

程锐, 宇如聪, 徐幼平, 等. 2019. 非静力 AREM 模式设计及其数值模拟. II: 数值模拟试验 [J]. 大气科学, 43 (1): 1–12. CHENG Rui, YU Rucong, XU Youping, et al. 2019. Design of non-hydrostatic AREM model and its numerical simulation. Part II: Numerical simulation experiments [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43 (1): 1–12, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1712.17201.

非静力 AREM 模式设计及其数值模拟 II: 数值模拟试验

程锐^{1,2} 宇如聪¹ 徐幼平¹ 王斌¹ 宋帅³ 顾春利²

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG), 北京 100029

2 地理信息工程国家重点实验室, 西安 710054

3 中国人民解放军 32033 部队, 海口 571100

摘 要 在程锐等 (2018) 中, 我们完成了非静力 AREM (Advanced Regional Eta-coordinate Model) 模式动力框架设计。本文将通过理想和实例试验检验其模拟能力。设计理想试验并通过与国际成熟的中尺度非静力框架比较, 直接检验非静力 AREM 三维动力框架在细致分辨率 (约 1 km) 下的模拟性能。可以看出, 非静力 AREM 与 ARPS (Advanced Regional Prediction System)、WRF (Weather Research and Forecasting Model) 模拟出类似的积云对流结构及演变特征, 从而基本确证了本文发展的非静力框架的正确性。结合原静力平衡模式的初始化和物理参数化过程, 形成非静力 AREM 模式系统。台风实例模拟表明, 粗分辨率下静力、非静力 AREM 模式性能接近; 但在高分辨率下, 非静力明显优于静力模式。我们还开展了批量降水试验检验, 对非静力 AREM 模式性能进行了进一步的验证。

关键词 AREM 模式 非静力动力框架 理想试验 台风模拟 降水检验

文章编号 1006-9895(2019)01-0001-12

中图分类号 456

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1712.17201

Design of Non-hydrostatic AREM Model and Its Numerical Simulation Part II: Numerical Simulation Experiments

CHENG Rui^{1,2}, YU Rucong¹, XU Youping¹, WANG Bin¹, SONG Shuai³, and GU Chunli²

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an 710054

3 The 32033 Troop of PLA, Haikou 571100

Abstract The design of non-hydrostatic core for Advanced Regional Eta-coordinate Model (AREM) has been presented in Cheng et al. (2018). The non-hydrostatic AREM is tested through the idealized and real-data numerical experiments in the present part. Firstly, the authors carry out high resolution idealized simulation (about 1 km) and compare the non-hydrostatic core of AREM with advanced non-hydrostatic frames, which are commonly used for research and operational forecasting. It can be seen that non-hydrostatic cores of AREM, Advanced Regional Prediction System (ARPS) and Weather Research and Forecasting Model (WRF) yield similar structural and evolitional features of

收稿日期 2017-07-25; **网络预出版日期** 2018-02-02

作者简介 程锐, 男, 1975 年出生, 高工, 主要从事数值模式及数值预报应用研究。E-mail: c4rui@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2017YFB1002702, 国家自然科学基金项目 91637211、61572058

Funded by National Key Research and Development Plan (Grant 2017YFB1002702), National Natural Science Foundation of China (Grants 91637211, 61572058)

convection, which basically proves the soundness and validity of the non-hydrostatic dynamic core of AREM. In association with the existing initialization techniques and physical packages of current hydrostatic model, non-hydrostatic AREM has the capability of real-data simulation. The typhoon Rananim (2004) is then simulated using this non-hydrostatic model and results are verified against various observations. The results reveal that the non-hydrostatic AREM can reproduce the hydrostatic simulation at lower resolution (for example, 37 km) and it can outperform the hydrostatic version of AREM at finer resolution (for instance, 8 km). Finally, the non-hydrostatic version of AREM is evaluated through quantitative testing on the precipitation hindcasting in July of 2010.

Keywords AREM (Advanced Regional Eta-coordinate Model), Non-hydrostatic dynamic core, Idealized experiment, Typhoon simulation, Precipitation test

1 引言

对动力框架进行理想检验的主要思想是构造反映一定物理特性的理想试验, 并进行模式实现, 然后将模拟结果和已知或公认的流型、模态进行比较, 从而检验模式框架的性能, 其中包括山脉波检验 (Clark, 1977; Dudhia, 1993; Janjic et al., 2001; 韩慎友, 2009), 重力内波检验 (Skamarock and Klemp, 1994; 韩慎友, 2009), 密度流检验 (Straka et al., 1993; Janjic et al., 2001; 韩慎友, 2009) 以及热泡检验 (Tripoli, 1992; Wicker and Skamarock, 1998; Janjic et al., 2001; 韩慎友, 2009)。通过上述理想试验, 可以评估模式准确刻画具有气象意义重要模态的可信性、准确性和有效性。由于计算条件和理论求解的限制, 许多新发展的非静力框架都有简化的二维版本, 从而可基于二维模式验证动力框架的性能, 这样既节省计算资源, 又有较多成熟的结果可供比较 (如 MM5、NCEP-ETA 模式的检验)。但我们知道, 二维运动虽然是三维运动的简化, 但两类运动仍然性质不同, 本文将通过与国际成熟的中尺度动力框架模拟结果的比较, 直接检验非静力 AREM 三维动力框架的性能。

另外, 通过较粗分辨率的实例模拟试验, 可以探讨非静力框架在较大尺度范围内是否依然保留了原静力平衡框架的模拟能力。这是验证新框架性能的又一种方法, 如 Dudhia (1993) 比较了 MM5 静力平衡和非静力版本的异同, 由此分析和验证非静力框架的正确性和可靠性。

对于一个数值模式而言, 动力框架是它的基础, 而物理过程是它的内容。要实现实例模拟, 必须装配合理的物理过程。AREM 静力版本重点考虑了那些对中尺度台风、暴雨过程短期预报有重要影响的物理过程, 主要包括显、隐式网格尺度云和降水过程、积云对流过程、边界层过程以及地—气交

换过程等。参照 MM5 模式非静力发展思路与策略 (Dudhia, 1993), 我们在建立复杂地形非静力数值模式时, 将充分继承原静力平衡模式中得到适用和检验的物理参数化方案, 主要解决以下问题: (1) 针对非静力动力框架程序特点, 设计和实现物理参数化接口方案; (2) 针对非静力框架动力特性, 进一步调试和改进物理过程计算参数。非静力 AREM 模式水汽及水凝物平流处理采用 Yu (1994, 1995) 提出的两步保形正定平流方案进行计算。非静力模式主要物理过程与静力版本相同, 包括: BIAM 云微物理参数化 (宇如聪和徐幼平, 2004; 徐幼平, 2009)、Wang 云微物理参数化 (Wang, 2001)、非局地行星边界层参数化 (Holtslag and Boville, 1993)、Betts-Miller 积云对流参数化 (Betts, 1986)、Zeng 多层结地表通量计算 (Zeng et al., 1998) 及简化的地表辐射计算 (Ghan et al., 1982)。上述参数化过程经过宇如聪、徐幼平及程锐等人的工作而成为 AREM 模式中尺度数值模拟的主要方案选项 (宇如聪, 1992, 1994a; Cheng et al., 2009; 徐幼平, 2009)。

数值模式模拟性能检验还可通过典型个例分析和批量数值试验两种方式进行 (宇如聪, 1994a, 1994b; 宇如聪等, 1994, 2004; 宇如聪和徐幼平, 2004)。在本文中, 我们主要针对典型中尺度天气过程——台风数值模拟和对比检验以及暴雨批量试验验证等方式分析非静力 AREM 模式对典型中尺度特征刻画的可信性、稳定性及准确性。

2 理想试验检验

2.1 模式模拟方案与初值设计

本节设计理想数值试验来比较分析非静力 AREM 与 ARPS 动力框架的对流模拟性能。表 1 所列主要试验参数两模式完全一致。初始背景场水平均一, 温度廓线参考美国 1977 年 5 月 20 日发生的一次对流风暴给出, 纬向风场和经向风场整场取为

零值。通过探空迭加热泡启动模式, 其中初始热泡位于模式中心, 呈圆形分布, 半径约为 10 km, 垂直方向从地表伸展到 700 hPa, 最大加热位于 850 hPa, 强度约 2 K。需要说明的是, 当前只是验证干框架, 水汽场为零初值。

表 1 非静力 AREM 与 ARPS 动力框架试验方案

Table 1 Model configuration of non-hydrostatic AREM (Advanced Regional Eta-coordinate Model) and ARPS (Advanced Regional Prediction System) for dynamical core experiments

	方案描述
初值特点	水平均一背景场分为 21 层, 从 1000 hPa 到 100 hPa; 热泡扰动
模拟范围	水平范围约为 100 km, 垂直方向从地表到 100 hPa
模拟分辨率	水平格距约为 1 km, 垂直方向分为 20 层
模拟步长	时步 1 s
模拟时间	运行 1800 s
边界处理	辐射侧边界条件, 顶边界刚壁
地形处理	不考虑地形
物理过程	不考虑任何物理过程

由于 AREM 采用经纬网格, 而 ARPS 是正方形网格, 因此两个模式的水平模拟范围近似相同, 约为 100 km。垂直方向 AREM 基于气压坐标建立, 而 ARPS 基于高度坐标建立, 所以垂直伸展高度两者也是大体一致 (约从 1000 hPa 到 100 hPa)。采用 1 km 格距运行两模式, 时步为 1 s, 模拟积分 1800 s。两模式都采用辐射侧边界条件, 模式顶部为刚壁。另外, 当前模拟不考虑地形和下垫面特征, 也不考虑任何物理过程。

2.2 对流单体结构

2.2.1 垂直结构

我们在比较分析非静力 AREM 和 ARPS 动力框架的性能时, 既要考虑形态和结构的异同, 还要考虑强度的差别。因此, 下述图形中, 两模式最外圈等值线将取为相同, 用来反映对流单体发展的范围, 而中心等值线分别代表两模式的最大/最小值, 用来反映对流发展的强度。图 1 给出了对流成熟期过对流中心垂直速度的垂直剖面。从图中可以看出两模式共同特征是, 初始热泡经过一段时间模拟而发展成熟, 逐渐演变为一个较强的对流单体, 可从地表一直延伸至 15 km 左右。AREM 和 ARPS 模拟的最强上升气流分别超过 0.4 m s^{-1} 和 0.6 m s^{-1} , 位于 3 km 左右高度; 非静力 AREMV5 模拟的对流水平范围更大。

接下来, 我们来看两模式模拟的散度垂直结

构。从图 2 可以看出, 非静力 AREM 和 ARPS 都模拟出 3 km 以下大气低层的“辐散—辐合—辐散”及 4~8 km 对流层中层的“辐合—辐散—辐合”结构, 且两者的辐合、辐散强度也接近 (最大辐合强度为 $-2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 最大辐散强度为 $0.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$), 但气流的辐合、辐散范围有所不同。这与两模式模拟出的对流层低层风场“正—负”及中高层“负—正”的对称分布结构 (图略) 是一致的。

2.2.2 水平结构

接下来, 我们简要分析一下两模式模拟的积云对流水平结构。图 3 给出对流消弱期 3 km 高度流场分布。可以看出, 在积云对流强度开始减弱后, AREM 和 ARPS 模拟出对流层中低层 3 km 高度上气流的辐散特征, 但辐散范围前者更大。两模式垂直速度场、散度场及位温场也都基本关于模式域中心呈圆形对称分布, 变量中心值处于区域中心, 且中心附近变量梯度显著, 呈现水平非均匀特点。

2.3 对流单体的演变

图 4 给出对流中心垂直速度的时间演变。从图中可以看出, 非静力 AREM 和 ARPS 都刻画出单体对流发展和衰亡的生命史, 但对单体对流演变细节的刻画存在一定差别。AREM 模拟的对流在起始阶段发展快, 约 200 s 就达到了最大值 0.42 m s^{-1} , 而 ARPS 起始阶段发展较慢, 约 300 s 后达到最大值 0.69 m s^{-1} 。此后, AREM 强度减弱较慢, 1200 s 后垂直速度约 0.2 m s^{-1} ; 而 ARPS 减弱快, 其时垂直速度接近 0.15 m s^{-1} 。另外, 两模式刻画的气压扰动都先快速减弱, 然后缓慢变化, 再趋于平稳, 而两者温度扰动都呈现逐渐减小特点 (图略)。

我们也将 AREM 模式模拟结果与 WRF 模式 2D 模拟结果进行比较。此处, 两模式设置主要区别在 y 方向侧边界条件 (WRF 采用 2D 模拟, y 方向为周期边界条件)。从图 5b 可以看出, WRF 模式模拟的对流垂直速度首先也是快速增强, 在 300 s 左右达到最大值 (约 0.82 m s^{-1}); 之后缓慢减小至 1200 s 时接近 0.15 m s^{-1} 。这与 AREM 和 ARPS 模拟的对流生命史一致。从对流成熟期垂直速度垂直剖面 (图 5a 和图 1) 可以看出, WRF 模拟的单体对流垂直结构与 AREM 和 ARPS 相同, 即在区域中心发展旺盛的孤立对流塔, 最强垂直速度也出现在 3 km 左右。主要差别是对流中心强度 WRF 比 AREM、ARPS 强, 但对流发展高度比其他两模式低 (仅从地面伸展到 8 km 左右)。

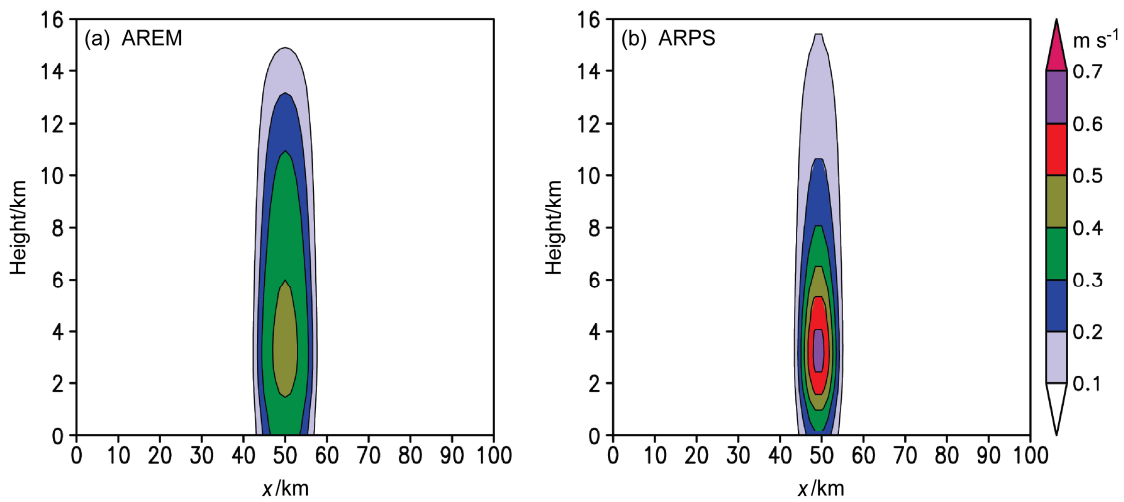


图 1 对流成熟期过对流中心垂直速度的垂直剖面 (单位: m s^{-1}): (a) 非静力 AREM; (b) ARPS

Fig. 1 Vertical cross sections of vertical velocity (units: m s^{-1}) along convection center at the mature stage of convection: (a) Non-hydrostatic AREM; (b) ARPS

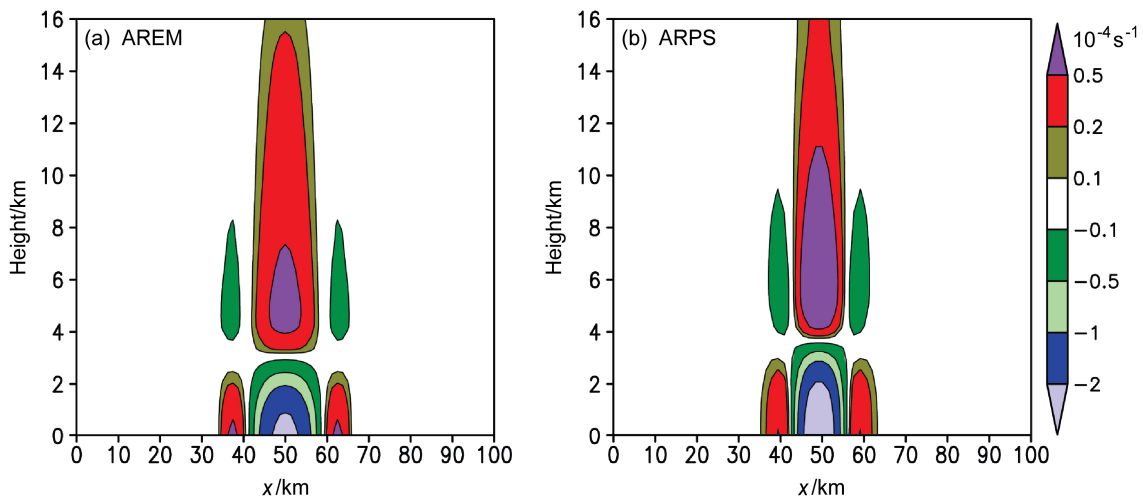


图 2 对流成熟期过对流中心散度 (单位: 10^{-4}s^{-1}) 的垂直剖面: (a) 非静力 AREM; (b) ARPS

Fig. 2 Vertical cross sections of divergence (units: 10^{-4}s^{-1}) along the convection center at the mature stage of convection: (a) Non-hydrostatic AREM; (b) ARPS

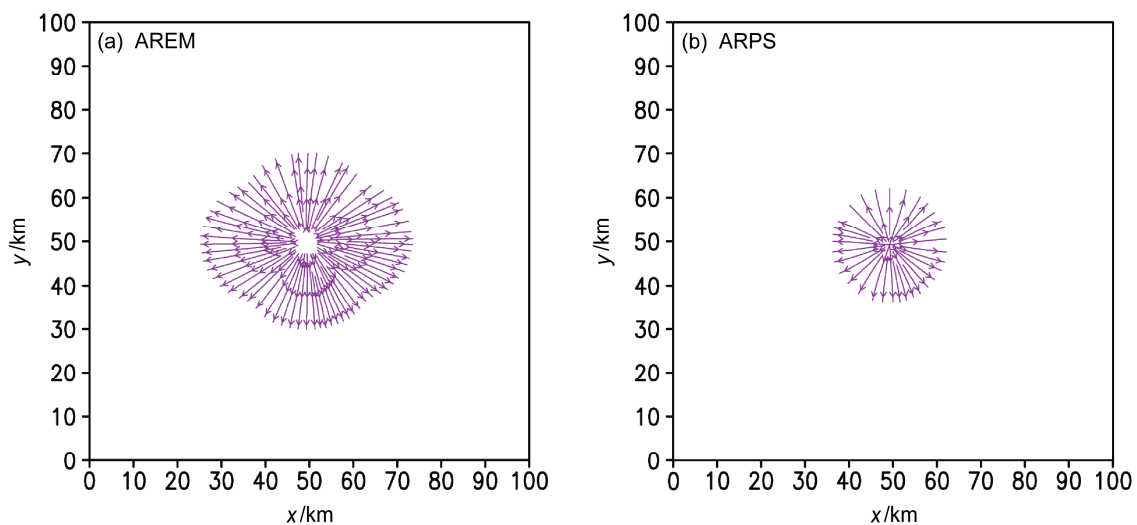
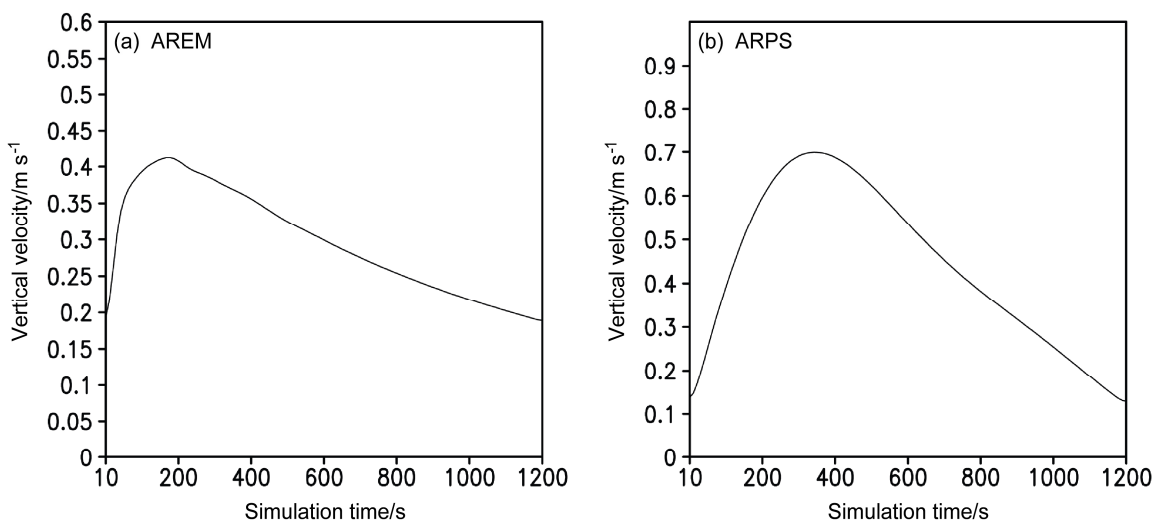


图 3 对流消弱期 3 km 高度上的流场分布: (a) 非静力 AREM; (b) ARPS

Fig. 3 Streamline fields at 3-km height at the dissipative stage of convection: (a) Non-hydrostatic AREM; (b) ARPS

图4 对流中心垂直速度（单位： m s^{-1} ）的时间演变：（a）非静力 AREM；（b）ARPSFig. 4 Time series of vertical velocity (units: m s^{-1}) at the convection center: (a) Non-hydrostatic AREM; (b) ARPS

3 非静力框架实例检验

3.1 模拟方案与初值设计

我们选择台风“云娜”个例,通过与 AREM 静力平衡框架的比较,来考察新建非静力框架在粗分辨率情形下的模拟能力。表 2 给出试验参数设置和初值状况。要注意的是,两模式只有静力/非静力选项的差别,其他试验参数完全相同。其中,水平分辨率都取为 37 km,垂直方向分为 32 层;模拟区域为:纬向 $105^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$,经向 $5^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$,垂向从地表到 10 hPa;采用固定侧边界条件和刚体顶边界条件;时步取为 30 s,以 2004 年 8 月 11 日 00 时(协调世界时,下同)的 NCEP 分析场 (<https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/#!description> [2017-09-20]) 作为初值运行 24 h。本节将不考虑地形和任何物理过程。

表 2 AREM 静力与非静力框架试验描述

Table 2 Model configuration of non-hydrostatic AREM and hydrostatic AREM for dynamical core experiments

	方案描述
初值处理	$1^{\circ}\times 1^{\circ}$ NCEP 分析场作为初值,分为 17 层,从 1000 hPa 到 10 hPa
边界条件	固定侧边界条件,刚体顶边界条件
模拟范围	纬向 $105^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$,经向 $5^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$,垂向从地表到 10 hPa
模拟分辨率	水平格距约为 37 km,垂向分为 32 层
模拟步长	时步 30 s
模拟时段	2004 年 8 月 11 日 00 时至 8 月 12 日 00 时
地形处理	不考虑地形
物理过程	不考虑任何物理过程

3.2 台风结构模拟

从模式积分 24 h 的 850 hPa 垂直速度分布(图 6)可以看出,AREM 静力和非静力版本模式都模拟出三条关于台风中心呈螺旋分布的垂直上升运动带,其中非静力版本模式的最大垂直速度可达 2 cm s^{-1} ,而静力平衡版本模式约为 1 cm s^{-1} 。可见,非静力框架给出的垂直上升运动结构与静力平衡框架相似,但强度更强。

从台风垂直结构的模拟特征(图 7)可以发现,两模式都模拟出台风眼区弱垂直运动、云墙区域强上升气流的分布结构(非静力和静力模式垂直速度分别在 500 hPa 和 400 hPa 附近达到最大值 5 cm s^{-1} 和 3 cm s^{-1}),且两者描述的主体云墙都位于台风中心东侧。另外,在台风眼区,两模式都给出垂直伸展直到 300 hPa 附近的正涡柱,并在边界层内达到涡度最大值 $1.6\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ (图略)。

4 非静力模式实例检验

4.1 模拟方案与初值设计

接下来分析高分辨率非静力 AREM 模式对台风“云娜”的模拟情况。表 3 是试验参数设置和初值状况。考虑到模式尚未嵌套及并行化,我们选择的水平分辨率为 8 km,希望网格距尽可能细致的同时,也要符合串行计算效率与能力的要求。根据 Janjic et al. (2001) 的工作,在 8 km 格距下,非静力效应已经显著,特别在地形影响下更加突出。但由于模拟范围小(东西和南北跨度都只有 20 经纬

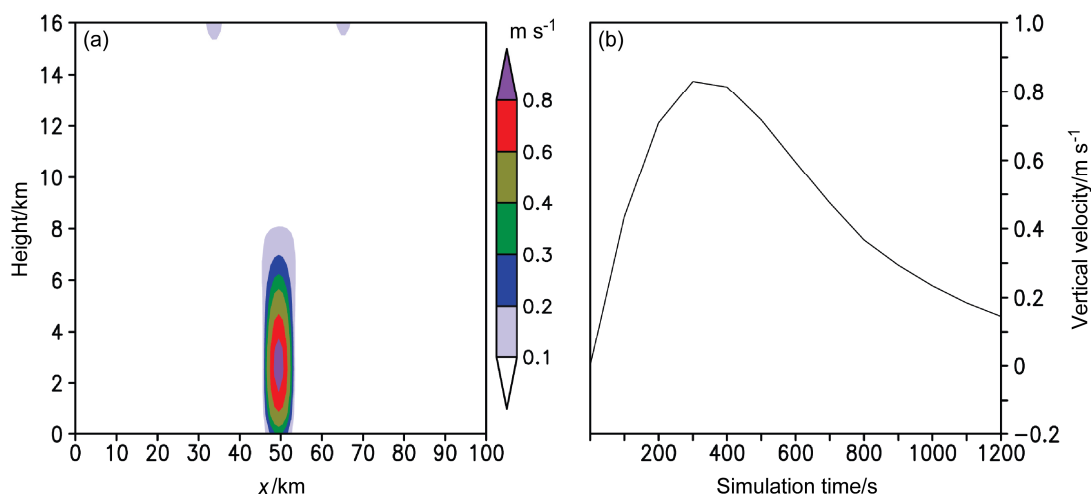


图 5 WRF 模拟的 (a) 对流成熟期垂直速度垂直剖面 (单位: m s^{-1}) 及 (b) 对流中心垂直速度 (单位: m s^{-1}) 演变

Fig. 5 (a) The vertical cross section of vertical velocity (units: m s^{-1}) along the convection center at the mature stage of convection and (b) time series of vertical velocity (units: m s^{-1}) at the convection center simulated by WRF (Weather Research and Forecasting Model)

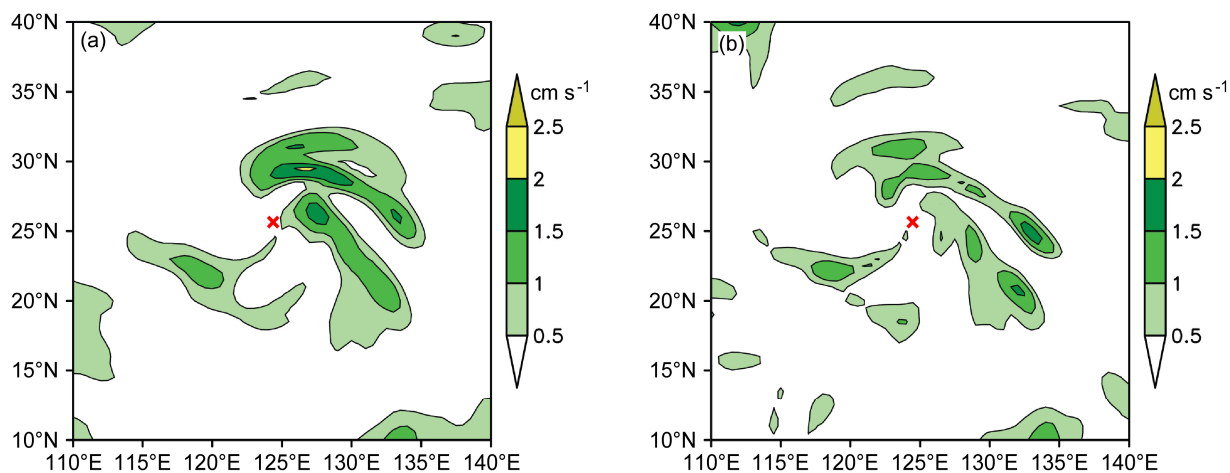


图 6 积分 24 h (2004 年 8 月 12 日 00 时) 的 850 hPa 垂直速度 (单位: cm s^{-1} , 正值表示上升运动) 分布: (a) 非静力 AREM; (b) 静力平衡 AREM。× 表示台风中心, 下同

Fig. 6 Vertical velocity (units: cm s^{-1} , positive values represent updrafts) distributions at 850 hPa after 24-h simulation (0000 UTC 12 August 2004): (a) Non-hydrostatic AREM; (b) hydrostatic AREM. The sign “×” represents the typhoon center, the same below

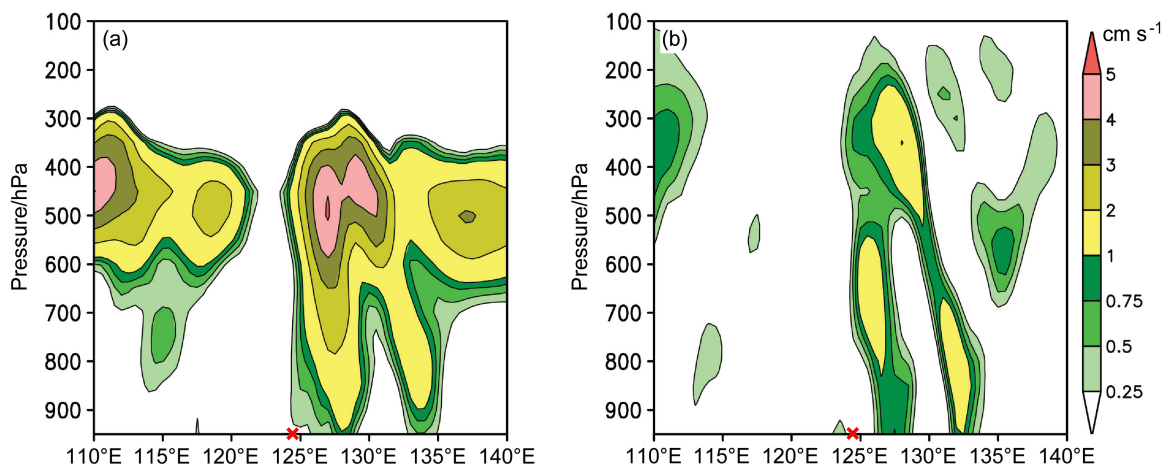


图 7 积分 24 h (2004 年 8 月 12 日 00 时) 过台风中心垂直速度 (单位: cm s^{-1}) 的垂直剖面: (a) 非静力 AREM; (b) 静力平衡 AREM

Fig. 7 Vertical cross sections of vertical velocity (units: cm s^{-1}) along the typhoon center after 24-h simulation (0000 UTC 12 August 2004): (a) Non-hydrostatic AREM; (b) hydrostatic AREM

度)且为固定侧边界,边界噪声会对试验结果产生一定影响,因此只进行了 24 h 模拟。我们以人造台风构造方案 (Low-Nam and Davis, 2001) 形成模式初值。模式地形使用 NCAR 5' (National Center for Atmospheric Research 5 min) 原始地形经过插值得到,地表植被类型分为 24 种。物理过程包括非局地行星边界层参数化 (Holtslag and Boville, 1993), Wang 云微物理参数化 (Wang, 2001), Betts-Miller 积云对流调整 (Betts, 1986) 以及简化的地表辐射能量平衡 (Ghan et al., 1982) 和地表通量计算 (Zeng et al., 1998)。两模式从 2004 年 8 月 11 日 00 时开始积分计算,运行 24 h。为了比较分析不同分辨率情形下非静力模式的模拟性能,我们也给出非静力 15 km 模拟结果,该试验与 8 km 模拟相比只有水平分辨率及时间步长差别,其余参数完全一致。同样,8 km 静力平衡模拟与非静力模拟试验参数完全一致 (如表 3 所示)。

表 3 非静力 AREM 高分辨率模拟试验方案

Table 3 Model configuration for high resolution simulation of non-hydrostatic AREM

计算方案描述	
初值处理	人造台风初值,分为 26 层,从 1000 hPa 到 10 hPa
边界条件	固定侧边界条件,刚体顶边界条件
模拟范围	纬向 115°~135°E,经向 15°~35°N,垂向从地表到 10 hPa
模拟分辨率	水平格距约为 8 km,垂向分为 32 层
模拟步长	时步 5 s
模拟时段	2004 年 8 月 11 日 00 时至 8 月 12 日 00 时
地形处理	考虑实际地形和植被
物理过程	非局地行星边界层参数化, Wang 云微物理参数化, Betts-Miller 积云对流调整,简化的地表辐射能量平衡和地表通量计算

4.2 模拟结果分析

4.2.1 路径和强度

图 8 给出高分辨率模式模拟的台风路径和强度。可以看到,8 km 非静力模式 24 h 路径基本为西北走向,与观测更加接近;8 km 静力平衡模式在 18 h 之后路径存在明显西折;而 15 km 非静力平衡模式 6 h 之后路径存在明显北折,12 h 左右才转为西北移行。从图 8b 看出,无论是演变趋势还是强度大小,高分辨率非静力模式对台风强度的模拟,都要明显好于静力平衡模式及低分辨非静力模式的模拟结果。8 km 非静力模式除了对 9~12 h 台风的加深过程模拟稍弱以外,其他阶段演变特征都与观测相近。另外,高分辨率非静力 AREM 模拟的台风强度始终维持较强水平,较好地改进了台风临近

登陆期间静力平衡及低分辨非静力模式模拟强度持续减弱的问题。24 h 后,8 km 非静力模式台风强度为 964 hPa,而 8 km 静力平衡模式 (15 km 非静力平衡模式) 模拟强度接近 1000 hPa (990 hPa)。综上分析不难看出:在非静力框架下提高模式分辨率对台风强度和路径的改进明显,而高分辨率静力平衡模式对台风的模拟水平远低于同分辨率非静力模式。

4.2.2 热动力结构模拟

以下开展结构分析时,一方面将高分辨率非静

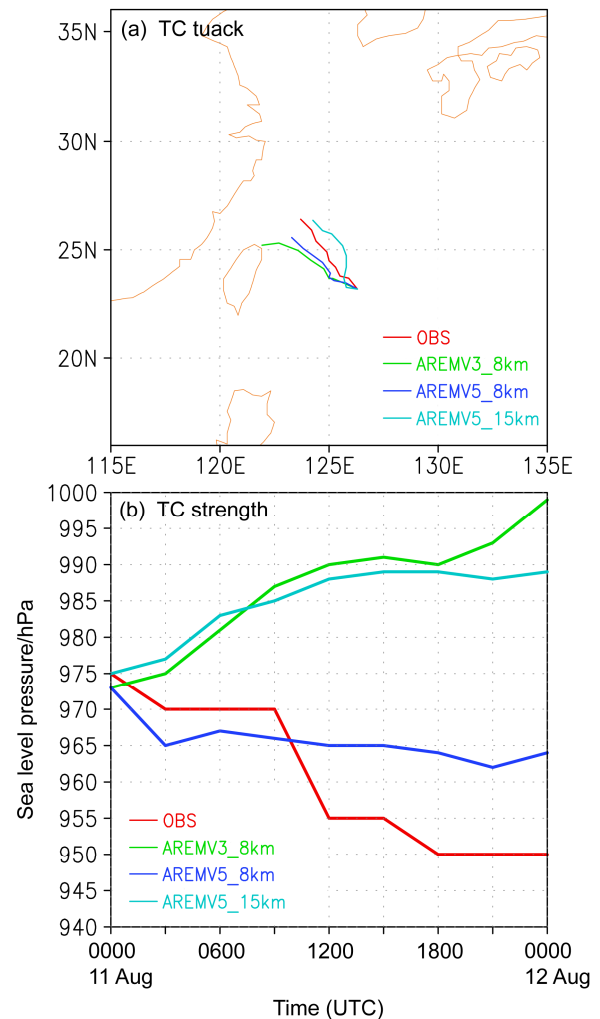


图 8 2004 年 8 月 11 日 00 时至 12 日 00 时 AREM 模式模拟的和观测的台风 (a) 路径及 (b) 中心海平面气压 (单位: hPa)。OBS、AREMV3_8km、AREMV5_8km、AREMV5_15km 分别表示观测、8 km (格距) 静力平衡、8 km 非静力平衡、15 km 非静力平衡 AREM 的模拟结果

Fig. 8 AREM-simulated and observed typhoon (a) track and (b) sea level pressure (units: hPa) at the typhoon center from 0000 UTC 11 August to 0000 UTC 12 August 2004. OBS, AREMV3_8km, AREMV5_8km, and AREMV5_15km represent observation, 8-km hydrostatic AREM, 8-km non-hydrostatic AREM, and 15-km non-hydrostatic AREM, respectively

力模式 (8 km) 与同分辨率静力平衡模式结果进行比较, 同时还要与粗分辨率 (15 km) 非静力版本模式结果及日本中尺度再分析资料 (Japanese Reanalysis, JRA, 水平分辨率 20 km, 垂直从 1000 hPa 到 10 hPa, 逐日 4 次) 进行比较, 从而从不同层面考察高分辨非静力模式对台风结构的模拟能力。

我们选择积分 9 h (8 月 11 日 09 时) 进行结果分析, 既可以回避模式 Spin-up 问题, 又兼顾此时

静力平衡模式模拟强度也较强的特点。首先来看涡度的结构 (参见图 9)。可以发现, 静力和非静力模式刻画的台风内核涡柱分布及结构与 JRA 相似, 都表现为贯穿整个对流层的正涡度柱, 且对流层低层涡度更强。其中非静力 AREM 涡旋特性最显著, 最大涡度出现在边界层, 达到 $14 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。

图 10 是过台风中心垂直速度剖面。不难发现, 8 km 非静力模式和静力平衡模式刻画的台风眼壁主体强上升气流结构一致, 也都存在微弱补偿下沉

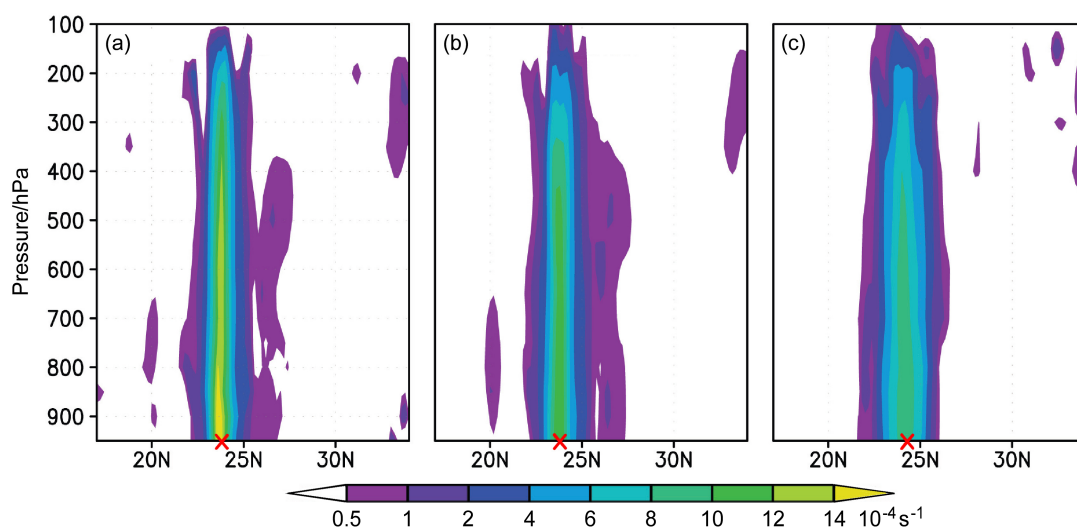


图 9 积分 9 h (2004 年 8 月 11 日 09 时) 的过台风中心涡度 (单位: 10^{-4} s^{-1}) 经向—垂直剖面: (a) 8 km 非静力 AREM; (b) 8 km 静力平衡 AREM; (c) JRA

Fig. 9 Latitude-height cross sections of vorticity (units: 10^{-4} s^{-1}) along the typhoon center after 9-h simulation (0900 UTC 11 August 2004): (a) 8-km non-hydrostatic AREM; (b) 8-km hydrostatic AREM; (c) JRA (Japanese Reanalysis) data

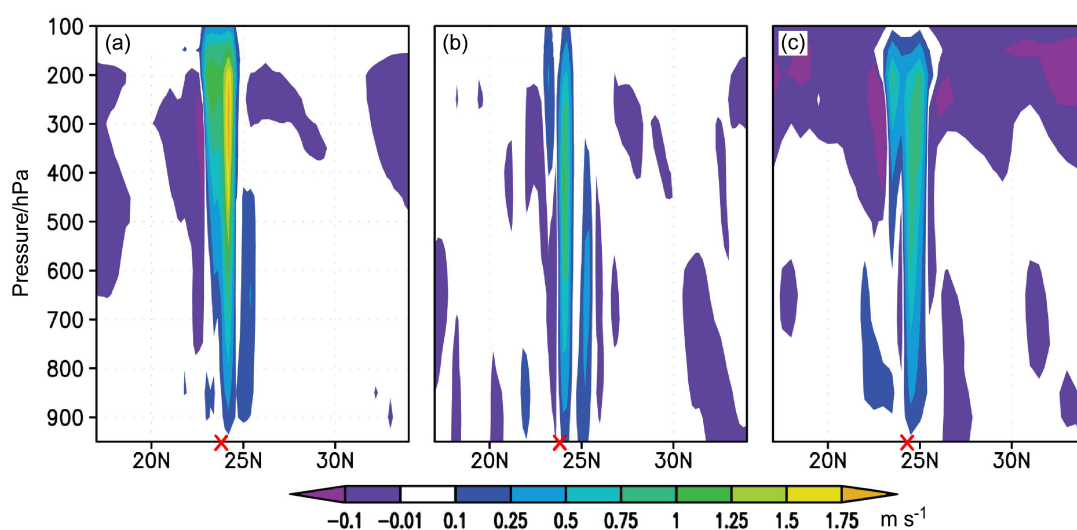


图 10 积分 9 h (2004 年 8 月 11 日 09 时) 过台风中心垂直速度 (单位: m s^{-1}) 经向—垂直剖面: (a) 8 km 非静力 AREM; (b) 8 km 静力平衡 AREM; (c) 15 km 非静力 AREM

Fig. 10 Latitude-height cross sections of vertical velocity (units: m s^{-1}) along the typhoon center after 9-h simulation (0900 UTC 11 August 2004): (a) 8-km non-hydrostatic AREM; (b) 8-km hydrostatic AREM; (c) 15-km non-hydrostatic AREM

气流; 但高分辨率非静力版本模拟的最大上升气流速度 (1.75 m s^{-1}) 比同分辨率静力平衡版本 (0.75 m s^{-1}) 强, 且上升速度中心 (位于 300 hPa) 比静力模式 (400 hPa) 更高。其时, 15 km 非静力模式模拟的最大垂直速度约 1 m s^{-1} (图 10c), 但下沉气流范围更广, 主要分布在对流层高层。

由图 11, 高分辨率非静力 AREM 模拟的环流场结构特征是: 台风内核气流在边界层内主要表现为一致北风, 边界层以上则以辐合上升气流为主; 上升气流分为 2 支, 其中眼区北部与水凝物分布中心匹配的垂直速度更强。在内核以北, 边界层内主要以入流为主, 边界层以上则表现为反气旋式出流结构。内核以南, 边界层内也以入流为主, 但受到偏北气流挤压, 入流范围从地面至边界层顶逐渐减小; 边界层以上主要以入流为主, 但是在 200 hPa 以上和 $800 \sim 700 \text{ hPa}$ 之间存在明显出流结构。

相比之下, 高分辨率静力平衡模式虽能模拟出与非静力模式类似的环流结构, 但静力平衡 AREM 刻画的垂直环流场没有贯穿整个对流层的上升气流结构, 且垂直气流强度也小。低分辨率非静力 AREM 模拟环流结构较为粗略, 如台风内核以南除对流层高层外皆为一致的入流特征; 而且内核垂直环流组织弱, 许多流入气团在被抬升到较高层次之前即已穿过眼壁向外流出了。

上述三模式模拟的水凝物分布与各自垂直环流结构相对应, 其中云墙水物质发展旺盛, 呈孤立塔状并可伸展到对流层顶以上。三模式给出的最强水凝物含量都在 4 g kg^{-1} 左右, 水物质中心位于对流层中高层强上升气流区。需要注意的是, 虽然 AREM 静力平衡模式模拟的垂直气流速度不及非静力版本强, 但两者水凝物含量却接近, 而且静力平衡模式水凝物大值区范围还更广。

5 暴雨过程检验

我们选择 2010 年 7 月的暴雨过程分别使用 37 km 静力和非静力 AREM 模式开展批量模拟试验。试验中, 模式使用 NCEP 再分析资料 ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) 作为初值, 其他模式计算和物理过程选项与前节相同。之后, 采用传统定量降水评估方法, 对 2010 年 7 月暴雨过程模拟结果进行检验。图 12 给出长江中下游及华南地区不同级别降水 (逐日降水量分别大于 0.1 mm 、 10 mm 、 25 mm 和 50 mm) 的逐日 TS 和 BS 评分。从图中 TS 评分可以看出, 静力和

非静力模式总体降水模拟性能相当, 逐日降水的模拟能力比较稳定。而从 BS 评分发现, 对于大雨和暴雨以上级别降水的模拟, 非静力模式比静力模式 BS 评分普遍偏低, 空报率减小较为明显。从当月平均来看, 静力 (非静力) 模式模拟大于 0.1 mm 、 10 mm 、 25 mm 和 50 mm 降水的 TS 评分为 0.52 、 0.18 、 0.08 、 0.03 (0.52 、 0.18 、 0.08 、 0.03), 而 BS 评分为 1.63 、 4.56 、 11.3 、 44.3 (1.55 、 4.34 、 10.7 、 42.2)。因此, 对于粗分辨率的非静力模式而言, 总体降水模拟性能与静力平衡模式相当, 在减小空报率方面还有优势。

6 总结与结论

本文通过构造理想和实例试验, 对非静力 AREM 动力框架进行了检验。在此基础之上, 结合原 AREM 静力平衡模式物理参数化过程和初始化方案, 开展了非静力数值模拟试验, 通过个例分析和批量试验方式, 对非静力模式进行了检验。得到如下结论:

(1) 非静力 AREM、ARPS 及 WRF 模拟出类似的积云对流结构及演变特征: 模拟的上升速度分别于 200 s 、 300 s 和 300 s 左右达到最大值 0.42 m s^{-1} 、 0.69 m s^{-1} 及 0.82 m s^{-1} , 之后逐渐减弱。从形态和结构上看, 三模式都能刻画出成熟期孤立塔状对流, 并在 3 km 附近最强。模式不同之处主要在于对流发展快慢及其空间范围的差别。

(2) 利用格距为 8 km 的非静力 AREM 模式进行台风模拟, 显著改进了相同分辨率静力平衡模式及粗分辨率非静力模式的模拟效果。高分辨率非静力模式 24 h 模拟路径为西北移行, 相比静力平衡模式及低分辨非静力模式与观测更加接近。除了 $9 \sim 12 \text{ h}$ 对台风的加深过程模拟稍弱外, 8 km 非静力 AREM 刻画的强度演变特征与观测相近, 而 8 km 静力平衡模式与 15 km 非静力模式模拟强度持续减弱; 24 h 后, 8 km 非静力模式、 8 km 静力模式及 15 km 非静力模式模拟强度分别比观测弱 14 hPa 、 48 hPa 和 38 hPa 左右。与台风强度相对应, 高分辨率非静力模式模拟的垂直速度和涡度中心最大值分别达到 1.75 m s^{-1} 、 $14 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 都比静力平衡模式及低分辨率非静力模式强。

(3) 暴雨批量试验表明, 对于粗分辨率的非静力模式而言, 总体降水模拟性能与静力平衡模式相当, 在减小空报率方面还有优势。

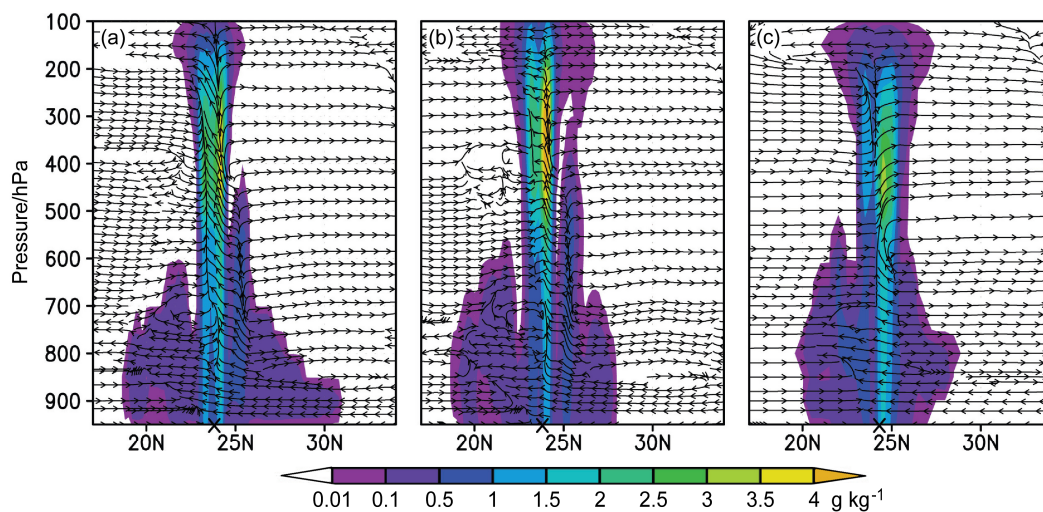


图 11 积分 9 h (2004 年 8 月 11 日 0900 UTC) 过台风中心水凝物含量 (彩色阴影, 单位: g kg^{-1}) 及环流 (黑色带箭头线) 经向—垂直剖面: (a) 8 km 非静力 AREM; (b) 8 km 静力平衡 AREM; (c) 15 km 非静力 AREM

Fig. 11 Latitude-height cross sections of hydrometeors content (shaded, units: g kg^{-1}) and circulation (black lines with arrows) along the typhoon center after 9-h simulation (0900 UTC 11 August 2004): (a) 8-km non-hydrostatic AREM; (b) 8-km hydrostatic AREM; (c) 15-km non-hydrostatic AREM

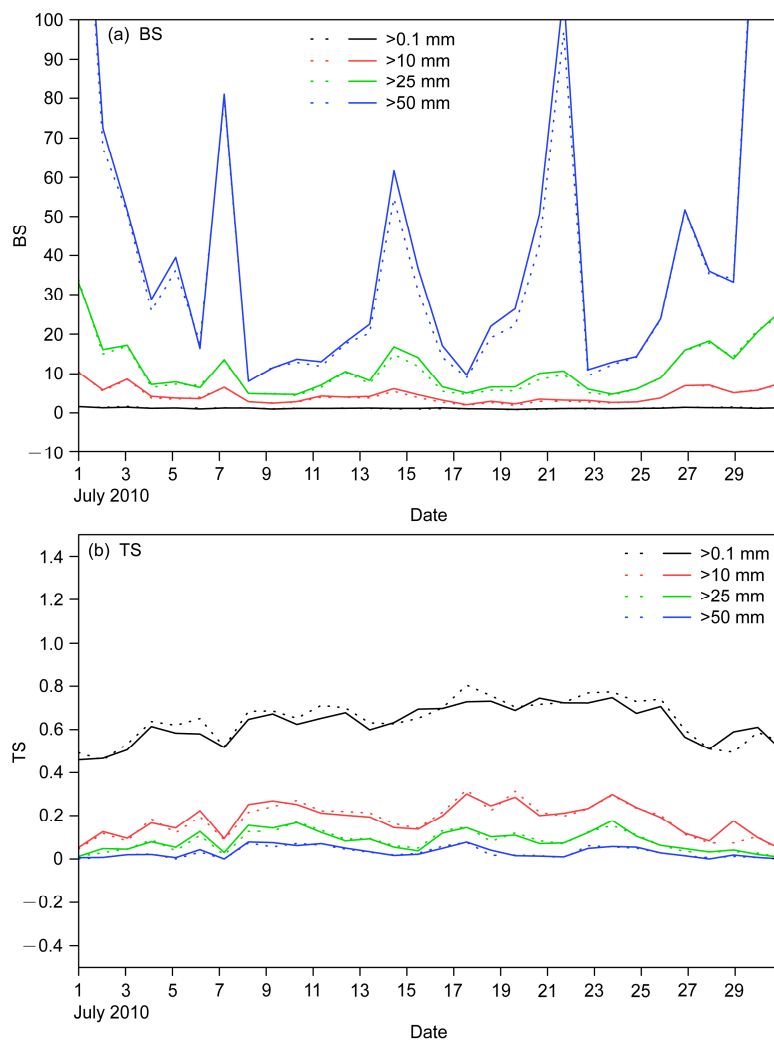


图 12 2010 年 7 月长江中下游及华南地区逐日降水的 (a) BS 评分和 (b) TS 评分。实线为静力, 点线为非静力

Fig. 12 (a) Bias scores (BS) and (b) threat scores (TS) for daily precipitation forecasts in the middle and lower reaches of the Yangtze River and South China in July 2010. The solid and dotted lines indicate hydrostatic and non-hydrostatic simulation, respectively

本文设计了理想对流热泡试验和实例台风、暴雨过程试验,较全面的检验了非静力 AREM 的性能。通过本文工作,不仅确证了新发展的非静力模式的稳定性、准确性,更重要的是从中发现了模式差距,为进一步改进、完善模式给出建议。当前非静力 AREM 模式主要不足:(1)侧边界简单,不适合长时间实例模拟;(2)资料同化过于简单,缺乏卫星等非常规资料的同化分析能力;(3)模式运行的大规模并行框架仍未建立,限制了精细化数值试验开展。立足长远的业务化应用,还需不断提高动力计算求解精度,不断完善物理过程参数化表达,在不断“评估—发展”回路中解决模式出现的问题。

致谢 感谢夏威夷大学王玉清教授在模式物理参数化方面给予的帮助。

参考文献 (References)

- Betts A K. 1986. A new convective adjustment scheme. Part I: Observational and theoretical basis [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 112 (473): 677–691, doi:10.1002/qj.49711247307.
- 程锐, 宇如聪, 傅云飞, 等. 2009. 台风“云娜”在近海强度变化及结构特征的数值研究. I: 云微物理参数化对云结构及降水特征的影响 [J]. *气象学报*, 67 (5): 764–776. Cheng Rui, Yu Rucong, Fu Yunfei, et al. 2009. Numerical research on intensity change and structure feature of typhoon Ranim near shore. I: Impact of cloud microphysical parameterization on cloud structure and precipitation features [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 67 (5): 764–776, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2009.05.009.
- 程锐, 宇如聪, 徐幼平, 等. 2018. 非静力 AREM 模式设计及其数值模拟. I: 非静力框架设计 [J]. *大气科学*, 42 (6): 1286–1296. Cheng Rui, Yu Rucong, Xu Youping, et al. 2018. Design of non-hydrostatic AREM model and its numerical simulation. Part I: Design of non-hydrostatic dynamic core [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 42 (6): 1286–1296, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1712.17200.
- Clark T L. 1977. A small-scale dynamic model using a terrain-following coordinate transformation [J]. *J. Comput. Phys.*, 24 (2): 186–215, doi:10.1016/0021-9991(77)90057-2.
- Dudhia J. 1993. A nonhydrostatic version of the Penn state-NCAR mesoscale model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 121 (5): 1493–1513, doi:10.1175/1520-0493(1993)121<1493:ANVOTP>2.0.CO;2.
- Ghan S J, Lingaas J W, Schlesinger M E, et al. 1982. A documentation of the OSU two-level atmospheric general circulation model [R]. Report 61 Climate Research Institute, Oregon State University.
- 韩慎友. 2009. 非静力保真模式发展和测试 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. Han Shenyou. 2009. The development and test of a nonhydrostatic fidelity model [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.
- Holtzlag A A M, Boville B A. 1993. Local versus nonlocal boundary-layer diffusion in a global climate model [J]. *J. Climate*, 6 (10): 1825–1842, doi:10.1175/1520-0442(1993)006<1825:LVNB LD>2.0.CO;2.
- Janjic Z I, Gerrity J P Jr, Nickovic S. 2001. An alternative approach to nonhydrostatic modeling [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129 (5): 1164–1178, doi:10.1175/1520-0493(2001)129<1164:AAATNM>2.0.CO;2.
- Low-Nam S, Davis C. 2001. Development of a tropical cyclone Bogussing scheme for the MM5 system [C]//Proceedings of the 11th PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop. Boulder, Colorado: PSU/NCAR, 130–134.
- Skamarock W C, Klemp J B. 1994. Efficiency and accuracy of the Klemp-Wilhelmson time-splitting technique [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 122 (11): 2623–2630, doi:10.1175/1520-0493(1994)122<2623:EAAOTK>2.0.CO;2.
- Straka J M, Wilhelmson R B, Wicker L J, et al. 1993. Numerical solutions of a non-linear density current: A benchmark solution and comparisons[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 17 (1): 1–22, doi:10.1002/fld.1650170103.
- Tripoli G J. 1992. A nonhydrostatic mesoscale model designed to simulate scale interaction [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 120 (7): 1342–1359, doi:10.1175/1520-0493(1992)120<1342:ANMMDT>2.0.CO;2.
- Wang Yuqing. 2001. An explicit simulation of tropical cyclones with a triply nested movable mesh primitive equation model: TCM3. Part I: Model description and control experiment [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129 (6): 1370–1394, doi:10.1175/1520-0493(2001)129<1370:AESOTC>2.0.CO;2.
- Wicker L J, Skamarock W C. 1998. A time-splitting scheme for the elastic equations incorporating second-order Runge-Kutta time differencing [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 126 (7): 1992–1999, doi:10.1175/1520-0493(1998)126<1992:ATSSFT>2.0.CO;2.
- 徐幼平. 2009. AREM 载水预报框架的发展和评估 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. Xu Youping. 2009. Development and evaluation on the water bearing prediction frame of AREM [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.
- 宇如聪. 1992. 有限区域数值预报模式的设计及其对雅安天漏的数值预报试验 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. Yu Rucong. 1992. Design of the limited area numerical weather prediction model with steep mountain and numerical experiments on “Ya-An-Tian-Lou” [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.
- 宇如聪. 1994a. 一个 η 坐标有限区域数值预报模式对1993年中国汛期降水的实时预报试验 [J]. *大气科学*, 18 (3): 284–292. Yu Rucong. 1994a. A test for numerical weather prediction of real-time for China flood season precipitation in 1993 by a regional η -coordinate model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 18 (3): 284–292, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1994.03.04.
- 宇如聪. 1994b. LASG-REM 对1994年中国汛期降水的实时预报试验 [J]. *大气科学*, 18 (S1): 801–809. Yu Rucong. 1994b. Real-time precipitation forecasting experiments in the summer China of 1994 by the LASG-REM [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 18 (S1): 801–809, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1994.z1.04.
- Yu Rucong. 1994. Two-step shape-preserving advection scheme [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 11 (4): 479–490, doi:10.1007/BF02658169.
- Yu Rucong. 1995. Application of a shape-preserving advection scheme to

- the moisture equation in an E-grid regional forecast model [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 12 (1): 13–19, doi:10.1007/BF02661283.
- 宇如聪, 徐幼平. 2004. AREM 及其对 2003 年汛期降水的模拟 [J]. *气象学报*, 62 (6): 715–724. Yu Rucong, Xu Youping. 2004. AREM and its simulations on the daily rainfall in summer in 2003 [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 62 (6): 715–724, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2004.06.001.
- 宇如聪, 曾庆存, 彭贵康, 等. 1994. “雅安天漏”研究. II: 数值预报试验 [J]. *大气科学*, 18 (5): 535–551. Yu Rucong, Zeng Qingcun, Peng Guikang, et al. 1994. Research on “Ya-An-Tian-Lou”. Part II: Numerical trial forecasting [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 18 (5): 535–551, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1994.05.04.
- 宇如聪, 薛纪善, 徐幼平. 2004. AREMS 中尺度暴雨数值预报模式系统 [M]. 北京: 气象出版社, 139–190. Yu Rucong, Xue Jishan, Xu Youping. 2004. An Advanced Regional Eta-coordinate Numerical Heavy-ran Prediction Model (AREM) System (AREMS) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 139–190.
- Zeng Xubing, Zhao Ming, Dickinson R E. 1998. Intercomparison of bulk aerodynamic algorithms for the computation of sea surface fluxes using TOGA COARE and TAO data [J]. *J. Climate*, 11 (10): 2628–2644, doi:10.1175/1520-0442(1998)011<2628:IOBAAF>2.0.CO;2.