



二十面体网格和经纬网格全球模式 在中国区域模拟效果对比

摘要

为了评估二十面体网格全球模式 MPAS 和经纬网格全球模式 WRF 在中国区域的模拟效果,对比了两模式对 2010 年 10 月 23—28 日中国区域的涡度场、降水场、高度场和温度场的模拟效果,结果表明:在 30 和 60 km 准均匀模拟下,MPAS 和 WRF 模式对中国区域 500 hPa 高度处涡度场的模拟效果都比较好,但都难以模拟出局地的涡度极值中心,两模式模拟效果相当;从第 3 天的日累积降水的模拟结果来看,两模式基本都能模拟出降水分布情况,MPAS 模式模拟结果整体要优于 WRF,WRF 对降水中心的模拟要优于 MPAS;MPAS 对高层高度场和温度场的模拟较好,WRF 对中、低层的模拟较好,且 WRF 的预报时效性比 MPAS 长;网格分辨率的提高对 MPAS 模式模拟效果的改善不大,而 WRF 模式的模拟效果得到了提高。

关键词

中国区域;二十面体网格;经纬网格

中图分类号 P459.9

文献标志码 A

收稿日期 2015-09-27

资助项目 国家自然科学基金(41175089)

作者简介

刘维,男,硕士生,主要从事大气动力学及数值模拟研究,nuoliuwei@foxmail.com

刘宇迪(通信作者)男,副教授,博士生导师,主要从事数值模式开发和大气动力学研究,ydliu0509@163.com

0 引言

球面水平网格的选择是全球大气数值模式的动力框架设计中首先要考虑的问题.由于数值解的计算精度与网格分辨率有关,模式所能描写的波动也随网格不同而异,因此合理的网格设计能有效提高模式的性能和计算效率.目前全球大气模式普遍采用传统的经纬网格,WRF^[1]就是典型应用经纬网格的模式.但是传统的经纬网格^[2]存在极点奇异和网格线在极区附近辐合的缺点,这不仅会造成计算资源的浪费,同时也会影响模式物理参数化方案^[3]的应用效果,使得本身只适合在大尺度环境背景下使用的参数化方案,在网格距向极区的逐渐减小过程中,变得不适用,因此设计一种均匀、无奇异点的理想球面水平网格,成为各国气象工作者不断追求的目标.二十面体网格是满足此条件的一种球面网格^[4],是一种由均匀的二十个球面三角形组成的非结构球面网格,当然正二十面体的每一个面可以进一步细分,其中最大网格距和最小网格距的近似比率约为 1.2,是一种比较均匀的球面网格,这种网格没有极点奇异,没有分辨率的聚集,也没有网格的重叠现象^[5].

美国国家大气研究中心(NCAR)和美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)共同研发的 MPAS 模式^[6]就是采用的二十面体网格,是一种全球非静力跨尺度数值天气预报模式,水平方向采用交错的 C 网格^[7-8],垂直方向采用追随地形高度坐标系,时间积分采用分裂显式三阶 Runge-Kutta 方案.MPAS 模式是 2013 年对外公开源代码的,但离实际应用和业务运行还有一段距离,目前国外已有学者用理想个例对 MPAS 的模拟效果做过一些评估^[9-11].Park 等^[12]利用扩展的 JW (Jablonski & Williamson)斜压波测试个例评估了 MPAS 模式的大气动力框架,结果表明 MPAS 大气模式能较好地模拟出 JW 斜压波正模态的结构特征以及非线性斜压波的发展.并且在网格加密区域,小尺度流体特征也能较好地模拟出来,在加密网格向粗网格的过渡区域,也并不存在明显的波动扭曲变形,表明 MPAS 在多尺度流体模拟上具有较好的应用前景.

MPAS 是一个全球模式,但对中国区域的模拟效果怎样,并没有学者进行检验,并且 MPAS 和 WRF 的差异如何也并不知晓,为此本文

¹ 解放军理工大学 气象海洋学院,南京,211101

用 MPAS 大气模式和 WRF 全球模式模拟一次天气过程,通过分析两个模式在中国区域的模拟效果,对比评估两种拥有不同网格结构模式的模拟性能。

1 个例选择

选取的个例为 2010 年 10 月 23—28 日的一次天气过程,该过程全球同时生成三个台风,其中两个在大西洋,一个在太平洋。Skamarock 等^[6]利用本次个例检验过 MPAS 大气模式准均匀网格和可变量分辨率网格在全球的模拟性能,主要分析了 500 hPa 高度场和温度场、5 d 累积降水和 500 hPa 相对涡度场,结果显示预报场和分析场的结果非常相似。本文也选取此个例,主要是为了进一步检验 MPAS 模式在中国区域以及在不同高度层的模拟效果。

2 资料和模式设置

模式初始场选择 CFSR 再分析资料,精度为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,同时也将 CFSR 再分析资料作为实测场,对比分析模式的模拟效果,另外选取中国自动站与 CMORPH 降水产品融合的逐时降水量产品作为降水参考场。

模拟开始时间为 2010 年 10 月 23 日 00 时(世界时),模拟时间长度为 5 d。为了比较同一模式不同分辨率对模拟效果的影响,本次实验中 MPAS 大气模式网格分辨率选择了 163842 和 655362 两种单元数,对应的 WRF 全球模式分辨率分别为 60 和 30 km。两模式垂直方向均取 41 层,模式参数化方案均采用 WSM6 云微物理方案、K-Fritsch 深对流方案、Noah 陆面方案、YSU 边界层方案、RRTMG_LW 长波辐射方案、RRTMG_SW 短波辐射方案、Monin-Obukhov 表面层方案以及 Cld_Fraction 长波和短波辐射的局地云量参数化方案等。本文主要通过分析涡度场、降水场、高度场和温度场的模拟效果,来检验 MPAS 和 WRF 模式的模拟性能。

3 结果分析

3.1 500 hPa 涡度场

涡度是一个相对比较重要的气象变量,对大气环流形势的变化具有重要的指导意义,其表达式如下:

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

图 1 显示了在 30 和 60 km 精度下,MPAS 和 WRF 模式对 500 hPa 等压面上涡度场的模拟情况。

从图 1e 可以看出,2010 年 10 月 26 日中国区域 500 hPa 等压面上,大部分区域涡度值在 $(-0.5 \sim 0.5) \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 之间,在甘肃北部和东部区域分别存在一小值中心,中心值在 $-1.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 左右,而 CFSR 资料分析表明该涡度低值中心是虚假的。在 30 和 60 km 精度下,从两模式在中国区域的模拟结果来看,大部分区域涡度场的量级也都在 $(-0.5 \sim 0.5) \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 之间,正负区域的分布情况和再分析资料的结果比较一致,特别是在中国南部,模拟得都比较好,而在华北区域则都存在一定的误差。从极值中心的模拟效果来看,两模式在 30 和 60 km 精度下的模拟效果都比较差,低值中心没有被模拟出来,在甘肃东部区域应该是一低值中心,但两模式的模拟结果显示,在该区域的涡度值为正,另外在西南部也都出现了虚假的低值中心。总体上,在 30 和 60 km 精度下,两模式对中国区域 500 hPa 高度处环流形势的模拟效果都比较好,但难以模拟出局地的流场运动情况。

3.2 降水

图 2 显示了 MPAS 和 WRF 在不同分辨率下模拟的第 3 天的日累积降水分布场。从降水场分布情况来看,两模式都能很好的将该天的降水分布情况模拟出来,特别是在中部地区,整体的降水量级也和实测相符合,但从降水范围上来看,MPAS 模拟的结果要优于 WRF 模拟的结果,降水范围比 WRF 模拟的要小,更接近实测值。具体到降水中心,从图 2e 可以看出,实测场有两个降水中心,第一个位于四川的东北部,强度在 15~20 mm 之间,第二个则位于云南南部,强度在 35~40 mm 之间。如图 2a 和 2b 所示,在 60 km 精度下,MPAS 和 WRF 模式都能很好的模拟出这两个降水中心的强度,但降水中心的位置向西北方向都有不同程度偏移,从第一个降水中心的模拟结果来看,MPAS 和 WRF 模拟的结果都向北偏移了 0.5° 左右,而两模式对第二个降水中心的模拟结果显示,降水中心都偏移到了云南西北部,偏移幅度较大。当精度提高到 30 km 时(图 2c、2d),两个模式模拟的降水中心位置保持不变,但范围和强度都有不同程度的加大,且 MPAS 增加的幅度要明显高于 WRF,产生较为明显的大范围虚假降水,模拟结果要差于 WRF。当将这一天累积降水分对流性降水和网格尺度降水分别分析时(图略),可发现 MPAS 模拟的降水中心强度和范围随网格分辨率的变化主要受网格尺度降水的影响,可见 MPAS 模式模拟的网格尺度降水对网格分辨率比较敏感,造成了一定的误

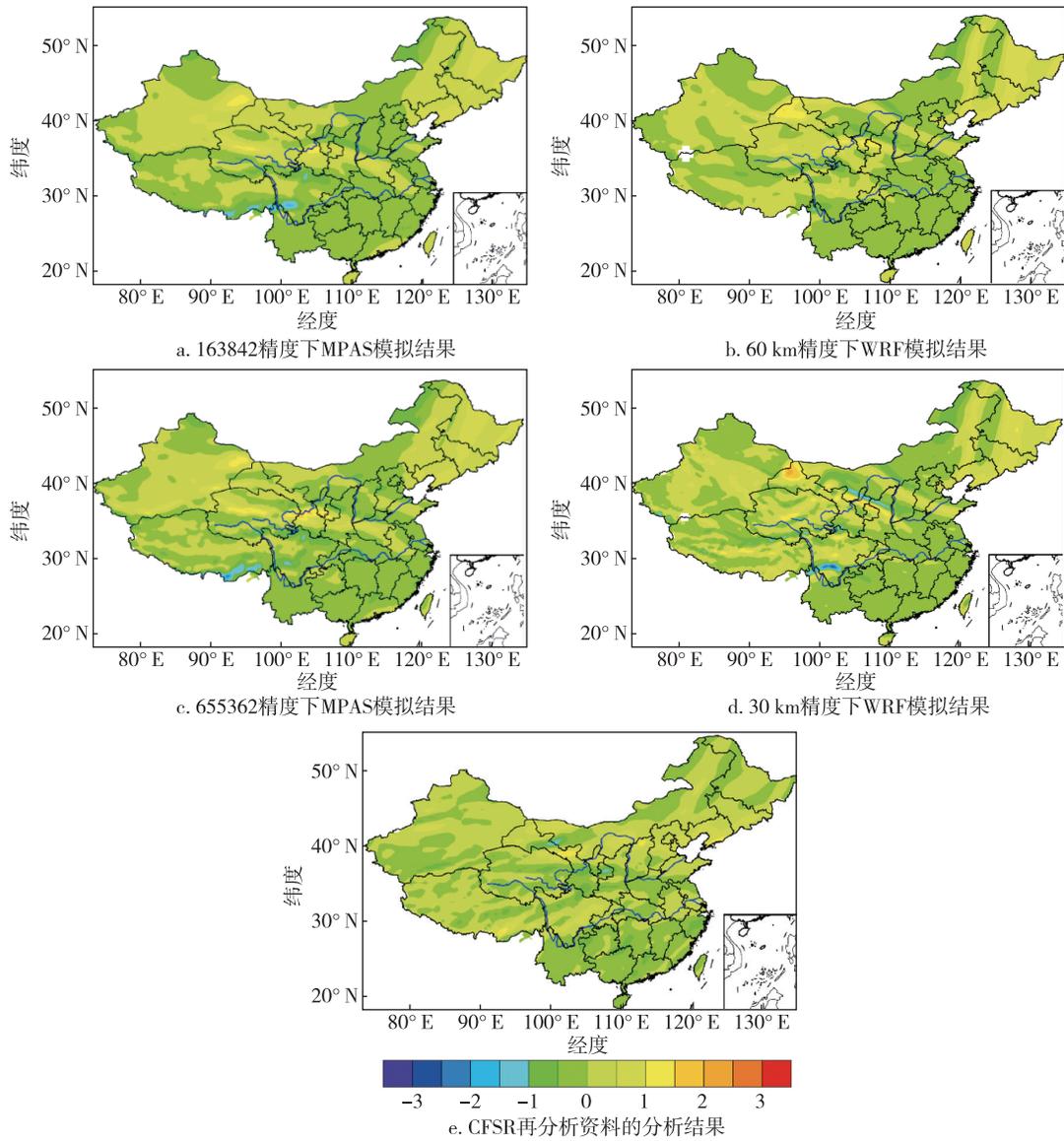


图1 26日00时中国区域500 hPa等压面上的相对涡度(单位: $10^{-4} s^{-1}$)

Fig. 1 Relative vorticity at 500 hPa at 0000 UTC on October 26, 2010 in China (units in $10^{-4} s^{-1}$)
a. and c. for MPAS simulation under 163842 and 655362 resolution, respectively; b. and d. for WRF simulation under 30 km and 60 km, respectively; and e. for CFSR reanalysis result

差.总的来说,对于降水的模拟,在准均匀模拟下(30、60 km),MPAS和WRF模式都能大体模拟出降水的分布情况,且MPAS模拟的结果要优于WRF模式,但对降水中心的模拟,WRF模式要优于MPAS模式.

3.3 高度场和温度场

对于高度场和温度场,本文采用误差范数来评估模式的模拟效果,误差范数的表达式如下:

$$l_2(F) = \frac{\{I[(F_n(S) - F_0(S))^2]\}^{\frac{1}{2}}}{\{I[F_0(S)^2]\}^{\frac{1}{2}}},$$

$$其中, I[F(S)] = \frac{\sum_{S=1}^{N_s} F(S)A(S)}{\sum_{S=1}^{N_s} A(S)},$$

这里的 $F_n(S)$ 表示

在网格单元 S 上模拟得到的某一要素场, $F_0(S)$ 表示网格单元 S 上的解析解或再分析资料的要素场, $A(S)$ 为网格单元的面积, N_s 为网格单元总数.

图3显示了不同分辨率和不同高度下,MPAS和WRF模拟的高度场和温度场误差范数在不同预报时效下的值.由图3a可以看出,在60 km精度下,

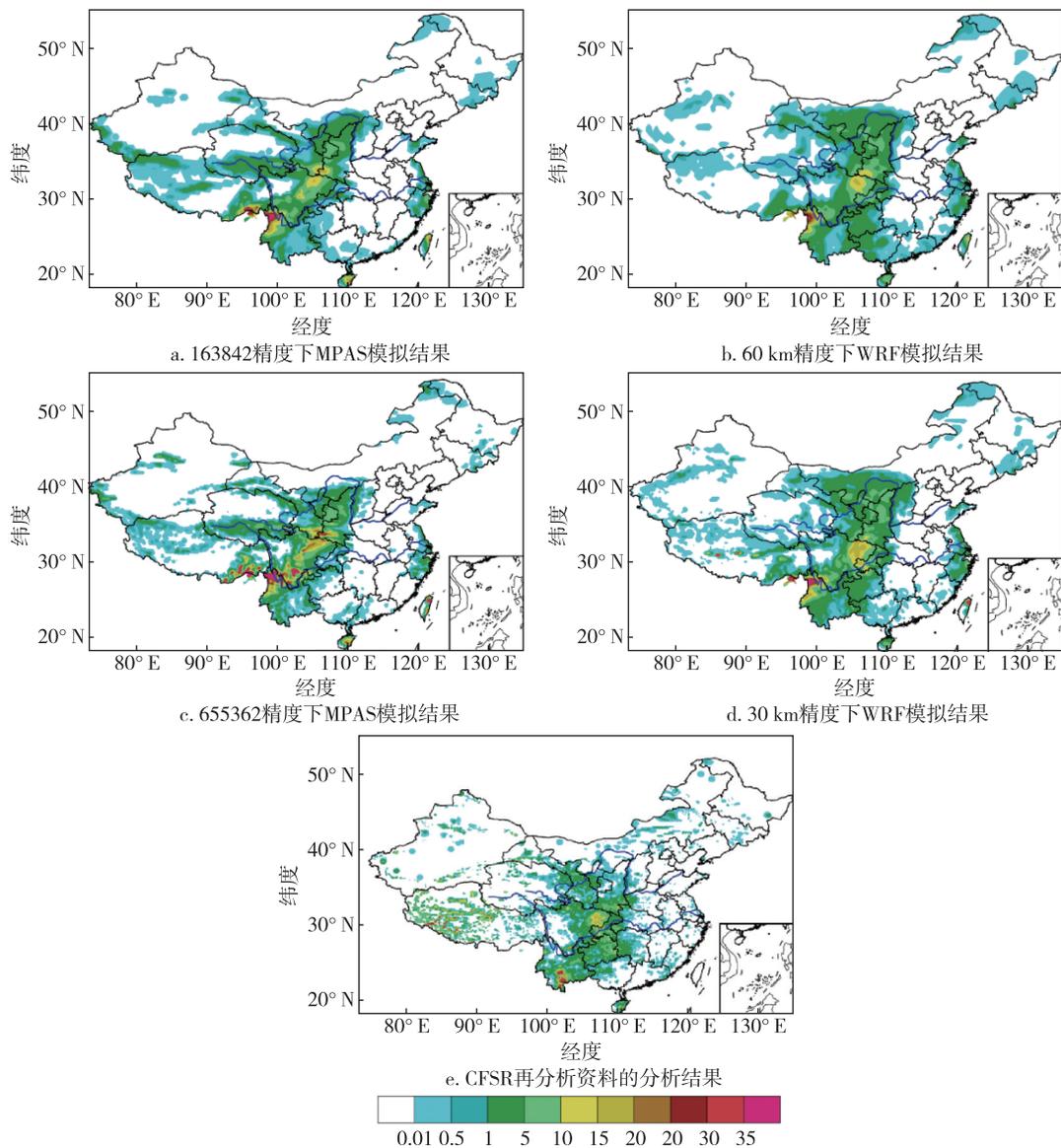


图2 26日00时的日累积降水分布(mm)

Fig.2 The 1-day accumulated rainfall distribution at 0000UTC on October 26, 2010

a. and c. for MPAS simulation under 163842 and 655362 resolution, respectively;
 b. and d. for WRF simulation under 30 km and 60 km, respectively; and e. for measured accumulated rainfall

MPAS 和 WRF 模式模拟的高度场误差范数(简称为 l_{2-H})随着预报时效的延长,都表现为逐渐加大的趋势,且高度越低, l_{2-H} 值越大.和 WRF 模拟的结果相比,MPAS 模拟的在低层的值较大,随着预报时效的延长,其增大的幅度也要大于 WRF, WRF 模拟的 l_{2-H} 增加相对比较平缓;在中层,在预报时效小于 60 h 时,两模式模拟的 l_{2-H} 大小相当,而在 60 h 以后,MPAS 模拟的 l_{2-H} 增大得较快, WRF 相对比较稳定;在高层,MPAS 模拟的 l_{2-H} 相对较小,且随时间增加的幅度也较小.当精度提高到 30 km 后(图 3b),

MPAS 模拟的 l_{2-H} , 在高层有一定的减小,而在中低层,并没有明显的变化, WRF 模拟的 l_{2-H} , 随着预报时效的延长,高、中、低层的值都有相应的减小.综合表明 MPAS 对高层高度场的模拟比较好,对中、低层的模拟不如 WRF,且 WRF 的预报时效性比较长.

由图 3c 和图 3d 可以看出, MPAS 和 WRF 模式模拟的温度场误差范数(简称为 l_{2-T})也是随着预报时效的延长而逐渐加大,但其值在各个高度层比 l_{2-H} 都要大,在垂直方向上的情况和 l_{2-H} 的也不一致,整体上, l_{2-T} 在高低层的值比中层的值要大,从两模式

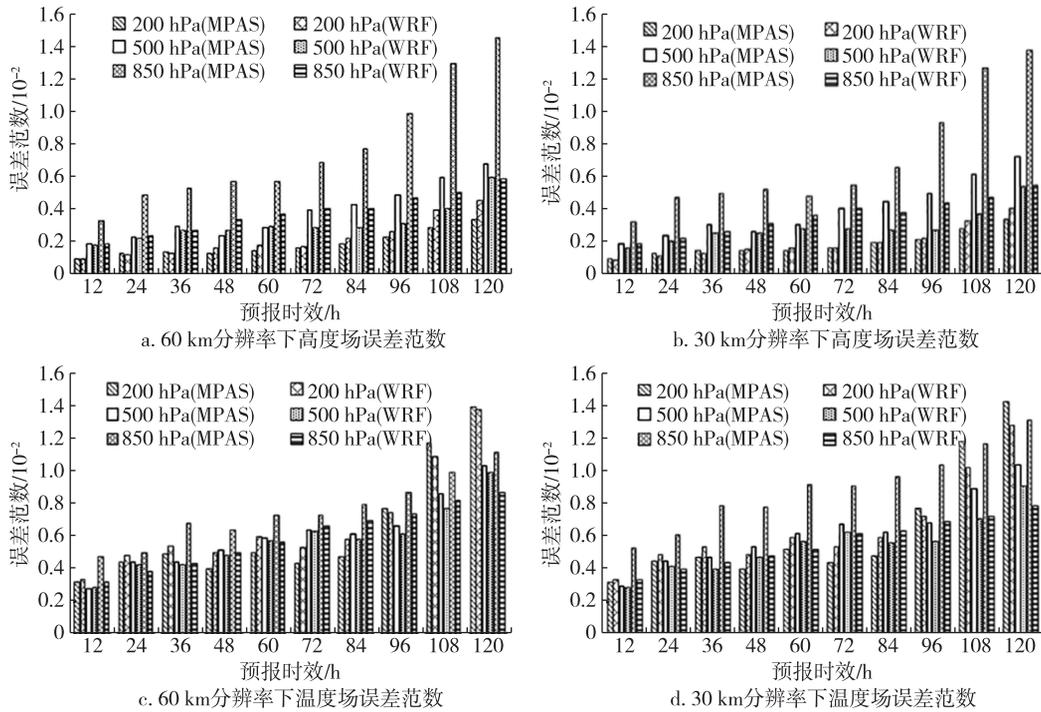


图3 MPAS和WRF模式模拟的各高度层上高度场和温度场误差范数随预报时效的变化

Fig. 3 Comparison of error norms for height (a. and b.) and temperature (c. and d.) simulated by MPAS and WRF at different levels and period of validity

模拟结果的对比中可以发现,在预报时效小于84 h时,MPAS模拟的 l_{2-T} 在高层稍小,中、低层则稍大,而当预报时效延长到84 h以后时,其值在高、中、低层都稍大.当精度提高到30 km后(图3d),MPAS模拟的 l_{2-T} 在高层和中层并没有明显的变化,而在低层反而会增大,对于WRF,在模拟精度提高后,其模拟的 l_{2-T} 会相应的有所减小,并且预报时效越长越明显.同样可以发现,MPAS对高层温度场的模拟也较好,而对中、低层的模拟不如WRF,且在预报时效性的表现上也不如WRF.

4 结果与讨论

本文分别用MPAS和WRF模式对2010年10月23—28日的一次天气过程进行了模拟,通过分析涡度、降水、高度和温度场的模拟结果,检验采用二十面体网格的MPAS模式和经纬网格的WRF对中国区域天气的预报效果.结果表明:

1) 对涡度场的分析结果表明,在30和60 km准均匀模拟下,MPAS和WRF模式对中国区域500 hPa高度处涡度场的模拟效果都比较好,但都难以模拟出局地的涡度极值中心,两模式模拟效果相当.

2) 对降水场的分析结果表明,对于降水的模拟,在准均匀模拟下(30、60 km),MPAS和WRF模式都能大体模拟出降水的分布情况,且MPAS模拟的结果要优于WRF模式,但对降水中心的模拟,WRF模式要优于MPAS模式.

3) 从高度场和温度场的误差范数分析结果来看,MPAS对高层高度场和温度场的模拟比较好,对中、低层的模拟不如WRF,且WRF的预报时效性比较长.

4) 当模拟精度提高后,MPAS和WRF模式对涡度场和降水场的模拟效果没有得到改善,对高度场和温度场的模拟,MPAS模式的模拟效果改善不大,而WRF模式的模拟效果整体得到了提高.

从以上的分析结果可知,在30和60 km准均匀模拟下,MPAS对高层气象要素场的模拟效果较好,对中、低层气象要素场的模拟效果明显不如WRF模式,MPAS模式在模拟大气环流形势上具有一定的优势.

在理论上二十面体网格的计算特性要优于经纬网格,避免了很多经纬网格的缺点,但要将其真正应用到预报业务中,充分发挥出它的优点,还需要气象工作者进一步努力加以改进.

参考文献

References

- [1] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A description of the advanced research WRF version 3 [R]. NCAR Technical Note, NCAR/TN-475+STR, 2008
- [2] Nickovic S, Gavrilo M B, Tosic I A. Geostrophic adjustment on Hexagonal grids [J]. Mon Wea Rev, 2002, 130 (3): 668-683
- [3] Beljaars A C. Numerical schemes for parameterizations [C] // Proceedings of ECMWF Seminar on Numerical Methods in Atmospheric Models, 1991, 2: 1-42
- [4] Majewski D, Liermann D, Prohl P, et al. The operational global icosahedral hexagonal gridpoint model GME: Description and high-resolution tests [J]. Mon Wea Rev, 2002, 130 (2): 319-338
- [5] 刘宇迪, 崔新东, 艾细根. 全球大气数值模式动力框架研究进展 [J]. 气象科技, 2014, 42 (1): 1-12
LIU Yudi, CUI Xindong, AI Xigen. Advances in researches on dynamic frameworks of global atmospheric numerical models [J]. Meteorological Science and Technology, 2014, 42 (1): 1-12
- [6] Skamarock W C, Klemp J B, Duda M G, et al. A multiscale nonhydrostatic atmospheric model using centroidal voronoi tessellations and C-grid staggering [J]. Mon Wea Rev, 2012, 140 (9): 3090-3096
- [7] Ju L L, Ringler T, Gunzburger M. Voronoi tessellations and their application to climate and global modeling [J]. Lecture Notes in Computational Science and Engineering, 2011, 80: 313-342
- [8] Thuburn J, Ringler T, Skamarock W C, et al. Numerical representation of geostrophic modes on arbitrarily structured C-grid [J]. Journal of Computational Physics, 2009, 228 (22): 8321-8335
- [9] Park S-H, Klemp J B, Skamarock W C. A comparison of mesh refinement in the global MPAS-A and WRF models using an idealized normal-mode baroclinic wave simulation [J]. Mon Wea Rev, 2014, 142 (10): 3614-3634
- [10] Rauscher S A, Ringler T. Impact of variable-resolution meshes on midlatitude baroclinic eddies using CAM-MPAS-A [J]. Mon Wea Rev, 2014, 142 (11): 4256-4268
- [11] Skamarock W C, Park S-H, Klemp J B, et al. Atmospheric kinetic energy spectra from global high-resolution non-hydrostatic simulations [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2014, 71 (11): 4369-4381
- [12] Park S-H, Skamarock W C, Klemp J B, et al. Evaluation of global atmospheric solvers using extensions of the Jablonowski and Williamson baroclinic wave test case [J]. Mon Wea Rev, 2013, 141 (9): 3116-3129

Global mode simulation results comparison between icosahedron spherical mesh and latitude-longitude mesh in China

LIU Wei¹ LIU Yudi¹ ZHAO Shimei¹

¹ Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

Abstract To assess the simulation effects of MPAS with icosahedral mesh and WRF with latitude-longitude mesh in global modes, the simulated vorticity, precipitation, height and temperature from these two models in China from October 23, 2010 to October 28, 2010 were compared. Results show that both the MPAS and WRF simulate the vorticity at 500 hPa with good effects under 30 km and 60 km resolutions, yet none of them can accurately simulate the extreme value centers of vorticity. From the simulation results of the accumulated precipitation at the 4th day, both the MPAS and WRF can simulate the rainfall distribution, and MPAS is superior to WRF in general simulation result, while WRF is superior to MPAS in precipitation value centers simulation. MPAS works well for height and temperature fields at upper level; while WRF is good for those at middle and low level, and long in forecast validity period than MPAS. The increase of mesh resolution improves the simulation effect of WRF, and affects little on MPAS simulation.

Key words China; icosahedral mesh; latitude-longitude mesh