1992. Parameterization of convective precipitation in mesoscale numerical models: A critical review. *Mon Wea Rev.* 120(2):326-344
- Morrison H, Thompson G, Tatarskii V. 2009. Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one- and two-moment schemes. *Mon Wea Rev.* 137(3):991-1007
- Stephens G L, Vane D G, Boain R J, et al. 2002. The cloudsat mission and the A-Train. *Bull Amer Meteor Soc.* 83(12):1771-1790
- Zhu Tong, Zhang Dalin. 2004. Numerical simulation of hurricane Bonnie (1998) Part I: Eyewall evolution and intensity changes. *Mon Wea Rev.* 132(1):225-241
- Zhu Tong, Zhang Dalin. 2006. Numerical simulation of hurricane Bonnie (1998) Part II: Sensitivity to varying cloud microphysical processes. *J Atmos Sci.* 63(1):109-126