

屈右铭, 陆维松, 蔡荣辉, 等. GRAPES-Meso 云分析系统的设计与试验[J]. 气象, 2010, 36(10): 37-45.

# GRAPES-Meso 云分析系统的设计与试验<sup>\* 1</sup>

屈右铭<sup>1,2</sup> 陆维松<sup>1</sup> 蔡荣辉<sup>2</sup> 杨毅<sup>3</sup> 蒋德明<sup>2</sup> 刘黎平<sup>4</sup>

1 南京信息工程大学 大气科学学院, 南京 210044

2 湖南省气象科学研究所, 长沙 410007

3 兰州大学 大气科学学院, 兰州 730000

4 中国气象科学研究院, 北京 100081

**提 要:** 研究应用 LAPS(Local Analysis and Prediction System)云分析方案, 基于美国“风暴分析预报中心”开发的中尺度模式 ARPS(Advanced Regional Prediction System)的资料分析系统 ADAS(ARPS Data Analysis System), 开发了 GRAPES-Meso(Mesoscale of the Global and Regional Assimilation and Prediction System)区域中尺度数值预报模式的云分析系统, 首次实现了地面云观测资料、卫星云图、多普勒雷达反射率资料在 GRAPES 模式中的综合同化应用。详尽分析了地面云观测资料、卫星红外云图、可见光云图、多普勒雷达反射率多种观测资料对 GRAPES 模式初始三维云覆盖、多相混合比等云微物理因子以及初始场的调整。通过对 2009 年 6 月 28 日至 7 月 4 日湖南省一次强降水过程的模拟试验检验云分析系统的性能, 对比分析表明: (1) 云分析系统通过地面云观测资料、卫星红外云图、可见光云图、多普勒雷达反射率的同化, 能够反演出三维云覆盖状况; (2) 在三维云覆盖的基础上结合云底云顶高度, 能够反演出云水、雨水、云冰等微粒, 并显著改善模式初始湿度场; (3) 云分析系统能够显著缩短模式的热启动时间, 明显增大了开始几小时的降水量预报, 对 24 小时的降水预报效果也有显著改善。

**关键词:** 云分析, GRAPES-Meso, 多普勒雷达反射率, 同化, 云量, 云水含量

## Design and Experiment of GRAPES-Meso Cloud Analysis System

QU Youming<sup>1,2</sup> LU Weisong<sup>1</sup> CAI Ronghui<sup>2</sup> YANG Yi<sup>3</sup> JIANG Deming<sup>2</sup> LIU Liping<sup>4</sup>

1 School of Atmospheric Sciences, NUIST, Nanjing 210044

2 Institute of Meteorology in Hunan Province, Changsha 410007

3 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

4 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

**Abstract:** For the purpose of applying the surface cloud observation data, satellite images and Doppler radar reflectivity to the GRAPES-Meso (Mesoscale of the Global and Regional Assimilation and Prediction System) model, the GRAPES cloud analysis system has been developed for the first time which is based on the LAPS (Local Analysis and Prediction System) cloud analysis program and referring to ARPS Data Analysis System (ADAS). The adjustments of the 3D cloud cover and initial field and cloud water and hydrometeors have been analyzed when the surface cloud observation data, satellite images and Doppler radar reflectivity are assimilated in the GRAPES-Meso. A heavy precipitation lasting from June 28 to July 4, 2009 in Hunan is simulated, and the results show: (a) the distribution of 3D cloud cover has been retrieved from the cloud analysis system; (b) the cloud water and hydrometeors have been produced quickly based on the 3D cloud cover and the heights of cloud top and bottom, and also the initial relative humidity field has been adjusted; and (c) the duration of spin-up time has been remarkably decreased, and the fore-

\* 湖南省科技重大专项(2008FJ1006)、公益性行业专项(GYHY200806003)、灾害天气国家重点实验室开放课题(2008LASW-A01)共同资助

2010 年 4 月 15 日收稿; 2010 年 6 月 28 日收修定稿

第一作者: 屈右铭, 从事资料同化研究. Email: 5688056@qq.com

cast precipitation has been significantly increased in the early hours, the performance of 24 h precipitation forecast has been also improved obviously.

**Key words:** cloud analysis, GRAPES-Meso, Doppler radar reflectivity, assimilation, cloud cover, moisture content

## 引 言

对于中小尺度数值预报模式而言,湿物理过程即水成物之间的互相转化,成云致雨过程及其相应的动力、热力效应对降水的预报性能是相当重要的。常规的观测资料难以捕捉到中尺度环流信息,而云水、雨水等又不是直接的观测量,因此,传统的分析系统并不分析湿物理量,模式必须通过一段时间的运转才能生成云水、云冰等物质,这就造成了降水开始时刻的滞后。云参数是雷达资料反演的一个重要方面,云降水过程不仅是中小尺度数值预报的直接对象,而且通过相变潜热、水凝物负荷和水汽密度对大气热力、动力和辐射过程有重要的直接反馈作用<sup>[1-5]</sup>。

近年来卫星、多普勒雷达等非常规资料的应用成为资料同化研究的一个新方向。Lin 等<sup>[6]</sup>首先开发了使用雷达资料对云分辨率模式进行初始化的程序,发现 15 min 内的短时预报与观测很一致。Xue 等<sup>[7]</sup>由反射率因子导出初始的云水含量来加湿初始状态,发现同化雷达反射率因子对飑线的模拟有较大的正影响。国内学者徐慧、葛文忠等<sup>[8]</sup>将雷达、卫星资料加入 MM4 中尺度数值模式,对淮河流域暴雨实时数值预报进行了试验。徐玉貌等<sup>[9]</sup>将 713 测雨雷达和 GMS 卫星云图资料引入 MM4 中尺度模式,改变初始湿度场,并对两个不同类型的江淮暴雨过程进行了数值模拟敏感试验。徐枝芳等<sup>[10]</sup>将雷达、卫星资料通过改变水汽场加入 MM5 中尺度模式中,对湖北东部地区的特大暴雨进行了数值模拟,得到了比较理想的结果。齐琳琳、朱国富等学者利用 GRAPES 3DVar 同化系统实现了对卫星资料直接同化<sup>[11-12]</sup>,但基于 GRAPES 模式的雷达反射率同化和云分析尚未见到相关报道。

为提升 GRAPES 模式云微物理分析功能,本文参照中尺度模式 ARPS 提供的资料分析系统 ADAS 中的综合云分析过程,开发了基于 GRAPES 区域中尺度模式的云分析系统,成功地把地面报文云观测资料、卫星云图资料和多普勒雷达反射率因

子加入到数值模式中。通过 2009 年 6 月底华中区域一次强降水过程的模拟对比试验,对综合云分析过程进行了验证。模拟结果的对比分析表明:加入多种观测资料的综合云分析过程能够有效地调整三维云覆盖,进而反演出云水、云冰、雨水、雪、霰等云微物理量,并改善初始水汽条件,提高初始场质量,提升 GRAPES 模式降水预报的准确率。

## 1 GRAPES 模式云分析系统设计

### 1.1 模式简介

GRAPES(Global and Regional Assimilation and Prediction System)是中国气象科学研究院数值预报研究中心自主开发的新一代静力/非静力多尺度通用数值预报模式<sup>[13]</sup>,以多尺度通用动力模式为核心的、以统一软件编程标准为平台的新一代数值预报模式系统。GRAPES 模式是集常规与非常规变分同化、静力平衡与非静力平衡、全球与区域模式、科研与业务应用、串行与并行计算、标准化与模块化程序、理想试验与实际预报等为一体,中小尺度与大尺度通用的先进数值预报系统。GRAPES 模式采用半隐式、半拉格朗日时空分离技术,水平方向采用 Arakawa-C 网格格点,垂直方向采用 Charney-Phillips 非均匀跳层设计。该模式软件具有模块化、标准化、并行化的特点,具有高可移植性和高度兼容性<sup>[14-15]</sup>。

### 1.2 云分析方案简介

GRAPES 云分析系统,它的主要框架借鉴了 ADAS 模块中的复杂云分析系统。ADAS 云分析系统实际上是一个独立的简单云模式,该模块是从美国的 LAPS(Local Analysis and Prediction System)模式移植过来,并经改进和优化。LAPS 分析系统包括若干个融合部分,分别针对雷达、多种探测手段探测的地面资料、廓线仪、飞机报、探空及辐射仪、卫星、GPS 及其他类型的资料来源<sup>[16]</sup>。ADAS 云分析系统只分析了多普勒天气雷达资料、卫星资料和地面云观测资料,在背景场的基础上利用三种观

测资料进行三维云分析, 构建一个具有高分辨率的三维初始云场和降水场, 再通过基于湿绝热或非绝热初始化的方法对温、湿量和风分量等进行调整, 使得雷达观测信息在初始场形成中得到应用, 从而改进初始场。本文所设计的云分析主要分析产品包括三维的云量场、云水及云冰混合比、云及降水类型、结冰严重指数、雹混合比、云底及云顶高度等。限于篇幅, 详细的云分析方案就不再叙述, 详见参考文献 [17]。

### 1.3 观测资料预处理

本文所用地面云观测数据为站点数据, 由于国内云分层观测只有低云云量与最低云层云底高度, 所以把它当作第 1 层的云量和云底高度, 直接进入云分析系统; 在 ADAS 中原始读取的是卫星云图红外和可见光通道数据, 然后转化为云顶亮温和总云量, 而本文为消除反演过程的误差, 直接采用的是国家卫星中心提供的 FY-2D 产品数据, 卫星 TBB(黑体辐射亮温) 和 CTA(总云量) 数据均为二位平面数据, 只要插值到模式网格点水平网格点上即可; 雷达资料为华南区域的多普勒雷达反射率三维组网数据, 将反射率编码转化为反射率因子后插值到模式三维网格点的整层上。

首先依据模式网格范围和分辨率, 实现观测资料的水平插值, 得到逐个网格点的经纬度坐标, 然后在观测资料中查找离该经纬度最接近的点作为该网格点的观测值。由于无论是卫星云图还是雷达反射率数据的分辨率精度均较高, 大于模式的分辨率, 所以总可以取到合适的值。

对于雷达反射率资料还需进行垂直插值, 本文采用了最简单的距离权重插值法, 计算公式如下:

$$\text{Ref}(n) = \{ \text{Dbz}(k)[z(k+1) - z(n)] + \text{Dbz}(k+1)[z(n) - z(k)] \} / [z(k+1) - z(k)] \quad (1)$$

式中:  $z(n)$  为网格点实际物理高度(图 1 中模式层  $n$  上的 A 点),  $\text{Ref}(n)$  为最后得到的该点的反射率因子值;  $z(k)$  为该垂直方向上小于并最接近  $z(n)$  的点的高度(选取图 1 中雷达反射率  $k$  层上的 B 点),  $\text{Dbz}(k)$  为该点的反射率值;  $z(k+1)$  为该垂直方向上大于并最接近  $z(n)$  的点的高度(选取图 1 中雷达反射率  $k+1$  层上的 C 点),  $\text{Dbz}(k+1)$  为该点的反射率值。

对于外插的情况, 分别在雷达反射率层最顶层

上方 500 m 和最底层下方 500 m 虚拟一个 0 值的反射率层, 若模式格点垂直高度大于虚拟的顶层或小于虚拟的底层, 则该格点反射率不做调整, 反之则按照内插的方法计算。

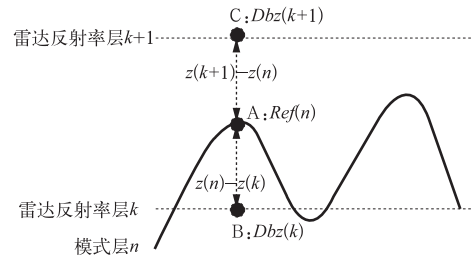


图 1 雷达反射率垂直插值示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of Doppler radar reflectivity vertical interpolation

### 1.4 云分析步骤

云分析过程由以下步骤组成<sup>[18]</sup>:

(1) 三维云覆盖量背景场的形成。通过一个经验指数函数, 把初始场中的相对湿度转变为相应网格点上的云覆盖量:

$$CF = \left| \frac{RH - RH_0}{1.0 - RH_0} \right|^b \quad (2)$$

其中  $CF$  是三维云覆盖量, 其值从 0 到 1.0;  $RH$  是初始场的相对湿度;  $RH_0$  是一个随高度变化的相对湿度域值;  $b$  是一个经验常数, 这里取为 2。

(2) 加入地面观测资料中的云底高度和云覆盖量。对于观测到有云的地方, 假设云的厚度 ( $CH$ ) 是云的覆盖量 ( $CF$ ) 和地面距云底高度 ( $H$ ) 的函数, 其计算公式为:

$$\text{当 } CF \geq 0.5 \text{ 时,} \quad CH = \begin{cases} 1500, & (H \geq 7000) \\ 1000 + (H - 1000) \div 12, & (1000 < H < 7000) \\ H, & (H \leq 1000) \end{cases} \quad (3)$$

当  $0 < CF \leq 0.5$  时,

$$CH = \min(1000, CH) \quad (4)$$

其中式(4)中等号右边的  $CH$  由式(3)计算得到。

(3) 加入红外卫星云图资料。由前两步得到的三维云覆盖量, 加上初始温度场, 可以推算出一个云顶亮温, 计算方法如下:

$$E = E_{\text{cld}} \times CF + E_{\text{grd}} \times (1 - CF) \quad (5)$$

其中  $E_{\text{cld}}$  和  $E_{\text{grd}}$  是由普朗克定律计算出来的红外 1 通道的分光辐出度。  $E_{\text{cld}}$  由云顶高度处的温度(这里取为相应网格点的初始温度)决定;  $E_{\text{grd}}$  由相应网格

点的地表温度决定。由式(5)计算出  $E$ , 把  $E$  代入普朗克定律, 即可推算出云顶亮温。

把推算出的云顶亮温与卫星观测到的亮温资料进行比较, 修正云的分析。当卫星观测到的亮温比推算亮温高的时候, 就减小云的覆盖量或云的厚度, 直到二者一致。当卫星观测到的亮温比推算亮温低的时候, 就增加云的覆盖量或云的厚度, 或者加入一层新的云, 直到二者一致, 详见参考文献[19]。

(4) 由三维云覆盖量得到改进的水汽含量。由前三步得到了三维云覆盖量, 对于云覆盖量在给定范围内( $CF_1 < CF < CF_2$ )的网格点, 通过线性关系, 将云覆盖量转化为相对湿度:

$$RH = \frac{CF - CF_1}{CF_2 - CF_1}(RH_2 - RH_1) + RH_1, \quad (6)$$

$$(CF_1 < CF < CF_2)$$

其中,  $RH$  为最终得到的相对湿度;  $CF$  为通过以上前三步分析得到的三维云覆盖量;  $CF_1$  和  $CF_2$  分别为云覆盖量域值, 本文中取  $CF_1$  为 0.2,  $CF_2$  为 0.65;  $RH_1$  和  $RH_2$  分别为相对湿度域值, 取  $RH_1$  为 0.5,  $RH_2$  为 0.95。如果  $CF$  小于  $CF_1$ , 则不进行水汽调整; 如果  $CF$  大于  $CF_2$ , 则取  $RH$  为  $RH_2$ 。

(5) 处理雷达资料时, 首先将反射率因子插值到模式网格坐标上, 在雷达扫描范围内将网格点上的反射率因子值与阈值相比较, 如果反射率因子低于阈值, 则视为晴空, 高于阈值, 则对该点调整, 再通过客观分析将这种局地调整进行空间上的传播, 对三维空间上湿度、云水、雨水、冰以及雪、霰等湿度量进行调整<sup>[20]</sup>。

### 1.5 云分析系统流程设计

由于 GRAPES 模式网格和坐标系分别采用 Arakawa C 跳点网格和 Charney-Phillips 跳层设计及高度地形追随坐标, 而 ARPS 中采用的是高度地形追随坐标<sup>[21]</sup>, 另外, GRAPES 同化分析采用的是全变量的方法, 这与 ADAS 中扰动量分析的方式也不同, 而且分析中的控制变量也不同, 所以必须先进行格点与变量的转换, 如:

$$t(i, j, k) = 0.5PT(i, j, k)[PI(i, j, k) + PI(i, j, k-1)] \quad (7)$$

式中:  $t$  为整层温度,  $PT$  为整层位温,  $PI$  为半层表示气压相关的 Exner 变量。

云分析系统是在由 GRAPES-3DVAR 生产的分析场基础上, 通过复杂的综合云分析, 调整预报场

湿度场和水凝物含量, 具体流程(图 2)如下:

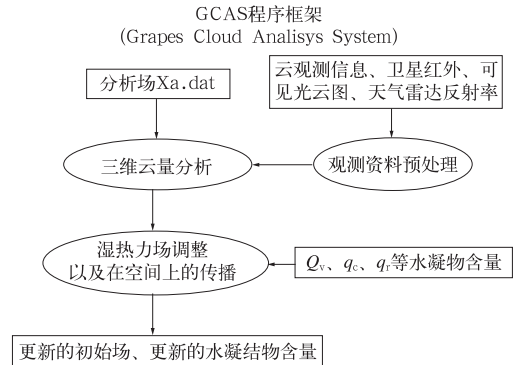


图 2 GRAPES 模式云分析系统框架

Fig. 2 GRAPES cloud analysis system framework

## 2 GRAPES 模式云分析系统数值模拟试验

### 2.1 模拟个例概况

2009 年 6 月 28 日至 7 月 4 日, 受梅雨锋雨带南移影响, 长江中下游地区出现了 1 次自北向南的暴雨天气过程。过程前期(6 月 28—30 日)副热带高压较强( $110^{\circ}\text{E}$ ), 东北低槽下摆并携带冷空气南下, 使我国中东部地区的经向环流逐渐加强并南移, 对流层低层西南急流建立, 夏季风前沿推进到长江中下游流域, 湖南省北部地区出现持续性暴雨过程, 并在湘中地区发展; 7 月 1—3 日随着东北横槽转竖, 副热带高压减弱移出大陆, 高原东部低涡沿中低层切变线东移南压, 湘中及以南地区出现暴雨, 降水逐渐减弱并消散。本次过程长江中下游区域范围都有降雨发生, 持续 6 天, 在湖南省累积降雨达到 100 mm 的笼罩面积达 11 万  $\text{km}^2$ , 占湖南省面积的一半以上。

从 29 日 12 时(世界时, 本文时间均为世界时)的 FY-2D 卫星的黑体辐射亮温场(TBB)(图 3a, 范围  $21.5^{\circ}\text{N}\sim 33.5^{\circ}\text{N}$ ,  $105.5^{\circ}\text{E}\sim 117.5^{\circ}\text{E}$ )以及可见光反演的总云量(CTA)图(图 3b)看, 云图中回波带为西南—东北向, 在研究区域存在一个倾斜的多云量带, 伴随着低的 TBB 值。从 4 km 高度层的华南区域多普勒雷达反射率三维拼图看, 在湖北全省的大部分地区以及湖南省西部有较强的雷达回波(图 4), 从  $30^{\circ}\text{N}$  垂直雷达反射率经向-高度剖面图(经度范围  $108^{\circ}\sim 112^{\circ}\text{E}$ )可以看出, 在  $110^{\circ}\sim$



111.5°E 以及 108.5°E 附近的 4~10 km 高度区有较大的雷达反射率, 存在较强的垂直运动(图 5)。从 24 小时降水实况看, 暴雨主要落区在鄂西南、江汉

平原、鄂东北、鄂东南北部以及湖南省北部地区(图 6), 最强的降水中心位于鄂西南与湘西北, 24 小时降水达到了大暴雨量级。

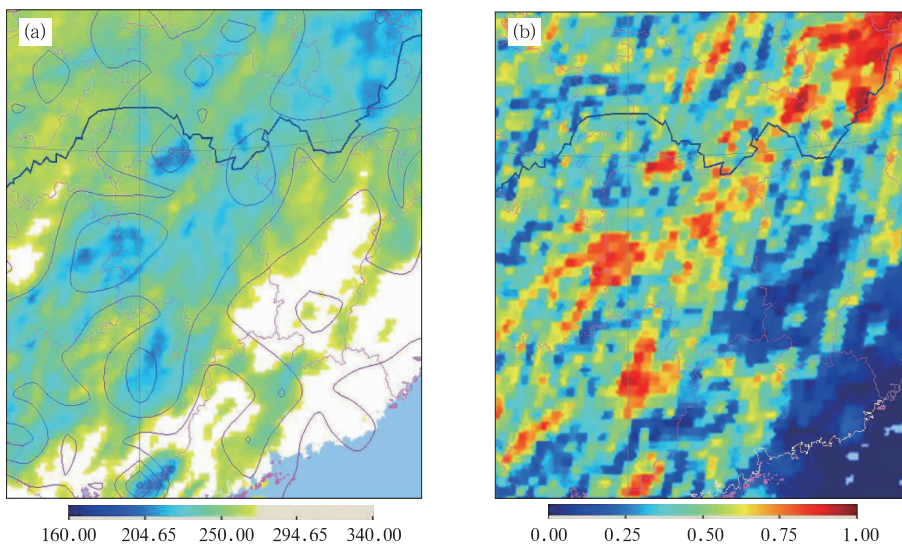


图 3 2009 年 29 日 12 时 15 分卫星云图: (a) 黑体辐射亮温(单位:K); (b) 总云量  
Fig. 3 Satellite images at 12:15 UTC 29 June, 2009: (a) TBB (units:K); and (b) CTA

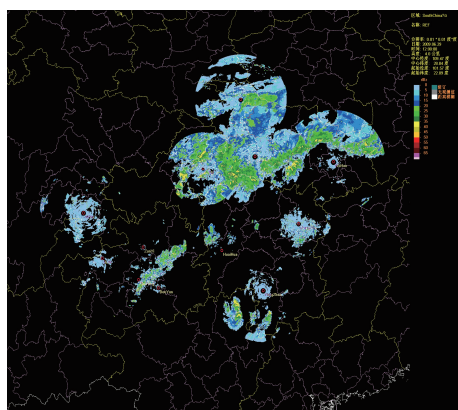


图 4 2009 年 29 日 12 时 00 分 4 km 高度层的雷达反射率(单位: dBz)  
Fig. 4 Doppler radar reflectivity on 4 km height at 12:00 UTC 29 June 2009 (units: dBz)

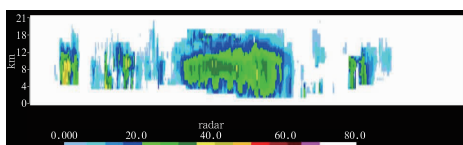


图 5 2009 年 29 日 12 时 00 分沿 30°N 雷达反射率经度-高度剖面(单位: dBz)  
Fig. 5 The longitude-height cross section of radar reflectivity along 30°N at 12:00 UTC 29 June 2009 (units: dBz)

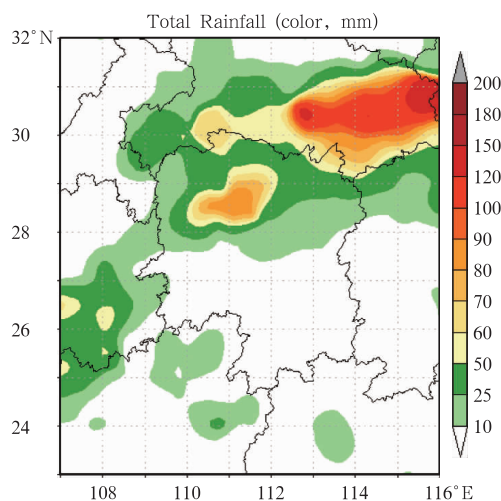


图 6 2009 年 29 日 12 时至 30 日 12 时 24 小时降水实况(单位: mm)  
Fig. 6 Observed 24 h precipitation from 12:00 UTC 29 June to 12:00 UTC 30 June 2009 (units: mm)

## 2.2 试验设计

试验模式为 GRAPES 区域模式最新业务版本, 微物理过程采用 NCEP-3class 方案, 只考虑水汽( $q_v$ )、云水/云冰( $q_c$ 、 $q_i$ , 两者归为同一类, 依据温度  $T$  来区分)、雨/雪( $q_r$ 、 $q_s$ , 依据温度  $T$  来区分)三种水物质。模式取湖南区域及其邻近地区为计算区域, 整个计算范围为: 21.5°~33.5°N、105.5°~117.5°E, 模式水平

分辨率为  $0.15^\circ$ , 总的格点数为  $80 \times 80$ 。垂直方向为  $\sigma$  坐标, 取不等距的 31 层。模式的背景场使用国家气象中心 T 213 资料, 其格距为  $0.5625^\circ$ , 积分的时间间隔为 3 h, 垂直方向共 17 层, 初始场同化了高空报、地面报、飞机报与船舶报观测资料。

共设计了两个试验方案。方案一为控制试验, 不进行综合云分析; 方案二为敏感性试验, 模式从 29 日 9 时启动, 积分 3 小时后输出  $q_v$ 、 $q_c$ 、 $q_r$ , 加入了 2009 年 6 月 29 日 12 时的地面云观测信息、华南区域多普勒天气雷达反射率三维组网数据、FY-2D 静止卫星云图反演的 TBB 和 CTA 数据, 进行综合云分析, 更新初始场与  $q_v$ 、 $q_c$ 、 $q_r$  后继续运行至 30 日 12 时。

### 2.3 模式试验结果分析

三维云覆盖量的调整见图 7, 图 7a 为中低层(高度约 4 km)云量增量、图 7b 为中高层(高度约 11.5 km)云量增量, 图 7c 为东西向垂直云量增量。

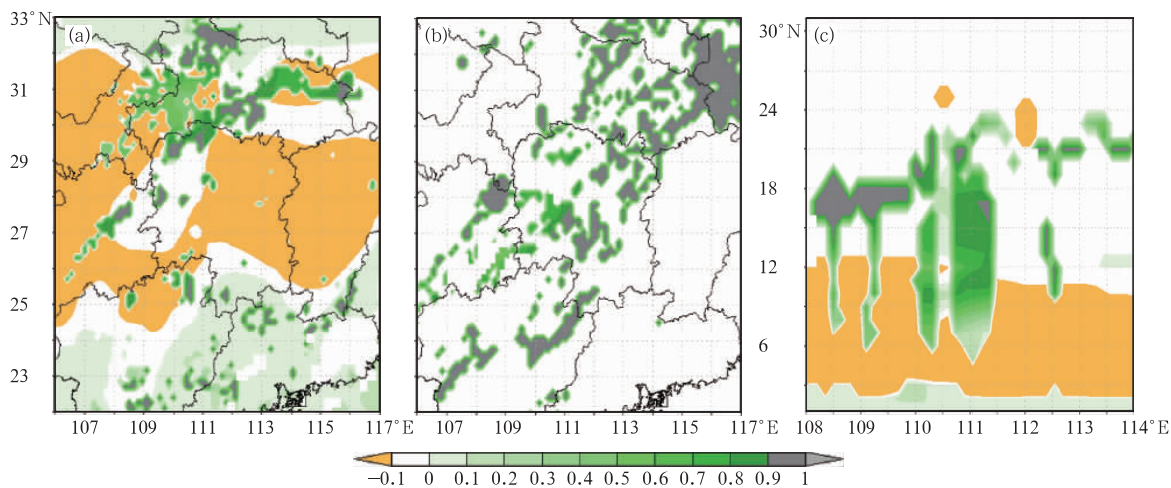


图 7 云分析后三维云量增量分布(单位: %)

(a) 中低层(高度约 4 km)云量增量; (b) 中高层(高度约 11.5 km)云量增量; (c) 沿  $30^\circ\text{N}$  经度-高度云量增量剖面

Fig. 7 The increment of 3D cloud cover with cloud analysis (units: %)

(a) the increment of 3D cloud cover at mid/low levels (about 4 km height); (b) the increment of 3D cloud cover at mid/high levels (about 11.5 km height); and (c) the longitude-height cross section of the increment of 3D cloud cover along  $30^\circ\text{N}$

由于从 GRAPES 模式中输出的只包含了水汽( $q_v$ )、云水( $q_c$ )、雨水( $q_r$ )三类微粒含量, 而本云分析还能根据雷达反射率等资料的分布情况获取模式的云量场及云底云顶高度, 分析出云冰( $q_i$ )和雪水( $q_s$ ), 所以在最终调整时将  $q_c$  和  $q_i$  进行了合并, 将  $q_r$  和  $q_s$  进行了合并, 得到最终的增量场。

将图 8、9 与图 3、4 进行对比可以看出, 在中低

同化地面观测的云信息后, 底层的云量显著减少, 高层则变化不大。主要是由于使用的地面云观测信息只是使用了低云或中云量, 在数值上很小。所以调整后的中低层云量显著减小(图略)。同化卫星云图红外资料反演的黑体辐射亮温后, 主要调整增加了模式中高层的云量, 调整结果与 TBB 分布一致(图略)。同化多普勒雷达反射率数据后, 主要调整增加了模式中低层的云量, 只是由于雷达反射率资料探测主要在 10 km 以下的中低层, 并对云量的三维调整效果显著。同化卫星云图可见光反演的总云量数据后, 空间三维云覆盖量有所减小。分析同化 aob、ir、radar 和 vis 后的三维云覆盖增量场, 中低层部分区域的云量增量  $< -0.3$ , 但在多普勒雷达回波较强的区域云量增量为正。高层的云量增量基本都大于 0。从剖面图看也是有较强回波的区域云量增量较大。

层和中高层高度上雨水、云水和相对湿度增量值的空间分布分别与雷达反射率因子和卫星云图以及云量分布是一致的, 并且随着观测值的增大, 各物理量的值迅速增大。图 9 为水汽含量增量, 分析云分析系统对初始场相对湿度的调整, 基本所有格点增量都大于或等于 0, 回波区水汽基本都达到了饱和, 受云量调整的影响, 中高层相对湿度增量较大(图 9)。

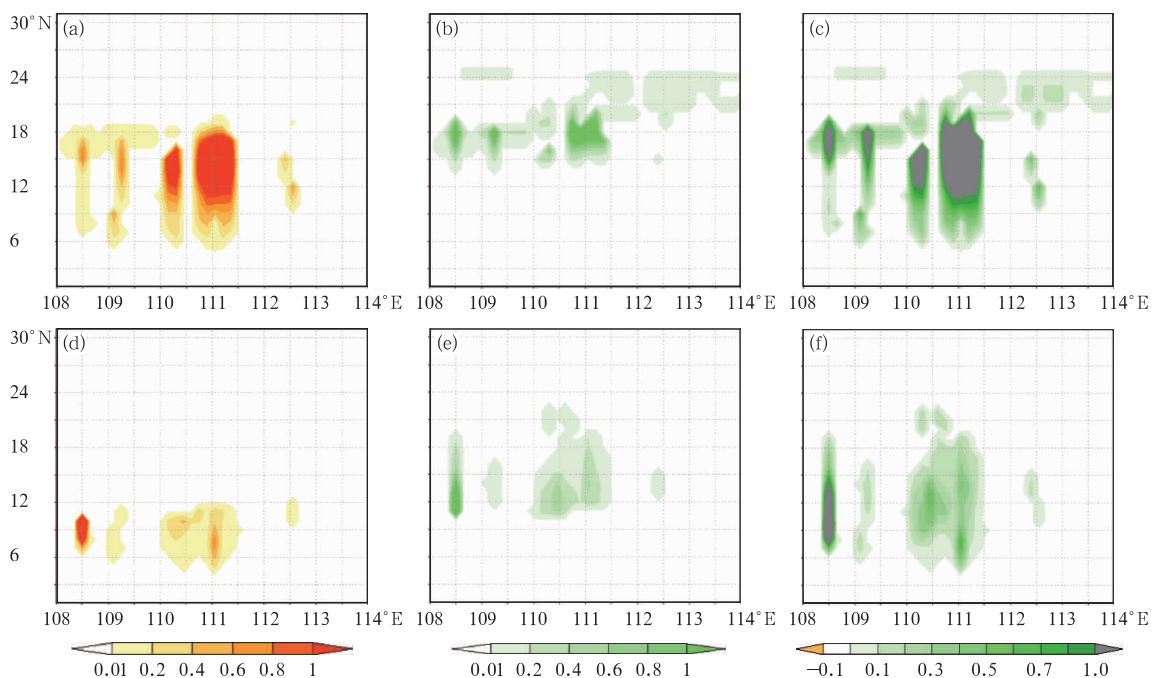


图 8 水凝物微粒含量沿 30°N 经度-高度剖面(单位:  $g \cdot kg^{-1}$ )  
 (a) 云分析后的云水  $q_c$  含量; (b) 云分析后的云冰  $q_i$  含量; (c) 云分析后云水与云冰合并的增量;  
 (d) 云分析后的雨水  $q_r$  含量; (e) 云分析后的雪水  $q_s$  含量; (f) 云分析后雨水与雪水合并的增量

Fig. 8 The longitude-height cross sections of the moisture content with the cloud analysis along 30°N (units:  $g \cdot kg^{-1}$ )

(a)  $q_c$ , (b)  $q_i$ , (c) the increment of  $q_c + q_i$ , (d)  $q_r$ , (e)  $q_s$ , and (f) the increment of  $q_r + q_s$ .

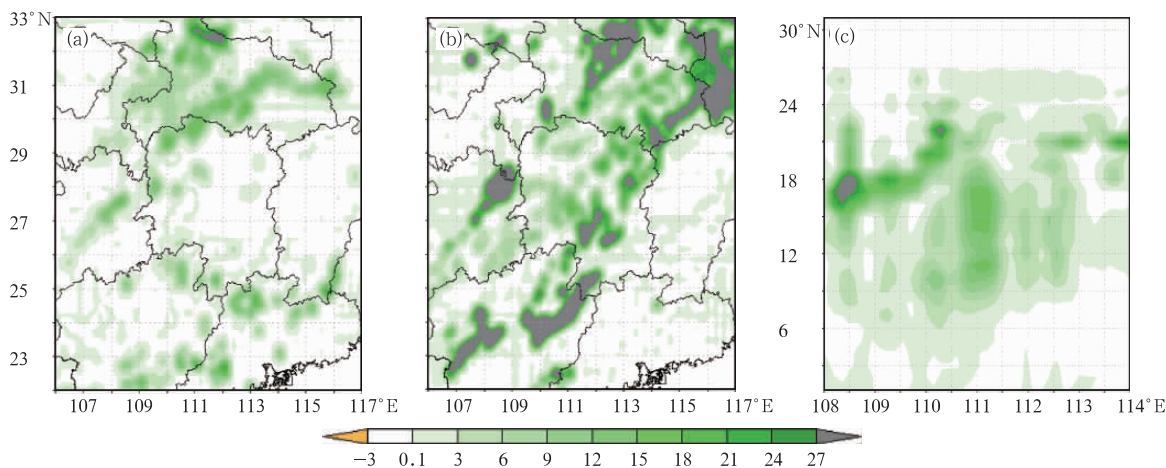


图 9 云分析后湿度场增量(单位: %)

(a) 中低层(高度约 4 km)相对湿度  $RH$  增量; (a) 中高层(高度约 11.5 km)相对湿度  $RH$  增量; (c) 沿 30°N 经度-高度相对湿度  $RH$  增量剖面

Fig. 9 The increment of relative humidity with cloud analysis (units: %)

(a) the increment of  $RH$  at mid/low levels (about 4 km height), (b) the increment of  $RH$  at mid/high levels (about 11.5 km height), and (c) the longitude-height cross section of the increment of  $RH$  along 30°N

从垂直剖面图(图 8)上可以更加清楚地看清各物理量在不同高度上的大小分布情况。回波强度大值区在 4~11 km 之间,得到的雨水、云水与雷达反射率因子在垂直方向上的结构也是十分一致的。强度 25 dBz 左右的回波对应的雨水含量约  $0.2 g \cdot$

$kg^{-1}$ ; 强度 45 dBz 左右的回波对应的雨水含量超过了  $1.0 g \cdot kg^{-1}$ 。云水与雨水含量同量级,垂直分布高度略高于雨水。各物理量这种量级和分布十分符合梅雨锋暴雨结构<sup>[4]</sup>。在梅雨锋中,对流云的强雷达回波在  $0^\circ C$  高度(图 8 中雨水与冰水分界的



0 °C 层高度约为 4 km) 以下, 说明了云中大水滴都集中在 0 °C 高度以下的暖区, 地面强降水主要是由暖雨碰并过程形成的<sup>[22]</sup>。由于本文并未对初始速度场做出调整, 所以垂直速度与雨滴末速度未做分析。

图 10、图 11 为控制试验和敏感性试验 6 小时和 24 小时模拟降水分布图。分析 6 小时降水预报

图, 云分析系统增大了初始场的相对湿度与云水、雨水等微粒的含量, 能显著减小模式的积分调整时间, 缩短 spin-up 时间, 在较短时间内形成降水。分析 24 小时降水预报图(图 11), 增大了湖南西北部以及鄂中以东区域的降水强度(图 11b 椭圆形区域), 总体降水预报效果有较大改善, 预报的形势场改善相对不是特别显著(图略)。

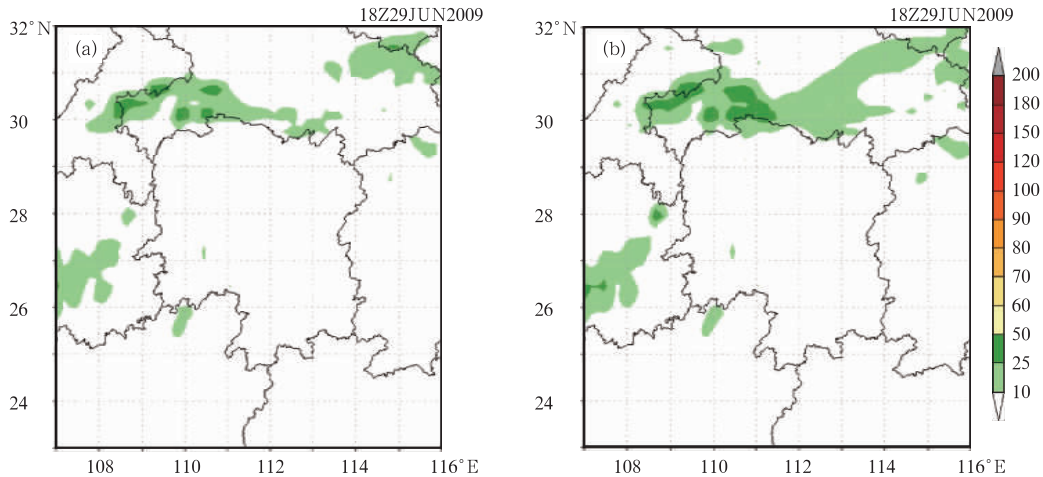


图 10 2009 年 6 月 29 日 12 时至 18 时 6 小时模拟降水量预报(单位: mm)  
(a) 控制试验; (b) 敏感性试验

Fig. 10 Simulated 6 h precipitation from 12:00 UTC to 18:00 UTC 29 June 2009 (units: mm)  
(a) without cloud analysis, and (b) with cloud analysis

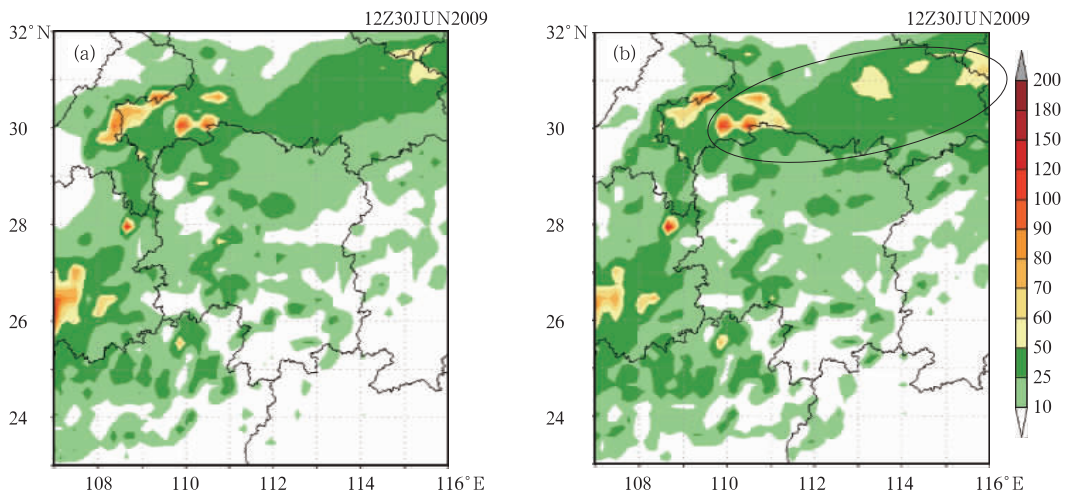


图 11 2009 年 6 月 29 日 12 时至 30 日 12 时 24 小时模拟降水量预报  
(a) 控制试验; (b) 敏感性试验

Fig. 11 Simulated 24 h precipitation from 12:00 UTC 29 to 12:00 UTC 30 June 2009 (units: mm)  
(a) without cloud analysis, and (b) with cloud analysis

### 3 结论与讨论

本系统实现了地面观测云信息、卫星红外和可见光资料以及多普雷达反射率数据在 GRAPES 区域中尺度模式云分析系统的同化应用, 复杂的云分

析中对模式初始场和观测资料进行了多次反复插值, 必将增大模式的初始场误差。这必将会降低 GRAPES 的云分析系统(GCAS)对于模式预报性能的改善, 但其对三维云覆盖的分析效果相当优异。

云分析中使用的地面云观测数据要求提供由低到高共 5 层的云量、云底高度信息, 但由于目前国内



云观测只有总云量、低云或中云云量、最低云层云底高度,低云状、中云状和高云状,且观测完全依靠人工识别,所以在预处理时只能将低云或中云云量与最低云层云底高度当作第 1 层的云量和云底高度,其他 4 层赋值为 0。由此带来的影响是导致中低层云量的显著减小,但对初始湿度场的调整影响不大,同化此类资料是否恰当还将进一步验证。

模拟结果表明 GRAPES 模式在本次降水过程的模拟中能成功地模拟出降水的落区和强度,经过云分析系统的预报结果有所改善,但对局地强降水的模拟能力较差,降水大小的模拟存在偏差,没能模拟出局地大暴雨,模拟的降水有时较实况降水偏小,这可能与模拟个例的分辨率较低有关。

下一步将通过大量的模拟实验,对不同类型的天气过程开展 GRAPES 云分析模块 GCAS 的预报效果检验,并将最终实现在国家气象中心 GRAPES-RUC 业务系统的业务应用。

## 参考文献

- [1] 刘奇俊,胡志晋. 中尺度模式湿物理过程和物理初始化方法[J]. 气象科技, 2001,29(2):1-10.
- [2] 陈德辉,杨学胜,张红亮,等. 多尺度非静力通用模式框架的设计策略[J]. 应用气象学报, 2003,14(4): 452-461.
- [3] 楼小凤,胡志晋,王鹏云,等. 中尺度模式云降水物理方案介绍[J]. 应用气象学报, 2003,14(增刊):19-59.
- [4] 刘红亚,徐海明,胡志晋,等. 雷达反射率因子在中尺度云分辨模式初始化中的应用 I:云微物理量和垂直速度的反演[J]. 气象学报, 2007,65(6):896-905.
- [5] 刘香娥,王广河. FY-ZC 静止气象卫星红外通道辐射特性研究[J]. 气象, 2010,36(2):39-47.
- [6] Lin Y P, Ray P S, Johnson K W. Initialization of a modeled convective storm using Doppler radar derived fields[J]. Mon Wea Rev, 1993, 121: 2757-2775.
- [7] Xue M, Wang D, Hou D, et al. Prediction of the 7 May 1995 squall line over the central U. S. with intermittent data assimilation[C]. 12 th Conf on Numerical Weather Prediction, Phoenix, AZ, Amer Meteor Soc, 1998: 191-194.
- [8] 徐慧,葛文忠. 雷达和卫星资料在淮河流域暴雨实时数值预报试验中的应用[J]. 气象科学, 2000,20(4):433-439.
- [9] 徐玉貌,夏文梅. 雷达和卫星资料对江淮暴雨数值模拟的影响[J]. 南京气象学院学报, 2001,24(4):545-552.
- [10] 徐枝芳,徐玉貌,葛文忠. 雷达和卫星资料在中尺度模式中的初步应用[J]. 气象科学, 2002,22(2):167-174.
- [11] 李娟,朱国富. 直接同化卫星辐射率资料在暴雨预报中的应用研究[J]. 气象, 2008,34(12):36-43.
- [12] 郭锐,李泽椿,张国平. ATOVS 资料在淮河暴雨预报中的同化应用研究[J]. 气象, 2010,36(2):1-12.
- [13] 伍湘君,金之雁,黄丽萍,等. GRAPES 模式软件框架与实现[J]. 应用气象学报, 2005,16(4):539-546.
- [14] 徐国强,陈德辉,薛纪善,等. GRAPES 物理过程的优化试验及程序结构设计[J]. 科学通报, 2008,53(20):2428-2434.
- [15] 孙晶,楼小凤,胡志晋,等. CAMS 复杂云微物理方案与 GRAPES 模式耦合的数值试验[J]. 应用气象学报, 2008, 9(3):315-325.
- [16] 李红莉,张兵,陈波. 局地分析和预报系统(LAPS)及其应用[J]. 气象科技, 2008,36(1):20-24.
- [17] 王瑾,刘黎平. CINRAD/CD 雷达反射率因子同化对中尺度数值模式云微物理量场调整的分析[J]. 高原气象, 2009,28(1):173-185.
- [18] Zhang J, Carr F, Brewster K. ADAS cloud analysis preprints [C]//12thConf on Num Wea Prediction, Boston,1998: 185-188.
- [19] 鄢俊一,王洪庆,张焱,等. 卫星资料在中尺度模式 ARPS 中的应用[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2006,42(6):791-795.
- [20] <http://www.caps.ou.edu/ARPS/ARPS5DOC/ADAS500.Pdf>[OL].
- [21] XueMing, Droegemeier Kelvin K. ARPS user's guide (Version410)[M]. Center for Analysis and Prediction of Storms, 1995.
- [22] 于翡,姚展予. 一次积层混合云降水实例的数值模拟分析[J]. 气象, 2009,35(12):3-11.