

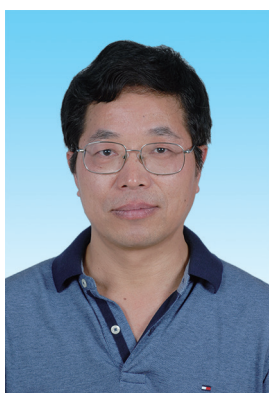
海洋多尺度和多圈层过程及其相互作用研究

——一个应用于厄尔尼诺模拟的成功范例*

张荣华^{1,2} 王 凡^{1,2}

1 中国科学院海洋研究所 青岛 266071

2 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋动力过程与气候功能实验室 青岛 266237



摘要 海洋中存在各种对气候和环境有显著影响的多尺度自然现象，如热带不稳定波和厄尔尼诺-南方涛动（El Niño-Southern Oscillation, ENSO）等，它们是海洋中不同时间和空间尺度过程及其与地球系统中其他圈层之间相互作用的综合产物，表现出复杂性、多样性、多变性和相互作用等特点。对海洋的研究要作为一个系统来展开，以考虑多尺度和多圈层过程间的相互作用和反馈；要采用不同方法相结合的综合手段（包括观测、理论和模式等）；在认知和表征现象和过程的基础上，进一步构建模式，从而模拟、预测和预估海洋相关现象及其对气候和环境变化的影响。作为地球系统中最强的年际变化信号，ENSO现象是研究年际时间尺度海气相互作用和气候预估的核心内容，本文以ENSO为例，来阐明海洋多尺度和多圈层过程及其相互作用对ENSO的调制影响（如海洋生物引发的加热效应和热带不稳定波等的反馈作用）。

关键词 海洋多尺度和多圈层过程，海洋观测，海洋模拟，厄尔尼诺-南方涛动（ENSO）

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2016.12.004

*资助项目：中科院战略性先导科技专项（XDA11010000、XDA11020000），国家自然科学基金项目（41490644、41475101），青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山人才计划（2015ASTP），山东泰山学者和青岛创新领军人才项目

修改稿收到日期：2016年11月23日

海洋约占地球表面积的3/4，是地球圈层的关键组成部分。由于其巨大的水体和热容量，以及海水热惯性和缓慢的流动性，海洋对全球热收支、水循环和碳循环等起重要贡献，在各种时间尺度气候变化（年际、年代际和长期变化趋势等）中起着至关重要的作用。特别是，海洋是气候系统具有长期记忆的载体，是气候可预报性的根源所在。海洋科学是多学科交叉的学科，用来描述海水特性及其运动规律，认知海洋时空演变规律等。深入研究海洋与气候和环境相关的多尺度过程以及与各圈层（如生物圈、大气圈等）相互作用等是当今海洋

与气候科学领域的重大国际前沿课题，也是预测和应对气候与环境变化的基础和重点所在。

由于海洋多尺度和多圈层过程间相互作用的复杂性和非线性，海洋过程不是局部的而是系统性的，不是孤立的而是相互联系的；所以海洋科学不但要研究海洋本身，又要考量与其他圈层间的相互作用，即应把海洋当作系统来研究。在研究方法上，需要观测、理论、模式和模拟等的结合，在认知和定量表征的基础上，建立数值模式并预测、预估其未来变化。

厄尔尼诺-南方涛动（El Niño-Southern Oscillation, ENSO）是海洋起主导作用而产生的年际气候变化现象。本文将通过阐述海洋多尺度和多圈层过程及其相互作用对ENSO的调制影响，总结海洋多尺度和多圈层过程及其相互作用这一领域的发展现状和未来发展趋势。

1 海洋多尺度和多圈层过程及其相互作用

海洋的变化可分为自然变率和外界强迫引起的变化，其中自然变率是地球自然气候系统内部海洋、陆地、海冰、大气等多圈层间交换过程及相互作用而形成的；海洋变化外界因子包括人类活动的强迫（如温室气体增加、人为气溶胶增多以及大尺度土地利用/覆盖变化等）所产生的全球和区域效应（如海平面上升和海水酸化等）。海洋中存在各种对气候与环境有显著影响的多尺度自然现象，并在不同时间尺度气候模态形成和变化中起重要作用，海洋变异可导致年际、年代际或更长时间尺度的区域和全球持续性气候变化（包括海洋物理、生物及化学等）。

例如：热带太平洋海洋—大气相互作用所产生的ENSO^[1,2]，是最强的年际气候变化模态，涉及到热带上层海洋动力学；更长时间尺度的年代际气候变化模态（如大西洋翻转环流等）是全球尺度的，并且涉及到深层海洋（如受到海洋温盐环流的影响），是造成全球许多地区气候年代际变异的重要原因，如太平洋海洋年代际过程被认为是造成21世纪以来全球变暖趋缓或停滞（hiau-

tus）的重要原因。

百年时间尺度的气候变化主要取决于人类活动，特别是CO₂增温的影响——研究表明人类活动使得CO₂增加，从而在长期趋势上显著改变着全球气候和环境状态。当然，气候系统的自然变率和人为引起的变化是相互作用的，所观测到的气候变化是多尺度过程的综合产物。认知其复杂的相互作用需要对气候动力学，特别是全球尺度海洋环流动力学有深刻的认识和理解，需要发展新的理论来阐明不同时间尺度过程间相互作用和影响。

海洋在气候变化中的作用反映其多尺度和多圈层过程及其相互作用的特点，一个典型的例子是ENSO。ENSO是热带太平洋海气耦合作用的产物，起源于海表大气风场、海表温度场和海洋温跃层间的相互作用，即所谓的温跃层反馈机制（thermocline feedback）。除了这一主导因子以外，热带太平洋中多尺度和多圈层过程可调制ENSO，如海洋生物加热（Ocean Biology-induced Heating, OBH）、热带不稳定波（Tropical Instability Waves, TIWs）、海气界面间的淡水通量（Freshwater Flux, FWF）、热带气旋（Tropical Cyclones, TCs）等强迫和反馈过程，这些过程一方面受ENSO的直接影响，另一方面其所产生的变化又可对ENSO特性产生调制作用（即反馈）；并且这些不同尺度和不同圈层过程之间又相互作用，对ENSO所产生的综合影响导致了ENSO的多样性、可变性和复杂性，更导致其预报的不确定性，因此需要观测、理论和模式相结合的综合手段来系统研究。

2 海洋观测资料的获取和应用

海洋观测的目的是为了获取海洋要素场的资料（包括物理、化学、生物过程或现象等），揭示其时、空分布特征和变化规律，为海洋科学研究、海洋资源开发和海洋灾害预报等提供基本状态变量信息和科学依据。海洋观测的手段和形式已经从早期的沿岸站或岛屿站观测、浮（潜）标观测、船舶走航调查等单一形式的观测

或监测逐渐发展成陆地、海基和空基相结合（如现场或遥感观测资料）的多样化、系统化和立体化观测系统或网络。特别可开展有针对性地围绕海洋现象和过程进行系统、深入的强化海洋观测（包括新的测量仪器的开发和使用、优化的观测方案或观测网络的设计、新的资料分析方法的探索等）。在海洋技术的推动下，现代观测技术已提供了广泛的海洋多源资料，积累了更精细化和更长时期的海洋观测资料（如基于观测描述的海洋过程的时空尺度在不断地拓展；已发展到目前的中尺度过程长期观测、次中尺度过程观测以及海洋内部或海气界面间的微尺度过程观测等）。在多学科交叉研究需求的推动下，跨学科的海洋多要素的同步观测资料也在不断积累^[3]，提供了海洋全方位、高时空分辨率的观测资料，特别是近些年来 Argo（全球海洋观测计划）已为人类提供了海洋次表层观测资料等，可供各种应用需求。

海洋观测资料已有广泛的应用，除描述海洋要素场四维时空演变特征外，已用于构建和验证海洋中多尺度和多圈层过程参数化方法的有效性，以及检验模式模拟和预报的准确性等。例如，在对海洋系统性观测分析的基础上，通过认知海洋的物理过程及机制，改进海洋环境预报模式整体性表征，以提升海洋环境模拟和预报的技巧；通过同化海洋观测资料，可以改进或优化海洋数值预报系统中的海洋初始状态，以克服目前对海洋物理过程认识的不足以及其他不确定性因素对环境预报精度的可能影响。

目前海洋观测已经取得了长足进步，但海洋观测资料的获取非常昂贵和费时、费力，相对于广阔浩瀚的海洋来说，海洋观测资料的时空分布仍极不均匀。海洋观测条件的困难性，导致了对海洋过程理解的局限性和严重不足，因此需要采用观测与模式相结合的研究手段。

3 海洋综合模式的发展和改进

在认知和表征过程的基础上，构建基于物理规律的数值模式和模拟是研究海洋多尺度和多圈层过程及其相

互作用强有力的工具，已在过去半个多世纪中取得了巨大进展，模式和模拟为我们提供了一个全面深刻认识海洋多尺度和多圈层过程、机制、演变规律以及未来变化的机会。例如，模式经历了从早期以海洋-大气耦合模式为基础，之后考虑更多地球系统分量（如海冰）耦合的气候系统模式，再到进一步考虑生物地球化学过程的地球系统模式的发展进程。同时，模式发展已充分利用观测资料作进一步的改进和完善，模式也为观测资料的应用提供了核心平台。例如，通过结合模式和资料所开展的资料同化可确定最优海洋状态和参数值等；特别是，包括海洋在内的地球系统模式是天气-气候-环境一体化和进行无缝隙模拟和预报的应用工具，不仅可再现过去全球气候演变，还可以预估未来气候变化。因此，基于多尺度和多圈层耦合的综合性模式的发展和改进具有重要的科学意义和战略意义。

由于海洋观测资料的匮乏及多尺度和多圈层等特点，所发展的综合模式极其复杂和庞大的计算量等，因此海洋观测设计本身要科学、优化；观测资料利用要合理、有效；观测资料与模式的融合要协调、一致；要有效利用观测资料构建模式未能分辨出的多尺度和多圈层过程（即参数化）等。这些方法和理念已被广泛用于海气相互作用和 ENSO 等研究中。ENSO 是热带太平洋中海洋一大气物理过程为主要驱动而产生的，对海洋中多尺度和多圈层过程产生重大影响，如引发海洋生态系统的异常等；所引发的海洋生态响应进一步对物理过程产生反馈，从而产生海洋物理和生物间的相互作用。目前，气候模式中未能合理表征海洋生物过程及其反馈影响，需要利用观测资料来发展参数化方案以表征海洋生物加热效应对 ENSO 的影响。

4 海洋多尺度和多圈层过程及其相互作用对 ENSO 的调制影响

ENSO 是地球系统中最显著的年际气候变率信号，它发生在热带太平洋，通过大气遥相关过程对全球天

气、气候产生重大影响。几十年来对 ENSO 广泛而深入的研究已取得了巨大进展, 现已开展提前半年至一年的实时预报 (详情请参见美国哥伦比亚大学国际气候研究所网站 <http://iri.columbia.edu/climate/ENSO/currentinfo/update.html>)。中科院海洋所 (IOCAS) 所发展和改进的中等复杂程度海气耦合模式 (IOCAS ICM) 每月为国际学术界提供 ENSO 实时预报结果 (图 1) [4,5]。但由于 ENSO 时空演变表现出极大的可变性和多样性, 目前对 ENSO 研究仍面临许多难题, 对其变异机理还不清楚, 对具有重大影响的热带太平洋地区海表温度 (SST) 模拟误差仍很大, 因此 ENSO 实时预报存在很大的不确定性和模式间的差异性等, 还不能满足防灾减灾的实际需求。尤其是 20 世纪 90 年代以来, 不同类型厄尔尼诺 (El Niño) 事件的频繁发生使得 ENSO 时空演变过程变得更加复杂多变, 其实时预报水平也面临更大的挑战。研究 ENSO 的形成机理, 及时准确地预报 ENSO 事件的发生、发展和转变过程是气候动力学的关键性课题和探索年际尺度气候预报最有希望的途径之一, 是目前科学

界、政府部门和社会公众关注的热点, 不仅具有重要的科学意义, 而且具有潜在的巨大经济和社会价值。

为全面认清 ENSO 的多样性和多变性, 国际上开展了观测、理论和数值模拟等多方面的综合研究。如由世界气候研究计划 (WCRP) 提出并于 1985 年实施的为期 10 年的研究热带海洋和全球大气环流 (TOGA) 关系的国际合作计划, 掀起了研究 ENSO 形成机制和海气相互作用动力学的新高潮, 特别在观测方面揭示出 ENSO 的可变性现象及可能机制、多时间尺度过程 (如年循环、准两年振荡和低频变率等) 相互作用及其对 ENSO 影响等新课题。自 20 世纪 80 年代中后期以后, 广泛开展基于海洋-大气耦合模式的模拟研究, 特别借助于简化海气耦合模式分析不稳定海气相互作用机理、ENSO 起源机制和循环过程等, 并开始对 ENSO 进行基于海气耦合动力模式的预报试验, 如在 1986 年首次用动力模式对 1986—1987 年的 El Niño 事件进行预报试验, 并获得令人鼓舞的初步成功, 为以后采用动力模式进行实时 ENSO 预报奠定了基础。目前已形成了较为成熟的 ENSO 循环理论, 已发展了不同类型的海气耦合模式, 如中等复杂程度耦合模式 (Intermediate Coupled Model, ICM)、混合型耦合模式、环流型耦合模式等, 并用于 ENSO 可预报性研究和实时预报等。随着对 ENSO 研究的深入, 又不断出现了更多相关新课题, 如 ENSO 不规则性、两类 El Niño 事件、ENSO 冷/暖位相的不对称、ENSO 年代际变化、多时间尺度和跨区域海气过程对 ENSO 的调制影响以及不同气候模态与 ENSO 模态相互作用和全球变暖背景下 ENSO 的响应等研究领域。自 20 世纪 90 年代以来, 年代际气候变异规律和成因已成为国际气候学研究的挑战性课题, 被 WCRP 的“气候变率与可预报性研究计划 (CLIVAR)”列为核心内容。

显然, ENSO 过程涉及不同时间尺度相互作用、多源强迫和反馈过程的相互制约作用、跨区域海气过程和大气随机过程的影响等。例如, ENSO 起源于热带太平

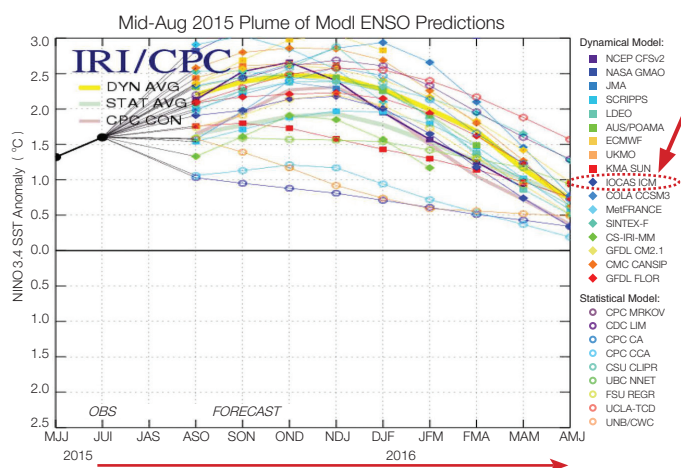


图1 海气耦合模式以2015年8月作为初始条件实时预报得到的2015—2016年间热带太平洋海表温度随时间的分布

纵坐标为 Niño3.4 区 (150°W—90°W, 5°N—5°S) 区域平均的海表温度异常; 横坐标为时间, MJJ 为 May-June-July (5月-6月-7月) 的缩写, 其他类推; 黑线为观测值; 其他有色曲线为不同模式预报的结果。该图是 IRI 和 CPC 联合提供的预报结果 (其中 IRI 是美国 Columbia University 的 International Research Institute for Climate and Society 的缩写; 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海气耦合模式对 2015 年 El Niño 事件的实时预测结果, 其中以中科院海洋所冠名的中等复杂程度海气耦合模式 (IOCAS ICM) 也被收录其中

洋，除了温跃层反馈机制以外，热带太平洋中还存在其他多尺度和多圈层过程（图2）。除这些具体过程以外，不同时间尺度过程（如年循环、季节内振荡、准两年振荡和低频变率等）间相互作用可对 ENSO 有调制作用，使 ENSO 时空演变具有更复杂的可变性和多样性。例如，在全球变暖背景下，大尺度海洋-大气平均气候场发生改变，进入 21 世纪以来，热带太平洋的背景态出现了显著的年代际变化，具体表现为：热带太平洋信风持续加强、西太平洋地区中层海水温度升高、赤道东太平洋冷水上翻加强和热带东太平洋海表温度下降等。这些背景场的变化也可改变 ENSO 的自然属性，导致出现不同类型的 El Niño 事件，加剧了 ENSO 循环中两个位相的不对称性等。如 21 世纪初至 2014 年间，拉尼娜（La Niña）事件可持续多年，而在赤道东太平洋 El Niño 现象很难出现，代之以 El Niño 事件主要出现在赤道中太平洋；而在 20 世纪 80—90 年代，则是相反情况^[6]。另一方面，这些背景场的改变对全球变暖产生调制作用（例如全球平均温度的上升趋势减缓），如已有一些研究表明太平洋海气耦合系统对全球变暖有调制作用；年际尺度上 ENSO 的不对称性发展及其累积效应可导致赤道中太平洋 SST 年代际变化，可对全球增暖产生调制影响，但仍然存在众多未解的科学问题（包括 ENSO 年代际变异和年代际气候变化与全球增暖间的相互影响等）。

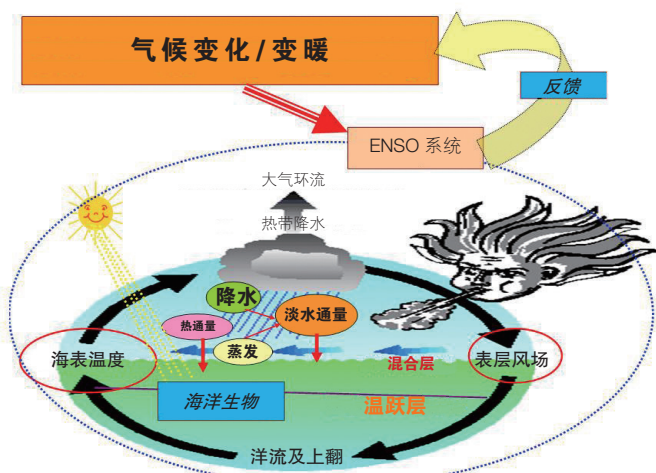


图 2 ENSO 相关过程示意图

ENSO 现象的复杂性、多样性和多变性等问题都与海洋多尺度和多圈层过程及其相互作用密切相联系的，ENSO 已被视作一个系统来研究（包括观测、理论和数值模式等多方面的综合研究）。在认知、表征和模拟的基础上，利用海洋观测所提供的初始条件进行实时预报。下面就 ENSO 受海洋中多尺度和多圈层过程的调制影响的有关研究做一些具体分析。

4.1 海洋多尺度过程对 ENSO 的调制影响——一个热带不稳定波的例子

热带东太平洋地区一个重要的海洋-大气过程是热带不稳定波（TIWs），高分辨率卫星观测资料表明，沿热带东太平洋冷舌区 3°N 附近存在一条明显的海表面温度锋，该温度锋把近赤道上涌冷水区与其北侧暖水区隔开。由于赤道主要洋流经向切变的不稳定性和海洋温度锋的斜压不稳定性等原因，导致了热带东太平洋冷舌区海表面温度锋产生扰动并以波动形式向西传播，这种波动称为 TIWs。虽然 TIWs 是一种中小尺度现象，但可对年际气候变化（如 ENSO）有重要影响，这反映了多尺度过程间的相互作用。例如，这种起源于海洋内部过程的中尺度现象，可以通过水平输送及海洋上层的垂直混合作用等，对热带东太平洋的热量和动量平衡产生重要影响，进而影响热带地区气候平均态及其季节和年际变化。例如，一些研究指出，TIWs 垂直混合产生的向赤道地区的经向热输送是赤道东太平洋海洋混合层热量平衡项中的一级项，甚至可以超过海表热通量量值。卫星观测资料分析表明，赤道东太平洋冷舌区 TIWs 引起的 SST 扰动可以引起海表风场、云和降水等系统性响应，如热带东太平洋 TIWs 引起的 SST 扰动可达 2℃—3℃，与之相伴随的海表风速变化可达气候平均值的 20%—30%，风应力涡度和散度变化可达其气候平均值^[7]。因此，TIWs 对赤道东太平洋冷舌区气候平均态、季节变化和大尺度年际变率等可产生重要影响。

近年来，由于卫星观测资料可提供高分辨率的海洋-大气观测数据，使得对 TIWs 的研究得到了长足发展。但

目前气候模式还不能表征 TIWs 这样的中小尺度过程,特别是 TIWs 所引发的风场作用在目前大尺度海气耦合模式中都未能很好地表征。在以前的工作中^[7],利用卫星观测资料构建了一个计算 TIWs 风场的经验模式,并应用于海洋和海气耦合模式中;模拟结果发现, TIWs 产生的低层大气风场对热带东太平洋海温的气候平均态和年际变率均有可观的影响(尤其是对 La Niña 事件),说明 TIWs 这样的中、小尺度过程也可对大尺度过程(如 ENSO)产生反馈作用(图 3)。但目前对 TIWs 所引发的风场强迫和反馈作用的分析和模拟实验是相当初步的,对 ENSO 预报的影响还未有人研究过,需进一步详细研究 TIWs 在海气耦合模式中的作用和对 ENSO 的反馈过程,评估 TIWs 对大尺度 ENSO 现象、过程和预报的影响。

4.2 海洋多圈层过程对 ENSO 的调制影响——一个海洋生物引发的加热效应的例子

ENSO 主要由物理过程所控制,但也受一些多圈层过程的调制影响,这里给出一个海洋多圈层过程

对 ENSO 调制影响的例子。

近年来的研究表明,热带太平洋海洋生物与物理存在相互作用,进而可影响 ENSO 的特性。一方面, ENSO 相关的物理过程控制热带太平洋的海洋生物状况;另一方面,上层海洋浮游生物量的存在和变化,反过来调制太阳辐射在上层海洋的垂直穿透,从而导致海洋生物所引发的加热和对海洋物理过程产生反馈影响,从而形成海洋生物-物理及气候间相互作用。例如,海洋生物加热效应对物理过程的影响可用太阳辐射在上层海洋的垂直穿透度来描述,可简单地引入穿透深度变量(H_p)来表征,并作为气候系统中海洋物理和海洋生态系统的主要关联变量。在热带太平洋海盆尺度上, H_p 表现出与 ENSO 循环紧密相关的年际变率,对太阳辐射在上层海洋的传输有调节作用,并在海洋混合层热收支中起着重要影响,如发现热带太平洋中海洋生物加热的年际变率可对 ENSO 起负反馈作用。因此在诊断和模拟研究中,需要充分考虑海洋生物加热所导致的对气候的反馈作用,但当前热带太平洋海盆尺度模式和全球海气耦合模式中对海洋生物加热效应的表征及海洋生物-气候相互作用方面仍存在着极大的不确定性,特别是目前集海洋物理、生物和化学分量于一体的综合模式在真实模拟 ENSO 所引发的 H_p 年际异常方面仍有相当的困难;目前描述海洋生物和化学状态的资料非常缺少。

与此同时,卫星观测提供了前所未有的海盆尺度上海洋水色(ocean color)数据,为描述海洋生态过程和海洋生物-气候相互作用等成为可能,如已利用卫星观测资料导出一个可表征热带太平洋 H_p 年际变率的经验模式,并将其嵌入到一个海洋-大气耦合模式中以表征海洋生物引发的加热效应和海洋生物-气候相互作用^[8],结果表明海洋生物加热效应对 ENSO 有很大的调制影响(图 4)。但需结合现有的资料和模拟数据对海洋生态过程与 ENSO 之间的关系进行更深入研究,特别是评估多圈层过程(包括海洋生态引发的加热效应等)及相互作用对 ENSO 预报的影响等。本节也给出如何利用卫星资料表征这一反馈过程

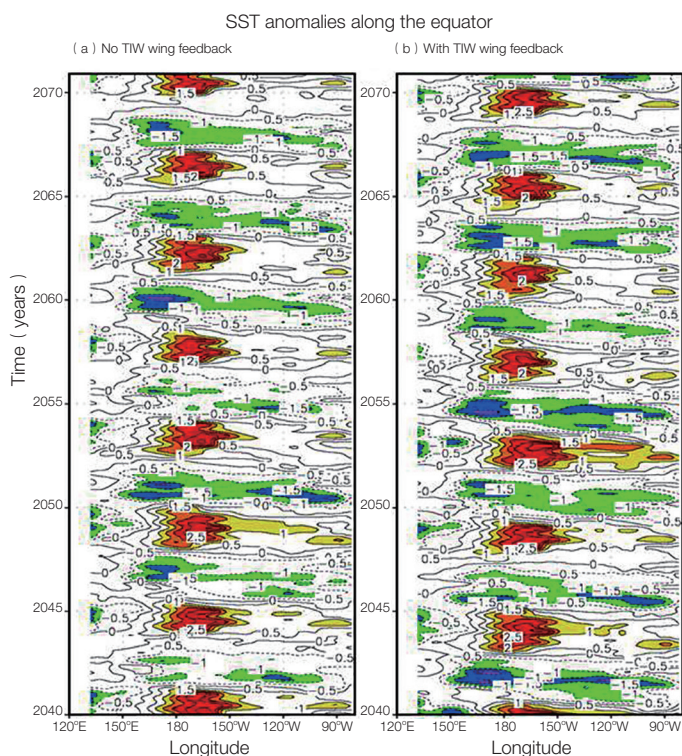


图 3 模拟得到的海表温度(SST)异常沿赤道的纬圈-时间分布 (a) 未考虑 TIWs 引发的风场反馈效应; (b) 考虑 TIWs 引发的风场反馈效应。SST 的等值线间隔为 0.5 °C

以改进海气耦合模式对 ENSO 模拟的例子。

5 结语

由于海洋与相关的全球气候和环境变化关系到整个人类社会的前途与命运，海洋科学研究的重要性和迫切性上升到了前所未有的高度。海洋研究涉及多尺度过程及与地球系统其他圈层之间相互作用（如海气界面、海陆界面和海底界面等），表现出复杂性、多样性和多变性等，目前，海洋的研究存在极大的挑战和困难。对海洋的研究应从地球系统的视角，开展海洋与其他圈层（如大气圈、水圈、生物圈、岩石圈等）相互作用的前沿综合性研究；应采用观测和模式相结合的综合手段；促进多学科交叉观测和模拟系统的建立、改进和完善，开展未来海洋和气候及环境变化的预测和预估研究，为“海洋强国”和“21 世纪海上丝绸之路”的国家战略提供重要科技支撑。

ENSO 是热带太平洋海气相互作用最为重要的产物，是地球系统中最可预报的年际变化信号。研究 ENSO 的

形成机理，及时准确地预报 ENSO 事件的发生发展和演变，具有巨大的经济价值。因此，ENSO 及其热带海洋-大气相互作用研究是当今气候动力学前沿课题。目前对 ENSO 的研究已经取得了巨大成果，但仍不能对其发生、发展的全过程进行准确、实时的预测；目前对引发 ENSO 事件的主要海气过程（即斜温层反馈机制）已有充分的认知和模拟能力，但对热带太平洋中存在的多尺度和多圈层过程及其相互作用对 ENSO 调制作用的理解还很有限，当前模式还不能或未能很好地表征这些过程。作为例子，这里给出海洋生物加热过程和 TIWs 在调制 ENSO 中的作用，以说明 ENSO 受海洋多尺度和多圈层过程调制影响而表现出的多样性和多变性。

针对目前我国在走向深海大洋中所急需解决的重大科学问题（如 ENSO 调制机理和 ENSO 实时预报等），应集中开展以地球系统耦合模式为工具，以数值模拟为主要手段，以 ENSO 为聚焦点，积极开展西太平洋海洋观测网的建立和完善，实时监测 ENSO 现象和过程；同时，开展海洋多尺度和多圈层过程相互作用研究（如发展和改进包括海洋和大气等在内的多圈层耦合模式）；结合海洋资料同化技术，以改进 ENSO 事件实时预报和短期气候预测。

参考文献

- 1 李崇银. 气候动力学引论. 北京: 气象出版社, 1995.
- 2 巢纪平. ENSO 循环机理和预测研究. 北京: 气象出版社, 2003.
- 3 王凡, 王嘉宁. 我国热带西太平洋科学观测网初步建成. 中国科学院院刊, 2016, 31(2): 258-262.
- 4 Zhang R H, Zheng F, Zhu J, et al. A successful real-time forecast of the 2010-11 La Niña event. Scientific Reports, 2013, 3: 1108.
- 5 Zhang R H, Gao C. The IOCAS intermediate coupled model (IOCAS ICM) and its real-time predictions of the 2015-16 El Niño event. Science Bulletin, 2016, 61: 1061.
- 6 Zhang R H, Rothstein L M, Busalacchi A J. Origin of upper-ocean warming and El Niño change on decadal time scales

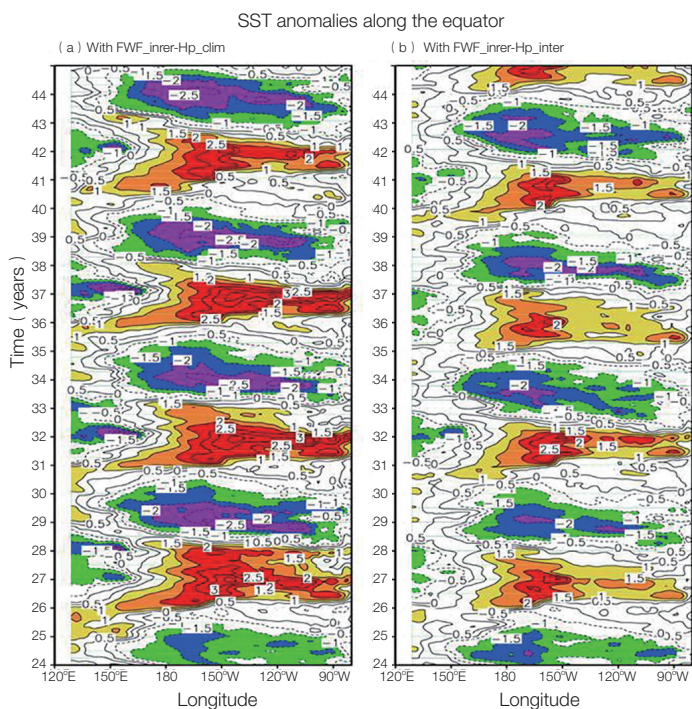


图4 模拟得到的海表温度 (SST) 异常沿赤道的纬-时间分布 (a) 没有考虑海洋生物加热年际变化引发的气候反馈效应; (b) 考虑海洋生物加热年际变化引发的气候反馈效应。SST 的等值线间隔为 0.5°C

- in the Tropical Pacific Ocean. *Nature*, 1998, 391: 879-883.
- 7 Zhang R H. Effects of tropical instability wave (TIW)-induced surface wind feedback in the tropical Pacific Ocean. *Climate Dynamics*, 2014, 42: 467-485.
- 8 Zhang R H, Gao C, Kang X, et al. ENSO modulations due to interannual variability of freshwater forcing and ocean biology-induced heating in the tropical Pacific. *Scientific Reports*, 2015, 5: 18506.

Oceanic Studies on Multi-scale and Multi-sphere Processes and Their Interactions: A Successful Example for El Niño Simulation

Zhang Ronghua^{1,2} Wang Fan^{1,2}

(1 Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;

2 Laboratory for Ocean and Climate Dynamics, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

Abstract The ocean is one important component of the Earth system. There exist various processes in the ocean which can have significant influences on the climate and environment on the Earth, including the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and tropical instability waves (TIWs). These phenomena and signals result from complicated interactions among oceanic processes on multiple scales and among multi-spheres (such as the atmosphere, hydrosphere, biosphere and so on). Because the ocean exhibits such great diversity and variability on various space-time scales, the ocean should be studied as a system, taking into account interactions and taking different approaches in a coherent way (observation, theories, simulation and prediction etc.). Based on process understanding, models need to be developed as a powerful tool for simulation, prediction and projection. As the strongest interannual signal on the Earth, ENSO exerts significant influences on weather and climate worldwide. Examples are given for the modulating effects on ENSO by feedback processes on multiple time scales and multi-spheres, including ocean biology-induced heating and TIWs.

Keywords multi-scale and multi-sphere processes in the ocean, oceanic observations, oceanic simulations, El Niño-Southern Oscillation (ENSO)

张荣华 中科院海洋所研究员，国家“千人计划”特聘专家，山东省“泰山学者”特聘教授，青岛海洋科学与技术国家实验室“鳌山人才”卓越科学家；中科院海洋环流与波动重点实验室副主任、学术委员会副主任。在国际重要核心期刊上发表众多具有重要影响力的学术论文（包括 *Nature* 及其子刊多篇文章）。主要研究方向包括热带海气耦合模式、热带海洋-大气相互作用、厄尔尼诺-南方涛动（ENSO）数值模拟和预测、年代际海洋气候变率、海洋反馈过程参数化及其对气候模拟影响等。E-mail: rzhang@qdio.ac.cn

Zhang Ronghua Professor at the Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences (CAS). He received his Ph. D. from the Institute of Atmospheric Physics, CAS in 1989. Then, he worked respectively at the Meteorological Research Institute/Japan Meteorological Agency (Japan), the National Oceanic Data Center (NODC)/NOAA (USA), the University of Rhode Island (USA), the Columbia University (USA), and the University of Maryland (USA). His research interests include coupled ocean-atmosphere interactions and numerical modeling, ENSO prediction and predictability, and data assimilation. E-mail: rzhang@qdio.ac.cn