

应用卫星资料改进云计算过程的初步试验研究

徐国强¹ 赵晨阳²

1 国家气象中心/数值预报中心, 北京 100081

2 民航气象中心, 北京 100021

摘要: 利用 GRAPES_Meso (Global/Regional Assimilation and Prediction System) 模式对 2018 年两次降雨天气过程进行了数值模拟, 对比分析了模式计算和卫星观测的相关云变量。结果指出, 在 GRAPES_Meso 模式现用的云量计算方案中存在模拟的高云云量偏多、中低云密闭云区云量偏少, 模式模拟的云顶温度明显偏低、云顶高度明显偏高的问题。针对模式云计算存在的问题, 对云计算的原理和公式进行了解读, 对计算公式进行了优化改进。采用改进的云计算方案后, 高云云量偏多问题得到了明显改进; 模式模拟的云顶温度明显偏低和云顶高度明显偏高问题也得到了极大缓解或优化改进。以卫星观测资料为基础对云量计算方案的优化进行的初步探索和试验, 为研究和优化云计算方案提供了一种新的手段和方法。

关键词: 卫星资料, GRAPES_Meso 模式, 云计算, 数值模拟

Preliminary test and study on the application of satellite data to improve cloud computing process

XU Guoqiang¹, ZHAO Chenyang²

1 Numerical Weather Prediction Center, National Meteorological Center, Beijing 100081

2 Aviation Meteorological Center, Beijing 100021

Abstract The GRAPES_Meso model was used to simulate two rainfall processes in 2018. The relevant cloud variables of model calculation and satellite observation were compared and analyzed. The results show that in the current cloud computing scheme of GRAPES_Meso model, there are excessive high cloud cover in some places and deficit cloud cover in the medium and low level dense closed cloud region. The cloud top temperature simulated by GRAPES_Meso model is obviously lower and the cloud top height is obviously higher. To address these issues, the principles and formulas of the cloud computing scheme are interpreted, and the calculation formula is optimized. After adopting the improved cloud computing scheme, the excessive high cloud cover has been greatly alleviated. Low cloud top temperature and high cloud top height has been greatly optimized. Based on satellite observation data, the preliminary exploration and test on the optimization of cloud computing scheme provides a new means and method for researching and optimizing cloud computing scheme.

Key words Satellite data, GRAPES_Meso model, Cloud computing, Numerical simulation

国家重点研发计划 (2018YFC1506902, 2018YFC1506603), 国家自然科学基金项目 (41590874) 共同资助
第一作者: 徐国强, 主要从事数值预报模式的研发和应用, Email: xugq@cma.gov.cn

前言

地球表面的 60%~70% 被云覆盖；云、降水物理过程是大气水循环的核心组成部分，是地球大气的热量、水分和动量平衡的关键因素，它不仅影响局地 and 短期天气过程，也影响着大气环流和全球气候变化。此外，云与大气辐射的相互作用还会影响大气辐射平衡、大气污染传输等。

数值模式中云计算方案的优劣很大程度上决定着模式的性能，因此云计算方案的研究越来越得到重视。关于云量计算方面的已有工作，主要有诊断方案、预报方案、统计方案和统计动力预报方案等。云量诊断方案的代表是 Slingo (1987) 的工作；云量预报方案中的代表是 Tiedtke (1993) 的工作，通过对云形成与消散的影响因子研究，推导出了云量预报方案；云量统计方案的代表性工作为 Sommeria and Deardorff (1977)；而统计动力预报方案的代表性工作为 Tompkins (2002)。很多学者对大气模式中的云量问题进行了多方面的探索。Teixeira (2001) 研究低云量与相对湿度的关系，从一个稳定的云量预报方程出发，得到了一个关于亚热带边界层的云量诊断方程。Gu et al (2003) 从云的光学性质出发，改进了 UCLA (The University of California, Los Angeles) AGCM (The Atmospheric General Circulation Model) 模式中云辐射方案，对全球总云量的计算提高了 5% 的准确性。戴福山等 (2004) 提出了一个基于统计的低云参数化方案，用于 CCM3 (Community Climate Model) 模式后显著增强了对大洋东部冷海域低云云量的模拟。郑晓辉等 (2011; 2016) 在 GRAPES-Meso 模式中引进了欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 的云量诊断方案并进行了部分优化，提高了模式的预报准确率。随着云计算研究的不断深入，云顶高度、云顶气压、云顶温度、云量、云光学厚度等云参数的计算过程越来越重要。云量对辐射过程具有极其重要的影响，而云顶高度是区分云类型的重要标准之一 (岑路和傅云广, 2017)。降水概率与云参数相关性较高，随着云顶温度降低、云光学厚度及云顶粒子平均尺度增加而增加 (桂海林等, 2019)。对流初生阶段，云顶高度在短时间内快速升高，云顶温度快速降低 (周鑫等, 2019)。研究表明，云参数的变化可以体现天气运动的变化，对未来天气变化具有先导性价值。鉴于全球三维观测系统的局限性，数值预报模式中这些云参数的分析和计算仍然具有一定的挑战性 (Miller et al, 2014)。

近年来，随着遥感技术的迅猛发展，观测云的手段变得越来越多样化。目前云观测主要有卫星红外可见光遥感、卫星微波遥感、云高仪、偏振雷达、星载云雷达、全天空成像辐射仪等云观测手段 (韩成鸣等, 2015)；地基和空基雷达可以精确地获得高时空分辨率的云的水平 and 垂直结构，毫米波雷达的波长更接近小粒子尺度，可以探测云的各种特性，以及宏观和微观结构。由于云随着时间、空间变化非常迅速多样；因此，基于卫星和雷达探测得到的资料并不能获取全面的云信息。随着航空业务上的需求增长，对云底高度、云顶高度、云顶温度、云顶气压、云光学厚度等云属性进行更为精确的预报变得越来越重要。由于缺乏广泛分布的云观测设备，航空业务上对于各种云属性的预报需求仍是一种挑战。

越来越丰富的卫星观测资料为诊断分析云计算方案中部分云参数的准确性提供了观测

依据；借助于卫星资料发现云计算方案的误差，进而对其优化改进，为研究云计算方案提供了一种新的手段和方法。本文尝试将一些云变量，如云顶温度、云顶高度等相关物理量作为输出变量，与卫星遥感可得到的资料进行比对，从而发现现有模式中云计算方案的不足之处，通过修改相关云方案，以期得到更为准确的云变量，为 GRAPES-Meso 模式云计算方案的进一步完善提供有益的参考。

1 资料与云计算方案

1.1 资料

(1) 美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, 简称 NCEP) 每日四次的再分析资料（水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ），作为模式初始场和侧边界条件。

(2) 用于分析模拟结果的（准）观测资料包括：(a) 日本气象卫星(Himawari-8) 的 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 分辨率云产品，要素包括云顶高度和云顶温度，资料来源于：日本宇宙航空研发机构（Japan Aerospace Exploration Agency, 简称 JAXA），

<ftp://ftp.ptree.jaxa.jp/pub/himawari/L2/CLP/bet/>；(b) 风云二号气象卫星 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 分辨率的逐小时相当黑体温度 (TBB) 产品、总云量 (CTA) 产品及卫星云图，资料来源于：国家卫星气象中心，<http://www.nsmc.org.cn/NSMC/Home/Index.html>；(c) 我国多普勒天气雷达反射率因子三维组网拼图资料；(d) ECMWF 再分析云量资料，包括高、中、低云量，空间分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ ，资料来源于 EC 官网：<https://apps.ecmwf.int/datasets/>；(e) 全国加密站逐小时地面 2 米温度资料，约为 2600 站，其中包括站号、经度、纬度以及地面 2 米温度，由中国气象局数值预报中心提供；(f) 中国国家站辐射逐小时资料数据集，包括中国 99 个站的总辐射（曝辐量）、站号、经度、纬度、站名等，由全国各级气象台站进行质量控制，资料来源于国家气象业务内网。

1.2 云计算方案

GRAPES_Meso 模式现用的是从 ECMWF 模式引进的诊断云方案，该方案主要公式如下：

$$Cu = \min(0.8, \max(0.0, 0.125 \ln Pr - 1.5)) \quad (1)$$

$$Cc = \begin{cases} 0.4Cu, & Cu < 0.4 \\ \max(0.4Cu, 2(Cu - 0.3)), & Cu \geq 0.4 \end{cases} \quad (2)$$

$$Cg = \left(\frac{RH - CRH}{1 - CRH} \right)^2 \quad (3)$$

$$C_T = \min(1.0, \max(0.0, Cc + Cg)) \quad (4)$$

式中： Pr 为调用两次辐射方案之间的对流降水率，单位： mm s^{-1} ， Cu 为计算积云量的中间量， Cc 为积云量； Cg 为利用相对湿度等变量计算得到的格点云量； RH 为相对湿度； CRH 为相对湿度阈值，不同模式中可能略有不同(Slingo, 1987)，GRAPES 模式中其范围在 0.7~0.9，与所在模式层高度相关； C_T 为总云量，为积云量 Cc 与格点云量 Cg 相加得到。

2 云量计算方案中问题的发现

由于云变量观测的困难和稀缺，特别是云内部变量观测的缺失，人们经常以雷达等地基观测大致确定云底变量，而用卫星等空基观测大致确定云顶变量的大小。利用云顶变量可以用卫星直接观测或反演的特征，首先对 GRAPES_MESO 模式云计算方案的云顶部分变量进行了诊断分析，以发现云计算方案存在的问题。

本文选取了 2018 年 5 月 5 日和 7 月 5 日两次降雨天气过程，对其进行了数值模拟，对模式计算的相关云顶变量进行了输出，并与卫星观测得到的对应云顶变量进行了对比分析。试验所用模式为 GRAPES_Meso4.1.2.1 版本，美国 NCEP 的 GFS 资料(水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$) 作为模式预报的初始场和侧边界条件，将雷达资料及风云二号卫星资料(包括相当黑体温度数据和总云量数据)加入模式的云分析过程中。模式水平分辨率为 5 km ，垂直分层 49 层，模式层顶高度为 28000 m 。物理过程参数化方案做如下选择：MCM6 微物理过程方案，RRTM 长波辐射方案，Dudhia 短波辐射方案，Monin-Obukhov 近地面层方案，Noah 陆面过程方案，MRF 边界层方案以及 KFeta 积云对流参数化方案。分别以 2018 年 5 月 5 日 00 时 (UTC，以下均为世界时) 和 7 月 5 日 00 时 (UTC) 作为模式的初始积分时间，时间步长取为 60 s ，共积分 24 h 。

2.1 云量对比

图 1 为 2018 年 5 月 5 日 06 时 EC 再分析(准观测)和模拟的高云、中云和低云的云量分布以及卫星云图实况。对比图 1a 和图 1d,1g 可知，模拟的高云云量明显偏多，特别是在华南和南海北部，空报了大片的高云；对比中云(图 1b,1e)，模拟的中云的范围和分布与 EC 再分析比较一致，但模拟的密闭云区云量不够密实，即比 EC 云量少一些；对比低云(图 1c,1f)，模拟低云的云区(图 1f)比 EC 再分析的云区范围偏大，而密闭云区云量偏少。总起来看，计算的中低云的范围与卫星观测(图 1g)相比大致相符。

图 2 为 2018 年 7 月 5 日 06 时 EC 再分析(准观测)和模拟的高云、中云和低云的云量分布和卫星云图实况，对比图 2a 和图 2d,2g 可知，模拟的高云云量明显偏多，特别是在华北和江淮北部，空报了大片的高云；对比中云(图 2b,2e)和低云(图 2c,2f)与图 1 分析结果相类似。

从以上初步分析可知，现在的云计算方案中，模拟的高云云量偏多，而模拟的中低云密闭云区云量偏少。

利用卫星资料可以得到大气中接近观测的云顶高度和温度，这为研究和改进云顶变量计算方案提供了可能。为此，本文对模式计算的云顶温度和高度进行了诊断和分析。为避免图表过多，以下仅给出 2018 年 5 月 5 日个例的结果。

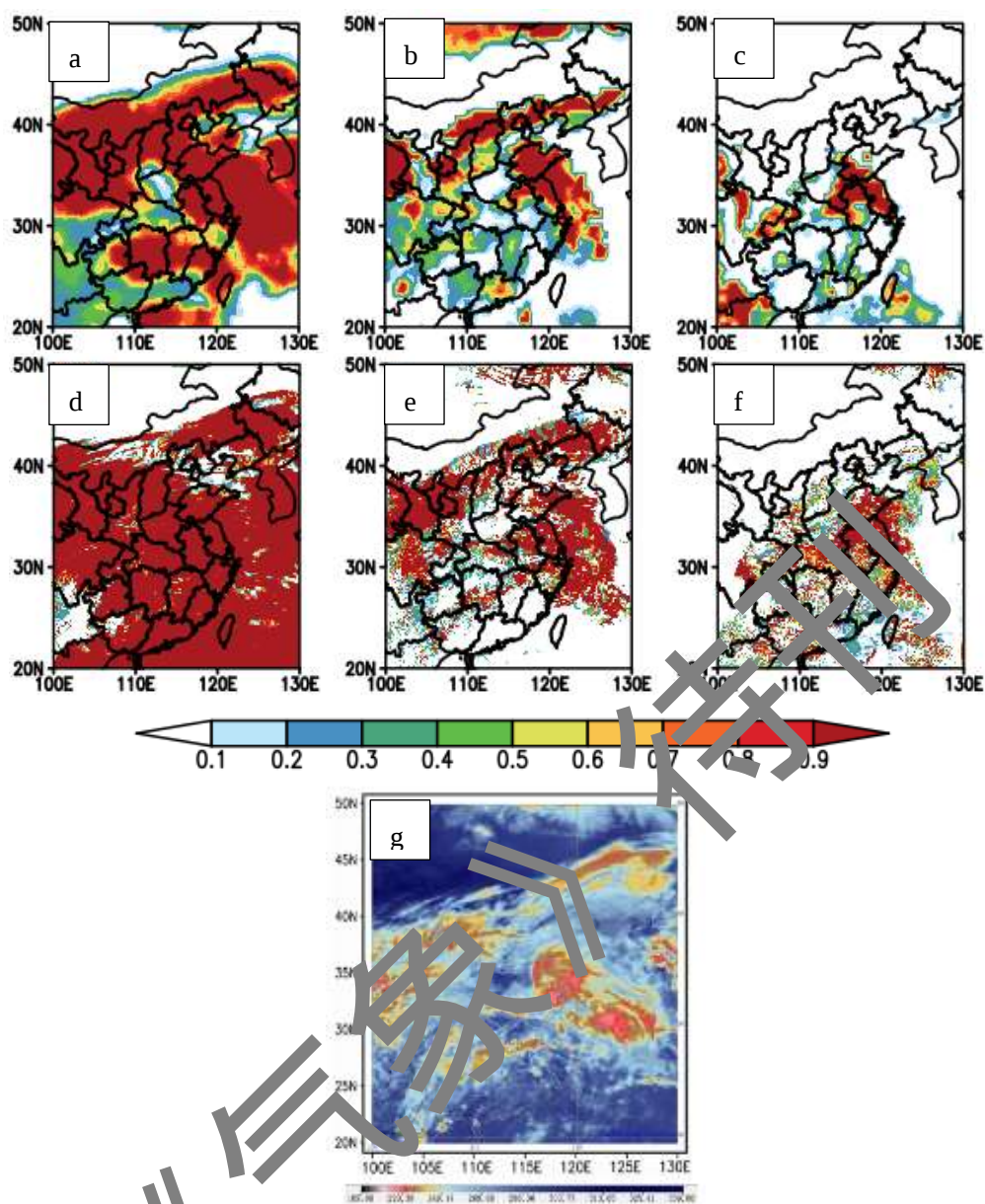


图1 2018年5月5日06时EC再分析资料(a~c)、模式模拟(d~f)和对应时刻的FY-2卫星云图(g)的云量分布

(a,d:高云; b,e:中云; c,f:低云)

Fig 1 The distribution of cloud cover in EC reanalysis (a~c), model simulation (d~f) and satellite image of FY-2 (g) at 0600UTC 5 May 2018

(a,d: high cloud; b,e: medium cloud; c,f: low cloud)

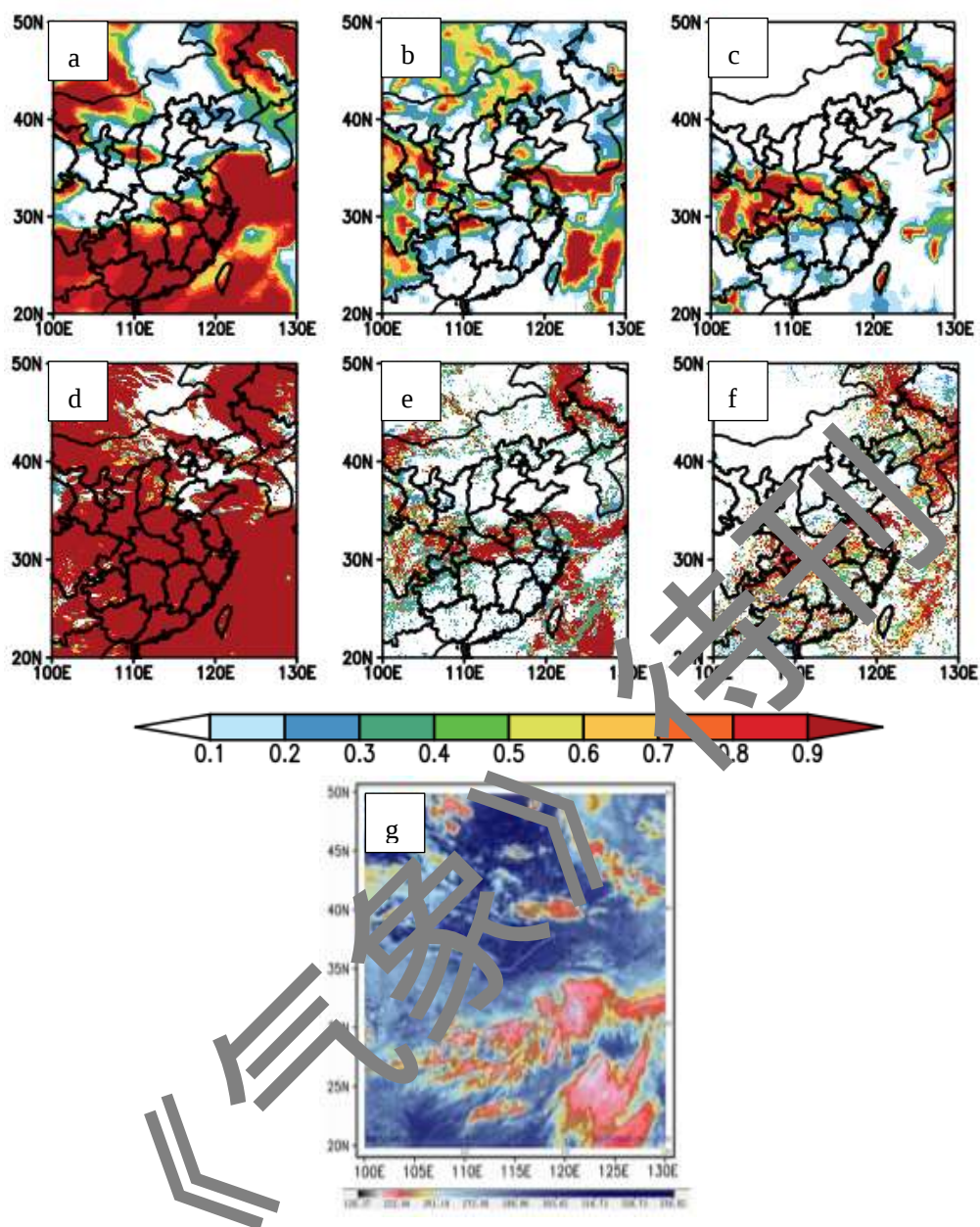


图2 2018年7月5日06时EC再分析资料(a~c)、模式模拟(d~f)和对应时刻的FY-2卫星云图(g)的云量分布

(a,d:高云; b,e:中云; c,f:低云)

Fig 2 The distribution of cloud cover in EC reanalysis (a~c), model simulation (d~f) and satellite image of FY-2 (g) at 0600UTC 5 Jul 2018

(a,d: high cloud; b,e: medium cloud; c,f: low cloud)

2.2 云顶温度对比

图3为2018年5月5日06时卫星观测和模式计算得到的云顶温度分布图。由图可知，模式模拟的云顶温度在我国的西南地区和华北北部区域与卫星观测较接近，但也存在偏低现象；其它区域模拟的云顶温度是明显偏低的，这说明模式关于云顶的计算存在较大的误差，需要对云顶温度的计算进行优化和改进。

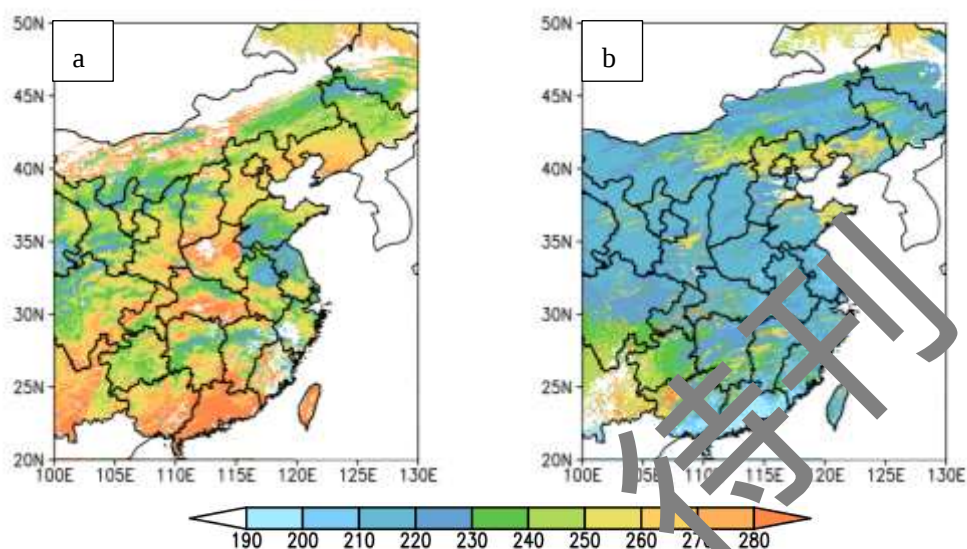


图3 2018年5月5日06时 Himawari-8 卫星观测(a)和模式模拟(b)的云顶温度分布(单位: K)

Fig3 The distribution of cloud top temperature in Himawari-8 satellite observation (a) and model simulation (b) at 06 UTC 5 May 2018 (unit: K)

2.3 云顶高度对比

图4为5月5日06时卫星观测和模式计算得到的云顶高度分布图。由图可知，模式模拟的云顶高度在我国的西南地区和华北北部区域与卫星观测较接近，但也存在偏高现象；其它区域模拟的云顶高度是明显偏高的，这说明模式关于云顶高度的计算存在较大的误差，需要对云顶高度的计算进行优化和改进。

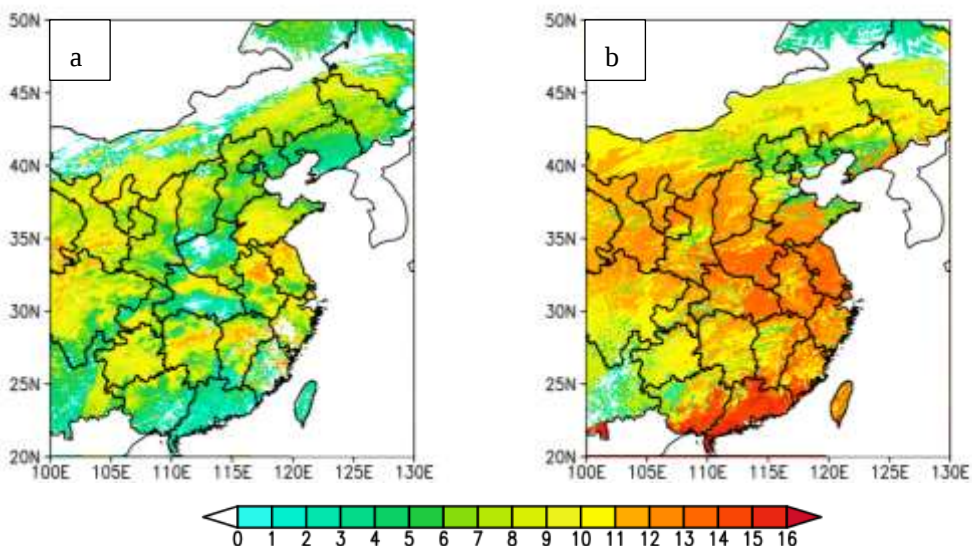


图 4 2018 年 5 月 5 日 06 时 Himawari-8 卫星观测 (a) 和模式模拟 (b) 的云顶高度分布 (单位: km)

Fig4 The distribution of cloud top height in Himawari-8 satellite observation (a) and model simulation (b)

at 0600UTC 5 May 2018 (unit: km)

3 云计算方案的优化

从上面分析可以看出, 模式现用的云计算方案中, 存在三个问题: (1) 计算的高云云量偏多; (2) 云顶高度偏高; (3) 云顶温度偏低的问题。对其它天气个例的模拟计算也存在这三个问题, 这里不再详述。

针对存在问题, 对云计算的原理和公式进行了解读, 对计算公式进行了优化改进。并进行多次数值试验后发现, 以上计算误差主要与高云的格点云量计算有关, 其中相对湿度的计算是导致云顶偏高的主要原因。原方案中相对湿度的计算公式为:

$$RH = Q / Q_s \quad (5)$$

$$Q_s = 0.622 * e_s / (p - 0.373 * e_s) \quad (6)$$

$$e_s = \begin{cases} 6.1078 * \exp\left[\frac{17.2693882(T-273.15)}{T-35.86}\right], (T \geq 273.15) \\ 6.1078 * \exp\left[\frac{21.8745594(T-273.16)}{T-7.66}\right], (T < 273.15) \end{cases} \quad (7)$$

式中: RH 为相对湿度, 单位: %; Q 为云量, Q_s 为饱和比湿, 单位: kg kg^{-1} ; p 为大气压, e_s 为饱和水汽压, 单位: hPa; T 为开氏温度, 单位: K。其中饱和水汽压的计算采用了 Tetens (1930) 经验公式。目前国际上公认的饱和水汽压方程为 Goff-Gratch 公式 (Goff, 1957), 而在 0°C 以下, Tetens 公式与 Goff-Gratch 公式的相对误差随温度降低而逐渐增大 (Mokdad et al, 2012; Xu et al, 2012)。虽然 Goff-Gratch 公式最为准确, 但由于其过于繁琐, 并不适用于本模式, 因此本试验采用 WMO 在 1996 年第六版《气象仪器观测指南》中公布的饱和水汽压计算公式替换原方案中的公式, 从而对原方案中云计算部分进行优化, 具体修改公式如下:

$$f(p) = 1.0016 + 3.15 \times 10^{-6} p - 0.074 p^{-1} \quad (8)$$

$$e_s = \begin{cases} f(p) \cdot 6.112 \exp\left[\frac{17.62 \cdot (T-273.15)}{(T-30.03)}\right], (T \geq 273.15) \\ f(p) \cdot 6.112 \exp\left[\frac{22.46 \cdot (T-273.15)}{(T-0.53)}\right], (T < 273.15) \end{cases} \quad (9)$$

式中: p 为大气压, 单位: hPa; $f(p)$ 为与大气压 p 有关的函数; T 为开氏温度, 单位: K; e_s 为饱和水汽压, 单位: hPa。此外, 结合观测可知 180h Pa 以上云量极少, 因此将模式 180hPa 以上的云量计算阈值最大设为 0.1, 并经过多次数值试验后修改了该方案中影响云中水凝物

含量计算的参数。

4 云量新方案的数值试验

利用新的云计算方案对 2018 年 5 月 5 日天气过程进行了数值模拟，并与原方案计算的云进行了对比分析。以下图表中 OBS 为观测值，CTL 为原方案的模拟结果，TEST 为改进方案的模拟结果。

图 5 为模拟的高云、中云和低云的云量分布图。对比图 5 与图 1 可知，新的云量计算方案计算的高云（图 5a）与原来方案计算的高云（图 1d）相比，在华南和南海北部原方案中空报的高云云量明显减少，更接近于 EC 再分析的高云云量分布；新旧方案的中云和低云云量变化不明显。

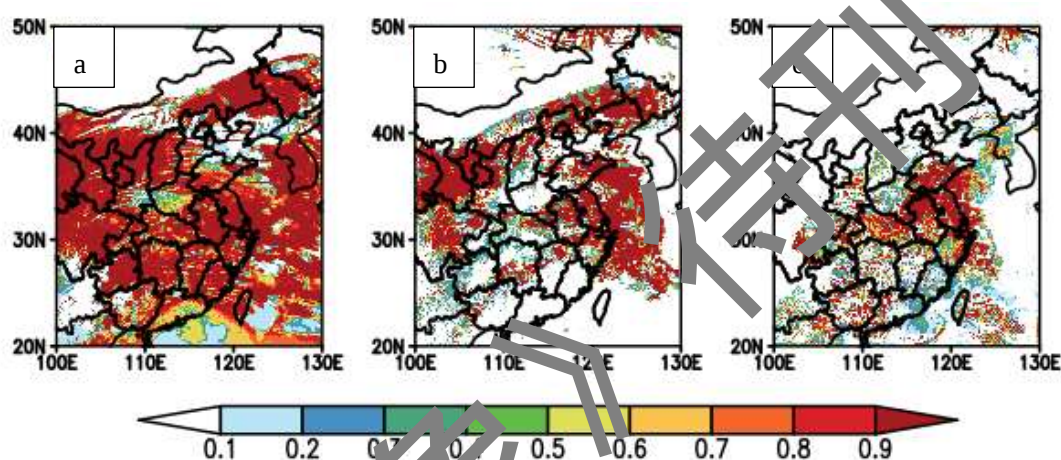


图 5 改进后模式模拟的 2018 年 5 月 5 日 06 时云量分布

(a:高云; b:中云; c:低云)

Fig 5 The distribution of cloud cover at 0600UTC 5 May 2018 simulated by GRAPES with the new cloud scheme

图 6 为模拟的云顶温度和云顶高度图。对比图 6a 与图 3 对应的云顶温度可知，新的云量计算方案计算的云顶温度明显比原来方案计算的云顶温度更接近观测，部分修正了原方案中计算的云顶温度过低的误差；对比图 6b 与图 4 对应的云顶高度，发现新方案计算的云顶高度明显比原来方案计算的云顶高度更接近观测，部分修正了原方案中计算的云顶高度过高的误差。

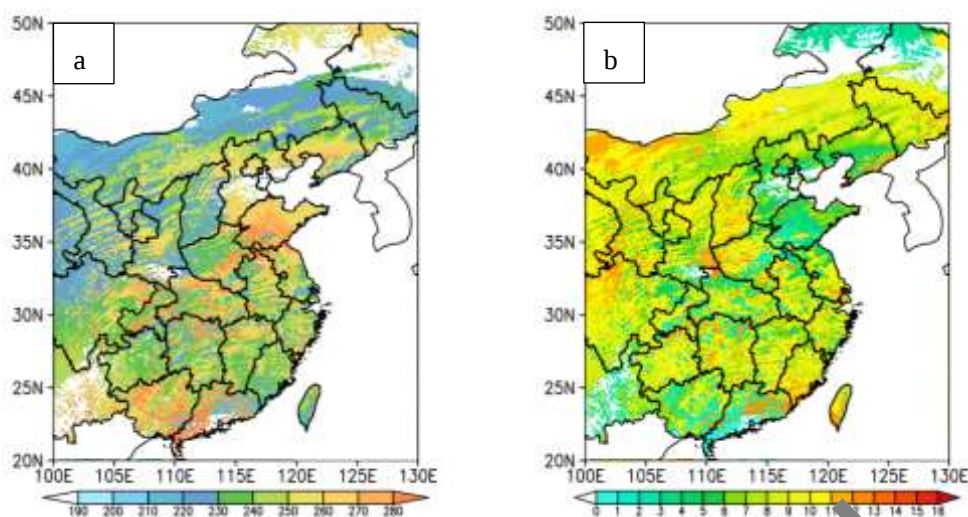


图 6 改进后模式模拟的 2018 年 5 月 5 日 06 时云顶温度 (a, 单位: K) 及云顶高度 (b, 单位: km) 分布

Fig 6 The distribution of cloud top temperature (a, unit: K) and cloud top height (b, unit: km) at 0600UTC 5 May 2018 simulated by GRAPES with the new cloud scheme

为定量描述云计算方案改进前后云顶温度和高度变化情况, 制作了两个要素的预报均方根随时间变化表(见表 1), 由表 1 可知, 改进后的云顶温度和云顶高度均方根误差均小于改进前的数值; 同时也能看出, 虽然改进后的均方根误差虽然有明显降低, 但仍然有较大的误差, 这是由于数值模式在中高层层数较稀疏, 各层之间距离较大, 由此造成模式中高层计算的云顶温度和高度会出现较大误差, 同时云计算方案本身也不够完善。要更好解决这个问题, 需要数值模式垂直分层不断增加, 云计算方案不断完善。

表 1 CTL 和 TEST 试验积分 1-9 小时的云顶温度（单位：K）及云顶高度（单位：km）预报与卫星观测的均方根误差

Table 1 Root-mean-square error (RMSE) between forecasts and satellite observations,the forecasts are cloud top temperature (unit: K) and cloud top height (unit: km) which are integrated 1-9 hours in CTL and TEST tests

变量 时间	均方根误差			
	云顶温度 (K)		云顶高度 (km)	
	CTL	TEST	CTL	TEST
1	45.44	32.02	6.47	4.66
2	45.19	30.98	6.51	4.63
3	44.11	29.37	6.66	4.43
4	41.54	27.82	5.88	4.13
5	40.43	28.06	5.75	4.17
6	40.40	28.63	5.7	4.25
7	40.59	28.54	5.80	4.24
8	40.12	28.16	5.71	4.18
9	39.60	27.28	5.63	4.08

云量计算方案的优化改进，必然对模式大气辐射的计算产生影响。为此，本文给出了区域平均的模式计算和观测得到的总辐射、长波辐射（短波辐射）随时间演变图（图 7）。由图可知，新方案计算（红虚线）和旧方案计算（绿虚线）的短波辐射较实际观测值都偏低，但新方案计算值都大于旧方案的值，更接近实际观测值。这说明云计算方案经过改进后对大气短波辐射的计算也得到了改善。

前面重点分析了高空云变量的变化，而高空云的变化也必然引起地面温度的变化，因此 2 m 温度进行分析。图 8 为是模式区域的 2 m 温度、绝对误差、平均误差和均方根误差随时间变化。由图 8a 可知，预报的 2 m 温度在积分 2 h 后都低于观测值，但都表征出与观测值一致的日变化特征，新方案预报的温度更接近观测值；由图 8b,8c,8d 分析 2 m 温度的误差变化，同样也可以得到新方案在积分 2 h 后，其 2 m 温度的平均误差更接近 0，绝对误差和均方根误差均小于原来方案的预报结果。2018 年 7 月 5 日的个例模拟分析结果与之相似，这里略去。

综合以上分析可以认为，云量方案经过改进后，模式计算的高云云量、云顶温度和云顶高度都更接近观测值，即减小了模式预报误差。

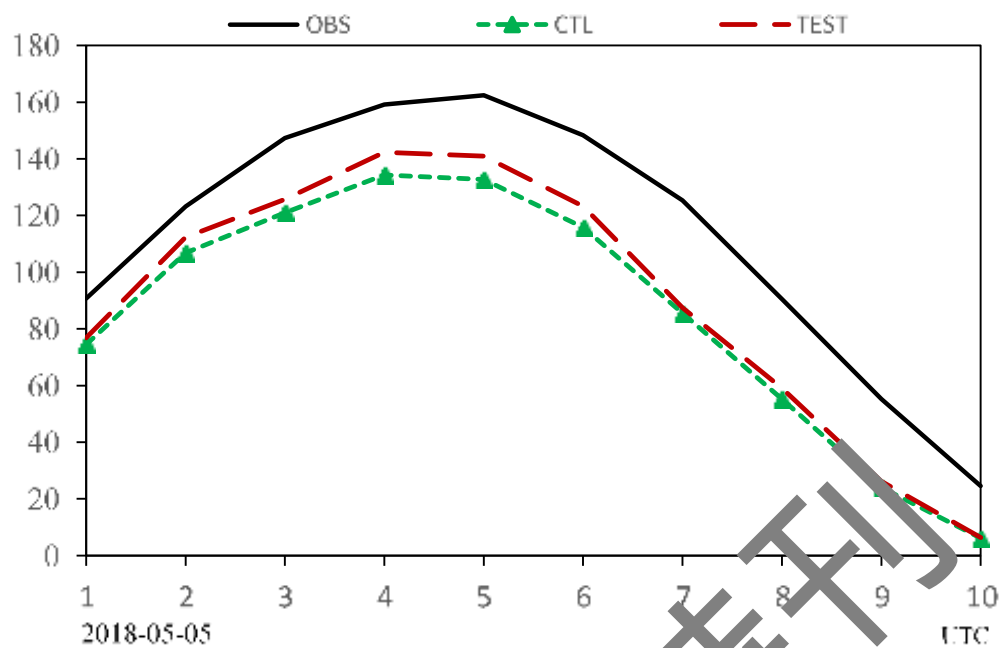


图7 2018年5月5日01-10时模拟的区域平均短波辐射(单位: $0.01\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$)

Fig7 Regionally averaged shortwave radiation simulated from 0100-1000UTC during 5 May 2018 (unit:

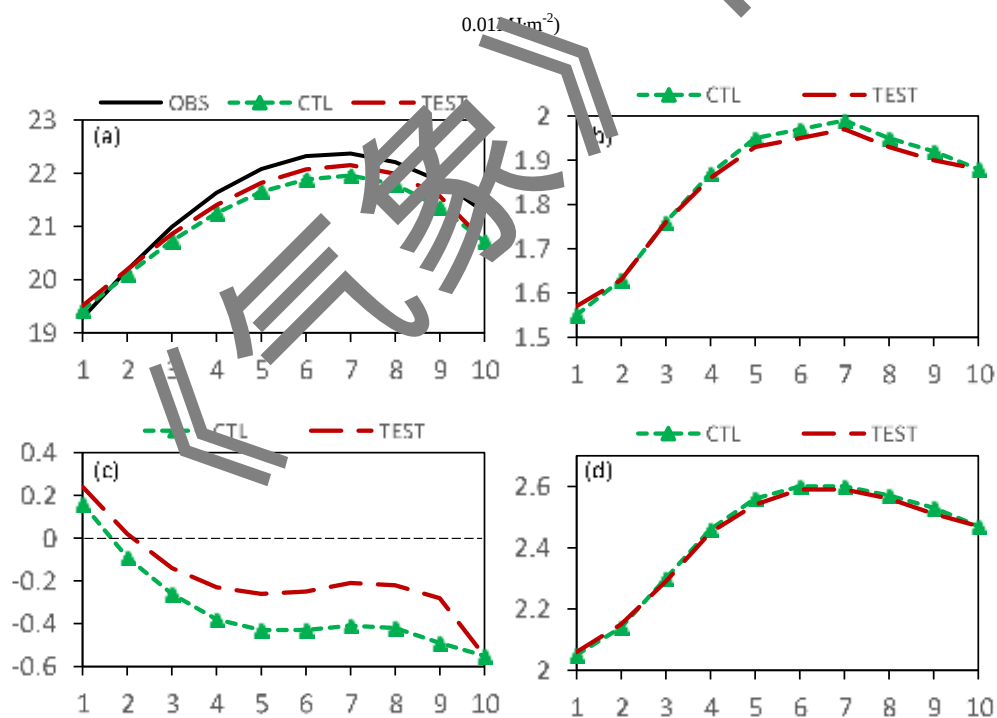


图8 2018年5月5日01-10时模拟的区域平均2m温度及与观测的误差变化(单位: $^{\circ}\text{C}$)

(a: 2m 温度; b: 绝对误差; c: 平均误差; d: 均方根误差)

Fig8 Regionally averaged 2m temperature and the errors between simulations and observations from

0100-1000UTC during 5 May 2018 (unit: $^{\circ}\text{C}$)

(a: 2m temperature; b: absolute error; c: mean error; d: root-mean-square error)

5 小结

通过对两次次降雨天气过程的模拟，重点对比分析了 2018 年 5 月 5 日卫星观测和模式模拟在云量、云顶温度和云顶高度的差异，发现了 GRAPES_MESO 模式在云计算方案中存在的问题，针对这些问题对云量计算方案进行了初步研究和改进，主要结论如下：

- (1) GRAPES_MESO 模式现用的云计算方案中，模拟的高云云量偏多，而模拟的中低云密闭云区云量偏少；模式模拟的云顶温度明显偏低，而模拟的云顶高度明显偏高。
- (2) 针对模式云计算存在的问题，对云计算的原理和公式进行了解读，对计算公式进行了优化改进。
- (3) 采用改进的云计算方案后，高云云量偏多问题得到了明显改进；模式模拟的云顶温度明显偏低和云顶高度明显偏高问题也得到了极大缓解或优化改进。

本文以卫星观测资料为基础对云量计算方案的优化进行了初步探索和试验，取得了令人鼓舞的结果。本文的研究是初步的，由于文章篇幅和计算量的限制，文章只分析了两个个例，重点给出了 2018 年 5 月 5 日的结果。随着越来越丰富的观测资料的出现，将为模式物理过程的诊断和改进提供更可靠的资料基础和修改依据，这将为模式物理过程的精细化和正确性奠定坚实的研究基础，这种方法将会越来越多地应用于模式物理过程的研发和评估中。

参考文献

- 戴福山, 宇如聪, 张学洪, 等, 2004. 一个统计低云方案及其在大气环流模式中应用初探[J]. 气象学报, 62(4): 385-394. Dai F S, Yu R C, Zhang X H, et al, 2004. A statistical low-level cloud scheme and its tentative application in a general circulation model[J]. Acta Meteor Sin, 62(4): 385-394 (in Chinese).
- 桂海林, 诸葛小勇, 韦晓澄, 等, 2019. 基于Himawari-8卫星的云参数和降水关系研究[J]. 气象, 45(11): 1579-1588. Gui H L, Zhuge X Y, Wei X C, et al, 2019. Study on the relationship between Himawari-8-based cloud parameters and precipitation[J]. Meteor Mon, 45(11): 1579-1588 (in Chinese).
- 韩成鸣, 李耀东, 史小康, 2015. 云分析预报方法研究进展[J]. 地球科学进展, 30(4): 505-516. Han C M, Li Y D, Shi X K, 2015. Overview of researches on cloud analysis and prediction methods[J]. Adv Earth Sci, 30(4): 505-516 (in Chinese).
- 宇路, 傅云飞, 2017. 基于星载微波雷达和激光雷达探测的夏季云顶高度及云量差异分析[J]. 气象学报, 75(6): 955-965. Yu L, Fu Y F, 2017. Analysis of cloud-top height and cloud amount difference between spaceborne microwave radar and laser radar detection in boreal summer[J]. Acta Meteor Sin, 75(6): 955-965 (in Chinese).
- 郑晓辉, 徐国强, 贾丽红, 等, 2016. GRAPES_Meso区域模式积云计算方案引进及预报效果检验[J]. 大气科学, 40(5): 907-919. Zheng X H, Xu G Q, Jia L H, et al, 2016. Incorporation of a cumulus fraction scheme in the GRAPES_Meso and evaluation of its performance[J]. Chin J Atmos Sci, 40(5): 907-919 (in Chinese).
- 郑晓辉, 徐国强, 魏荣庆, 2013. GRAPES新云量计算方案的引进和影响试验[J]. 气象, 39(1): 57-66. Zheng X H, Xu G Q, Wei R Q, 2013. Introducing and influence testing of the new cloud fraction scheme in the GRAPES[J]. Meteor Mon, 39(1): 57-66 (in Chinese).
- 周鑫, 周顺武, 覃丹宇, 等, 2019. 利用FY-2F快速扫描资料分析对流初生阶段的云顶物理量特征[J]. 气象, 45(2): 216-227. Zhou X, Zhou S W, Qin D Y, et al, 2019. Analysis of cloud top features during convective initiation using FY-2F satellite scan data[J]. Meteor Mon, 45(2): 216-227 (in Chinese).
- Goff J A, 1957. Saturation pressure of water on the new kelvin temperature scale[C]//Proceedings of Semi-Annual Meeting of the American Society of Heating and Ventilating Engineers, Canada: General Books LLC, 347-354.
- Gu Y, Farrara J, Liou K N, et al, 2003. Parameterization of cloud-radiation processes in the UCLA general circulation model[J]. J Climate, 16(20): 3357-3370.
- Miller S D, Forsythe J M, Parton P J, et al, 2014. Estimating three-dimensional cloud structure via statistically blended satellite observations[J]. J Appl Meteor Climatol, 53(2): 437-455.
- Mokdad S, Georgin E, Moubaili I, et al, 2012. On the way to determination of the vapor-pressure curve of pure water[J]. Int J Thermophys, 33(8-9): 1374-1389.
- Slingo J M, 1987. The development and verification of a cloud prediction scheme for the ECMWF model[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 113(447): 899-927.
- Sommeria G, Deardorff J W, 1977. Subgrid-scale condensation in models of nonprecipitating clouds[J]. J Atmos Sci, 34(2): 344-355.
- Teixeira J, 2001. Cloud fraction and relative humidity in a prognostic cloud fraction scheme[J]. Mon Wea Rev, 129(7): 1750-1753.
- Tetens O, 1930. Über einige meteorologische Begriffe[J]. Z Geophys, 6: 297-309 (in German).
- Tiedtke M, 1993. Representation of clouds in large-scale models[J]. Mon Wea Rev, 121(11): 3040-3061.
- Tompkins A M, 2002. A prognostic parameterization for the subgrid-scale variability of water vapor and clouds in large-scale models and its use to diagnose cloud cover[J]. J Atmos Sci, 59(12): 1917-1942.
- Xu J Z, Wei Q, Peng S Z, et al, 2012. Error of saturation vapor pressure calculated by different formulas and its effect on calculation of reference evapotranspiration in high latitude cold region[J]. Procedia Eng, 28: 43-48.