

FIO-ESM: The Earth System Model Coupled with Ocean Surface Gravity Waves

Zhenya Song^{1,2,3}

¹First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao Shandong

²Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao Shandong

³Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, Ministry of Natural Resources, Qingdao Shandong
Email: songroy@fio.org.cn

Received: Dec. 26th, 2019; accepted: Jan. 12th, 2020; published: Jan. 19th, 2020

Abstract

The Earth System Model (ESM), a numerical model for the quantitative description of the climate system, is the key tool for understanding and predicting climate change as well as assessing impacts of human on climate change. Its development is at the forefront of global change. Although the state-of-the-art ESMs have made great progress, they are still suffering from several common simulated problems. By incorporating the ocean surface wave model into ESM through the role of small-scale waves on the ocean vertical mixing and air sea fluxes, two generations of FIO-ESM are innovatively developed by the First Institute of Oceanography (FIO), which can effectively reduce the simulation biases. Focused on the effects of ocean surface waves on climate system, this paper mainly reviewed the background and history of the two-generation FIO-ESM development through introducing four distinctive physical processes including the wave-induced vertical mixing, the air-sea flux induced by Stokes drifts, the heat flux associated with sea spray, and the SST diurnal cycle scheme. And the simulation ability and applications on the climate change and short-term prediction are also introduced. Finally, the future development and suggestions of the ESM is discussed from the perspective of the role of ocean surface waves on the ESM.

Keywords

Earth System Model, FIO-ESM, Ocean Surface Waves, Coupled Model, Climate Model

耦合海浪的地球系统模式FIO-ESM

宋振亚^{1,2,3}

¹自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛

²青岛海洋科学与技术国家实验室区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛

³自然资源部海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 山东 青岛

Email: songroy@fio.org.cn

收稿日期：2019年12月26日；录用日期：2020年1月12日；发布日期：2020年1月19日

摘要

地球系统模式是定量描述气候系统的数值模型，也是理解和预测气候变化、评估人类对气候变化影响的核心工具，其发展是全球变化领域的前沿。尽管当前地球系统模式取得了巨大的进步，但仍面临一些共性偏差问题。自然资源部第一海洋研究所通过引入小尺度海浪在海洋混合和海气通量上的作用，率先发展了两代耦合海浪的地球系统模式FIO-ESM，能够有效减缓模拟偏差，提高模拟和预测能力。本文围绕耦合海浪分量模式这一特色，以FIO-ESM模式中引入的浪致混合、斯托克斯漂流对海气通量作用、海浪飞沫对热通量作用和海表温度日变化过程等4种特色物理过程为切入点，阐述了两代模式发展的考量，总结了FIO-ESM在气候变化研究和短期气候预测上的应用，系统回顾了两代模式的发展历程。最后，结合海浪在气候系统中的作用，对地球系统模式未来发展进行了展望，为模式的发展提供参考。

关键词

地球系统模式， FIO-ESM， 海浪， 耦合模式， 气候模式

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地球系统模式(以下简称“气候模式”)是定量描述地球气候系统现象及其变化的数值模型，也是一组大型的计算机程序。它通过建立数学物理方程组反映地球气候系统中动力、物理、化学和生态以及其相互作用等复杂过程，进而采用数值积分方式对偏微分方程组进行求解[1] [2]。

自从1969年Manabe和Bryan的开创性工作[3]以来，气候模式取得了极大的发展和进步，经历了海气耦合环流模式、气候系统模式，已经进入到包含生物地球化学过程的地球系统模式阶段。模式分辨率越来越高、过程(物理、化学、生物等)越来越复杂，其模拟能力也在逐步提高，已经成为理解和预测气候变化、评估人类对气候变化影响的核心工具，其发展及应用也成为地球科学特别是全球变化领域研究的前沿和重要方向之一[1] [2] [4]。

尽管早在1991年Hasselmann就提出了包含大气环流模式、海洋环流模式、海浪模式、全球生物化学及碳循环等分量的气候模式框架[5]，但由于传统研究认为小尺度海浪过程在大尺度气候系统中作用微弱，因此经典的气候模式通常由大气环流模式、陆面模式、海洋环流模式以及海冰模式等四个分量模式组成，海浪的作用一直未受到重视[4] [6]。Qiao等发现非破碎海浪混合的影响深度可达百米量级(波长尺度)，与海洋上混合层厚度相当，进而建立了海浪非破碎致混合理论(浪致混合理论)[7]，在模式中的系列应用结果表明海浪可以通过非破碎混合的作用对大尺度海洋环流和气候系统产生重要影响，并能够减缓当前海洋和气候模式面临的系列经典模拟偏差问题[7]-[17]。

为了推动气候模式的发展，加深海浪对气候系统作用的认识，自然资源部第一海洋研究所(原国家海洋局第一海洋研究所)以自主发展的浪致混合理论为切入点，建立了首个包含海浪模式分量的气候模式FIO-ESM v1.0 (First Institute of Oceanography-Earth System Model version 1.0) [6]，表现出了较好的模拟性

能,特别是海洋表层温度和上混合层。随后,我们注意到海浪对海气通量的作用,在 FIO-ESM v1.0 的基础上,通过引入海浪斯托克斯漂速度对海气通量作用、海浪破碎飞沫对热通量作用等物理过程,发展了第二代包含海浪的气候模式 FIO-ESM v2.0,初步结果表明 FIO-ESM v2.0 在热带地区的模拟能力有了较大的提高[4]。

系列 FIO-ESM 模式是以海浪耦合为特色的地球系统模式,其发展对于气候模式发展和气候变化研究具有重要意义。本文将系统回顾两代地球系统模式 FIO-ESM 的发展历程和进展,在此基础上对气候模式未来发展进行展望,为气候模式的发展提供参考。

2. FIO-ESM v1.0 的发展及其应用

2.1. FIO-ESM v1.0 的发展

海浪是全球海洋中最显著的运动形态之一,也是全球海洋中含能最高的运动形态[18],但含能巨大的海浪在上层海洋中的作用一直并没有被正确地包含在海洋环流模式中。由于小尺度海浪在水平方向上与大尺度环流相差 4~5 个量级,海浪主要通过海洋垂向混合的作用来影响海洋环流系统。以往对海浪混合的研究主要集中在海浪破碎混合,然而破碎混合影响的深度仅局限在海面以下几米范围内,无法将表层热量输送到更深的海洋次表层,因此,传统研究认为小尺度海浪过程在大尺度海洋与气候系统中作用微弱,其作用一直未受到重视。Qiao 等发现除了破碎过程,非破碎海浪可以直接诱发混合,在垂向方向上其影响深度可达波长尺度(百米),与海洋上混合层厚度相当,进而建立了浪致混合理论[7]。将该理论应用到 POM (Princeton Ocean Model)、ROMS (Regional Ocean Modeling System)、MOM (Modular Ocean Model)、POP (Parallel Ocean Program)等多个海洋环流模式后,均能通过加强海洋上层的混合,有效改善了海洋模式模拟的夏季混合层偏浅、海表温度(SST)偏高这一经典问题,这表明海浪能够通过非破碎混合的作用对大尺度海洋环流产生重要影响[7] [8] [9] [10] [11]。

随后,基于浪致混合理论,宋振亚等将我国自主研发的 MASNUM 海浪模式耦合至我国中科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),发展的气候模式 FGCM0 (Flexible Coupled General Circulation Model version 0),美国大气研究中心(NCAR)发展的气候模式和 CCSM3 (Community Climate System Model version 3)中[12] [13],发现浪致混合通过海洋混合和海气反馈机制在气候系统中发挥了重要作用,能够有效减缓当前气候模式面临的如热带偏差[12] [14] [15]、东亚季风区水汽输送不足[16]、南大洋混合层模拟偏浅[17]等系列经典偏差问题,气候模式的模拟和预测能力得到较大提高[13]。以上系统性研究揭示了小尺度的海浪过程通过海洋混合和复杂的海气反馈机制在气候系统中发挥的重要作用及其机制,加深了海浪在气候系统中作用的科学理解。

在以上研究基础上,经过大量的数值试验,基于美国大气研究中心气候模式 CCSM3 耦合框架,以浪致混合为切入点,建立了首个包含海浪分量的气候模式 FIO-ESM v1.0 [6]。

2.2. FIO-ESM v1.0 模式简介

作为地球系统模式,FIO-ESM v1.0 由气候系统模式和碳循环模式两部分组成(图 1)。气候系统模式包括大气环流模式 CAM3.0 (Community Atmosphere Model version 3.0) [19]、陆面模式 CLM3.5 (Community Land Model version 3.5) [20]、海洋环流模式 POP2.0 (Parallel Ocean Programme) [21]、海冰模式 CICE4 (Los Alamos National Laboratory Sea Ice Model version 4) [22]和海浪模式 MASNUM (Marine Science and Numerical Modeling) [23],它们借助通量耦合器 Coupler6 耦合实现为一个完整的气候系统模式;碳循环模型(图 1 橙色矩形框)包括大气 CO₂ 三维输运模型、陆地碳循环模型和海洋碳循环模型,这些碳循环模型相互作用组成一个完整的地球碳循环过程,其中陆地碳循环模型为静态植被模型 CASA' [24],海洋碳循环

模型为改进的 OCMIP-2 [25]。气候物理过程和全球碳循环过程二者相互作用，共同影响全球气候变化。

在 FIO-ESM v1.0 中，海浪模式从耦合器中得到大气 10 米风场，然后计算出波浪的方向谱，得到波浪的方向谱后利用波致混合计算公式得到波致混合系数，并发送给耦合器；海洋模式通过耦合器获得波致混合系数，并将其迭加到动量控制方程中的垂向涡粘系数和温度、盐度控制方程中的垂向扩散系数中得到总的垂向混合系数。

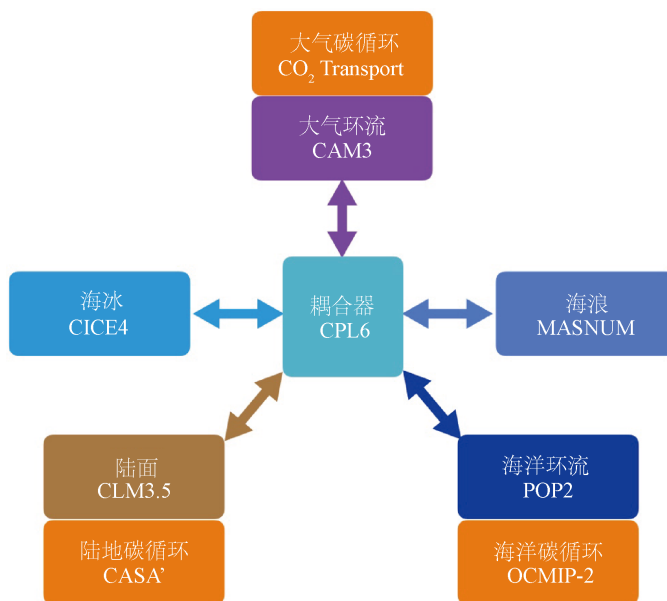


Figure 1. Framework of First Institute of Oceanography-Earth System Model version 1.0 (FIO-ESM v1.0)

图 1. 地球系统模式 FIO-ESM v1.0 框架示意图

FIO-ESM v1.0 只有一种分辨率配置(表 1)，即大气模式的水平分辨率为 T42，约为 2.875° ，垂向分为 26 层，陆面模式的水平分辨率与大气相同，海洋模式的水平分辨率为 $1^\circ \times 0.27^\circ \sim 0.54^\circ$ ，垂向分为 40 层，海浪模式的水平分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$ 。大气模式、陆面模式和海冰模式与耦合器的交换频率为 24 次/d，海洋模式与耦合器的交换频率为 1 次/d，海浪模式与耦合器的交换频率为 4 次/d。有关 FIO-ESM v1.0 的细节见文献[6]。

2.3. FIO-ESM v1.0 的应用

气候模式 FIO-ESM v1.0 参加了第五次国际耦合模式比较计划(CMIP5) [26]，其中气候系统模式完成了工业革命前控制试验(Pre-industrial)、历史气候模拟试验(historical)、4 组典型浓度路径(RCP)未来百年情景试验和 6 k 年前全新世中期试验，包含碳循环的气候模式完成了地球系统模式工业革命前控制试验(ESM Pre-industrial)、历史气候模拟试验(ESM historical)和 RCP8.5 的未来百年情景试验(表 2)。这是我国海洋领域首次参加国际耦合模式比较计划，FIO-ESM v1.0 模式也是所有 CMIP5 气候模式中唯一耦合海浪的气候模式。据不完全统计，模式数据自通过地球系统网格联盟(ESGF)数据节点发布以来，已被国内外 491 篇论著引用分析¹。

CMIP5 多模式对比结果表明，FIO-ESM v1.0 对东太平洋 SST [27]、北极海冰的季节循环和变化趋势 [28]、厄尔尼诺和南方涛动(ENSO) [29]、大气亚澳季风区水汽输送[30]、西北太平洋副热带高压[31]等表

¹引用的文献列表见网页 http://odc.fio.com.cn/FIO-ESM/CMIP5_Publications-FIO-ESM.html

Table 1. Comparison of Components models in FIO-ESM v1.0 and v2.0
表 1. FIO-ESM v1.0 与 v2.0 分量模式比较

分量模式	FIO-ESM v1.0	FIO-ESM v2.0	
	模式名称	CAM3	CAM5
大气	分辨率	水平: T42 (2.875° × 2.875°); 垂向: 26 层	水平: f09 (0.9° × 1.25°) 垂向: 30 层
	动力框架	欧拉(EUL)	有限体积(FV)
	碳循环	CO ₂ 三维运输模型	CO ₂ 三维运输模型
	耦合频率	24 次/d	48 次/d
	模式名称	CLM3.5	CLM4.0
陆面	分辨率	水平分辨率与大气一致	水平分辨率与大气一致
	碳循环	CASA'模型	CN 模型
	耦合频率	24 次/d	48 次/d
	模式名称	POP2	POP2
海洋	分辨率	水平: 1.1° × (0.27°~0.54°) 垂向: 40 层(海洋上 1000 m 22 层)	水平: 1.1° × (0.27°~0.54°) 垂向: 61 层(第 1 层为 SST 日变化参数化方案 诊断的 0 m 海温层, 第 2~61 层为海洋模式垂 向分层, 包含海洋各要素, 其中海洋上 1000 m 分为 40 层)
	碳循环	OCMIP-2 模型	NPZD 模型
	耦合频率	1 次/d	8 次/d
海冰	模式名称	CICE4	CICE4
	分辨率	水平分辨率与海洋相同	水平分辨率与海洋相同
	耦合频率	24 次/d	48 次/d
海浪	模式名称	MASNUM 海浪模式	MASNUM 海浪模式子程序版
	分辨率	2° × 2°	水平分辨率与海洋相同
	耦合频率	4 次/d	8 次/d
径流	模式名称	——	RTM1
	分辨率	——	0.5° × 0.5°
	耦合频率	——	48 次/d
耦合器	CPL6	CPL7	

Table 2. CMIP5 experiments carried out by FIO-ESM v1.0
表 2. FIO-ESM v1.0 开展 CMIP5 试验列表

试验名称	积分时段	集合数目
工业革命前控制试验(Pre-industrial)	控制积分 1200 a	1
历史试验(Historical)	156 a (1850~2005 年)	3
RCP2.6 情景试验	95 a (2006~2100 年)	3
RCP4.5 情景试验	95 a (2006~2100 年)	3
RCP6.0 情景试验	95 a (2006~2100 年)	3
RCP8.5 情景试验	95 a (2006~2100 年)	3
全新世中期(6 k 年前)试验	500 a	1
工业革命前控制试验(ESM Pre-industrial)	控制积分 400 a	1
历史试验(ESM historical)	156 a (1850~2014 年)	1
RCP8.5 未来情景预测(ESM RCP8.5)	95 a (2006~2100 年)	1

现出了较好的模拟能力。特别是引入了浪致混合过程，能够将更多的能量从海洋表层传递到次表层，有效缓解了副热带地区混合层模拟偏浅等共性问题[32] [33]，并有效地增加了全球上层海洋热含量[34]，进而使得全球平均 SST 和海冰的模拟更为合理。

图 2 给出了 45 个 CMIP5 气候模式模拟的历史时期(1870~2005 年)全球平均 SST 的变化。从图中可以看出，45 个 CMIP5 模式都能模拟出二十世纪增温的变化趋势，多模式平均(图 2 红色粗线)与观测(图 2 黑色粗线)的相关系数可以达到 0.857。虽然多模式平均与观测的绝对均差为 0.101℃，但是各模式模拟的全球平均 SST 的量级具有较大的不确定性，绝对均差最大为 1.247℃ (CSIRO-Mk3-6-0)，最小为 0.112℃ (CMCC-CMS)，其中 FIO-ESM v1.0 (图 2 蓝色粗线)与观测的绝对均差为 0.146℃，在 45 个模式中排名分别为第 8，表现出了较好的模拟能力。

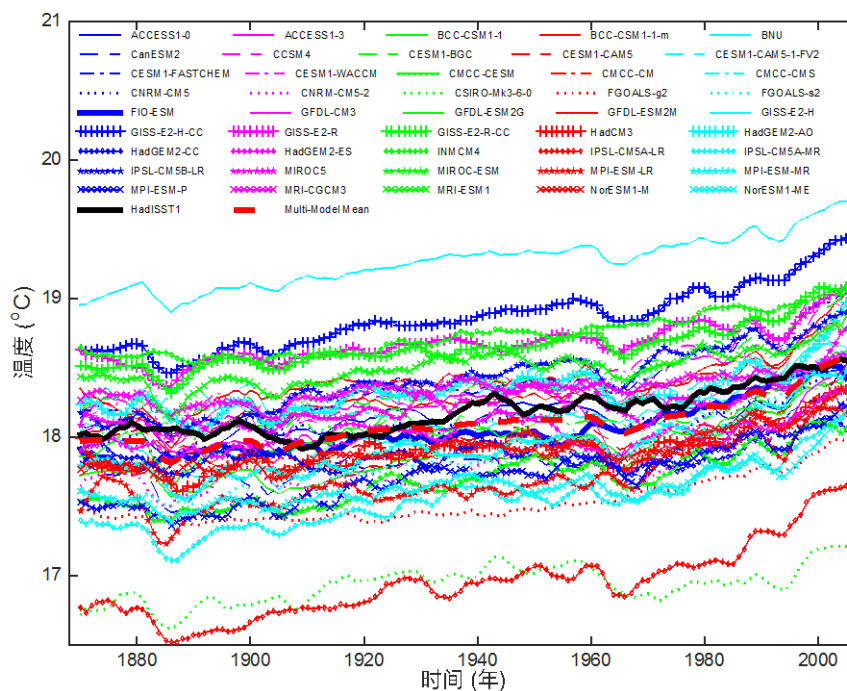


Figure 2. Time series of the annual and global mean sea surface temperature (SST) from 1870 to 2005 (units: °C). Black thick line: Observation (HadSST1); Red thick line: CMIP5 multi-model mean; Colored Line: Individual model of CMIP5; Blue thick line: FIO-ESM v1.0

图 2. 历史时期(1870~2005 年)全球年平均海表温度(SST)的变化(单位: °C)。黑色粗实线: 观测(HadSST1); 红色粗实线: CMIP5 多模式平均; 其它颜色线: CMIP5 模式, 其中 FIO-ESM v1.0 为蓝色粗实线

图 3 给出了 47 个 CMIP5 气候模式模拟的有连续卫星记录以来(1979~2005 年)的北极海冰覆盖范围的季节循环情况。观测(图 3 黑色粗线)显示，北极海冰覆盖范围具有明显的季节循环，每年 3 月份最大、9 月份最小，CMIP5 多模式平均(图 3 红色粗线)与观测符合较好，其误差在每个月均小于观测值的 15%，但是模式间的差异较大(图 3 颜色细线)。CMIP5 多模式与观测相比，均方根误差最大为 $3.99 \times 10^6 \text{ km}^2$ (GFDL-ESM2G)，最小为 $0.36 \times 10^6 \text{ km}^2$ (CCSM4)，其中 FIO-ESM v1.0 (图 2 蓝色粗线)与观测的均方根误差为 $0.66 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，在 47 个模式中排名为第 8，也表现出了较好的模拟能力。

FIO-ESM v1.0 在 SST 和海冰等方面表现出了较好的模拟能力，因此，我们基于该模式和集合调整卡尔曼滤波同化方案建立了短期气候预测系统[35]，自 2014 年起参与了国际北极夏季海冰预测计划²，每

² 国际北极夏季海冰预测计划网页 <https://www.arcus.org/sipn>。

年6月份起提供北极夏季预测结果；2016年起在国家海洋环境预报中心应用，为厄尔尼诺气候会商和雪龙船北极科考提供短期气候预测结果。

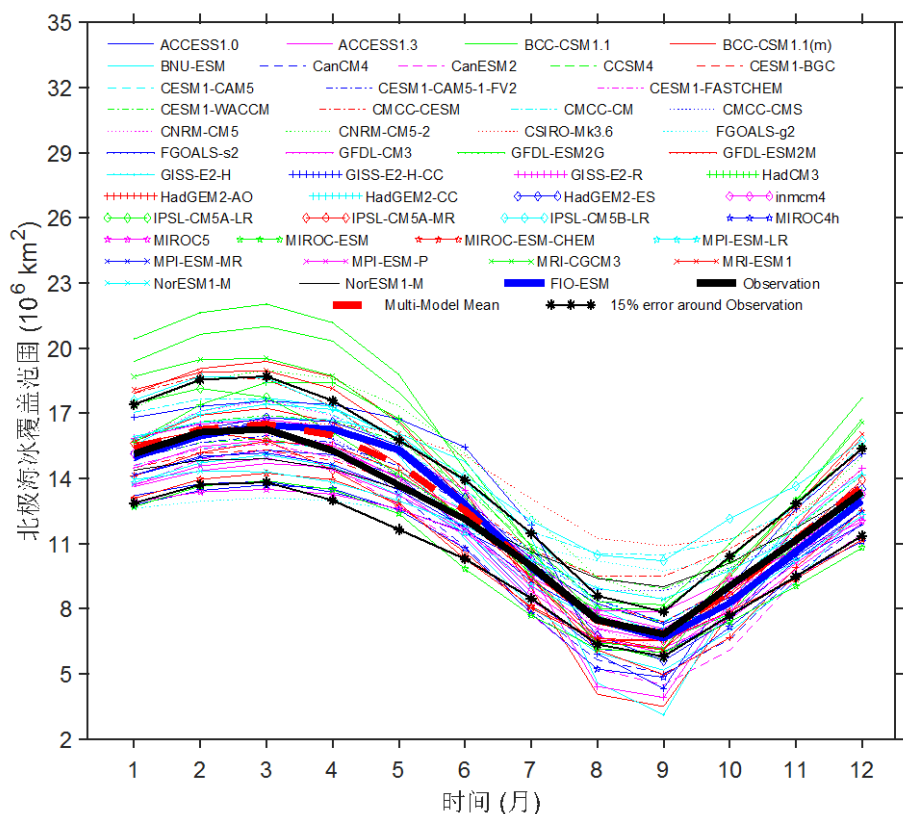


Figure 3. Climatological seasonal cycle (1979-2005) of the Arctic sea ice extent from the Satellite observations and CMIP5 simulations (units: million km²). Black thick line: observation; red thick line: CMIP5 multi-model mean; colored line: individual model of CMIP5; blue thick line: FIO-ESM v1.0

图3. 卫星观测及CMIP5模拟的北极海冰覆盖范围的多年(1979~2005年)平均的季节循环(单位: 10⁶ km²)。黑色粗实线: 观测; 红色粗实线: CMIP5多模式平均; 其它颜色线: CMIP5模式, 其中FIO-ESM v1.0为蓝色粗实线

3. FIO-ESM v2.0 的发展及参与 CMIP6 情况

3.1. FIO-ESM v2.0 的发展

FIO-ESM v1.0 的系列工作表明小尺度海浪可以通过改变海洋中的混合过程进而影响大尺度全球大洋环流和气候变化, 对气候模式热带偏差、南大洋混合层模拟偏浅等共性问题有所改善。对于气候模式来说, 其模拟偏差不止来源于海洋模式分量, 其他模式分量以及通量过程的不完善都会导致气候模式的模拟偏差。因此在 FIO-ESM v2.0 的发展中, 除了分量模式的优化改进外, 我们主要关注了海气界面的通量过程, 通过引入斯托克斯漂流对海气通量的作用、海浪飞沫对海气热通量作用以及 SST 日变化等特色物理过程改进海气通量参数化方案。以下简单的对这三个特色物理过程进行简要的介绍, 详细介绍见文献 [4]和 Bao *et al*³。

³Bao, Y., Song, Z. and Qiao, F. (2020) FIO Earth System Model (FIO-ESM) version 2.0: Model description and evaluation, submitted to Journal of Geophysical Research: Ocean.

3.1.1. 斯托克斯漂流对海气通量作用

斯托克斯漂是由于海表水质点的运动轨迹在表面重力波的非线性作用下不封闭而在海浪传播方向上产生的拉格朗日净输运[36]，其方向与海洋表层流场分布接近但有所偏移，其大小可达到海表流速的百分之十，在西风带等区域能够超过海表流速的一半。

当前，气候模式中海气通量计算采用的是块体公式，在计算动量通量风应力、潜热通量和感热通量时，海面风速采用的是大气风场与海表流场的相对速度。事实上，斯托克斯漂流也是海水流动的一部分，因此，在 FIO-ESM v2.0 海气通量计算时，首次采用了物理上更为合理的参数化方案，即将大气风场、海表流场和斯托克斯漂流三者的相对速度作为海面风速来计算海气通量。

3.1.2. 海浪飞沫对海气热通量作用

海浪破碎伴随产生的飞沫从海洋进入大气边界层并扩散，一方面飞沫的水滴以海水温度进入大气，降低边界层大气温度，从而增大了海洋同大气之间的感热交换，另一方面飞沫水滴蒸发吸热带走海洋的热浪，影响潜热通量。研究表明，当风速超过 10 m/s 时，飞沫对热通量的影响不容忽视，可达 2~3 倍，因此，海气界面的热通量应包括直接的湍流热通量和飞沫导致的热通量[37]。

在 FIO-ESM v2.0 海气热通量计算时，首次引入了浪致飞沫对热通量的作用，即在采用块体公式计算出感热通量和潜热通量的基础上，叠加上根据经验公式计算得到的飞沫引起的感热通量和潜热通量作为最终的海气热通量。

3.1.3. SST 日变化参数化方案

日变化过程是 SST 的最主要变化之一，它在海-气相互作用过程中起着重要的作用。在气候模式中，虽然提高大气与海洋的耦合频率，能够模拟出 SST 日变化过程，但是由于海洋模式垂向分辨率的不足，SST 日变化振幅的合理模拟仍是一个挑战[38]。在当前海洋垂向分辨率情况下，引入 SST 日变化参数化方案是一种较为可行的方法。

在 FIO-ESM v2.0 中，采用了 Yang 等最新发展的一个 SST 日变化参数化方案[38]，通过海洋模式第一层(5 m 层)温度、短波辐射、海表风速等物理量诊断出海洋表层(0 m 层)的温度，然后替代原海洋模式的第一层温度发送给耦合器进行海气热通量计算。

3.2. FIO-ESM v2.0 模式简介

FIO-ESM v2.0 的框架结构与 v1.0 类似，都是通过耦合器实现不同分量模式之间的耦合(图 4)，但由于耦合器由 Coupler 6 升级为 Coupler 7，因此整个模式由原来的多程序多数据流方式(MPMD)变为了单程序多数据流方式(SPMP)。

除了前面介绍的 3 种特色物理过程外，FIO-ESM v2.0 的各分量模式也分别开展了升级和改进(表 1)，具体包括：大气分量模式由 CAM3 升级为 CAM5 [39]，动力框架由谱元欧拉方法变为有限体积法，水平分辨率由 T42 提高到 f09 ($0.9^\circ \times 1.25^\circ$)，垂向分层由 26 层加密到 30 层，气溶胶强迫采用的是给定的气溶胶浓度方案，考虑了气溶胶的直接效应和间接效应；陆面分量模式由 CLM3.5 升级为 CLM4.0 [40]，水平分辨率与大气分量模式相同；海冰分量模式仍为 CICE4，水平分辨率保持不变($1.1^\circ \times 0.27\sim 0.54^\circ$)；海洋分量模式仍为 POP2，水平分辨率与海冰分量模式一致，但是垂向分辨率由 40 层加密到 61 层，其中第 1 层为 SST 日变化参数化方案诊断的 0 m 海温层，第 2~61 层为海洋模式垂向分层，包含海洋各要素；海浪分量模式仍为自然资源部第一海洋研究所自主研发的 MASNUM 海浪模式，但为了减少浪致混合系数带来的三维数据插值和传输代价，提高计算精度和速度，采用了子程序版的海浪模式直接嵌入到海洋分量模式 POP2 中，水平分辨率由 2° 提高到 $1.1^\circ \times 0.27\sim 0.54^\circ$ ；径流分量模式从陆面模式中的模块变为了单

独的分量模式 RTM (River Transport Model) [41], 水平分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。



Figure 4. Framework of First Institute of Oceanography-Earth System Model version 2.0 (FIO-ESM v2.0)

图 4. 地球系统模式 FIO-ESM v2.0 框架示意图

FIO-ESM v2.0 中的大气碳循环模型仍为大气 CO_2 三维输运模型, 陆地碳循环模型由静态植被模型 CASA 升级为 CN 模型(Carbon-Nitrogen) [40], 海洋碳循环模型升级为海洋生态系统动力学与海洋生物地球化学耦合的 NPZD 模型(Nutrient-Phytoplankton-Zooplankton-Detritus) [42]。

3.3. FIO-ESM v2.0 参加 CMIP6 情况

与以往的 CMIP 设计不同, CMIP6 试验由通用试验(Common Experiment)和系列模式比较子计划(MIPs)试验组成[43] [44]。其中通用试验为门槛试验, 要求所有参加的模式组必须完成, 并且提供其模式的全部结果, 包括气候诊断、评估和描述试验(DECK, Diagnostic, Evaluation and Characterization of Klima Experiments)、历史气候模拟试验(historical simulations, 1850~2014 年)两组基础试验, 以用来保持连续性和记录 CMIP 不同阶段的基本特征。系列模式比较子计划是建立在 DECK 和历史气候模拟试验的基础上, 针对特定的科学问题由科学家自行设计和组合提出的多模式比较计划。与通用试验不同, 系列模式比较子计划的试验, 各个模式组可以自由选择 and 参加, 根据各自的情况, 可以部分做或者全部做, 不受约束。

基于最新发展的气候模式 FIO-ESM v2.0, 开展了 CMIP6 的相关试验(表 3)。当前已经完成了所有的通用试验, 包括由大气模式比较计划(AMIP)、工业革命前控制试验(piControl)、 CO_2 浓度每年增加 1%模拟(1 pct CO_2)和 4 倍 CO_2 浓度突增(abrupt-4 $\times \text{CO}_2$)等 4 组试验组成的 DECK 以及历史气候模拟试验。工业革命前控制试验最后 700 年(301~1000a)全球平均温度和盐度分别为 3.78°C 和 34.72 psu , 并且长期变化趋势都较小, 分别为 $0.0155^{\circ}\text{C}/\text{百年}$ 和 $0.0001 \text{ psu}/\text{百年}$ (图 5), 这表明气候模式 300 年后已经达到了平衡并且较为稳定, 没有出现较大的气候漂移, 进一步的评估工作结果正在开展中。

此次 CMIP6 科学计划中已经确认的系列模式比较子计划有 21 个[43], 我们根据感兴趣的科学问题和 FIO-ESM 的特点, 开展了其中 6 个系列模式比较子计划的试验, 分别是耦合气候碳循环模式比较子计划(C4MIP) [45]、年代际气候预测子计划(DCPP) [46]、全球季风比较子计划(GMMIP) [47]、海洋模式比较子计划(OMIP) [48]、情景预测模式比较子计划(Scenario MIP) [49]和海冰模式比较子计划(SIMIP) [50]。

Table 3. CMIP6 experiments carried out by FIO-ESM v2.0
表 3. FIO-ESM v2.0 开展 CMIP6 试验列表

试验名称	积分时段	集合数目	
大气模式比较(AMIP)	36 a (1979~2014 年)	3	
工业革命前控制试验(piControl)	控制积分 1000 a	1	
气候诊断、评估和描述试验 (DECK)	碳循环工业革命前控制试验 (esm-piControl)	控制积分 1000 a	1
	1% CO ₂ 增加试验(1 pct CO ₂)	150 a	3
	4 倍 CO ₂ 突增试验(abrupt-4 × CO ₂)	150 a	3
历史试验(Historical Simulation)	历史试验(Historical)	165 a (1850~2014 年)	3
	碳循环历史试验(esm-hist)	165 a (1850~2014 年)	1
耦合气候碳循环模式比较子计划(C4MIP)	1% CO ₂ 增加试验(1 pct CO ₂ -bgc)	140 a	1
	SSP5-8.5 情景试验(esm-ssp585)	85 a (2015~2100 年)	1
年代际气候预测子计划 (DCPP)	同化试验(dcppA-assim)	60 a (1960~2019 年)	10
	回报试验(dcppA-hindcast)	300 a (1960~2019 年, 每次预测 5 a)	10
	预测试验(dcppB-forecast)	5 a (2019 年)	10
全球季风比较子计划 (GMMIP)	大气模式历史试验(amip-hist)	145 a (1870~2014 年)	3
	IPO 和 AMO 试验(hist-resIPO、hist-resAMO)	145 a (1870~2014 年)	3
	青藏高原、东非地形和感热强迫试验 (amip-TIP、amip-TIP-nosh、amip-hld)	36 a (1979~2014 年)	3
	海洋模式比较子计划(OMIP)	310 a (1948~2009 年, 每次预测 5a)	3
情景预测模式比较子计划 (ScenarioMIP)	SSP5-8.5 情景试验	85 a (2015~2100 年)	3
	SSP2-4.5 情景试验	85 a (2015~2100 年)	3
	SSP1-2.6 情景试验	85 a (2015~2100 年)	3
	海冰模式比较子计划(SIMIP)	除 AMIP 外以上所有试验	3

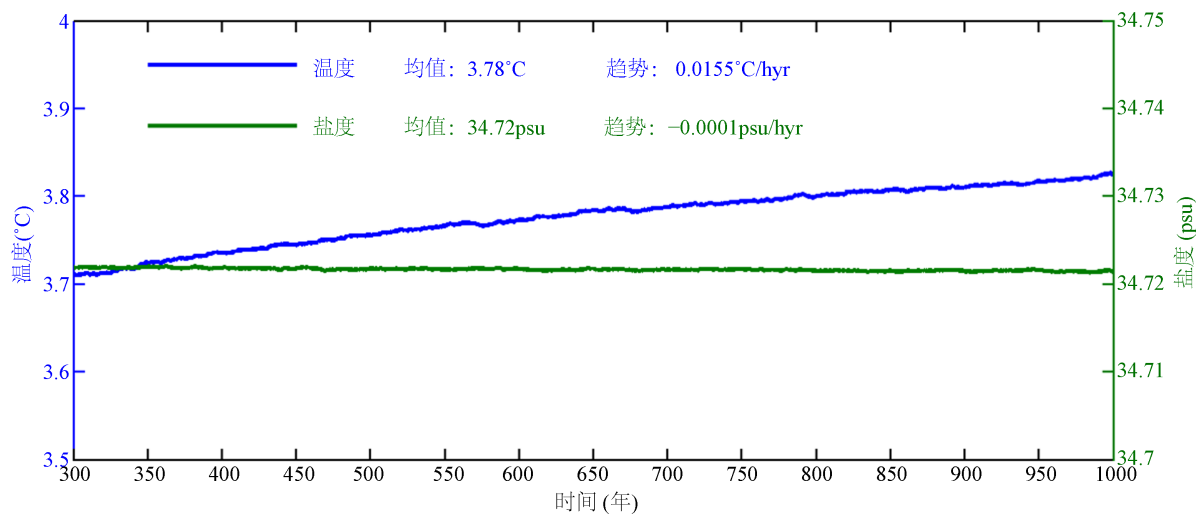


Figure 5. Time series of annual-mean global mean seatemperature (blue line; units: °C) and (b) salinity (green line; units: psu) from 301 to 1000a of piControl experiment carried by FIO-ESM v2.0

图 5. FIO-ESM v2.0 开展的 piControl 试验模拟的 700 年(301~1000 年)全球平均温度(蓝线; 单位: °C)和盐度(绿线; 单位: psu)的时间序列

按照 CMIP6 的要求, FIO-ESM v2.0 的试验结果正在通过地球系统网格联盟(ESGF)网站 <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/> 陆续对外发布中。从 FIO-ESM v2.0 工业革命前控制试验和历史气候模拟试验的初步评估结果来看, 相对于 FIO-ESM v1.0, FIO-ESM v2.0 对热带地区的模拟性能有了较大改进, 特别是多年平均 SST 空间分布、SST 日变化过程、ENSO 周期和振幅等[4], 这可能与新引入的斯托克斯漂流、海浪飞沫和 SST 日变化对海气通量参数化方案的改进有关。这些过程的影响及机制仍进一步需开展系统性研究。

4. 小结与讨论

本文系统介绍了两代耦合海浪的自然资源部第一海洋研究所(原国家海洋局第一海洋研究所)地球系统模式 FIO-ESM 的发展历程和最新的进展。FIO-ESM 的发展表明, 小尺度海浪在大尺度气候系统中能够起到重要的作用, 特别是 FIO-ESM v1.0 参与 CMIP5 之后, 全球海洋中最显著的运动形态之一的海浪在气候系统中的作用受到广泛的关注和重视, 美国大气研究中心在其最新发展并参与 CMIP6 的气候模式 CESM2 中, 已经将海浪模式作为其分量模式之一(<http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm2/>), 我国清华大学等单位联合研发的气候模式 CIESM 中耦合了 MASNUM 海浪模式[51]。

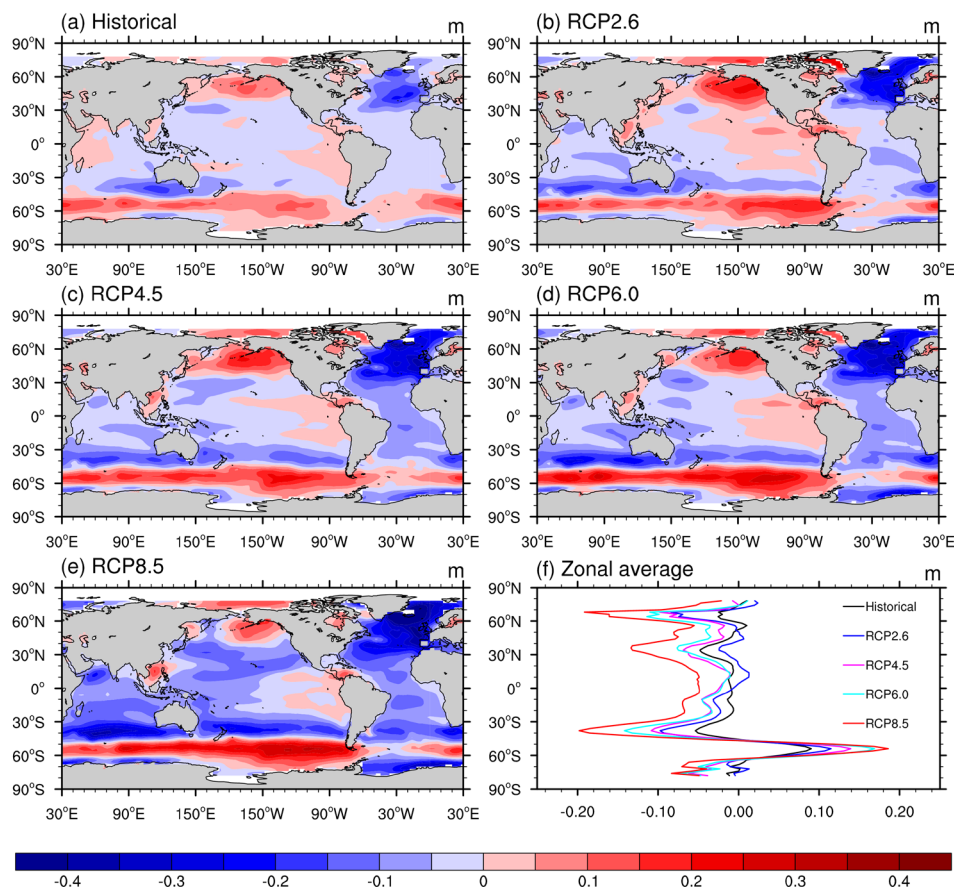


Figure 6. The historical simulation (1986-2005) and future projection (2081-2100) of annual mean significant wave height change relative to Pre-Industry period (1850-1869) simulated by FIO-ESM v1.0 (units: m). (a) Historical simulation; (b) RCP2.6; (c) RCP4.5; (d) RCP6.0; (e) RCP8.5; (f) Zonal mean

图 6. FIO-ESM v1.0 模拟和预测的年平均有效波高变化(相对于 1850~1869 年)(单位: 米)。(a) 历史试验(1986~2005 年); (b) RCP2.6 情景(2081~2100 年); (c) RCP4.5 情景(2081~2100 年); (d) RCP6.0 情景(2081~2100 年); (e) RCP8.5 情景(2081~2100 年); (f) 纬向平均

在全球气候变化背景下,海浪也发生了较为明显的变化(图 6)。自工业革命以来,南大洋西风带地区和北太平洋 40°N 以北地区,波高显著增大;到本世纪末(2100 年),波高可能会继续增大,并且对于温室气体浓度越高的情景,波高增大越多。同时,在气候系统中,海浪不仅能够通过海洋混合、斯托克斯漂和海浪飞沫的海气通量作用对气候系统起到关键作用,它还可以通过海面粗糙度影响大气底摩擦和反照率、通过海浪破碎影响大气边界层气溶胶、通过冰-海-浪相互作用影响海冰分布等。因此,海浪在气候系统中所起到的作用会越来越重要,其作用应受到更大的重视。

半个世纪以来,气候模式从简单的海气耦合模式到当前的地球系统模式,无论是模式分量还是模式包含的过程都变得越来越复杂,这需要地球科学不同学科之间的密切合作;同时,气候模式的水平分辨率从百公里量级已经进入到几十公里量级,这离不开超级计算机和高性能计算技术的支持;并且,气候模式与人类的相互作用也越来越受到重视,气候变化情景已经发展到人文要素情景——共享社会经济路径(SSPs: Shared Socio-Economic Paths),这需要地球科学与社会经济的交叉融合;此外,随着地球科学数据类型和数据量的不断增加,气候模式与机器学习的深度融合也将是未来的一个发展趋势。总的来说,气候模式发展是一项长期的工作,是多领域多学科之间持续性合作与互相促进的结果,也是多学科、多圈层集成研究的重要平台,未来的发展更加离不开进一步的多学科交叉融合。

基金项目

国家重点研发计划——大规模多模式多过程地球系统模式耦合平台研发(2016YFA0602200)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金——地球系统模式 FIO-ESM v2.0 的建立及应用(2016S03)、自然科学基金创新研究群体项目——新型海洋与气候模式的发展(41821004)和青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山人才培养计划——优秀青年学者项目(2017ASTCP-ES04)。

参考文献

- [1] 王斌,周天军,俞永强. 地球系统模式发展展望[J]. 气象学报, 2008, 66(6): 857-869.
- [2] 周天军, 邹立维, 吴波, 金晨曦, 宋丰飞, 陈晓龙, 张丽霞. 我国地球气候系统模式研究进展: CMIP 计划实施 20 年回顾[J]. 气象学报, 2014, 72(5): 892-907.
- [3] Manabe, S. and Bryan, K. (1969) Climate Calculation with a Combined Ocean-Atmosphere Model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **26**, 768-789. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1969\)026<0786:CCWACO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1969)026<0786:CCWACO>2.0.CO;2)
- [4] 宋振亚, 鲍颖, 乔方利. FIO-ESM v2.0 模式及其参与 CMIP6 的方案[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 558-565.
- [5] Hasselmann, K. (1991) Ocean Circulation and Climate Change. *Tellus*, **43**, 82-103. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.1991.t01-2-00008.x>
- [6] Qiao, F., Song, Z., Bao, Y., Shu, Q., Huang, C. and Zhao, W. (2013) Development and Evaluation of an Earth System Model with Surface Gravity Waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **118**, 4514-4524. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20327>
- [7] Qiao, F., Yuan, Y., Yang, Y., Zheng, Q., Xia, C. and Ma, J. (2004) Wave-Induced Mixing in the Upper Ocean: Distribution and Application to a Global Ocean Circulation Model. *Geophysical Research Letters*, **31**, 293-317. <https://doi.org/10.1029/2004GL019824>
- [8] Qiao, F., Yuan, Y., Ezer, T., Xia, C., Yang, Y., Lv, X. and Song, Z. (2010) A Three-Dimensional Surface Wave-Ocean Circulation Coupled Model and Its Initial Testing. *Ocean Dynamics*, **60**, 1339-1335. <https://doi.org/10.1007/s10236-010-0326-y>
- [9] Wang, Y., Qiao, F., Fang, G. and Wei, Z. (2010) Application of Wave-Induced Vertical Mixing to the K Profile Parameterization Scheme. *Journal of Geophysical Research Oceans*, **115**, C09014. <https://doi.org/10.1029/2009JC005856>
- [10] Huang, C., Qiao, F., Song, Z. and Ezer, T. (2011) Improving Simulations of the Upper Ocean by Inclusion of Surface Waves in the Mellor-Yamada Turbulence Scheme. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **116**, C01007. <https://doi.org/10.1029/2010JC006320>
- [11] Shu, Q., Qiao, F., Song, Z., Xia, C. and Yang, Y. (2011) Improvement of MOM4 by Including Surface Wave-Induced

- Vertical Mixing. *Ocean Modelling*, **40**, 42-51. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2011.07.005>
- [12] Song, Z., Qiao, F., Yang, Y. and Yuan, Y. (2007) An Improvement of the Too Cold Tongue in the Tropical Pacific with the Development of an Ocean-Wave-Atmosphere Coupled Numerical Model. *Progress in Natural Science*, **17**, 576-583. <https://doi.org/10.1080/10020070708541038>
- [13] 宋振亚, 乔方利, 赵伟. 波致混合对 CCSM3 气候模式预测能力的改进[J]. 自然科学进展, 2009, 19(2): 203-211.
- [14] Song, Z., Qiao, F. and Wang, C. (2011) The Correctness to Spuriously Simulated Sea Surface Temperature Semi-Annual Cycle in the Equatorial Eastern Pacific. *Science China Earth Science*, **54**, 438-444. <https://doi.org/10.1007/s11430-011-4176-3>
- [15] Song, Z., Qiao, F. and Song, Y. (2012) Response of the Equatorial Basin-Wide SST to Wave Mixing in a Climate Model: An Amendment to Tropical Bias. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **117**, C00J26. <https://doi.org/10.1029/2012JC007931>
- [16] Song, Y., Qiao, F. and Song, Z. (2012) Improved Simulation of the South Asian Summer Monsoon in a Coupled GCM with a More Realistic Ocean Mixed Layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **69**, 1681-1690. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-11-0235.1>
- [17] Huang, C., Qiao, F., Shu, Q. and Song, Z. (2012) Evaluating Austral-Summer Mixed Layer Response to Surface Wave-Induced Mixing in the Southern Ocean—Summer Mixed Layer in the Southern Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **117**, C00J18. <https://doi.org/10.1029/2012JC007892>
- [18] Wunsch, C. and Ferrari, R. (2004) Vertical Mixing, Energy and the General Circulation of the Oceans. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **36**, 281-314. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.050802.122121>
- [19] Collins, W.D., Rasch, P.J., Boville, B.A., Hack, J.J., McCaa, J.R., Williamson, D.L., Briegleb, B.P., Bitz, C.M., Lin, S.-J. and Zhang, M. (2006) The Formulation and Atmospheric Simulation of the Community Atmosphere Model Version 3 (CAM3). *Journal of Climate*, **19**, 2144-2161. <https://doi.org/10.1175/JCLI3760.1>
- [20] Oleson, K.W., Niu, G.-Y., Yang, Z.-L., Lawrence, D.M., Thornton, P.E., Lawrence, P.J., Stockli, R., Dickinson, R.E., Gonan, G.B. and Levis, S. (2007) CLM3.5 Documentation. http://www.cgd.ucar.edu/tss/clm/distribution/clm3.5/CLM3_5_documentation.pdf
- [21] Smith, R., Jones, P., Briegleb, B., *et al.* (2010) The Parallel Ocean Program (POP) Reference Manual, Ocean Component of the Community Climate System Model (CCSM). Technical Report LAUR-10-01853. <http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.0/pop2/doc/sci/POPRefManual.pdf>
- [22] Hunke, E.C. and Lipscomb, W.H. (2008) CICE: The Los Alamos Sea Ice Model. Documentation and Software User's Manual. Version 4.0, Technical Report LA-CC-06-012. https://csdms.colorado.edu/w/images/CICE_documentation_and_software_user's_manual.pdf
- [23] 杨永增, 乔方利, 赵伟, 腾涌, 袁业立. 球坐标系下 MASNUM 海浪数值模式的建立及其应用[J]. 海洋学报, 2005, 27(2): 1-7.
- [24] Doney, S., Lindsay, K., Fung, I. and John, J. (2006) Natural Variability in a Stable, 1000-yr Global Coupled Climate-Carbon Cycle Simulation. *Journal of Climate*, **19**, 3033-3054. <https://doi.org/10.1175/JCLI3783.1>
- [25] Bao, Y., Qiao, F. and Song, Z. (2012) Historical Simulation and Twenty-First Century Prediction of Oceanic CO₂ Sink and pH Change. *Acta Oceanologica Sinica*, **31**, 87-97. <https://doi.org/10.1007/s13131-012-0239-3>
- [26] Taylor, K.E., Stouffer, R.J. and Meehl, G.A. (2012) An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **93**, 485-498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- [27] Song, Z., Liu, H., Wang, C., Zhang, L. and Qiao, F. (2014) Evaluation of the Eastern Equatorial Pacific SST Seasonal Cycle in CMIP5 Models. *Ocean Science*, **10**, 837-843. <https://doi.org/10.5194/os-10-837-2014>
- [28] Shu, Q., Song, Z. and Qiao, F. (2015) Assessment of Sea Ice Simulations in the CMIP5 Models. *The Cryosphere*, **9**, 399-409. <https://doi.org/10.5194/tc-9-399-2015>
- [29] Chen, X., Liao, H., Lei, X., Bao, Y. and Song, Z. (2019) Analysis of ENSO Simulation Biases in FIO-ESM Version 1.0. *Climate Dynamics*, **53**, 6933-6946. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04969-w>
- [30] Song, Y., Qiao, F. and Song, Z. (2013) Water Vapor Transport and Cross-Equatorial Flow over the Asian-Australia Monsoon Region Simulated by CMIP5 Climate Models. *Advances in Atmospheric Science*, **30**, 726-738. <https://doi.org/10.1007/s00376-012-2148-y>
- [31] 刘芸芸, 李维京, 左金清, 胡增臻. CMIP5 模式对西太平洋副热带高压的模拟和预估[J]. 气象学报, 2014, 72(2): 277-290.
- [32] Huang, C., Qiao, F. and Dai, D. (2014) Evaluating CMIP5 Simulations of Mixed Layer Depth during Summer. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **119**, 2568-2582. <https://doi.org/10.1002/2013JC009535>
- [33] Chen, S., Qiao, F., Huang, C. and Song, Z. (2018) Effects of the Non-Breaking Surface Wave-Induced Vertical Mixing

- on Winter Mixed Layer Depth in Subtropical Regions. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **123**, 2934-2944. <https://doi.org/10.1002/2017JC013038>
- [34] Chen, S., Qiao, F., Huang, C. and Song, Z. (2019) Contribution of Surface Wave-Induced Vertical Mixing to Heat Content in Global Upper Ocean. *Journal of Oceanology and Limnology*, 1-7. <https://doi.org/10.1007/s00343-019-9003-2>
- [35] Song, Z., Shu, Q., Bao, Y., Yin, X. and Qiao, F. (2015) The Prediction on the 2015/16 El Nino Event from the Perspective of FIO-ESM. *Acta Oceanologica Sinica*, **34**, 67-71. <https://doi.org/10.1007/s13131-015-0787-4>
- [36] Stokes, G. (1847) On the Theory of Oscillatory Waves. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, **8**, 441-455.
- [37] Zhao, B., Qiao, F., Cavaleri, L., Wang, G., Bertotti, L. and Liu, L. (2017) Sensitivity of Typhoon Modeling to Surface Waves and Rainfall. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **122**, 1702-1723. <https://doi.org/10.1002/2016JC012262>
- [38] Yang, X., Song, Z., Tseng, Y., Qiao, F. and Shu, Q. (2017) Evaluation of Three Temperature Profiles of a Sublayer Scheme to Simulate SST Diurnal Cycle in a Global Ocean General Circulation Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **9**, 1994-2006. <https://doi.org/10.1002/2017MS000927>
- [39] Neale, R., Chen, C., Gettelman, A., *et al.* (2012) Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM5.0), NCAR/TN-486+STR. http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.0/cam/docs/description/cam5_desc.pdf
- [40] Lawrence, D., Oleson, K., Flanner, M., *et al.* (2011) Parameterization Improvements and Functional and Structural Advances in Version 4 of the Community Land. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **3**, M03001. <https://doi.org/10.1029/2011MS00045>
- [41] Branstetter, M. (2001) Development of a Parallel River Transport Algorithm and Applications to Climate Studies. PhD Thesis, University of Texas at Austin, Austin.
- [42] Moore, J.K., Lindsay, K., Doney, S.C., Long, M.C. and Misumi, K. (2013) Marine Ecosystem Dynamics and Biogeochemical Cycling in the Community Earth System Model [CESM1(BGC)]: Comparison of the 1990s with the 2090s under the RCP4.5 and RCP8.5 Scenarios. *Journal of Climate*, **26**, 9291-9312. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00566.1>
- [43] Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., *et al.* (2016) Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) Experimental Design and Organization. *Geoscientific Model Development*, **9**, 1937-1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- [44] 赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. CMIP6 的设计[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(3): 258-260.
- [45] Jones, C., Arora, V., Friedlingstein, P., *et al.* (2016) C4MIP: The Coupled Climate-Carbon Cycle Model Intercomparison Project: Experimental Protocol for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, **9**, 2853-2880. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-2853-2016>
- [46] Boer, G., Smith, D., Cassou, C., *et al.* (2016) The Decadal Climate Prediction Project (DCPP) Contribution to CMIP6. *Geoscientific Model Development*, **9**, 3751-3777. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3751-2016>
- [47] Zhou, T., Turner, A., Kinter, J., *et al.* (2016) GMMIP (v1.0) Contribution to CMIP6: Global Monsoons Model Inter-Comparison Project. *Geoscientific Model Development*, **9**, 3589-3604. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3589-2016>
- [48] Griffies, S., Danabasoglu, G., Durack, P., *et al.* (2016) OMIP Contribution to CMIP6: Experimental and Diagnostic Protocol for the Physical Component of the Ocean Model Intercomparison Project. *Geoscientific Model Development*, **9**, 3231-3296. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3231-2016>
- [49] O'Neill, B., Tebaldi, C., van Vuuren, D., *et al.* (2016) The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, **9**, 3461-3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- [50] Notz, D., Jahn, A., Holland, M., *et al.* (2016) The CMIP6 Sea-Ice Model Intercomparison Project (SIMIP): Understanding Sea Ice through Climate-Model Simulations. *Geoscientific Model Development*, **9**, 3427-3446. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3427-2016>
- [51] 林岩鑫, 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.