

DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2019.077

王磊, 包庆, 何编. CMIP6 高分辨率模式比较计划 (HighResMIP) 概况与评述 [J]. 气候变化研究进展, 2019, 15 (5): 498-502

Wang L, Bao Q, He B. Short commentary on CMIP6 High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP) [J]. Climate Change Research, 2019, 15 (5): 498-502



## CMIP6 高分辨率模式比较计划 (HighResMIP) 概况与评述

王磊<sup>1,3</sup>, 包庆<sup>1,2</sup>, 何编<sup>1,2</sup>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, 北京 100029;

2 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101;

3 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 高分辨率模式比较计划 (HighResMIP) 是第六次国际耦合模式比较计划 (CMIP6) 的新增计划, 旨在研究水平分辨率提高后对气候模式模拟性能的改进, 并借助多模式集合的方法降低模拟的不确定性。中国有 5 个模式团队在 CMIP6 GitHub 上注册参加 HighResMIP。文中对 HighResMIP 的科学背景、试验设计和参与模式等方面进行了简要介绍, 为需要了解该计划的科研人员提供参考。

**关键词:** 高分辨率模式比较计划 (HighResMIP); 气候系统模式; CMIP6

### 引言

气候系统模式对当前气候现象的模拟能力是古气候模拟、气候预测和预估试验可信度的基石。自 1995 年起, 世界气候研究计划 (WCRP) 发起了一项关注气候系统模式研发及交流的国际耦合模式比较计划 (CMIP), 目前该计划已经发展到第六阶段 (CMIP6)<sup>[1]</sup>。该计划一方面通过评估和改进气候系统模式的模拟性能来促进气候系统模式的不断发展; 另一方面也为全世界在全球变化背景下预估未来气候与环境的变化提供可靠的科学依据。中国的气候系统模式参与 CMIP 有着很长的历史, 模式数目也在不断增加。最初的 CMIP1 仅有 IAP/LASG 的 1 个模式参加, CMIP5 有 5 个模式来自中国<sup>[2]</sup>,

最新的 CMIP6 有 9 个模式来自中国。

提高分辨率一直是气候系统模式研发的最前沿方向, 高性能超级计算机集群则是开展全球高分辨率数值模拟试验最主要的试验平台。近些年来, 得益于高性能计算机的迅猛发展, 国内外的模式研发机构也相继开展全球高分辨率 (水平方向  $\geq 0.5^\circ$ ) 数值模拟试验。已有的一些研究表明, 相较于低分辨率模式, 更高分辨率的气候模式对多种天气和气候现象均表现出一定的模拟“增值”, 这些“增值”不仅体现在对大尺度现象 (如: 厄尔尼诺 - 南方涛动 (ENSO)<sup>[3]</sup>、热带降水辐合带 (ITCZ)<sup>[4]</sup>、全球水循环<sup>[5]</sup>等) 气候态的模拟性能的改进, 也表现在对一些具有重要影响的中小尺度现象 (如: 气旋<sup>[6]</sup>、极地低压<sup>[7]</sup>) 和极端事件 (如:

收稿日期: 2019-04-12; 修回日期: 2019-06-02

资助项目: 科技部重点研发专项 (2017YFA0604004); 国家自然科学基金 (91737306, 41675100, U1811464)

作者简介: 王磊, 男, 博士研究生, wanglei@lasg.iap.ac.cn

极端降水<sup>[8]</sup>的模拟性能的改善。当然,取得进展的同时也存在着许多不足。由于开展高分辨率气候模拟试验需要花费巨大的计算和存储资源,该类试验的积分时间通常较短,对于一些具备多年代际尺度变化特征的大气、海洋现象,如:大西洋多年代际振荡 (AMO)、太平洋年代际振荡 (PDO)、ENSO 等,尚无法详尽研究;上述由分辨率提高带来的模式性能改进,也通常是单个模式的试验结果,不同模式的试验设计也存在许多差别。基于此,CMIP6 高分辨率模式比较计划 (HighResMIP)<sup>①</sup>被首次发起<sup>[9]</sup>,旨在通过设计相同要求的高分辨率气候模拟试验,开展详细的模式评估工作(包括水平分辨率的提高对模式动力和物理过程的具体影响),以确定模式水平分辨率的提高带来的模拟性能改进,并借助多模式集合的方法降低模拟的不确定性。

发展高分辨率气候模式系统也一直是我国国内气候模拟领域的前沿和发展趋势。近年来,中国在超级计算机领域取得的众多成就为我国自主研发高分辨率气候系统模式<sup>[10-12]</sup>提供了重要保障,这些高分辨率气候系统模式也成为了 HighResMIP 的重要成员。

## 1 试验设计及参与模式

HighResMIP 分为 3 个层级试验,各层级试验要求至少进行标准分辨率和高分辨率两组试验,试验中仅考虑水平分辨率变化,垂直分辨率保持不变,高分辨率试验的大气模式水平分辨率要  $\geq 50$  km。为更清楚地体现水平分辨率对模拟结果的影响,HighResMIP 工作组建议模式的调试过程仅在标准分辨率下进行,高分辨率试验与标准分辨率试验所用模式及配置设置应尽可能保持一致。HighResMIP 关注模式的模拟性能、偏差、偏差原因及其影响,而非气候敏感度。气溶胶组分、地表特性等量也进一步简化以便于模式之间的集合和比较。

图 1 给出 HighResMIP 的 3 个层级试验的积分时长和各自使用的强迫场年份。第一层级 (Tier-1) 试验是历史强迫的大气模式比较计划 (AMIP)<sup>[13]</sup>,也是 HighResMIP 的核心试验,其积分时长为 65 a,时段是 1950—2014 年。该层级试验中外强迫条件(如:太阳活动、气溶胶、臭氧等)与 CMIP6 的历史气候模拟试验 (Historical) 相同。边界条件设定如下:土地利用/土地覆盖保持不变(大体与 2000 年前后一致),地表的叶面积指数 (LAI) 为其具有季节变化特征的气候态值。第二层级 (Tier-2) 试验为百年耦合试验,时段为 1950—2050 年,为了在试验前尽可能达到海—气准平衡态,HighResMIP 工作组建议先进行约 50 a 的模式 spin-up,之后以“热启动”(restart)的方式完成该段试验。试验启动后又分为两个分支:第 1 个分支试验固定使用 1950 年的外强迫条件积分百年。第 2 个分支试验则是在 1950—2014 年时段使用与 Tier-1 相同的外强迫条件和边界条件;而在 2015—2050 年时段,边界条件与 Tier-1 一致,外强迫条件中温室气体和气溶胶浓度使用 CMIP6 的共享社会经济路径 (SSP) 中的最高 (high-end) 排放情景。第三层级 (Tier-3) 试验则是对 Tier-1 的延伸,积分时段为 2015—2050 年(可进一步延伸到 2100 年),仍然使用单独大气模式进行气候预估试验,

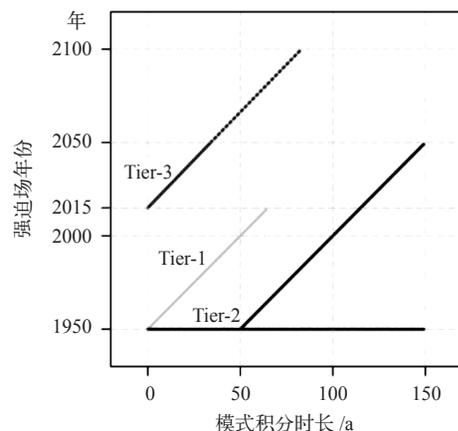


图 1 HighResMIP 各层级试验示意图<sup>[9]</sup>

Fig. 1 Schematic outline of HighResMIP Tiers-1-3<sup>[9]</sup>

① <https://www.wcrp-climate.org/modelling-wgcm-mip-catalogue/cmip6-endorsed-mips-article/1068-modelling-cmip6-highresmip>.

外强迫条件与 Tier-2 中的第 2 个分支试验 (2015—2050 年时段) 相同。边界条件中: 土地利用 / 土地覆盖依旧固定, LAI 为具有月或其他变化 (如季节) 特征的气候态值。

参加 HighResMIP 的入门条件是必须要完成 Tier-1 (实际上, 大部分模式仅完成 Tier-1)。表 1 给出了注册该计划的模式基本信息。值得一提的是, 中国有 5 个模式团队在 CMIP6 GitHub 上注册参加 HighResMIP: 中国气象局国家气候中心 BCC-CSM2-HR 气候系统模式<sup>[14]</sup> (大气模式水平分辨率为 50 km), 中国科学院大气物理研究所 FGOALS-f3 气候系统模式<sup>[15-17]</sup> (大气模式水平分辨率为 25 km), “中央研究院”环境变迁研究中心 HiRAM 模式<sup>[18]</sup> (大气模式水平分辨率为 50 km), 中国科学院 CAS-ESM<sup>[19]</sup> 地球系统模式 (大气模式水平分辨率为 100 km) 和清华大学 CIESM 地球系统模式 (大气模式水平分辨率为 100 km)。

## 2 计划评述

模式的系统偏差起源和影响是 CMIP6 提出的三大科学问题之一, 这也是 HighResMIP 最关注的科学问题。HighResMIP 将第一次实现有计划地开展国际间的高分辨率气候模拟试验, 并为科研工作者提供多集合、高时空分辨率的气候模拟数据集。基于多个模式集合的方法, HighResMIP 工作组也将系统评估高分辨率气候模式对于多种尺度天气、

气候现象的模拟性能, 进一步加深科学界对不同尺度的大气、海洋现象以及不同尺度现象之间的相互作用的理解。HighResMIP 中模式的水平分辨率也近似达到了解析天气尺度现象的要求, 为实现天气-气候无缝隙预报这一目标迈出了重要一步。相较于 CMIP6 气候诊断、评估和描述试验 (DECK) 中的 AMIP 类型试验, HighResMIP 的模拟时段更长, 可进一步用于研究具备多年代际尺度变化特征的大气、海洋现象。HighResMIP 与 CMIP6 其他模式比较计划 (如全球季风比较计划 (GMMIP)、云反馈模式比较计划 (CFMIP)、辐射强迫模式对比计划 (RFMIP) 等) 均存在一定的关联性, 但 HighResMIP 使用的模式分辨率更高, 通过高低分辨率模拟结果的对比分析, 可以探究水平分辨率对相关过程及现象模拟的影响, 进一步加深对这些计划所关注的具体科学问题的理解。区域降尺度试验产品, 如协同区域气候降尺度试验 (CORDEX) 数据集, 是区域灾害风险评估研究使用的主要数据集, 该产品水平分辨率较高 (几十千米乃至几千米), 且主要通过利用粗分辨率的全球模式模拟结果或再分析资料驱动高分辨率的区域模式 (即区域网格加密) 的方式获取<sup>[20]</sup>。相比粗分辨率的全球模式模拟结果, 该类试验产品对许多过程 (如极涡、极端降水等) 都表现出一定的模拟增值<sup>[21-22]</sup>。HighResMIP 的模式数据集和区域降尺度产品的对比分析, 可用于进一步探究全球尺度的遥相关和多尺度相互作用与局地分辨率提升带来的局地过程解析增值对气候

表 1 注册 CMIP6 HighResMIP 的模式  
Table 1 Models registered in CMIP6 HighResMIP

模式名称	机构 / 国家 (地区)	模式名称	机构 / 国家 (地区)	模式名称	机构 / 国家 (地区)
AWI-CM	AWI/ 德国	CNRM-CM6	CNRM-CERFACS/ 法国	IPSL-CM6A	IPSL/ 法国
BCC-CSM2	BCC/ 中国	EC-Earth3	EC-Earth-Consortium/ 欧盟	MPI-ESM1	MPI/ 德国
CAS-ESM	CAS/ 中国	EC-Earth3P	EC-Earth-Consortium/ 欧盟	MRI-AGCM3	MRI/ 日本
FGOALS-f3	CAS/ 中国	ECMWF-IFS	ECMWF/ 欧洲中心	NICAM16	AORI-UT-JAMSTEC-RIKEN/ 日本
CESM2-SE	NCAR/ 美国	GFDL-CM4	GFDL/ 美国	NorESM2	NCC/ 挪威
CIESM	THU/ 中国	HadGEM3-GC31	MOHC/ 英国		
CMCC-CM2	CMCC/ 意大利	GFDL-HiRAM*	RCEC-AS/ 中国台湾		

注: 此表来源为 [https://rawgit.com/WCRP-CMIP/CMIP6\\_CVs/master/src/CMIP6\\_source\\_id.html](https://rawgit.com/WCRP-CMIP/CMIP6_CVs/master/src/CMIP6_source_id.html)。\*“中央研究院”环境变迁研究中心使用美国 NOAA GFDL 实验室研发的 HiRAM 模式参与 HighResMIP。

模拟的相对重要性。高分辨率模式输出的数据集也可作为区域降尺度试验或云解析模式等提供必要的边界条件。如何达到陆-气准平衡态和海-气准平衡态是开展高分辨率试验中必须要解决的问题, HighResMIP 工作组的推荐试验设计方法为解决该问题提供了可能。

中国在高分辨率气候系统模式领域的技术研发起步较晚, 与发达国家存在差距。虽然中国在超级计算机领域发展迅速, 但是设计和开发与之相应的可扩展并行应用软件的能力还比较落后。中国高分辨率气候系统模式与所拥有的国际领先超算环境不匹配。近年来, 中国的气候模式研发团队也将模式分辨率提高作为重要发展方向, 研发全球高分辨率气候系统模式和与之适应的物理过程参数化方案。高分辨率气候系统模式研发水平也是中国气候模式能否进入国际一流模式行列的重要指标之一。值得肯定的是, 中国是唯一一个自主研发高分辨率模式并参与 HighResMIP 的发展中国家。通过模式间比较, 不仅可以展示中国的模式性能, 同时可以借鉴国外机构的高分辨率模式研发经验, 进一步发展中国的高分辨率模式。此外, 高分辨率模式产生的数据集也可向国内外科研单位和业务部门推广, 促进在高分辨率数值模拟领域的国内和国际合作。

相较于 CMIP6 的其他模式比较计划, 参与 HighResMIP 的模式研发机构仍然较少, 且格点模式、谱模式、非均匀网格模式 (如: 球面立方网格、正六边形网格) 的水平分辨率提高后对模拟性能的影响可能并不相同<sup>[23]</sup>, 尚需要单独分析, 使集合样本更少。对于高分辨率海气耦合试验, 50 a 的 spin-up 是否足够, 这也是重要的科学问题之一。此外, HighResMIP 仅仅考虑了水平分辨率的影响, 垂直分辨率对气候模式模拟性能的影响还需要进一步探讨。■

## 参考文献

- [1] Veronika E, Sandrine B, Meehl G A, *et al.* Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6), experimental design and organization [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9 (5): 1937-1958
- [2] 周天军, 邹立维, 吴波, 等. 中国地球气候系统模式研究进展: CMIP 计划实施近 20 年回顾 [J]. *气象学报*, 2014, 72 (5): 892-907. Zhou T J, Zou L W, Wu B, *et al.* Development of Earth/climate system models in China: a review from the Coupled Model Intercomparison Project perspective [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 72 (5): 892-907 (in Chinese)
- [3] Shaffrey L C, Stevens I, Norton W A, *et al.* U.K. HiGEM: the new U.K. High-Resolution Global Environment Model: model description and basic evaluation [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22: 1861-1896
- [4] Doi T, Vecchi G A, Rosati A J, *et al.* Biases in the Atlantic ITCZ in seasonal-interannual variations for a coarse- and a High-Resolution Coupled Climate Model [J]. *Journal of Climate*, 2012, 23: 5494-5511
- [5] Demory M E, Vidale P L, Roberts M J, *et al.* The role of horizontal resolution in simulating drivers of the global hydrological cycle [J]. *Climate Dynamic*, 2014, 42 (7-8): 2201-2225
- [6] Murakami H, Vecchi G A, Underwood S, *et al.* Simulation and prediction of category 4 and 5 hurricanes in the high-resolution GFDL HiFLOR coupled climate model [J]. *Journal of Climate*, 2015, 28: 9058-9079
- [7] Zappa G, Shaffrey L, Hodges K. Can polar lows be objectively identified and tracked in the ECMWF operational analysis and the ERA-Interim reanalysis? [J]. *Monthly Weather Review*, 2014, 142: 2596-2608
- [8] Mahajan S, Evans K J, Branstetter M, *et al.* Fidelity of precipitation extremes in high resolution global climate simulations [J]. *Procedia Computer Science*, 2015, 51: 2178-2187
- [9] Haarsma R J, Roberts M J, Vidale P L, *et al.* High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP v1.0) for CMIP6 [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9: 4185-4208
- [10] Li J X, Bao Q, Liu Y M, *et al.* Evaluation of the computational performance of the Finite-volume Atmospheric Model of the IAP/LASG (FAMIL) on a high-performance computer [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2017, 10: 329-336
- [11] Fu H H, Liao J F, Ding N, *et al.* Redesigning CAM-SE for peta-scale climate modeling performance and ultra-high resolution on sunway Taihulight [C]//International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis. USA: IEEE, 2017
- [12] Zhou L J, Liu Y M, Bao Q, *et al.* Computational performance of the high-resolution atmospheric model FAMIL [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2012, 5: 355-359
- [13] Gates W L. AMIP: the Atmospheric Model Intercomparison Project [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1992, 73 (12): 1962-1970
- [14] Wu T W, Lu Y X, Fang Y J, *et al.* The Beijing Climate Center Climate System Model (BCC-CSM): main progress from CMIP5 to CMIP6 [J]. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2019, 12 (4): 1573-1600
- [15] 包庆, 吴小飞, 李矜霄, 等. 2018—2019 年秋冬季厄尔尼诺和印度洋偶极子的预测 [J]. *科学通报*, 2019, 64 (1): 73-78. Bao Q, Wu X F, Li J X, *et al.* Outlook for El Niño and the Indian Ocean Dipole in autumn-winter 2018-2019 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64 (1): 73-78 (in Chinese)
- [16] Zhou L J, Bao Q, Liu Y M, *et al.* Global energy and water balance: characteristics from Finite-volume Atmospheric Model of the IAP/LASG

- (FAMIL1) [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2015, 7 (1): 1-20
- [17] Li J X, Bao Q, Liu Y M, *et al.* Evaluation of FAMIL2 in simulating the climatology and seasonal-to-interannual variability of tropical cyclone characteristics [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2019, 11 (4): 1117-1136
- [18] Harris L M, Lin S J, Tu C Y. High-resolution climate simulations using GFDL HiRAM with a stretched global grid [J]. *Journal of Climate*, 2016, 29 (11): 4293-4314
- [19] 孙泓川, 周广庆, 曾庆存. IAP 第四代大气环流模式的气候系统模式模拟性能评估 [J]. *大气科学*, 2012, 36 (2): 215-233. Sun H C, Zhou G Q, Zeng Q C. Assessments of the climate system model (CAS-ESM-C) using IAP AGCM4 as its atmospheric component [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2012, 36 (2): 215-233 (in Chinese)
- [20] 徐忠峰, 韩瑛, 杨宗良. 区域气候动力降尺度方法研究综述 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49 (3): 487-498. Xu Z F, Han Y, Yang Z L. Dynamical downscaling of regional climate: a review of methods and limitations [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2019, 49 (3): 487-498
- [21] Rummukainen M. Added value in regional climate modeling [J]. *WIREs Climate Change*, 2016, 7 (1): 145-159
- [22] Jacob D, Petersen J, Eggert B, *et al.* EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research [J]. *Regional Environmental Change*, 2014, 14 (2): 563-578
- [23] Benoit V, Demory M E, Vidale P L, *et al.* Multi-model evaluation of the sensitivity of the global energy budget and hydrological cycle to resolution [J]. *Climate Dynamics*, 2019, 52 (11): 6817-6846

## Short commentary on CMIP6 High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP)

WANG Lei<sup>1,3</sup>, BAO Qing<sup>1,2</sup>, HE Bian<sup>1,2</sup>

1 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing 100029, China*; 2 *CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, CAS, Beijing 100101, China*; 3 *University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

**Abstract:** The High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP) is now a CMIP6-endorsed MIPs, which aimed to investigate the climate models' simulation performance improvements with increased horizontal resolution and also to reduce simulation uncertainties based on multi-model ensemble simulations. Five groups in Chinese modeling community have registered in HighResMIP on CMIP6 GitHub website. In this paper, the scientific background, experimental design and participants of HighResMIP are briefly introduced, to provide a reference for researchers who are interested in this project.

**Keywords:** High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP); Climate system model (CSM); CMIP6