

王佳,梅钦,陈钰文,2017. WRF 模式不同微物理方案水凝物的预报能力检验与集成试验[J]. 气象,43(5):552-559.

WRF 模式不同微物理方案水凝物的 预报能力检验与集成试验^{*}

王 佳^{1,2} 梅 钦² 陈钰文¹

¹ 江苏省气候中心,南京 210000

² 南京信息工程大学,南京 210044

提 要: 文章利用 TRMM(Tropical Rainfall Measuring)卫星 TMI(TRMM Microwave Imager)探测反演的云水、雨水和冰水新版改进资料,定量化检验了 WRF(Weather Research and Forecasting)模式 6 种微物理方案(Lin,WSM6,Thompson,Morrison 2-mom,CAM5.1,NSSL 2-mom)对江苏近海及周边海域上空云中水凝物的预报能力。19 次个例统计检验结果表明,6 种微物理方案基本都能预报出水凝物的量级及大致范围,对于云水的预报,除 NSSL 2-mom 方案误差较大外,其余 5 种方案误差均较小;CAM5.1 方案对雨水含量较大时的预报效果较好,但对于雨水含量较小时的预报误差较大;Lin 方案对于冰水的预报效果较好,更接近于实况。在此基础上,选用等权集成(EMN)和消除偏差集成(BREM)两种方法开展集成预报试验,结果发现,两种方法均可以减小预报的误差,且消除偏差集成的方法比等权集成的改进效果更好。

关键词: WRF 模式,微物理方案,水凝物,TRMM/TMI Version 7,定量检验,集成试验

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.05.004

Performance Verification and Ensemble Experiments of Hydrometeors Forecasting by Different Microphysical Schemes in WRF Model

WANG Jia^{1,2} MEI Qin² CHEN Yuwen¹

¹ Jiangsu Climate Centre, Nanjing 210000

² Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: The new improved retrieval data of cloud water, rain water and ice water detected by the TRMM (Tropical Rainfall Measuring) satellite TMI (TRMM Microwave Imager) are applied to quantitatively verify the performance of six microphysical schemes of WRF (Weather Research and Forecasting) model for hydrometeors over Jiangsu offshore and surrounding areas. The statistical verification results of 19 cases show that the six schemes can predict the magnitude and approximate range of the hydrometeors. For cloud water content forecasting there is a large deviation in NSSL 2-mom scheme but little deviation in other schemes. CAM5.1 scheme has a better performance in forecasting rain water when the content is larger, but worse performance when the content is small. Lin scheme is better in forecasting ice water than other schemes compared to the observation. On the basis of quantitative verification, the ensemble forecasting experiments are carried out by the two methods of ensemble mean (EMN) and the bias-removed ensemble mean (BREM). The results show that both methods can reduce the error of prediction, and the BREM is better than the EMN.

^{*} 国家自然科学基金面上项目(41575104)、江苏气象科研基金(KM201403)和江苏气象科研基金(Q201516)共同资助

2016 年 10 月 23 日收稿; 2017 年 1 月 6 日收修定稿

第一作者:王佳,从事数值预报与人工影响天气研究. Email:nanjingwangjia2008@aliyun.com

Key words: WRF model, microphysical schemes, hydrometeors, TRMM/TMI Version 7, quantitative verification, ensemble experiments

引 言

科学开发空中云水资源是缓解我国水资源短缺的有效措施之一(陈钰文和王佳,2015;王佳和陈钰文,2015),高效与合理开发空中云水资源的关键在于准确预报云中水凝物含量,实现开发利用条件的客观分析。云系水凝物的业务预报主要依赖于微物理过程较完善的中尺度可分辨云模式(郭学良等,2013)。

WRF 模式作为国际先进的中尺度数值预报模式,近年不断发展与完善微物理方案(Skamarock et al,2008;Rajeevan et al,2010;袁招洪,2015;沈新勇等,2015),引入了 Morrison, CAM5. 1, Milbrandt 和 NSSL 等多种详细的双参数微物理方案,新方案对我国云和降水预报能力急待检验。肖辉和银燕(2011)利用耦合 Morrison 双参数方案的 WRF 中尺度可分辨云模式对山西一次强降水过程进行了模拟研究;岳治国等(2011)利用耦合 Milbrandt 双参数方案的 WRF 中尺度可分辨云模式对北京地区暴雨、中雨和微雨等 3 次云降水天气过程进行了数值模拟研究;李安泰和何宏让(2011)利用不同微物理参数化方案对舟曲的一次暴雨进行了模拟;朱格利等(2014)利用不同微物理参数化方案对华南的一次暴雨过程进行了模拟。研究结果发现,不同微物理方案对于降水的预报有着重要的作用(Colle et al, 2005)。显然,云水资源开发利用条件预报,更加关注不同微物理方案对云中水凝物的预报能力,衡志炜等(2011)利用 WRF 和 AREM 模式对一次台风过程进行了模拟,结果发现 WRF 模式对冰粒子的模拟效果较好。目前,我国针对微物理方案的水凝物预报能力研究相对较少,少量研究仅限于模拟个例的定性对比,本文将利用随机选取的 19 个预报实例,采用 TRMM/TMI 改进后的 V7 版本的云水、雨水和冰水观测反演资料,量化统计检验 WRF 模式 6 种双参数微物理方案的水凝物预报性能。

集成预报可以提高模式预测准确率。Krishnamurti et al(1999)最早提出超级集成预报方法,就是利用线性回归方法将多个模式预报结果进行集成,以提高确定性预报的准确率。研究结果表明,集

成预报可有效地减小预报的均方根误差,预报效果优于确定性预报(赵声蓉,2006;智协飞等,2009;林春泽等,2009;Zhi et al,2012;Zhang et al,2015)。常用的集成方法包括:简单集成平均(EMN)、消除偏差集成平均(BREM)、超级集成平均(SUP)以及概率多模式集成方案。各种集成预报方法已被广泛应用于温度、降水和台风路径等预报结果的改进(智协飞等,2013;崔慧慧和智协飞,2013;陈良吕等,2014;Zhang and Zhi,2015;张涵斌等,2015;He et al, 2015;李勇,2016),然而水凝物集成预报研究尚未开展,本文拟在定量化检验 6 种微物理方案水凝物预报性能的基础上,进一步采用 EMN 和 BREM 两种集成预报方法改进预报效果。

1 资料和方法

1.1 实况与模式资料

本文使用了 V7 版本的 TRMM 卫星资料中的水凝物反演资料(2A12)和 3 h 降水资料(3B42),它是由 GPROF(goddard profiling algorithm)扩线反演算法计算得出,改进后的 V7 版本由之前的垂直方向 14 层增加至 28 层,在 10 km 以下每层间隔 0.5 km,10 km 以上每层间隔 1 km,并且 V7 版本的水凝物反演资料仅对海洋区域做反演。2A12 为轨道资料,每天大概有 16 个轨道,本文选取每天经过江苏东部海域($30^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $120^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$)的轨道数据,取其中的云水(cloud water path)、雨水(rain water path)和冰水(ice water path)下文分别简称(CWP、RWP、IWP)三个变量作为观测值。

WRF 模式采用 3.6 版本,除了微物理方案(表 1)不同外,其他都采用相同的参数配置:KF 积云对流参数化方案、RRTM 长波辐射方案、Dudhia 短波辐射方案、MM5 Monin-Obukhov 表面层方案、Noah 陆面过程方案以及 Yonsei University 行星边界层方案;模式采用一层嵌套网格,水平分辨率为 15 km,对应的网格点数为 449×353 ,垂直层数为 45 层,预报时效为 48 h。本文所选取如下 19 次预报个例,其起报时间分别为下同:2014081100(2014 年 8 月 11 日 00 时,世界时,下同)、2014081200、

2014081300、2014081500、2014081600、2014082812、2014082900、2014083000、2014090112、2014090312、2014090512、2014091000、2014091100、2014091212、2014091312、2014091600、2014091700、2014091800、2014102900,初始场采用美国国家环境预报中心的 GFS 全球模式资料,分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。考虑到模式启动调整,本文主要取预报时效超过 12 h 的结果。其相应物理量的计算方法如下:

$$\begin{aligned} CWP &= \frac{1}{g} \int_{p_{\text{bot}}}^{p_{\text{top}}} qc(p) dp \\ RWP &= \frac{1}{g} \int_{p_{\text{bot}}}^{p_{\text{top}}} qr(p) dp \\ IWP &= \frac{1}{g} \int_{p_{\text{bot}}}^{p_{\text{top}}} [qi(p) + \\ &\quad qs(p) + qg(p) + qh(p)] dp \end{aligned}$$

式中, CWP 、 RWP 、 IWP 分别为云水、雨水、冰水气柱积分,单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$; qc 、 qr 、 qi 、 qs 、 qg 、 qh 分别为云水、雨水、冰晶、雪、霰、雹质量浓度比,单位为 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,相应的数浓度比分别为 nc 、 nr 、 ni 、 ns 、 ng 、 nh ; p_{bot} 和 p_{top} 分别为底部和顶部气压; g 为重力加速度。

本文采用双线性插值法,将 WRF 模式的高斯格点插值到 TRMM 卫星相对应的轨道上,再进行定量分析。

1.2 定量化检验与集成预报方法

平均绝对误差(MAE)反映了预报和检验值的平均偏差程度,而均方根误差(RMSE)受平均绝对误差的影响,对系统误差以及较大的误差比较敏感。两者都可以直观地反映出预报效果和观测之间的偏差,其值越大,误差越大。公式如下:

$$\begin{aligned} RMSE &= \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2 \right]^{1/2} \\ MAE &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F_i - O_i| \end{aligned}$$

式中, F_i 为第 i 个方案的预报值, O_i 为第 i 个样本的观测值, N 为总的参数化方案的个数。

等权集成和消除偏差集成是目前常用的两种集成预报方法,其计算简单,节约计算资源,在业务运用中受大家欢迎,其计算公式如下:

$$\begin{aligned} EMN &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i \\ BREM &= \bar{O} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F}_i) \end{aligned}$$

式中, F_i 为第 i 个方案的预报值, $\bar{F}_i$ 为训练期中第 i 方案的平均值, $\bar{O}$ 为训练期观测值的平均值, N 为总的微物理方案的个数(本文为 6), $BREM$ 为消除偏差集成的结果,由于样本个数的局限性,这里采用交叉样本检验来消除偏差。

表 1 6 种微物理方案的水凝物变量

Table 1 The hydrometeor variables for six cloud microphysics schemes

方案名称	质量浓度比	数浓度比
Lin	qc, qr, qi, qs, qg	无
WSM6	qc, qr, qi, qs, qg	无
Thompson	qc, qr, qi, qs, qg	nr, ni
Morrison 2-mom	qc, qr, qi, qs, qg	nr, ni, ns, ng
CAM5.1	qc, qr, qi, qs	nc, nr, ni, ns
NSSL 2-mom	qc, qr, qi, qs, qg, qh	nc, nr, ni, ns, ng, nh

2 评估检验

2.1 量级检验

为检验不同微物理方案对水凝物含量的预报能力,随机选取 19 次预报个例的 3 种水凝物气柱积分的 WRF 预报值(下文简称为云水、冰水和雨水)与 TRMM 卫星的反演结果,计算其在江苏近海区域范围内($30^\circ \sim 40^\circ \text{N}$ 、 $120^\circ \sim 130^\circ \text{E}$)的平均值,并进行比较(图 1)。从水凝物含量的走势可以看出 6 种方案基本可以预报出水凝物含量量级的大小,在 TRMM 中水凝物含量比较大的时候其相应的预报含量也比较大。具体分析发现几种方案对云水的预报值偏大(图 1a),尤其 NSSL 2-mom 方案预报值明显偏大,在 8 月 16 日偏大了约 $0.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$; Lin、WSM6 和 Thompson 方案的预报效果相差不大,与实况比较接近,误差最大为 $0.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$;在 9 月 3—13 日这几个个例中,几种方案的误差都约为 $0.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,基本能够预报出实况的大小。几种方案对于雨水的预报结果与实况相比(图 1b),除 CAM5.1 方案外,其余都略微偏小。在 8 月 12、13 和 16 日,实况的雨水含量较多时, CAM5.1 方案的预报效果明显优于其他方案,但是当实况的雨水含量较少时, CAM5.1 方案预报的偏差就明显较大。从冰水图中(图 1c)可以看出, Thompson 方案的预报结果差于其他方案,尤其在 8 月 16 日,预报偏大了 $0.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右,而其他几种预报的结果误差

较小,且都能够预报出大致的量级大小,与实况较接近。总的来说几种方案都大致预报出了水凝物含量量级的大小,在实际预报过程中,预报的结果有一定的参考价值。

2.2 误差分析

为了进一步对几种方案的预报结果评估,本文

使用平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)两种误差分析方法,对模式预报的结果进行评估分析(图2)。从图中可以看出平均绝对误差与均方根误差的评估结论相一致。分析云水的评估结果(图2a,2b)发现,NSSL 2-mom 方案的偏差较大,Lin 方案和 WSM6 方案的误差较小,MAE 基本都在 $0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下, RMSE 也都小于 $0.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。分

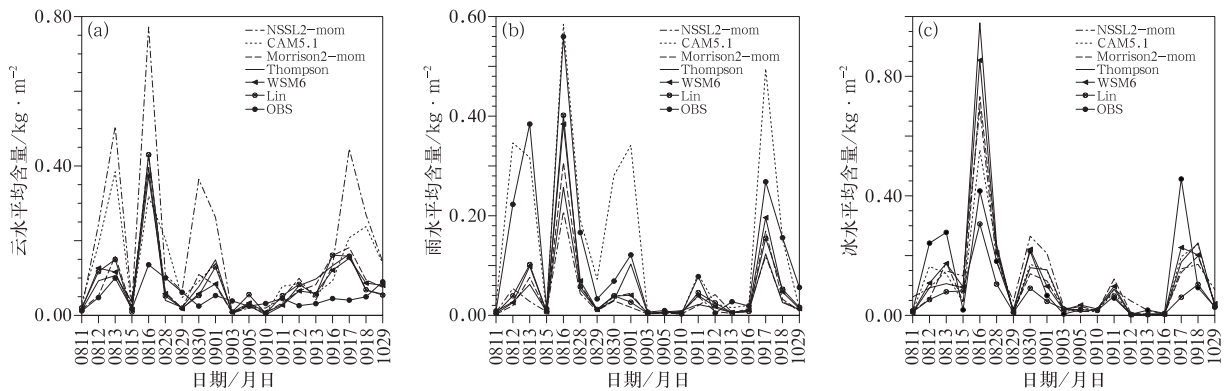


图1 6种微物理方案19次预报个例的云水(a)、雨水(b)和冰水(c)平均含量与TRMM/TMI资料的对比

Fig. 1 Six microphysics schemes' 19 forecasting cases' results of average content of cloud water (a), rain water (b) and ice water (c) compared to TRMM/TMI detected data

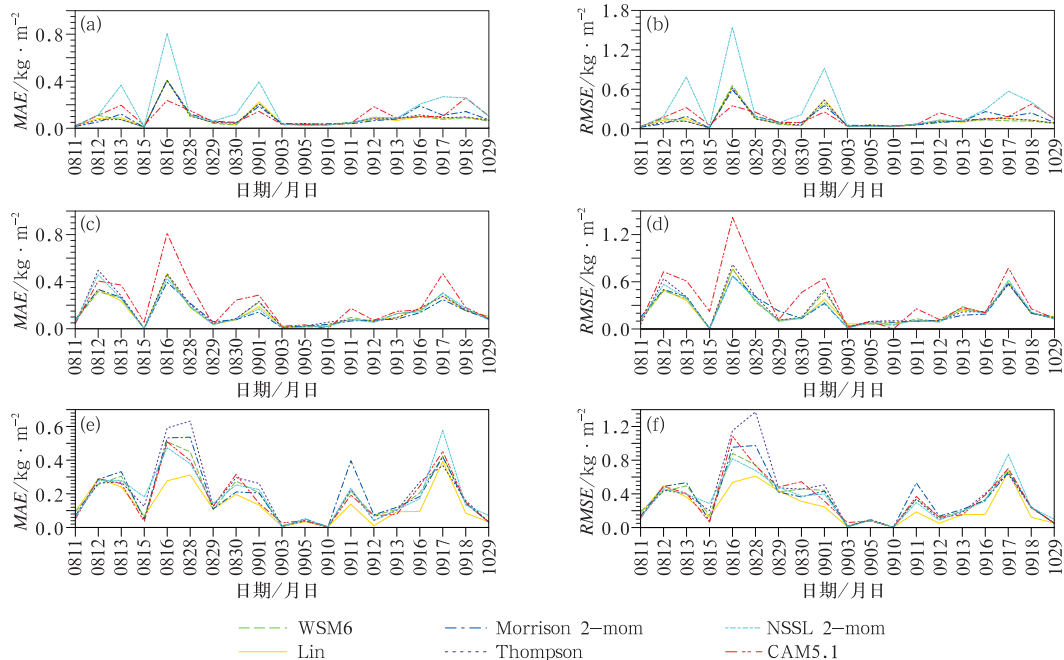


图2 6种微物理方案19次预报个例的云水(a, b)、雨水(c, d)和冰水(e, f)的平均绝对误差(a, c, e)与均方根误差(b, d, f)

Fig. 2 Six microphysics schemes for 19 forecasting cases' mean absolute error (a, c, e) and root mean square error (b, d, f) in average content of cloud water (a, b), rain water (c, d) and ice water (e, f)

析雨水的评估结果可以发现(图 2c, 2d), CAM5.1 方案的 MEA 和 $RSME$ 明显高于其他方案, 结合上文分析可知, CAM5.1 方案对于水凝物含量较大时的预报效果较好, 对于水凝物含量较少时的预报明显偏大, 从而导致了最终的误差较大; 而其他的几种方案的评估结果基本相一致, MEA 基本都在 $0.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下, $RSME$ 基本都在 $0.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下。分析冰水的评估结果发现(图 2e, 2f), Lin 方案的误差要小于其他方案, 尤其是在 8 月 16、28、30 日和 9 月 1 日这几个时次; 而 Morrison 2-mom 和 Thompson 两种方案的误差较大, 8 月 16 日较优的 Lin 方案 MEA 只有 $0.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右, 而 Thompson 方案的 MEA 达到了 $0.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右, Morrison 2-mom 方案也达到了 $0.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右。

3 集成预报试验

由于不同的微物理方案对不同水凝物的预报效果的优劣程度不一致, 并且受时间、地点和环境的约束, 使得预报的结果充满不确定性, 为了使最后的预报结果更加准确、充分发挥不同方案的优势、降低预报的不确定性, 本文采用等权集成(EMN)和消除偏差集成(BREM)两种方法对模式结果进行改进。图 3 所示, 对于云水(CWP)和雨水(RWP)的预报, 消除偏差集成(BREM)的误差均小于 6 种微物理方案的误差, 达到了集成改进的效果, 并且可以发现消除偏差集成比等权集成的结果更好; 从冰水(IWP)的误差分析中可以看出, 等权集成和消除偏差集成

的误差虽然比 Lin 方案的大, 但是相比于其他 5 种方案, 误差减小了。

4 个例分析

为了更加直观地看出两种集成方案对预报结果的改进, 以及模式的预报结果与实况的空间对比, 本文给出了三个变量在 2014 年 8 月 13 日 07 时的空间分布(图 4)。对比 6 种微物理方案以及 2 种集成方法对云水的预报发现(图 4a₁~4a₉), 几种方案均预报出了江苏东部黄海海域的云水, 但是其中 CAM5.1 方案和 NSSL 2-mom 方案明显可以看出, 云水含量偏大, 实况基本在 $0.05 \sim 0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 而这两方案的预报结果在 $0.2 \sim 0.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。Lin、WSM6、Thompson 和 Morrison 2-mom 方案对于 $0.01 \sim 0.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的云水没有预报出来, 范围偏小, 通过等权集成后, $0.1 \sim 0.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的区域得到改进, 更接近实况, 但是 $0.01 \sim 0.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的区域依旧没有预报出来, 不过消除偏差集成预报出了该范围的区域, 可以看出消除偏差集成后的结果与实况更加接近。

图 4b₁~4b₉ 雨水含量的分布图看出, 在该个例中, 6 种参数化方案对于雨水含量的预报范围明显偏小, 含量也偏少, 通过等权集成后并没有对这一结果有所改进, 但是消除偏差集成后, 结果有所改进。

图 4c₁~4c₉ 的分布图可以看出, 6 种方案都预报出了冰水含量的大致范围, 但含量都偏低, 其中 CAM5.1 方案与实况最为接近。在该时刻等权集

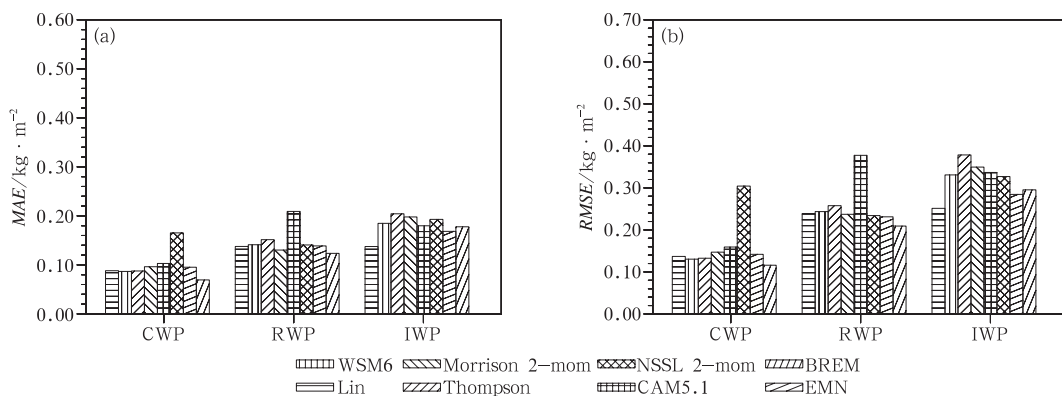


图 3 6 种微物理方案以及 2 种集成方案 19 次预报个例的平均绝对误差(a)和均方根误差(b)

Fig. 3 The mean absolute error (a) and root mean square error (b) of the six microphysics schemes and two ensemble schemes for 19 forecasting cases

成和消除偏差结果相似,且对6种方案的改进效果不太明显。

微观物理量预报结果的好坏,最终体现在对降水预报的能力上。图5给出了6种微物理方案对同

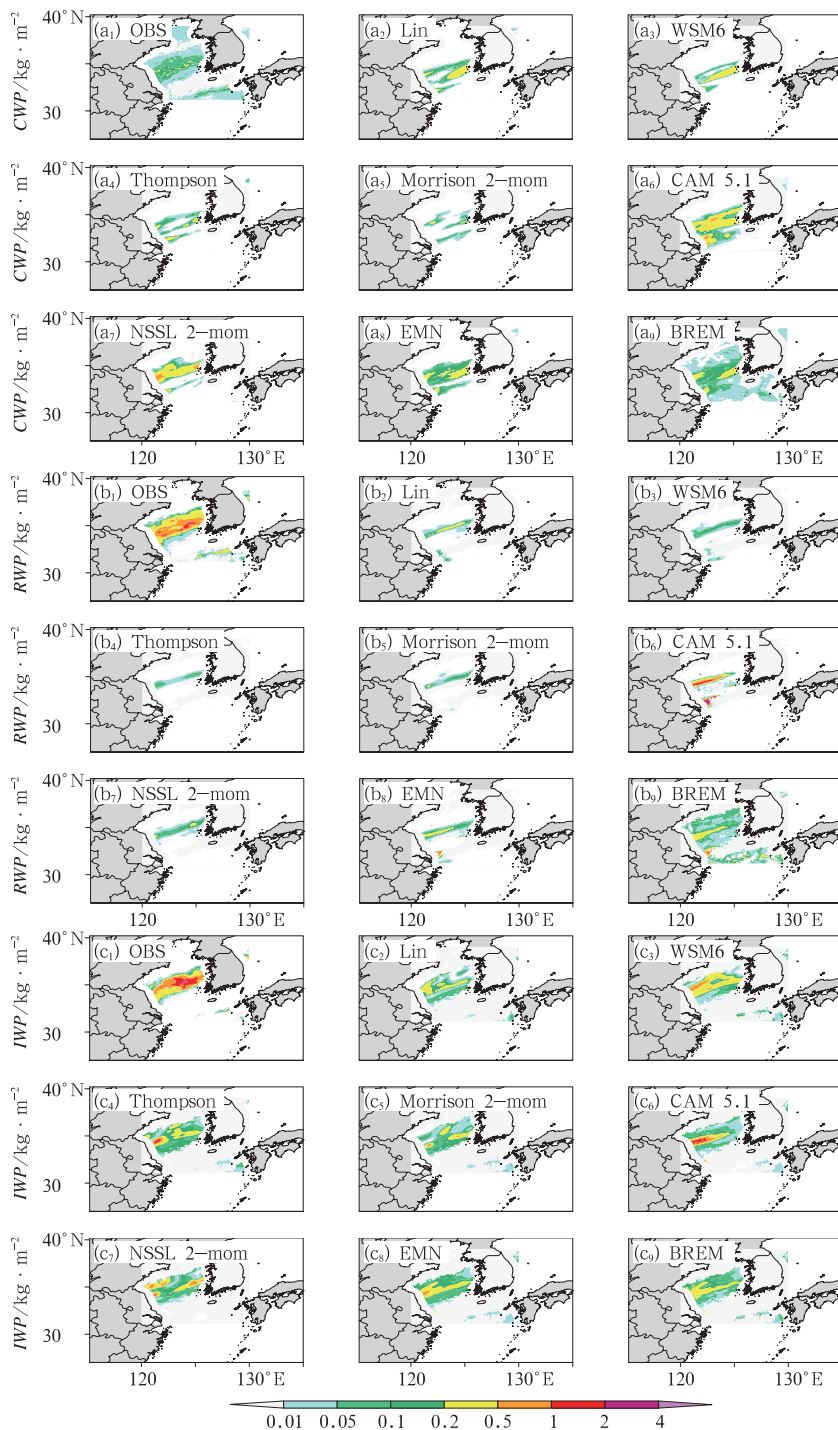


图4 2014年8月13日0700 UTC 6种微物理方案以及2种集成方案预报的江苏东部海域(30°~40°N, 120°~130°E)上空云水(CWP, $a_1 \sim a_9$)、雨水(RWP, $b_1 \sim b_9$)、冰水(IWP, $c_1 \sim c_9$)的空间分布个例

Fig. 4 Distribution of six microphysics schemes' and two ensemble schemes' forecasting average content of cloud water (CWP, $a_1 \sim a_9$), rain water (RWP, $b_1 \sim b_9$) and ice water (IWP, $c_1 \sim c_9$) over the sea to the east of Jiangsu Province (30°—40°N, 120°—130°E) at 0700 UTC 13 August 2014

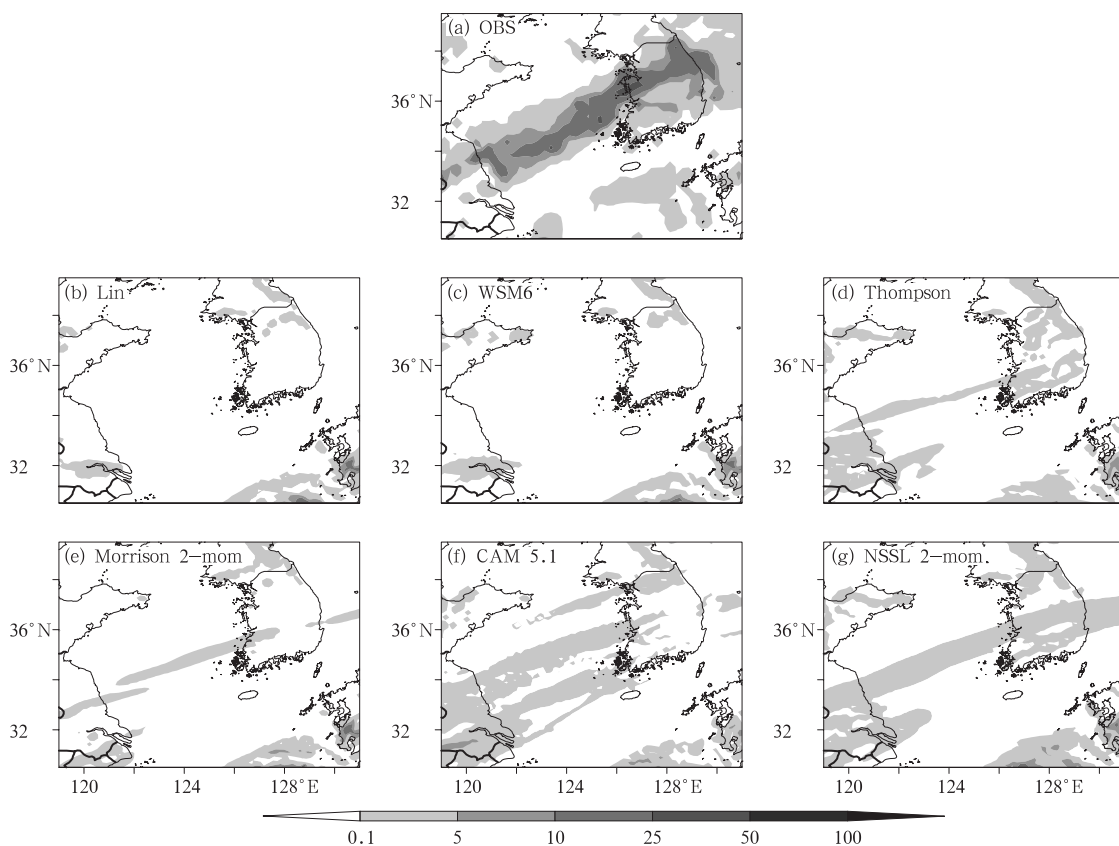


图 5 6 种微物理方案 2014 年 8 月 13 日 04:00—10:00 UTC 江苏东部海域(30°~40°N、120°~130°E)的 6 h 累积降水量(b~g)和实况(a)(单位: mm)

Fig. 5 Distribution of six microphysics schemes' 6 h accumulated precipitation (b-g) and observation (a) over the sea to the east of Jiangsu (30°-40°N, 120°-130°E) from 0400 UTC to 1000 UTC 13 August 2014 (unit: mm)

一时刻 2014 年 8 月 13 日的降水预报情况,由于海洋上没有自动站资料,因此本文使用 TMI 的反演资料。从图中可以看出,除了 Lin 和 WSM6 方案外,其他几种方案预报出了降水的大致量级以及东北—西南向的雨带走势,其中 CAM5.1 方案的结果与反演结果更为接近。Kummerow et al(2001)指出, TMI 反演结果存在一定的误差,尤其在降水率为 $6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 处反演值明显偏大,这可能是反演值在 10~25 mm 内虚假出现的原因。

5 结论与讨论

本文通过 6 种不同微物理参数化方案对江苏近海海域(30°~40°N、120°~130°E)的 19 次个例的水凝物预报性能进行了评估,并且做了集成预报试验,得到结论如下:

(1) 6 种微物理方案基本都能预报出水凝物的

大致量级。对于云水的预报值均偏大,其中 NSSL 2-mom 方案偏差较大, Lin、WSM6 和 Thompson 方案与卫星反演值较接近; CAM5.1 方案对雨水含量较多时,预报的结果较好,但对于雨水含量较小时,预报的结果较差;模式对于冰水量级的预报结果优于云水, Thompson 方案的预报结果略差于其他方案。

(2) 误差分析表明,对于云水预报, NSSL 2-mom 方案误差偏大, Lin、WSM6 和 Thompson 方案较优,与量级评估的结果相一致;对于雨水的预报, CAM5.1 误差较大,这可能与该方案对于雨水含量较小时,预报偏大有关;对于冰水的预报, Lin 方案较优,误差较小, Thompson 和 NSSL 2-mom 方案的误差稍微偏大。

(3) 通过集成处理之后,综合了各方案的优点,在一定程度上改进了模式的预报结果,降低了预报的不确定性。虽然对于冰水的预报结果不是最优,

但也算得上次优,而对于雨水和云水都属于最优结果,成功地降低了预报的误差,从水平分布图中可以发现消除偏差的集成效果要优于等权集成,消除偏差集成可以预报出几种方案均没有预报出的量级较小的水凝物,使预报结果更加准确。

本文的结论是 WRF 模式对江苏近海范围的预报结果,由于不同的地点、不同的天气过程对 WRF 预报的准确性有很大的影响,因此结论是否适用于其他区域还需要进一步的检验。

参考文献

- 陈良吕,陈静,陈德辉,等,2014. 基于 T213 集合预报的延伸期产品释用方法及初步试验[J]. 气象,40(11):1293-1301.
- 陈钰文,王佳,2015. 江苏近 35 年空中水汽资源气候特征及开发潜力分析[J]. 中国农学通报,31(21):167-176.
- 崔慧慧,智协飞,2013. 基于 TIGGE 资料的地面气温延伸期多模式集成预报[J]. 大气科学学报,36(2):165-173.
- 郭学良,付丹红,胡朝霞,2013. 云降水物理与人工影响天气研究进展(2008~2012 年)[J]. 大气科学,37(2):351-363.
- 衡志伟,宇如聪,傅云飞,等,2011. 基于 TMI 产品资料对数值模式水凝物模拟能力的检验分析[J]. 大气科学,35(3):506-518.
- 李安泰,何宏让,2011. WRF 模式中不同云微物理参数化方案对舟曲“8.8”暴雨过程模拟的影响[J]. 气象与减灾研究,34(3):9-16.
- 李勇,2016. 2011 年长江中下游梅雨期强降雨延伸期集合预报性能初探[J]. 气象,42(9):1114-1123.
- 林春泽,智协飞,韩艳,等,2009. 基于 TIGGE 资料的地面气温多模式超级集合预报[J]. 应用气象学报,20(6):706-712.
- 沈新勇,梅海霞,王卫国,等,2015. 双参数微物理方案的冰相过程模拟及冰核数浓度的影响试验[J]. 大气科学,39(1):83-99.
- 王佳,陈钰文,2015. 2010 年盛夏人工增雨防控太湖蓝藻效果分析[J]. 中国农学通报,31(14):232-237.
- 肖辉,银燕,2011. 污染气溶胶对山西一次降水过程影响的数值模拟[J]. 大气科学,35(2):235-246.
- 袁招洪,2015. 不同分辨率和微物理方案对飑线阵风锋模拟的影响[J]. 气象学报,73(4):648-666.
- 岳治国,刘晓东,梁谷,2011. 气溶胶对北京地区不同类型云降水影响的数值模拟[J]. 高原气象,30(5):1356-1367.
- 张涵斌,智协飞,王亚男,等,2015. 基于 TIGGE 资料的西太平洋热带气旋多模式集成预报方法比较[J]. 气象,41(9):1058-1067.
- 赵声蓉,2006. 多模式温度集成预报[J]. 应用气象学报,17(1):52-58.
- 智协飞,季晓东,张璟,等,2013. 基于 TIGGE 资料的地面气温和降水的多模式集成预报[J]. 大气科学学报,36(3):257-266.
- 智协飞,林春泽,白永清,等,2009. 北半球中纬度地区地面气温的超级集合预报[J]. 气象科学,32(5):569-574.
- 朱格利,林万涛,曹艳华,2014. 用 WRF 模式中不同云微物理参数化方案对华南一次暴雨过程的数值模拟和性能分析[J]. 大气科学,38(3):513-523.
- Colle B A, Garvert M F, Wolfe J B, et al, 2005. The 13-14 December 2001 IMPROVE-2 event. Part III: Simulated microphysical budgets and sensitivity studies[J]. J Atmos Sci, 62(10):3535-3558.
- He C, Zhi X, You Q, et al, 2015. Multi-model ensemble forecasts of tropical cyclones in 2010 and 2011 based on the Kalman Filter method[J]. Meteor Atmos Phys, 127(4):467-479.
- Krishnamurti T N, Kishtawal C M, Larow T E, et al, 1999. Improved weather and seasonal climate forecasts from multi-model super ensemble[J]. Science, 285(5433):1548-1550.
- Kummerow C, Hong Y, Olson W S, et al, 2001. The evolution of the goddard profiling algorithm (GPROF) for rainfall estimation from passive microwave sensors[J]. J Appl Meteor, 40(11):1801-1820.
- Rajeevan M, Kesarkar A, Thampi S B, et al, 2010. Sensitivity of WRF cloud microphysics to simulations of a severe thunder storm event over Southeast India[J]. Ann Geophys, 28(2):603-619.
- Skamarock W, Klemp J B, Dudhia J, et al, 2008. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note [R], NCAR/TN-475+STR, 113.
- Zhang H, Zhi X, Chen J, et al, 2015. Study of the modification of multi-model ensemble schemes for tropical cyclone forecasts[J]. J Tropical Meteor, 21(4):389-399.
- Zhang L, Zhi X, 2015. Multimodel consensus forecasting of low temperature and icy weather over central and southern China in early 2008[J]. J Tropical Meteor, 21(1):67-75.
- Zhi X, Qi H, Bai Y, et al, 2012. A comparison of three kinds of multimodel ensemble forecast techniques based on the TIGGE data[J]. Acta Meteor Sin, 26(1):41-51.