

DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2019.166

林岩奎, 黄小猛, 梁逸爽, 等. 清华大学 CIESM 模式及其参与 CMIP6 的方案 [J]. 气候变化研究进展, 2019, 15 (5): 545-550

Lin Y L, Huang X M, Liang Y S, et al. The Community Integrated Earth System Model (CIESM) from Tsinghua University and its plan for CMIP6 experiments [J]. Climate Change Research, 2019, 15 (5): 545-550

清华大学 CIESM 模式及其参与 CMIP6 的方案

林岩奎¹, 黄小猛¹, 梁逸爽¹, 秦怡¹, 徐世明¹, 黄文誉¹, 徐芳华¹, 刘利¹, 王勇¹, 彭怡然¹, 王兰宁², 薛巍¹, 付昊桓¹, 张广俊¹, 王斌^{1,4}, 李锐喆¹, 张诚¹, 卢麾¹, 阳坤¹, 罗勇¹, 白玉琪¹, 宋振亚³, 王敏琦¹, 赵文婕¹, 张峰⁵, 徐敬蘅¹, 赵曦¹, 陆春松⁵, 骆亦其¹, 陈奕兆⁶, 胡勇¹, 唐强¹, 陈德训⁷, 杨广文⁸, 官鹏¹

1 清华大学地球系统科学系 / 地球系统数值模拟教育部重点实验室, 北京 100084;

2 北京师范大学, 北京 100875;

3 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061;

4 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;

5 南京信息工程大学, 南京 210044;

6 南京林业大学, 南京 210037;

7 无锡江南计算技术研究所, 无锡 214000;

8 国家超级计算无锡中心, 无锡 214000

CIESM

摘要: 世界气候研究计划 (WCRP) 组织实施第六次国际耦合模式比较计划 (CMIP6), 清华大学联合国内多家单位, 通过多年的模式研发, 完成联合地球系统模式 (CIESM), 除了 CMIP6 的气候诊断、评估和描述试验 (DECK) 和历史气候模拟试验 (Historical), 模式拟参与 6 个 CMIP6 子计划。通过介绍该模式的基本情况及其参与的试验子计划, 为今后模式试验数据使用者提供参考。

关键词: 清华大学; 联合地球系统模式 (CIESM); CMIP6; 气候系统模式; 地球系统模式

引言

地球系统模式 (ESM) 是理解复杂地球系统并预估由于人类温室气体排放增加导致未来升温程度的重要工具。尽管 ESM 有显著的改进, 但仍存在很多系统偏差。这些系统偏差显著影响模式的可信度, 包括对未来全球增暖幅度的预估, 尤其是区域气候变化的预估。因此模式系统偏差的来源及其归因成为第六次国际耦合模式比较计划 (CMIP6) 中三大重要的科学问题之一^[1]。

CMIP 的气候模拟数据以及对未来的预估, 为

理解过去的气候变化规律、未来气候变化的预估以及气候的影响等方面提供了重要的参考依据, 也构成了 IPCC 科学评估报告的重要组成部分。与此同时, 模式间的对比与评估也进一步推进了模式的发展。从 CMIP3 开始, 中国的地球系统模式蓬勃发展。参与的中国模式由最初的 1 个增加到 5 个。预计参加本次 CMIP6 计划的中国模式可达到 10 个^[2]。

基于气候模式发展的必要性、迫切性, 以及当前气候模式较大的不确定性, 清华大学致力于改善关键的模式动力和物理过程, 从而有效减小

收稿日期: 2019-07-15; 修回日期: 2019-08-23

资助项目: 清华大学自主研究计划 (20131089356)

作者简介: 林岩奎, 男, 教授, yanluan@tsinghua.edu.cn

当前模式普遍存在的系统偏差,如海洋低云模拟偏少、双热带辐合带偏差等问题,进而提高模式各方面的模拟能力。在确定参加CMIP6计划后,逐步确定了最终的模式版本CIESM1.1,于2019年初开始CMIP6计划中的相关试验。有关CIESM模式及其开展的CMIP6试验内容以下将逐一介绍。

1 CIESM 模式简介

清华大学从2009年开始决定发展地球系统模式,致力于改善当前模式中存在的系统偏差问题。以当前世界领先的美国国家大气研究中心(NCAR)的公共地球系统模式(CESM)1.2.1版本^[3]为基础,清华大学联合国内多家高校和科研院所共同发展了联合地球系统模式(CIESM)。该模式的开发重点针对CESM模式以及当前气候模式存在的诸多系统偏差,在多个分量模式中引入一系列新的物理参数化方案来缓解这些偏差(图1)。目前参加CMIP6的版本不考虑碳、氮循环过程,因此暂时是一个气候系统模式。2018年初完成在英特尔机器上采用有限体积大气动力框架的1.0版本。2018年9月,在前期移植和优化工作^[4]的基础上,完成在国产高性能计算机“神威·太湖之光”上运行的采用谱元大气动力框架的1.1版本。目前参加CMIP6的1.1版本在国产神威机器上采用5400核运行速度可达10模式年每天,并首次实现了百万

核规模的全球25 km高分辨率大气数值模拟。以下简要介绍CIESM1.1各方面的开发工作。

1.1 大气模式

大气分量模式发展基于公用大气模式(CAM5)^[5],采用谱元(SE)动力框架,水平分辨率约为100 km,垂直分辨率为30层,模式层顶高度为1 hPa。大气模式的发展主要集中在缓解原有CESM模式中存在的系统偏差,包括但不限于海洋低云模拟偏少和双热带辐合带偏差问题。为了缓解这些偏差,我们对大气积云对流参数化、短波辐射传输、云宏物理和微物理方案,以及气溶胶的处理上都进行了针对性的改进。

首先,在原有的积云对流参数化^[6]中考虑对流的随机性^[7]。同时,我们采用了Song等^[8]开发的对流微物理方案,用来更好地描述对流和格点尺度云微物理过程的相互作用。这些改进提高了热带降水的总体分布和降水强度的模拟。在大尺度层云云量和凝结计算上,开发了一个诊断的统计云宏物理方案^[9]替代原有的云宏物理方案^[10]。考虑到云量和凝结之间的一致性以及原有方案中相对湿度阈值选取的主观性,该方案通过假设总比湿和液态水位温的联合变量服从高斯分布,并从模式中湍流和浅对流方案诊断得到联合变量次网格变化的方差来计算云量和凝结。该云宏物理方案的引入有效改善了海洋低云模拟偏少的问题,并一定程度缓解了双热带辐合带偏差^[11]。

基于原有的双参微物理参数化方案^[12],Zhao等^[13]发展了一个简化的单冰云微物理方案,该方案将冰和雪合并为同一个变量,并引入一个从0到1变化的融化度来刻画不同种类的降冰粒子。由于冰相和混合相微物理过程的减少,新方法不仅提高了计算效率,而且消除了原有方案中冰粒子到雪粒子之间的经验转化公式带来的不确定性,改进了热带高云和长波云辐射的模拟。

在短波辐射方面,一个基于球谐函数展开近似的短波四流累加辐射传输方案(4SDA)^[14-15]取代了原有的短波二流辐射传输方案。该方法在太阳高度角较大的情况下,可以减少辐射通量的计算误差。



图1 CIESM 构架图

Fig. 1 Framework and components of the CIESM

此外, 基于 Beljaars 等^[16]的方法, 我们把湍流拖曳作为大气动力方程中的一项直接考虑^[17], 改进了复杂地形下的低层风速模拟。在气溶胶的处理方面, 考虑到气溶胶及其化学过程的复杂性以及气溶胶气候效应的不确定性, 我们采用 Stevens 等^[18]给出的 MACv2-SP 方法和数据统一处理气溶胶的直接和间接效应。

1.2 海洋模式

海洋模式基于洛斯阿拉莫斯国家实验室 (LANL) 的 POP2 模式, 在海洋网格、正压求解器、混合方案以及海气通量交换的计算等方面进行了一系列改进。

新的海洋网格使用 Schwarz-Christoffel (SC) 共形映射生成^[19], 水平分辨率为 0.5° , 有 60 个垂直层, 从表面每层 6 m 到底部每层 250 m, 深度达到 6000 m。新网格具有良好的计算负载平衡, 同时在沿岸地区对于关键物理过程的计算有更高的精度。该网格目前还在紧密测试中, 下文的模式初步结果来自采用默认的 1° 网格的耦合模式模拟。在分辨率不断提高的情况下, 正压求解成为当前海洋模式的一个主要计算瓶颈^[20], Huang 等^[21]开发了一个高可扩展的海洋环流模式正压求解器 P-CSI, 有效提高了高分辨率模拟的并行能力。该求解器目前已被新一代的 CESM2.0 采用。已有研究表明在海温梯度大的区域风应力会加强, 因此我们引入了一个温度依赖的风应力方案来改善风应力模拟^[22]。新的风应力方案降低了全球海温偏差, 改进了赤道太平洋洋流系统的模拟, 同时改善了原有 CESM 中厄尔尼诺和南方涛动 (ENSO) 的模拟强度。同时, 我们还考虑了风应力引起的海表粗糙度改变对于海表反照率的影响。我们进一步增强了海洋模式在海洋性大陆附近的潮汐导致的垂直混合, 这不仅有助于改进海洋性大陆附近的温度的气候平均态, 还可以进一步改进赤道东西方向的温度梯度并在一定程度上改进 ENSO 的变率模拟。

1.3 陆面模式、海冰模式与耦合器

陆面模式基于 CLM4.0, 并对土壤参数集、地

表能量分配方案等做了一系列改进。土壤数据采用北京师范大学开发的全球土壤数据 (GSDE)^[23], 热力学粗糙度参数化采用 Yang 等^[24]的方法。陆面生态过程采用了一个高效的陆地碳氮循环模块^[25] (目前参加 CMIP6 的试验尚未使用)。海冰模式基于 CICE4.1, 与海洋模式使用相同的网格, 在海冰物理和动力过程方面做了改进, 如结冰温度考虑盐度影响, 考虑浮冰大小对侧向融化的影响。自主研发的耦合器 C-Coupler2^[26-27]用于处理 CIESM 模式中的各种耦合过程, 包括数据传输和插值等。同时我们还耦合了自然资源部第一海洋研究所的海浪模式^[28] (目前参加 CMIP6 的试验尚未使用)。

2 CIESM 模式拟参加的 CMIP6 试验计划

CMIP6 基于 CMIP5 的模式评估结果, 重新设计了耦合模式比较计划的整体结构, 其中包括气候诊断、评估和描述试验 (DECK), 历史气候模拟试验 (Historical) 以及 23 个 CMIP6 模式比较子计划 (MIPs)。其中 DECK 和 Historical 试验是每个参加 CMIP6 模式的必备试验。另外 CIESM 模式参加了云反馈模式比较计划 (CFMIP)、情景模式比较计划 (ScenarioMIP)、高分辨率模式比较计划 (HighResMIP)、全球季风模式比较计划 (GMMIP)、海洋模式比较计划 (OMIP)、海冰模式比较计划 (SIMIP) 等 6 个子计划, 具体详见表 1。此表也给出了每个子计划开展的具体试验, 各子计划试验预计于 2019 年逐步完成。

3 初步结果

这部分简要介绍一下模式的主要性能, 初步结果来自达到平衡状态 300 a 的工业革命前参照试验 (piControl) 耦合试验。全球平均降水为 3.00 mm/d。模式能基本抓住全球降水气候学计划 (GPCP) 的全球降水分布, 包括热带的主要降水带和中纬度风暴轴的主要降水。虽然南太平洋辐合带 (SPCZ) 的降水偏差有所下降, 但东印度洋和亚马孙地区降水偏低 (图 2)。

表 1 CIESM 模式拟参与的 CMIP6 试验
Table 1 CMIP6 experiments planned for CIESM

科学子计划	试验名称	积分时段	集合数目	
DECK	AMIP	36 a (1979—2014 年)	3	
	piControl	控制积分 500 a	1	
	abrupt-4xCO2	150 a	1	
	1pctCO2	150 a	1	
	Historical	Historical	165 a (1850—2014 年)	3
	CFMIP	amip-p4K	36 a (1979—2014 年)	1
	amip-4xCO2	36 a	1	
	amip-future4K	36 a	1	
	aqua-control	10 a	1	
	aqua-p4K	10 a	1	
	aqua-4xCO2	10 a	1	
ScenarioMIP	SSP1-2.6	86 a (2015—2100 年)	1	
	SSP2-4.5	86 a	1	
	SSP3-7.0	86 a	1	
	SSP5-8.5	86 a	1	
	HighResMIP	Tier-1	65 a (1950—2014 年)	1
GMMIP	amip-hist	145 a (1870—2014 年)	1	
OMIP	CORE-2	500 a	1	
SIMIP	DECK	165 a	3	

热带年际变率，如 ENSO 是衡量耦合模式性能的一个重要指标。Niño3.4 区的海温异常小波分析显示模式能较好地抓住热带太平洋的年际变率，包括 ENSO 的周期 (3 ~ 6 a 之间，峰值在 4 a 左右)，变化幅度也和观测较为接近，包括暖位相幅度比冷位相幅度大这一观测特征 (图 3)。

4 总结

本文简要介绍了清华大学联合多家单位共同开发的 CIESM1.1 模式以及参与 CMIP6 计划的基本情况，除了参与必须开展的 DECK 和 Historical 试验，该模式共拟参与 6 个 MIPs。目前 DECK 试验和 Historical 试验正在进行中，其他的子计划也将

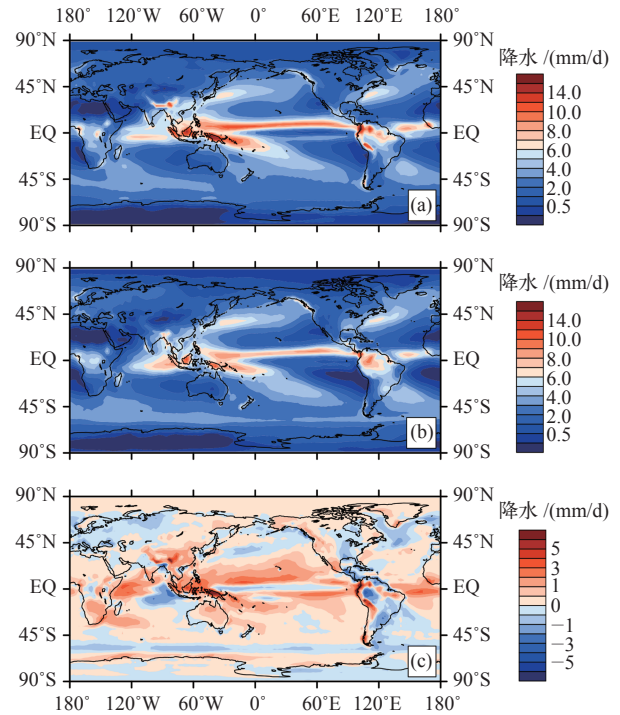


图 2 全球降水分布 (a) CIESM 模式模拟, (b) 1979—2009 年 GPCP 观测, (c) CIESM 模拟与 GPCP 观测降水的差异
Fig. 2 The spatial distribution of global precipitation rate from (a) CIESM, (b) GPCP observation during 1979—2009, and (c) the difference between CIESM and GPCP

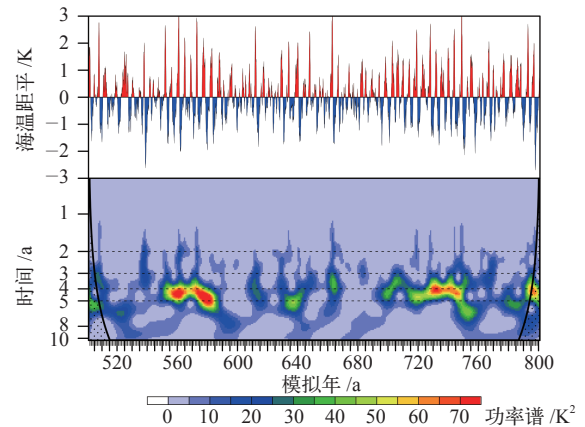


图 3 CIESM 模式模拟的 ENSO 小波分析 (300 a 模拟)
Fig. 3 Wavelet analysis of Niño3.4 sea surface temperature (SST) anomaly from 300 years of the CIESM piControl simulation

陆续完成并在 ESGF 平台^①发布数据。

此外，CMIP6 预计提交的模式数据总量为 20 ~ 40 PB。如果依然采取目前的“查询—下载—

① <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>。

本地分析”的工作模式, 模式数据对比分析工作将面临网络下载数据慢、本地分析硬件要求高等新的难题。清华大学提出了协同式数据分析的技术方法^[29], 并获得了专利授权。该方法把多个分布式的模式数据中心在逻辑上集成起来, 提供了“存—算”一体的远程数据管理和分析能力, 借助于数据中心的硬件资源, 用户无需下载原始数据即可得到多模式对比分析结果。该方法及其软件正在清华大学地球系统科学系、中国气象局、国家超级计算无锡中心、华东师范大学、中国科学院大气物理研究所、河海大学等多个地球系统模式研制和使用单位进行部署和评估。■

参考文献

- [1] Eyring V, Bony S, 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 models in China: a review from the Coupled Model Intercomparison Project perspective [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 72 (5): 892-907 (in Chinese)
- [3] Hurrell J W, Holland M M, Gent P R, *et al.* The community Earth system model: a framework for collaborative research [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94 (9): 1339-1360
- [4] Fu H H, Liao J F, Xue W, *et al.* Refactoring and optimizing the Community Atmosphere Model (CAM) on the Sunway TaihuLight Supercomputer [C]. USA: IEEE, 2016
- [5] Neale R B, Gettelman A, Park S, *et al.* Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 5.0) [Z/OL]. 2012 [2019-07-15]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=F121F6101D3BBF93810EFDA8686EFFD0?doi=10.1.1.422.3202&rep=rep1&type=pdf>
- [6] Zhang G J, Mcfarlane N A. Sensitivity of climate simulations to the parameterization of cumulus convection in the Canadian climate centre general circulation model [J]. *Atmosphere-Ocean*, 1995, 33 (3): 407-446
- [7] Plant R S, Craig G C. A stochastic parameterization for deep convection based on equilibrium statistics [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2008, 65 (1): 87-105
- [8] Song X, Zhang G J. Microphysics parameterization for convective clouds in a global climate model: description and single-column model tests [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116 (D2): D02201
- [9] Qin Y, Lin Y, Xu S, *et al.* A diagnostic PDF cloud scheme to improve subtropical low clouds in NCAR Community Atmosphere Model (CAM5) [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2018, 10 (2): 320-341
- [10] Park S, Bretherton C S, Rasch P J. Integrating cloud processes in the Community Atmosphere Model, version 5 [J]. *Journal of Climate*, 2014, 27 (18): 6821-6856
- [11] Qin Y, Lin Y. Alleviated double ITCZ problem in the NCAR CESM1: a new cloud scheme and the working mechanisms [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2018, 10 (9): 2318-2332
- [12] Morrison H, Gettelman A. A new two-moment bulk stratiform cloud microphysics scheme in the Community Atmosphere Model, version 3 (CAM3). Part I: description and numerical tests [J]. *Journal of Climate*, 2008, 21 (15): 3642-3659
- [13] Zhao X, Lin Y, Peng Y, *et al.* A single ice approach using varying ice particle properties in global climate model microphysics [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2017, 9 (5): 2138-2157
- [14] Zhang F, Li J. Doubling-adding method for delta-four-stream spherical harmonic expansion approximation in radiative transfer parameterization [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2013, 70 (10): 3084-3101
- [15] Li J, Ramaswamy V. Four-stream spherical harmonic expansion approximation for solar radiative transfer [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1996, 53 (8): 1174-1186
- [16] Beljaars A C M, Brown A R, Wood N. A new parametrization of turbulent orographic form drag [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2004, 130 (599): 1327-1347
- [17] Liang Y, Wang L, Zhang G J, *et al.* Sensitivity test of parameterizations of subgrid-scale orographic form drag in the NCAR CESM1 [J]. *Climate Dynamics*, 2017, 48 (9-10): 3365-3379
- [18] Stevens B, Fiedler S, Kinne S, *et al.* MACv2-SP: a parameterization of anthropogenic aerosol optical properties and an associated Twomey effect for use in CMIP6 [J]. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10 (1): 433-452
- [19] Xu S, Wang B, Liu J. On the use of Schwarz-Christoffel conformal mappings to the grid generation for global ocean models [J]. *Geoscientific Model Development*, 2015, 8 (10): 3471-3485
- [20] Hu Y, Huang X, Baker A H, *et al.* Improving the scalability of the ocean barotropic solver in the community Earth system model [C]. New York: ACM Press, 2015: 1-12
- [21] Huang X, Tang Q, Tseng Y, *et al.* P-CSI v1.0, an accelerated barotropic solver for the high-resolution ocean model component in the Community Earth System Model v2.0 [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9 (11): 4209-4225
- [22] Xu F. Test and evaluation of a simple parameterization to enhance air-sea coupling in a global coupled model [J]. *Satellite Oceanography and Meteorology*, 2018, 3 (3)
- [23] Shangguan W, Dai Y, Duan Q, *et al.* A global soil data set for earth system modeling [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2014, 6 (1): 249-263
- [24] Yang K, Koike T, Ishikawa H, *et al.* Turbulent flux transfer over bare-soil surfaces: characteristics and parameterization [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47 (1): 276-290

- [25] Luo Y, Shi Z, Lu X, *et al.* Transient dynamics of terrestrial carbon storage: mathematical foundation and its applications [J]. *Biogeosciences*, 2017, 14: 145-161
- [26] Liu L, Yang G, Wang B, *et al.* C-coupler1: a Chinese community coupler for Earth system modeling [J]. *Geoscientific Model Development*, 2014, 7 (5): 2281-2302
- [27] Liu L, Zhang C, Li R, Wang B, and Yang G. C-coupler2: a flexible and user-friendly community coupler for model coupling and nesting [J]. *Geoscientific Model Development*, 2018, 11: 3557-3586. DOI: 10.5194/gmd-11-3557-2018
- [28] Qiao F L, Zhao W, Yin X Q, *et al.* A highly effective global surface wave numerical simulation with ultra-high resolution [C]. NJ, USA: IEEE Press Piscataway, 2016. DOI: 10.1109/SC.2016.4
- [29] Xu H, Li S, Bai Y, *et al.* A collaborative analysis framework for distributed gridded environmental data [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2019, 111: 324-339

The Community Integrated Earth System Model (CIESM) from Tsinghua University and its plan for CMIP6 experiments

LIN Yan-Luan¹, HUANG Xiao-Meng¹, LIANG Yi-Shuang¹, QIN Yi¹, XU Shi-Ming¹, HUANG Wen-Yu¹, XU Fang-Hua¹, LIU Li¹, WANG Yong¹, PENG Yi-Ran¹, WANG Lan-Ning², XUE Wei¹, FU Hao-Huan¹, ZHANG Guang-Jun¹, WANG Bin^{1,4}, LI Rui-Zhe¹, ZHANG Cheng¹, LU Hui¹, YANG Kun¹, LUO Yong¹, BAI Yu-Qi¹, SONG Zhen-Ya³, WANG Min-Qi¹, ZHAO Wen-Jie¹, ZHANG Feng⁵, XU Jing-Heng¹, ZHAO Xi¹, LU Chun-Song⁵, LUO Yi-Qi¹, CHEN Yi-Zhao⁶, HU Yong¹, TANG Qiang¹, CHEN De-Xun⁷, YANG Guang-Wen⁸, GONG Peng¹

1 Department of Earth System Science/Ministry of Education Key Laboratory for Earth System Modeling, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2 Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3 First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 4 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 5 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 6 Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 7 Jiangnan Institute of Computing Technology, Wuxi 214000, China; 8 National Supercomputing Center in Wuxi, Wuxi 214000, China

Abstract: World Climate Research Programme (WCRP) organized the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). Tsinghua University, collaborated with several institutes in China, released the Community Integrated Earth System Model (CIESM) after many years of devoted model development. Except for the DECK and Historical experiments required by CMIP6, CIESM will also participate in six CMIP6-endorsed Model Intercomparison Projects (MIPs). Via the introduction of basic information and participation of CIESM in various MIPs, the paper will provide a brief reference for the future users of model outputs from various experiments.

Keywords: Tsinghua University; Community Integrated Earth System Model (CIESM); CMIP6; Climate system model (CSM); Earth system model (ESM)