

用于厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)研究的海气耦合模式综述：中间型和混合型模式*

张荣华^{1,2}

(1. 南京信息工程大学海洋科学学院 江苏南京 210044; 2. 崂山实验室 山东青岛 266237)

摘要 厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)是地球气候系统中最强的年际变率信号,起源于热带太平洋海气相互作用过程,并对全球的天气和气候等产生显著的影响。过去几十年来,广泛、深入而细致的海气相互作用研究致力于发展和改进海气耦合模式以用于 ENSO 模拟和预测,各种类型的海气耦合模式应运而生。经过半个多世纪的努力,ENSO 数值模式及其应用已经取得了巨大进展,包括已发展了一些高度理想化的概念(concept)模型来解释 ENSO 准周期性循环(包括正负反馈机制等);同时也已发展了几类复杂程度不同的海气耦合模式并用于对 ENSO 的真实模拟和实时预测等研究,尤其是已能提前 6 个月或更长时间对 ENSO 事件的发生和发展等进行有效的实时预测。其中最为复杂的模式是基于原始方程组的大气环流模式(Atmospheric General Circulation Models, AGCMs)与海洋环流模式(Oceanic General Circulation Models, OGCMs)等所组成的环流型耦合模式(Coupled General Circulation Models, CGCMs),这类模式变量取为完全变量的形式(如总的海表温度场,其可以分解为气候态部分和年际异常部分),还考虑了尽可能详尽的物理过程及其参数化方案。中间型耦合模式(Intermediate Coupled Models, ICMs)是一类介于高度理想化概念模型与复杂的环流型耦合模式之间的简化模式,其对应的控制方程组采用距平形式,直接取大气和海洋年际异常场作为预报变量(如海表温度年际异常),而相应的气候平均态部分则由对应的观测资料来给定;大气与海洋模式间的耦合采用异常耦合(anomaly coupling)。混合型耦合模式(Hybrid Coupled Models, HCMs)是另一类简化的海气耦合模式,其中海洋或大气模式有一个分量模式采用了简化的距平类模式(类似于 ICMs),而另一个分量模式则采用环流型模式(General Circulation Models, GCMs);如可采用统计的大气风应力年际异常模式与 OGCM 间的耦合而构建一种 HCM_{OGCM},也可采用简化的海洋距平类模式(如 ICM 中的海洋分量模式)与 AGCM 间的耦合而构建另一种 HCM^{AGCM}。历史上,ICMs、HCMs 和 CGCMs 等这几类耦合模式都在 ENSO 理论体系的发展、数值模拟和实时预测等方面都起到了重要作用。本文主要回顾作者与合作者所研发的 ICMs 和 HCMs 的构建、特点和应用例子等。

关键词 厄尔尼诺-南方涛动(ENSO); 海气相互作用; 中间型耦合模式; 混合型耦合模式; ENSO 模拟性能

中图分类号 P733.1 doi: 10.11693/hyhz20230600120

* 国家自然科学基金项目, 42030410 号; 崂山实验室科技创新项目, LSKJ202202402 号; 中国科学院战略性先导科技专项, XDB40000000 号; 南京信息工程大学人才启动经费项目。张荣华, 博士生导师, 教授, E-mail: rzhang@nuist.edu.cn

收稿日期: 2023-06-04, 收修改稿日期: 2023-08-31

本文部分内容翻译自作者与合作者在 2020 年发表于英文期刊《Journal of Oceanology and Limnology》(JOL)的论文: ZHANG R-H, YU Y, SONG Z, *et al.*, 2020. A review of progress in coupled ocean-atmosphere model developments for ENSO studies in China [J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 38, 930-961. <https://doi.org/10.1007/s00343-020-0157-8>。该英文论文发表后, 很多读者来信索要相应的中文稿以便于阅读。经与 JOL 编辑部商议并获得授权(RightsLink Printable License, Order Number: 501839968)后, 由本作者翻译成中文, 并做适当更新补充, 在《海洋与湖沼》发表。

厄尔尼诺是指赤道中东太平洋海表温度(sea surface temperature, SST)异常偏暖现象,而南方涛动则是指热带太平洋海平面大气压力场东西方向上跷跷板(see-saw)式的变化,二者合在一起构成了“厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)”的术语,其具有 2~7 年的不规则振荡周期(巢纪平, 2003)。ENSO 作为发生于热带太平洋海气耦合相互作用中最显著的年际气候变化信号及其强迫作用,对全球的天气和气候具有重要的影响(张人禾等, 2003; 王会军等, 2012; 郑飞等, 2016; 张荣华等, 2016)。

过去几十年对 ENSO 广泛而深入的研究已取得重要进展(McCreary *et al.*, 1991; Neelin *et al.*, 1998; Philander, 1999; McPhaden *et al.*, 2006)。在 20 世纪 60 年代之前,厄尔尼诺和南方涛动现象是被分别作为海洋和大气中两个独立的现象来单独研究的。太平洋海表温度和大气海表物理场[如海平面气压(sea level pressure, SLP)等]的基本特征及其变化是基于有限的观测资料来刻画的;到 20 世纪 60 年代末,人们开始认识到厄尔尼诺和南方涛动是热带太平洋大尺度海气相互作用过程中两个密切相关的方面(Bjerknes, 1969),这一认知开启了研究 ENSO 的新纪元,研究方法也从简单的统计分析发展到采用动力诊断方法层面上,开始把这两种现象作为一个耦合的整体来研究,由此提出了热带太平洋海表温度、海表风场和温跃层间相互作用的机制,即所谓的“温跃层反馈”或“Bjerknes 反馈”机制(Bjerknes, 1969; Wyrki, 1975)。在 20 世纪 70、80 年代,开发了高度理想化的概念模型和简化的海气耦合模式以用于 ENSO 过程分析和表征,包括海洋赤道波动(开尔文波和罗斯贝波)动力学理论分析和热带海气相互作用不稳定性理论等(Matsuno, 1966; McWilliams *et al.*, 1978; Schopf *et al.*, 1988; Battisti *et al.*, 1989; Pacanowski *et al.*, 1998)。随着观测资料的不断获取和分析,科学家们已经刻画出经典 ENSO 演变和准周期循环等一些共同特征,如给出了关于 ENSO 从发生、发展、到成熟和最后衰减等整个循环过程(Rasmusson *et al.*, 1982);并且提出了一些基本动力学理论来解释热带太平洋气候系统内部 ENSO 循环的动力过程及正、负反馈机制等,包括延迟振子理论(Suarez *et al.*, 1988; Battisti *et al.*, 1989)、充放电振子理论(Wyrki, 1975; Jin, 1997)、西太平洋振子理论(Weisberg *et al.*, 1997)、以及表层洋流辐合和平流振子理论(Picaut *et al.*, 1997)等。至此,ENSO 现象所蕴含的基本物理过程已相当清晰,已把

对 ENSO 过程和机制的理论认知有效地转化为对海气耦合模式中过程的定量表征和参数化方法,大力促进了 ENSO 数值模式的发展和改进。

海气耦合模式是开展 ENSO 数值模拟和预测等研究强有力的工具。几十年来海气耦合模式的研制和应用已取得了巨大进展,包括 ENSO 数值模拟和对 ENSO 提前半年或更长时间的实时预测等研究。考虑到 ENSO 模拟性能强烈地依赖于模式的动力框架、物理过程参数化和分辨率等因素,已发展了不同类型的耦合模式。目前,根据模式复杂程度的不同,模式可以分为高度理想化的概念模型、简化的中间型耦合模式(Intermediate Coupled Models, ICMs)和混合型耦合模式(Hybrid Coupled Models, HCMs),以及最为复杂的基于原始方程的环流型耦合模式(Coupled General Circulation Models, CGCMs)等(Zhang *et al.*, 2020)。同时,这些 ICMs、HCMs、CGCMs 已经成功地应用于 ENSO 数值模拟(Zebiak *et al.*, 1987; Barnett *et al.*, 1993; Chen *et al.*, 1995; Zhang *et al.*, 2003, 2005b, 2016; Barnston *et al.*, 2012; 张荣华等, 2021)。特别地,观测、过程认知及表征、模式构建及模拟等的综合进展,促成了利用耦合模式对 ENSO 进行实时预测试验的开展,目前国际上已有 20 多个海气耦合模式每月对 ENSO 进行提前 6 个月至 1 年的实时预测,详情请参见美国哥伦比亚大学气候与社会国际研究所(International Research Institute for Climate and Society, IRI)网站: <https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/enso/current/>。总体而言,当前耦合模式也已采用天气预报中广泛采用的观测资料同化技术等来有效改进 ENSO 预测,以提前 6~12 个月开展与 ENSO 相关的热带太平洋 SST 年际异常的有效预测(Chen *et al.*, 1995; Barnston *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2016)。值得指出的是,一系列国际间合作计划的实施更是极大地促进了 ENSO 研究的发展,包括热带海洋和全球大气(Tropical Ocean Global Atmosphere Program, TOGA)计划、气候变率和可预测性(Climate Variability and Predictability, CLIVAR)计划(Wallace *et al.*, 1998)、耦合模式比较计划(Eyring *et al.*, 2016)等。特别地,科学家们已开发了一系列 ENSO 模式,并与观测资料结合起来开展资料同化和 ENSO 实时预测研究(Zheng *et al.*, 2006; Gao *et al.*, 2016, 2018; Tang *et al.*, 2018)。这些基于模式、观测资料和过程认知与表征等的综合性集成研究,为 ENSO 数值模拟和预测等提供了坚实的数理基础,极大地推动了 ENSO 实时预测的发展和

改进。

然而, 随着对 ENSO 认知的逐渐深入和实时预测的广泛开展, 对 ENSO 现象的理解和表征等方面却面临着新的挑战。例如, ENSO 表现出明显的多样性和复杂性(Zhang *et al*, 1998; Yeh *et al*, 2014; Chen *et al*, 2015; Timmermann *et al*, 2018; Xie *et al*, 2018), 一些 ENSO 事件的发展和演变与 Rasmusson 等(1982)所描述的经典 ENSO 类型不同。例如, 在 1982~1983 年, 热带太平洋发生了一次超强厄尔尼诺事件, 这次事件的发展与以往经典的厄尔尼诺事件有着显著的差异, 包括其发生时间以及在赤道太平洋中 SST 异常首先出现的海区及随后的传播方式等; 之后在 1997~1998 年又发生了一次超强厄尔尼诺事件, 其空间结构和时间演变方式等也与 1982~1983 年的强厄尔尼诺有所不同; 同样地, 本世纪发生于 2015~2016 年的一次强厄尔尼诺事件的演变也与 1982~1983 年和 1997~1998 年厄尔尼诺事件的形成过程和增温方式等有明显的不同。例如, 2015 年厄尔尼诺事件的前兆特征包括于 2014 年初发生在赤道中太平洋海区的弱增暖信号(但这一持续性增暖信号却在 2014 年年中变弱而未在 2014 年年末发展成为厄尔尼诺事件); 但随后于 2015 年春季热带太平洋海温迅速升高(即二次变暖), 并在 2015 年年末达到最强(Lian *et al*, 2014; Zhang *et al*, 2016)。又如, 目前热带太平洋正经历着连续 3 年的持续性拉尼娜现象: 2020 年秋冬季发生了一次拉尼娜现象; 随后于 2021 年秋冬季赤道东太平洋海表出现了二次变冷; 2022 年下半年又出现了第三次变冷(Gao *et al*, 2022; Li *et al*, 2022)。目前, 对于这次持续性拉尼娜事件仍缺乏合理的物理解释, 对其实时预测更存在巨大的挑战。最近, 已有研究初步表明, 2023~2024 年热带太平洋将进入厄尔尼诺位相(Lian *et al*, 2023), 并将对全球天气和气候产生广泛的影响。

影响 ENSO 演变的因素很多, 包括热带太平洋气候系统中各种强迫和反馈过程的调制作用, 如热带西太平洋的西风爆发(Chen *et al*, 2015; Lian *et al*, 2023)、淡水通量强迫[freshwater flux, FWF (Zhang *et al*, 2009)]、热带不稳定波[tropical instability waves, TIWs (Zhang, 2014)]、海洋生物引发的加热效应[ocean biology-induced heating, OBH (Zhang, 2015b)]等, 也包括外部因子(如全球变暖等), 以及自然变率与人类活动所导致的气候变化之间的相互作用等。

确实, ENSO 经典理论难以解释这些不同类型 ENSO 事件的发生和演变, 现行的海气耦合模式对

ENSO 多样性的模拟和预测仍有相当的困难(Zhang *et al*, 1998); 目前海气耦合模式对 ENSO 的数值模拟和预测仍然存在很大的偏差和不确定性, 这里以 2014~2015 年热带太平洋海表温度异常预测为例, 更详细地加以说明: 早在 2014 年年初, 赤道中太平洋已出现一个较弱的 SST 暖异常信号, 但它并没有在 2014 年年末发展成为一次厄尔尼诺事件[其基本定义的标准为: 当尼诺 3.4 海区(120°~170°W, 5°S~5°N) 3 个月滑动平均海表温度高于气候平均态 0.5 时, 即进入厄尔尼诺状态; 持续 5 个月以上便形成一次厄尔尼诺事件]; 然而许多海气耦合模式却曾预测会在 2014 年年末出现一次较强的厄尔尼诺事件, 但实际上并未出现。对 2014 年下半年赤道太平洋会发生厄尔尼诺的错误预警, 让气候研究学术界十分的尴尬; 另一方面, 耦合模式对发生在 2015 年的超强 ENSO 事件的实时预测, 也出现严重低估现象, 包括从 2015 年春季至年中所发生的快速增暖过程预测存在严重的低估现象(Zhang *et al*, 2016); 同时, 不同模式从 2015 年年初开始对夏季和秋季该次厄尔尼诺事件的强度预测也具有很大的差异。这些都说明了不同模式对 ENSO 预测存在明显的不确定性。确实, 目前耦合模式在 ENSO 实时预测技巧上有较大的偏差和模式间的差异性。从年代际时间尺度变化的角度来看, ENSO 预测技巧存在明显的年代际变化差异, 如相比于 20 世纪 80 和 90 年代, 21 世纪以来 ENSO 的预测技巧有明显的下降, 这可能反映了 ENSO 本身特性的年代际变化(Chen *et al*, 1995; Zheng *et al*, 2006; Hu *et al*, 2014; Tang *et al*, 2018), 但是对年代际变化相关的具体物理过程的认知还非常有限(Zhang *et al*, 2022)。

总之, 尽管耦合模式一直在不断的发展和改进中, 但当前对 ENSO 有调制作用的多圈层和多尺度具体过程仍未能在模式中有合理的认知和表征, 这为利用海气耦合模式开展 ENSO 多样性模拟及其实时预测等提出了极大的挑战, 需进一步有效改进各类海气耦合模式(包括 ICMs、HCMs 和 CGCMs 等)对 ENSO 的模拟和预测, 其中需要对其所涉及的潜在调制过程及机制进行分析、理解和定量表征, 并进一步把对过程的表征转化为对模式预测性能的改进上, 以有效减小模式模拟的系统性偏差和不确定性。

为及时总结关于 ENSO 模式及模拟等已有成果, 揭示目前所存在的问题与挑战, 为未来改进海气耦合模式及年际气候异常预测等提供科学指导(曾庆存等, 1990; 穆穆等, 2017), 本文简要回顾一些与 ENSO

模式的发展及其数值模拟相关的研究进展。由于目前用于 ENSO 相关研究的模式众多,不能一一详细介绍,这里我们主要介绍我国国内一些相关单位在 ENSO 模式发展方面的相关研究进展,选择性地重点介绍国内几个主要的海气耦合模式及其对 ENSO 模拟性能的评估。很显然,模式对 ENSO 和气候模拟的性能的改进总是在持续发展,包括动力框架的更新、物理过程参数化表征、更高的空间分辨率等方面的进展。值得注意的是,另有其他几篇聚焦于 ENSO 不同方面的回顾性论文,包括 McCreary 等(1991), Neelin 等(1998), Stockdale 等(1998), Philander(1999), Latif 等(1998), Guilyardi 等(2004), Barnston 等(2012), Tang 等(2018), Wang (2018), Timmermann 等(2018), Fang 等(2020), Ren 等(2020), 可供阅读参考。

1 应用于 ENSO 研究的大气、海洋及其耦合模式简介

基于地球流体动力学方程组的数值模式是研究 ENSO 的有效工具(曾庆存, 1979), 由于 ENSO 模拟性能强烈地依赖于模式的动力框架、参数化方案和分辨率等因素, 过去几十年来已开发了复杂程度不同的各类海气耦合模式来系统研究与 ENSO 相关的海气相互作用过程, 这些复杂程度不同的耦合模式在 ENSO 理论体系的建立、数值模拟和实时预测等研究中都起到了重要作用。

其中用于 ENSO 研究中最为复杂的模式是基于原始方程组的大气环流模式(Atmospheric General Circulation Models, AGCMs)与大洋环流模式(Oceanic General Circulation Models, OGCMs)所组成的环流型耦合模式(CGCMs), 这类模式变量取为全变量的形式(如总的海表温度场, 可分解为其气候态部分和年际异常部分), 还考虑了尽可能详尽的物理过程及其参数化方案。同时, 考虑到与 ENSO 相关的海洋和大气变量年际异常的特征, 可对控制大气或海洋状态的复杂方程组进行合理的简化, 这不仅可以提高计算效率, 还具有促使物理过程的显式表征、物理意义的深刻认知和机制的可解释性等优势。

1.1 大气模式

就大气而言, 相应的统计模式和动力模式在 ENSO 研究中都有广泛的应用。其中大气统计模式可用来确定热带太平洋中由 ENSO 引发的大气变量场的年际异常及与海表温度场之间的关系(图 1), 这是因为 ENSO 引发的大气年际异常场(如海表大气风场

和降水异常等)主要反映了其对热带太平洋 SST 年际异常的快速响应(可看成为定常响应), 因而可用统计模式来表征海气耦合模式中较为快速变化的大气分量部分: 基于历史数据利用统计方法来构建海表风场年际异常等对海表温度异常响应的统计模式, 这样可由海表温度年际异常直接计算出相应的大气异常的定常响应; 进一步又反过来对海洋产生反馈, 以表征海气间的相互作用。具体试验结果表明这类统计大气模式对大气年际异常场的表征确实是非常成功的, 可真实地再现观测到的热带太平洋大气风应力年际异常及与海表温度异常间的关系。另一个可采用统计大气模块进行与 ENSO 相关年际异常场表征的原因在于: 目前大气动力模式在模拟与 ENSO 相关的总风场时仍有很大的模式误差, 而其中很大一部分是由气候平均态模拟误差所造成的。考虑到总风场可分成为气候态部分和年际异常部分, 他们是由不同的主导过程所控制的, 大气模式对这两者的表征也可分开考虑。对于气候态部分, 目前即使最为先进的大气模式参数化方案也还不能精确地模拟好海表风场的季节性循环等现象和相应的过程, 如一些对气候平均态维持也起至关重要作用的微物理过程还很难在模式中有较好的定量表征, 特别是目前用 AGCM 对一些热带大气积云对流、云、辐射等细致的微物理过程及其相互作用的表征还相当的困难(Zhu *et al.*, 2017), 使得 AGCM 对总风场模拟仍有很大的模式误差。但假如我们直接构建距平模式, 并把大气风场的气候态平均部分直接从观测资料中来给定, 就可回避气候平均态部分的模拟。对于年际异常部分, 考虑到热带太平洋大气海表风场等年际异常反映了包括微物理过程在内的多尺度过程相互作用的一个宏观效应(即各种过程共同效应所产生的净结果), 可用统计模式来表征相关变量年际异常间的宏观关系, 因而可不必考虑单个具体过程的影响。例如, 海表温度与大气风场年际异常间的宏观关系可利用统计模式来表征(即后者反映了对前者的一个定常响应), 这样就有效地回避包括对流等过程对风场影响等棘手的具体的参数化等问题。基于这些想法, 我们可不考虑具体的细致过程而只注重宏观关系的统计模式, 可利用历史资料来构建大气场年际异常模式, 以表征海气耦合模式中大气年际异常与海表温度异常之间的统计关系。结果表明, 这种统计模式确实可非常真实地再现与 ENSO 相关的大气海表风场年际异常及与对应 SST 年际异常间的宏观关系, 模拟结果表明这种统计方法是非常有效和成功的。

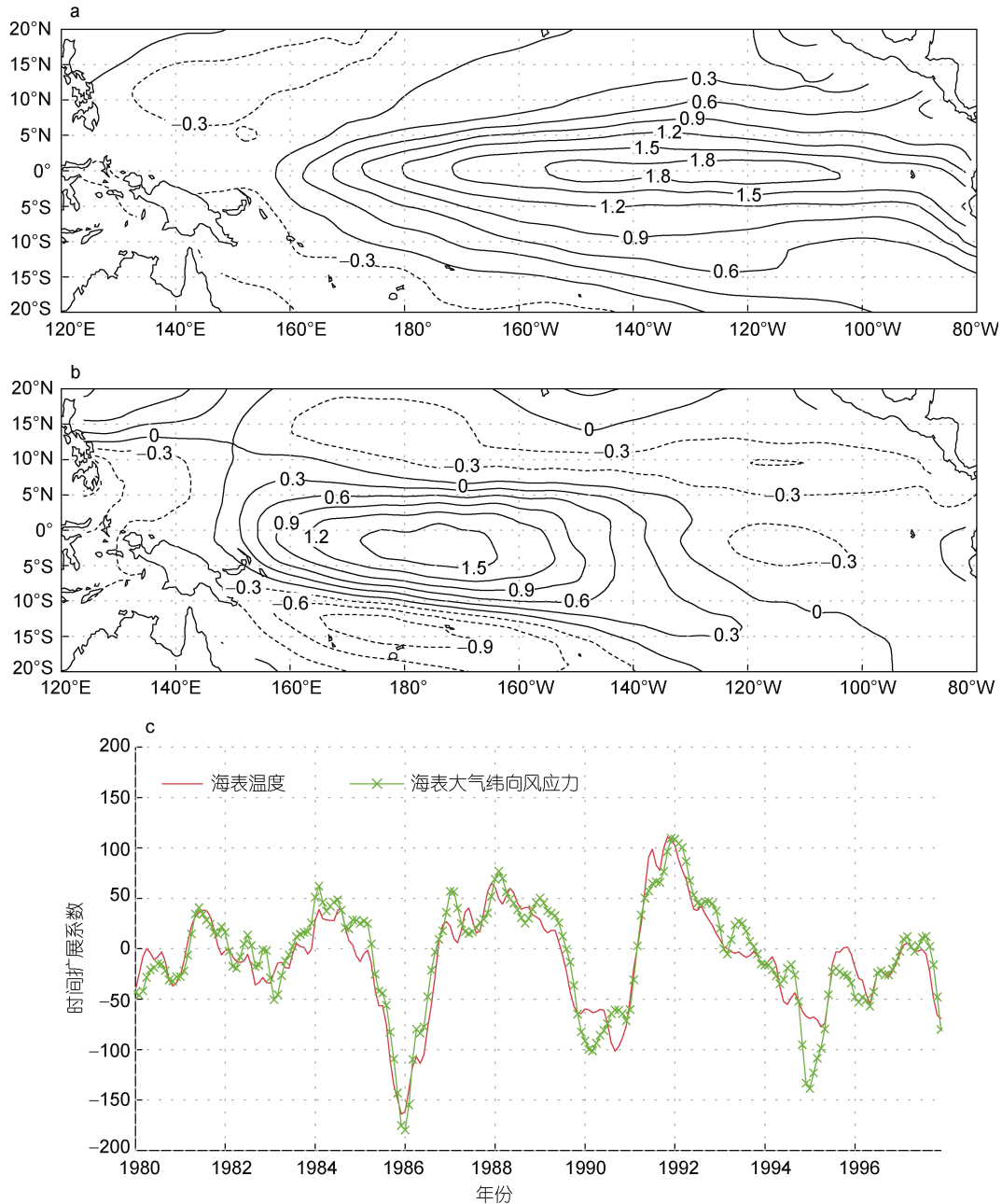


图1 奇异向量分解(singular vector decomposition, SVD)分析得到的关于海表面温度(a)和海表大气纬向风应力(b)异常的第一模态特征向量的空间分布以及 SVD 分析得到的第一模态的时间扩展系数(c)

Fig.1 The spatial patterns of the first singular vector decomposition (SVD) mode derived for SST (a), surface zonal wind stress (b), and the time series associated with the first SVD mode (c)

注: 该结果是利用 1963~1996 年间观测得到的 SST 异常与由 ECHAM4.5 AGCM 模拟得到的大气海表纬向和经向风应力异常两个分量一起进行联合 SVD 分析得到的, 其中 SVD 分析时没有考虑季节变化

在采用大气动力模式用于 ENSO 研究时, AGCM 是基于地球流体动力学原始方程组的模式, 它的运行非常耗时, 并且不同过程都混合在一起, 其影响效果不易区分, 模拟结果缺少可解释性。考虑到热带太平洋与 ENSO 相关的大气年际变率特征, 可对大气动力方程组进行非常合理而有效的简化。例如, 热带大

气动力学研究中经常采用浅水方程来近似, 以表征大气对由 ENSO 所引发的热带太平洋 SST 异常的响应(Gill, 1980)。另外, 考虑到 ENSO 演变中大气异常场响应的垂直结构特征, 可以采用两层近似的垂向分层式动力方程组来真实地描述海表大气风场对 SST 异常场响应的垂向结构, 这样就可以把大气对海

表温度的响应这一复杂的三维问题简化为一个二维问题,进一步用具有代表性的二维浅水方程模式来求解和分析,如已由 Gill (1980)、Zebiak 等(1987)等代表性研究所证实的,基于这些简化模式对 ENSO 相关的大气年际变率等的表征和模拟都非常成功,再现了与 ENSO 演变相关的大气风场响应的基本特征,特别是所得到的海表大气风场年际异常场对 SST 异常的响应、上层海洋对风应力强迫的响应等半解析解的形式,便于数学上的求解和物理上的可解释性。

1.2 海洋模式

就海洋模式而言,由于低频海洋动力过程及调整与 SST 时空演变等对 ENSO 模拟至关重要,需要采用海洋动力模式来表征与 ENSO 相关的过程和机制。类似于大气动力模式中对相关过程的简化和近似,目前同样已构建了不同复杂程度的海洋模式并成功地应用于 ENSO 研究中。海洋模式中最为复杂的是基于原始方程组的 OGCMs,模式变量采用完全变量的形式(如总的 SST 场),其运行非常费时。如 Zhang 等(2002)所描述的,海洋环流模式按其所采用的垂直坐标系的的不同可分为等深面坐标系的海洋模式(即表示为 z -坐标系或简称为 level OGCM)和分层型海洋模式(简称为 layer OGCM)。前者如美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)地球物理流体动力学实验室(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, GFDL)所开发的模块化海洋环流模式[modular ocean model, MOM (Bryan *et al.*, 1975; Pacanowski *et al.*, 1998; Griffies *et al.*, 2004)],这种模式的垂直坐标取在固定的海洋等深度上,其每层的垂直位置(深度)和厚度是固定不变的,模式输出直接得到等深面上的结果(如 50 m)。后者的分层型海洋模式在垂直方向上按一定的要求进行垂向分层,如取等密度面坐标系、地形追随坐标系(Mellor *et al.*, 1982; Zeng *et al.*, 1991; Zhang *et al.*, 1992)、海洋混合层深度追随坐标系[如 Chen 等(1994)],以及不同坐标系间的混合所构成的混合型坐标系等。分层海洋模式的垂直坐标点在垂直方向上是不固定的,其每层的深度和厚度随海洋状态演变是可变的。垂直坐标系决定了海洋模式的基本动力架构,会导致控制方程的复杂程度、过程表征、模式性能和计算效率等的差异性。

由于环流型海洋模式非常复杂,也可对其进行有效的简化近似以用于 ENSO 研究,包括约化重力(reduced gravity)近似、浅水方程近似和线性化近似(Moore *et al.*, 1977)等。例如,考虑到上层海洋对海表

大气风应力响应所具有的明确的垂直结构,也可采用两层近似来简化表征上层海洋动力和热力场对风场响应的垂直结构。特别地,垂向模态分解方法可把热带海洋对大气的响应这样一个复杂的三维空间问题转化为一个二维问题(McCreary, 1981),从而极大地简化了上层海洋对大气风场强迫响应问题的认知和求解,例如,以 Zebiak 等(1987)开发的 ICM [以下简称 ZC87 (Zebiak *et al.*, 1987)]为代表的中间型耦合模式,在仅保留几个垂直模态的条件下就可以真实地再现上层海洋对风应力强迫响应的主要特征(Keenlyside *et al.*, 2002)。值得一提的是,在 ENSO 研究中采用简化的海洋模式不仅可以提高计算效率,还可以更清晰地表征其所涉及的各种物理量之间的关系及相应的过程和机制,便于结果的可解释性。

1.3 海气耦合模式

单独的海洋模式和大气模式可用来进行与 ENSO 相关的数值模拟,如当给定大气强迫场(如海表面风场、热通量和淡水通量等)来驱动海洋模式时,单独的海洋模式可以模拟出与厄尔尼诺和拉尼娜事件,及其位相转变过程中相关的海洋状态及其演变(如 SST 年际异常等)。同样,当给定海洋强迫场(如 SST)来驱动大气模式时,单独的大气模式可再现与南方涛动(Southern Oscillation, SO)相关的表面风场等大气状态及其时空演变。考虑到 ENSO 起源于热带太平洋海气相互作用,表征 ENSO 现象需要采用海气耦合模式。值得指出的是,当海洋模式与大气模式两者耦合时,性能良好的海洋-大气分量模式并不能保证由它们所构成的海气耦合模式能够模拟出 ENSO 循环。换言之,耦合模式的构建及对 ENSO 的模拟能力不仅取决于其单独的海洋或大气分量模式的性能,还取决于对海气相互作用过程的合理表征(包括海表风场、热通量、淡水通量、SST 等强迫场,以及其所引发的响应和反馈过程等)。

影响海气耦合模式对 ENSO 模拟性能的因素很多,包括各种强迫和反馈的强度及年际异常间的位相关系、不同的正负反馈过程等的补偿效应等。实际上,当大气与海洋分量模式耦合时,需要小心调试海洋-大气模式中的耦合部分,需特别关注海洋模式中海洋温跃层影响 SST 的过程和强度、海表海气耦合强度等的表征;要合理平衡影响海表温度年际变化中各种强迫和反馈过程的强度及其相对作用的大小,以得到 SST 的真实模拟,包括其空间结构和时间演变等。同样,大气风场对 SST 响应的表征,也需要有

合理的时空结构, 这样大气与海洋异常场之间具有合理的时空配置, 以确保热带太平洋气候系统中海气相互作用能维持年际振荡式的循环, 产生 2~7 年的 ENSO 现象。

复杂程度不同的海洋和大气模式可以进行组合, 以构建出不同类型的海气耦合模式, 并已广泛地应用于海气相互作用和 ENSO 模拟及预测研究中。根据模式复杂程度的不同, 海气耦合模式可以分为 ICMs、HCMs、CGCMs 等(Zebiak *et al.*, 1987; Latif *et al.*, 1998; Chen *et al.*, 1995; Stockdale *et al.*, 1998; Zhang *et al.*, 2016)。作为基于原始方程所构建的最为复杂的海气耦合模式, CGCMs 是指由 AGCMs 与 OGCMs 组合而形成的环流型耦合模式。相比之下, ICMs 和 HCMs 都是简化模式, 其计算成本较低。例如, 中间型耦合模式中大气和海洋变量都取为距平变量的形式(如海表温度为年际异常), 即只关注年际异常部分; 而相应的气候平均态部分由对应的观测资料给定; 同时, 海气模式间的耦合可采用异常耦合(anomaly coupling)。例如, Zebiak 等(1987)所构建的 ICM 是最早成功用于 ENSO 预测的动力模式(Cane *et al.*, 1985, 1986), 其中大气分量采用 Gill 类型的定常大气动力模块, 而海洋分量采用一个由两层线性化近似所组成的动力模块。又如 Zhang 等(2003)也发展了一个 ICM 用于 ENSO 研究。另外, HCM 也是一类简化的海气耦合模式, 其中海洋或大气分量模式有一个采用了简化的距平模式, 而另一个分量则采用环流型模式。例如, 大气部分可采用统计的大气模块, 其与 OGCM 间耦合而构建一类 HCM_{OGCM} (Zhang, 2015a); 也可采用简化的海洋模块(如 ICM 中的海洋分量模式)与 AGCM 间耦合而构建另一种类型的 HCM^{AGCM} (Hu *et al.*, 2019), 这两类简化的 ICMs 和 HCMs 是本文所要详细阐述的海气耦合模式; 关于 CGCMs 将在另文详述。

显而易见, 所构建的 ICMs、HCMs 和 CGCMs 等用来做 ENSO 研究时各有其优势和劣势, 计算效率是需要考虑的一个方面; 同时还要考虑模式性能和能否以简单而清晰的方式来表征相关的物理过程等。由 OGCM 与 AGCM 耦合而构建的 CGCM, 因包含了尽可能完整的物理过程, 运算非常费时; 两者耦合时容易出现所谓的气候漂移现象(是指耦合模式长时间积分时得到的气候平均态模拟会偏离相应的观测结果, 使得模式对气候平均态的模拟产生系统性偏差, 也导致对 ENSO 相关年际异常模拟的失败)。这其中有一个主要原因在于 CGCM 中变量取为完全变量的形式,

海气之间耦合时采用了完全耦合(full coupling)。这样, 当模式随着时间积分时, 模式平均态模拟会逐渐偏离观测到的气候平均态而产生系统性的偏差(如模拟的 SST 振幅变得很低、变化范围很小等)。而 ICM 和 HCM 中采用了某种近似或简化, 如其中一个模式分量取为距平形式, 相应的模式变量取为距平变量(如其中大气或者海洋的气候平均态是由观测给定的, 故只考虑其年际异常部分作为预报量), 海气耦合时采用异常耦合(即在海气界面进行海气通量交换时, 只使用模拟得到的年际异常部分来计算大气与海洋间的通量场, 而相应的气候平均态部分取值于观测场)。这种处理方式就相当于给海气耦合系统附加了一个约束条件, 在某种程度上限制了变量场的时空演变的自由度, 使得年际异常只能在观测资料给定的气候平均态附近摆动。这样能有效避免气候漂移问题的出现, 使得简化的海气耦合模式(ICMs 和 HCMs)在 ENSO 数值模拟和预测上具有良好的性能, 因而已被广泛应用于 ENSO 研究中。另外, ICM 和 HCM 相对于 CGCM 都有较大的计算优势。由此可见, ICMs 和 HCMs 广泛应用于 ENSO 研究中, 不仅是因为其计算省时高效, 也因为它们适用于对物理过程的显式表征和机理的可解释性等优势, 这已在 Gill (1980)、Zebiak 等(1987)和其他基于 ICM 所开展的关于 ENSO 研究工作中得到充分的验证。但这些简化模式不能给出完全变量场的模拟, 使得模拟结果不够全面, 其中有些简化模式和近似也会影响模拟结果的可应用性和真实性。

过去几十年来, 科研机构 and 业务单位在 ENSO 模式的发展和改进等方面都取得了重要进展, 对推动 ENSO 研究做出了卓越的贡献, 如已成功地发展了多种复杂程度不同的海气耦合模式, 并应用于包括对 ENSO 物理过程的表征和数值模拟之中。结果表明, 这些模式不仅再现了 ENSO 的空间结构和时间演变过程, 也表征了海洋与大气年际异常场间的相互关系; 进一步, 目前性能良好的模式已被广泛应用于分析和评估与 ENSO 相关的各种强迫和反馈机制, 已成功应用于 ENSO 实时预测和相关的气候预测等中。在下面几节中, 我们将详细描述几个已被成功应用于 ENSO 数值模拟和预测的简化海气耦合模式。

2 中间型海气耦合模式(ICM)及其对 ENSO 的数值模拟

中间型海气耦合模式是指一类专门用于 ENSO

模拟和预测的简化模式(Zebiak *et al.*, 1987; Kang *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2003; Song *et al.*, 2018), 由于其复杂程度介于高度理想化的概念模型(conceptual model)与复杂的 CGCMs 之间而被称为中间型耦合模式。更具体地, ICMs 是一类距平模式, 其基本特征是模式变量由距平方程所组成, 即把海洋和大气的年际异常场取为直接的预报变量, 而模式中随季节变化的气候平均场部分则从观测资料中给定。如上所述, 构建和使用这类聚焦与 ENSO 相关的年际异常模拟的中间型海气耦合模式具有明显的优势。例如, 可以只重点考虑对年际异常有重要影响的海气过程, 而不需要专门关注对气候平均态起重要作用的相关过程。这是因为对气候平均态起重要作用的过程(如深海过程、中小尺度过程等)对 ENSO 相关年际异常不一定有直接的动力作用, 这样就不需要在模式中显式地关注其对 ENSO 模拟的影响。同样, 海气界面间耦合时采用异常场之间的异常耦合, 从而避免了对一些复杂而又困难的海气过程参数化的精细化表征, 也避免了气候漂移现象和系统性误差的出现等。

ICMs 一般可以由一个简化的大气模式与一个简化的海洋模式进行耦合来构建, 其中的大气分量可采用动力模式, 如由 Gill (1980)模式所代表的简单的两层近似来表征大气对 SST 异常响应及其垂直结构; 同样地, 大气分量也可采用常用的统计方法, 如经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)和奇异值分解(singular vector decomposition, SVD)方法等, 这是因为考虑到与 ENSO 相关的大气年际异常主要反映了对海表温度年际异常的快速响应, 大气模式可取为简化的定常型模式, 从历史数据中来构建出大气年际异常场对 SST 年际异常响应的统计模式。

对于海洋分量而言, 考虑到海洋动力过程在 ENSO 演变中的重要性, ICMs 应采用简化的动力模式, 以考虑海洋动力过程对 ENSO 时空演变的重要作用。例如, 考虑到热带上层海洋对大气风应力强迫响应的特征, 上层海洋在垂直方向也可以近似取为两层结构, 可由浅水方程模式来定量计算(Gill, 1980), 可从此模式方程中半解析地理解大气对 SST 异常定常响应解的空间结构。同样地, 在 ICMs 框架内, 不需要考虑海洋全水层的热力过程, 而只需关注表层海洋混合层中与 SST 相关的热力和动力过程, 可构建 SST 距平模式来描述其年际变率, 并嵌入到简化的海洋动力模式之中。值得指出的是, 模式的上层海洋动力部分(描述流场和压力)可以取为线性的, 但控制

SST 异常时空演变的距平模式需是非线性的, 以考虑各种非线性平流场的协同作用。

ICMs 中通过海洋与大气年际异常场之间的交换进行异常耦合: SST 距平模式直接产生 SST 异常场来驱动大气模式; 所产生的表层风场年际异常等又反过来作用于海洋(包括海洋环流和温跃层等的变化), 进一步影响 SST。因为温跃层和次表层过程对 SST 具有非常重要的影响, 所以需要在模式中合理表征其作用。在 ICMs 中, 次表层海水上卷到混合层的温度(T_e)是一个显式表征的变量, 可根据温跃层深度的变化[如由海表高度(sea level, SL)表示]来对 T_e 进行参数化(Wyrski, 1975)。下面给出两种 ICM 的具体例子。

2.1 中国科学院海洋研究所(IOCAS)中间型海气耦合模式(IOCAS ICM)

在中国科学院海洋研究所(Institute of Oceanology Chinese, Academy of Sciences, IOCAS), 我们发展和改进了一个 ICM 及其四维变分同化系统[简称为 IOCAS ICM (Zhang *et al.*, 2016)], 并用于对 ENSO 相关的数值模拟研究(张荣华等, 2021)。IOCAS ICM 是由一个中等复杂程度的海洋模式与一个大气风应力异常统计模式所组成(图 2), 其中海洋部分是由 Keenlyside 等 (2002)基于垂向斜压模态分解方法(McCreary, 1981)所开发的一个中等复杂度的海洋动力模式(Intermediate Ocean Model, IOM)。

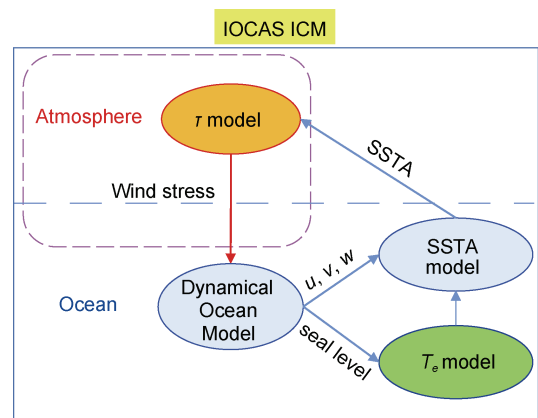


图 2 中国科学院海洋研究所中间型海气耦合模式(IOCAS ICM)的构成框架示意图

Fig.2 Schematic diagrams showing the structures of an intermediate coupled model (ICM) developed and improved at the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences (IOCAS), which is named as IOCAS ICM
注: 该图引自 Zhang 等(2020)的图 1, 包括一个计算大气海表风应力年际异常(τ)的统计模式、一个简化的海洋动力模式、一个海表温度距平(sea surface temperature anomalies, SSTA)模式和一个由海面高度(sea level, SL)计算次表层海水上卷进入混合层温度(T_e)异常的统计模式; u 、 v 、 w 分别为海水纬向、经向和垂向流速

与常用的 ZC87 模式不同, IOCAS ICM 的海洋动力模式(IOM)考虑了观测到的海洋层结的水平可变性;同时也考虑了上层海洋中热力及动力场等复杂的垂直结构(如它在垂向上包含了十个模态)。此外, 该 IOM 中部分地考虑了动量方程中海洋流场的非线性影响, 从而可更真实地刻画出赤道海区的纬向和经向海洋流场; 海洋动力模式的预报变量可采用其全变量和距平变量两种形式, 如在距平形式的模式中, 全变量场可分解为气候态和年际异常场部分, 年际异常场取为模式的直接模拟变量, 而气候平均态部分是由观测或模式本身模拟结果来给定的。海洋动力模式中嵌套了一个由 SST 距平模块所表征的混合层

温度变化方程及相应的热力和动力学过程, 以描述海表温度时空演变。IOCAS ICM 另一显著的特点是采用了次表层海水上卷到混合层温度(T_e)异常的参数化方法, 其中 T_e 是采用反算优化方法分以下几步计算得到的(Zhang *et al*, 2005a): 先由基于 ICM 中的 SST 距平方程反算得到 T_e 场; 然后, 用 SVD 或 EOF 方法构建 T_e 与 SL 年际异常间的经验关系。这样, 当给定 SL 异常时, 就可以算出 T_e 场。IOCAS ICM 经过优化可产生稳定持续的 ENSO 循环(图 3~5)。对 ENSO 预测的试验表明, 其模拟性能是令人满意的。在做实时预测时, 模式直接计算得到相关的年际异常场, 没有进行任何修正等后处理。

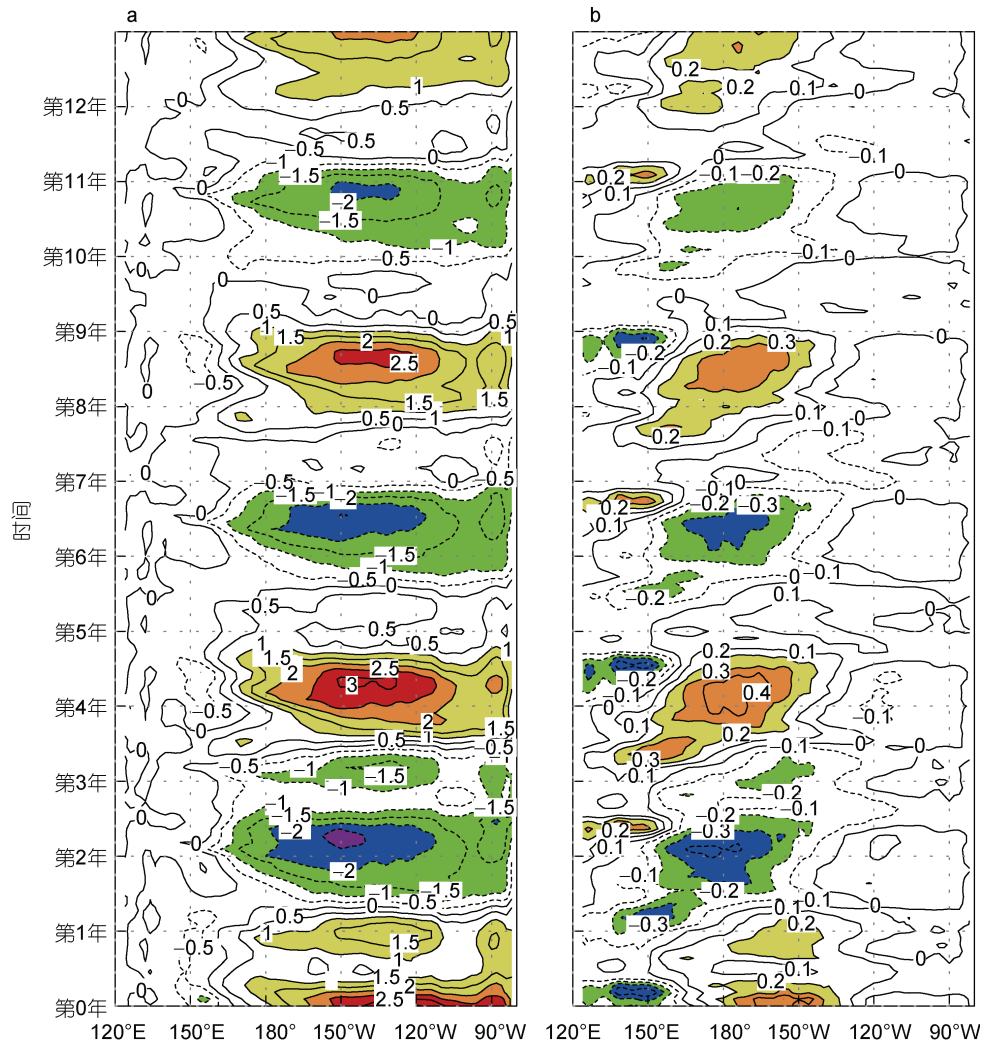


图 3 由 IOCAS ICM 模拟得到的 SST (a)和大气海表纬向风应力(b)年际异常沿赤道的纬圈-时间分布

Fig.3 Interannual anomalies of simulated SST (a) and surface zonal wind stress along the equator (b) from extended integration of the IOCAS ICM.

注: SST 等值线间隔为 0.5°C ; 纬向风应力等值线间隔为 $0.1 \times 10^{-1} \text{ Pa}$; 等值线范围用一定的颜色来更醒目地显示, 例如, 在图 3a 中: 2.5°C 及以上范围用红色表示, 1.0°C 及以上范围用黄色表示; 同样, 在图 3b 中: $0.1 \times 10^{-1} \text{ Pa}$ 及以上范围用黄色表示, 等等

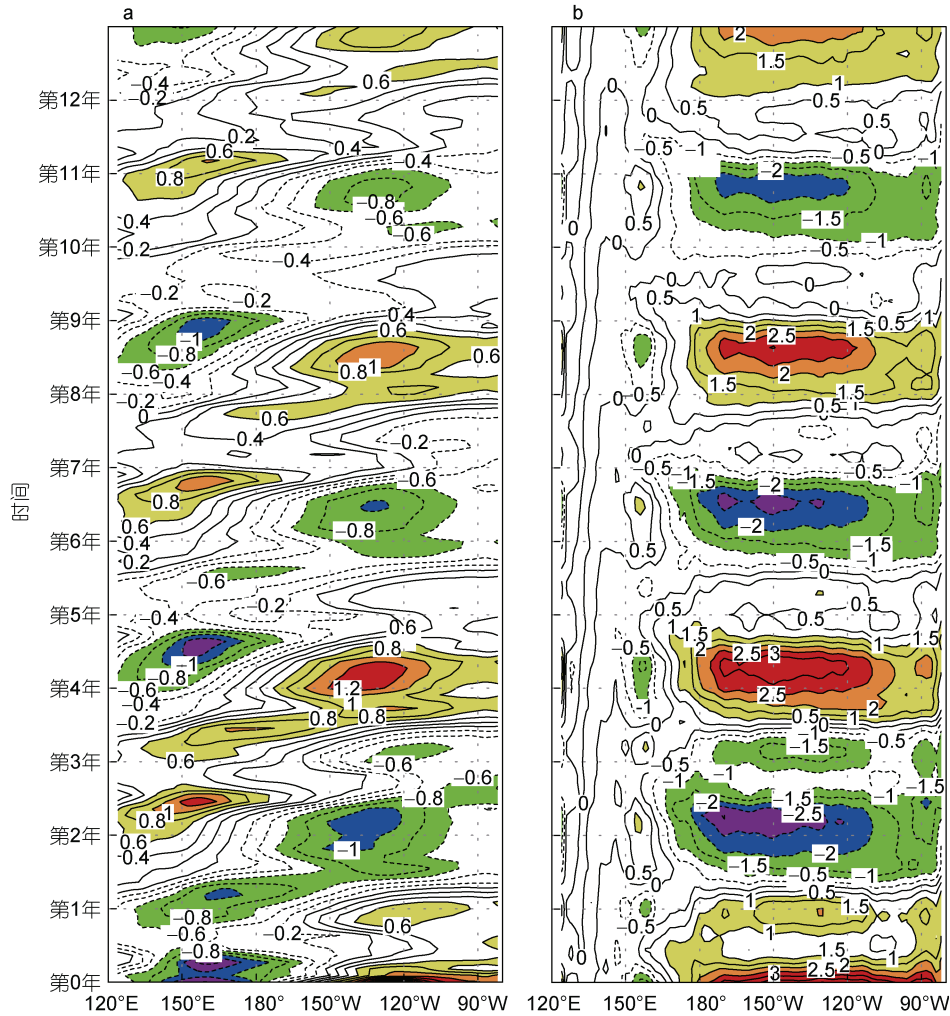


图 4 由 IOCAS ICM 模拟得到的海表压力场(等价于海面高度场) (a)和 T_e (b)年际异常沿赤道的纬圈-时间分布

Fig.4 Interannual anomalies of simulated sea surface pressure (a) and entrainment temperature (b) along the equator from extended integration of the IOCAS ICM

注: 海表压力场等值线间隔为 0.1 cm/s^2 ; T_e 等值线间隔为 $0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$; 等值线范围用一定的颜色来更醒目地显示。例如, 在图 4a 中: 1.2 cm/s^2 及以上范围用红色表示, 0.6 cm/s^2 及以上范围用黄色表示; 同样, 在图 4b 中: $1.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以上范围用黄色表示, 等等

IOCAS ICM 已成功应用于 ENSO 数值模拟和预测研究中。例如, 它是成功预测 2010~2012 年间热带太平洋海表温度二次变冷事件的耦合模式之一 (Zhang *et al.*, 2013)。在对 ENSO 模拟和回报性能进行优化之后, 自 2015 年 8 月起, IOCAS ICM 每月对热带太平洋 SST 年际异常演变进行实时预测, 其结果被收录于 IRI 以作进一步的应用(详情请参见 <https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/ens0/current/>)。图 6 给出了 ENSO 实时预测的例子。这里需指出的是: IOCAS ICM 预测得到的年际异常结果是直接从模式计算得到的, 没有做任何的后处理; 同时, 这里用 IOCAS ICM 做预测时也没有采用复杂的资料同化方法技术。

目前, IOCAS ICM 已广泛应用于 ENSO 相关的数值模拟研究, 如资料同化和可预报性分析等 (Zheng *et al.*, 2006; Gao *et al.*, 2016, 2018; Tao *et al.*, 2018, 2019; Mu *et al.*, 2007)。同时, IOCAS ICM 已为国内单位所广泛使用, 以开展热带太平洋海洋-大气相互作用、ENSO 数值模拟、ENSO 实时预测和可预报性等研究, 包括中国科学院海洋研究所 (IOCAS)、中国科学院大气物理研究所 (Institute of Atmospheric Physics, IAP)、大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (State Key Laboratory of Numerical Modelling for Atmospheric Sciences & Geophysical Fluid Dynamics, LASG)、复旦大学、同济大学、国家海洋环境预报中心、天津大学、南京信息工程大学等, 其中, 我们直接为模式用户提供所有源代码和必要的技术帮助及

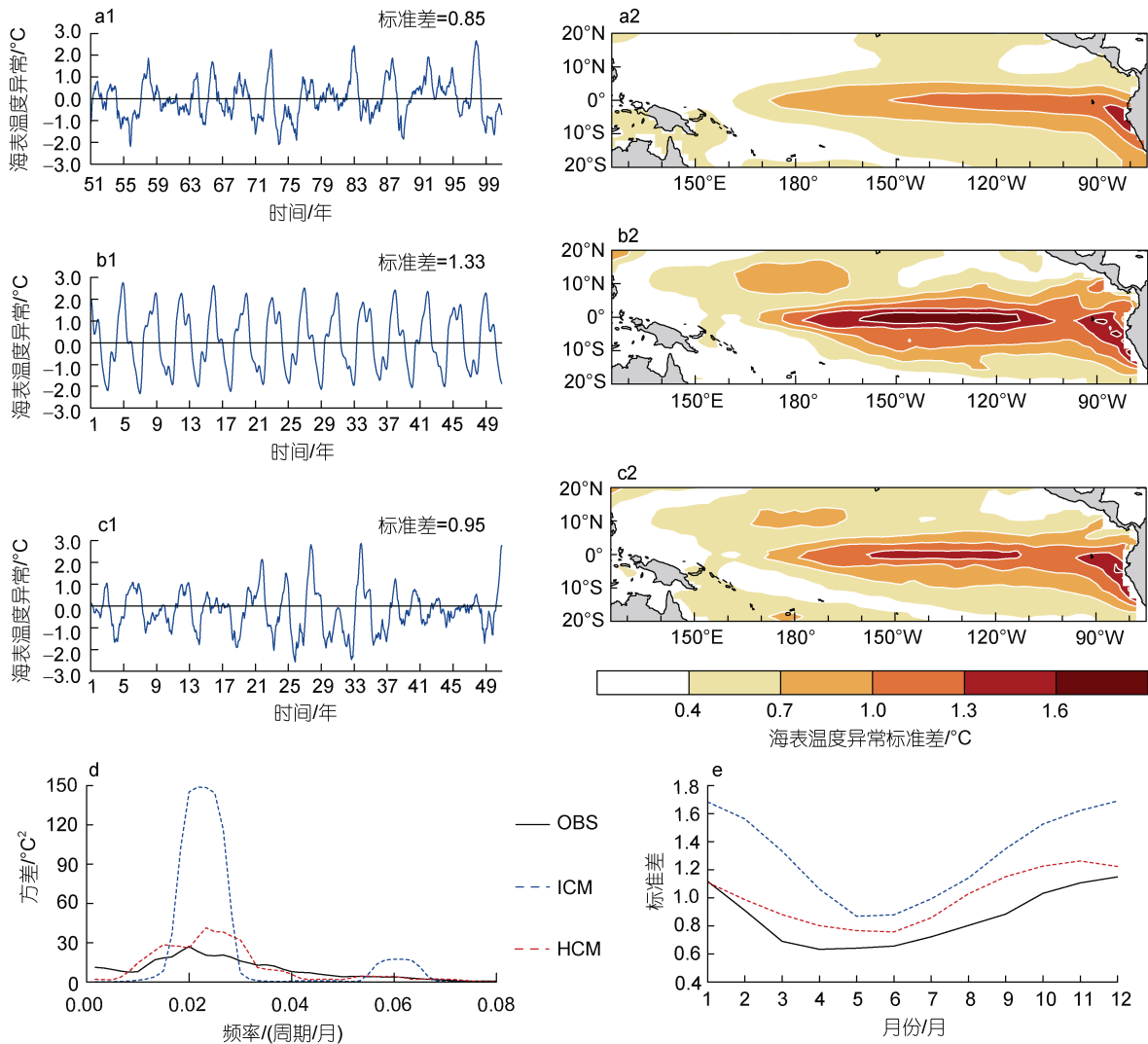


图5 观测(a1)、IOCAS ICM (b1)和HCM^{AGCM} (c1)模拟得到的 Niño 3.4 区 SST 异常的时间序列;对应的 Niño 3.4 区 SST 异常时间序列的功率谱(d); 对应的观测和模式模拟得到的 SST 年际异常标准差的空间分布(a2、 b2 和 c2); 观测和模式模拟得到的标准差随季节的变化(e)

Fig.5 Time series of SST anomalies ($^{\circ}\text{C}$) averaged over the Niño 3.4 region (a1, b1, c1) and horizontal distributions of the standard deviation of SST interannual variability ($^{\circ}\text{C}$) (a2, b2, c2) for observation (a), ICM (b), and HCM (c), respectively. Power spectra of the Niño 3.4 SST index in observation and model simulations (d). Seasonal variations of the standard deviation of the Niño 3.4 SST index ($^{\circ}\text{C}$) as a function of calendar month (e)

注: 海表温度单位为 $^{\circ}\text{C}$; d 和 e 中黑实线为观测结果、蓝虚线和红虚线分别为 ICM 和 HCM^{AGCM} 的模拟结果; 本图根据 Zhang 等(2020)的图 2 改编

支撑; 本文的综述也为使用该模式提供技术指导。有关模式的详细说明和应用例子请参见 2021 年由科学出版社出版的《中间型海洋-大气耦合模式及其 ENSO 模拟和预测》专著(张荣华等, 2021)。

2.2 与美国哥伦比亚大学 Zebiak-Cane 模式的简单比较

美国哥伦比亚大学的 Zebiak 等(1987)最早开发了一个著名的 ICM [ZC87 (Zebiak *et al.*, 1987)], 它是第一个用于 ENSO 预测的动力学模式(Cane *et al.*,

1986), 也是 ENSO 数值模拟领域应用最为广泛的简化动力模式。具体地, ZC87 模式采用了一个两层的线性浅水方程来近似表征热带海气耦合系统, 其中大气部分是基于 Gill (1980)模式的定常动力模式; 海洋部分是基于线性浅水方程的动力模式。同时, 一个非线性的 SST 模式嵌套到海洋动力模式中以表示海洋混合层中各种不同海洋动力过程对 SST 的影响, 其中次表层海水上卷到混合层的温度(T_c)异常场是通过与温跃层变化的解析关系(三角双曲函数)来进行参数

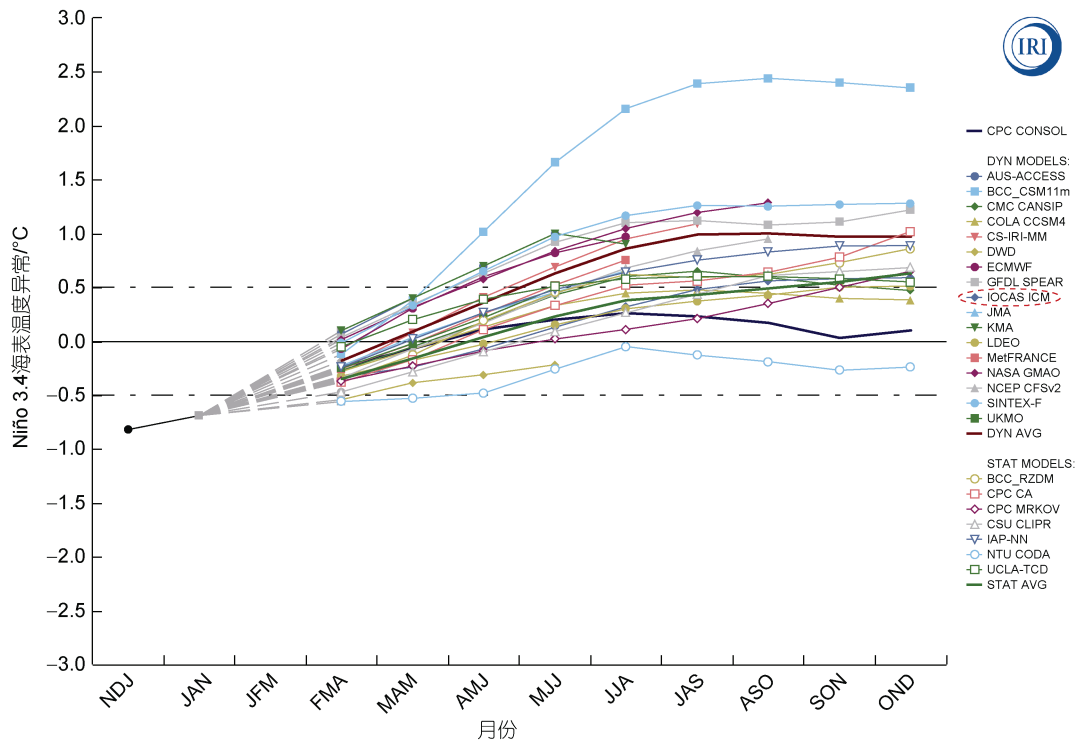


图 6 不同海气耦合模式以 2023 年 2 月作为初始场进行实时预测得到的 2023 年热带太平洋 Niño3.4 区 SST 随时间的分布
Fig.6 The predictions of the Niño3.4 SST anomalies during 2023~2024, which are made from mid-February 2023 as an initial condition using different coupled models, including the IOCAS ICM

注: 纵坐标为 Niño3.4 区(150°~90°W, 5°N~5°S)区域平均的海表温度异常; 横坐标为月份, 如 MJJ 为 May-June-July(5 月-6 月-7 月)的缩写, 其他类推; NDJ 和 JAN 为观测, 用黑线表示; 其他颜色曲线为不同模式预测的结果, 由 IRI 和 CPC 提供, 其中 IRI 是美国哥伦比亚大学的 International Research Institute for Climate and Society (IRI)的缩写, 几十年来一直致力于 ENSO 预测及其相关气候预测分析和应用; CPC 是美国 NOAA 的 Climate Prediction Center 的缩写; 图中给出了目前国际上主要研究和业务机构所发展的模式对 2023 年热带太平洋海表温度的实时预测结果, 其中以中国科学院海洋研究所冠名的中等复杂程度的海气耦合模式(IOCAS ICM)也被收录其中。该图改自美国哥伦比亚大学的 IRI 网站(<https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/ens0/2023-February-quick-look/>)

化的。作为一个距平模式, 它聚焦于对 SST 年际变率有重要影响的主要物理过程, 而随季节变化的 SST 和温度垂向梯度等气候平均态部分是基于观测资料给定的; 海洋与大气间的相互作用是通过异常场的耦合来实现的(即异常耦合), 避免了在 CGCMs 中常见的所谓的气候漂移等问题。正如上面所提到的, 这一 ICM 的动力构架和过程表征是足够的简单以至于其可显式表征一些主要过程, 便于机制的可解释性; 但又是足够的复杂以至于其模拟结果可与观测进行直接比较。如 ZC87 模式成功刻画了与厄尔尼诺相关的 SST 年际变率(Zebiak *et al*, 1987), 因此被广泛应用于 ENSO 研究之中[如 Mu 等(2007)]。不仅如此, ZC87 模式还能被进一步简化成为一类概念型 ENSO 模式(Jin, 1997; Jin *et al*, 1999), 即把 ENSO 相关的控制方程进一步再做最大程度的简化, 从而可得到半

解析形式的解。如其中只保留了海气异常场及其相互作用关系中最主要的特征, 但仍能表征 ENSO 的年际循环。这样所衍生出的概念型模式在 ENSO 动力学理论分析和过程认知中发挥了极大的作用(Jin, 1997; Jin *et al*, 1999), 从而极大地推动了热带海气相互作用动力学的发展。最近, 原始的热带太平洋 ZC87 模式已经被扩展到包含印度洋在内的热带海区, 以考察印度洋的年际变率及其对热带太平洋年际变率的影响和跨洋盆间的相互作用等(Song *et al*, 2018)。

值得指出的是: 历史上, 简化的 ICMs 在 ENSO 理论体系的构建和对 ENSO 成功模拟及预测研究中都起到了非常重要的作用。这种简化模式不仅具有可解释性的优势(如可方便地进行模式调试和过程及机制等的认知研究), 还可进行对 ENSO 的真实模拟和实时预测, 其结果可与观测资料间进行直接对比。当

然, 这类简化的距平模式的适用性也是有限的, 如距平模式本身只考虑年际异常场的计算, 而海洋或大气的气候平均态需要由观测给定。当也需要确定气候平均态时, 应采用更为复杂的海气耦合模式以计算海洋和大气的完全变量场(包括气候平均态和年际变率)。同时, 很多对 ENSO 有调制作用的过程也难以在这类模式中加以考虑, 如大气随机强迫和海洋生物引发的加热效应等(Lian *et al.*, 2014; Zhang, 2015a; Kang *et al.*, 2017a)。因此有必要构建基于 AGCM 或 OGCM 所组成的更为完整而复杂的海气耦合模式, 并对 ENSO 进行全方位的模拟, 如包括气候态等。

3 混合型海气耦合模式(HCM)及其对 ENSO 的数值模拟

海洋-大气混合型耦合模式(HCMs)是一类由 ICMs 中的简化海洋模式或大气模式与环流型模式(General Circulation Model, GCM)所组成的, 其复杂程度介于 ICMs 与 CGCMs 之间(Neelin *et al.*, 1992, 1993; Barnett *et al.*, 1993; Syu *et al.*, 1995; Chang *et al.*, 2001; Tang, 2002; Zhang *et al.*, 2009, 2012; Zhu *et al.*, 2013; Zhang, 2015b)。更具体地, HCMs 中的大气或海洋的一个分量模式采用了以年际异常为直接预报变量的距平模式(即类似于 ICMs 中取大气或海洋年际异常为预报量), 而另一分量模式则采用原始方程组的环流型模式(General Circulation Models, GCMs), 这样构成的海气耦合模式称之为混合型耦合模式。HCMs 根据其大气或海洋模式的组成方式大体可以分为两种: HCM^{AGCM} 和 HCM^{OGCM}。其中, HCM^{AGCM} 为 AGCM 与简化的海洋距平模式进行耦合所构成的, 而 HCM^{OGCM} 为 OGCM 与简化的大气距平模式进行耦合所构成的。HCMs 中大气与海洋也采用异常耦合, 即在计算海气界面之间的海气通量时只考虑模式模拟得到的年际异常场的影响, 而随季节变化的气候态平均场则由观测资料给定。

HCM 与 ICM 具有一些共同的优势。例如, 由于海洋或大气分量模式中直接预报量取为年际异常形式, 计算出的异常场直接用于海气间的异常耦合; 而相应的气候态场则由观测给定, 避免了 CGCM 模拟中经常面临的气候漂移问题。此外, 简化的 HCM 在进行时间积分时具有更高的计算效率, 有利于进行各种敏感性试验, 以考虑自然界中可能出现的各种情景(如考虑不同的海气耦合强度等)。同时, HCM 中海气界面变量场都显式地分离为气候态部分和年际异常场部分, 这样也便于显式分离各种强迫场的作

用。例如, 可用 HCM 研究不同气候态对 ENSO 的调制影响, 也可分析耦合强迫和反馈作用强度等对 ENSO 相关的年际变率的影响。

历史上, HCM 这类耦合模式也都为 ENSO 理论体系的建立、对 ENSO 数值模拟和实时预测的成功实现等做出了重要贡献。目前, 这种简化的 HCM 仍然是热带海气相互作用研究中的强有力的工具, 为认识和表征与海气系统年际和年代际变化及其相关过程的研究提供了一个有效的模拟工具, 包括 HCM 可方便地用来研究热带海区海气相互作用对年际变率和可预报性的影响等。例如, Neelin 等(1992)构建了一个由等深面坐标系的 OGCM(即由美国 NOAA 的 GFDL 开发的 MOM)与一个定常的大气动力模型所组成的 HCM^{OGCM}, 用于研究海气耦合过程对 ENSO 相关的年际变率的影响, 包括海气耦合强度与年际振荡维持方式之间的关系(如在风应力与海表温度场关系中可引入 α_τ 来表示海气耦合强度: $\tau_{\text{inter}} = \alpha_\tau \times \text{SST}_{\text{inter}}$, 其中 τ_{inter} 表示风应力年际异常, α_τ 表示海气耦合强度系数, $\text{SST}_{\text{inter}}$ 表示海表温度年际异常)。另外, 这种模式也是较早用于 ENSO 预测的模式之一[如 Barnett 等(1993)], 其中由 Scripps of Oceanography 所发展的 HCM 目前仍用于 ENSO 的实时预测中(IRI 网站上标注为 SCRIPPS 的模式)。

另外, HCM 也非常适用于气候态年代际变化对 ENSO 调制影响等研究。例如, 利用这类 HCM 可研究风应力和海表温度平均态(τ_{clim} 和 SST_{clim})的改变与海气耦合系统年际变率特征间的关系等敏感性问题, 以考察气候平均态对 ENSO 的调制作用。例如, 在 HCM^{AGCM} 中, 由于 SST_{clim} 是从观测资料中给定, 可以利用 HCM^{OGCM} 考虑气候变化背景下不同 SST_{clim} 场对 ENSO 的调制影响, 即分析 SST_{clim} 的改变会怎样影响 ENSO 特性等敏感性问题。同样, 在 HCM^{OGCM} 中, τ_{clim} 可由观测资料中给定, 可用 HCM^{OGCM} 试验来阐明气候变化背景下不同 τ_{clim} 场对 ENSO 特性的影响, 评估在全球变暖背景下未来气候态风场的改变可能对 ENSO 产生的调制作用等科学问题。

作者及其合作者已经成功构建和改进了两类简化的 HCM^{AGCM} 和 HCM^{OGCM}, 并用于 ENSO 研究, 本节将简要介绍相关的研究成果和应用范例。

3.1 由 AGCM 与 IOCAS ICM 中的简化海洋模式组成的混合型模式(HCM^{AGCM})

由 IOCAS ICM 中简化的中间型海洋距平模式与大气环流模式(AGCM)结合可构建一类混合型海气耦

合模式(HCM^{AGCM})。例如, Zhang 等(2008)用耦合器(coupler)实现了 IOCAS ICM 中海洋模式(图 2)与德国马克斯-普朗克气象研究所开发的第四代欧洲中期天气预报中心大气环流模式 ECHAM4 (Roeckner *et al.*, 2003)二者间的耦合。近来, Hu 等(2019)在未使用耦合器的情况下, 将简化的中间型海洋模式(IOM)与第五代 ECHAM5 的 AGCM 进行直接耦合而构建了一个 HCM^{AGCM} (图 7)。由于海洋分量模式采用了距平形式, 模式中的海洋和大气耦合采用异常耦合(图 7): 先由海洋模式计算出海表温度年际异常(SST_{inter}), 与由观测给定的 SST 气候态场(SST_{clim})结合得到总的 SST 场(SST=SST_{clim}+SST_{inter}), 用于强迫 AGCM 并计算出总的风应力(τ)场, 再计算出相对于 AGCM 气候态的风应力的年际异常场($\tau_{inter} = \tau - \tau_{clim}$), 用于强迫海洋距平模式, 就直接计算出海表温度年际异常; 与给定的气候态 SST 场结合形成总的 SST 场以强迫 AGCM, 得到大气海表风应力场; 重复以上步骤就可以得到海洋-大气相关变量场, 实现对海气耦合系统的数值模拟。

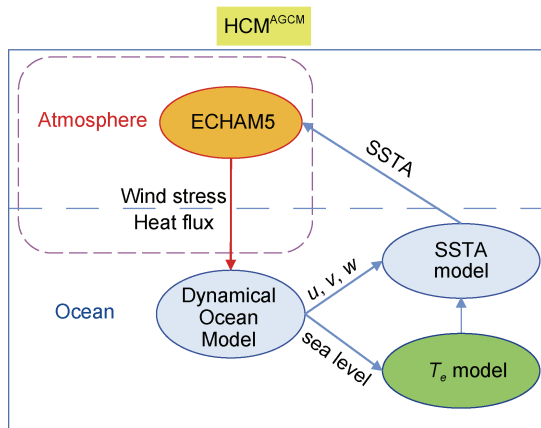


图 7 由 IOCAS ICM 的海洋模式部分与 ECHAM5 AGCM 构成的混合型海气耦合模式(HCM^{AGCM})的框架示意图

Fig. 7 Schematic diagrams showing the structures of the HCM^{AGCM} consisting of the oceanic part of the IOCAS ICM and the atmospheric general circulation model (AGCM) of ECHAM5 注: 该图引自 Zhang 等(2020)的图 1, 其中由大气环流模式(AGCM)计算大气海表风应力和热通量等大气强迫场; 海洋模式取为简化的 IOCAS ICM 的海洋部分, 包括一个简化的海洋动力模式、一个 SST 距平模式和一个由海面高度(sea level, SL)计算 T_s 异常的统计模式; 海洋与大气间采用异常耦合

已利用该 HCM^{AGCM} 进行了超过 1 000 年的长期模拟试验(Hu *et al.*, 2023), 并对模拟得到的热带太平洋 SST 场和 ENSO 事件的性能等进行了评估(图 5 和图 8)。与 IOCAS ICM 相比(图 5), 由于使用了 AGCM 作为耦合模式的大气分量, 考虑了大气随机强迫效

应, 该 HCM^{AGCM} 能模拟出 ENSO 事件的不规则性(图 8) (Hu *et al.*, 2019), 具有 2~5 年的不规则振荡周期(图 5b1 和图 8); 而在 IOCAS ICM 中, 得到约为 4 年的非常有规则的周期振荡(如图 3 和图 5c1 所示)。而且, HCM^{AGCM} 更合理地再现了 ENSO 事件的振幅、演变过程以及 SST 年际异常等的季节锁相特征(图 5e), 也能很好地描述由 SST 异常引发的与 ENSO 相关的全球大气环流年际异常(Hu *et al.*, 2019)。需要指出的是, HCM^{AGCM} 中海洋只包括了热带太平洋区域, 但大气使用了全球 AGCM, 该 HCM^{AGCM} 仍可用于研究热带太平洋 SST 异常对副热带和中纬度地区天气和气候的影响。例如, 该模式可用于研究与 ENSO 相关的全球气候异常的遥相关型分析, 包括太平洋-北美(Pacific and North America, PNA)等重要的大气遥相关型。初步结果表明: 因这些遥相关型主要受热带太平洋海表温度异常的影响, 模式模拟的遥相关型与观测分析结果有着较为相似分布特征; 并且这种 SST 异常对热带外的影响是通过大气 Hadley 环流和遥相关波列来实现的。与观测相比表明, HCM^{AGCM} 模拟得到的赤道中太平洋 SST 变率幅度稍强, 但对 ENSO 相关的大气响应型的模拟与观测结果非常相似。因此, 该区域性 HCM^{AGCM} 不仅可以描述热带太平洋中与 ENSO 相关的海气相互作用过程, 还能再现由 ENSO 引起的全球大气环流的响应, 是研究热带太平洋与 ENSO 相关的海气耦合过程及对全球大气的远程影响的有效工具。

HCM^{AGCM} 相对于 CGCM 具有明显的计算优势; 同时, 由于采用距平形式的海洋模式, HCM^{AGCM} 中使用异常耦合的方式, 从而未出现气候漂移等相关问题。当然, 我们这里所构建的 HCM^{AGCM} 是一个区域模式, 其海洋部分仅考虑了热带太平洋中的海气耦合过程, 不包含热带太平洋外海洋-大气相互作用过程及其影响。这样, 其应用具有一定的局限性。当然, 由于 HCM^{AGCM} 中一些海洋气候态是给定的, 这种设置也限制了 HCM^{AGCM} 的一些应用性。另外, 该模式的海洋变量是距平形式, 不能模拟海洋的总变量, 因而未考虑会通过改变海洋气候态而影响 SST 的相关过程。

3.2 由 OGCM 与大气统计模式组成的混合型海气耦合模式(HCM_{OGCM})

为考虑海洋中复杂的多圈层和多尺度过程及其相互作用, 海洋模式应取为由完全变量的原始方程组所组成的环流型模式(即 OGCMs), 其中应考虑

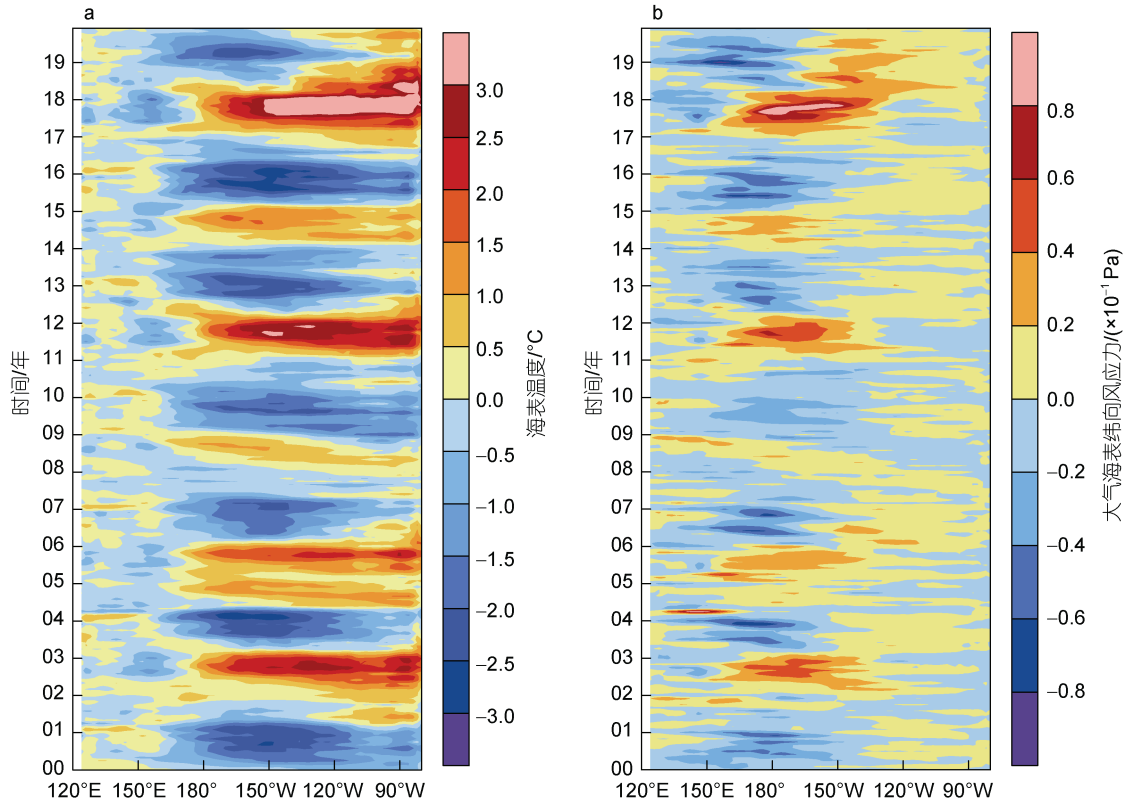


图 8 由 HCM^{AGCM} 模拟得到的 SST (a)和大气海表纬向风应力(b)年际异常沿赤道的纬圈-时间分布

Fig.8 Interannual anomalies of simulated SST (a) and surface zonal wind stress (b) along the equator from extended integration of the HCM^{AGCM}

海洋生物地球化学过程(Wang *et al*, 2005, 2009, 2013); 同时, 考虑到与 ENSO 相关的大气场年际异常主要反映了其对海表温度年际异常的快速定常响应, 大气模式可取为简化的定常响应模式。例如, 可由简化的大气模式与海洋环流模式(OGCM)耦合来构建另一类混合型耦合模式(HCM_{OGCM})。其中简化大气模式可选用 Gill(1980)型的动力模式(Zebiak *et al*, 1987)和大气平均模式(Neelin *et al*, 1987)等; 也可以采用统计大气模式: 即利用 EOF 和 SVD 等方法来构建大气年际异常场对海表温度异常的定常响应(Barnet *et al*, 1993; Chang *et al*, 2001)。例如, 张荣华等早在 20 世纪 90 年代时就构建了基于 IAP OGCM 所组成的混合型海气耦合模式(张荣华等, 1997; 朱杰顺等, 2009)。

同样, Zhang 等(2009)构建了一个由分层型 OGCM (Chen *et al*, 1994; Murtugudde *et al*, 1996)与统计大气模式耦合的混合型海气耦合模式(HCM_{OGCM}; 图 9)。这里, HCM_{OGCM} 中使用由 SVD 方法构建的大气风应力统计模型与 IOCAS ICM 中的完全一样(图 1); 海洋分量是由 Gent 等(1989)发展的海洋环流模式(OGCM): 一个基于约化重力、原始方程组的分层型

海洋模型; Chen 等(1994)进一步把一个块体混合层模式[bulk mixed layer (ML) model (Kraus *et al*, 1967)]嵌入到这一海洋环流模式中, 使得该模式中海洋表层混合层深度(H_m)也是一个显式的预报变量, 直接由块体混合层模式来确定(而不像等深面坐标系海洋环流模式中混合层深度只能是由诊断计算来确定, 即在这类模式模拟中混合层深度只有诊断意义而无动力作用)。进一步, 我们使用的海洋模式的垂直分层采用了与海洋混合层深度相关的 sigma 坐标系: 模型的最上层取为混合层(ML), 其深度是随空间和时间变化的; 混合层下面的分层则根据 sigma 坐标进行垂直划分(每一层与总层厚度之比取为固定的常数)。HCM_{OGCM} 中大气与海洋变量间的耦合采用了异常耦合方式来进行: 由 OGCM 模拟得到总的海表温度场, 计算出相对于气候态 SST (SST_{clim})的年际异常($SST_{inter}=SST-SST_{clim}$), 通过大气统计模型计算出相应的风应力年际异常(τ_{inter}), 将其与观测到的气候态风应力场(τ_{clim})相结合, 得到总风应力场($\tau=\tau_{clim}+\tau_{inter}$)来强迫 OGCM, 得到总的海表温度场, 再减去 SST_{clim} 得到 SST 年际异常又作用于大气, 实现海气间的耦

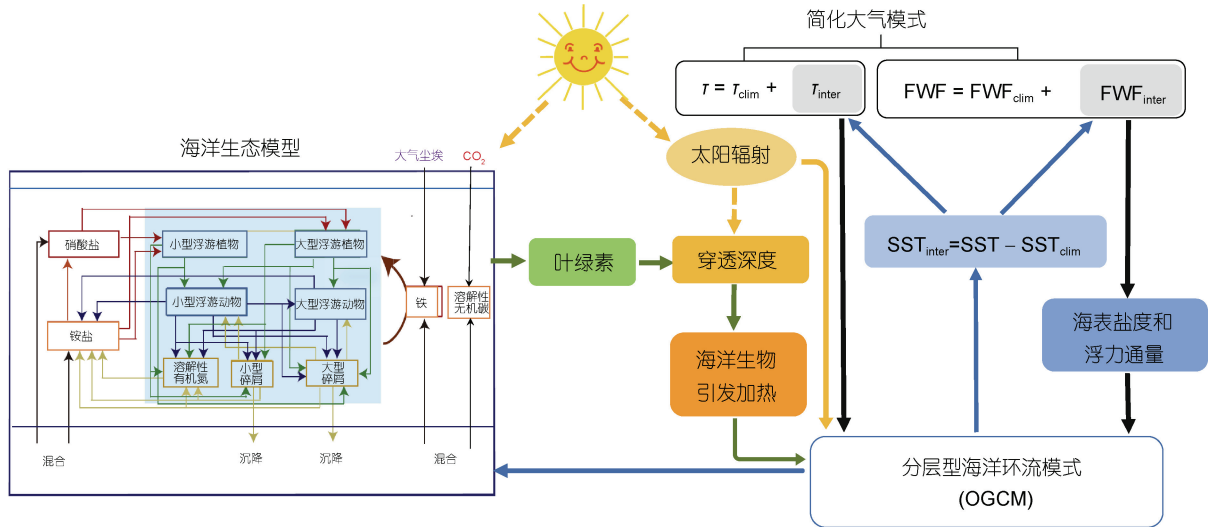


图9 一个由简单大气模式与海洋环流模式(OGCM)和海洋生态模式构成的混合型海气耦合模式(HCM_{OGCM})框架示意图
 Fig.9 A schematic diagram illustrating a hybrid coupled model (HCM_{OGCM}), consisting of a statistical atmospheric model, an oceanic general circulation model, and an ocean biogeochemistry model in the tropical Pacific
 注: 基于 SVD 方法所构建的简化大气模式可用于计算风应力(τ)和淡水通量强迫(freshwater flux, FWF)的年际异常(τ_{inter} 和 FWF_{inter})。海洋物理部分是一个分层型海洋环流模式; 海洋生物地球化学部分为一个简化的海洋生态模式。海洋生态模式用来计算海洋叶绿素(chlorophyll, chl)浓度, 从而可表征海洋生物等对太阳辐射在上层海洋的穿透影响和引发的加热效应(ocean biology-induced heating, OBH)。这样, 该模式表征了热带太平洋大气和海洋物理-生物地球化学过程(AOPB)的混合型耦合模式(HCM AOPB), 利用这一 HCM AOPB 可实现大气与海洋、海洋物理与海洋生态模式等这些不同圈层间的相互作用, 用来研究 FWF 和 OBH 等对 ENSO 单独或联合的调制效应。总的风应力可以分解为 $\tau = \tau_{clim} + \tau_{inter}$ (τ_{clim} 为气候态部分; τ_{inter} 为年际异常部分); 类似地, 总的 FWF 可以分为 $FWF = FWF_{clim} + FWF_{inter}$ (FWF_{clim} 为气候态部分; FWF_{inter} 为年际异常部分)。其中海洋生态模式共有 12 个分量: 包括 6 大生物类型(小型和大型浮游植物、小型和大型浮游动物、小型和大型碎屑)和 6 类营养盐(硝酸盐、铵盐、溶解性无机氮、溶解性有机氮、铁; 其中从 chl 可以估算出穿透深度(penetration depth, H_p)和 OBH, 作为海洋生态过程与海洋物理过程之间的接口, 实现气候与海洋生物地球化学过程间的相互作用。在这个简化的混合型海气耦合模式中, SST_{clim} 和 FWF_{clim} 等是由观测给定的季节可变的气候态场, τ_{inter} 和 FWF_{inter} 则由相应的大气统计模式得到, chl 场由生态模式计算得到。本图根据 Zhang 等(2020)的图 4 改编

合。相对于 CGCM, HCM_{OGCM} 也具有明显的计算优势; 同时, 由于使用异常耦合, 风应力气候态场(τ_{clim})是由观测给定的, 该模式不存在气候漂移等问题。但由于 HCM_{OGCM} 中异常耦合中气候场(例如 τ_{clim} 等)是从观测给定的, 使得模式演变是在观测到的气候态约束下进行的, 相应的年际异常不会太偏离观测到的气候态, 这会限制耦合系统的自由度, 使得模拟所得的 ENSO 会缺少不规则性和多样性等问题。

这类 HCM_{OGCM} 也得到了广泛的应用。例如, Zhang 等(2018)在早期 HCM_{OGCM} 的基础上构建了一个热带太平洋区域 HCM_{OGCM} 来表征热带太平洋大气、物理海洋和海洋生物地球化学过程之间的相互作用。如图 9 所示, HCM_{OGCM} 的大气部分用一个统计的定常模式来表征大气海表风应力和淡水通量等年际异常对 SST 异常的响应, 海洋部分中考虑了海洋环流和海洋生态过程, 可显式表征 OBH, 以实现热带太平洋海洋生态系统与气候系统间的耦合。这样形成的 HCM AOPB 是研究多圈层和多尺度过程相互作用

的一个有效工具, 可进行包括海洋生物引发的加热效应、TIWs 引发的风场反馈、淡水通量引发的强迫作用和盐度效应(Zhang *et al*, 2012)、热带气旋引发的强迫作用等相关过程的研究。这些过程在 HCM 中可以单独或综合考虑, 以考察各种不同过程的单独或合成作用, 可分清各种多圈层和多尺度过程的不同影响等。

例如, 由于 HCM_{OGCM} 中包含了海洋生态系统模式, 可用来研究海洋中复杂的多圈层和多尺度过程及其相互作用。我们已利用该模式进行了多种数值试验来研究海洋生物过程引发的加热效应及其对 ENSO 的调制作用, 包括通过海洋叶绿素影响上层海洋短波辐射穿透度的相关调制机制、不同反馈强度下海洋生物加热效应对 ENSO 的影响等。图 10 给出了利用 HCM_{OGCM} 模拟得到的海洋-大气年际异常的例子(Tian *et al*, 2018; Zhang *et al*, 2018)。

值得指出的是, 包含海洋生态系统的 HCM_{OGCM} 模拟得到的 ENSO 分布特征较为规则, 这是因为该

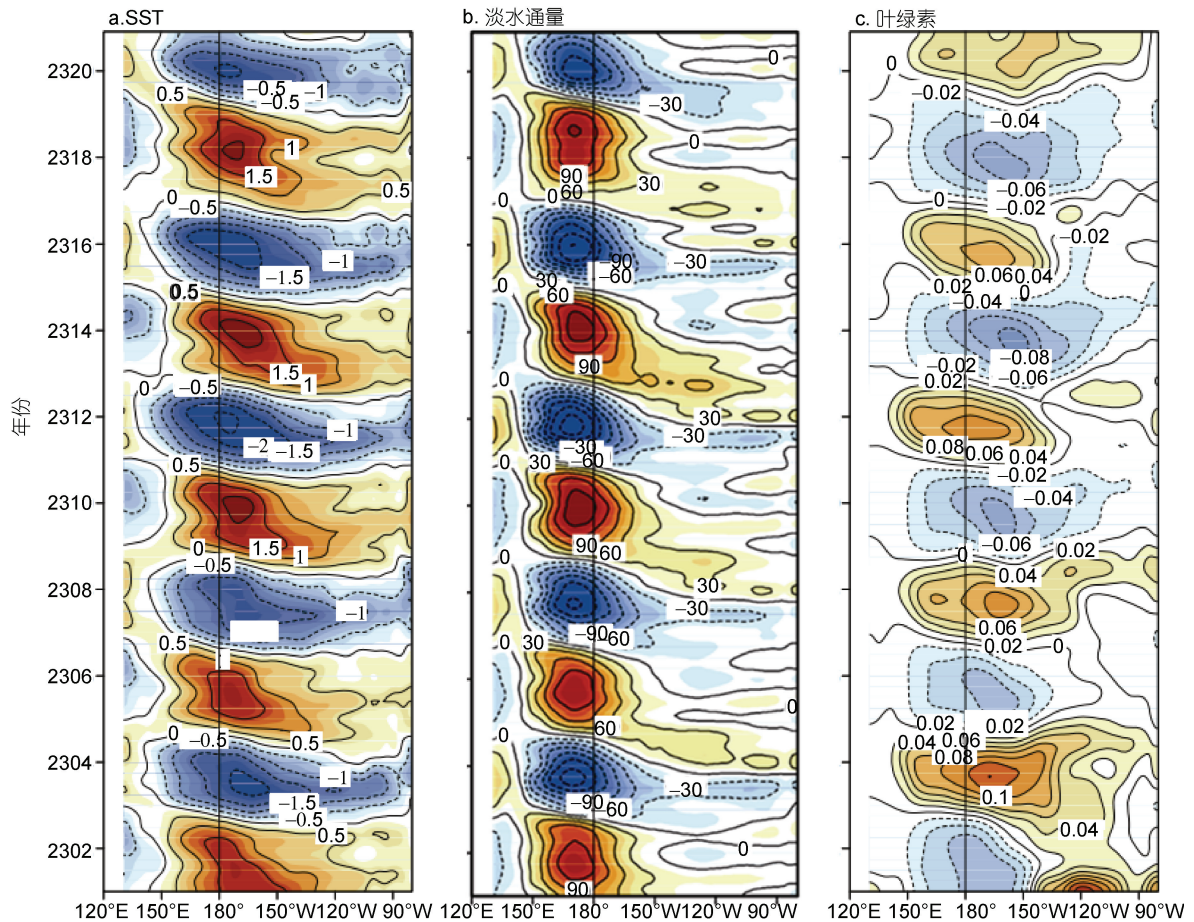


图 10 由 HCM_{OGCM} 模拟得到的 SST (a), 海气界面淡水通量(b)和海表叶绿素(c)年际异常沿赤道的纬圈-时间分布
Fig.10 Longitude-time sections along the equator for interannual anomalies of SST (a), fresh water flux (b), and ocean chl (c) simulated from the HCM_{OGCM}

注: 该图改自 Zhang 等(2020)的图 5; 海表温度等值线间隔为 0.5 °C; 淡水通量定义为降水(P)与蒸发(E)之差, 其中净淡水通量进入海洋表面时定义为正, 其等值线间隔为 30 mm/月; 叶绿素等值线间隔为 0.02 mg/m³

HCM_{OGCM} 采用了统计的大气模型而未考虑风场的随机强迫作用, 模式中的风应力年际异常仅考虑其对 SST 年际异常的定常响应, 没有显式考虑大气动力学过程及相关随机强迫的直接影响(如 AGCM); 因我们所发展的 HCM_{OGCM} 是一个热带太平洋的区域模式, 模式仅在热带太平洋海区有活跃的海气相互作用, 不能考虑大气中的遥相关过程。这样, HCM_{OGCM} 就难以表征热带太平洋 SST 变率对全球大气的遥影响。未来需将这一海洋模式与全球 AGCM 进行耦合, 以考虑大气随机强迫、完全的大气动力学过程和大气中的遥相关等过程。

3.3 由等深面坐标系和分层型 OGCM 组成的 HCM 间的差别及动力影响

目前基于不同垂直坐标系的 OGCM 得到广泛的应用, 包括构建不同的海气耦合模式。值得指出的是,

我们基于分层型海洋模式所构建的 HCM_{OGCM} 具有明显的特色和优势。从海洋模式本身而言, 我们这里构建的 HCM_{OGCM}, 相比于其他基于等深面坐标系的海洋模式[如 Neelin 等(1992), Tang (2002)]有明显的差别。首先, 在这种分层型 OGCM 中, 模式第一层取为混合层, 其深度也作为模式的显式预报变量, 其倾向可由显式考虑了海洋混合层动力和热力过程的预报方程来直接计算得到[即通过块体混合层模式来直接确定(Kraus *et al*, 1967)]; 而在等深面坐标系的海洋模式中, 混合层深度只能是由诊断计算间接得到(即其本身不是一个预报量)。进一步, 在海气相互作用表征方面, 我们所构建的分层型海洋模式中, 大气强迫场影响上层海洋的方式与等深面坐标系的海洋模式有显著的不同(Zhang *et al*, 2002)。例如, 在显示表征混合层深度的分层型海洋模式中, 因大气强迫场对

海洋混合层深度也可产生直接影响,可通过两种路径来影响海洋:其一是大气风应力、海表热通量和淡水通量分别通过对应的动量方程、海表温度方程和盐度方程实现大气对海洋的强迫作用;其二是风应力和浮力通量(Q_B ; 热通量和 FWF 间的组合)还可通过对混合层深度的作用而对海洋产生影响。然而,后者这条影响路径在基于等深面坐标系的海洋模式(如 MOM)中是不存在的。显而易见,因等深面坐标系的海洋模式中大气对海洋的影响只存在第一条影响路径,而没有显式考虑风应力和 Q_B 对海洋混合层深度产生影响的第二条影响路径。相关研究指出,这种表征上的差别会直接影响模拟结果,导致模式模拟结果的差异(Kang *et al.*, 2017b; Gao *et al.*, 2020)。由于 Q_B 也可通过影响混合层深度而在海气相互作用中起到重要的作用,因此在海气耦合模式中应合理考虑两种不同的影响方式。

我们所构建的 HCM_{OGCM} 的另一特色是考虑了太平洋气候系统与海洋生态系统间的相互作用:即在 OGCM 中引入了海洋生态系统模式,实现了海洋生态系统与气候系统间的耦合。该模式作为一个简单的地球系统模式可用于多圈层和多尺度过程及其相互作用等研究。

4 总结和讨论

ENSO 现象是海气系统中最强的年际变率,是地球气候系统中最具可预报性的年际信号。ENSO 起源于热带太平洋海洋-大气间的相互作用过程,同时也受地球系统中多圈层、多尺度和跨海盆等过程的调制影响。学者们对 ENSO 进行了广泛而深入的研究,包括观测分析、过程认知和表征、模式构建及数值模拟和实时预测等。近半个多世纪以来,ENSO 相关研究从现象发现、物理过程认知、模式构建、到实时预测等都取得了巨大进展,特别是基于数值模式开展对 ENSO 季节到年际尺度的实时预测等都取得了令人鼓舞的成功,是 20 世纪地球科学理论研究和实际应用中最为成功的案例之一(McPhaden *et al.*, 2006)。对 ENSO 研究所取得的巨大进展可以归因于诸多因素,包括构建了对热带太平洋海气耦合系统进行实时监测的现场和卫星观测系统、相关的国际合作计划的开展[如 TOGA、国际海洋观测系统(Global Ocean Observation System, GOOS)、地转海洋学实时观测阵(Array for Real-time Geostrophic Oceanography, Argo)等]。此外,对 ENSO 相关物理过程和机制的充分理

解,已有效地转化为对其定量的表征和模式构建之中,由此研发和改进了各类复杂程度不同的海气耦合模式;同时,观测与模式相结合的资料同化技术的发展和应用等也极大地推动了 ENSO 及相关气候异常实时预测的重要进展。

作为 ENSO 研究的最有效工具之一,海气耦合模式具有可重复性、可调试性等独特优势,利用海气耦合模式不仅可以实现对过去和现在状态的模拟,而且还能开展对未来变化的预报、预测和预估等,是其他观测和理论分析等研究方法所难以做到的。过去几十年间在研发 ENSO 模式和改进其模拟性能等方面已开展了大量工作,使得海气耦合模式从概念化的定性描述到综合性的定量化表征都取得了重要进展。考虑到 ENSO 表征具有很强的模式依赖性及其模拟性能也表现出对模式动力框架和物理过程参数的高度敏感性等原因,目前已发展了各具特色的海气耦合模式,用于 ENSO 模拟和预测。值得指出的是,构建海气耦合模式的一个关键要点是:当海洋与大气模式进行耦合时,需要特别关注耦合模式中热带太平洋海气相互作用的表征(如耦合强度和反馈强度、局地作用和远程影响等不同过程间的相对平衡等因素),使得海气耦合系统能维持自身的年际振荡,产生可持续性的 ENSO 循环。

就模式复杂程度而言,环流型海气耦合模式(CGCM)是由完整的 AGCM 与 OGCM 间耦合所组成的,二者均基于复杂的原始方程组,并包含了几乎完整的物理过程及参数化等。同时,考虑到 ENSO 相关的年际异常具有特定的时空结构和演变等特性(如热带大气风场年际异常对海表温度异常的响应场在垂直方向上主要表现为二层结构),可对复杂的原始方程组做进一步简化,如经常采用线性两层近似和简单的浅水方程组等简化模式来表征与 ENSO 相关的变量场的时空演变,进一步构建较为简化的海气耦合模式以用于 ENSO 认知、表征、模拟和预测。

目前,已发展了几类广泛使用的简化海气耦合模式,其中的 ICMs 介于高度理想化概念型模式与 CGCM 之间,其控制方程组取为距平形式:只关注海洋和大气变量的年际异常部分,而对应的气候平均态部分则由相应的观测资料给定;大气和海洋年际异常场直接取为预报变量(如海表温度年际异常等)。进一步,在这类简化模式中,海洋动力场垂直方向上经常采用线性两层近似和简单的浅水方程模式来简化表征;同时,海气耦合模式间耦合时采用异常耦合,

以有效避免海气耦合模式模拟中气候漂移等现象的出现。结果表明, 这类简化模式可以非常好地刻画出与 ENSO 相关的大气和海洋年际异常特征。值得一提的是, ICMs 用来表征 ENSO 时表现得足够简单以至于其主要过程可显式表征便于机制的可解释性, 但又足够复杂以至于其结果可与观测进行直接比较。历史上这类模式在 ENSO 理论体系的建立和实时预测中起到重要作用, 目前这类模式仍广泛地应用于 ENSO 研究。本文重点介绍的 IOCAS ICM, 已为国内单位广泛使用, 包括 IOCAS、IAP、LASG、复旦大学、同济大学、国家海洋环境预报中心、天津大学、南京信息工程大学等。

HCMs 是另一类简化的海气耦合模式, 其中大气或海洋分量模式采用距平形式(即直接取年际异常场为模式的预报变量), 而另一个分量模式采用 AGCM 或者 OGCM。耦合时也采用基于年际异常场的异常耦合: 计算海气界面通量时所用到的气候态场是从观测资料中给定的; 用模式计算得到的年际异常加上由观测给定的气候平均场来计算海气界面的通量场(如海表风应力和海表温度场等)。这一过程起到通量校正(flux correction)的作用, 有助于缓解海气耦合模式在长时间积分时所出现的气候漂移等问题。进一步, HCM 可分为 HCM^{AGCM} 和 HCM^{OGCM} 两种。其中, HCM^{AGCM} 中海气耦合是这样进行的: 由 AGCM 计算出总的海表面风应力场(τ), 然后计算出其相对于 AGCM 气候态风应力场(τ_{clim} , 由 AGCM 单独试验给定的)的年际异常($\tau_{\text{inter}} = \tau - \tau_{\text{clim}}$), 作为强迫场作用于简单的海洋模式, 可直接得到 SST 年际异常(SST_{inter}); 将其与观测得到的 SST 气候态场(SST_{clim})相结合形成总的 SST 场($SST = SST_{\text{clim}} + SST_{\text{inter}}$)以驱动 AGCM, 实现海气间的耦合。HCM^{OGCM} 中海气耦合是这样进行的: 由 OGCM 产生总的 SST 场, 计算出相对于 OGCM 气候态 SST 场(SST_{clim} , 由 OGCM 单独试验给定)的年际异常($SST_{\text{inter}} = SST - SST_{\text{clim}}$); 作为强迫场驱动简化的大气模式直接得到风应力的年际异常, 与观测得到的风应力气候态场(τ_{clim})结合而形成总的风应力场($\tau = \tau_{\text{clim}} + \tau_{\text{inter}}$), 进而驱动 OGCM, 实现海气间的耦合; 海气界面通量之间交换也采用异常耦合, 以避免气候漂移现象的发生。

本文主要介绍 ICMs 和 HCMs 这两类简化海气耦合模式的特点, 目前这两类模式都有广泛的应用, 至于在实际应用中采用哪类模式取决于不同的应用目的, 因地制宜合理选取。例如, 可用 ICMs 和 HCMs

来研究 ENSO 与大气或海洋平均态之间的关系, 评估气候平均态变化对 ENSO 的调制作用等。具体地, 当需要聚焦大气过程的重要性时, 可采用 HCM^{AGCM}; 当需要聚焦海洋过程的重要性时, 可采用 HCM^{OGCM}。采用统计大气模式所构建的 HCM^{OGCM}, 其大气模式中不包含随机强迫的作用, 可聚焦耦合系统中的确定性部分的影响。本文的描述可作为这些模式的使用手册, 以提供相关的科学指导和技术支撑。

当然, 这些简化模式及其对 ENSO 的模拟还存在明显的不足和局限性。例如, ICMs 和 HCMs 中随季节变化的气候场部分是由观测资料给定的, 并采用了异常耦合, 使得一些过程的表征是不全面的(如气候态及其影响过程等), 其应用性受到一定的限制; 如因气候态是由观测资料给定的, 可能会约束了模式中 ENSO 演变的自由度等; 又如因 HCM^{OGCM} 中大气模式采用了统计模式, 只考虑了大气海表风场对海表温度年际异常的定常响应, 未能考虑大气的随机性的作用, 使得这些模式对 ENSO 的模拟过于规则, 缺乏 ENSO 多样性和复杂性。另外, 这些简化模式大多是区域模式(如模式区域大多选为热带太平洋区域), 难以考虑热带外过程和跨洋盆过程等的影响。因此, 应拓展区域而发展全球模式; 应发展和应用更完整和更为复杂的环流型耦合模式(CGCMs), 以能同时描述气候态季节性演变及其影响, 开展与 ENSO 相关的多时空尺度和多圈层过程间的相互作用研究, 相关工作将在另文介绍。

参 考 文 献

- 王会军, 范可, 郎咸梅, 等, 2012. 我国短期气候预测的新理论、新方法和新技术[M]. 北京: 气象出版社.
- 朱杰顺, 周广庆, 张荣华, 等, 2009. 一个改进的混合型海气耦合模式: ENSO 模拟[J]. 大气科学, 33(4): 657-669.
- 张人禾, 周广庆, 巢纪平, 2003. ENSO 动力学与预测[J]. 大气科学, 27(4): 674-688.
- 张荣华, 王凡, 2016. 海洋多尺度和多圈层过程及其相互作用研究——一个应用于厄尔尼诺模拟的成功范例[J]. 中国科学院院刊, 31(12): 1308-1315.
- 张荣华, 高川, 王宏娜, 等, 2021. 中间型海洋-大气耦合模式及其 ENSO 模拟和预测[M]. 北京: 科学出版社: 254-267.
- 张荣华, 曾庆存, 周广庆, 1997. 一个混合型热带海洋-大气耦合模式 I. 模式构成及热带太平洋气候态模拟[J]. 大气科学, 21(2): 129-140.
- 郑飞, 朱江, 张荣华, 等, 2016. 2015 年超级厄尔尼诺事件的成功预报[J]. 中国科学院院刊, 31(2): 251-257.
- 巢纪平, 2003. ENSO 循环机理和预测研究[M]. 北京: 气象出版社.
- 曾庆存, 1979. 数值天气预报的数学物理基础[M]. 北京: 科学出版社.

- 曾庆存, 袁重光, 王万秋, 等, 1990. 跨季度气候距平数值预测试验[J]. 大气科学, 14(1): 10-25.
- 穆穆, 段晚锁, 唐佑民, 2017. 大气-海洋运动的可预报性: 思考与展望[J]. 中国科学: 地球科学, 47(10): 1166-1178.
- BARNETT T P, GRAHAM N, PAZAN S, *et al*, 1993. ENSO and ENSO-related predictability. Part I: prediction of equatorial Pacific sea surface temperature with a hybrid coupled ocean-atmosphere model [J]. *Journal of Climate*, 6(8): 1545-1566.
- BARNSTON A G, TIPPETT M K, L'HEUREUX M L, *et al*, 2012. Skill of real-time seasonal ENSO model predictions during 2002–11: is our capability increasing? [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(5): 631-651.
- BATTISTI D S, HIRST A C, 1989. Interannual variability in a tropical atmosphere-ocean model: influence of the basic state, ocean geometry and nonlinearity [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46(12): 1687-1712.
- BJERKNES J, 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific [J]. *Monthly Weather Review*, 97(3): 163-172.
- BRYAN K, MANABE S, PACANOWSKI R C, 1975. A global ocean-atmosphere climate model. Part . The oceanic circulation [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 5(1): 30-46.
- CANE M A, ZEBIAK S E, 1985. A theory for El Niño and the Southern Oscillation [J]. *Science*, 228(4703): 1085-1087.
- CANE M A, ZEBIAK S E, DOLAN S C, 1986. Experimental forecasts of El Niño [J]. *Nature*, 321(6073): 827-832.
- CHANG P J L, SARAVANAN R, 2001. A hybrid coupled model study of tropical Atlantic variability [J]. *Journal of Climate*, 14(3): 361-390.
- CHEN D K, LIAN T, FU C B, *et al*, 2015. Strong influence of westerly wind bursts on El Niño diversity [J]. *Nature Geoscience*, 8(5): 339-345.
- CHEN D K, ROTHSTEIN L M, BUSALACCHI A J, 1994. A hybrid vertical mixing scheme and its application to tropical ocean models [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 24(10): 2156-2179.
- CHEN D K, ZEBIAK S E, BUSALACCHI A J, *et al*, 1995. An improved procedure for El Niño forecasting: implications for predictability [J]. *Science*, 269(5231): 1699-1702.
- EYRING V, BONY S, MEEHL G A, *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: 10.5194/gmd-9-1937-2016.
- FANG X H, XIE R H, 2020. A brief review of ENSO theories and prediction [J]. *Science China Earth Sciences*, 63(4): 476-491, doi: 10.1007/s11430-019-9539-0.
- GAO C, CHEN M N, ZHOU L, *et al*, 2022. The 2020-2021 prolonged La Niña evolution in the tropical Pacific [J]. *Science China Earth Sciences*, 65(12): 2248-2266, doi: 10.1007/s11430-022-9985-4.
- GAO C, WU X R, ZHANG R H, 2016. Testing a four-dimensional variational data assimilation method using an improved intermediate coupled model for ENSO analysis and prediction [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 33(7): 875-888, doi: 10.1007/s00376-016-5249-1.
- GAO C, ZHANG R H, KARNAUSKAS K B, *et al*, 2020. Separating freshwater flux effects on ENSO in a hybrid coupled model of the tropical Pacific [J]. *Climate Dynamics*, 54(11): 4605-4626, doi: 10.1007/s00382-020-05245-y.
- GAO C, ZHANG R H, WU X R, *et al*, 2018. Idealized experiments for optimizing model parameters using a 4D-Variational method in an intermediate coupled model of ENSO [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 35(4): 410-422, doi: 10.1007/s00376-017-7109-z.
- GENT P R, CANE M A, 1989. A reduced gravity, primitive equation model of the upper equatorial ocean [J]. *Journal of Computational Physics*, 81(2): 444-480.
- GILL A E, 1980. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 106(449): 447-462.
- GRIFFIES S M, HARRISON M J, PACANOWSKI R C, *et al*, 2004. A technical guide to MOM4, GFDL ocean group technical report No. 5 [R]. NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory: 1-291.
- GUILYARDI E, GUALDI S, SLINGO J, *et al*, 2004. Representing El Niño in coupled ocean-atmosphere GCMs: the dominant role of the atmospheric component [J]. *Journal of Climate*, 17(24): 4623-4629, doi: 10.1175/JCLI-3260.1.
- HU Z Z, KUMAR A, XUE Y, *et al*, 2014. Why were some La Niñas followed by another La Niña? [J]. *Climate Dynamics*, 42(3/4): 1029-1042.
- HU J Y, WANG H N, GAO C, *et al*, 2023. Interdecadal wind stress variability over the tropical Pacific causes ENSO diversity in an intermediate coupled model [J]. *Climate Dynamics*, 60(5/6): 1831-1847, doi: 10.1007/s00382-022-06414-x.
- HU J Y, ZHANG R H, GAO C, 2019. A hybrid coupled ocean-atmosphere model and its simulation of ENSO and atmospheric responses [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 36(6): 643-657, doi: 10.1007/s00376-019-8197-8.
- JI M, LEETMAA A, KOUSKY V E, 1996. Coupled model predictions of ENSO during the 1980s and the 1990s at the national centers for environmental prediction [J]. *Journal of Climate*, 9(12): 3105-3120.
- JIN F F, 1997. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: conceptual model [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 54(7): 811-829.
- JIN F F, AN S I, 1999. Thermocline and zonal advective feedbacks within the equatorial ocean recharge oscillator model for ENSO [J]. *Geophysical Research Letters*, 26(19): 2989-2992, doi: 10.1029/1999GL002297.
- KANG I S, KUG J S, 2000. An El-Niño prediction system using an intermediate ocean and a statistical atmosphere [J]. *Geophysical Research Letters*, 27(8): 1167-1170, doi: 10.1029/1999GL011023.
- KANG X B, ZHANG R H, GAO C, *et al*, 2017a. An improved ENSO simulation by representing chlorophyll-induced climate feedback in the NCAR Community Earth System

- Model [J]. *Scientific Reports*, 7(1): 17123, doi: 10.1038/s41598-017-17390-2.
- KANG X B, ZHANG R H, WANG G S, 2017b. Effects of different freshwater flux representations in an ocean general circulation model of the tropical Pacific [J]. *Science Bulletin*, 62(5): 345-351, doi: 10.1016/j.scib.2017.02.002.
- KEENLYSIDE N, KLEEMAN R, 2002. Annual cycle of equatorial zonal currents in the Pacific [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107(C8): 3093, doi: 10.1029/2000JC000711.
- KRAUS E B, TURNER J S, 1967. A one-dimensional model of the seasonal thermocline II. The general theory and its consequences [J]. *Tellus*, 19(1): 98-106.
- LATIF M, ANDERSON D, BARNETT T, *et al*, 1998. A review of the predictability and prediction of ENSO [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C7): 14375-14393, doi: 10.1029/97JC03413.
- LI X F, HU Z Z, TSENG Y H, *et al*, 2022. A historical perspective of the La Niña event in 2020/2021 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(7): e2021JD035546, doi: 10.1029/2021JD035546.
- LIAN T, CHEN D K, TANG Y M, *et al*, 2014. Effects of westerly wind bursts on El Niño: a new perspective [J]. *Geophysical Research Letters*, 41(10): 3522-3527.
- LIAN T, WANG J, CHEN D, *et al*, 2023. A strong 2023/24 El Niño is staged by tropical Pacific Ocean heat content buildup [J]. *Ocean-Land-Atmosphere Research*, 2: 0011, doi: 10.34133/olar.0011.
- MATSUNO T, 1966. Quasi-geostrophic motions in the equatorial area [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 44(1): 25-43.
- MCCREARY J P, 1981. A linear stratified ocean model of the equatorial undercurrent [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical and Physical Sciences*, 298(1444): 603-635, doi: 10.1098/rsta.1981.0002.
- MCCREARY J P, ANDERSON D L T, 1991. An overview of coupled ocean-atmosphere models of El Niño and the Southern Oscillation [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 96(S01): 3125-3150, doi: 10.1029/90JC01979.
- MCPHADEN M J, ZEBIAK S E, GLANTZ M H, 2006. ENSO as an integrating concept in earth science [J]. *Science*, 314(5806): 1740-1745, doi: 10.1126/science.1132588.
- MCWILLIAMS J C, GENT P R, 1978. A coupled air and sea model for the tropical Pacific [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 35(6): 962-989.
- MELLOR G L, YAMADA T, 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems [J]. *Review of Geophysics*, 20(4): 851-875.
- MOORE D W, PHILANDER S G H, 1977. Modeling of the tropical ocean circulation [M] // GOLDBERG E D, CAVE I N, O'BRIEN J J, *et al*. *The Sea*. New York: Wiley: 319-361.
- MU M, XU H, DUAN W S, 2007. A kind of initial errors related to "spring predictability barrier" for El Niño events in Zebiak-Cane model [J]. *Geophysical Research Letters*, 34(3): L03709, doi: 10.1029/2006GL027412.
- MURTUGUDDE R, SEAGER R, BUSALACCHI A, 1996. Simulation of the tropical oceans with an ocean GCM coupled to an atmospheric mixed-layer model [J]. *Journal of Climate*, 9(8): 1795-1815.
- NEELIN J D, BATTISTI D S, HIRST A C, *et al*, 1998. ENSO theory [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C7): 14261-14290, doi: 10.1029/97JC03424.
- NEELIN J D, JIN F F, 1993. Modes of interannual tropical ocean-atmosphere interaction - a unified view. Part II: analytical results in the weak-coupling limit [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 50(21): 3504-3522.
- NEELIN J D, LATIF M, ALLAART M A F, *et al*, 1992. Tropical air-sea interaction in general circulation models [J]. *Climate Dynamics*, 7(2): 73-104.
- PACANOWSKI R C, GRIFFIES S M, 1998. MOM 3.0 manual [R]. Princeton: NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory.
- PHILANDER S G, 1999. A review of tropical ocean-atmosphere interactions [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 51(1): 71-90.
- PICAUT J, MASIA F, DU PENHOAT Y, 1997. An advective-reflective conceptual model for the oscillatory nature of the ENSO [J]. *Science*, 277(5326): 663-666.
- RASMUSSEN E M, CARPENTER T H, 1982. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño [J]. *Monthly Weather Review*, 110(5): 354-384.
- REN H L, ZHENG F, LUO J J, *et al*, 2020. A review of research on tropical air-sea interaction, ENSO dynamics, and ENSO prediction in China [J]. *Journal of Meteorological Research*, 34(1): 43-62.
- ROECKNER E, BÄUML G, BONAVENTURA L, *et al*, 2003. The atmospheric general circulation model ECHAM 5. PART I: model description [R]. Max-Planck-Institute für Meteorology Report 349: 127.
- SCHOPF P S, SUAREZ M J, 1988. Vacillations in a coupled ocean-atmosphere model [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 45(3): 549-566.
- SONG X S, CHEN D K, TANG Y M, *et al*, 2018. An intermediate coupled model for the tropical ocean-atmosphere system [J]. *Science China Earth Sciences*, 61(12): 1859-1874.
- STOCKDALE T N, BUSALACCHI A J, HARRISON D E, *et al*, 1998. Ocean modeling for ENSO [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C7): 14325-14355, doi: 10.1029/97JC02440.
- SUAREZ M J, SCHOPF P S, 1988. A delayed action oscillator for ENSO [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 45(21): 3283-3287.
- SYU H H, NEELIN J D, Gutzler D, 1995. Seasonal and interannual variability in a hybrid coupled GCM [J]. *Journal of Climate*, 8(9): 2121-2143.
- TANG Y, 2002. Hybrid coupled models of the tropical Pacific: I interannual variability [J]. *Climate Dynamics*, 19(3/4): 331-342, doi: 10.1007/s00382-002-0230-3.
- TANG Y M, ZHANG R H, LIU T, *et al*, 2018. Progress in ENSO

- prediction and predictability study [J]. *National Science Review*, 5(6): 826-839, doi: 10.1093/nsr/nwy105.
- TAO L J, DUAN W S, 2019. Using a nonlinear forcing singular vector approach to reduce model error effects in ENSO forecasting [J]. *Weather and Forecasting*, 34(5): 1321-1342, doi: 10.1175/WAF-D-19-0050.1.
- TAO L J, GAO C, ZHANG R H, 2018. ENSO predictions in an intermediate coupled model influenced by removing initial condition errors in sensitive areas: a target observation perspective [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 35(7): 853-867, doi: 10.1007/s00376-017-7138-7.
- TIAN F, ZHANG R H, WANG X J, 2018. A coupled ocean physics-biology modeling study on tropical instability wave-induced chlorophyll impacts in the Pacific [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(8): 5160-5179, doi: 10.1029/2018jc013992.
- TIMMERMANN A, AN S I, KUG J S, *et al*, 2018. El Niño-Southern Oscillation complexity [J]. *Nature*, 559(7715): 535-545, doi: 10.1038/s41586-018-0252-6.
- WALLACE J M, RASMUSSEN E M, MITCHELL T P, *et al*, 1998. On the structure and evolution of ENSO-related climate variability in the tropical Pacific: lessons from TOGA [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C7): 14241-14259, doi: 10.1029/97jc02905.
- WANG C Z, 2018. A review of ENSO theories [J]. *National Science Review*, 5(6): 813-825, doi: 10.1093/nsr/nwy104.
- WANG X J, CHRISTIAN J R, MURTUGUDDE R, *et al*, 2005. Ecosystem dynamics and export production in the central and eastern equatorial Pacific: a modeling study of impact of ENSO [J]. *Geophysical Research Letters*, 32(2): L02608, doi: 10.1029/2004GL021538.
- WANG X J, LE BORGNE R, MURTUGUDDE R, *et al*, 2009. Spatial and temporal variability of the phytoplankton carbon to chlorophyll ratio in the equatorial Pacific: a basin-scale modeling study [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C7): C07008, doi: 10.1029/2008JC004942.
- WANG X J, MURTUGUDDE R, HACKERT E, *et al*, 2013. Phytoplankton carbon and chlorophyll distributions in the equatorial Pacific and Atlantic: a basin-scale comparative study [J]. *Journal of Marine Systems*, 109/110: 138-148, doi: 10.1016/j.jmarsys.2012.03.004.
- WEISBERG R H, WANG C Z, 1997. A western Pacific oscillator paradigm for the El Niño-Southern Oscillation [J]. *Geophysical Research Letters*, 24(7): 779-782, doi: 10.1029/97GL00689.
- WYRTKI K, 1975. El Niño — The dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 5(4): 572-584.
- XIE S P, PENG Q H, KAMAE Y, *et al*, 2018. Eastern Pacific ITCZ dipole and ENSO diversity [J]. *Journal of Climate*, 31(11): 4449-4462, doi: 10.1175/jcli-d-17-0905.1.
- YEH S W, KUG J S, AN S I, 2014. Recent progress on two types of El Niño: observations, dynamics, and future changes [J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 50(1): 69-81, doi: 10.1007/s13143-014-0028-3.
- ZEBIAK S E, CANE M A, 1987. A model El Niño-southern oscillation [J]. *Monthly Weather Review*, 115(10): 2262-2278.
- ZENG Q C, ZHANG X H, ZHANG R H, 1991. A design of an oceanic GCM without the rigid lid approximation and its application to the numerical simulation of the circulation of the Pacific Ocean [J]. *Journal of Marine Systems*, 1(3): 271-292.
- ZHANG R H, 2014. Effects of tropical instability wave (TIW)-induced surface wind feedback in the tropical Pacific Ocean [J]. *Climate Dynamics*, 42(1/2): 467-485.
- ZHANG R H, 2015a. A hybrid coupled model for the Pacific ocean-atmosphere system. Part I: description and basic performance [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 32(3): 301-318, doi: 10.1007/s00376-014-3266-5.
- ZHANG R H, 2015b. Structure and effect of ocean biology-induced heating (OBH) in the tropical Pacific, diagnosed from a hybrid coupled model simulation [J]. *Climate Dynamics*, 44(3/4): 695-715, doi: 10.1007/s00382-014-2231-4.
- ZHANG R H, BUSALACCHI A J, 2009. Freshwater flux (FWF)-induced oceanic feedback in a hybrid coupled model of the tropical Pacific [J]. *Journal of Climate*, 22(4): 853-879, doi: 10.1175/2008JCLI2543.1.
- ZHANG R H, ENDOH M, 1992. A free surface general circulation model for the tropical Pacific Ocean [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 97(C7): 11237-11255, doi: 10.1029/92JC00911.
- ZHANG R H, GAO C, 2016. The IOCAS intermediate coupled model (IOCAS ICM) and its real-time predictions of the 2015-2016 El Niño event [J]. *Science Bulletin*, 66(13): 1061-1070, doi: 10.1007/s11434-016-1064-4.
- ZHANG R H, GAO C, FENG L C, 2022. Recent ENSO evolution and its real-time prediction challenges [J]. *National Science Review*, 9(4): nwac052, doi: 10.1093/nsr/nwac052.
- ZHANG R H, KLEEMAN R, ZEBIAK S E, *et al*, 2005a. An empirical parameterization of subsurface entrainment temperature for improved SST anomaly simulations in an intermediate ocean model [J]. *Journal of Climate*, 18(2): 350-371, doi: 10.1175/JCLI-3271.1.
- ZHANG R H, ROTHSTEIN L M, BUSALACCHI A J, 1998. Origin of upper-ocean warming and El Niño change on decadal scales in the Tropical Pacific Ocean [J]. *Nature*, 391(6670): 879-883, doi: 10.1038/36081.
- ZHANG R H, TIAN F, WANG X J, 2018. A new hybrid coupled model of atmosphere, ocean physics, and ocean biogeochemistry to represent biogeophysical feedback effects in the tropical Pacific [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10(8): 1901-1923, doi: 10.1029/2017MS001250.
- ZHANG R H, YU Y Q, SONG Z Y, *et al*, 2020. A review of progress in coupled ocean-atmosphere model developments for ENSO studies in China [J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 38(4): 930-961, doi: 10.1007/s00343-020-0157-8.
- ZHANG R H, ZEBIAK S E, 2002. Effect of penetrating momentum Flux over the surface boundary/mixed layer in a

- z-coordinate OGCM of the tropical Pacific [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 32(12): 3616-3637.
- ZHANG R H, ZEBIAK S E, KLEEMAN R, *et al*, 2003. A new intermediate coupled model for El Niño simulation and prediction [J]. *Geophysical Research Letters*, 30(19): 2012, doi: 10.1029/2003GL018010.
- ZHANG R H, ZEBIAK S E, KLEEMAN R, *et al*, 2005b. Retrospective El Niño forecasts using an improved intermediate coupled model [J]. *Monthly Weather Review*, 133(9): 2777-2802, doi: 10.1175/MWR3000.1.
- ZHANG R H, BUSALACCHI A J, DEWITT D G, 2008. The roles of atmospheric stochastic forcing (SF) and oceanic entrainment temperature (T_e) in decadal modulation of ENSO[J]. *Journal of Climate*, 21(4): 674-704. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1665.1>.
- ZHANG R H, ZHENG F, ZHU J S, *et al*, 2012. Modulation of El Niño-Southern Oscillation by freshwater flux and salinity variability in the tropical Pacific [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 29(4): 647-660, doi: 10.1007/s00376-012-1235-4.
- ZHANG R H, ZHENG F, ZHU J, *et al*, 2013. A successful real-time forecast of the 2010-11 La Niña event [J]. *Scientific Reports*, 3(1): 1108, doi: 10.1038/srep01108.
- ZHENG F, ZHU J, ZHANG R H, *et al*, 2006. Ensemble hindcasts of SST anomalies in the tropical Pacific using an intermediate coupled model [J]. *Geophysical Research Letters*, 33(19): L19604, doi: 10.1029/2006GL026994.
- ZHU J, ZHOU G Q, ZHANG R H, *et al*, 2013. Improving ENSO prediction in a hybrid coupled model with an embedded entrainment temperature parameterization [J]. *International J of Climatology*, 33, 343-355, DOI: 10.1002/joc.3426.
- ZHU J S, KUMAR A, WANG W Q, *et al*, 2017. Importance of convective parameterization in ENSO predictions [J]. *Geophysical Research Letters*, 44(12): 6334-6342, doi: 10.1002/2017GL073669.

A REVIEW OF PROGRESS IN COUPLED OCEAN-ATMOSPHERE MODEL DEVELOPMENTS FOR ENSO STUDIES: INTERMEDIATE COUPLED MODELS AND HYBRID COUPLED MODELS

ZHANG Rong-Hua^{1,2}

(1. *School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*; 2. *Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China*)

Abstract El Niño-Southern Oscillation (ENSO) is the strongest interannual signal that is produced by basin-scale processes in the tropical Pacific, with significant effects on worldwide weather and climate. In the past, extensive and intensive international efforts have been devoted to coupled model developments for ENSO studies. A hierarchy of coupled ocean-atmosphere models was formulated. In terms of their complexity, they can be categorized into intermediate coupled models (ICMs), hybrid coupled models (HCMs), and fully coupled general circulation models (CGCMs). ENSO modeling has made significant progress over the past decades, reaching a stage where coupled models can now be used to successfully predict ENSO events 6 months to one year in advance. Meanwhile, ENSO exhibits great diversity and complexity in nature as observed, which still cannot be adequately captured by current state-of-the-art coupled models, presenting a challenge to ENSO modeling. In this paper, the long-term efforts in ENSO modeling that has been made continually and steadily at different institutions in China were reviewed; some selected representative examples were presented to reflect current status in ENSO model developments and applications, which have been pursued actively with noticeable progress being made recently. As ENSO simulations are very sensitive to model formulations and process representations etc., dedicated efforts have been devoted to ENSO model developments and improvements. At present, different ocean-atmosphere coupled models are available in China, exhibiting good model performances and various applications for climate modeling, including the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). However, large biases and uncertainties still exist in ENSO simulations and predictions, and there are clearly rooms for their improvements, which are still an active area of researches and applications. In addition, model performances of ENSO simulations were assessed in terms of advantages and disadvantages with these differently formulated coupled models, pinpointing to the areas where they need to be further improved for ENSO studies. These analyses provide valuable guidance for future improvements in ENSO simulations and predictions.

Key words El Niño-Southern Oscillation (ENSO); interactions between the ocean and atmosphere; intermediate coupled models; coupled ocean-atmosphere models; ENSO simulation performance