

DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2019.033

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

Song Z Y, Bao Y, Qiao F L. Introduction of FIO-ESM v2.0 and its participation plan in CMIP6 experiments [J]. Climate Change Research, 2019, 15 (5): 558-565

## FIO-ESM v2.0 模式及其参与 CMIP6 的方案

宋振亚<sup>1,2</sup>, 鲍颖<sup>1,2</sup>, 乔方利<sup>1,2</sup><sup>1</sup> 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061;<sup>2</sup> 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 / 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 青岛 266237

**摘要:** 目前, 世界气候研究计划 (WCRP) 组织的国际耦合模式比较计划 (CMIP) 已经进入到第六阶段 (CMIP6), CMIP6 试验的开展也已成为国内外地球系统模式工作组的首要工作之一。自然资源部第一海洋研究所地球系统模式 FIO-ESM 是以耦合自主开发的海浪模式为特色的地球系统模式。在参与 CMIP5 的 FIO-ESM v1.0 的基础上, 通过升级分量模式、改进海气通量相关物理过程和提高分辨率等, FIO-ESM v2.0 现已完成研发, 正在开展 CMIP6 科学计划的相关试验。文中围绕 FIO-ESM v2.0 的特色和计划参与 CMIP6 的情况, 介绍了 FIO-ESM v2.0 的模式框架、包含的特色物理过程以及拟参加的 CMIP6 科学计划情况, 以方便气候研究领域的科学家了解和使用。

**关键词:** FIO-ESM; CMIP6; 海浪; 地球系统模式

### 引言

地球气候系统主要由大气圈、水圈、岩石圈、冰雪圈和生物圈组成, 气候变化是上述各个分量各自变化以及它们之间复杂相互作用的结果<sup>[1]</sup>。在最初的海-气耦合模式基础上, 经过半个世纪的发展, 特别是在国际耦合模式比较计划 (CMIP) 的推动下, 地球系统模式得到了极大发展, 已经成为理解气候变化过程, 预测、预估未来气候的核心工具。当前, 地球系统模式发展正朝着更高分辨率、包含更多过程 (物理、生物等) 的方向发展<sup>[2-3]</sup>。

Hasselmann<sup>[4]</sup> 早在 1991 年就提出了包含大气环流、海洋环流、大气化学、海浪、全球碳循环、海洋化学等分量的地球系统模式框架, 但由于传统研究认为小尺度的海浪过程在气候系统中作用微弱, 地球系统模式中一直未考虑海浪的作用。直到 2013 年, 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) 在 Qiao 等<sup>[5]</sup> 提出的非破碎海浪引起的海洋垂向混合 (即浪致混合) 理论上, 率先建立了包含海浪的地球系统模式 FIO-ESM v1.0 (First Institute of Oceanography-Earth System Model version 1.0), 并参与了 CMIP5<sup>[3]</sup>。与传统

收稿日期: 2019-02-11; 修回日期: 2019-03-17

资助项目: 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资金资助项目“束星北青年基金”(2016S03); 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项“中-澳海洋工程研究中心”(2016YFE0101400); 国家自然科学基金委-山东省联合基金项目“海量数据驱动下的高分辨率海洋数值模式关键算法研究”(U1806205); 青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山人才计划优秀青年学者专项 (2017ASTCP-ES04)

作者简介: 宋振亚, 男, 研究员; 乔方利 (通信作者), 男, 研究员, qiaofl@fio.org.cn

的海浪破碎混合不同, 浪致混合作用的影响深度可达百米量级。FIO-ESM v1.0 模式中考虑浪致混合作用后, 海洋上层的温盐结构模拟得到了较大改进, 能够有效缓解当前地球系统模式冷舌模拟过冷、南大洋混合层模拟偏浅等共性问题, 并且对东太平洋海表面温度 (SST)、北极海冰的季节循环、厄尔尼诺和南方涛动 (ENSO)、大气亚澳季风区水汽输送、西太平洋副热带高压、热带季节内振荡 (MJO)、台风潜在生成指数 (GPI) 等现象也表现出了较好的模拟能力<sup>[3,6-14]</sup>。

FIO-ESM v1.0 的模拟结果表明海浪在气候系统中起到了重要的作用。事实上, 海浪对气候系统的影响除浪致混合作用外, 还可以通过多个途径影响气候系统, 如海浪产生的斯托克斯漂以及海浪破碎后的飞沫都可对海气通量产生重要的作用。因此, FIO-ESM v2.0 的发展仍是主要围绕海浪在气候系统中的作用开展工作。文中将主要介绍正在研发的 FIO-ESM v2.0 及其参加 CMIP6 的基本情况。

## 1 FIO-ESM v2.0 模式简介

### 1.1 FIO-ESM v2.0 模式框架

地球系统模式 FIO-ESM v2.0 的模式框架与前一个版本 FIO-ESM v1.0 类似, 都是采用了当前流行的耦合架构, 即通过耦合器实现大气、陆地、海洋、海冰等分量模式之间的相互作用 (图 1), 但由于耦合器由 Coupler 6 变为 Coupler 7, 因此整个模式架构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)。

FIO-ESM v2.0 的各分量模式也有不同的升级和改进, 具体包括: 大气分量模式由美国大气研究中心 (NCAR) 研发的 CAM3 (Community Atmosphere Model version 3) 升级为 CAM5<sup>[15]</sup>, 动力框架由谱元方法变为有限体积法, 水平分辨率随之由 T42 (约  $2.875^\circ \times 2.875^\circ$ ) 提高到 f09 ( $0.9^\circ \times 1.25^\circ$ ), 其中云微物理方案采用的是 MG1.5<sup>[16]</sup>, 气溶胶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; 陆地

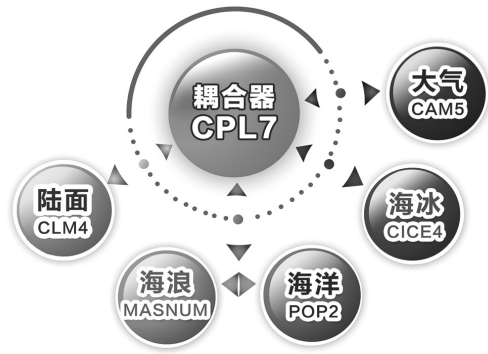


图 1 地球系统模式 FIO-ESM v2.0 框架示意图

Fig. 1 Framework of First Institute of Oceanography-Earth System Model version 2.0 (FIO-ESM v2.0)

分量模式由 NCAR 研发的 CLM3.5 (Community Land Model version 3.5) 升级为 CLM4.0<sup>[17]</sup>, 水平分辨率与大气分量模式一致; 海洋分量模式仍采用洛斯阿拉莫斯实验室 (LANL) 发展的 POP2 (Parallel Ocean Program version 2), 水平分辨率保持不变为  $1.1^\circ \times (0.27^\circ \sim 0.54^\circ)$ , 但垂向分辨率由 40 层加密到 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, 其中主要是海洋上 1000 m 由 22 层增多为 40 层; 海浪模式仍为自然资源部第一海洋研究所自主研发的 MASNUM (MARine Science and Numerical Modeling) 海浪模式<sup>[3]</sup>, 但耦合方式由原来作为分量模式的松耦合方式变为紧耦合的方式, 即作为子程序直接嵌入到海洋分量模式 POP2 中, 采用该方案的主要是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; 海冰模式仍为 LANL 发展的 CICE4 (Los Alamos Sea Ice Model version 4.0), 分辨率与海洋模式相同。FIO-ESM v1.0 和 v2.0 的分量模式版本及分辨率等比较信息见表 1。

### 1.2 FIO-ESM v2.0 的特色物理过程

#### 1.2.1 浪致混合过程

以往对海浪混合的研究主要集中在海浪破碎, 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深达百米的海洋

表 1 FIO-ESM v1.0 与 v2.0 分量模式比较  
Table 1 Components' detail of FIO-ESM v1.0 and v2.0

比较信息		FIO-ESM v1.0	FIO-ESM v2.0
大气	模式名称	CAM3	CAM5
	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, 大气层顶为 2.25 hPa
	耦合频率	24 次/d	48 次/d
陆面	模式名称	CLM3.5	CLM4.0
	分辨率	水平: 与大气一致	水平: 与大气一致
	耦合频率	24 次/d	48 次/d
海洋	模式名称	POP2	POP2
	分辨率	水平: 1.1° × (0.27° ~ 0.54°) 垂向: 40 层 (海洋上 1000 m 分 22 层)	水平: 1.1° × (0.27° ~ 0.54°) 垂向: 61 层 (海洋上 1000 m 分 40 层)
	耦合频率	1 次/d	8 次/d
海冰	模式名称	CICE4	CICE4
	分辨率	水平: 与海洋相同	水平: 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: 与海洋相同
	耦合频率	4 次/d	8 次/d
耦合器		CPL6	CPL7

次表层, 因而小尺度海浪的作用在大尺度海洋环流和气候系统中一直被忽略。Qiao 等<sup>[5-6]</sup>研究发现小尺度海浪在水平方向上与大尺度环流虽相差 4 ~ 5 个量级, 但在垂直方向上非破碎海浪可以影响到百米量级 (波长尺度), 与海洋混合层厚度相当, 创新性地将海浪运动作为叠加在海洋环流上的一种扰动, 利用湍流闭合方程和经典的普朗克混合长理论, 解析推导出非破碎海浪产生湍流混合的表达式, 在国际上率先建立了浪致混合理论。将浪致混合理论引入到海洋环流模式后能够有效解决海洋模式模拟的夏季混合偏浅、SST 偏高这一经典问题<sup>[5-6]</sup>, 随后地球系统模式数值试验和 FIO-ESM v1.0 的模拟结果都表明浪致混合理论能够大幅提高其模拟和预测能力<sup>[3, 6-14]</sup>。

浪致混合系数由 FIO-ESM v2.0 中海洋环流模式中的海浪模块直接计算得到, 然后叠加到海洋环流模式中作为垂向粘性 / 扩散系数的一部分。

## 1.2.2 斯托克斯漂对海气通量作用过程

斯托克斯漂 (Stokes Drift) 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送<sup>[18]</sup>, 其传播方向与海面表层流场分布接近但有所偏移, 其速度最大可超过 20 cm/s。地球系统模式中海气通量计算采用的是块体公式<sup>[19]</sup>, 在其计算动量通量 (风应力)、热量通量 (潜热通量和感热通量) 时海面风速采用的是大气风场与海洋流场的相对速度。而在海气界面上, 斯托克斯漂也是海水流动的一部分。因此, 采用大气风场、海洋流场和斯托克斯漂三者的相对速度作为海面风速在物理上应该更为合理。特别是, 斯托克斯漂的速度可达到海洋表层流速的 1/10, 甚至在某些海域 (如大西洋、北太平洋、西风带等) 超过了海洋表层流速的一半, 其对海气通量的影响不容忽视。斯托克斯漂对海气通量影响方案如下。

为考虑海浪对海气通量的作用, 我们将海气通量计算中的海气界面的速度差  $V$ , 由原来大气表层风场  $V_A$  与海表流速  $V_O$  的差, 即  $V=V_A-V_O$ , 改为  $V=V_A-V_O-V_S$ , 其中  $V_S$  为海浪斯托克斯漂速度。

斯托克斯漂速度直接由 FIO-ESM v2.0 的海洋分量模式中的海浪模块计算得到, 并传输给耦合器, 在耦合器中用于计算海气动量、潜热、感热通量。

### 1.2.3 海浪飞沫对热通量作用过程

海浪破碎伴随产生的飞沫对海气界面上的热量、动量和质量交换有重要影响。由水滴构成的飞沫从海洋进入大气边界层并扩散, 在海面形成水滴蒸发层。在无风或低风速下, 海气界面的热量、水汽交换主要是分子交换, 感热和潜热通量可根据隐式湍流体积通量算法得到。而当风速  $\geq 10$  m/s 时, 飞沫水滴和周围大气环境的微物理过程不容忽视。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。海面飞沫以海水温度进入空气, 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。同时, 小水滴从海洋进入大气, 蒸发吸热带走海洋的热量, 影响潜热通量。特别是在强风情况下, 飞沫对热通量的影响可达到原来的 2 ~ 3 倍。已有研究表明<sup>[20]</sup>, 将飞沫参数化过程引入到区域大气-海浪-海洋环流模式中, 能够有效改进台风强度的模拟。

全物理过程的飞沫通量计算方案较为复杂且计算耗时, 因此我们采用了 Andreas 等<sup>[21]</sup> 在 2008 年提出的一种快速算法, 通过简化算法, 基于有效波高和摩擦速度近似计算飞沫引起的感热通量和潜热通量。FIO-ESM v2.0 的海洋分量模式中的海浪模块计算有效波高并传输至耦合器, 根据以上算法并结合 Kepert<sup>[22]</sup> 得到海浪飞沫引起的潜热和感热, 对模式中已有的潜热和感热通量进行修正。

### 1.2.4 SST 日变化参数化过程

SST 的日变化是由太阳短波辐射引起的周期性变化。已有研究表明, 在地球系统模式中考虑 SST 的日变化, 能够对模式气候平均态、季节内乃

至年代际等长时间尺度过程产生重要作用<sup>[23-25]</sup>。然而, 由于地球系统模式中海洋分量模式垂向网格的原因, 海洋环流模式中对 SST 日变化的直接模拟仍是一个挑战<sup>[26]</sup>。

Yang 等<sup>[26]</sup> 发展了一个 SST 日变化参数化方案, 首先根据海洋块体理查德森数计算出次网格深度, 然后根据海洋模式第一层温度、能量守恒和次网格深度以浅 e 指数衰减的温度廓线的假定, 推导得出海洋表层温度。通过该方案计算出的新的海洋表层温度能够较准确地模拟出 SST 的日变化过程。海洋分量模式根据该 SST 日变化参数化方案计算出新的海洋表层温度, 然后替代原海洋模式的第一层温度发送给耦合器进行通量计算。

## 2 FIO-ESM v2.0 参加 CMIP6 科学计划情况

与前几次 CMIP 科学计划一样, CMIP6 仍沿用世界气候研究计划 (WCRP) 的 7 大科学挑战作为科学背景, 主要关注 3 个广泛的科学问题, 但是为了 CMIP 科学计划长远考虑, CMIP6 试验设计做了重大调整, 分为通用试验 (common experiment) 和 CMIP6 模式比较子计划 (MIPs)<sup>[27-28]</sup>。

通用试验是所有参加的模式组必须做的基础试验, 包括气候诊断、评估和描述试验 (DECK)、历史气候模拟试验 (Historical) 两组基础试验, 用来保持连续性和记录 CMIP6 不同阶段的基本特征。这两组基础试验作为每个模式组加入 CMIP6 的门槛要求, 并且提供其模式的全部结果。DECK 试验由大气模式比较计划 (AMIP)、工业革命前参照试验 (piControl)、CO<sub>2</sub> 浓度每年增加 1% 模拟 (1pctCO<sub>2</sub>) 和 4 倍 CO<sub>2</sub> 浓度突增试验 (abrupt-4xCO<sub>2</sub>) 4 组试验组成。Historical 试验是采用指定的强迫进行工业革命前 (1850 年) 至今 (2014 年) 的模拟。具体内容可参见文献 [27]。

MIPs 是建立在 DECK 和 Historical 试验的基础上, 针对特定的科学问题由各国专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, MIPs 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。MIPs的设计使得CMIP6的模式对比更加开放、灵活和自由,有利于解决目前全球的热点和焦点科学问题。此次CMIP6科学计划中已经确认的MIPs有23个,我们根据感兴趣的科学问题和FIO-ESM的特点,此次将参与6个MIPs,分别是耦合气候碳循环比较计划(C4MIP)<sup>[29]</sup>、年代际气候预测计划(DCPP)<sup>[30]</sup>、全球季风模式比较计划(GMMIP)<sup>[31]</sup>、海洋模式比较计划(OMIP)<sup>[32]</sup>、情景模式比较计划(ScenarioMIP)<sup>[33]</sup>和海冰模式比较计划(SIMIP)<sup>[34]</sup>(表2)。

由于2018年底FIO-ESM v2.0刚刚定版,现正在运行piControl和OMIP试验,因此未给出具

体的模式长期模拟结果。从初步气候平均态模拟结果来看,FIO-ESM v2.0的模拟性能相对于FIO-ESM v1.0有较大改进,特别是在热带地区(图2),这可能与新引入的斯托克斯漂、海浪飞沫和SST日变化过程有关。这些过程的影响及机制仍需开展系统性研究。

另外此次CMIP6更新了多个外强迫数据,特别是大气气溶胶数据,与CMIP5提供的气溶胶浓度数据不同,此次提供的只有排放数据和相对于1850年光学参数的增量数据。由于FIO-ESM v2.0中未包含大气化学模块,无法使用排放数据。因此,在FIO-ESM v2.0开展CMIP6试验时,piControl实验采用了CMIP5给的1850年气溶胶

表2 FIO-ESM v2.0 参加CMIP6 试验列表  
Table 2 CMIP6 experiments carried out by FIO-ESM v2.0

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 1000 a	1
	esm-piControl	控制积分 1000 a	1
	1pctCO2	150 a	3
	abrupt-4xCO2	150 a	3
Historical	Historical	165 a (1850—2014 年)	3
	esm-hist	165 a (1850—2014 年)	1
C4MIP	1pctCO2-bgc	140 a	1
	esm-ssp585	85 a (2015—2100 年)	1
DCPP	dcppA-assim	60 a (1960—2019 年)	10
	dcppA-hindcast	300 a (1960—2019 年)*	10
	dcppB-forecast	5 a (2019 年)	10
GMMIP	amip-hist	145 a (1870—2014 年)	3
	hist-resIPO、hist-resAMO	145 a (1870—2014 年)	3
	amip-TIP、amip-TIP-nosh、amip-hld	36 a (1979—2014 年)	3
OMIP		310 a (1948—2009 年)*	3
ScenarioMIP	SSP5-8.5	85 a (2015—2100 年)	3
	SSP3-7.0	85 a (2015—2100 年)	3
	SSP2-4.5	85 a (2015—2100 年)	3
	SSP1-2.6	85 a (2015—2100 年)	3
SIMIP		除 AMIP 外以上所有试验	3

注: \* 表示每次预测 5 a; SIMIP 只需按要求提交已运行试验的相关数据。

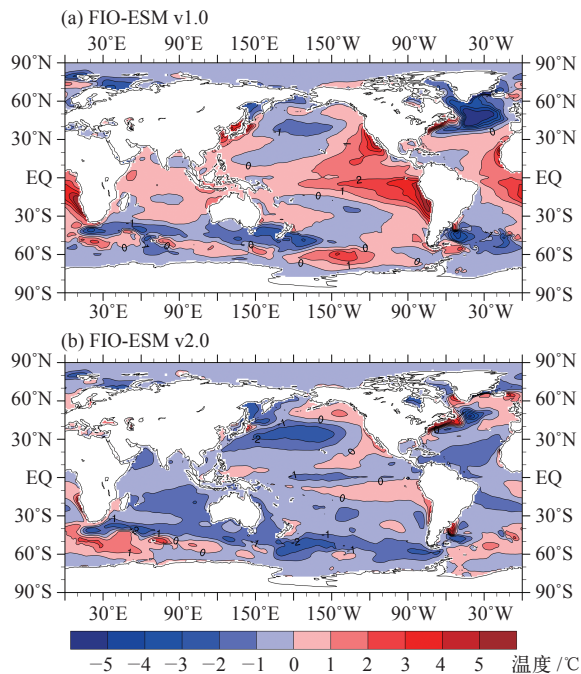


图 2 piControl 试验的多年平均海洋表层温度模拟偏差  
(a) FIO-ESM v1.0, (b) FIO-ESM v2.0

Fig. 2 The multiyear averaged sea surface temperature biases in the piControl experiments (a) FIO-ESM v1.0, (b) FIO-ESM v2.0

浓度数据。历史试验及未来情景预测试验中, 大气气溶胶浓度固定在 1850 年气溶胶浓度, 同时通过读取相应时刻的 CMIP6 气溶胶光学参数数据, 结合 1850 年气溶胶浓度数据计算出光学参数, 进而作为气溶胶的作用应用到历史试验和未来情景预测试验中。CMIP6 提供的光学参数增量, 包括气溶胶光学厚度、不对称因子、单次散射反照率和云滴数浓度 4 个量, 其中前 3 个参数为气溶胶的直接效应, 通过大气模式的辐射模块实现; 云滴数浓度为气溶胶的间接效应, 通过大气模式云微物理模块实现。

### 3 结论与讨论

本文首先系统介绍了自然资源部第一海洋研究所第二代地球系统模式 FIO-ESM v2.0 的基本框架、各模式分量的版本和分辨率等基本信息, 并介绍了 FIO-ESM v2.0 中引入的浪致混合、斯托克斯漂对海气通量作用、海浪飞沫对热通量作用和 SST 日变化等 4 个独特的物理过程。最后给出

了 FIO-ESM v2.0 参与 CMIP6 共同试验和 6 个模式比较子计划的情况, 包括数值试验的积分时段、集合数目等。

已有研究特别是两代 FIO-ESM 的发展表明, 小尺度海浪在气候系统中起到了重要的作用。然而, 海浪的作用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产生重要的影响, 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, 其作用应该受到更大的重视。■

### 参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis: contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 96
- [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. DOI: 10.11676/qxxb2014.083. 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. DOI: 10.11676/qxxb2014.083 (in Chinese)
- [3] Qiao F L, Song Z Y, Bao Y, et al. Development and evaluation of an Earth system model with surface gravity waves [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2013, 118: 4514-4524. DOI: 10.1002/jgrc.20327
- [4] Hasselmann K. Ocean circulation and climate change [J]. Tellus, 1991, 43: 82-103
- [5] Qiao F L, Yuan Y L, Yang Y Z, et al. Wave-induced mixing in the upper ocean: distribution and application to a global ocean circulation model [J]. Geophysical Research Letter, 2004, 31: L11303. DOI: 10.1029/2004GL019824
- [6] Qiao F L, Yuan Y L, Deng J. Wave-turbulence interaction-induced vertical mixing and its effects in ocean and climate models [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2016, 374: 20150201. DOI: 10.1098/rsta.2015.0201
- [7] Huang C J, Qiao F L, Dai D J. Evaluating CMIP5 simulations of mixed layer depth during summer [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119: 2568-2582. DOI: 10.1002/2013JC009535
- [8] Chen S Y, Qiao F L, Huang C J, et al. Effects of the non-breaking

- surface wave-induced vertical mixing on winter mixed layer depth in subtropical regions [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123: 2934-2944. DOI: 10.1002/2017JC013038
- [9] Song Z Y, Liu H L, Wang C Z. Evaluation of the eastern equatorial Pacific SST seasonal cycle in CMIP5 models [J]. *Ocean Science*, 2014, 10: 837-843. DOI: 10.5194/os-10-837-2014
- [10] Shu Q, Song Z, Qiao F. Assessment of sea ice simulations in the CMIP5 models [J]. *The Cryosphere*, 2015, 9: 399-409. DOI: 10.5194/tc-9-399-2015
- [11] Song Z Y, Shu Q, Bao Y. The prediction on the 2015/16 El Niño event from the perspective of FIO-ESM [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 34 (12): 67-71. DOI: 10.1007/s13131-015-0787-4
- [12] Song Y J, Qiao F L, Song Z Y. Water vapor transport and cross-equatorial flow over the Asian-Australia monsoon region simulated by CMIP5 climate models [J]. *Advances in Atmospheric Science*, 2013, 30 (3): 726-738. DOI: 10.1007/s00376-012-2148-y
- [13] 刘芸芸, 李维京, 左金清, 等. 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. DOI: 10.11676/qxxb2014.025. Liu Y Y, Li W J, Zuo J Q, *et al.* Simulations and projections of the western Pacific subtropical high in CMIP5 models [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 72 (2): 277-290. DOI: 10.11676/qxxb2014.025 (in Chinese)
- [14] Zhou T J, Chen X L, Dong Lu, *et al.* Chinese contribution to CMIP5: an overview of five Chinese models' performances [J]. *Journal of Meteorology Research*, 2014, 28 (4): 481-509. DOI: 10.1007/s13351-014-4001-y
- [15] Neale R B, Chen C C, Gettelman A, *et al.* Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM5.0), NCAR/TN-486+STR [R/OL]. 2012 [2019-08-16]. [http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.0/cam/docs/description/cam5\\_desc.pdf](http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.0/cam/docs/description/cam5_desc.pdf)
- [16] Gettelman A, Liu X, Ghan S J, *et al.* Global simulations of ice nucleation and ice super saturation with an improved cloud scheme in the Community Atmosphere Model [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: D18216. DOI: 10.1029/2009jd013797
- [17] Lawrence D M, Oleson K W, Flanner M G, *et al.* Parameterization improvements and functional and structural advances in version 4 of the community land [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2011, 3: M03001. DOI: 10.1029/2011MS00045
- [18] Stokes G G. On the theory of oscillatory waves [J]. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 1847, 8: 441-455
- [19] Large W G, Yeager S G. The global climatology of an interannually varying air-sea flux data set [J]. *Climate Dynamics*, 2009, 33 (2-3): 341-364
- [20] Zhao B, Qiao F L, Cavaleri L. Sensitivity of typhoon modeling to surface waves and rainfall [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122: 1702-1723. DOI: 10.1002/2016JC012262
- [21] Andreas E L, Persson P O G, Hare J E. A bulk turbulent air-sea flux algorithm for high-wind, spray conditions [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2008, 38 (7): 1581-1596. DOI: 10.1175/2007jpo3813.1
- [22] Keperth J D. Comments on "The temperature of evaporating sea spray droplets" [J]. *Journal of Atmospheric Science*, 1996, 53: 1634-1645
- [23] Bernie D J, Guilyardi E, Madec G, *et al.* Impact of resolving the diurnal cycle in an ocean-atmosphere GCM. Part 2: a diurnally coupled CGCM [J]. *Climate Dynamics*, 2008, 31 (7-8): 909-925
- [24] Ham Y, Kug J, Kang I, *et al.* Impact of diurnal atmosphere-ocean coupling on tropical climate simulations using a coupled GCM [J]. *Climate Dynamics*, 2010, 34 (6): 905-917
- [25] Large W G, Caron J M. Diurnal cycling of sea surface temperature, salinity, and current in the CESM coupled climate model [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120: 3711-3729. DOI: 10.1002/2014JC010691
- [26] Yang X D, Song Z Y, Tseng Y H. Evaluation of three temperature profiles of a sublayer scheme to simulate SST diurnal cycle in a global ocean general circulation model [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2017, 9: 1994-2006. DOI: 10.1002/2017MS000927
- [27] 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: 1937-1958. DOI: 10.5194/gmd-9-1937-2016
- [28] 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. DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2016.066. Zhao Z C, Luo Y, Huang J B. Design of CMIP6 [J]. *Climate Change Research*, 2016, 12 (3): 258-260. DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2016.066 (in Chinese)
- [29] Jones C D, Arora V, Friedlingstein P, *et al.* C4MIP: The Coupled Climate-Carbon Cycle Model Intercomparison Project: experimental protocol for CMIP6 [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9: 2853-2880. DOI: 10.5194/gmd-9-2853-2016
- [30] Boer G J, Smith D M, Cassou C, *et al.* The Decadal Climate Prediction Project (DCPP) contribution to CMIP6 [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9: 3751-3777. DOI: 10.5194/gmd-9-3751-2016
- [31] Zhou T J, Turner A G, Kinter J L, *et al.* GMMIP (v1.0) contribution to CMIP6: Global Monsoons Model Inter-comparison Project [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9: 3589-3604. DOI: 10.5194/gmd-9-3589-2016
- [32] Griffies S M, Danabasoglu G, Durack P, *et al.* OMIP contribution to CMIP6: experimental and diagnostic protocol for the physical component of the Ocean Model Intercomparison Project [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9: 3231-3296. DOI: 10.5194/gmd-9-3231-2016
- [33] O'Neill B C, Tebaldi C, van Vuuren D P, *et al.* The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6 [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9: 3461-3482. DOI: 10.5194/gmd-9-3461-2016
- [34] Notz D, Jahn A, Holland M, *et al.* The CMIP6 Sea-Ice Model Intercomparison Project (SIMIP): understanding sea ice through climate-model simulations [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9: 3427-3446. DOI: 10.5194/gmd-9-3427-2016

## Introduction of FIO-ESM v2.0 and its participation plan in CMIP6 experiments

SONG Zhen-Ya<sup>1,2</sup>, BAO Ying<sup>1,2</sup>, QIAO Fang-Li<sup>1,2</sup>

*1 First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 2 Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao)/Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao 266237, China*

**Abstract:** The Coupled Model Intercomparison Programs (CMIP) organized by the World Climate Research Program (WCRP) provides an important platform for the development and assessment of the Earth system model (ESM). At present, CMIP6 is undergoing the experiments, which are the most important tasks of the ESM's development groups. Based on the First Institute of Oceanography-Earth System Model version 1.0 (FIO-ESM v1.0), which is the first ESM coupled with the ocean surface waves and participated CMIP5, FIO-ESM v2.0 has been frozen and carrying out the CMIP6 experiments. This paper introduces the framework of FIO-ESM v2.0, and four distinctive physical processes, which are wave-induced mixing, air-sea flux induced by Stokes drift, heat flux associated with sea spray, and SST diurnal cycle scheme. And the plans of FIO-ESM v2.0 participation in CMIP6 experiments are also introduced.

**Keywords:** FIO-ESM; CMIP6; Ocean surface waves; Earth system model (ESM)