

GRAPES 全球模式云方案的诊断研究*

陈雪娇¹ 刘奇俊² 马占山²
CHEN Xuejiao¹ LIU Qijun² MA Zhanshan²

1. 中国气象科学研究院, 北京, 100081

2. 中国气象局国家气象中心, 北京, 100081

1. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

2. *National Meteorological Centre, CMA, Beijing 100081, China*

2020-04-26 收稿, 2020-08-06 改回.

陈雪娇, 刘奇俊, 马占山. 2021. GRAPES 全球模式云方案的诊断研究. 气象学报, 79(1): 65-78

Chen Xuejiao, Liu Qijun, Ma Zhanshan. 2021. A diagnostic study of cloud scheme for the GRAPES global forecast model. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(1):65-78

Abstract The performance of the GRAPES Global Forecasting System (GRAPES_GFS) was diagnosed and evaluated by comparing its forecasts with the fifth-generation ECMWF global climate and atmospheric reanalysis data (ERA5), and the effects of convection on cloud microphysical processes such as condensation (sublimate) and evaporation were optimized. The research emphasizes: (1) Cloud macro and micro physical quantities, such as cloud cover, cloud water content, column cloud water content etc.; (2) precipitation and outgoing long-wave radiation (OLR); (3) the feedback tendency of different physical process for temperature and humidity. The results show that after the cloud scheme is improved, liquid-water content forecasted by the GRAPES_GFS has increased in tropical regions, and the vertical distribution of hydrometers becomes more reasonable. The cloud cover forecast is closer to the ERA5. Particularly, the model performance for high cloud forecast has been improved significantly, which subsequently improves the OLR forecast. Total forecast precipitation in tropical areas increases slightly, while large-scale precipitation increase in the tropical areas is more obvious, which alleviates the underestimation of large-scale precipitation in the tropical areas.

Key words GRAPES_GFS, Cloud microphysics scheme, Diagnosis, Evaluation

摘要 在对 GRAPES 全球预报系统 (GRAPES_GFS) 云预报性能进行诊断评估的基础上, 对凝结 (华) 和蒸发等物理过程及对流卷出对云的影响过程进行改进和优化, 旨在提高 GRAPES_GFS 云量及其特征量和降水的预报精度。通过研究 GRAPES 全球模式、欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 和美国环境预报中心 (NCEP) 全球模式中 3 种云方案原理上的区别和联系, 并将 GRAPES_GFS 预报结果与 ECMWF 第 5 代全球再分析资料 (ERA5) 做对比, 分析云方案改进前后云量、云含水量、柱含水量等云宏观、微观物理量, 降水量、向外长波辐射等基本物理量以及物理过程对温度和湿度的反馈倾向的预报性能, 在此基础上对 GRAPES_GFS 原云方案进行改进。结果显示, 云方案改进后, GRAPES_GFS 在热带地区液水预报增大, 云系和水成物垂直分布更合理; 云量预报与 ERA5 预报结果更接近, 特别是高云量预报的改进, 使得热带向外长波辐射预报略有改进; 低纬度地区日平均总降水量略有增大, 特别是热带地区格点尺度降水增多较为明显, 缓解了热带区域格点尺度降水预报偏小的现象。

关键词 GRAPES 全球预报系统, 云方案, 诊断, 评估

中图法分类号 P426.5⁺1 P435

* 资助课题: 国家公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201506008) 和国家重点研发计划项目 (2018YFC1505702)。

作者简介: 陈雪娇, 主要从事数值模式中云微物理方案研究。E-mail: 2453311943@qq.com

通信作者: 刘奇俊, 主要从事数值模式云微物理参数化研究。E-mail: liuqj@cma.gov.cn

1 引言

云内微物理过程复杂, 建立更好的云微物理参数化方案是提高数值模式预报准确性关键所在(胡志晋, 1986; 谭超等, 2013)。数值模式中处理湿物理过程的方案主要包括陆面过程、边界层方案、积云对流参数化方案和云微物理方案(姜晓飞, 2015)。目前天气预报模式的微物理过程多使用显式云方案(刘奇俊等, 2003)描述。显式云方案的关键问题之一是如何解决格点尺度水汽凝结问题。传统的云微物理方案需要格点尺度水汽达到饱和情况下才启动凝结、凝华等微物理过程的计算(Zhao, et al, 1997)。但全球模式水平分辨率较低, 特别是在热带对流活跃区域, 其对流的尺度很可能小于格点尺度, 因此若继续沿用水汽达到饱和才启动凝结等过程, 就会使得低纬度对流活跃的区域用微物理过程描述的水汽凝结过程偏弱。针对这一问题, 目前多数全球模式云方案中均已引入大尺度宏观云方案, 用以描述水汽的蒸发、凝结和凝华过程, 并假定在格点相对湿度达到一定阈值的情况下便启动水汽凝结和凝华等过程(Lin, et al, 1983; Sundqvist, 1988; Reisner, et al, 1998, Thompson, et al, 2004), 同时利用云微物理方案描述水成物的碰并、冻结、融化、沉降等其他微物理过程(Thompson, et al, 2008)。另外, 对流过程对大尺度云降水过程有重要影响, 如何合理考虑次格点对流过程对云微物理过程的影响, 增强云方案与对流参数化间的联系, 也是全球模式云方案亟需解决的问题(Gettelman, et al, 2008; Morrison, et al, 2008)。

当前比较有代表性的全球模式云方案是欧洲中期天气预报中心(ECMWF)和美国环境预报中心(NCEP)的全球模式云方案以及 GRAPES 全球模式云方案。3 种全球模式原理相似, 均是利用大尺度宏观云方案描述水汽的凝结、凝华等过程, 之后根据温度将水成物含量分成液水和冰水, 用微物理方案描述碰并、淞附、自动转化等其他微物理过程。不同的是, ECMWF 全球模式云方案和 GRAPES 全球模式云方案的云量采用的是云量显式预报方案, 即云量作为模式预报量直接给出。而 NCEP 全球模式云方案的云量是诊断得到(Zhao, et al, 1997), 即根据格点平均水汽和格点预报的含水量拟合出的经验公式得到, 该经验公式一般受模式分辨率影

响较大, 且缺乏足够的物理基础, 对云量的预报性能稍差。此外, ECMWF 全球模式云方案和 GRAPES 全球模式云方案均考虑了次格点对流卷出的影响, 以期增加云方案与对流参数化的联系, 而 NCEP 全球模式云方案并未考虑该影响。

GRAPES_GFS1.0 版的云方案是借鉴 NCEP 全球模式云方案以及 WSM6 方案, 2013 年双参数云微物理方案(刘奇俊等, 2003)加入到全球模式中, 并且实现与大尺度宏观云方案、云量显式预报方案以及次格点对流卷出影响项的耦合(谭超等, 2013), 自此, GRAPES_GFS 拥有了自主研发的云方案。之后, 由于模式对低纬度地区云预报性能稍差, 在低云预报方面做了改进(姜晓飞, 2015), 一定程度上改善了模式预报热带低层云水凝结量少的问题。

数值模式云方案改进的基础建立在对云方案的诊断评估上(吴伟, 2011; 马严枝等, 2016; 聂皓浩, 2016), ECMWF 曾经对自己的全球模式进行过诊断评估工作, 并在此基础上对云方案做了改进优化。目前专门针对 GRAPES_GFS 云方案的诊断评估及改进工作开展相对较少, 且 GRAPES_GFS 在云量预报及降水预报上仍有欠缺, 热带地区格点降水量低, 中低纬度地区云量预报量少等问题较为突出。因此, 对 GRAPES_GFS 云方案进行诊断评估, 并在此基础上对其进行改进是有科学意义和应用价值的。其中, 云方案关于次格点对流卷出影响项的描述以及大尺度宏观云方案中关于水汽凝结等过程的描述, 是改进中低纬度地区云量及降水预报的关键所在(姜晓飞, 2015)。

文中在对 GRAPES_GFS2.3 版预报结果和 ERA5 分析评估的基础上, 对 GRAPES_GFS 云方案进行优化改进。研究重点包括云量、云含水量、柱含水量等云宏、微观物理量以及降水、温度、向外长波辐射(OLR)、物理过程对温度和湿度的反馈倾向等物理量, 通过与 ERA5 相应物理量对比分析, 检验云方案改进是否合理。

2 GRAPES_GFS 云微物理参数化方案的改进

2.1 GRAPES_GFS 云方案简介

GRAPES 全球模式云方案包括双参数云微物理方案、大尺度宏观云方案、云量显式预报方案和次格点对流卷出的影响过程 4 个主要部分, 在此基

础上,水成物含水量、粒子数浓度、云量以及云物理过程对温度影响的预报方程如下

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} = A(q_x) + S_{\text{micro}}^{q_x} + S_{\text{macro}}^{q_x} + S_{\text{convd}}(q_x) + S_{\text{convvs}}(q_x) + D(q_x) \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_x}{\partial t} = A(N_x) + S_{\text{micro}}^{N_x} + S_{\text{macro}}^{N_x} + S_{\text{convd}}(N_x) + S_{\text{convvs}}(N_x) + D(N_x) \quad (2)$$

$$\frac{\partial a}{\partial t} = A(a) + S_{\text{strat}}^a + S_{\text{convd}}^a + S_{\text{convvs}}^a + D(a) \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A(T) + S_{\text{micro}}^T + S_{\text{macro}}^T + S_{\text{convd}}^T + S_{\text{convvs}}^T + D(T) \quad (4)$$

式(1)为水成物含量(q)的预报方程,其中 q_x 包括水汽(q_v)以及云水(q_c)、雨水(q_r)、云冰(q_i)、雪(q_s)四种水成物的含水量,等式右边各项分别表示平流过程、微物理过程、大尺度宏观云过程、次格点深对流过程、次格点浅对流过程和扩散过程引起的水成物含量变化。式(2)为水成物数浓度(N)预报方程,其中 N_x 包括雨水(N_r)、云冰(N_i)、雪(N_s)三种水成物的数浓度,等式右边对应的各项与式(1)相同。式(3)为云量(a)的预报方程,等式右边分别为平流引起云量变化项、层积云云量变化、次格点深对流过程、次格点浅对流过程和扩散过程对云量的影响。式(4)为湿过程引起的温度变化方程,等式右边分别为平流过程、大尺度宏观云过程、次格点深对流过程、次格点浅对流过程及扩散过程对温度影响。

2.2 GRAPES_GFS 云方案的优化讨论

在对 GRAPES_GFS 云方案原理解读、脚本分析以及预报结果诊断评估的基础上,对 GRAPES_GFS 云方案做了以下优化(表 1)。

云方案具体改进方案包括:

(1)GRAPES_GFS 原云方案中,计算水汽凝结、凝华时,需要用到权重饱和比湿($q_{\text{vs_weight}}$),来计算云区内云水和冰水凝结量。原方案中, $q_{\text{vs_weight}}$ 计算

公式为

$$q_{\text{vs_weight}} = \begin{cases} q_{\text{vs}} & T \geq 0^\circ\text{C} \\ (1-\mu) \times q_{\text{vs}} + \mu \times q_{\text{vsi}} & T < 0^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu = (q_i + q_s) / q \quad (6)$$

考虑到模式计算云微物理项稳定性不高,容易造成水汽凝结、凝华量计算误差较大,故改用更稳定的温度作为约束条件,计算权重饱和比湿,公式为

$$q_{\text{vs_weight}} = \begin{cases} q_{\text{vs}} & T \geq 273.15 \text{ K} \\ \alpha \times q_{\text{vs}} + (1-\alpha) \times q_{\text{vsi}} & T_{\text{ice}} \leq T < 273.15 \text{ K} \\ q_{\text{vsi}} & T < T_{\text{ice}} \end{cases} \quad (7)$$

$$\alpha = [(T - T_{\text{ice}}) / (273.15 - T_{\text{ice}})]^2 \quad (8)$$

式中, q_{vs} 为相对水面饱和比湿, q_{vsi} 为相对冰面饱和比湿, $q = q_i + q_s + q_c + q_r$, $T_{\text{ice}} = 250.16 \text{ K}$

(2)GRAPES_GFS 原云方案中,在描述与水汽有关的相变(水汽凝结、凝华等)时,考虑云量影响。为保证云方案改进前、后对云量影响的处理一致,在原方案的基础上,增加了云量对自动转化、碰并、融化等其他微物理过程的影响。

(3)云方案中,云量由大尺度云降水过程和对流过程决定,其中,格点尺度云量由水成物的含水量变率计算得到。

云方案中格点尺度云量计算,即在原云量计算公式(谭超等,2013)基础上,调整系数 β ,经多次敏感性试验后,确定 β 合适值,使得云量模拟更合理。

具体如下

$$a_{\text{strat}} = \beta \cdot \frac{(1-a)^2}{(q_v - q_{\text{vs}})} \cdot \frac{dq}{dt} \quad (9)$$

$$\beta = \begin{cases} 40 & k < 15 \quad (\text{低云}) \\ 10 & 15 \leq k < 29 \quad (\text{中云}) \\ 25 & k \geq 29 \quad (\text{高云}) \end{cases}$$

式中, a_{strat} 为云量生成项, q_{vs} 为格点尺度水汽饱和比湿, dq/dt 为水成物的含水量变率, k 为模式层数。

表 1 云方案改进前、后对比

改进	原方案	新方案
权重饱和比湿	由云水和云冰确定	由温度确定
云量对微物理过程的影响	仅水汽相关微物理过程	所有微物理过程
格点云量计算	由相对湿度和水成物含水量变率确定	在原方案基础上略有调整
压力变化对凝结过程的影响	用微物理相变表征	由温度平流和其他物理过程决定
雨滴蒸发	云、雨同蒸发	云滴蒸发完,雨滴再蒸发

此外,优化了云量计算的部分约束条件,如原方案中,假定高、中、低云凝结生成量最高均不超过0.6,根据敏感性试验结果,新方案将其细化,分别为0.6、0.8、0.8。

(4)调整积云对流参数化对云方案的影响项计算公式(谭超等,2013)。

对流卷出对格点尺度云的影响分云量、液水和冰水3项,反馈到云方案时,上述3项又分为深对流项和浅对流项。计算公式为

$$S_{\text{conv}} = D_{\text{up}} l_{\text{up}} + \frac{M_{\text{up}}}{\rho} \frac{\partial q_x}{\partial z} \quad (10)$$

$$\delta a_{\text{conv}} = D_{\text{up}} + \frac{M_{\text{up}}}{\rho} \frac{\partial a}{\partial z} \quad (11)$$

$$D_{\text{up}} = \delta_{\text{up}} \frac{M_{\text{up}}}{\bar{\rho}} \quad (12)$$

$$l_{\text{up}} = \frac{q_x}{a} \quad (13)$$

式中, D_{up} 为积云上升气流卷出率, M_{up} 为上升气流质量通量, l_{up} 为积云云水或云冰含水量, q_x 为格点平均含水量, $\delta_{\text{up}} = 0.75 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ 。

原方案中,并未将式(10)中的 $D_{\text{up}} l_{\text{up}}$ 项及式(11)中的 D_{up} 项加入到次格点流对云方案的影响项中,新方案考虑了这两项的影响。

(5)优化和改进次格点总云水凝结率的计算。

原方案中,宏观云水汽、温度及水成物控制方程(Zhao, et al, 1997)为

$$\frac{\partial q}{\partial t} = q_{\text{non}} + E_c + E_r - C_b - C_g \quad (14)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = T_{\text{non}} - \frac{L}{c_p} (E_c + E_r - C_b - C_g) - \frac{L_r}{c_p} P_{\text{sm}} \quad (15)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = Q_{\text{non}} - E_c + C_b + C_g - P \quad (16)$$

式中, T 为温度, q 为水汽混合比, Q 为云水/冰混合比。 q_{non} 、 T_{non} 、 Q_{non} 为非凝结项(平流和湍流项之和), C_g 、 C_b 为格点尺度和对流尺度的凝结率, E_c 、 E_r 是格点平均总云水和总降水的蒸发率, P_{sm} 是融化层以下雪的融化率, P 为来自云水(冰)混合比的降水生成率, c_p 为定压空气比热容, L 是凝结和凝华的潜热系数, L_r 是冻结潜热系数。

在格点尺度下,上述公式可简化为

$$\frac{\partial q}{\partial t} = A_q + E_c - C_g \quad (17)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A_t - \frac{L}{c_p} (E_c - C_g) \quad (18)$$

$$\text{其中} \quad A_q = q_{\text{non}} + E_r - C_b \quad (19)$$

$$A_t = T_{\text{non}} - \frac{L}{c_p} (E_r - C_b) - \frac{L_r}{c_p} P_{\text{sm}} \quad (20)$$

凝结率 C_g 计算公式为

$$C_g = \frac{M - q_s f_t}{1 + f \varepsilon L^2 q_s / (R c_p T^2)} \quad (21)$$

$$f_t = \frac{2(1-a)(f_s - f_0)[(1-a)M + E_c]}{2q_s(1-a)(f_s - f_0) + Q/a} \quad (22)$$

式中, f_t 为相对湿度的时间变率, f_0 为凝结蒸发的相对湿度阈值, $f_s = 1$, $\varepsilon = 0.622$, $q_s = q_{\text{vs_weight}}$

$$M = A_q - \frac{f \varepsilon L q_s}{RT^2} A_t + \frac{f q_s}{P} \cdot \frac{\partial P}{\partial t} \quad (23)$$

式(23)中最后一项,NCEP全球模式云方案将其作为一个小项,模拟时忽略不计。GRAPES_GFS原云方案根据理想气体状态方程,将该项近似为 $\frac{f q_s}{P} \cdot \rho R \frac{\partial T}{\partial t}$,用微物理相变对温度的影响确定该项。考虑到温度变化不单是水汽相变决定,新方案改用 A_t 来表征该项,其中 A_t 代表平流、辐射、对流、边界层过程和扩散的总云水温度和的倾向。

新方案中,大尺度宏观云计算凝结等过程时, M 计算公式简化为

$$M = A_q - \frac{f q_s}{T} \left(\frac{\varepsilon L}{RT} - 1 \right) A_t \quad (24)$$

(6)考虑到云滴尺度小于雨滴,蒸发率远大于雨滴蒸发率,故新方案假定若格点内云水和雨水同时存在,雨水不蒸发,只有在格点内无云存在或者云水蒸发完后,雨水蒸发才启动。

3 试验结果与资料分析

本研究使用GRAPES_GFS2.3版,模式水平分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,垂直共分60层,积分步长取300 s,选取2009年6月1—5日的一次天气过程作为试验个例,预报时间共计5 d,起报时间为1日00时(世界时,下同),结束时间为6日00时,输出时间间隔为6 h,共计20个时次预报结果。同时选取2017年7月1—31日资料,进行为期1个月的批

量试验。在对试验预报结果与 ERA5 再分析资料对比分析基础上,对云方案进行改进。

ERA5 是 ECMWF 第 5 代全球气候监测数据集 (张永林等, 2020), 水平分辨率为 31 km, 相较于 ERA-Interim, ERA5 时间分辨率大幅度提高, 并提供了特定天气事件更为详细的演变过程。本研究主要使用 ERA5 的云量、降水及水成物含量等相关数据。

3.1 原方案与新方案云水和云冰含水量预报对比分析

GRAPES_GFS 与云相关预报结果主要包括液

相水成物和冰相水成物含水量。本研究通过对云方案改进前、后各水成物柱含量、垂直分布进行检验分析, 参照 ERA5 结果, 对云方案改进结果进行分析验证。

图 1 分别给出了 ERA5 以及 GRAPES_GFS 云方案改进前、后液相和冰相水成物柱含量预报为 2009 年 6 月 1—5 日 20 个预报时次的平均值。

对比图 1a、b, 可以看到 GRAPES_GFS 云方案改进前, 中高纬度地区液水含量明显高于 ERA5, 低纬度地区大部分区域柱液水含量低于 ERA5, ERA5

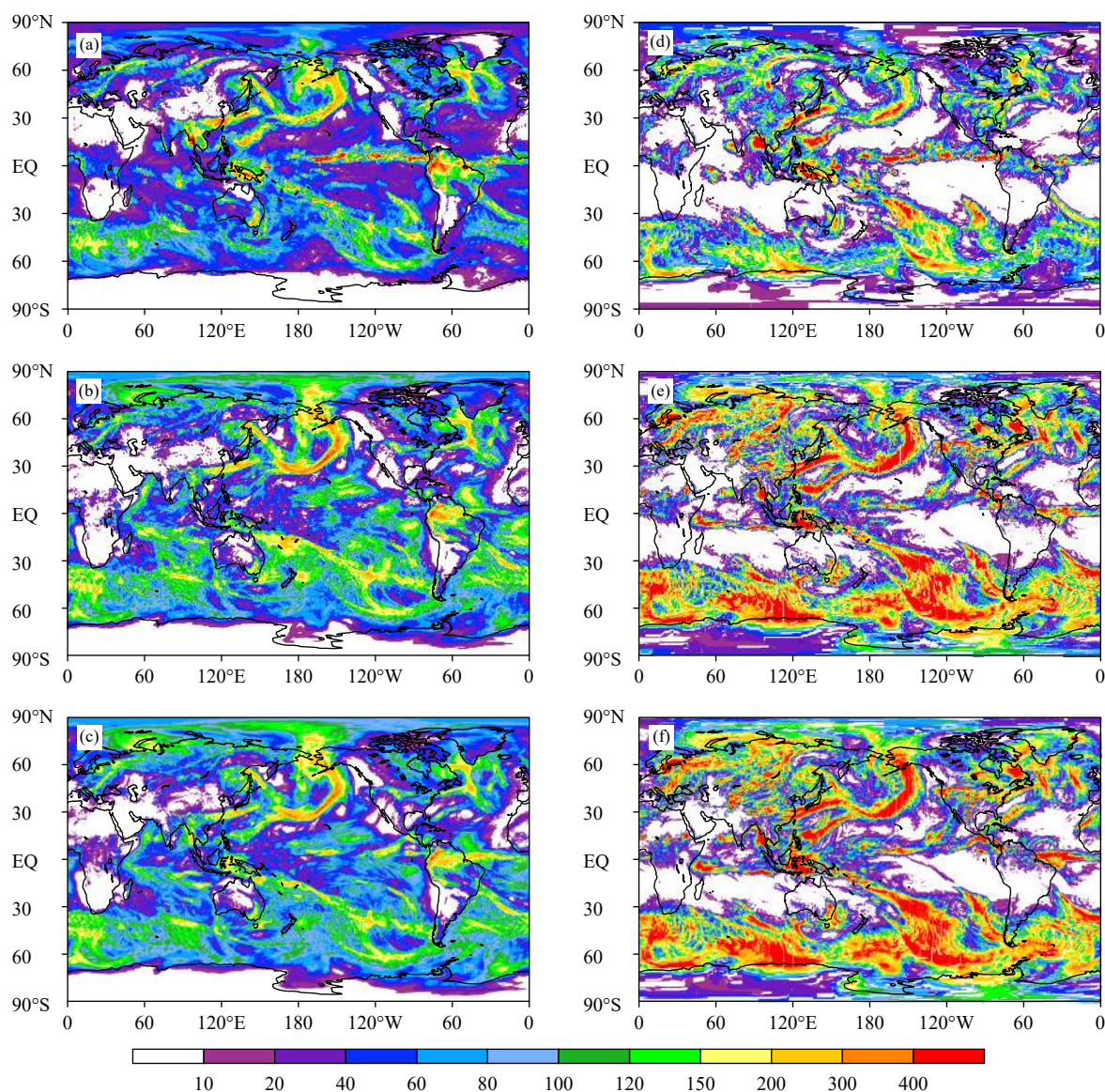


图 1 2017 年 7 月 1—5 日平均的 ERA5 (a, d) 及 GRAPES_GFS 云方案改进前 (b, e)、后 (c, f) 柱液水含量 (a—c)、柱冰水含量 (d—f) 的全球分布 (单位: g/m^2)

Fig. 1 Averaged intergrate liquid water content (a—c) and ice water content (d—f) from ERA5 (a, d), and from GRAPES_GFS forecasts with the original scheme (b, e) and the improved scheme (c, f) for 1—5 June 2009 (unit: g/m^2)

柱液水含量在赤道太平洋洋面上有明显的带状分布, GRAPES_GFS 柱液水含量在印度尼西亚地区明显少于 ERA5。根据图 1c, 云方案改进后 GRAPES_GFS 赤道地区柱液水含量升高, 特别是在赤道太平洋海域柱液水含量出现与 ERA5 类似的带状分布, 大洋洲北部和印度尼西亚地区液水含量也明显增大, 柱液水总体分布情况和 ERA5 分布更接近。对比图 1d、e, 可以看出云方案改进前 GRAPES_GFS 绝大部分区域冰水含量明显高于 ERA5, 只有赤道附近太平洋洋面上, ERA5 柱冰水含量相对集中且高于 GRAPES_GFS。根据图 1f, 云方案改进后赤道附近柱冰水含量略有增加, 中高纬度地区改进不明显, 需对冰水进一步优化。

为分析含水量垂直分布情况, 图 2 给出个例试验期间 ERA5 以及 GRAPES_GFS 云方案改进前、后水成物总量经向平均后的垂直剖面。对比图 2a、b、c 可见, 在纬度 40°S — 0° , 高度 900—700 hPa 范围内, 云方案改进前, 总含水量明显低于 ERA5, 改进后该区域含水量增大, 呈现连续分布。在中高纬度地区, 尤其是南北纬 60° 附近, GRAPES_GFS 总

含水量高于 ERA5, 但在北半球热带区域, ERA5 总含水量分布高度最高可达 100 hPa, GRAPES_GFS 水成物最高分布大概在 130 hPa。总体来看, GRAPES_GFS 云方案的改进提高了热带地区低层含水量预报性能, 对低云预报准确度的提高有帮助。

3.2 原方案与新方案云量预报对比分析

云量预报主要包括高、中、低云量和总云量。云量与周围环境温度、湿度、含水量以及空气运动等有密切关系。

图 3 是 ERA5 及 GRAPES-GFS 云方案改进前、后个例试验期间总云量和低云量全球平均分布, 对比图 3a、b、c, ERA5 和 GRAPES_GFS 的总云量全球分布相似, 但 ERA5 总云量相对较大, 北极极地和赤道附近更为明显, ERA5 云量分布更为集中, 小而散的云块较少, 这和含水量预报结果类似。GRAPES_GFS 云方案改进后, 对低层含水量影响较大, 热带地区极为明显, 而低云量可以较好反映低层含水量变化。从图 3d、e、f 可以看出, 低云量分布与总云量分布相似, ERA5 热带地区云区成片分布, 特别是太平洋上空, 但云量较小, 多数区

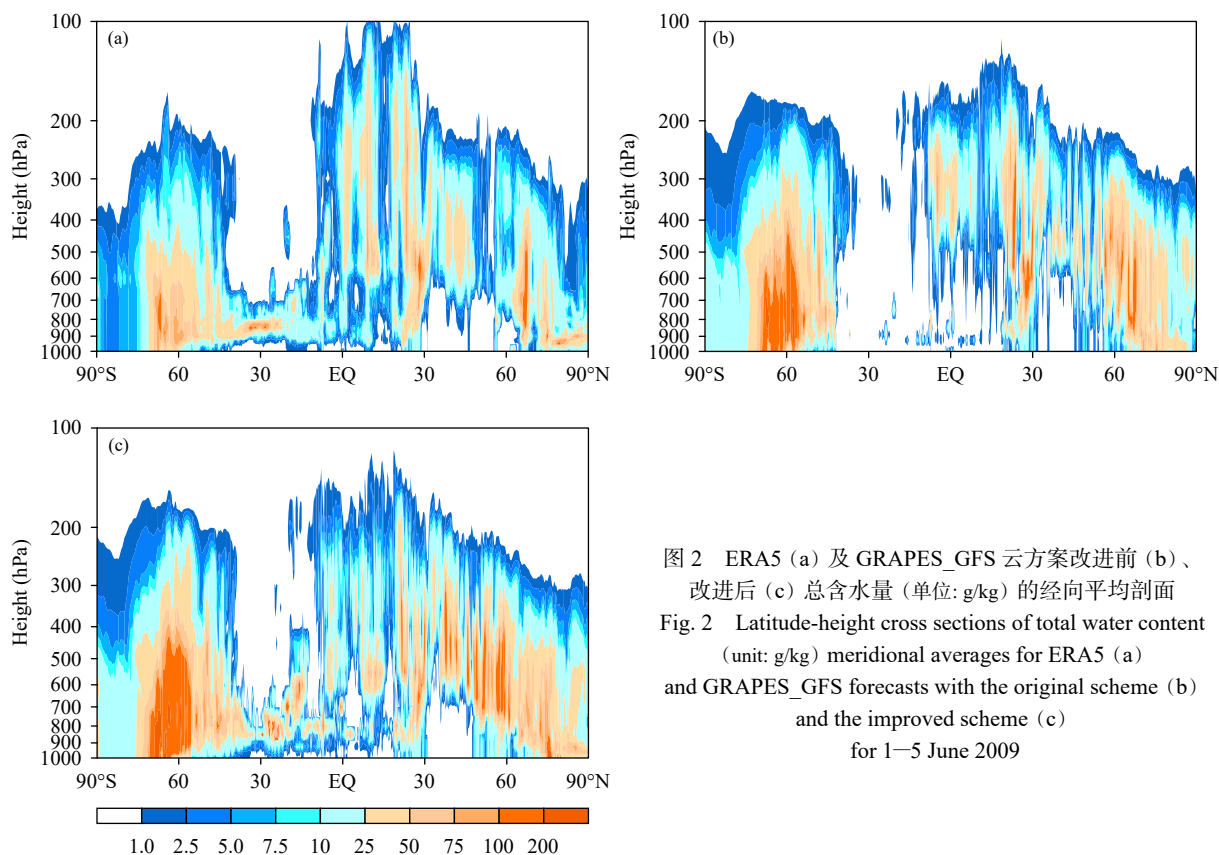


图2 ERA5 (a) 及 GRAPES_GFS 云方案改进前 (b)、改进后 (c) 总含水量 (单位: g/kg) 的经向平均剖面
Fig. 2 Latitude-height cross sections of total water content (unit: g/kg) meridional averages for ERA5 (a) and GRAPES_GFS forecasts with the original scheme (b) and the improved scheme (c) for 1–5 June 2009

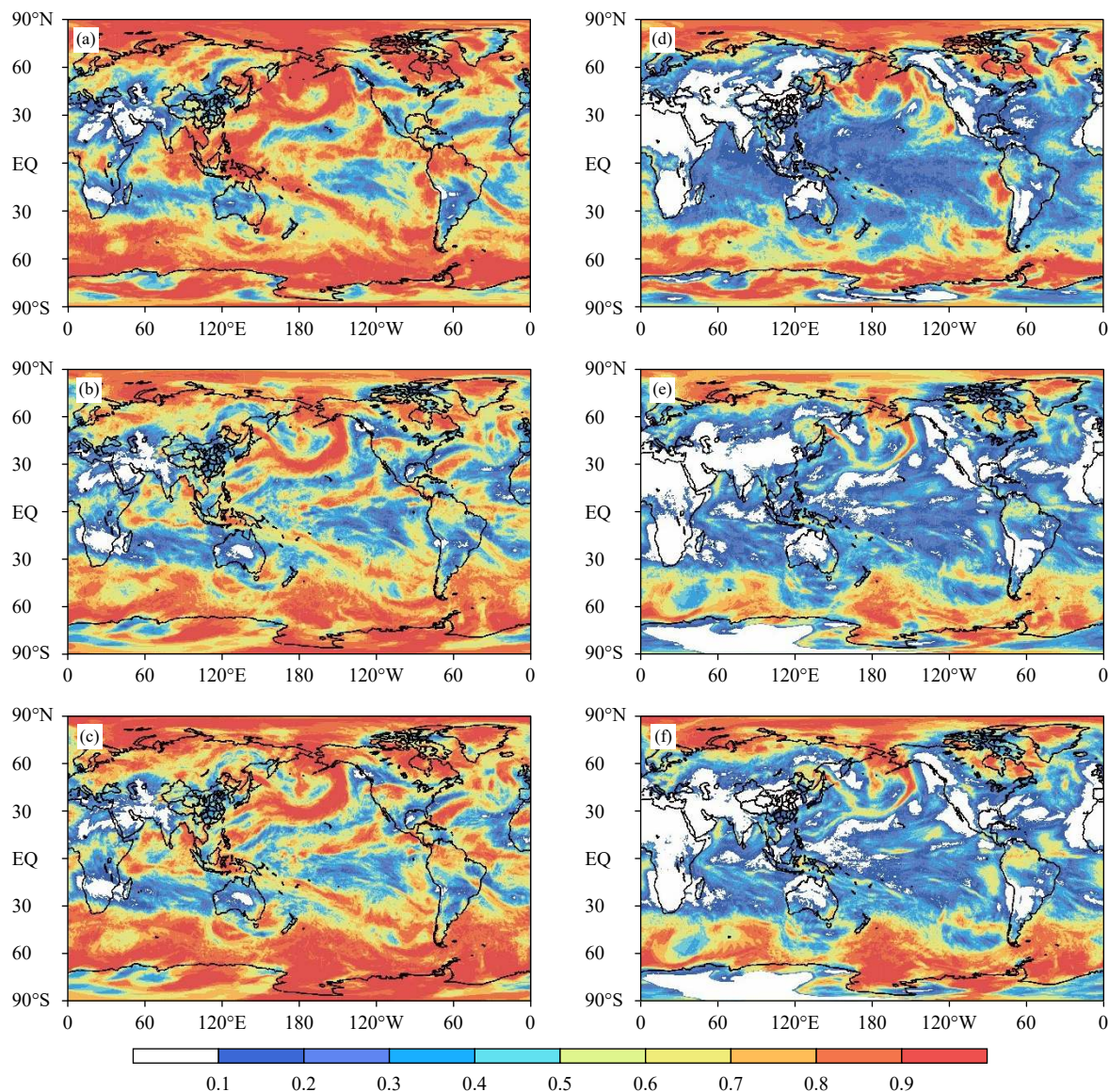


图3 ERA5 (a, d) 及 GRAPES_GFS 云方案改进前 (b, e)、改进后 (c, f) 总云量 (a—c) 和低云量 (d—f) 预报结果
Fig. 3 Total cloud cover (a—c) and low cloud cover (d—f) for ERA5 (a, d) and GRAPES_GFS forecasts with the initial scheme (b, e) and the improved scheme (c, f) for 1—5 June 2009

域小于 0.3。GRAPES_GFS 云方案改进前, 热带低云量少于 0.1 的区域多于 ERA5, 云量总体来看小于 ERA5, 云方案改进后, 热带低云量略有增加, 与低云含水量增加一致。

GRAPES_GFS 预报低云时, 在南极洲出现空白区域, 该区域海拔较高, 推测该现象可能是地形因素造成的。总体来看, 调整浅对流卷入对云方案影响过程, 增加云量对微物理过程的影响, 对低云影响较大。这是由于次格点浅对流卷入在低层贡献较大, 水成物含量变化集中在低层, 使得对流活动旺盛的

热带地区液水含量增大, 对流卷出的云水蒸发导致格点湿度升高, 对云量预报结果改善产生正效果。

3.3 原方案与新方案降水预报对比分析

GRAPES_GFS 降水预报包括次格点尺度降水和格点尺度降水两部分。图 4 给出个例试验期间 ERA5 及 GRAPES_GFS 云方案改进前、后总降水量日平均分布及云方案改进前、后的差值, 分析图 4a、b、c, GRAPES_GFS 和 ERA5 日降水区域分布相差不大, ERA5 总降水量高于 GRAPES_GFS, 热带地区尤为明显, 特别是靠近赤道地区沿纬向分布的降水

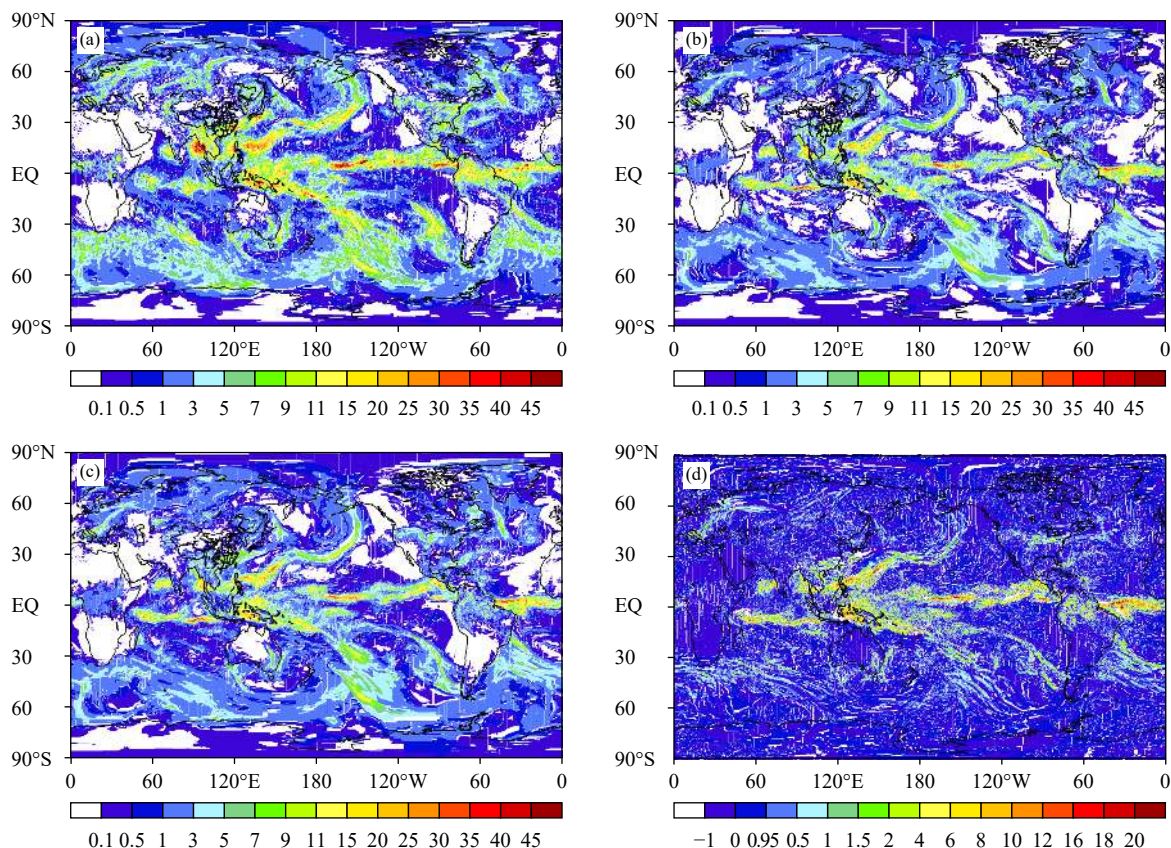


图4 ERA5 (a) 及 GRAPES_GFS 云方案改进前 (b)、改进后 (c) 总降水量及云方案改进前后总降水差值 (d) 分布 (单位: mm)

Fig. 4 Total precipitation for ERA5 (a) and GRAPES_GFS forecasts with the original scheme (b) and the improved scheme (c), and their differences (d) for 1–5 June 2009 (unit: mm)

带,在中纬度地区,ERA5 日降水量略高于 GRAPES_GFS。结合图 4d 总降水差值结果得到,云方案改进后,总降水量略有增大,热带地区增加明显,尤其是南美洲北部地区以及赤道纬向降水带区域,低纬度地区降水量增加 1—4 mm。

图 5 是 ERA5 及 GRAPES_GFS 云方案改进前、后次格点尺度降水和格点尺度降水的日平均预报。对比图 5a、b、c 可见,ERA5 次格点尺度降水明显高于 GRAPES_GFS 次格点尺度降水,特别是印度尼西亚地区以及中纬度区域尤为明显,云方案改进后,热带次格点尺度降水明显增大,中纬度降水量也稍有增加。根据图 5d、e、f, GRAPES_GFS 格点尺度降水集中在中纬度地区,热带很少,ERA5 在热带地区格点尺度降水明显高于 GRAPES_GFS 格点尺度降水。云方案改进后,热带地区格点尺度降水有所增加。总体来看,GRAPES_GFS 无论次格点尺度降水还是格点尺度降水都仍小于 ERA5。

3.4 GRAPES_GFS 云方案改进前、后辐射预报对比分析

辐射和云量密切相关,云预报结果好坏直接影响辐射预报质量。图 6 给出个例试验期间 20 个预报时次向外长波辐射和高云量小时平均预报全球分布,对比图 6a、b、c 可知,ERA5 的向外长波辐射值明显高于 GRAPES_GFS,尤其是北半球高纬度地区和热带地区,约高 15 W/m^2 ,但总体分布相似。云方案改进后,热带地区云量增加,向外长波辐射减小,在赤道太平洋洋面及印度尼西亚地区表现较为明显。从图 6d、e、f 可以看出,ERA5 在印度尼西亚区域高云云量较大,极区高云量稍小,向外长波辐射则在赤道附近小于 GRAPES_GFS。总体来看,云方案的改进,对于向外长波辐射的改进效果并不明显,仅在热带部分地区(印度尼西亚等地)略有效果。

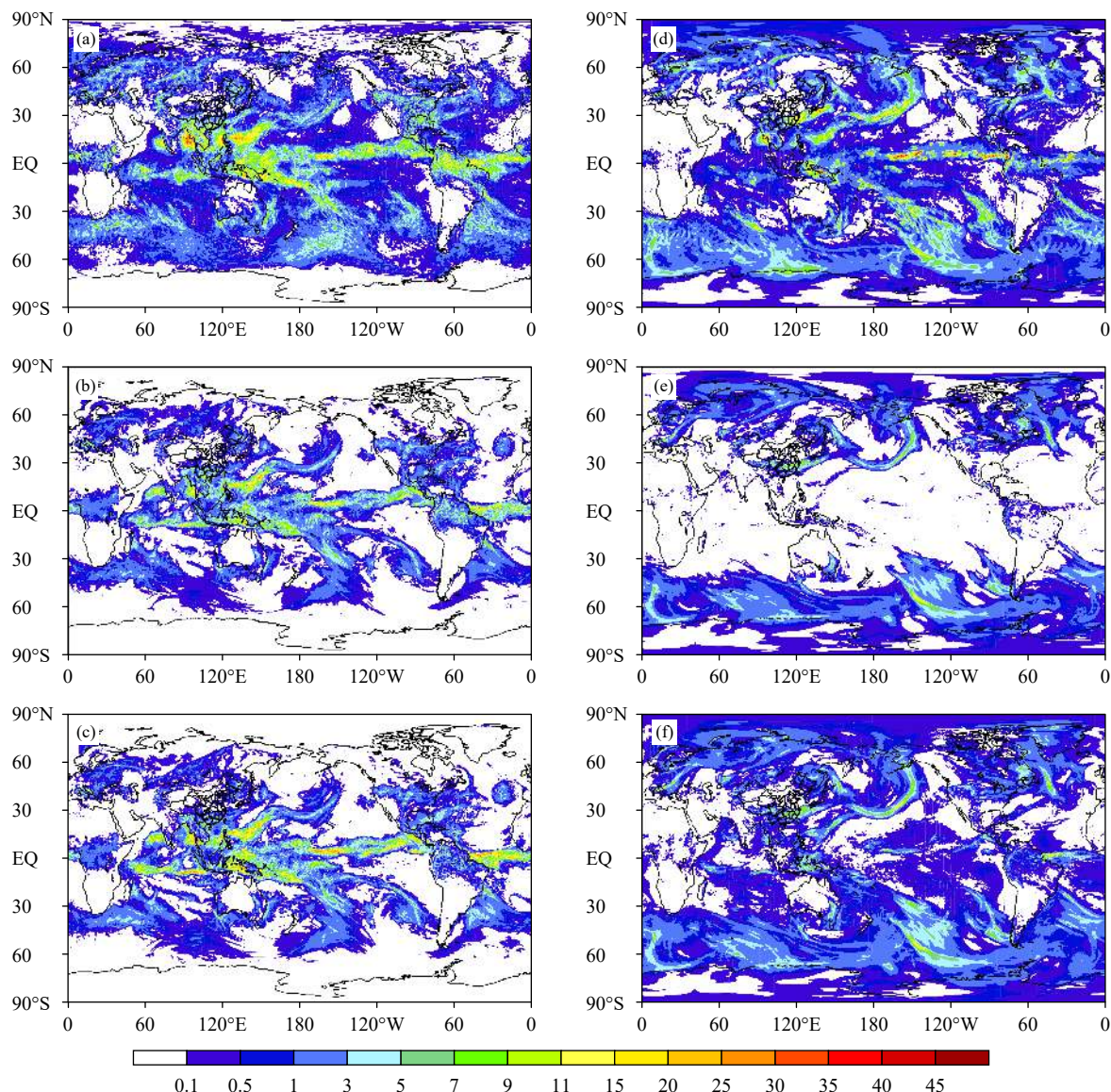


图 5 ERA5 (a, d) 及 GRAPES_GFS 云方案改进前 (b, e)、改进后 (c, f) 次格点尺度降水量 (a—c) 和格点尺度降水 (d—f) 预报 (单位: mm)

Fig. 5 Convective precipitation (a—c) and large-scale precipitation (d—f) for ERA5 (a, d) and GRAPES_GFS forecasts with the original scheme (b, e) and the improved scheme (c, f) for 1—5 June 2009 (unit: mm)

3.5 GRAPES_GFS 云方案改进前后温度、含水量倾向项分析

辐射过程、对流过程及微物理过程等都对温度或水汽含水量有重要反馈作用, 在模式中, 诊断 GRAPES_GFS 中辐射过程、对流参数化过程以及云微物理过程对温度和水汽的反馈倾向项, 分析模式温度场、湿度场对这些物理过程的反馈结果, 是优化和改进模式物理方案的重要手段。

图 7a 为 GRAPES_GFS 云方案改进前热带辐

射过程、浅对流过程、深对流过程及云微物理过程温度倾向项的预报。对流过程对周围环境的影响主要是升温降湿, 根据图 7a, 深、浅对流过程温度倾向项均为正值, 深对流深厚, 在 100 hPa 高度以下, 对温度都有影响, 在 700—300 hPa 高度最为明显; 浅对流浅薄, 对温度影响主要集中在 1000—700 hPa。云微物理过程在 700 hPa 高度以下的低层, 使温度降低, 这 and 低层云滴、雨滴等的蒸发吸热有关, 高层温度倾向项为正值, 这和水汽凝结或凝华, 云滴、雨

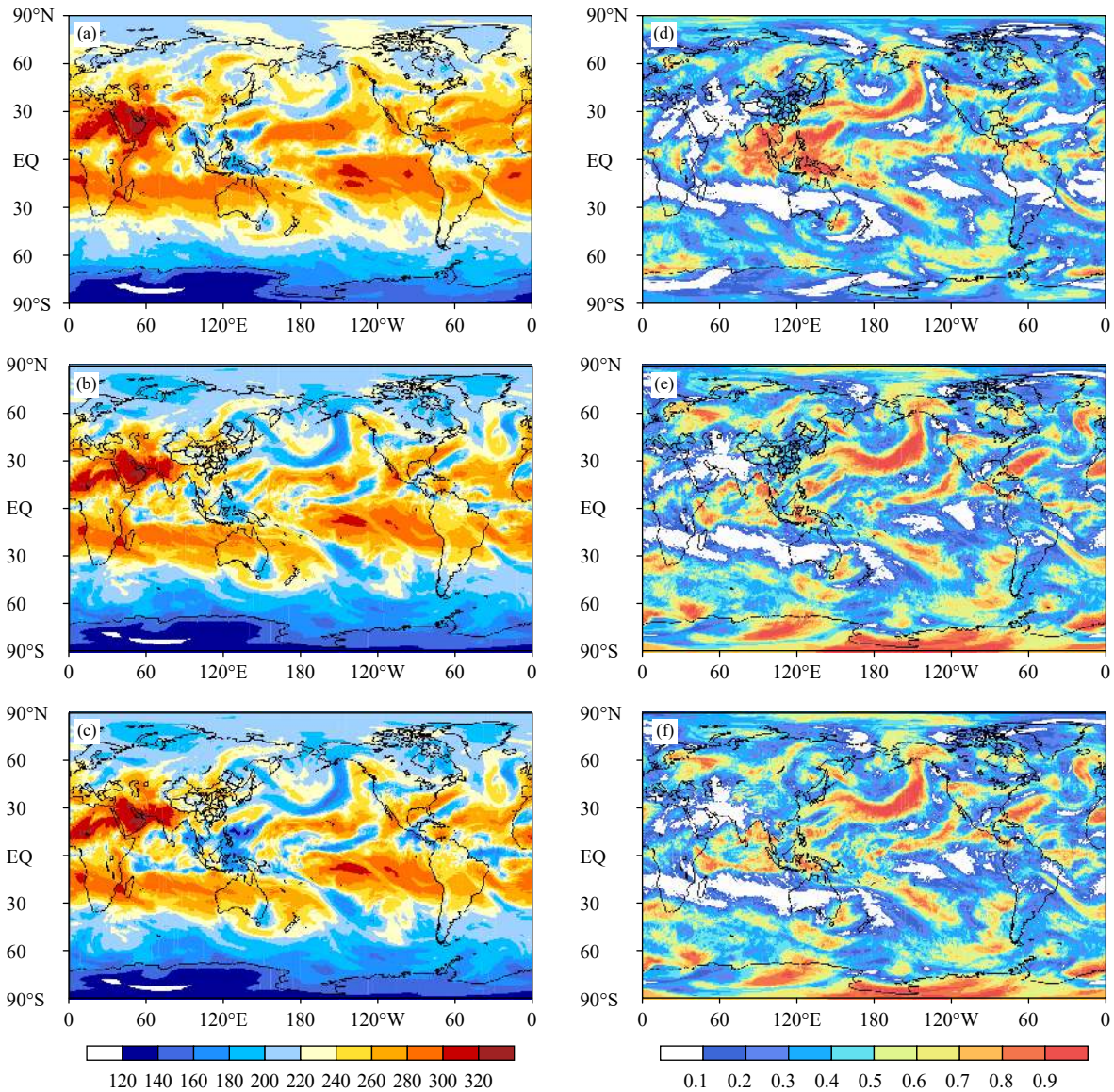


图6 ERA5 (a, d) 及 GRAPES_GFS 云方案改进前 (b, e)、改进后 (c, f) 向外长波辐射 (a—c, 单位: W/m^2) 和高云量 (d—f) 的预报

Fig. 6 OLR (a—c, unit: W/m^2) and high cloud cover (d—f) for ERA5 (a, d) and GRAPES_GFS forecasts with the original scheme (b, e) and the improved scheme (c, f) for 1–5 June 2009

滴冻结等物理过程放热有关。可见,温度场对对流和微物理过程都产生合理反馈。图 7b、c 表示深对流、浅对流过程的水成物含水量倾向项和云微物理过程的水汽、液水、冰水含量倾向项的经向平均预报结果。可以看出,对流过程对湿度场的影响主要表现为减湿效果。深对流使水汽减少,尤其是低层,浅对流在 900 hPa 高度以下其水汽含量倾向项为负值,900—700 hPa 区域为正值,但很小,其上受浅对流尺度限制,浅对流的水汽含量倾向项趋近于 0。

从云微物理过程含水量倾向项变化可以看出,当液水倾向项、冰水倾向项为正值时,水汽倾向项为负值,表征水汽与液(冰)水的相互转化关系。水汽倾向项多为正值,峰值约出现在 850 hPa 和 400 hPa 高度,达 $8 \times 10^{-4} \text{ g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 。液水在高层碰并成冰,倾向项为负值,低层积聚成雨滴下落,倾向项为正值,冰水倾向项正值主要集中在 150—500 hPa 高度,这与成冰过程主要集中在高层有关。从 GRAPES_GFS 云方案改进前、后含水量倾向项差

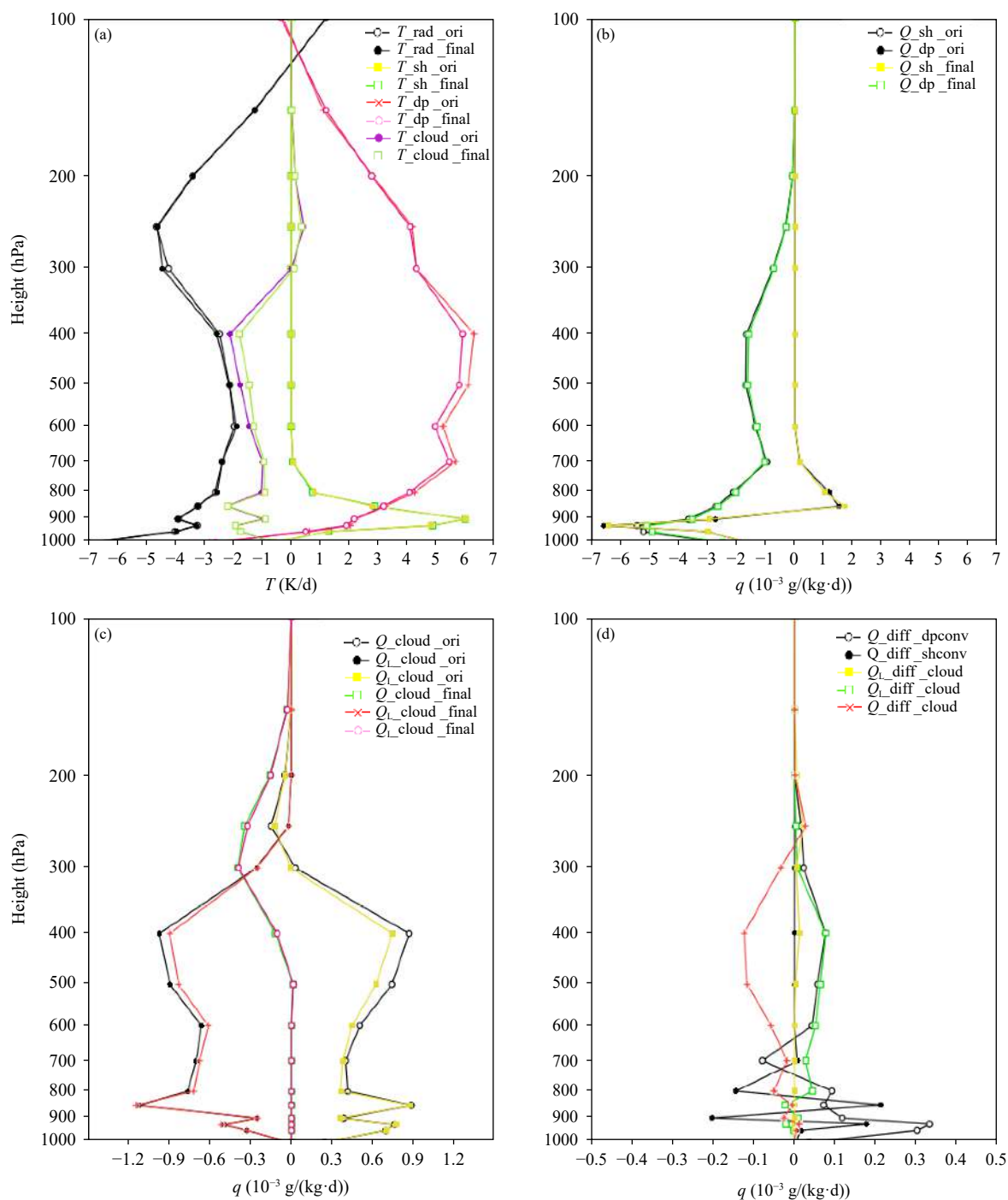


图 7 GRAPES_GFS 云方案改进前、后热带 (23.5°N–23.5°S) 温度和水汽倾向项的经向平均预报结果 (a. 温度倾向项 (单位: K/d), b. 对流过程引起的水成物水汽含量 (单位: 10^{-3} g/(kg·d)), c. 云微物理过程引起的水汽、液水、冰水含量倾向项 (单位: 10^{-3} g/(kg·d)), d. 云方案改进前后含水量倾向项的差值 (改进后-改进前, 单位: 10^{-3} g/(kg·d)); rad: 辐射过程, sh、shconv: 浅对流过程, dp、dpconv: 深对流过程, cloud: 云物过程, ori: 原云方案, final: 改进的云方案, 下标 L: 液水, 下标 I: 冰水)

Fig. 7 Meridional averages of temperature and water vapor tendencies in tropical region (23.5°N–23.5°S) of GRAPES_GFS forecasts with the original scheme and the improved scheme for 1–5 June 2009 (a. the tropical temperature tendency, b. the water vapor content tendency of deep convection and shallow convection, c. the water vapor, liquid water, and ice water content tendencies of cloud microphysical processes, d. the difference in moisture tendency between forecasts with the original scheme and the improved scheme; rad: radiative process, sh/shconv: shallow convective process, dp/dpconv: deep convection process, cloud: cloud microphysical processes, Q_L : liquid water tendency, Q_I : ice water tendency, ori: the original scheme, final: the improved scheme)

值(图7d)可以看出,云方案改进使深对流水汽含量倾向项增大,加大了模式的去湿过程。浅对流含水量倾向项差值变化较小。而云方案水汽倾向项略有减小,液水倾向项变化不大,冰水倾向项增大。

3.6 GRAPES_GFS 云方案改进前、后批量试验预报

在个例试验的基础上,进行2017年7月1—31日为期1个月的批量试验。分析批量试验期间云方案改进前、后柱液水含量和柱冰水含量差值(图8)得出,云方案改进后,中低纬度柱液水含量略有增加,增值30—50 g/m²,柱冰水含量在低纬度和高纬度地区增加较为明显,中纬度地区有增有减。总体来看,云方案改进后,柱液水含量的改变较符合预期,柱冰水含量的改进效果不明显。

批量试验期间ERA5及GRAPES_GFS云方案改进前、改进后次格点尺度降水量、格点尺度降水量、总降水量日平均分布结果(图9)显示,GRAPES_GFS和ERA5降水区域分布差别不大,对比图9a、b、c可以看到,GRAPES_GFS日平均次格点尺度降水量略低于ERA5,特别是在赤道附近区域,次格点尺度降水低于ERA5,但ERA5日平均次格点尺度降水量0.1—1 mm的小降水量级区域分布多于GRAPES_GFS,这与GRAPES_GFS次格点尺度降水不考虑浅对流过程形成的降水有直接关系。GRAPES_GFS云方案改进后热带区域次格点尺度降水略有增加,特别是印度尼西亚附近增加更明显。GRAPES_GFS格点尺度降水低于ERA5,在热带地区表现更为明显,云方案改进后,格点尺度降

水增加,中、低纬度区域都有明显改进。总降水量预报结果显示,云方案改进前,GRAPES_GFS降水量低于ERA5,格点尺度降水在热带区域偏小。云方案改进后,GRAPES_GFS总降水量增加,与ERA5总降水量分布更接近,特别是在热带区域格点尺度降水的预报,改进效果明显。

4 总结与讨论

基于GRAPES_GFS2.3版,对云方案中对流卷入影响过程、宏观云过程进行优化,同时增加云量对碰并、融化等微物理过程的影响,通过个例分析,对云方案改进前、后各水成物含水量、云量、降水、向外长波辐射等预报结果进行分析,以ERA5资料结果作为参照,得到以下结论:

(1)将云方案中计算水汽凝结时用到的权重饱和和比湿改为由温度确定后,GRAPES_GFS液相水成物在热带含量增多较为明显,且低云预报性能有明显改进。

(2)增加云量对云微物理过程的影响,云量、含水量及降水预报准确度均有提高,特别是在热带地区,改进效果更明显。具体改进效果主要表现为云方案改进后,热带区域柱水含量出现“带状”分布。

(3)优化格点云量计算过程,调整高云、中云、低云生成过程中部分约束条件之后,GRAPES_GFS云量明显增多,特别是中、低纬度地区,云量预报准确度明显提高。

(4)调整宏观云方案中次格点总云水凝结率和雨水蒸发,在一定程度上增加了水成物含量预报量,

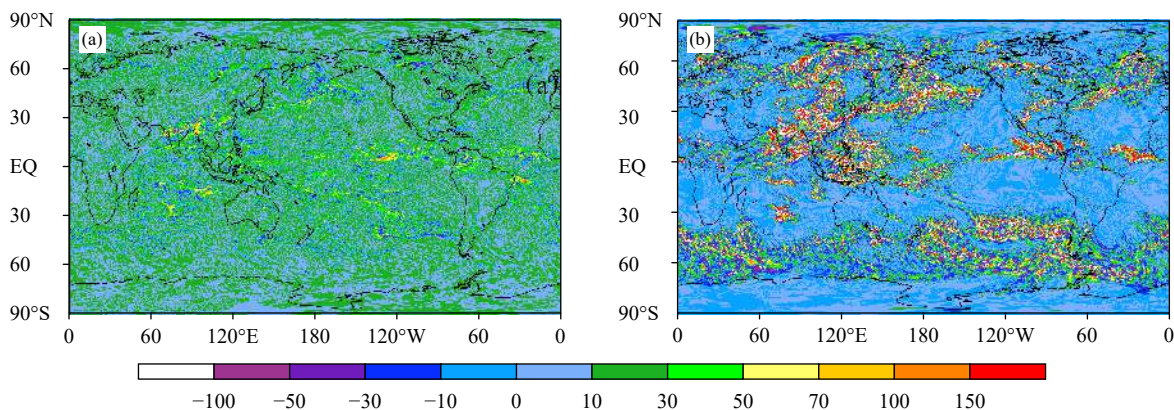


图8 2017年7月GRAPES_GFS云方案改进前、后柱液水含量(a)和柱冰水含量(b)的差(单位: g/m²)

Fig. 8 Differences (unit: g/m²) for intergrated liquid water (a) and ice water (b) content between GRAPES_GFS forecasts with the original scheme and the improved scheme for July 2017

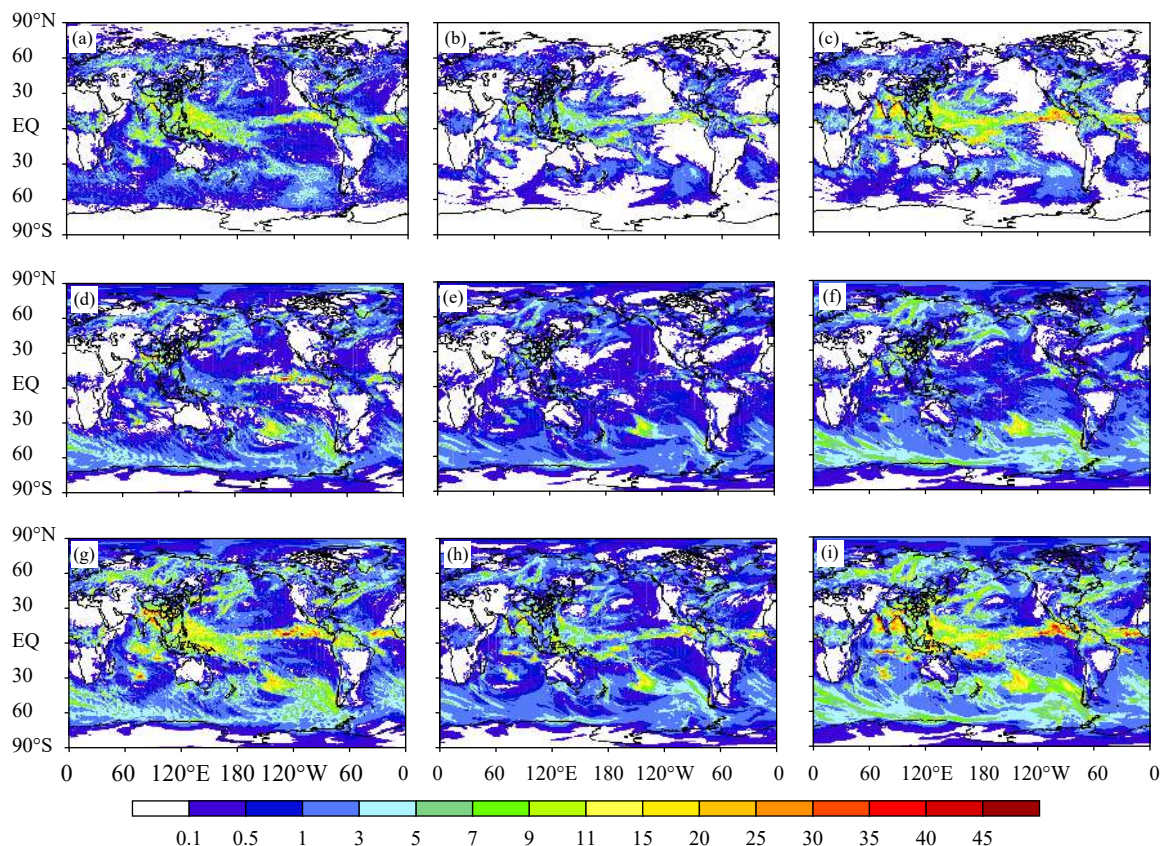


图9 2017年7月ERA5 (a, b, c) 及GRAPES_GFS云方案改进前(d, e, f)、后(g, h, i)次格点尺度降水量(a, d, g)、格点尺度降水量(b, e, h)、总降水量(c, f, i)日平均分布(单位: mm)

Fig. 9 Distributions of daily average convective precipitation (a, d, g), large-scal_GFS precipitation (b, e, h) and total precipitation (c, f, i) for ERA5 (a, b, c) and GRAPES_GFS forecasts with the original scheme (d, e, f) and the improved scheme (g, h, i) for July 2017 (unit: mm)

使得 GRAPES_GFS 含水量预报结果与 ERA5 相近, 含水量垂直分布特征与 ERA5 含水量垂直分布相似, 特别是低层含水量的垂直分布, 同时, 缓解了 GRAPES_GFS 热带地区格点尺度降水过少现象。

(5) GRAPES_GFS 双参数云微物理方案改进之后, 含水量、云量、降水预报都有明显改进, 这也有助于提高模式中其他与云有关过程预报质量, 如向外长波辐射的预报。

本研究虽然对云方案做了一些改进, 但是 GRAPES_GFS 冰水含量预报偏高, 中纬度区域降水偏少等问题仍存在, 未来需要进一步研究完善。且全球范围的云微物理观测资料相对缺乏, 后期可增加 GRAPES 预报结果与实测资料的比较。

参考文献

胡志晋, 严采蓁. 1986. 层状云微物理过程的数值模拟(一): 微物理模式. 气

象科学研究院院刊, 1(1): 37-52. Hu Z J, Yan C F. 1986. Numerical simulation of microphysical processes in stratiform clouds (I): Microphysical model. J Acad Meteor Sci, 1(1): 37-52 (in Chinese)

姜晓飞. 2015. GRAPES 全球模式浅对流和边界层过程对低云预报的影响研究 [D]. 北京: 中国气象科学研究院. Jiang X F. 2015. Influences of sub-grid shallow convective and boundary-layer process on cloud forecast in GRAPES global model [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese)

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. Liu Q J, Hu Z J, Zhou X J. 2003. Explicit cloud schemes of HLAFS and simulation of heavy rainfall and clouds, Part I: Explicit cloud schemes. J Appl Meteor Sci, 14(S1): 60-67 (in Chinese)

马严枝, 赵桂, 郝婧宇等. 2016. “8.19”华北区域暴雨的数值模拟与诊断分析. 干旱气象, 34(3): 511-521. Ma Y Z, Zhao G, Hao J Y, et al. 2016. Numerical simulation and diagnostic analysis about a heavy rainstorm process in North China based on WRF Model. J Arid Meteor, 34(3): 511-521 (in Chinese)

- 聂皓浩. 2016. 高分辨 GRAPES 模式中云微物理方案对强降水过程的模拟和诊断研究 [D]. 北京: 中国气象科学研究院. Nie H H. 2016. Simulation and analysis of heavy precipitation using cloud microphysical scheme coupled with high-resolution GRAPES model [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese)
- 谭超, 刘奇俊, 马占山. 2013. GRAPES 全球模式次网格对流过程对云预报的影响研究. 气象学报, 71(5): 867-878. Tan C, Liu Q J, Ma Z S. 2013. Influences of sub-grid convective processes on cloud forecast in the GRAPES global model. Acta Meteor Sinica, 71(5): 867-878 (in Chinese)
- 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 [D]. 兰州: 兰州大学. Wu W. 2011. Comparison to the sensitivity of GRAPES and WRF model cloud microphysical parameterization schemes using CloudSat and MODIS Satellite data [D]. Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese)
- 张永林, 蔡昌盛. 2020. 基于再分析资料 ERA5 的对流层延迟估计方法及精度评估. 大地测量与地球动力学, 40(1): 62-65. Zhang Y L, Cai C S. 2020. Method and accuracy assessment of zenith tropospheric delay derived from ERA5 re-analysis data. J Geod Geodyn, 40(1): 62-65 (in Chinese)
- Gottelman A, Morrison H, Ghan S J. 2008. A new two-moment bulk stratiform cloud microphysics scheme in the community atmosphere model, version 3 (CAM3). Part II: Single-column and global results. J Climate, 21(15): 3660-3679
- Lin Y L, Farley R D, Orville H D. 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. J Climate Appl Meteor, 22(6): 1065-1092
- Morrison H, Gettelman A. 2008. A new two-moment bulk stratiform cloud microphysics scheme in the community atmosphere model, version 3 (CAM3). Part I: Description and numerical tests. J Climate, 21(15): 3642-3659
- 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 of Roy Meteor Soc, 124(548): 1071-1107
- Sundqvist H. 1988. Parameterization of condensation and associated clouds in models for weather prediction and general circulation simulation //Schlesinger M E. Physically-Based Modelling and Simulation of Climate and Climatic Change. Dordrecht: Springer, 433-461
- Thompson G, Rasmussen R M, Manning K. 2004. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis. Mon Wea Rev, 132(2): 519-542
- Thompson G, Field P R, Rasmussen R M, et al. 2008. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization. Mon Wea Rev, 136(12): 5095-5115
- Zhao Q Y, Black T L, Baldwin M E. 1997. Implementation of the cloud prediction scheme in the Eta Model at NCEP. Wea Forecasting, 12(3): 697-712