

《所庆 95 年专刊》投稿

## FGOALS 高分辨率气候模式系统模式研制与应用综述

俞永强<sup>1,2\*</sup> 安博<sup>1</sup> 刘海龙<sup>1,2</sup> 包庆<sup>1,2</sup> 林鹏飞<sup>1,2</sup> 何编<sup>1,2</sup> 郑伟鹏<sup>1,2</sup> 栾贻花<sup>1</sup> 白文蓉<sup>1,2</sup> 李恬燕<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院大气物理研究所 LASG, 北京 100029

2. 中国科学院大学, 北京 100049

### 摘 要

当今气候系统模式发展的重要趋势之一, 是通过提高模式的空间分辨率, 改进对气候系统中多尺度相互作用过程和极端事件的模拟能力。过去 5 年里, 中国科学院大气物理研究所发展并完善了 25 公里分辨率大气环流分量模式 FAMIL2.2、 $1/10^\circ$  分辨率海洋环流分量模式 LICOM3.0, 并以此为基础建立了高分辨率气候系统模式 FGOALS-f3-H。利用上述高分辨率模式, 开展了大量的数值模拟试验和预报/预测研究, 其中包括国际耦合模式比较计划第六阶段 (CMIP6) 的高分辨率模式比较子计划 (HighResMIP), 建立了海洋环流预测系统 (LFS) 等。初步评估分析表明, 相对于低分辨率模式, 高分辨率模式对气候平均态和气候变率的模拟能力均有明显改进。其中高分辨率大气环流模式可以更好地模拟台风、极端降水事件, 高分辨率海洋模式可以更好地模拟海洋中尺度涡旋和西边界流, 而高分辨率耦合模式则可以更好重现中尺度海气相互作用过程、热带不稳定波动 (TIW) 等事件。

**关键词:** 气候系统模式; 高分辨率; 多尺度相互作用; 国际耦合模式比较计划

**文章编号**

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2309.23317

收稿日期 2023-09-27 网络预出版日期

\* 通讯作者 俞永强, E-mail: yyq@lasg.iap.ac.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 (2020YFA0608800), 国家自然科学基金项目 (91958201、42130608、42242018), 中国科学院国际伙伴计划项目 183311KYSB20200015

Funded by National Key Research and Development Program of China (2020YFA0608800), and National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grants 91958201、42130608、42242018), the International Partnership Program of Chinese Academy of Sciences (Grant 183311KYSB20200015)

# A Review of the Development and Application of the High-Resolution Climate System Model FGOALS

YU Yongqiang<sup>1,2\*</sup>, AN Bo<sup>1</sup>, Liu Hailong<sup>1,2</sup>, BAO Qing<sup>1</sup>, LIN Peng fei<sup>1,2</sup>, HE Bian<sup>1,2</sup>,  
ZHENG Weipeng<sup>1,2</sup>, LUAN Yiha<sup>1</sup>, BAI Wenrong<sup>1,2</sup>, and LI Tianyan<sup>1,2</sup>

*1 LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

*2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

## Abstract

One of the major trends in the development of climate system models today is to improve the ability to simulate multi-scale interaction processes and extreme events in the climate system by increasing the spatial resolution of climate models. In the past five years, scientists from the Institute of Atmospheric Physics (IAP), Chinese Academy of Sciences (CAS) have developed and improved the 25 km resolution atmospheric circulation model FAMIL2.2 (Finite Volume Atmosphere Model of IAP LASG version 2.2) and the 1/10° resolution ocean circulation model LICOM3.0 (LASG/IAP Climate system Ocean Model version 3.0), and established the high resolution climate system model FGOALS-f3-H (Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System Model version f3-H) based on them. A large number of numerical experiments of climate simulation and forecast/prediction have been carried out using the above high-resolution models, including the high-resolution model comparison project (HighResMIP) of the sixth phase of the international Coupled Model Inter-comparison Project (CMIP6), and the establishment of an ocean circulation prediction system (LICOM Forecast System, LFS). Preliminary

diagnosis and analyses show that compared to low-resolution models, high-resolution models can better simulate mean climatology and climate variability. In particular, the high resolution atmospheric model can better simulate typhoons and extreme precipitation, and high resolution oceanic model can better simulate the western boundary currents and mesoscale eddies, while the high resolution coupled model better reproduce mesoscale sea-air interaction processes and Tropical Instability Waves (TIW).

**Key Words: Climate System Model; High Resolution; Multi-scale Intercation; CMIP**

## 1 引言

气候数值模式是定量研究气候演变规律、预测或预估气候变化的重要工具之一，已在地球系统科学研究中得到了广泛应用。为了确保模式核心技术的自主可控以及在国际气候变化研究和谈判的话语权，世界上主要发达国家均长期坚持自主研发气候数值模式。上世纪 60 年代美国地球流体动力学实验室（GFDL）研制了国际上第一个气候模式并开启了气候变化模拟研究，模式团队负责人之一 Manabe 也因此获得了 2021 年度诺贝尔物理学奖。尽管气候模式的研发历史已经超过了半个世纪，但是由于地球系统内部存在复杂的多圈层和多尺度复杂的非线性相互作用过程以及人们对一些过程认知存在局限性，当代气候模式仍然存在相当大的不确定性（IPCC，2021）。

为了理解气候模式偏差形成的原因和减小未来气候变化预估的不确定性，世界气候研究计划（WCRP）于 1990s 初期组织了国际耦合模式比较计划（CMIP）。该计划一经推出就引起了学术界的极大重视，并一直持续至今，其试验结果不仅为 IPCC 气候变化评估报告提供了重要支撑，也极大地促进了模式的发展。基于 CMIP 试验结果的分析，目前主要从提高分辨率和改进次网格参数化方案两方面减小模式的不确定性。这是因为提高模式空间分辨率，可直接分辨更多的中小尺度动力过程，从而减小对参数化方案的依赖性，同时以往的天气预报和气候模式研发经验也表明提高模式分辨率是减小模式误差的重要途径之一。随着高性能计算资源的增加，近几年越来越多的全球研究机构开始发展高分辨率全球气候模式（栾贻花等，2016）。为此，最新一期模式比较计划 CMIP6 专门设计了一组高分辨率模式比较子计划 HighResMIP（Eyring et al., 2016）。国内外多个模式研发中心参与了该子计划，其中来自美国、英国及中国科学院大气物理研究所模式团队发展的 3 个耦合模式具有最高的水平分辨率。

大量研究表明，水平分辨率的提高显著提升了模式对气候及其变率的模拟能力，也为更准确的气候预测和气候变化预估奠定了基础。对海洋模式来说，海洋第一斜压罗斯贝半径随纬度的空间分布，决定了水平分辨率达到  $1/10^\circ$  -  $1/12^\circ$  海洋模式才能直接解析全球大洋大部分区域的中尺度涡旋（除高纬地区和近岸区域）（Hallberg, 2013）。依据海洋中一阶斜压模的 Rossby 变形半径尺度的空间分布特征，可以按照水平分辨率将海洋模式分为三类，其中水平分辨率低于  $1^\circ$  的模式需要对中尺度涡旋进行参数化（即粗分辨率模式，“eddy-parameterizing”模式）、水平分辨率在  $1/4^\circ$  左右的模式可以在热带地区分辨中尺度涡旋（即涡旋部分可分辨模式，“eddy-permitting”或“eddy-present”模式），水平分辨率为  $1/10^\circ$  左右的模式可以在全



球绝大部分海区分辨中尺度涡旋（即涡分辨率模式，“eddy-resolving”或“eddy-rich”模式）。相比前两类低分辨率海洋模式， $1/10^\circ$ 左右的涡分辨率海洋模式可以模拟出开阔洋面无处不在且能量活跃的中尺度涡旋，以及边界流区域的准永久活跃涡旋。涡分辨率海洋模式模拟海洋中尺度涡输送作用也系统性地不同于涡旋部分可分辨的海洋模式，尤其体现在中尺度涡旋对物质和能量的垂直输送作用，而这影响着次表层的热盐收支平衡、可能造成模式模拟漂移（Griffies et al., 2015; von Storch et al., 2016）。在水平分辨率提升之后，海洋模式还可以更好地模拟地形敏感区域比如海峡和贯穿流（Hewitt et al., 2016）。对大气模式来说，将分辨率从CMIP5典型的100公里分辨率提高到25公里，可以模拟出更多天气尺度过程比如热带气旋、更真实的地形作用、以及局地大气状态由海洋主导的中尺度海气相互作用（Bacmeister et al., 2014; Small et al., 2014）。同时，高分辨率大气模式可以捕捉到下垫面高频中尺度海温异常扰动，进而模拟更真实的大气边界层，包括垂直深度可达对流层的深对流。高分辨率全球耦合气候模式，由高分辨率海洋和大气分量模式组成，具备这两个分量模式的优越性能，并且可以模拟更真实的中尺度海气相互作用（Ma et al., 2016）。高分辨率耦合模式对中尺度海气相互作用过程模拟性能的提升，反过来，也提升了模式对海表温度气候态、次表层模式漂移、水循环、年际变率如ENSO和IOD、年代际变率如大西洋多年代际振荡（AMO）、南极绕极流（ACC）、南大洋和海冰等大尺度气候特征的模拟能力。这些现象的模拟性能提升对区域年代际预测至关重要，同时也是模式更准确地模拟出气候变率和长期气候变化趋势的前提条件。

大气物理研究所自从上世纪八十年代以来就一直把发展气候模式作为核心目标之一，从最初的2层大气环流模式（Zeng et al., 1987）和4层海洋环流模式（Zhang et al., 1989）以及相应的全球海气耦合模式（Zhang et al., 1992），到大气环流模式（AGCM）（Wu et al., 1996）和大洋环流模式（OGCM）（Zhang et al., 1996）、海陆气冰耦合气候系统模式（吴国雄等, 1997; Yu et al., 2002; Yu et al., 2004），经过数十年的继承发展，不断迭代更新到目前的FGOALS耦合气候系统模式（灵活的全球海-气-陆-系统模式，Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System Model, FGOALS）（Yu et al., 2008; Yu et al., 2011; Li et al., 2013; Bao et al., 2013）。上述气候系统模式积极参与各项国际气候模式计划，其数值试验结果不仅广泛地应用于国内外的地球科学研究，而且还被联合国政府间气候变化委员会（IPCC）

发表的气候变化评估报告所引用，为气候政策的制定提供科研支撑（Zhou et al., 2018; Zhou et al., 2020）。

面对气候变化研究和应用的迫切需求，大气物理研究所模式团队积极发展新版本气候模式以应对新的研究挑战。首先在已有模式的基础上，发展了高分辨率海洋模式和大气环流模式，并分别进行高分辨率耦合试验：包括高分辨率海洋模式与 CAM4 耦合（Lin et al., 2019），大气模式与 POP2 耦合等。在海洋模式动力框架进一步改进升级后（俞永强等，2018），高分辨率大气模式 FAMIL2.2（Finite Volume Atmosphere Model of IAP LASG version 2.2）、新一代的高分辨率海洋模式 LICOM3.0-H（LASG/IAP Climate system Ocean Model version 3.0-H）与高分辨率海冰模式、陆面模式一起，耦合组成了高分辨率耦合模式 FGOALS-f3-H（An et al., 2022）。当前最新一代的 FGOALS 包含三个具有不同分量模式组合的版本：FGOALS-g3（Li et al., 2020a），FGOALS-f3-L（Guo et al., 2020）和 FGOALS-f3-H。这三个耦合模式的海洋分量模式都是 LICOM3.0；但应用了不同的大气分量模式，FGOALS-g3 采用了一个格点大气模式 GAMIL3，FGOALS-f3-L 和 FGOALS-f3-H 采用的是基于球面立方体剖分投影的有限体积模式 FAMIL2.2（Bao 和 Li, 2020; Li et al., 2021）。FGOALS-g3 和 FGOALS-f3-L 为低分辨率版本，FGOALS-f3-H 则是高分辨率版本。本文主要综述近 5 年来大气物理研究所在高分辨率气候模式研制和应用方面的主要进展，其中第 2、3 和 4 节分别介绍 25 公里分辨率的大气环流模式 FAMIL2.2、0.1 度分辨率海洋模式 LICOM3.0 和高分辨率气候系统模式 FGOALS-f3-H 的研制及应用，第 5 节对全文总结及展望。

## 2 高分辨率大气环流模式 FAMIL

### 2.1 模式发展

LASG 大气环流模式 F/SAMIL 的发展经历分为两个阶段。90 年代初，吴国雄课题组引进了大气环流谱模式 R15L9，该模式是在澳大利亚谱模式的基础上发展而来的。在动力框架方面，吴国雄等（Wu et al., 1996）采用了曾庆存（1963）提出的参考大气扣除的方法，而王在志等（2005a, 2005b）提高了水平和垂直方向的分辨率，王鹏飞等（2006）又进行了并行化处理。最终该模式被正式命名为 Spectral Atmosphere Model of IAP LASG，简称 SAMIL（周天军 等，2005；包庆 等，2006）。

2010 年左右，FV3 动力框架被引入大气所气候系统模式中，发展了新一代大气环流模式 Finite Volume Atmosphere Model of IAP LASG，简称 FAMIL（周林炯，2015）。

这种模式采用有限体积球立方网格，支持全球聚焦变网格，具有高分辨率和加密功能。在 FAMIL 中，半拉格朗日通量形式平流方案被接入了 FV3 动力框架。理想试验和干框架试验表明，这种平流方案能够实现模式本身的保形和正定特性，并克服了“负水汽问题”，改善了降水频次 (Wang et al., 2013)。Zhou 等 (2012) 研究表明大气模式 FAMIL 具有优越的并行计算性能和并行 I/O 性能，其动力框架最高可以实现 6.25 公里的水平分辨率。Li 等 (2017) 研究表明，该模式在 CPU 使用率、CPU 节点间信息传输等待时间、代码向量化、Gflops 平均值、Gflops 峰值五个方面表现优异，模式系统具有良好的可扩展性。

由于大气环流模式网格尺度较大，不能直接解析小尺度天气过程，气候模式通过参数化间接表示次网格过程对平均网格的贡献。物理过程参数化是模式模拟及预测的最大不确定性来源，尤以对流-云-辐射的参数化过程最为复杂，大气环流模式的整体性能很大程度上受制于上述湿物理过程的参数化水平。LASG 大气模式发展至今，先后引进替换了多种对流参数化方案，并开展了对其模拟性能的评估 (宋晓良, 2005; 刘琨等, 2010; Wang et al., 2011)。尽管已有的研究工作丰富了人们对积云对流问题的理解，但由于积云对流本身所涉及的多尺度相互作用的复杂性，积云参数化的研究进展依然缓慢，其中闭合假设和积云模型的不确定性最大。近期，结合大涡模拟和场地试验数据，夹卷率和积云垂直动量在理论和参数化领域取得明显进展 (Wang and Zhang, 2014)。在尺度自适应参数化方案发展方面，FAMIL 模式组自主研发显式对流降水方案 (Resolved Convective Precipitation, 简称为 RCP)，实现积云对流降水显式化，将传统的积云对流降水用单参数云微物理方程改写，然后分别计算它们的云微物理属性，减少传统积云对流参数化方案中由于对流效果的平均化和强烈依靠对流参数准确性带来的误差。针对模式评估结果，在 25-100 公里的水平分辨率下，RCP 方案的 FAMIL2 模式和其耦合版本 FGOALS-f3 显著增强了热带大气季节内振荡 MJO 的模拟能力 (图 1)，减少了双赤道辐合带误差，提高了厄尔尼诺 (ENSO) 的模拟能力，准确再现极端降水强度和日变化特征 (图 2)，并且提高热带气旋 (台风) 模拟能力 (图 3) (He et al., 2019; Li et al., 2019; Bao et al., 2020; Bao and Li, 2020; Ahn et al., 2020; Li et al., 2021)。

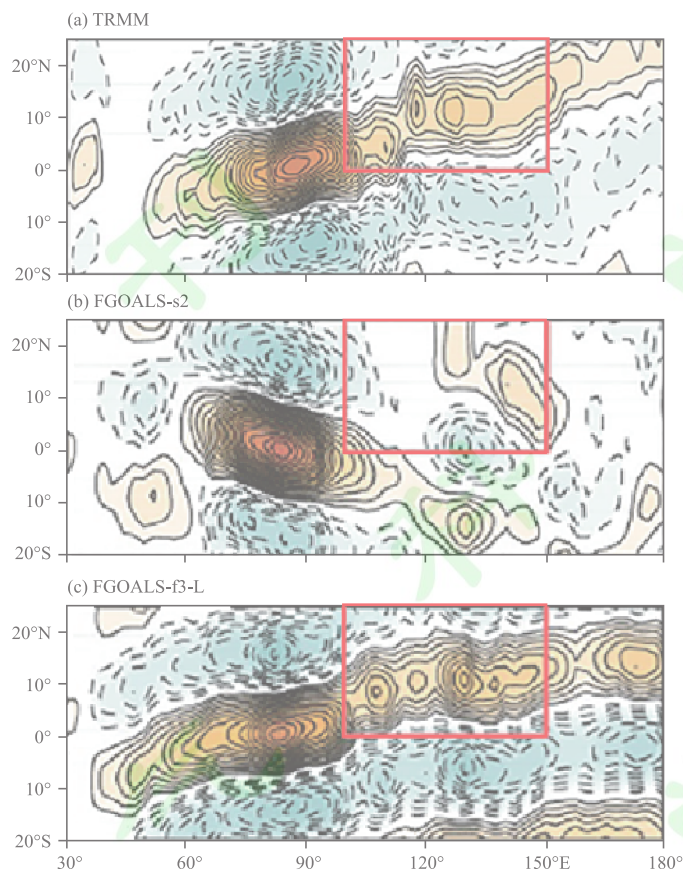


图1 气候系统模式 FGOALS-s2 和 FGOALS-f3-L 对 MJ0 模拟性能。(a) TRMM 卫星观测, (b) 参与 CMIP5 试验的 FGOALS-s2 模式结果, (c) 参与 CMIP6 试验的 FGOALS-f3-L 模式结果。引自 Ahn et al. (2020)

Fig.1 The ability of climate system model FGOALS-s2 and FGOALS-f3-L in simulating MJ0. (a) TRMM satellite observation. (b) FGOALS-s2 CMIP5 simulation (c) FGOALS-f3-L CMIP6 simulation. Cited from Ahn et al. (2020)



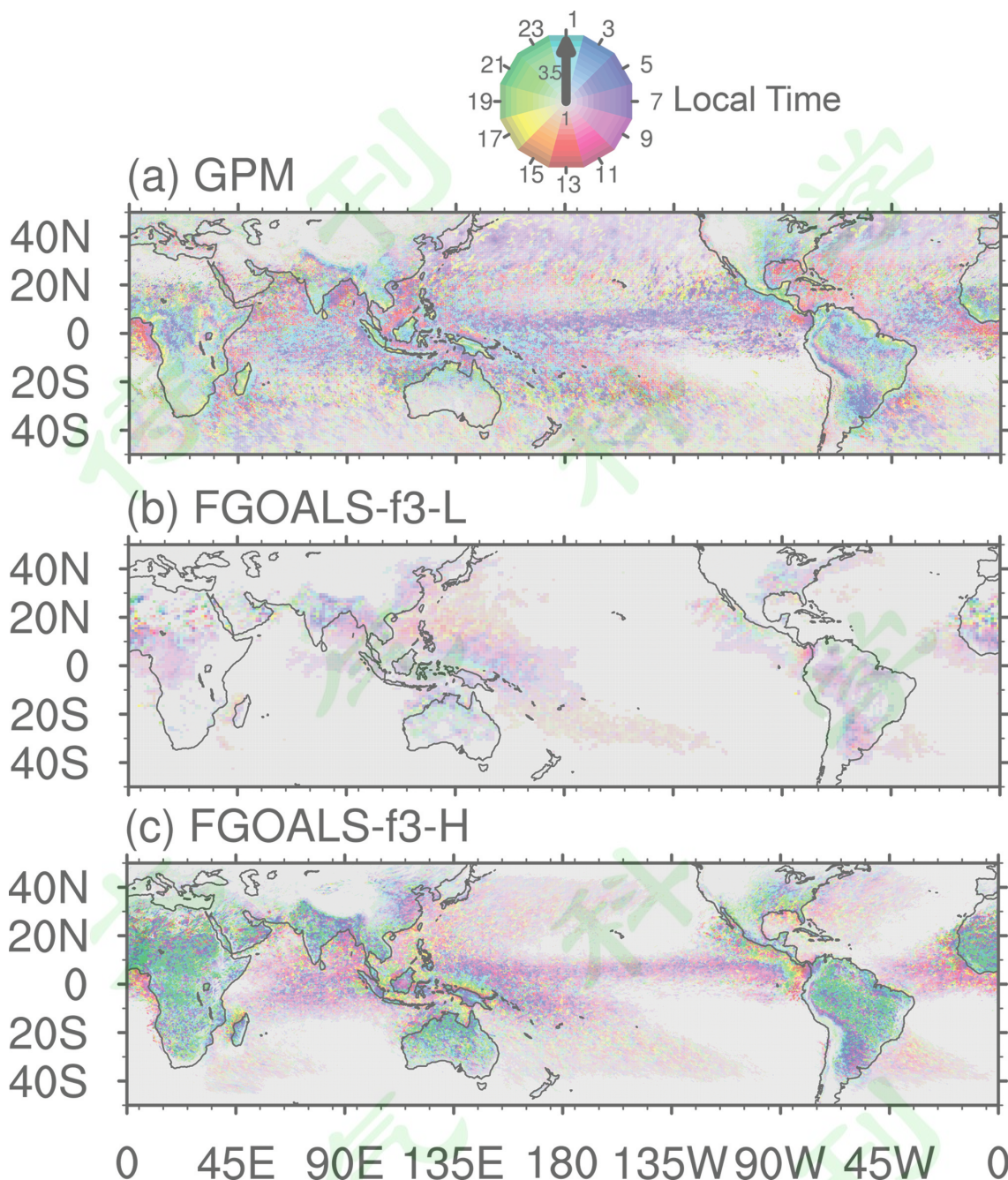


图2 FGOALS-f3-L 和 FGOALS-f3-H 大气分量模式 AMIP 试验对降水日变化的模拟性能。(a) GPM 卫星观测, (b) FGOALS-f3-L 模式 AMIP 试验结果, (c) 参与 FGOALS-f3-H 模式 AMIP 试验结果。引自 Bao et al. (2020)

Fig. 2 The AMIP results of atmospheric component model FGOALS-f3-L and FGOALS-f3-H in simulating diurnal cycle of the precipitation. (a) GPM satellite observation. (b) FGOALS-f3-L AMIP simulation (c) FGOALS-f3-H AMIP simulation. Cited from Bao et al. (2020)



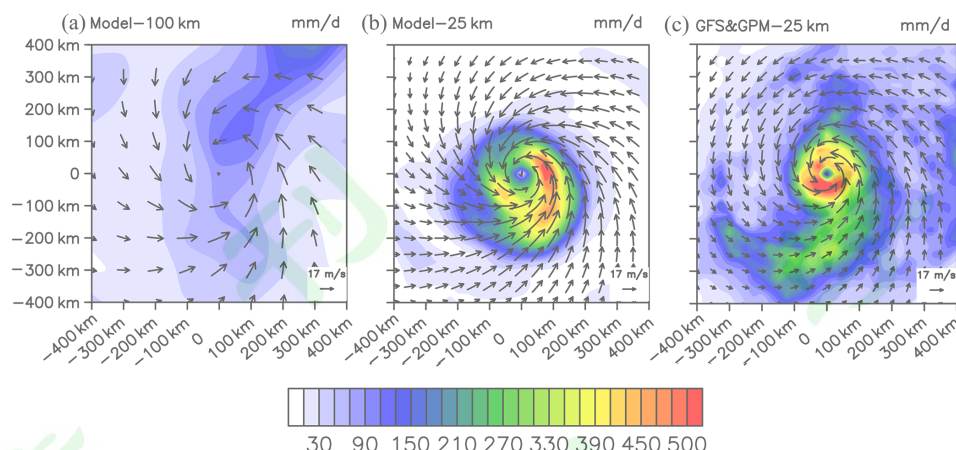


图3 FGOALS-f3-L 和 FGOALS-f3-H 大气分量模式对台风的模拟性能：30 个强台风合成的 10m 风和日降水率。(a) 100km 分辨率的 FGOALS-f3-L 大气分量模式模拟结果，(b) 25km 分辨率的 FGOALS-f3-H 大气分量模式模拟结果，(c) GFS 环流分析场和 GPM 降水场合成的结果。引自 Li et al. (2021)

Fig.3 The ability of atmospheric component model FGOALS-f3-L and FGOALS-f3-H in simulating tropical cyclones. (a) 100km resolution FGOALS-f3-L simulation (b) 25km resolution FGOALS-f3-H simulation. (c) Results of the surface 10 m wind in GFS and the daily precipitation rate in GPM. Cited from Li et al. (2021)

## 2.2 模式评估

极端降水灾害占中国自然灾害的 70%，准确模拟和预估极端降水事件对防灾减灾十分重要。FAMIL2 模式缓解了青藏高原南坡虚假降水问题，模拟青藏高原地区的日降水概率密度分布与高分辨率卫星资料一致 (Bao and Li, 2020)。FAMIL2 模式能够再现亚洲夏季风的降水日变化峰值时间，并再现了我国陆地夜间降水峰值的特点。大部分 CMIP5 模式不能抓住 150mm/day 以上的极端降水，并且低估了极端降水的频次，而 FAMIL2 模式提高了对中国东部极端降水的模拟能力 (He et al., 2019)。

MJO 是大气环流的重要系统，MJO 的活动对天气和气候有明显影响。FAMIL2 及其全耦合版本 FGOALS-f3 准确再现了 MJO 东传的强度和速度特征。大部分 CMIP5 和 CMIP6 模式模拟 MJO 东传明显偏弱，但采用 RCP 方案的 CMIP6 大气所 FGOALS-f3 模式模拟的 MJO 东传强度增强、速度合理，MJO 的模拟性能获得了显著提升 (Ahn et al., 2020, 图 2.1)。

国际主流气候模式在 100 公里标准分辨率下模拟台风个数偏少、模拟能力不足。FAMIL2 通过采用显式对流降水方案 RCP 改进了对流耦合红道波群和 MJO 的模拟能力，使用 100 公里分辨率能够再现全球热带气旋的生成位置、移动路径、季节循环、年际

变率等特征。100 公里分辨率的 FAMIL2 模式模拟出西北太平洋热带气旋爆发个数为 76 个/年，与观测结果一致，优于国际主流模式中 9 个/年的结果。FAMIL2 有能力模拟出热带气旋爆发个数的年际变率，在西北太平洋、北大西洋的热带气旋爆发个数的时间相关系数分别是：0.51 和 0.49 (Li et al., 2019; He et al., 2019; Bao et al., 2020)。

## 2.3 模式应用

FAMIL 模式团队建立了天气-气候一体化的集成无缝隙预测系统，简称为 FGOALS-f2 无缝隙预测系统。与传统的气候预测系统相比，该系统采用了无缝隙的集成预测方法，将天气和气候的预测融合在一起，以提高预测的准确性和时效性。FGOALS-f2 无缝隙预测系统在 MJ0、热带气旋（台风）、厄尔尼诺、北极海冰等方面已达到国际同类模式预测系统的先进水平。该系统能够较准确预测天气和气候变化的趋势和变化规律，为政府、企业和公众提供了重要的预测信息。FGOALS-f2 无缝隙预测系统的预测结果不仅多次用于国家级会商，参与咨询报告撰写，还被广泛应用于中国气象局国家气候中心、自然资源部国家海洋环境预报中心、水利部信息中心等多家国家级和省级业务平台中。这些应用不仅服务了国家需求和国防安全，还为农业、水利、能源等重要领域提供了可靠的预测依据。FGOALS-f2 无缝隙预测系统已多次助力一带一路地区防灾减灾，提升了我国在 S2S（次季节-季节）预测领域的国际影响力。该系统已经加入了世界气象组织（WMO）S2S 预测计划，向全球用户提供实时预测。在国际 S2S 参与模式系统中，FGOALS-f2 系统的实时预报时效性最高，重要指标的预测水平达到国际同类模式预测系统的先进水平。例如，MJ0 预报技巧可达 30 天，接近欧洲中心 33 天的 MJ0 预报技巧。FGOALS-f2 无缝隙预测系统是我国天气气候预测领域的重要成果之一，具有较高的技术水平和广泛的应用前景。该系统不仅为我国天气气候预测的发展做出重要贡献，而且为全球防灾减灾和气象灾害预警提供了重要支持。

## 3 高分辨率海洋环流模式 LICOM

### 3.1 模式发展

海洋环流本身具有鲜明的非线性多尺度相互作用的动力特征，这就要求海洋模式不仅需要足够高的空间分辨率，而且还需要采用次网格物理参数化方案描述数值计算方案无法直接分辨率的动力过程。例如，目前高分辨率海洋模式已经可以直接模拟海

洋中的 Rossby 波、中尺度涡等与天气气候现象紧密相关的过程；另一方面模式次网格过程需要合理地模拟次网格动力过程对大尺度环流的影响。在这样的需求驱动下，LICOM (LASG/IAP Climate system Ocean Model) 高分辨率版本发展也进行了大量的工作。

首先，改进了模式的动力框架。俞永强等（2018）发展了一个可以适用于任意水平正交曲线坐标系的海洋模式动力框架，并应用于气候系统海洋模式 LICOM，实现了三极网格的新版本。新动力框架克服了经纬网格北极点处理为孤岛的缺陷，避免模式网格距随纬度增加而急剧减小带来的计算不稳定，并去掉了原本的空间滤波，增加了模式的可扩展性和计算效率。其次，Lin 等（2019）升级了模式的耦合器，并利用涡分辨率海洋模式 LICOM2.0 与高分辨率大气模式耦合，构建了超高分辨率准全球耦合模式。该模式在当前气候条件下成功运行 6 年，并根据观测和再分析数据对模拟进行了评估。再次，进行了模式异构并行的改进。Jiang 等（2019）使用 OpenACC 实现了 LICOM2.0 的 GPU 加速，Wang 等（2021）使用 HIP 以及 Wei 等（2023）使用 CUDA 实现了 LICOM3.0 时间积分部分的 GPU 加速。HIP 版本一方面在国产超算平台上成功实现了 6550 个节点和 26200 个 GPU 的测试，另一方面建立了全球  $1/20^\circ$  的海洋模式版本，模式的速度提高到每天约 2.72 个模拟年（图 4）。而 CUDA 版本的高分辨率（ $0.1^\circ$ ）模式，在小规模的测试上得到了约 4.5 倍的加速。此外，模式也进行了物理过程的改进，增加了潮致混合（于子棚等，2017）、引入了时空变化沿等密度面混合系数（李逸文，2019）等。

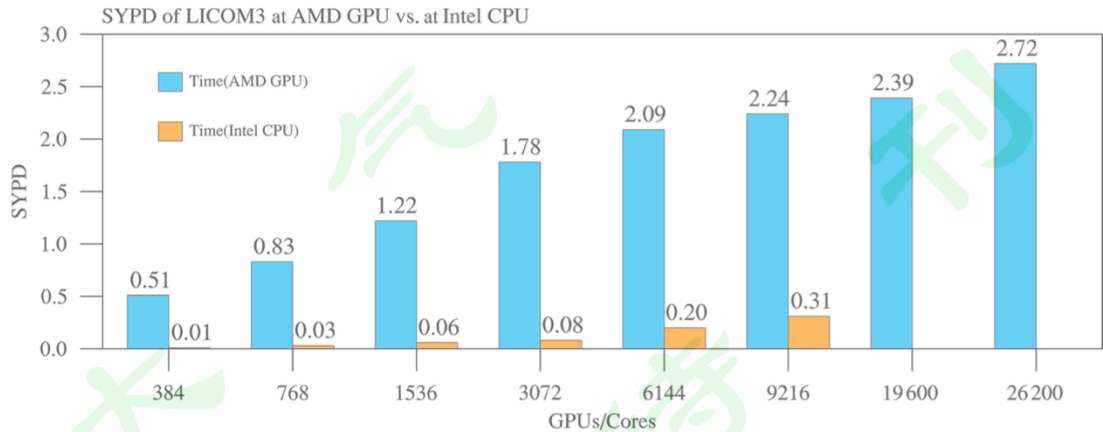


图 4 LICOM3.0 海洋模式（ $1/20$  度分辨率）在 AMD GPU 与 Intel CPU 上并行效率对比（单位：模拟年/天）。引自 Wang et al. (2021)

Fig. 4 Simulation performances of the AMD GPU vs. Intel CPU core for LICOM3 (1/20°).  
Unit: SYPD (Simulation years Per Day). Cited from Wang et al. (2021)

基于上述动力框架和并行技术的改进，建立了气候系统海洋模式第三版（LICOM3），其低分辨率（Lin 等，2019）和高分辨率（Li 等，2020b）版本均参与了国际海洋模式比较计划（OMIP）。低分辨率的 LICOM3 分别采用了海洋-海冰参考试验第二阶段（Coordinated Ocean-Ice Reference Experiments, Phase II, CORE-II）的数据集和日本大气再分析表面数据（JRA55-do）强迫模式，利用来自观测气候态和年际变化数据，对两个试验的模拟性能进行检验。结果表明模式的两个试验均很好再现了平均态、年际变化和长期线性趋势，两个试验的差异主要来自强迫场之间的差异。针对高分辨率模式，采用了 JRA55-do 的强迫场，连续积分了 61 年（1958–2018）得到了全球高分辨率海洋状态模拟。利用观测和再分析资料对数据集对模拟的海洋大尺度和中尺度空间特征进行了检验评估，检验表明海洋中尺度空间分布结构模拟较好，中尺度结构对海表面温度 SST 变化的贡献在中尺度活动区可以达到 50%，与观测相当。涡分辨率模拟的大尺度特征相对低分辨率也有明显改进，表现为气候态 SST 偏差明显减小，模拟的 SST 变化趋势和北大西洋经圈翻转环流演变也明显改进。除了以上两套标准试验之外，Ding 等（2022b）利用 ERA-20C（1901–2010）的 6 小时大气数据驱动高分辨率 LICOM3，模拟了过去百年全球海洋的变化，模拟结果可以真实地再现大尺度全球海洋环流，并捕捉到全球表面中尺度涡旋的基本特征。以上这些数据都可以公开下载，具体信息请参见相关文献。

### 3.2 模式评估

模式评估是模式发展的基石，而多模式比较则是模式评估的一个关键的手段。在提交 OMIP 模拟试验数据的同时，LICOM3 也参与了国际海洋模式比较计划（OMIP）框架下的多模式数值试验和模拟评估工作。

Tsujino 等（2020）通过评估 11 个全球海洋-海冰模式的试验结果，比较了基于 JRA55 再分析资料的 JRA55-do 海洋强迫场数据集和 CORE-II 海洋强场的差异，LICOM3 就是这 11 个模式之一，这两组试验也分别被称为 OMIP-1 和 OMIP-2。这两个试验模拟的许多特性非常相似，但 OMIP-2 再现了 20 世纪 80 年代和 90 年代观测到的全球变暖，以及 21 世纪初期变暖停滞和近期的加速变暖，OMIP-1 无法再现这些现象。而且 OMIP-



306 1 模拟两半球夏季海冰浓度的负偏差在 OMIP-2 中显著减小, OMIP-2 模拟的海温和海表  
307 高度(动力海平面)的季节和年际变化的总体有所提高。这些结果都证明了新的强迫场  
308 JRA55-do 总体上要优于旧强迫场。Chassignet 等(2020)评估了 4 对高低分辨率的海  
309 洋-海冰模式 OMIP-2 试验的结果。虽然这些模式在数值和参数化上各不相同,但每一  
310 对高低分辨率模式都是匹配的,从而尽可能地区分水平分辨率的影响。低分辨率模拟  
311 中西部边界流、赤道流和南极绕极流的位置、强度和变率的偏差,在高分辨率模式中  
312 得到了显著改善。然而,尽管高分辨率模式“分辨”了大部分这些特征,但温度和盐  
313 度的改善在不同模式家族之间并不一致,有些区域高分辨率模式比低分辨率模式的偏  
314 差更大。也就是说,从目前的结果看,大幅提高水平分辨率并不能在所有模式的所有  
315 区域提供明确的偏差改善。Ding 等(2022a)使用了与 Chassignet 等(2020)相同的高  
316 分辨率数值试验结果以及两个额外的高分辨率 LICOM3.0 试验,评估了涡分辨率全球  
317 海洋-海冰模式模拟中尺度涡流的性能。与卫星观测相比,尽管全球平均涡动动能被低  
318 估了 25%-45%,涡旋活跃区涡动动能大约被高估 27% - 60%,主要位于黑潮延伸体、墨  
319 西哥湾流和南极绕极流地区,而涡旋非活跃区涡动动能被低估。基于相关中尺度涡特  
320 性的进一步分析表明,涡旋活跃区的高估主要归因于中尺度涡的强度,并且在中尺度  
321 涡处于发展阶段时更为突出。这为进一步评估和改进模式指出了方向。Treguier 等  
322 (2023)评估了来自海洋模式比较计划(OMIP)受共同大气影响状态驱动的 6 组低分  
323 辨率和涡分辨率模式的混合层深度(MLD)。分析发现,在冬季低分辨率模式在深水形  
324 成区域表现出较大的偏差,这些偏差在涡分辨率模式中有所减少,但不同模式模拟的  
325 区域偏差不同,其中北半球模态水形成区偏差的改进最为明显,而南大洋的结果对比  
326 更加鲜明,高、低分辨率中偏差符号相反。

327 在 OMIP 模拟比较计划框架之外,还有大量研究单独评估了高分辨率 LICOM 版本的  
328 模拟性能。比如 Li 等(2018)对涡分辨海洋模式 LICOM2 模拟的北赤道潜流 NEUC 的平  
329 均态进行了评估,并对三支北赤道潜流的变率进行了分析。结果表明,高分辨率  
330 LICOM2 较好地再现了三个东向 NEUC 急流的主要特征,如三个急流的位置、倾斜方向和  
331 宽度。然而,模拟的 NEUC 偏弱,位置偏浅。在 39 年的高分辨率 LICOM2 模拟中,也发  
332 现了 NEUC 存在年际(2-7 年)和年代际(12-19 年)两个主要时间变率。此外,纬向  
333 速度的时间低通滤波表明,准稳定的跨盆 NEUC 只能在比年际周期更长的时间尺度上出  
334 现。此外,也开展了针对低分辨率 LICOM3 模拟结果的评估,如孙志阔等(2020)评估

了北赤道逆流的模拟、Wang 等（2022）评估海平面变化的模拟、白佳慧等（2023）评估了南极绕极流和南大洋经向翻转环流的模拟能力。

### 3.3 模式应用

在研制高分辨率海洋环流模式的同时，还在下述两方面开展了大量应用研究。一是利用高分辨率 LICOM 模式开展海洋环流的短期业务化预报试验；二是利用高分辨率 LICOM 的结果，与国内外同行学者合作开展了中尺度、亚中尺度的物理海洋过程的分析。

Liu 等（2021）基于 LICOM3 建立了一个全球涡分辨预报系统 LFS（LICOM Forecast System），系统包括分析和预报两部分，用简单的 Nudging 方法生成初值之后，在 GFS 逐 6 小时预报场的驱动下预报未来 7 天的海洋状态。LFS 在短期海洋预测方面总体表现良好，海表面温度、海表高度异常、2000m 以上温度和盐度提前 1 天预报的均方根误差中位数分别约为  $0.52^{\circ}\text{C}$ 、 $0.10\text{ m}$ 、 $0.57^{\circ}\text{C}$  和  $0.13\text{ psu}$ 。虽然存在海温预测的暖偏差，但 LFS 对温跃层温度和盐度的预测与 IV-TT 框架下的海洋预报系统的结果是可比的。Zheng 等（2023）深入比较了与 IV-TT 框架下其他海洋预报系统，评价结果表明 LFS 具有较好的短期海洋环境预报能力。在 1-6 天的预测中，海表温度、温度和盐度剖面的均方根误差分别在  $0.53\text{--}0.63^{\circ}\text{C}$ 、 $0.57\text{--}0.66^{\circ}\text{C}$  和  $0.12\text{--}0.13\text{ psu}$  之间（图 5）。整体表现可与其他主要海洋预报系统相比较，但在预测温度和盐度分布方面略有优势，同时海表面高度等也存在一定的偏差，需要进一步分析和改进来提升预报能力。

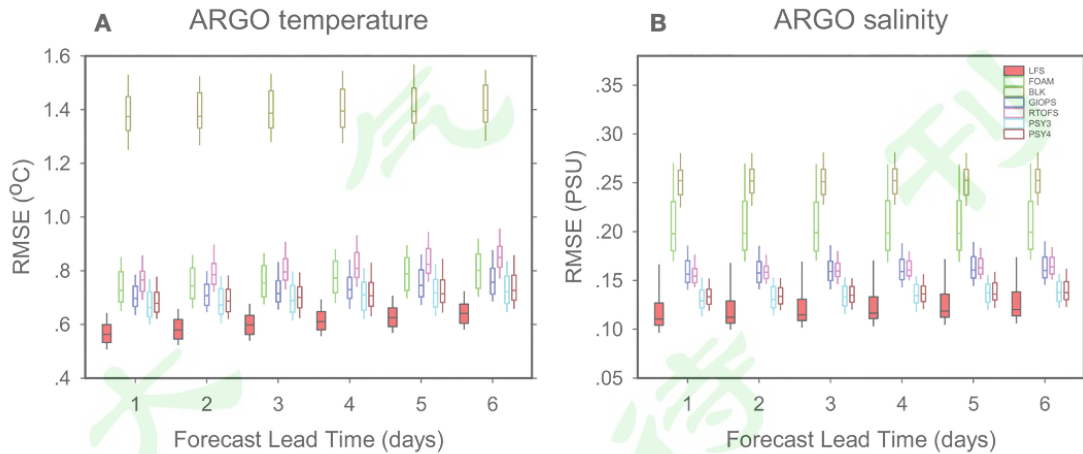


图 5 海温和盐度预报相对于 ARGO 观测的均方根误差（RMSE），垂直框表示 RMSE 估计值的 95%置信区间。引自 Zheng et al.（2023）

Fig. 5 The RMSE of the forecast (A) temperature and (B) salinity against Argo measurements. The boxes show the range of 95th percentile. Cited from Zheng et al. (2023)

Wang 等 (2018) 利用高分辨率 LICOM2 长期气候模拟试验的结果, 研究了热带太平洋东部亚中尺度涡旋活动的空间和季节变化特征, 这也是较早利用模式分析这一区域亚中尺度过程的工作。LICOM2 可以很好地分辨该区域的亚中尺度涡旋, 亚中尺度涡动能收支表明, 表层混合层的亚中尺度涡旋主要是由正压不稳定产生的, 其次是斜压不稳定。非线性相互作用在亚中尺度范围内导致了显著的正向能量串级, 对平衡能量收支起着重要作用。作为对正压不稳定性引起的能量输入变化的响应, 亚中尺度涡动能表现出明显的季节循环, 最大值和最小值分别出现在北方的秋季和春季。此外, 强烈的季节循环对混合层深度的季节性具有重要的调节作用。特别是 7-10 月强亚中尺度涡旋引起的重新分层是该季节混合层深度变浅的重要贡献。

Wang 等 (2019) 利用高分辨率 LICOM2 的结果, 分析了全球涡动动能 (EKE) 收支中水平波数的空间分布。在热带和中纬度地区, 从背景流到涡旋的正压能量转换在整个波数空间都是正的, 通常在 EKE 达到最大时尺度达到峰值 ( $Le$ )。斜压能量转换在中纬度地区更为明显, 在比  $Le$  小尺度和比  $Le$  大尺度上表现为正、负的偶极结构。地转流上的表面风能在  $Le$  附近造成了显著的 EKE 损失, 但在更大的范围内积累了能量。由压力通量收敛导出的内部粘性耗散和底部拖曳作为 EKE 汇项。后者在  $Le$  处效率最高, 而前者在更小的尺度上更占主导地位。频谱空间中 EKE 的产生与耗散存在明显的不匹配, 尤其是在中纬度地区, 而赤道上的主要正向能量串级和中纬度上的主要反向能量串级调和了这一点。

Feng 等 (2020) 研究了黑潮入侵对南海中尺度涡模拟的影响。基于高分辨率 LICOM2 的数值试验, 比较了吕宋海峡处地形优化后的黑潮入侵形态和强度不同, 研究了黑潮入侵优化后对南海中尺度涡模拟的影响。发现黑潮入侵的减弱导致了涡旋活动的减弱, 这使得模式结果与观测结果更为相近。涡动动能收支的分析进一步表明, 黑潮入侵的优化将通过改变水平速度切变和温跃层斜率来改变涡动动能, 而这两个参数分别与正压和斜压不稳定性有关。前者在模式涡动动能减弱中起着更为重要的作用, 而黑潮入侵导致的涡动动能的水平输送对吕宋海峡西部区域的能量收支同样起着重要的作用。Qiu 等 (2022) 利用高分辨率 LICOM3 的 2007 至 2017 年结果, 分析了南海北

部跨陆架的热量和盐度的输送。在确定了侵入大陆坡 47 个反气旋涡和 97 个气旋涡的基础上，与未侵入斜坡的涡相比，侵入涡在水平方向上更加不对称且充满活力。由于西沙群岛和东沙群岛的水平不对称，这些涡流引起  $0 (10^{12})$  W 和  $0 (10^4)$  kg s<sup>-1</sup> 的跨斜坡热和盐传输。基于位涡收支，我们发现速度水平不对称是由位涡不对称引起的，这主要是由东沙群岛的涡流非线性效应和西沙群岛的地形  $\beta$  效应引起的。这些研究结果在帮助我们理解中小尺度涡旋的能量和物质输送的同时，也充分表明了高分辨率 LICOM 对于海洋多尺度过程良好的模拟能力。

#### 4 高分辨率气候系统模式 FGOALS-f3-H

表 1 FGOALS-f3-H 模式信息

Table1 Component models of FGOALS-f3-H

| 分量模式 | 模式       | 分辨率<br>(水平/垂直)                | 与耦合器交换数<br>据的时间步长 |
|------|----------|-------------------------------|-------------------|
| 大气模式 | FAMIL2.2 | c384, 1440x720<br>经向/纬向; 32 层 | 15 分钟             |
| 海洋模式 | LICOM3.0 | 0.1°x0.1°; 55 层               | 4 小时              |
| 海冰模式 | CICE4    | 0.1°x0.1°                     | 15 分钟             |
| 陆面模式 | CLM4.0   | 0.31°x0.23°                   | 15 分钟             |

基于本文第 2 和 3 节描述的高分辨率大气环流模式 FAMIL2.2 和海洋环流模式 LICOM3.0，中国科学院大气物理研究所 LASG 还研发了最新一代全球高分辨率全耦合气候系统模式 FGOALS-f3-H。该耦合模式包含 4 个分量模式（表 1）：大气分量模式 FAMIL2.2 (He et al., 2019; Bao et al., 2020; Li et al., 2021)，海洋分量模式 LICOM3.0-H (Li et al., 2020b)，海冰模式 CICE4 (Hunke 和 Lipscomb, 2010) 和陆面模式 CLM4 (Lawrence et al., 2011)。上述分量模式使用美国国家大气研究中心 (NCAR) 开发的耦合器 Coupler 7 (Craig et al., 2011) 进行耦合。

大气分量模式 FAMIL2.2 和海洋分量模式 LICOM3.0，相关描述详见本文的第 2 和 3 节。海冰分量模式 CICE4 是 Los Alamos 实验室研发，为满足耦合器对海洋和海冰模式水平网格点一致的要求，我们将 CICE4 的水平网格点调整为与 LICOM3.0 一致的三极网



格，即 3600x2302 格点，应用于 FGOALS-f3-H。陆面分量模式 CLM4.0 是 NCAR 研发，采用经纬网格，水平分辨率为  $0.31^{\circ} \times 0.23^{\circ}$ 。在高分辨率耦合模式 FGOALS-f3-H 中，耦合器与大气分量、陆面分量和海冰分量的数据交换的时间步长均为 15 分钟，与海洋模式的数据交换步长则为 4 小时。分析表明，相对于低分辨率版本的耦合模式 FGOALS-f3-L，高分辨率版本 FGOALS-f3-H 可以更好地模拟历史全球平均气温、海表温度等随时间的变化（图 6），以及多年平均的气候态（图 7）、中尺度涡旋、中尺度海气相互作用（An et al., 2022）、热带太平洋不稳定波（Li et al., 2023）、热带气旋（Liu et al., 2023）等。

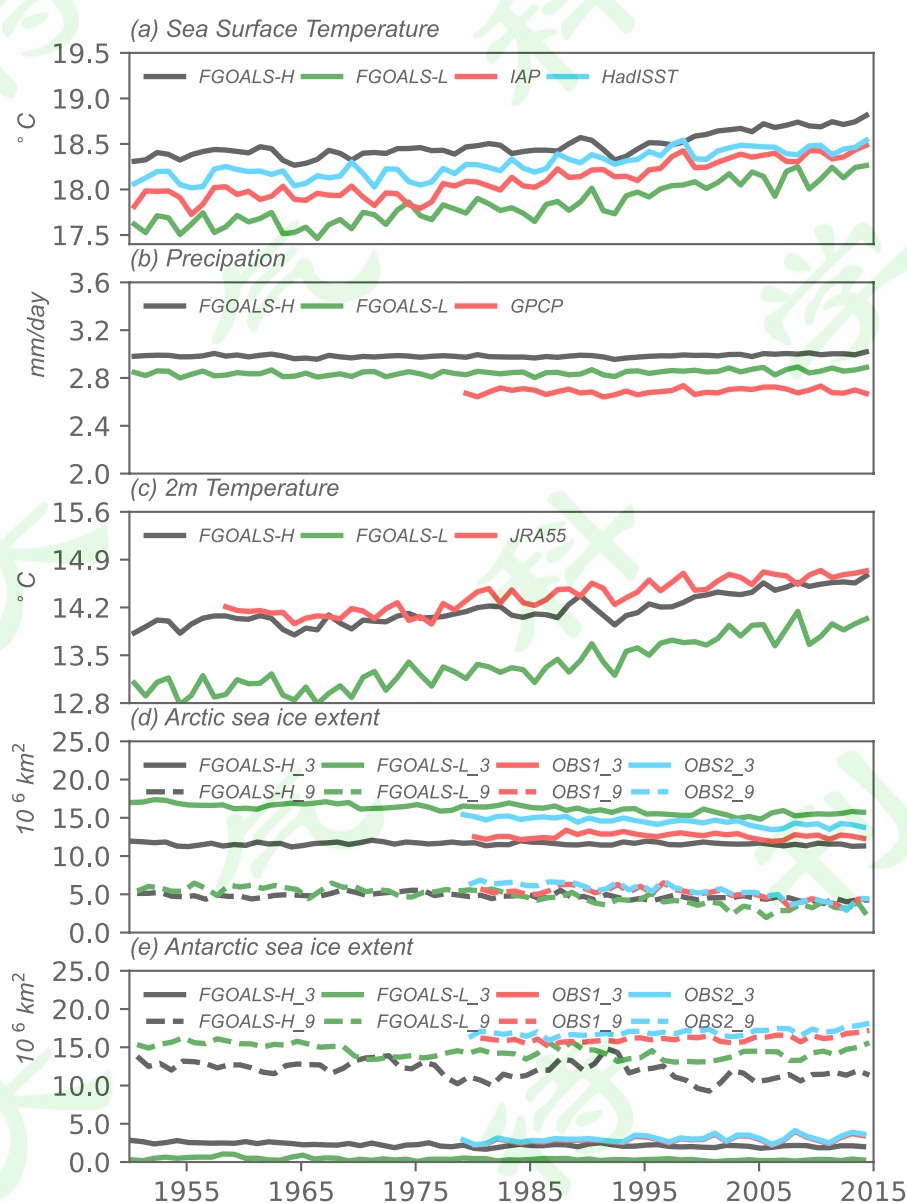


图 6 1950–2014 全球平均逐年时间序列 (a) 海表温度 (单位:  $^{\circ}\text{C}$ ) (b) 降水 (单位:  $\text{mm day}^{-1}$ ) (c) 2 米温度 (单位:  $^{\circ}\text{C}$ )，以及 1950–2014 年逐年时间序列 (d) 北极海冰密集度 (单位:  $10^6$

km<sup>2</sup>) 和 (e) 南极海冰密集度 (单位: 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>) , 其中实线为 3 月, 虚线为 9 月。图中黑线是 FGOALS-f3-H 模拟结果, 绿线是 FGOALS-f3-L 模拟结果, 红线和蓝线分别为观测和再分析数据。引自 An et al. (2022)

Fig. 6 Timeseries of annual global mean (a) SST (units: °C) (b) precipitation (units: mm day<sup>-1</sup>) (c) 2m air temperature (units: °C) from FOGALS-f3-H (black), FGOALS-f3-L (green) and observation or reanalysis data (red and blue) during 1950–2014. Timeseries of (d) Arctic sea ice extent (units: 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>) and (e) Antarctic sea ice extent (units: 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>), in March (solid) and September (dashed), from FOGALS-f3-H (black), FGOALS-f3-L (green) and observation data (Bootstrap in red and Passive Microwave in blue) during 1950–2014. Cited from An et al. (2022)

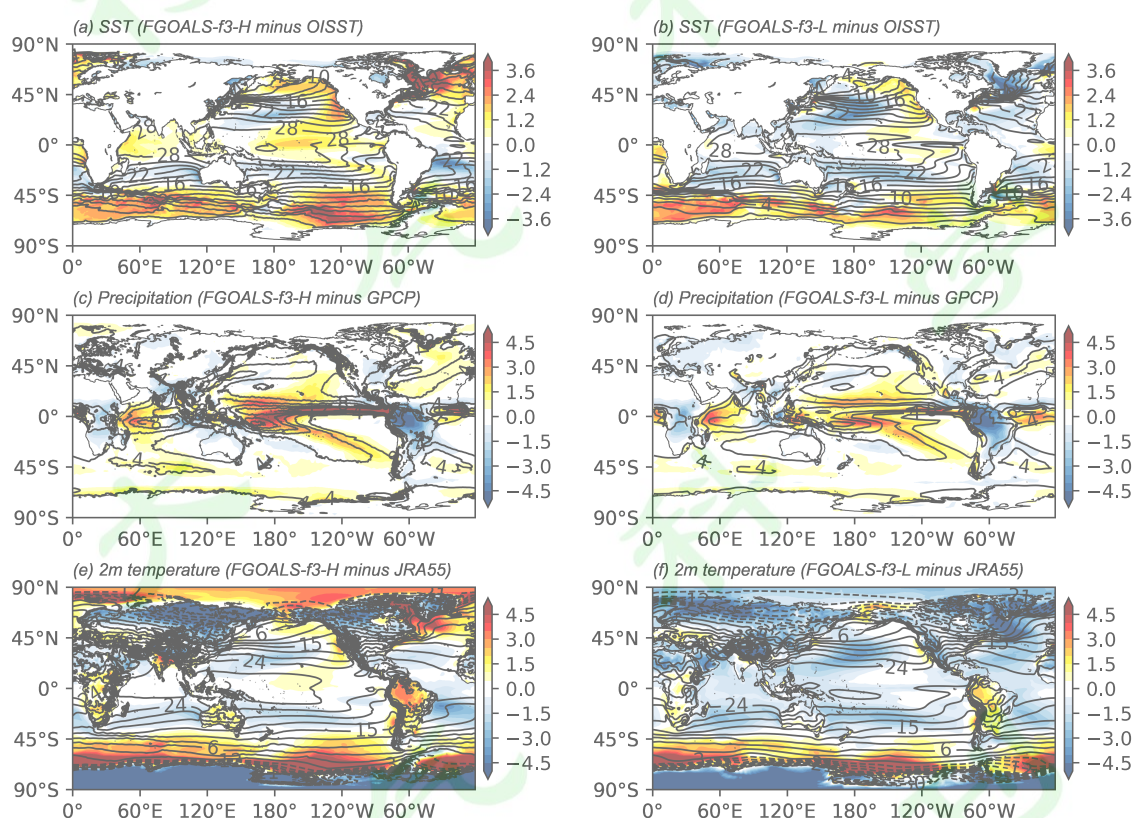


图 7 (a) FGOALS-f3-H 模拟的 1982–2014 年海表温度气候平均及其相对 OISSTv2.1 观测数据的偏差 (单位: °C) , (c) FGOALS-f3-H 模拟的 1979–2014 年降水气候平均及其相对 GPCP 降水数据的偏差 (单位: mm day<sup>-1</sup>) , (e) FGOALS-f3-H 模拟的 1979–2014 年 2 米气温气候平均及其相对 JRA-55 再分析数据的偏差 (单位: °C) , (b) (d) 和 (f) 是 FGOALS-f3-L 的相应结果。引自 An et al. (2022)

Fig. 7 (a) Climatological mean (lines) SST (units: °C) from FGOALS-f3-H and its bias (color) against OISSTv2.1 during 1982–2014, (c) climatological mean (lines) precipitation (units: mm day<sup>-1</sup>) from FGOALS-f3-H and its bias (color) against GPCP during

1979-2014, (e) climatological mean (lines) 2m air temperature (units:  $^{\circ}\text{C}$ ) from FGOALS-f3-H and its bias (color) against JRA-55 during 1979-2014, (b), (d), (f) are the same but for FGOALS-f3-L. Cited from An et al. (2022)

#### 4.1 中尺度涡旋

高分辨率耦合气候模式模拟性能的优越性主要体现在对中尺度涡旋的直接模拟。FGOALS-f3-H 的海洋模式分量是高分辨率海洋模式 LICOM3.0, 水平分辨率为  $0.1^{\circ}$ , 可以直接解析海洋大部分区域的第一斜压罗斯贝半径, 通过正压和斜压不稳定过程为中尺度涡旋的发展提供能量, 同时还可以更好地模拟中尺度-大尺度环流之间的相互作用, 也有利于改善对大尺度环流的模式。例如, 对于具有强烈非线性动力过程的湾流和黑潮等西边界流, FGOALS-f3-H 也给出了更好的模拟结果。图 8 (ace) 是 FGOALS-f3-H 模拟的海表高度 (SSH) 标准差与 FGOALS-f3-L (低分辨率模式版本)、AVISO 观测资料的对比 (An et al., 2022)。LICOM3.0 单独海洋模式模拟结果已经表明, 随着分辨率的增加, SSH 变率明显增加且更接近观测。对于 LICOM3.0 高分辨率单独海洋模式模拟, 海洋单方面受大气强迫, 没有海气反馈作用, 过高的粘性系数和耗散作用可能导致了模式低估 SSH 变率和涡动动能 (EKE)。在单独海洋模式模拟中大气对海洋的耗散作用过大, 在高分辨率耦合模式则更真实地模拟中尺度海气反馈作用, FGOALS-f3-H 模拟的 SSH 变率也比高分辨率单独海洋模式 LICOM3.0-H 更高, 这在西边界流这样中尺度海气相互作用剧烈的锋区尤为明显。FGOALS-f3-H 模拟的 SSH 变率在西边界流区域和南极绕极流比观测更强, 在大洋内区比观测弱。图 8 (bd) 是 FGOALS-f3-H 和 FGOALS-f3-L 模拟的月平均海表涡动动能 (EKE)。可以看出, FGOALS-f3-H 模拟的黑潮、湾流、南大洋、厄加勒斯折回流和南极绕极流等地区更活跃。

#### 4.2 中尺度海气相互作用

在海盆尺度, 赤道外地区风速和海表温度是负相关的。卫星观测首先揭示, 在锋面和中尺度, 近地表风速与海表温度呈正相关关系 (Xie, 2004; Small et al., 2008)。对于负的海表风速与海表温度相关关系, 表明大的风速对应冷的海表温度, 说明大气主导海洋; 对于正的海表风速与海表温度相关关系, 表明暖的海表温度对应大的风速, 说明海洋主导大气。Bryan 等 (2010) 用这一指标 (中尺度海表风场和海表温度呈正相关) 检验了不同水平分辨率气候模式的模拟精度, 发现只有高分辨率耦合气候模式模拟性能模拟出这一中尺度特征。图 9a 是模式模拟的逐月高通滤波

( $3^\circ \times 3^\circ$  箱式滤波) 海表 10m 风速与 SST 相关的空间分布 (An et al., 2022)。可以看出在锋区和中尺度涡旋活跃区: 湾流、黑潮及其延伸体、南极绕极流等地区, FGOALS-f3-L 不能模拟中尺度海气相互作用特征 (图 9b), FGOALS-f3-H 模拟的风速与海表温度都呈显著正相关, 且分布与前人观测结果相似, 这表明 FGOALS-f3-H 能够较好地模拟出中尺度的海气作用。

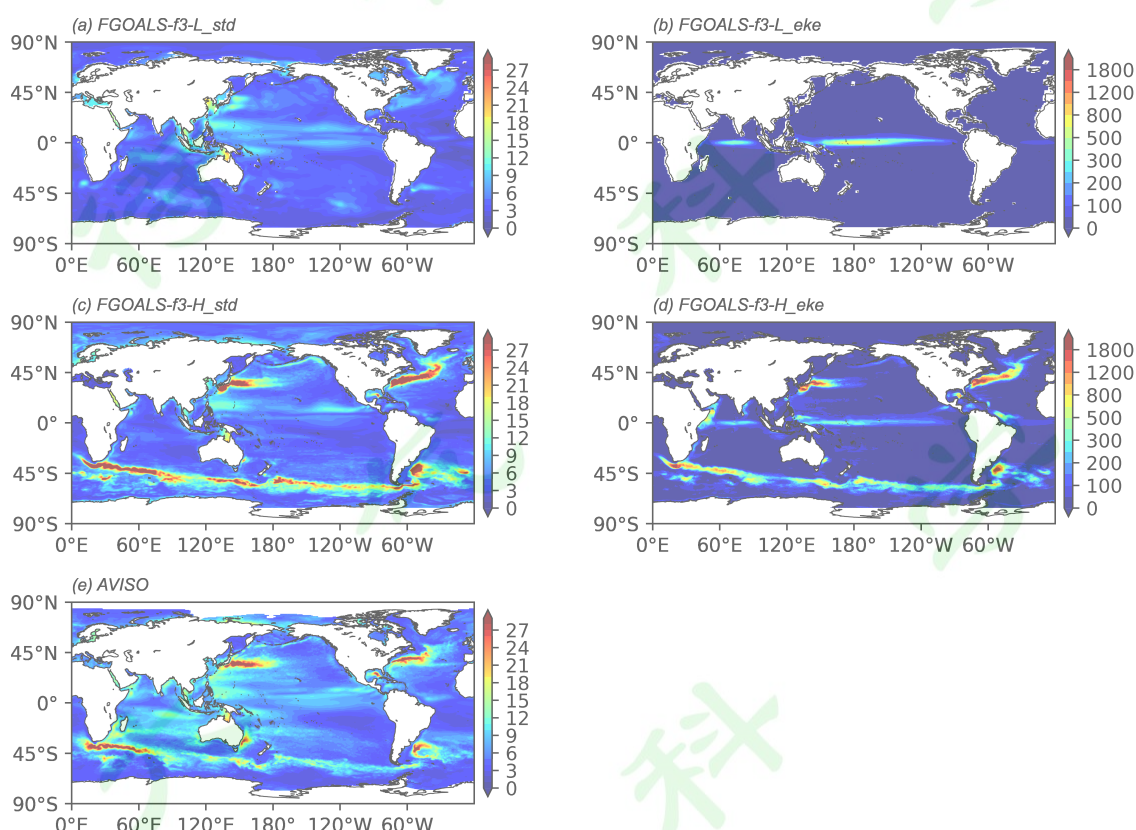


图 8 (a) FGOALS-f3-L, (c) FGOALS-f3-H 和 (e) AVISO 的 1993-2014 年月平均海表高度标准差 (单位: cm)。(b) FGOALS-f3-L 和 (d) FGOALS-f3-H 模拟的 1993-2014 年气候月平均 EKE (单位:  $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$ )。引自 An et al. (2022)

Fig. 8 Standard deviation of monthly SSH (units: cm) from (a) FGOALS-f3-L, (c) FOGALS-f3-H and (e) AVISO during 1993-2014. Climatological monthly mean EKE (units:  $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$ ) from (b) FGOALS-f3-L and (d) FGOALS-f3-H during 1993-2014. Cited from An et al. (2022)



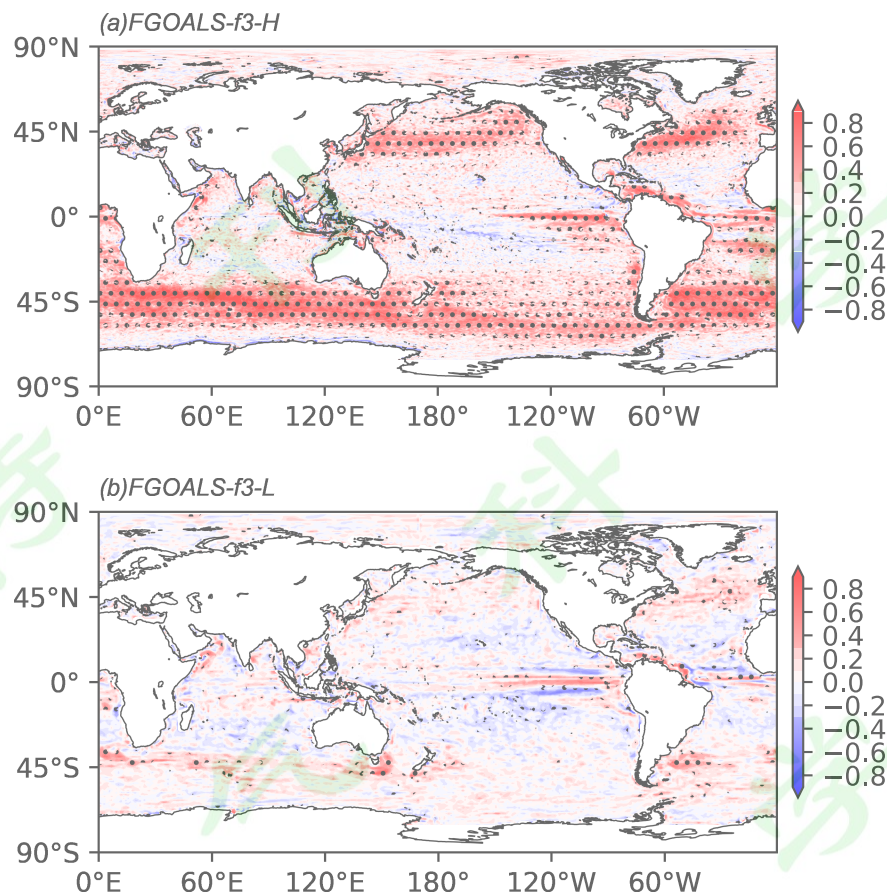


图 9 (a) FGOALS-f3-H 和 (b) FGOALS-f3-L 模拟的 2001-2008 年高通滤波的海表风与海表温度相关。打点表示双边 t 检验统计超过 95%显著性水平。引自 An et al. (2022)

Fig.9 Temporal correlation of high-pass filtered surface wind speed with SST from (a) FGOALS-f3-H and (b) FGOALS-f3-L during 2001-2008. Stippling indicates statistical significance at the 95% level calculated using a two-sided t-test. Cited from An et al. (2022)

### 4.3 热带太平洋不稳定波 (TIW)

热带不稳定波是赤道东太平洋海洋锋附近的最主要的季节内中尺度波动，直接影响该区域海洋状态、生物化学循环和大气边界层特征，与海洋环流和 ENSO 等相互作用。高分辨率气候系统模式 FGOALS-f3-H 可以模拟出 TIW 的基本特征，包括西传的 Rossby 波 (Li et al., 2023) (图 10)。但仍有不足：模式模拟的 TIW 强度较低，其通过正压、斜压不稳定从平均场获取的能量比观测偏低。相比高分辨率单独海洋模式，高分辨率耦合模式由于更真实的模拟了中尺度海气相互作用，其模拟 TIW 更接近观测。

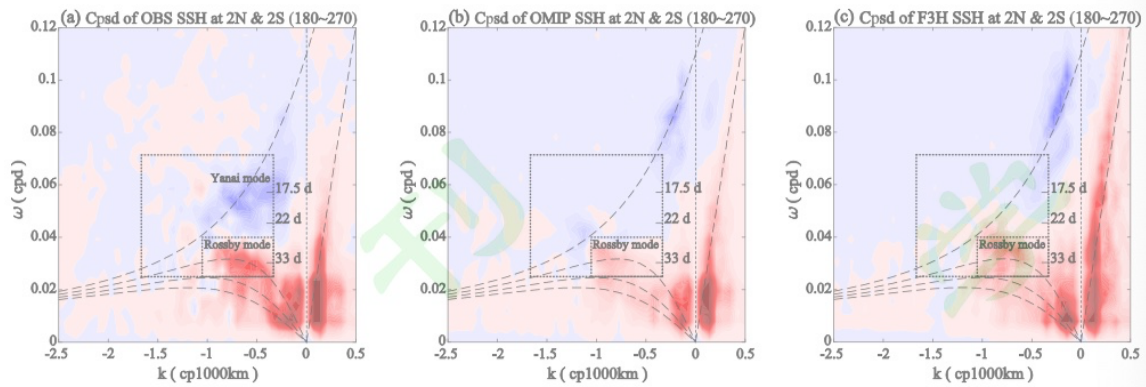


图 10 180°-90°W, 2°N-2°S 标准化 SSH 的空间-时间谱, 其中 (a) 观测、(b) LICOM3 模拟、(c) FGOALS-f3-H 模拟。较大的虚线矩形框表明观测的 Rossby 模态和 Yanai 模态的 TIW 谱域, 即 14-40 天, 600-300 km 西传。较小的虚线矩形框表示 Rossby 模态, 是分析关注点, 表现为 25-40 天, 950-3000 km 西传。阴影单位是  $\text{var cpd}^{-1} \text{cp1000 km}^{-1}$ 。引自 Li et al. (2023)

Fig. 10 Temporal-spatial spectra of the standardized SSH at 2°N and 2°S over 180°-90°W: (a) observation; (b) LICOM3; (c) FGOALS-f3-H. The larger dashed rectangular boxes denote the TIW spectral domain in account of the Rossby mode and Yanai mode for the observations, which is 14-40 days, 600-3000 km westward. The smaller dashed rectangular boxes are the Rossby mode, which is the main focus of the analysis and is 25-40 days and 950-3000 km westward. The unit of the shading is  $\text{var cpd}^{-1} \text{cp1000 km}^{-1}$ . Cited from Li et al. (2023)

## 5 总结和展望

近五年来, 大气物理研究所自主研制了水平分辨率为 25 公里的大气环流模式 FAMIL2.2、水平分辨率为 0.1 度的高分辨率海洋模式 LICOM3.0, 以及相应的耦合模式 FGOALS-f3-H, 这些均开展了长期气候变化数值试验, 并参与 CMIP6 的高分辨率耦合模式比较试验 (HighResMIP), 是该计划中水平分辨率最高的三个模式之一。大量模式评估研究指出, 高分辨率数值模式对 ITCZ、台风、季节内振荡、青藏高原和亚洲季风区降水的模拟能力相对低分辨率模式有明显提高, 可以更好地模拟出黑潮、热带太平洋不稳定波等中小尺度海气相互作用活跃的系统。面向未来, 大气模式团队将进一步完善模式的次网格参数化方案, 提高分辨率, 开发新一代公里尺度分辨率大气模式、海洋模式及其耦合系统版本, 主要模式研发和应用设想如下:

(1) 新一代高分辨率大气模式的发展目标是实现全球 12.5 公里的分辨率, 改进与分辨率相适应的物理过程参数化方案, 保证高分辨率模式长期积分稳定性, 提高模

式对极端天气气候事件（例如：台风、MJO、青藏高原和东亚季风区的极端强降水）的模拟技巧。

（2）随着天气气候一体化的模式发展趋势，可以继续提升 LICOM 海洋模式分辨率，向公里级分辨率全球海洋模式推进，实现对非静力过程的模拟。这要求对模式动力框架和次网格参数化过程进行整体重构和升级。同时，需要对计算资源合理配置，以提升高分辨率模式计算效率。

（3）下一次模式比较计划 CMIP7 拟在 2023 年启动，其中就包括新的高分辨率模式比较计划 HighResMIP2。因此，可以基于新一代高分辨率气候系统模式，开展 HighResMIP2 系列试验，通过对多模式模拟结果分析，开展多尺度相互作用研究。

（4）模式团队还将依托新版本高分辨率模式及变网格版本建立新一代公里级超高分辨率耦合模式系统，开展天气-气候一体化的公里级无缝隙预测，以更高质量和精细化的无缝隙预测产品助力我国全球防灾减灾和可持续发展，进一步提高模式的国内外影响力。

**致谢：**本文作者基于高分辨率气候系统模式完成的数值模拟试验得到了国家重大科技基础设施“地球系统数值模拟装置”的大力支持。

## 参考文献(References)

- Ahn, M-S, Kim, D, Kang, D, et al. 2020. MJO propagation across the Maritime Continent: Are CMIP6 models better than CMIP5 models? [J] *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL087250. doi: <https://doi.org/10.1029/2020GL087250>
- An B, Yu Y, Bao Q, et al. 2022. CAS FGOALS-f3-H Dataset for the High-Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP) Tier 2[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 39,1873–1884. doi: <https://doi.org/10.1007/s00376-022-2030-5>
- Bacmeister JT, Wehner MF, Neale RB, et al. 2014. Exploratory High-Resolution Climate Simulations using the Community Atmosphere Model (CAM) [J]. *Journal of Climate*, 27(9): 3073-3099. doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00387.1>
- 白佳慧, 刘海龙, 李逸文, 等. 2023. LICOM 海洋模式对南大洋环流的模拟评估 [J]. *气候与环境研究*, 28(1): 74–88. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2022.22017. Bai Jiahui, Liu Hailong, Li Yiwen, et al. 2023. An Assessment of Southern Ocean Circulation Simulation by LASG/IAP Climate system Ocean Model [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 28 (1): 74–88
- 包庆, 刘屹岷, 周天军, 等. 2006. LASG/IAP 大气环流谱模式对陆面过程的敏感性试验[J]. *大气科学*, 30(6): 1077–1090. Bao Qing, Liu Yi-Min, Zhou Tian-Jun, Wang Zai-Zhi, Wu Guo-Xiong, Wang Peng-Fei. The Sensitivity of the Spectral Atmospheric General Circulation Model of LASG/IAP to the Land Process[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30(6): 1077-1090.
- Bao Q, Lin P, Zhou T, et al. 2013: The Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System Model, Spectral Version 2: FGOALS-s2[J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 30(3): 561-576 <https://doi.org/10.1007/s00376-012-2113-9>
- Bao Q, Liu Y, Wu G, et al. 2020. CAS FGOALS-f3-H and CAS FGOALS-f3-L outputs for the high-resolution model intercomparison project simulation of CMIP6[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 13(6): 576-581. doi:10.1080/16742834.2020.1814675
- Bao Q, Li J, 2020. Progress in Climate Modeling of Precipitation over the Tibetan Plateau[J]. *Natl Sci Rev*, 7(3): 486-487. doi: <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa006>
- Bryan FO, Tomas R, Dennis JM, et al. 2010. Frontal Scale Air-Sea Interaction in High-Resolution Coupled Climate Models[J]. *Journal of Climate*, 23(23): 6277-6291. doi: <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3665.1>
- Chassignet, E P, S G Yeager, B Fox-Kemper, et al. 2020. Impact of horizontal resolution on global ocean–sea ice model simulations based on the experimental protocols of the Ocean Model Intercomparison Project phase 2 (OMIP-2). *Geosci. Model Dev.*, 13(9), 4595-4637. doi: <https://dx.doi.org/10.5194/gmd-13-4595-2020>
- Craig AP, Vertenstein M, Jacob R. 2011. A new flexible coupler for earth system modeling developed for CCSM4 and CESM1[J]. *The International Journal of High Performance Computing Applications*, 26(1): 31-42. doi: 10.1177/1094342011428141



- Ding, M, Liu H, Lin P, et al. 2022a. Overestimated Eddy Kinetic Energy in the Eddy-Rich Regions Simulated by Eddy-Resolving Global Ocean–Sea Ice Models[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 49(11), e2022GL098370. doi: <https://doi.org/10.1029/2022GL098370>.
- Ding, M, Liu H, Lin P, et al. 2022b. A century-long eddy-resolving simulation of global oceanic large- and mesoscale state[J]. *Sci. Data*, 9, 691. doi: <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01766-9>
- Eyring V, Bony S, Meehl GA, et al. 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization[J]. *Geoscientific Model Development*, 9(5): 1937-1958. doi: <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Feng, B X, Liu HL and Lin PF, 2020. Effects of Kuroshio intrusion optimization on the simulation of mesoscale eddies in the northern South China Sea[J]. *Acta Oceanol. Sin.*, 39(3), 12-24. doi: <https://doi.org/10.1007/s13131-020-1565-5>
- Griffies SM, Winton M, Anderson WG, et al. 2015. Impacts on Ocean Heat from Transient Mesoscale Eddies in a Hierarchy of Climate Models[J]. *Journal of Climate*, 28(3): 952-977. doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00353.1>
- Guo Y, Yu Y, Lin P, et al. 2020. Overview of the CMIP6 Historical Experiment Datasets with the Climate System Model CAS FGOALS-f3-L[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37(10): 1057-1066. doi: <https://doi.org/10.1007/s00376-020-2004-4>
- Hallberg R. 2013. Using a resolution function to regulate parameterizations of oceanic mesoscale eddy effects[J]. *Ocean Modelling*, 72: 92-103. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2013.08.007>
- He B, Liu Y M, Wu G X, et al. 2019. CAS FGOALS-f3-L model datasets for CMIP6 historical atmospheric model intercomparison project simulation[J]. *Adv Atmo Sci*, 36: 771-778. doi: <https://doi.org/10.1007/s00376-019-9027-8>
- Hewitt HT, Roberts MJ, Hyder P, et al. 2016. The impact of resolving the Rossby radius at mid-latitudes in the ocean: results from a high-resolution version of the Met Office GC2 coupled model[J]. *Geoscientific Model Development*, 9(10): 3655-3670. Doi: <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3655-2016>
- Hunke E, Lipscomb W. 2010. CICE: The Los Alamos sea ice model documentation and software user's manual version 4.0 LA-CC-06-012[J]. *Tech. Rep.* LA-CC-06-012.
- Jiang, J R., Lin PF, Wang J, et al. 2019. Porting LASG/IAP Climate system Ocean Model to GPUs using OpenACC. *IEEE Access*, 7(1), 154490-154501. doi:10.1109/ACCESS.2019.2932443
- Lawrence DM, Oleson KW, Flanner MG, et al. 2011. Parameterization Improvements and Functional and Structural Advances in Version 4 of the Community Land Model[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 3(3). doi: <https://doi.org/10.1029/2011MS00045>
- Li L, Lin P, Yu Y, et al. 2013: The Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System Model, Grid-point Version 2: FGOALS-g2[J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 30(3): 543-560 <https://doi.org/10.1007/s00376-012-2140-6>
- LI J, BAO Q, LIU Y, et al. 2017. Evaluation of the computational performance of the finite-volume atmospheric model of the IAP/LASG (FAMIL) on a high-performance computer[J]. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 10(4): 329-336. doi: 10.1080/16742834.2017.1331111

- Li, JX, Bao Q, Liu YM, et al. 2019. Evaluation of FAMIL2 in Simulating the Climatology and Seasonal-to-Interannual Variability of Tropical Cyclone Characteristics. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 11: 1117 - 1136. doi: <https://doi.org/10.1029/2018MS001506>
- Li JX, Bao Q, Liu YM, et al. 2021. Effect of horizontal resolution on the simulation of tropical cyclones in the Chinese Academy of Sciences FGOALS-f3 climate system model[J]. *Geoscientific Model Development*, 14(10): 6113-6133. doi: <https://doi.org/10.5194/gmd-14-6113-2021>
- Li LJ, Yu YQ, Tang YL, et al. 2020a. The Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System Model Grid-Point Version 3 (FGOALS-g3): Description and Evaluation[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(9). doi: <https://doi.org/10.1029/2019MS002012>
- Li T, Yu Y, An B, et al. 2023. Tropical instability waves in a high-resolution oceanic and coupled GCM[J]. *Ocean Modelling*, 182. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2023.102169>
- 李逸文. 2019. 气候海洋环流模式中厚度扩散系数的研究[D]. 中国科学院大学博士论文. The Role of Thickness Diffusivity Coefficients in a Climate Ocean Model[D]. Ph.D. dissertation (in Chinese), University of Chinese Academy of Sciences.
- Li, Y W, Liu H L, and Lin P F. 2018. Interannual and decadal variability of the North Equatorial Undercurrents in an eddy-resolving ocean model. *Sci. Rep.*, 8, 17112, doi:10.1038/s41598-018-35469-2.
- Li YW, Liu HL, Ding MR, et al. 2020b. Eddy-resolving Simulation of CAS-LICOM3 for Phase 2 of the Ocean Model Intercomparison Project[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37(10): 1067-1080. doi: <https://doi.org/10.1007/s00376-020-0057-z>
- Lin P, Liu H, Ma J, et al. 2019. Ocean mesoscale structure-induced air-sea interaction in a high-resolution coupled model[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 12(2): 98-106. doi: <https://doi.org/10.1080/16742834.2019.1569454>
- Liu H L, Lin P F, Zheng W P, et al. 2021. A global eddy-resolving ocean forecast system – LICOM Forecast System (LFS). *J. Oper. Oceanogr.*, 1-13. doi:10.1080/1755876X.2021.1902680
- 刘琨, 刘屹岷, 吴国雄. 2010. SAMIL 模式中 Tiedtke 积云对流方案对热带降水模拟的影响[J]. *大气科学*, 01. Liu Kun, Liu Yimin, Wu Guoxiong, et al. The Impacts of the Modified Tiedtke Cumulus Convective Parameterization Scheme on the Tropical Rainfall Simulation in SAMIL Model[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2010, 34(1): 163-174.
- Liu Q, Qiao F, Yu Y, et al. 2023. Bias Analysis in the Simulation of the Western North Pacific Tropical Cyclone Characteristics by Two High-Resolution Global Atmospheric Models[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 40(4): 634-652. doi: <https://doi.org/10.1007/s00376-022-2159-2>
- 栾贻花, 俞永强, 郑伟鹏. 2016. 全球高分辨率气候系统模式研究进展[J]. *地球科学进展*, 31(3): 258-268. Luan Yihua, Yu Yongqiang, Zheng Weipeng. Review of Development and Application of High Resolution Global Climate System Model[J]. *Advanced Earth Science*, 2016, 31(3): 258-268.
- Ma X, Jing Z, Chang P, et al. 2016. Western boundary currents regulated by interaction between ocean eddies and the atmosphere[J]. *Nature*, 535(7613): 533-537. Doi: <https://doi.org/10.1038/nature18640>

- Qiu C, Z Yi, D Su, et al. 2022. Cross-slope heat and salt transport induced by slope intrusion eddy's horizontal asymmetry in the northern South China Sea. *J. Geophys. Res. Oceans*, 127, e2022JC018406. <https://doi.org/10.1029/2022JC018406>
- Small RJ, Bacmeister J, Bailey D, et al. 2014. A new synoptic scale resolving global climate simulation using the Community Earth System Model[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 6(4): 1065-1094. doi: <https://doi.org/10.1002/2014MS000363>
- Small RJ, deSzoeko SP, Xie SP, et al. 2008. Air-sea interaction over ocean fronts and eddies[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 45(3-4): 274-319. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2008.01.001>
- 孙志阔, 刘海龙, 林鹏飞, 等. 2020. LICOM3.0 中太平洋北赤道逆流的模拟偏差分析. *大气科学*, 44(3): 591-600. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1907.19123. SUN Zhikuo, LIU Hailong, LIN Pengfei, Yü Zipeng, LI Yiwen. Simulation Bias Analysis of Pacific North Equatorial Countercurrent in LICOM3.0 Ocean Model[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2020, 44(3): 591-600.
- 宋晓良. 2005. 两种质量通量型积云参数化方案在气候模拟中的评估分析研究[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所. Song Xiaoliang. 2005. The evaluation analysis of two kinds of mass-flux cumulus parameterizations in climate simulation [D]. Ph.D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.
- von Storch J-S, Haak H, Hertwig E, et al. 2016. Vertical heat and salt fluxes due to resolved and parameterized meso-scale Eddies[J]. *Ocean Modelling*, 108: 1-19. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2016.10.001>
- Treguier A M, de Boyer Montégut, C Bozec, et al. 2023. The Mixed Layer Depth in the Ocean Model Intercomparison Project (OMIP): Impact of Resolving Mesoscale Eddies, *EGUsphere*. doi: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-310>.
- Tsujino H, L Urakawa, S Griffies, et al. 2020. Evaluation of global ocean-sea-ice model simulations based on the experimental protocols of the Ocean Model Intercomparison Project phase 2 (OMIP-2). *Geosci. Model Dev.*, 13(8), 3643-3708. doi: <https://dx.doi.org/10.5194/gmd-13-3643-2020>
- Wang X C, Liu Y M, Wu G X, et al. 2013. The application of flux-form semi-Lagrangian transport scheme in a spectral atmosphere model[J]. *Adv Atmos Sci*, 30: 89-100. doi: <https://doi.org/10.1007/s00376-012-2039-2>
- Wang X C, Zhang M H. 2014. Vertical velocity in shallow convection for different plume types[J]. *J Adv Model Earth Syst*, 6(2):478-489. doi: <https://doi.org/10.1002/2014MS000318>
- Wang X, Bao Q, Liu K et al. 2011. Features of rainfall and latent heating structure simulated by two convective parameterization schemes. *Sci. China Earth Sci.* 54, 1779-1788. doi: <https://doi.org/10.1007/s11430-011-4282-2>
- 王鹏飞, 黄刚, 2006. 数值模式预报时效对计算精度和时间步长的依赖关系[J]. *气候与环境研究*, 11: 395-403. WANG Peng-Fei, HUANG Gang. A Study on the Dependency of Maximum Prediction Time on Computation Precision and Time Step-size in Numerical Model[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2006, 11(3): 395-403.

- Wang P F, Jiang JR, Lin PF, et al. 2021. The GPU version of LASG/IAP Climate System Ocean Model version 3 (LICOM3) under the heterogeneous-compute interface for portability (HIP) framework and its large-scale application. *Geosci. Model Dev.*, 14, 2781–2799. doi: <https://doi.org/10.5194/gmd-14-2781-2021>
- Wang S P, Jing Z, Liu HL, et al. 2018. Spatial and Seasonal Variations of Submesoscale Eddies in the East Tropical Pacific Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, 48(1), 101-116, doi: 10.1175/JPO-D-17-0070.1.
- Wang S P, Jing Z, Zhang YQ, et al. 2019. Ocean Eddy Energetics in the Spectral Space as Revealed by High-Resolution General Circulation Models. *J. Phys. Oceanogr.*, <https://doi.org/10.1175/JPO-D-19-0034.1>, 49, 2815–282.
- Wang YQ, Liu HL, Yu ZP, et al. 2022. Simulated sea levels during 1948–2009 in a global ocean-sea ice model for OMIP. *Deep Sea Res. Pt. II: Topical Studies in Oceanography*, 199, 105082, doi:<https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2022.105082>.
- 王在志, 吴国雄, 刘平, 等. 2005a. 全球海-陆-气耦合模式大气模式分量的发展及其气候模拟性能 I——水平分辨率的影响[J]. *热带气象学报*, 21(3): 225–237. Wang Z Z, Wu G X, Liu P, et al. 2005a. The development of GOALS/LASG AGCM and its global climatological features in climate simulation I: Influence of horizontal resolution. *Journal of Tropical Meteorology*, 21(3): 225-237.
- 王在志, 宇如聪, 王鹏飞, 等. 2005b. 全球海-陆-气耦合模式大气模式分量的发展及其气候模拟性能 II——垂直分辨率的提高及其影响[J]. *热带气象学报*, 21(3): 238–247. Wang Z Z, Yu R C, Wang P F, et al. 2005b. The development of GOALS/LASG AGCM and its' global climatological features in climate simulation II: The increase of vertical resolution and its influences. *Journal of Tropical Meteorology*, 21(3): 238-247.
- Wei J, JR, Liu HL, et al. 2023. Implementing and optimizing a hybrid CPU-GPU version of LICOM3 based on CUDA, *The Journal of Supercomputing*, <https://doi.org/10.1007/s11227-022-05020-2>
- 吴国雄, 张学洪, 刘辉, 等. 1997. LASG 全球海洋-大气-陆面系统模式 (GOALS/LASG) 及其模拟研究 [J]. *应用气象学报*, 8, 15-28. Wu G X, Zhang X H, Liu H, et al. 1997. Global Ocean-Atmosphere-Land system model of LASG(GOALS/LASG) and its performance in simulation study. *Quart J Appl Meteor*, 8:15-28.
- Wu G, Liu H, Zhao Y, et al. 1996. A nine-layer atmospheric general circulation model and its performance[J]. *Adv Atmos Sci*, 13: 1-8.
- Xie SP. 2004. Satellite observations of cool ocean-atmosphere interaction[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(2). doi: <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-2-195>
- 俞永强, 唐绍磊, 刘海龙, 等. 2018. 任意正交曲线坐标系下的海洋模式动力框架的发展与评估. *大气科学*, 42, 877-889. Yongqiang YU, Shaolei TANG, Hailong LIU, Pengfei LIN, Xiaolan LI. Development and Evaluation of the Dynamic Framework of an Ocean General Circulation Model with Arbitrary Orthogonal Curvilinear Coordinate[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, 42(4): 877-889.



726 Yu Y, Yu R, Zhang X, et al. 2002. A flexible coupled ocean-atmosphere general circulation model[J].  
 727 Advances in Atmospheric Sciences, 19(1): 169-190. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00376-002-0042-8>  
 728 YU Y, ZHANG X, GUO Y . 2004: Global Coupled Ocean-Atmosphere General Circulation Models in  
 729 LASG/IAP[J]. Adv. Atmos. Sci., 21(3): 444-455<https://doi.org/10.1007/BF02915571>  
 730 YU Y, ZHI H, WANG B, et al . 2008: Coupled Model Simulations of Climate Changes in the 20th Century  
 731 and Beyond[J]. Adv. Atmos. Sci., 25(4): 641-654<https://doi.org/10.1007/s00376-008-0641-0>  
 732 YU Y, ZHENG W, WANG B, LIU H, LIU J . 2011: Versions g1.0 and g1.1 of the LASG/IAP Flexible  
 733 Global Ocean--Atmosphere--Land System Model[J]. Adv. Atmos. Sci., 28(1): 99-  
 734 117<https://doi.org/10.1007/s00376-010-9112-5>  
 735 于子棚, 刘海龙, 林鹏飞. 2017. 潮汐混合对大西洋经圈翻转环流 (AMOC) 模拟影响的数值模拟  
 736 研究. 大气科学, 41(5), 1087-1100, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1702.16263. Zipeng YU, Hailong  
 737 LIU, Pengfei LIN. A Numerical Study of the Influence of Tidal Mixing on Atlantic Meridional  
 738 Overturning Circulation (AMOC) Simulation[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2017,  
 739 41(5): 1087-1100  
 740 曾庆存. 1963. 大气运动的特征参数和动力方程[J]. 气象学报, 33: 472-483. Zeng Qingcun. 1963.  
 741 Characteristic parameters and dynamic equations of atmospheric motions[J]. Acta Meteorologica  
 742 Sinica, 33: 472-483.  
 743 曾庆存, 张学洪. 1987. 球面上斜压原始方程组保持总有效能量守恒的差分格式. 大气科学, 11, 2:  
 744 113-127. Zeng Qingcun, Zhang Xuehong. Available energy conserving schemes for spherical  
 745 baroclinic primitive equations[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1987, 11(2): 113-127.  
 746 Zhang XH, Chen KM, Jin XZ, et al. 1996. Simulation of thermohaline circulation with a twenty-layer  
 747 oceanic general circulation model[J]. Theoretical and Applied Climatology, 55(1-4): 65-87. Doi:  
 748 <https://doi.org/10.1007/BF00864703>  
 749 Zhang XH, Liang XZ. 1989. A numerical World ocean general circulation model. Advances in Atmospheric  
 750 Sciences, 6, 1: 44-61.  
 751 Zhang X, Bao N, Yu R, et al. 1992. Coupling scheme experiments based on an atmospheric and an oceanic  
 752 GCM[J]. Chinese Journal Atmospheric Sciences, 16(2): 129-144.  
 753 Zheng W, Lin P, Liu HL, et al. 2023. An assessment of LICOM Forecast System (LFS) under the IVTT  
 754 framework, FMS. doi: <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1112025>  
 755 周林炯. 2015. LASG 有限体积大气模式 FAMIL 及其耦合版本 FGOALS-f 的研发与评估[D]. 北京  
 756 : 中国科学院大气物理研究所. Development and Evaluation of the Finite-volume  
 757 Atmospheric/Coupled Model of IAP/LASG[D]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese  
 758 Academy of Sciences.  
 759 Zhou L, Bao Q, Liu Y, et al. 2015. Global energy and water balance: Characteristics from Finite-volume  
 760 Atmospheric Model of the IAP/LASG (FAMIL 1)[J]. J Adv Model Earth Syst, 7(1): 1-20. doi:  
 761 <https://doi.org/10.1002/2014MS000349>  
 762 Zhou L, Liu Y, Bao Q, et al. 2012. Computational performance of the high-resolution atmospheric model  
 763 FAMIL[J]. Atmos Oceanic Sci Lett, 5: 355-359. doi: 10.1080/16742834.2012.11447024

764 周天军, 宇如聪, 王在志, 等. 2005. 亚洲季风区海陆气相互作用对我国气候变化的影响 (第四  
 765 卷): 大气环流模式 SAMIL 及其耦合模式 FGOALS-s[M]. 北京: 气象出版社. Zhou tianjun, Yu  
 766 Rucong, Wang Zaizhi, et al. 2005. The Impacts of the Ocean -Land-Atmosphere Interaction over the  
 767 Asian Monsoon Domain on the Climate Change over China: Volume 4 of The Atmospheric General  
 768 Circulation Model SAMIL and Its Associated Coupled Climate System Model FGOALS-s[M]. Beijing:  
 769 China Meteorological Press.

770 Zhou T, Chen Z, Zou L, et al. 2020. Development of Climate and Earth System Models in China: Past  
 771 Achievements and New CMIP6 Results[J]. Journal of Meteorological Research, 34(1). doi:  
 772 <https://doi.org/10.1007/s13351-020-9164-0>

773 Zhou T, Wang B, Yu Y, et al. 2018. The FGOALS climate system model as a modeling tool for supporting  
 774 climate sciences : An overview[J]. 10.26464/epp2018026: 276-291.