

于翡, 黄丽萍, 邓莲堂. 2018. GRAPES-MESO 模式不同空间分辨率对中国夏季降水预报的影响分析 [J]. 大气科学, 42 (5): 1146–1156. Yu Fei, Huang Liping, Deng Liantang. 2018. Impacts of different GRAPES-MESO model spatial resolutions on summer rainfall forecast in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (5): 1146–1156, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1710.17221.

GRAPES-MESO 模式不同空间分辨率对 中国夏季降水预报的影响分析

于翡 黄丽萍 邓莲堂

国家气象中心, 北京 100081

摘 要 国家气象中心业务运行的中尺度数值预报系统 GRAPES-MESO (Global/Regional Assimilation and Prediction System mesoscale model) 在升级到 4.0 版本后采用了与以往版本不同的三维空间分辨率设置, 本文通过计算精度分析、个例分析及统计分析的方法详细阐述了两者水平分辨率和不等距垂直分层的差异, 并由此深入分析了不同模式三维空间分辨率对中国夏季汛期降水预报的影响。主要结论表明, GRAPES-MESO 预报系统 4.0 版本在水平分辨率提高到 10 km 并同时使用更为合理的加密垂直分层设置后, 不仅提高了计算精度和计算稳定性, 同时仍能满足业务预报的时效要求。对个例降水特征的分析结果表明, 提高模式空间分辨率可以在一定程度上改善对降水中心的预报, 但对降水落区的预报改进较为有限。对 2012 年 7 月整月批量试验的统计检验结果表明, 月平均技巧评分总体变化不大, 但对逐日大到暴雨评分提高较大, 通过各气象要素统计检验分析可以认为, 模式空间分辨率提高的主要作用是通过降低了中低层高度场、温度场和水平风场的误差, 改进了对流层中层环流背景场以及对流层低层降水直接接触发系统的强度预报, 从而能够提高大到暴雨的降水评分。

关键词 GRAPES-MESO 模式 中尺度模式 空间分辨率 降水

文章编号 1006-9895(2018)05-1146-11

中图分类号 P456.7

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1710.17221

Impacts of Different GRAPES-MESO model Spatial Resolutions on Summer Rainfall Forecast in China

YU Fei, HUANG Liping, and DENG Liantang

National Meteorological Center, Beijing 100081

Abstract The Global/Regional Assimilation and Prediction System (GRAPES) mesoscale model (GRAPES-MESO) V4.0 with a new spatial resolution has been put into formal operation in the Numerical Weather Prediction Centre (NWPC) of China Meteorological Administration (CMA). This paper examines the computational accuracy of GRAPES-MESO with different spatial resolutions. The results show that the refined spatial resolution can be applied for operational forecast. Several sensitivity experiments are then performed to determine the impacts of different spatial resolutions on the forecast skill of summer rainfall in July 2012 in China. The simulation results indicate that GRAPES-MESO V4.0 with a refined spatial resolution can better improve the precipitation maxima forecast compared to precipitation location forecast. The equitable threat score (ETS) of 24 hours accumulated precipitation from the batch experiments of the whole

收稿日期 2017-08-25; 网络预出版日期 2017-11-16

作者简介 于翡, 男, 1983 年出生, 工程师, 博士, 主要从事中尺度数值天气预报模式研究。E-mail: yuf@cma.cn

资助项目 中国气象局数值预报发展专项 GRAPES-FZZX-2017-25, 国家自然科学基金项目 41705080

Funded by Numerical Prediction Developing Project of China Meteorological Administration (Grant GRAPES-FZZX-2017-25), National Natural Science Foundation of China (Grant 41705080)

July 2012 shows that heavy rainfall forecast is significantly improved. The verification of geopotential height at the middle and lower levels of the troposphere illustrates that the model with a refined spatial resolution reduces the prediction error of the geopotential height and improves the predictions of synoptic background circulation at the middle levels and systems at lower levels that can trigger precipitation. Finally, the model can increase the accuracy rate of prediction of convective systems at lower levels and improve the ETS of heavy rainfall forecast.

Keywords GRAPES-MESO model, Mesoscale model, Spatial resolution, Precipitation

1 引言

近年来,数值天气预报模式的分辨率不断提高,水平分辨率可精细到 1 km 或更细,使得模式可以解析较小尺度的物理现象。在提高模式水平分辨率的同时必须考虑垂直分辨率的影响,有研究(Lindzen and Fox-Rabinovitz, 1989)指出当垂直分辨率和水平分辨率的搭配不符合从准地转流和重力波的角度推导出垂直分辨率和水平分辨率的相互关系时,数值模式对于真实大气中特定物理现象的解析能力就可能受到影响。骆美霞等(1993, 1994)通过对全球谱模式进行敏感性试验发现减少垂直分辨率时,预报误差先在模式上层出现,然后影响到对流层中层和下层,而这与行星尺度波动的水平感热通量的垂直分布、行星尺度波动能量的垂直输送特征有关。赵宗慈和罗勇(1999)指出区域气候模式高垂直分辨率模拟的降水分布优于低垂直分辨率模式,但容易引起格点暴雨。应用 WRF 模式研究发现,模式的垂直分辨率越高,飓风的强度越强(Zhang and Wang, 2003),之后又通过理想试验指出飓风强度和垂直分辨率间并不是简单的线性关系,提高模式在特定高度层的垂直分辨率,有助于模式模拟该高度层环境对于对流系统发展的影响,这与对流层低层潜热释放密切相关,即模式中低层的加热比高层的加热对中尺度涡旋生成的影响更为明显(Zhang et al., 2015),而这也与之前的研究结果(Tracton, 1973; Anthes and Keyser, 1979;)是一致的。由此可见,模式分辨率对模式的影响是多方面的,这不仅仅是计算数学的问题,更要考虑深层的物理机制问题。

在向高分辨率数值天气预报发展的过程中,在科技部和中国气象局的支持下,我国自主发展了新一代的数值模式 Global/Regional Assimilation and Prediction System (GRAPES),及其有限区域版本 GRAPES-MESO。GRAPES-MESO 的核心部分是 GRAPES 预报模式的动力框架以及经过优化选取和改进的物理过程参数化方案,其主要特点包括采

用全可压原始方程、静力平衡与非静力平衡可以开关式置换、半隐式半拉格朗日时间平流方案、经纬度格点的网格设计、水平 Arakawa-C 网格和垂直方向高度地形追随坐标等。物理过程包括云微物理显式降水、次网格积云对流参数化、长波辐射、短波辐射、陆面过程及边界层过程。模式所有预报变量均采用矢量形式。2004 年 3 月 GRAPES-MESO 2.0 版本开始业务应用,在 2010 年 GRAPES-MESO 升级为 3.0 版本提高水平分辨率到 15 km 开始向高分辨率模式发展,2014 年 6 月 GRAPES-MESO 升级为 4.0 版本进一步提高模式的水平分辨率到 10 km,增加垂直分层数量到 50 层,并改变了垂直分辨率的分布曲线(黄丽萍等, 2017)。本文详细分析比较了 GRAPES-MESO 4.0 版本的分辨率设置,特别是新的不等距垂直分层设置,与该版本以前原垂直分层设置的差别。结合个例预报试验分析和批量预报试验统计检验的方法,比较不同水平分辨率与不同垂直分辨率设置对 GRAPES-MESO 中国区域夏季降水数值预报的影响。

2 分辨率设置及分析

GRAPES-MESO 在 4.0 版本以前,使用的垂直分层设置为总层数为 31 层(以下称为 GM31),层顶为 10 hPa 的不等距分层,这种分层设置不仅垂直分辨率过低,还存在顶层层厚变化不平滑的问题。因此,按照水平分辨率与垂直分辨率一致性原则(Lindzen and Rabinovitz, 1989),在水平分辨率提高到 10 km 后,之前与水平分辨率 15 km 相匹配的 GM31 垂直分层设置已经不再适用,为了保证中尺度模式三维空间分辨率设计的合理性(图 1a),设计了 GRAPES-MESO 4.0 版本新的垂直加密设置,即在保持原模式顶高不变的基础上,增加 15 km 以上高层的分层并优化层厚变化平滑度,同时考虑中 β 及更小尺度天气系统多发生在对流层中低层且多由边界层过程触发,故着重对低层加密最终形成新的 50 层的垂直分层设置(以下称为 GM50),层顶仍为 10 hPa(图 1b)。针对 GRAPES-MESO 垂直坐标为地形追随高度坐标的特点,对比了在有钟形山

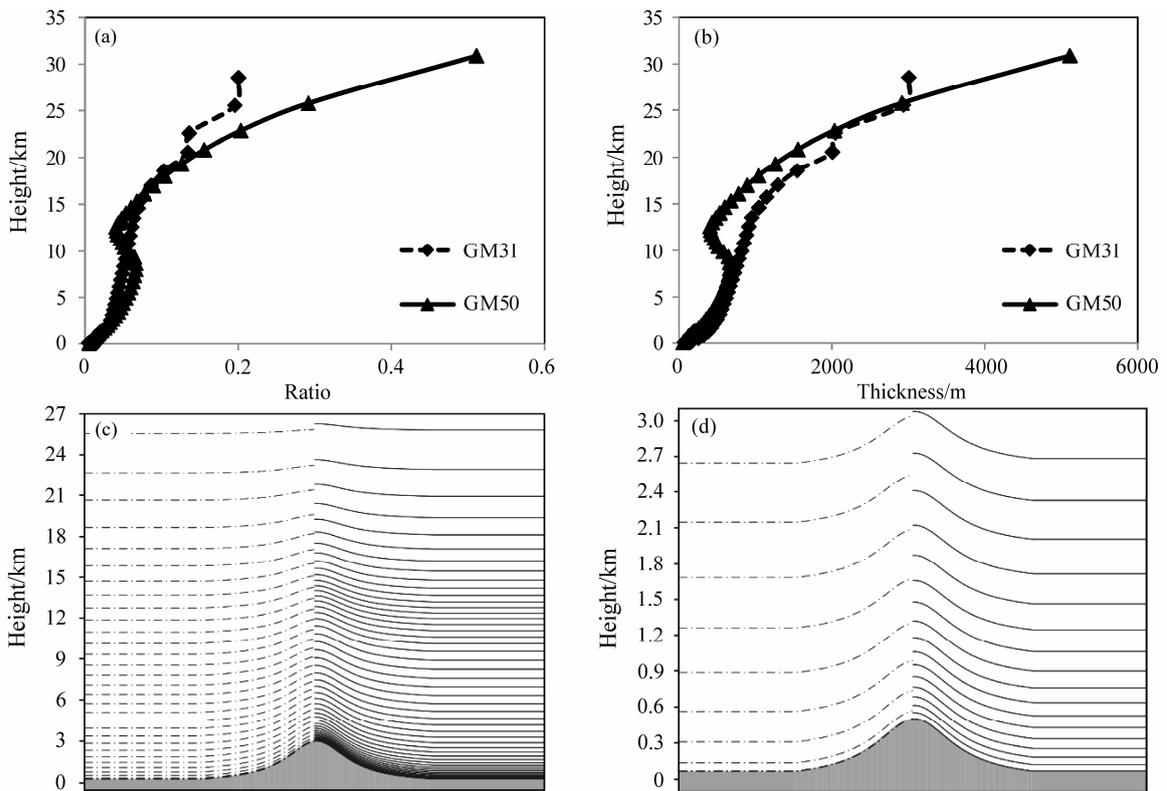


图 1 GRAPES-MESO 模式垂直分层设置对比图，纵坐标为高度（单位：km）。（a）垂直分辨率与水平分辨率的一致性比率随高度的分布对比，横坐标为垂直分辨率与水平分辨率的一致性比率；（b）垂直分层厚度随高度的分布对比，横坐标为层厚（单位：m）；（c）模式全层垂直分层分布对比，阴影为示意钟形地形；（d）3 km 以下垂直分层分布，阴影为示意钟形地形

Fig. 1 Comparison of GRAPES-MESO model vertical layer schemes: (a) Vertical distributions of consistent ratio between horizontal resolution and vertical resolution, GM31: 31 vertical layers scheme of GRAPES-MESO and GM50: 50 vertical layers scheme of GRAPES-MESO ; (b) vertical distributions of layer thickness and height, horizontal axis is layer thickness (units: m); (c) whole vertical layers distribution of GM31 and GM50; (d) vertical layers below 3 km of GM31 and GM50. The shadow in (c) and (d) indicates an ideal terrain with a bell-like shape mountain

地形时不同地形高度处垂直分层随高度的分布（图 1c、d），可以清楚的看出 GM50 在对流层低层和边界层垂直分层层数增加为 GM31 的 2~3 倍(图 1c)。

另一方面，本文应用 Sunquist and Veronis (1970) 提出模式二阶精度判断方法比较 GM31 和 GM50 对模式差分计算精度的影响，即垂直方向二阶导数 $f''(z)$ 的差分计算公式为

$$f''(z) = \left[\frac{\Delta z_2 \Delta z_1}{2} (\Delta z_1 + \Delta z_2) \right]^{-1} \cdot$$

$$\Delta z_2 \{ [f(z + \Delta z_1) - f(z)] - \Delta z_1 [f(z) - f(z - \Delta z_2)] \}, \quad (1)$$

其中， z 为所在层模式高度， Δz_1 为所在层模式高度减所在层下一层模式高度的差， Δz_2 为所在层上一层模式高度减所在层模式高度的差。当格点的非均匀性能满足：

$$\Delta z_1 - \Delta z_2 = O(\Delta z_2^2), \quad (2)$$

公式 (1) 的差分计算可以接近二阶精度，也就是说相邻两层的厚度相差不要太大的不均匀分层分布，公式 (1) 也可获得二阶精度。从图 2 可见，在 GM50 和 GM31 在模式低层的比值量级均在 10^{-3} 左右，都能够接近二阶精度，但 GM50 的比值较 GM31 更小，说明 GM50 确实可以取得比 GM31 更高的计算精度。

3 试验方案和计算性能

为对比两种不同空间分辨率对中国区域夏季降水的影响，设计了两组试验。两组试验的模式计算区域选取为与国家气象中心 GRAPES-MESO 业务中尺度数值预报系统相同的区域（黄丽萍等，2017），即（15°N~55°N，70°E~140°E）。初始场和边界条件使用美国国家环境预报中心 NCEP（National Centers for Environmental Prediction）的全球预报系统 GFS（Global Forecast System） $1^\circ \times 1^\circ$ 分辨率的预报场数据，设置 2012 年 7 月整月每日

00:00 (协调世界时, 下同) 起报, 预报时长为 48 小时。物理过程方案的选择与国家气象中心 GRAPES-MESO 业务中尺度数值预报系统相同, 即积云参数化方案为 Kain-Fritsch (Kain, 2004), 微物理过程参数化方案为 WSM6 (Lim and Hong, 2010), 长波辐射方案为 RRTM (Mlawer et al., 1997), 短波辐射方案为 Dudhia (Dudhia, 1989), 陆面过程方案为 Noah (Tewari et al., 2004), 边界层参数化方案为 MRF (Hong and Pan, 1996)。根据空间分辨率的不同共有两个试验成员, 即 H15km_L31 (水平分辨率为 15 km, 垂直分层为 GM31) 和 H10km_L50 (水平分辨率为 10 km, 垂直分层为 GM50)。

H10km_L50 的空间计算规模较 H15km_L31 的 $501 \times 332 \times 31$ 增长为 $751 \times 501 \times 50$ 。为保持水平分辨率和垂直分辨率提高后的计算稳定性, 需要将模式时间步长由原来的 90 秒缩短为 60 秒, 也就是说, 48 小时预报时效所需模拟步数则较 H15km_L31 的 1920 步增加到 2880 步, 即系统的时空计算规模分别增长了 1.5 倍和 3.6 倍, 提高了对运行模式的大型计算机的性能要求。对 2012 年 7 月 1 日 00:00 起报 48 小时个例测试结果表明, 在中国气象局 IBM Cluster 1600 机器平台下极易数据溢出中断计算, 在国家超级计算中心济南中心的神威大型机上用 1024 核可正常计算, 进行一次全国区域 10 km 的 48 小时计算所需要的时间约为 8 小时, 而在中国气象局最新配置的 IBM Flex P460 大型机上, 512 核 (CPU, 计算机运算核心和控制核心) 同时计算 40 分钟即可完成计算, 可满足业务预报运行的要求。

4 天气背景及降水特征

2012 年 7 月降水过程频繁, 主要特征为主雨带位置变化大, 降雨范围广, 其中 2012 年 7 月 21 日到 22 日京津冀地区的特大暴雨过程, 降水持续时间长, 降水强度大, 属历史罕见, 多个国家级气象站突破了建站以来的日降水量极值, 北京、天津的暴雨均为近年最强 (图 3b)。从全月的 500 hPa 位势高度场距平的经向平均和日降水距平的经向平均可以看出, 110°E 以西的对流层高层低值系统的活动与 110°E 以东的高于均值的大部分降水过程有可以相互对应, 也与该月大部分降水过程都是槽前型的特征相吻合 (图 3a、b)。

2012 年 7 月 2~3 日为中国夏季典型的梅雨降水天气过程, 其主要影响天气系统从 500 hPa 位势

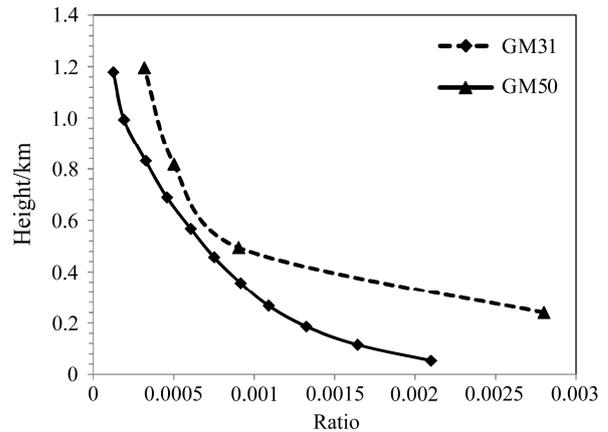


图 2 相邻层厚度比值 $(\Delta z_1 - \Delta z_2) / \Delta z_2^2$ 随高度的变化, 纵坐标为高度 (单位: km)

Fig. 2 Variation of ratio of neighborhood vertical layer thickness $(\Delta z_1 - \Delta z_2) / \Delta z_2^2$ with height (units: m)

高度场可以看到, 亚洲中高纬呈现两槽一脊型, 巴尔喀什湖北部和我国东北地区分别有一个低压槽, 贝加尔湖和蒙古高原为弱高压脊控制。此外, 在我国内蒙古东北部也有弱低压槽, 副热带高压 (简称副高) 的西脊点位置较常年同期偏西, 位于 110°E 附近, 副高西侧东南气流和西南季风带来的水汽和冷空气交汇于黄淮、江淮东部、华北南部、四川盆地、江汉以及陕西南部等地 (图 4a)。

2012 年 7 月 21~22 日为中国夏季典型的华北暴雨天气过程, 其主要影响天气系统, 从 500 hPa 位势高度可以看到乌拉尔山为阻塞高压, 贝加尔湖为低涡, 东亚为一弱脊控制, 亚洲中高纬度的环流经向度较大, 贝加尔湖低涡底部的高空槽从河套一带向东移动影响华北、黄淮西部地区, 其东侧的高压脊稳定维持, 其减缓了系统的东移速度。200 hPa 高空急流明显, 急流北支的出口区正位于华北地区上空, 高空急流二级环流伴随的高空辐散有利于上升运动和对流活动的维持发展。与此同时, 从低层 850 hPa 风场上可以看到, 在西北地区东部移出并在东移过程逐步加强, 相应有明显的冷、暖切变线, 暖性切变线南侧有较强的低空急流, 暴雨区出现在暖性切变线南侧, 因而此次暴雨的发生发展具有良好的动力条件 (图 4b)。

本文选取发生在江淮区域的 2012 年 7 月 2~3 日和雨带北抬到华北区域的 2012 年 7 月 21~22 日的典型个例进行对比分析。

5 个例对比分析

对于 2012 年 7 月 2~3 日的降水个例, 从 24

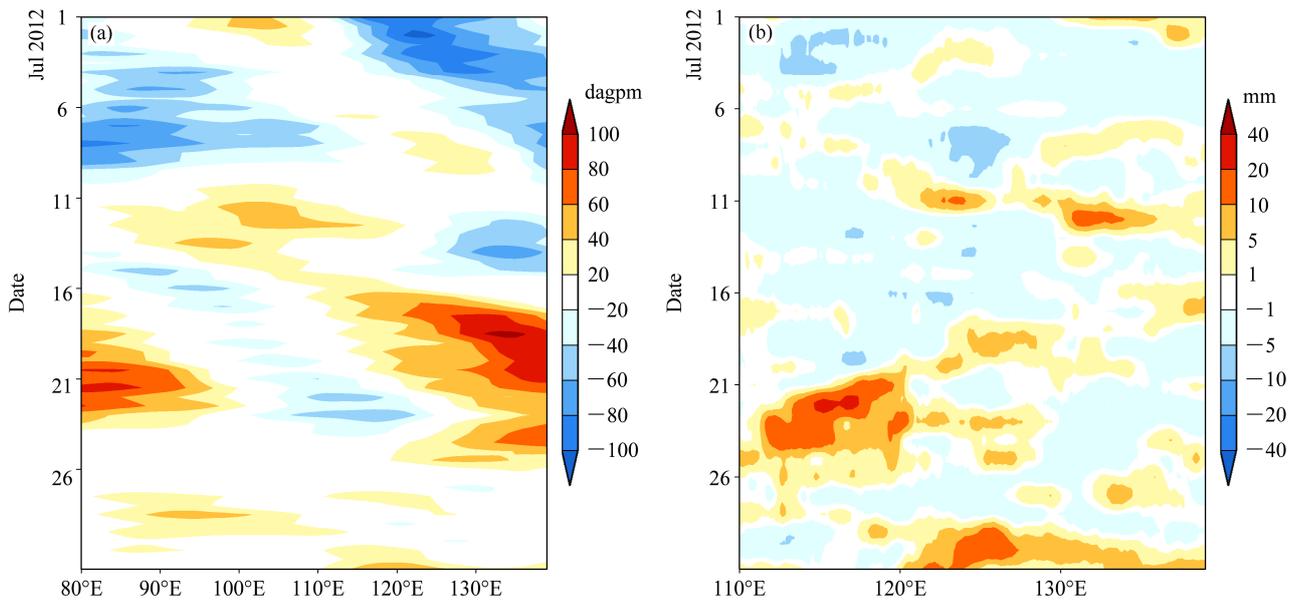


图3 2012年7月 (a) 40°N~60°N 平均的 500 hPa 高度距平场 (填色, 单位: dagpm) 以及 (b) 20°N~40°N 平均的 24 小时累计降水量距平 (填色, 单位: mm) 的时间—经度剖面

Fig. 3 Longitude-time Hovmöller diagram of (a) abnormal geopotential height (shaded, units: dagpm) at 500 hPa averaged from 40°N to 60°N and (b) 24-h accumulated precipitation (shaded, units: mm) averaged from 20°N to 40°N in July 2012

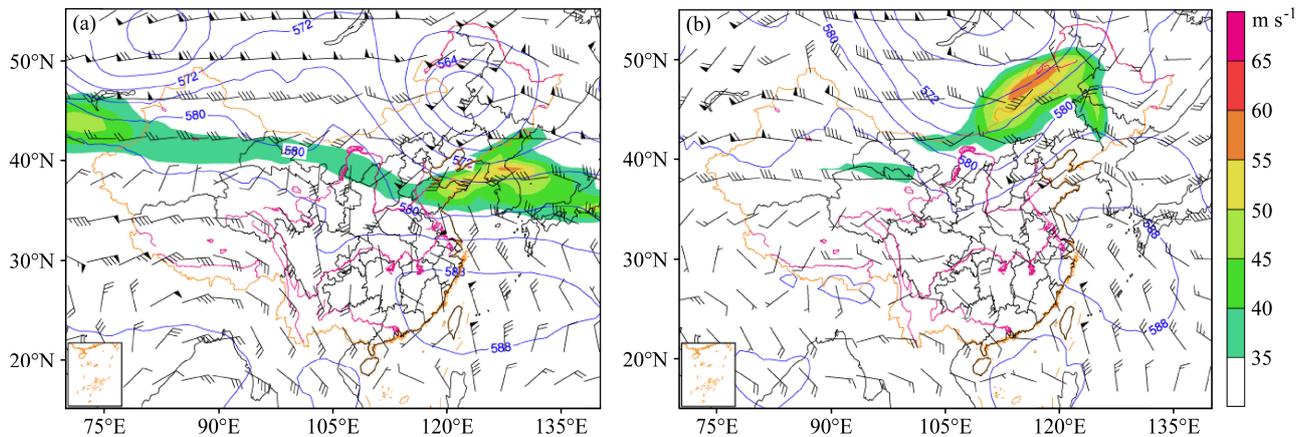


图4 2012年7月 (a) 2日、(b) 21日日平均 200 hPa 水平风速 (填色, 单位: $m s^{-1}$)、日平均 500 hPa 位势高度 (蓝色实线, 单位: dagpm) 和日平均 850 hPa 风羽 (单位: $m s^{-1}$)

Fig. 4 Daily averaged wind speed at 200 hPa (shaded, units: $m s^{-1}$), daily averaged geopotential height at 500 hPa (blue solid lines, units: dagpm), and daily averaged wind field at 850 hPa (barbs, units: $m s^{-1}$) on (a) 2 July and (b) 21 July 2012

小时累积降水量可以看出, 观测的东部海区的只有一个暴雨到大暴雨级别 (100 mm 以上) 的降水中心, 而 H15km_L31 的预报结果出现了三个分散的降水中心, 相比而言, H10km_L50 的可以较好的预报出一个降水中心, 其范围和强度均与实况相吻合, 虽然其模拟的整体雨带较实况偏北, 但相对于 H15km_L31 对本次过程的降水预报, 有着显著的改进 (图 5)。

对于 2012 年 7 月 21~22 日的个例 (图 6), 从结果可以看出, 从雨带的整体分布而言, 两组试验差别不显著, 预报结果都是西南—东北走向的雨带, 降水中心在河北东北部, 与实况中雨带东西走向, 北京西南部有大暴雨中心的特点相差较大。从降水中心而言, H10km_L50 对暴雨中心的预报较 H15km_L31 更接近北京, 走向也更趋近东西走向, 范围也更接近于实况。

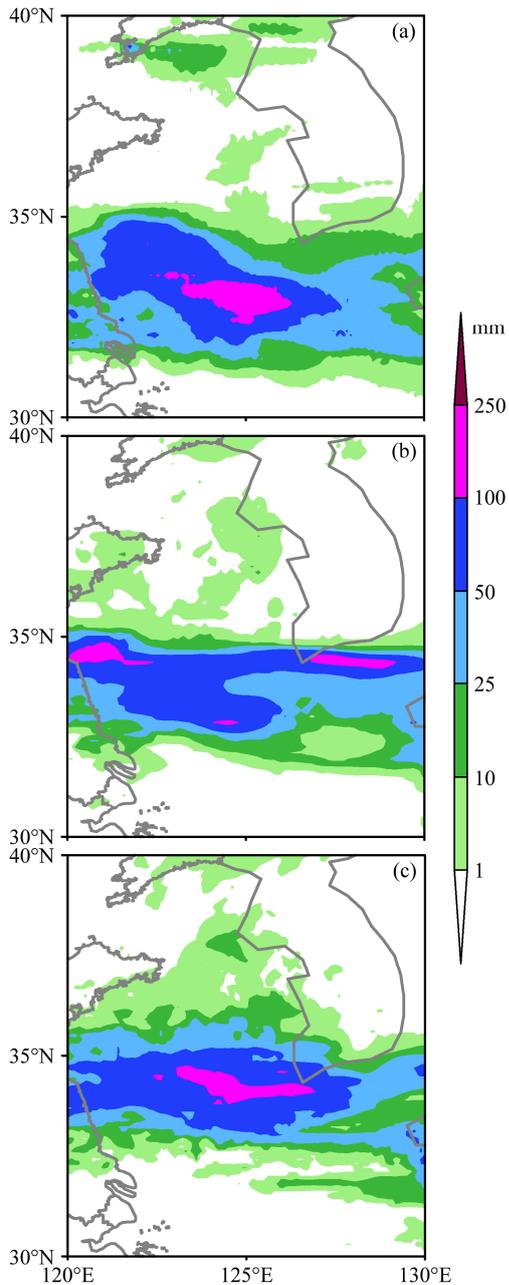


图 5 2012 年 7 月 2 日 00:00 至 3 日 00:00 24 小时累积降水量 (单位: mm; 2012 年 7 月 1 日 00:00 起报 24 到 48 小时预报): (a) 观测实况; (b) H15km_L31 (水平分辨率为 15 km, 垂直分层为 GM31); (c) H10km_L50 (水平分辨率为 10 km, 垂直分层为 GM50)

Fig. 5 24-h accumulated precipitation from 0000 UTC 2 July to 0000 UTC 3 July 2012 (units: mm; 24-48 h prediction initialized at 0000 UTC 1 July 2012): (a) Observations; (b) H15km_L31 (horizontal resolution is 15 km and vertical layers define as GM31); (c) H10km_L50 (horizontal resolution is 10 km and vertical layers define as GM50)

同时参考国家气象中心 24 小时降水检验方案 (王雨和闫之辉, 2007), 使用全国加密 2513 站降水数据对这两个个例进行了 ETS (Equitable Threat

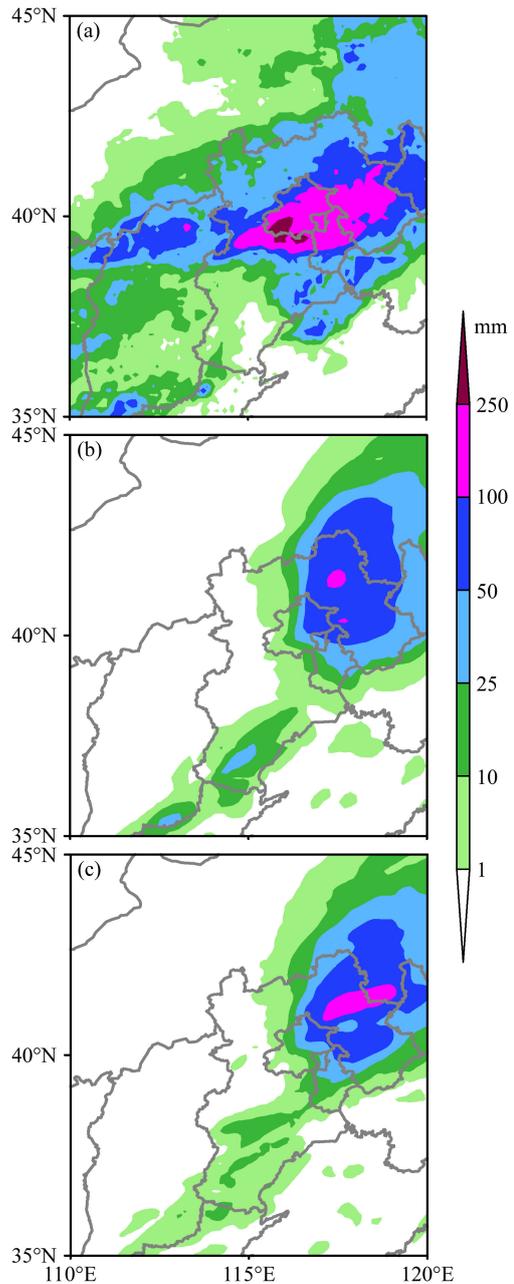


图 6 2012 年 7 月 21 日 00:00 至 22 日 00:00 24 小时累积降水量 (单位: mm; 2012 年 7 月 21 日 00:00 起报 0 到 24 小时预报): (a) 观测实况; (b) H15km_L31; (c) H10km_L50

Fig. 6 24-h accumulated precipitation from 0000 UTC 21 to 0000 UTC 22 July 2012 (units: mm; 0-24 hours prediction initialized at 0000 UTC 21 July 2012): (a) Observations; (b) H15km_L31; (c) H10km_L50

Score) 评分, 采用这种检验方法, 可有效去除随机降水概率对评分的影响, 同时也可以避免使用气候概率, 将数值预报资料从格点插值到观测站。分为 5 个等级: 小雨、中雨、大雨、暴雨及特大暴雨, 分别为 24 小时降水量达到或不小于 1 mm、10 mm、20 mm、50 mm 及 100 mm。可以看出, 对于 2012

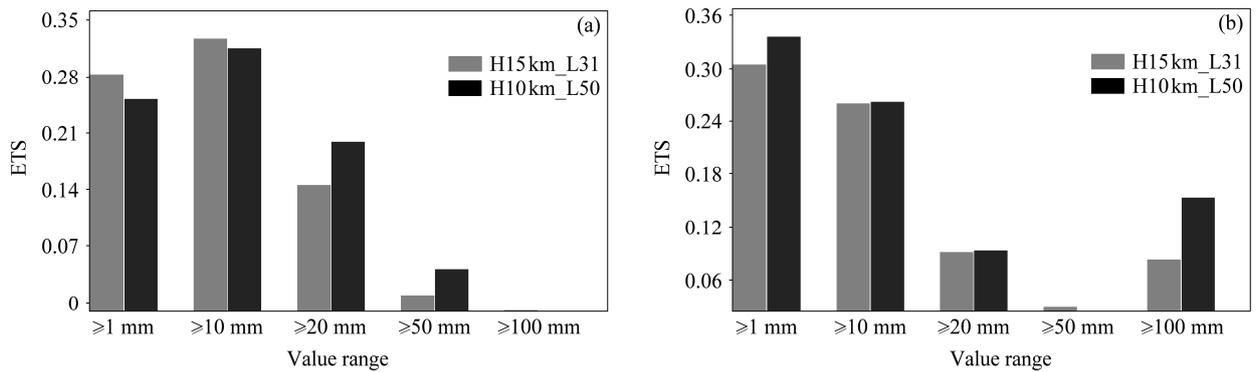


图 7 24 小时累积降水量 ETS (Equitable Threat Score) 评分: (a) 2012 年 7 月 1 日 00:00 起报 24~48 预报; (b) 2012 年 7 月 21 日 00:00 起报 0~24 小时预报

Fig. 7 ETS (Equitable Threat Score) of 24-h accumulated precipitation: (a) 24-48 hours prediction initialized at 0000 UTC 1 July 2012; (b) 0-24 hours prediction initialized at 0000 UTC 1 July 2012

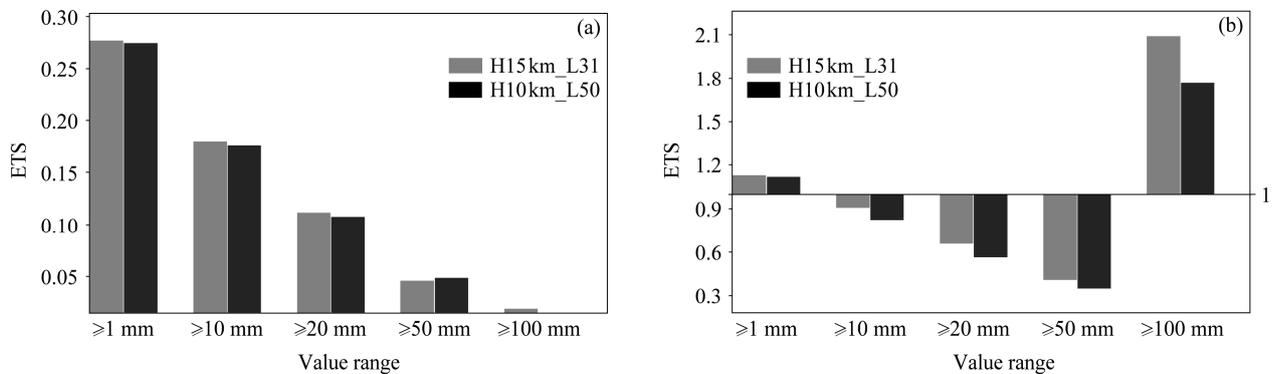


图 8 预报 24 小时累积降水量评分: (a) 月平均 ETS 值; (b) 月平均 Bias 值

Fig. 8 Verification of 24-h accumulated precipitation: (a) Monthly averaged ETS for July 2012; (b) monthly averaged Bias for July 2012

年 7 月 2~3 日的 24 小时累积降水, H10km_L50 较 H15km_L31 显著提高了大到暴雨的 ETS 评分, 而小到中雨的降水评分略有下降 (图 7a), 这与前面分析的 H10km_L50 较 H15km_L31 降水中心集中, 但整体雨带较偏北的结论相吻合。2012 年 7 月 21~22 日的 24 小时累积降水, H10km_L50 较 H15km_L31 显著提高了小雨和特大暴雨的 ETS 评分, 中雨和大雨的 ETS 评分基本接近, 这与前面分析的 H10km_L50 较 H15km_L31 暴雨中心的预报更接近北京, 走向也更趋近与实况一致的东西走向, 河北南部的降水更小更接近实况, 但整体雨带均为西南-东北走向与实况东西走向差别较大等的结论一致。

综合以上对两个个例的分析, 一方面可以说明提高空间分辨对改善模式降水预报有一定影响, 但影响程度与个例有关, 并不能从根本上改变模式降水预报; 另一方面, 也说明使用 24 小时累积降水的 ETS 评分能够得到与主观分析相一致的结论, 可

以在批量试验中继续应用这一方法进行统计检验。

6 批量试验统计检验

对 2012 年 7 月整月的批量试验进行了 ETS 评分和预报偏差 Bias 的统计检验发现, 月平均的各级降水 ETS 评分变化不大, 暴雨的 ETS 略有提高, 但其他级别的降水 ETS 评分略有减少 (图 8a), 月平均预报偏差 Bias 也可以看出显著降低了特大暴雨的漏报, 但略微增加了小雨的漏报和中到暴雨的空报 (图 8b)。

对特大暴雨 ETS 评分的逐日曲线分析可以发现, 2012 年 7 月 ETS 评分共有 6 个峰值, 分别对应了 2~3 日、6~7 日、9~11 日、12~13 日、14~17 日和 21~22 日的强降水过程, H10km_L50 较 H15km_L31 对后三次过程评分有所提高, 但对前三次的预报差别不大甚至变差 (图 9)。结合前文分析, 说明提高空间分辨率, 对提高强降水的预报影响较大, 但并非是一致的的变好或者变差, 总体而

言, 提高分辨率有利于改善降水的预报, 但不会对每例强降水过程都有改善作用。

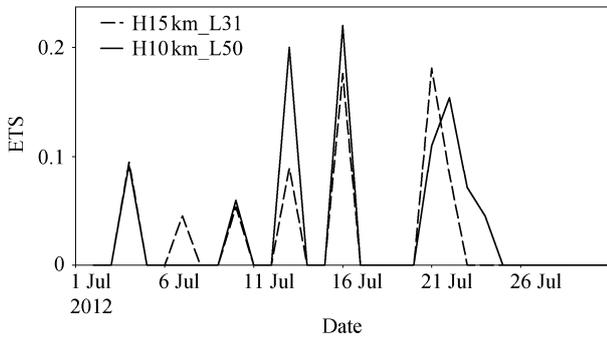


图9 2012年7月逐日24小时特大暴雨量级降水的ETS评分值
Fig. 9 ETS of 24-h accumulated heavy rain precipitation in July 2012

使用NCEP的GFS分析场对预报结果进行了等压面要素检验 (Murphy and Epstein, 1989), 计算了模式等压面上的风场、温度场和位势高度场的均方根误差 (Root Mean Square Error, 简称 RMSE) 和距平相关系数 (Anomaly Correlation Coefficient, 简称 ACC)。整体来看, H10km_L50 和 H15km_L31 的位势高度场, 等压面风场和温度场的 ACC 曲线基本重合, 平均值的变化率较小, 这说明 H10 km_L50 和 H15km_L31 均能对降水系统及其环流条件的位置作出较好的预报。但从 RMSE 的各个曲线上来看, H10 km_L50 都有所改进 (图 10、图 11), 这说明在系统强度的预报上, H10 km_L50 比 H15 km_L31 有了显著的提高。从图 10 可以看出, 500

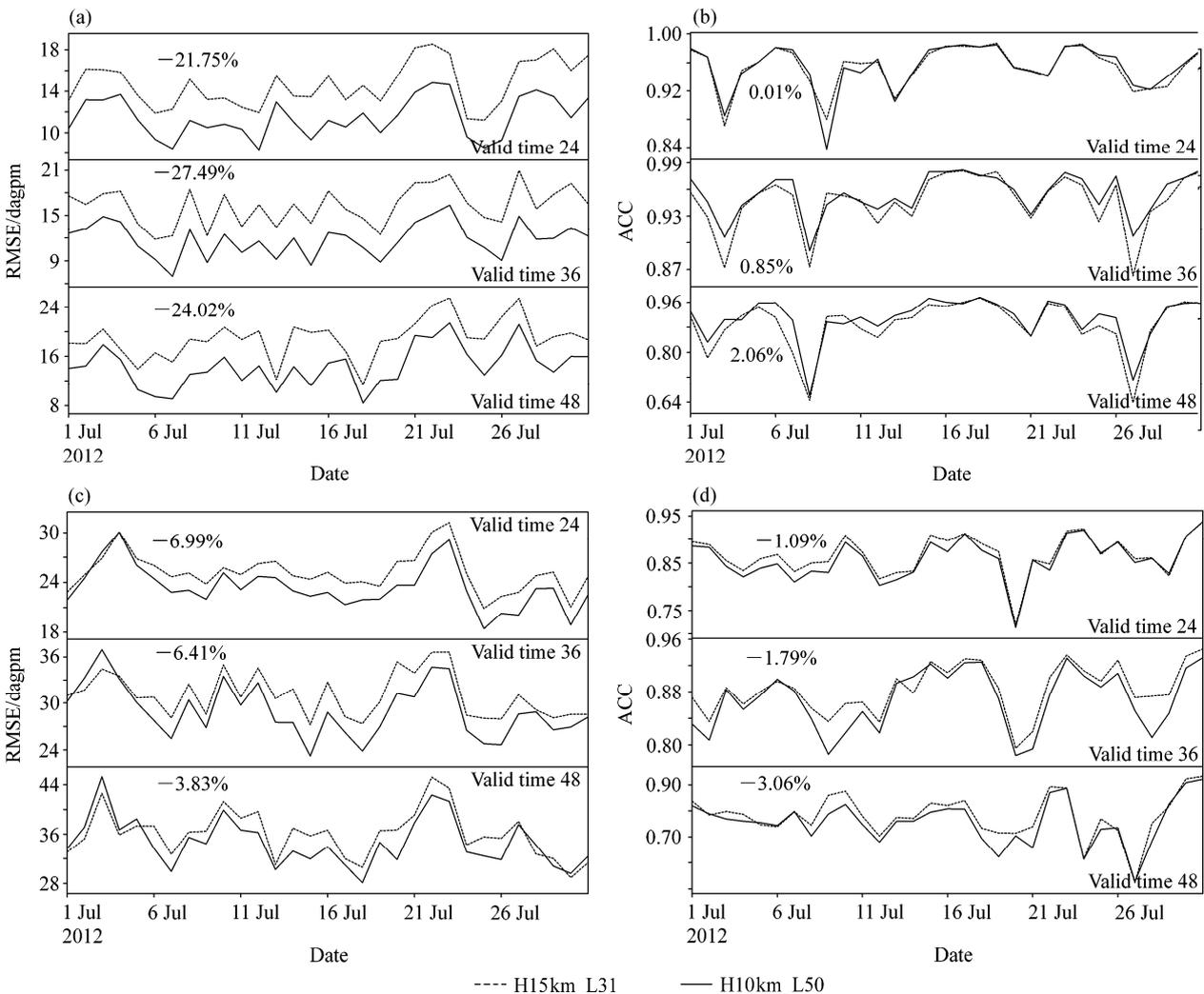


图 10 逐日 24 小时、36 小时和 48 小时预报时效 (Valid time 24、36 和 48) 位势高度场的均方根误差 (RMSE, 单位: dagpm; 左列) 和距平相关系数 (ACC; 右列) 检验: (a、b) 500 hPa; (c、d) 850 hPa。百分数表示 H10km_L50 对 H15km_L31 平均值的变幅
Fig. 10 RMSE (Root Mean Square Error; units: dagpm; left column) and ACC (Anomaly Correlation Coefficient; right column) verification of geopotential height at 24-h, 36-h and 48-h (Valid time 24, 36, and 48) forecast times at a, b) 500 hPa and (c, d) 850 hPa. Percentages are for percent differences between H10km_L50 m and H15km_L31 mean value

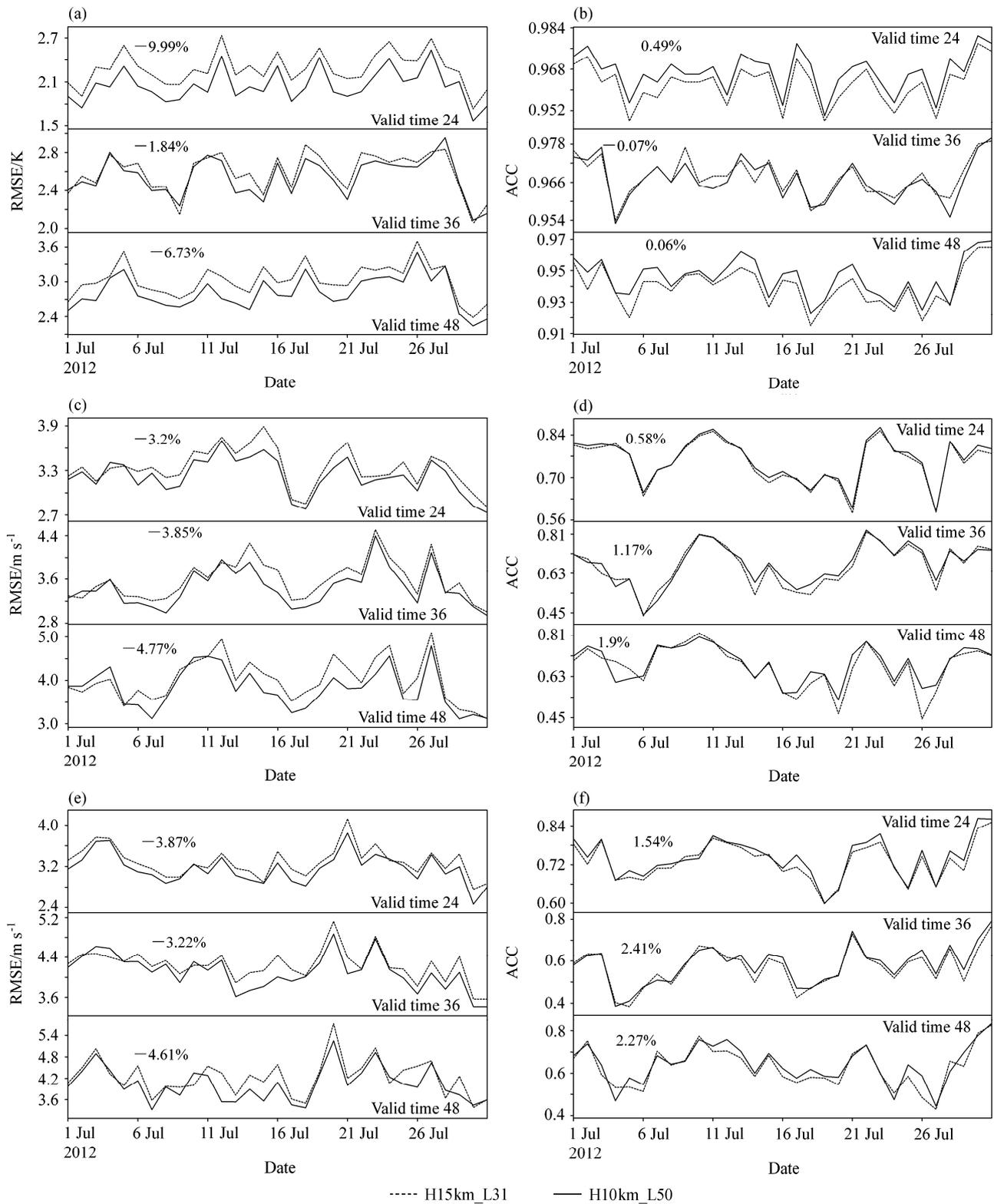


图 11 逐日 24 小时、36 小时和 48 小时预报时效 (Valid time 24、36 和 48) 850 hPa 变量的 RMSE (左列) 和 ACC (右列) 检验: (a、b) 温度场; (c、d) 经向风分量场; (e、f) 纬向风分量场。百分数为 H10km_L50 对 H15km_L31 平均值的变幅
Fig. 11 RMSE (left column) and ACC (right column) verification of variables at 850 hPa at 24-h, 36-h and 48-h (Valid time 24, 36, and 48) forecast times: (a, b) Temperature; (c, d) meridional wind component; (e, f) zonal wind component. Percentages are for percent differences between H10km_L50 m and H15km_L31

hPa 和 850 hPa, H10 km_L50 各预报时效的位势高度场 RMSE 都比 H15 km_L31 的小,说明 GRAPES-MESO 模式加密空间分辨率可以在保持中低层位势高度场的距平相关系数基本不变的情况下显著降低相应层次位势高度场的均方根误差。其中 500 hPa 位势高度场的 RMSE 显著减少,说明加密空间分辨率后,模式对天气尺度背景环流形势强度的预报有明显提高。而直接造成强降水的中尺度系统(如切变线、中尺度涡旋等)主要位于对流层的中低层。由图 11 可知, H10 km_L50 对低层(850 hPa)风场和温度场的预报也有一定提高,这说明特别针对低层加密的模式能够在系统位置预报不变的情况下有效地提高对锋面、冷暖平流、层结条件(这些因子与温度场有关)、低空急流、中尺度切变线和低涡等(这些因子由风场决定)与降水直接相关的因子的强度预报,这对于提高降水的预报能力是至关重要的。因而提高模式空间分辨率对 GRAPES-MESO 模式夏季降水预报的影响主要是显著改善了对流层中层环流背景场以及对流层低层降水直接触发系统的强度预报。因此,通过增加模式三维空间分辨率,可以改善模式对对流天气系统的预报的准确率,从而能够提高大到暴雨的降水评分。

7 总结与讨论

GRAPES-MESO 4.0 版本水平分辨率提高为 10 km,同时垂直加密方案在保持原模式顶高不变的基础上,着重加密低层和中高层,最终垂直分层设置加密为 50 层,尤其是 1 km 以下比原有 GM31 分层增加了 10 层,保持了与水平分辨率为 15km 和垂直分辨率为 31 层较为接近的一致性比率,去除了原有顶层层厚变化不平滑的问题,提高了计算精度。系统的时空计算规模分别增长了 1.5 倍和 3.6 倍,在国家气象局新配置的 IBM Flex P460 大型机上,计算使用 512 核耗时约 90 分钟,因此,更新后的模式仍能满足业务预报的时效要求。

对 2012 年 7 月 2~3 日江淮梅雨暴雨和 2012 年 7 月 21~22 日的华北夏季暴雨两个例进行降水特征分析说明,提高水平分辨率到 10 km 并加密垂直分层为 50 层后,可以在一定程度上改善降水中心的预报,但对整体降水落区的预报的改进较有限。而对 2012 年 7 月整月的批量试验的统计检验结果表明月平均技巧评分变化不大,但对逐日大到暴雨评分提高较大,结合等压面各气象要素统计检验分

析说明提高模式三维空间分辨率有效减少了 GRAPES-MESO 模式中低层高度场、温度场和水平风场的误差,从而改善了对流层中层环流背景场以及对流层低层降水直接触发系统的强度预报,改进了降水中心的预报效果,最终提高了大到暴雨的降水评分。但仍应注意到提高模式空间分辨率并不是对所有的降水个例都有显著效果,这可能是对于模式来说,水平方向上解析的最小物理现象长度为 6 倍的格距,垂直方向上能解析的最小物理现象长度为 $4\Delta z$,当有较小尺度的波时,模式会将次网格尺度的波解析为波长较长的波,而产生更大的误差,导致提高分辨率也不能减小误差。因此,要全面认识不同分辨率对 GRAPES-MESO 模式预报各方面要素的影响,还需要今后更多更深入的研究分析。

参考文献 (References)

- Anthes R A, Keyser D. 1979. Tests of a fine-mesh model over Europe and the United States [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 107 (8): 963-984, doi:10.1175/1520-0493(1979)107<0963:TOAFMM>2.0.CO;2.
- Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 46 (20): 3077-3107, doi:10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2.
- Hong S Y, Pan H L. 1996. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 124 (10): 2322-2339, doi:10.1175/1520-0493(1996)124<2322:NBLVDI>2.0.CO;2.
- 黄丽萍, 陈德辉, 邓莲堂, 等. 2017. GRAPES Meso V4.0 主要技术改进和预报效果检验 [J]. *应用气象学报*, 28 (1): 25-37. Huang Liping, Chen Dehui, Deng Liantang, et al. 2017. Main technical improvements of GRAPES Meso V4.0 and verification [J]. *J. Appl. Meteor. Sci.* (in Chinese), 28 (1): 25-37, doi:10.11898/1001-7313.20170103.
- Kain J S. 2004. The Kain Fritsch convective parameterization: An update [J]. *J. Appl. Meteor.*, 43 (1): 170-181, doi:10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2.
- Lim K S S, Hong S Y. 2010. Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 138 (5): 1587-1612, doi:10.1175/2009MWR2968.1.
- Lindzen R S, Fox-Rabinovitz M. 1989. Consistent vertical and horizontal resolution [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 117 (11): 2575-2583, doi:10.1175/1520-0493(1989)117<2575:CVAHR>2.0.CO;2
- 骆美霞, 张道民, 徐飞亚. 1993. 全球谱模式不同垂直分层对数值预报影响的敏感性试验 [J]. *大气科学*, 17 (5): 563-575. Luo Meixia, Zhang Daomin, Xu Feiya. 1993. The sensitivity of numerical forecasts to the model's vertical extent in the global spectral model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 17 (5): 563-575, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1993.05.08.
- 骆美霞, 徐飞亚, 宋正山. 1994. 全球谱模式不同垂直分层对纬向基本气流和行星尺度波动物理量的影响 [J]. *大气科学*, 18 (2): 184-193.

- Luo Meixia, Xu Feiya, Song Zhengshan. 1994. The influence of spectral model's vertical extent on mean zonal flow and physical quantities for planetary waves [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 18 (2): 184–193, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1994.02.06.
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated- k model for the longwave [J]. J. Geophys. Res., 102 (D14): 16663–16682, doi:10.1029/97JD00237.
- Murphy A H, Epstein E S. 1989. Skill scores and correlation coefficients in model verification [J]. Mon. Wea. Rev., 117 (3): 572–582, doi:10.1175/1520-0493(1989)117<0572:SSACCI>2.0.CO;2.
- Sundqvist H, Veronis G. 1970. A simple finite difference grid with non-constant intervals [J]. Tellus, 22, 26–31.
- Tewari M, Chen F, Wang W, et al. 2004. Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model [C]. 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction, 11–15.
- Tracton M S. 1973. The role of cumulus convection in the development of extratropical cyclones [J]. Mon. Wea. Rev., 101 (7): 573–592, doi:10.1175/1520-0493(1973)101<0573:TROCCI>2.3.CO;2.
- 王雨, 闫之辉. 2007. 降水检验方案变化对降水检验评估效果的影响分析 [J]. 气象, 33 (12): 53–61.
- Wang Yu, Yan Zhihui. 2007. Effect of different verification schemes on precipitation verification and assessment conclusion [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 33 (12): 53–61, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2007.12.008.
- Zhang D L, Wang X X. 2003. Dependence of hurricane intensity and structures on vertical resolution and time-step size [J]. Adv. Atmos. Sci., 20 (5): 711–725, doi:10.1007/BF02915397.
- Zhang D L, Zhu L, Zhang X J, et al. 2015. Sensitivity of idealized hurricane intensity and structures under varying background flows and initial vortex intensities to different vertical resolutions in HWRF [J]. Mon. Wea. Rev., 143 (3): 914–932, doi:10.1175/MWR-D-14-00102.1.
- 赵宗慈, 罗勇. 1999. 区域气候模式在东亚地区的应用研究——垂直分辨率与侧边界对夏季季风降水影响研究 [J]. 大气科学, 23 (5): 522–532.
- Zhao Zongci, Luo Yong. 1999. Investigations of application for the regional climate model over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (5): 522–532, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1999.05.02.