

王凡,胡敦欣,穆穆,等. 热带太平洋海洋环流与暖池的结构特征、变异机理和气候效应[J]. 地球科学进展,2012,27(6):595-602. [Wang Fan, Hu Dunxin, Mu Mu, et al. Structure, variations and climatic impacts of ocean circulation and the warm pool in the tropical Pacific Ocean[J]. Advances in Earth Science,2012,27(6):595-602.]

热带太平洋海洋环流与暖池的结构特征、 变异机理和气候效应*

王凡¹,胡敦欣¹,穆穆¹,王启²,何金海³,朱江⁴,刘志宇⁵

1. 中国科学院海洋研究所,海洋环流与波动重点实验室,山东 青岛 266071;
2. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室,山东 青岛 266003;
3. 南京信息工程大学江苏省气象灾害省部共建教育部重点实验室,江苏 南京 210044;
4. 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心,北京 100029;
5. 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室,福建 厦门 361005)

摘要:热带西太平洋暖池是引发强烈的大气对流、驱动 Walker 环流和 Hadley 环流系统的主要热源之一,对全球、尤其是东亚气候有重要影响。针对我国在提升气候预测水平方面的重大和迫切需求,国家重点基础研究发展计划项目“热带太平洋海洋环流与暖池的结构特征、变异机理和气候效应”于2011年7月正式立项。项目拟解决的关键科学问题包括:①调控暖池形成和变异的海洋环流多尺度相互作用过程;②海洋动力过程在暖池热盐结构变异中的作用及其机理;③暖池变异对不同类型 El Niño 影响机理的异同和对东亚季风变异的调制机理。围绕上述关键科学问题,项目将以暖池变异为中心,关注影响和控制暖池结构与变异的关键海洋过程,以及暖池海气相互作用影响 ENSO 循环、东亚季风年际变异的过程和机理,重点组织开展以下3个方面有针对性的调查研究:①热带太平洋环流和暖池的结构和变异特征;②热带太平洋环流与暖池相互作用的关键过程和机理;③暖池变异的海洋—大气耦合过程及其气候效应。在此基础上,项目将力争阐明暖池影响东亚季风和我国气候变异的过程、机理与敏感区,改进模式的混合参数化方案,提出有效提高 ENSO 预报技巧的同化方案,为我国短期气候预测能力的提高提供科学支撑。

关键词:热带西太平洋;暖池;环流;ENSO;东亚季风

中图分类号:P731;P732.6 文献标志码:A 文章编号:1001-8166(2012)06-0595-08

1 引言

热带西太平洋暖池(简称暖池)是全球海洋中最大的暖水团,是引发强烈的大气对流、驱动 Walker 环流和 Hadley 环流系统的主要热源之一,对全球、尤其是东亚气候有重要影响。以暖池变异为中

心,关注并开展影响和控制暖池结构与变异的关键海洋过程,以及暖池海气相互作用影响 ENSO 循环、东亚季风和我国气候年际变异的过程和机理的研究,具有迫切的国家需求和重要的科学意义。由中国科学院海洋研究所牵头,中国科学院大气物理研究所、中国海洋大学、南京信息工程大学、厦门大学

* 收稿日期:2011-10-27;修回日期:2012-04-13.

* 基金项目:国家重点基础研究发展计划项目“热带太平洋海洋环流与暖池的结构特征、变异机理和气候效应”(编号:2012CB417400)资助.

作者简介:王凡(1967-),男,山东青岛人,研究员,项目首席科学家,主要从事海洋环流动力学研究. E-mail:fwang@qdio.ac.cn

和中国科学技术大学等单位联合申请的国家重点基础研究发展计划项目“热带太平洋海洋环流与暖池的结构特征、变异机理和气候效应”于 2011 年 7 月正式立项。

本项目将通过组织开展针对性的海上观测和系统深入的理论研究,揭示调控暖池变异的关键海洋过程及海气耦合过程,阐释其影响和调控不同类型 El Niño 和东亚夏、冬季风的机理及关键敏感区;在此基础上,发展更为合理、有效的海洋混合参数化方案和 ENSO 耦合同化预报方案,为提升我国气候预测能力提供科学依据和技术支撑。

2 立项依据

2.1 我国气候预测和海洋环境安全保障的重大需求

众所周知,热带西太平洋海洋环流系统和暖池邻近我国,对于我国气候与海洋环境变化的预测和国家安全保障至关重要。作为海洋中最大的暖水区,暖池是全球最强劲的 Walker 环流和 Hadley 环流对流中心,在各种时间尺度上的变化对东亚季风、ENSO 等气候现象的发生和发展及我国旱涝、冷暖(灾害)等重大气候灾害的形成都具有极为重要的影响。暖池及其周边海域海洋环流复杂、多变,数支赤道流和西边界流在海洋纬向与经向热量、质量输送和东西太平洋、南北半球水交换过程中起关键作用,直接影响和调制暖池自身的变异和暖池区海洋一大气相互作用过程。大力开展调控暖池变异的关键海洋、大气过程,特别是热带太平洋海洋环流动力过程,及其对东亚和我国气候变化影响的调查研究,是提高我国气候变异研究水平和预报能力的迫切需要。随着我国国力的日益提升和国家利益的不断拓展,邻近我国近海的热带西太平洋成为我国海洋战略从近海挺进大洋必须重点关注和掌控的海域。在热带太平洋气候变异敏感区开展科学调查研究,除了满足科学发展和气候预测需求之外,还将为我国海洋环境保障能力的扩展和提升起到科技先导作用。

2.2 具有重要的海洋动力学和气候动力学意义

热带太平洋海洋环流与暖池的结构、变异机理和气候效应是当今国际海洋与气候研究的前沿科学问题。自 20 世纪 80 年代国际“热带海洋与全球大气研究计划(Tropical Ocean and Global Atmosphere, TOGA)”以来,热带太平洋海洋环流与海气相互作用一直是国际海洋与气候研究领域的热点。2008 年启动的“西南太平洋海洋环流与气候试验(South-

western Pacific Ocean Circulation and Climate Experiment, SPICE)”和 2010 年启动的由我国发起、8 个国家 19 个研究机构参加的“西北太平洋海洋环流与气候试验(Northwestern Pacific Ocean Circulation and Climate Experiment, NPOCE)”等国际合作计划,标志着新一轮研究热潮的兴起。随着研究的不断深入,新的、更具挑战性的科学问题被提出。比如,如何解释海洋环流在暖池的形成与变异过程中的重要作用;如何正确地认识暖池区海洋混合等物理过程并合理可行地改进其参数化方案,以消减数值模式对西太平洋暖池的模拟偏差;如何理解混合层、障碍层、温跃层并存情况下的暖池热、盐收支过程和海气耦合过程,及其对 20 世纪 90 年代以来频繁出现的中部型 El Niño(或称 El Niño Modoki,或称暖池 El Niño)发生、发展及其可预报性的影响机理;是否存在与东亚季风变异和我国气候异常相关的不同敏感区等,都是亟待解决的科学问题。本项目将针对关键海域、关键过程开展有针对性的观测和系统研究,以期深化对上述重要科学问题的认识,丰富热带海洋动力学和气候动力学的内涵,具有重要的科学意义。

本项目是 NPOCE 计划启动后国际上实施的首个重大调查研究项目,将进一步巩固和提升我国在该计划和西太平洋海洋与气候研究领域的科学地位和国际影响力。

3 国内外研究现状和发展趋势

3.1 暖池及其气候效应

20 世纪 80 年代以来,暖池日益得到关注和重视,国际上在暖池的形成、变异机制及对 ENSO、东亚季风的影响等方面开展了广泛研究。

(1) 暖池形成及变异机制

暖池形成和维持是海洋过程和大气过程共同作用的结果。这些过程主要包括:海表温度的东西梯度和赤道信风之间的动力学正反馈过程;海表温度与潜热通量之间的热力学局地负反馈过程;海面温度与对流云及海面短波辐射通量之间的热力学负反馈过程;海洋平流的热输运效应等。耦合模式的敏感性试验结果表明,如果没有海洋平流热输运,单靠大气的外强迫过程将无法形成观测到的西太平洋暖池^[1]。

各种海洋过程在不同时间尺度上对暖池变异的作用程度各不相同。研究表明,暖池 SST 的季节内变化主要与湍流混合和海表热通量有关,季节循环

为海表热通量所主导,而年际和更长时间尺度的变化则主要受海洋环流的平流效应影响。特别是,海洋平流和赤道波在暖池纬向迁移中起重要作用,而后者是影响 ENSO 发展的一个关键因素^[2]。

障碍层是暖池热盐结构的显著特征之一,对暖池热收支的影响值得关注。障碍层存在于低盐度的上混合层与温跃层之间^[3],不仅将风应力、海面热通量等外强迫作用限制在浅薄的混合层内,使暖池 SST 对海面热通量的变化非常敏感,同时使表层暖水在风场的作用下纬向移动更加迅速^[2,4]。现有研究主要是基于模式或是赤道附近的少量观测资料,不足以深入了解暖池障碍层分布、变化及其对暖池热、盐收支的影响。

(2) 暖池变异的气候效应

暖池变异会对 ENSO、东亚季风等气候现象产生重大影响,从而引发全球和区域气候的变异。

暖池变异在 ENSO 循环中起重要作用。作为全球气候年际变化的一个主要影响因子,El Niño 在过去几十年被广泛关注。早期 El Niño 被描绘成一种赤道东太平洋的海温异常事件,后来逐渐认识到 El Niño 信号起源于暖池下边界温跃层的变化。已有研究还发现,El Niño 的海温异常中心也会发生在中太平洋或西太平洋暖池区,表明暖池区存在着有别于传统 El Niño 的年际变化,即中部型 El Niño^[5~7]。中部型 El Niño 与传统 El Niño 在时空分布、遥相关模态及气候响应上都有明显区别。暖池热盐结构的时空差异很大,对不同类型 El Niño 的发生、发展及其可预报性有着尚不为人知的不同影响。

暖池局地海气相互作用直接影响东亚季风变异。暖池热状态可以通过影响副高和 Walker 环流对东亚夏季风的季节内、季节和年际变化产生重要作用。一方面,暖池中心的東西移动影响着副高位置、西伸脊点、面积等变化,并通过对流激发东亚一太平洋波列(EAP 或 PJ 型)^[8,9],进而影响季风雨带位置和我国旱涝分布。另一方面,暖池变异可以引起 Walker 环流西分支的西风异常,进而影响东亚夏季风爆发的早晚;就热力而言,暖池区存在与南海夏季风爆发早晚显著相关的核心区域^[10~12]。然而,上述 2 种经向和纬向的过程是否具有有一致性,尚不得而知。近年来,暖池对冬季气候异常的影响受到越来越多的重视。初步研究表明,暖池能够通过中高纬大气环流系统(如 Hadley 环流、西风急流等)影响东亚冬季风^[13]。但上述过程的机制,特别是暖池是否和如何影响近年来我国冬季严重灾害性极端天气

事件,有待进一步深入研究。

暖池在不同类型 El Niño 影响东亚气候的过程中所扮演的角色尚不能区分。近年来研究表明中部型 El Niño 对全球气候的影响与传统 El Niño 存在明显不同。早期由于中部型 El Niño 出现频次较少,并未引起特别关注。20 世纪 90 年代以来,中部型 El Niño 发生频率明显增加,对东亚季风环流及降水的影响过程和机理引起人们越来越多的关注;其中暖池的作用,更是目前迫切需要研究的问题。

(3) ENSO 可预报性

ENSO 预测是目前短期气候预测中最为成功的,但实际预报中仍然面临很大的挑战。自 20 世纪 80 年代以来,各国科学家广泛开展 ENSO 预测研究,发展了一系列具有较高预报技巧的预报模式。目前 ENSO 预测模型一般来说能够提前 6 个月预报 El Niño 事件的冷暖位相,做出有意义的预报。但是不同模式的预报结果仍存在着一定的差异,目前也难以评价哪个模式更加优越。以往的模式更侧重于海洋热状态的作用,近期研究发现热带太平洋盐度的年际变化对 ENSO 循环有着重要的影响。海表盐度和障碍层直接影响上层海洋层结的变化,进而对 ENSO 循环产生直接的反馈影响。数值模式敏感性试验结果显示,若去除暖池障碍层,El Niño 事件会减少甚至消除^[14]。暖池区盐度过程对不同类型 El Niño 可预报性的定量影响,目前的研究还没有涉及。不同类型 El Niño 爆发的前期征兆是否都始于暖池区内,其空间结构与发展机制如何,与暖池变异有何种关系等,是 El Niño 可预报性研究中的重要问题。

海气耦合模式对不同类型 El Niño 的预报水平有待提高。经初步比较,复杂海气耦合模式对传统 El Niño 的预报技巧相对高于中部型 El Niño,但无法准确地描述和区分控制 2 类 El Niño 的反馈机制^[15]。澳大利亚气象局短期气候预测模式的回报试验表明,只有 3 个月时长的预报可以有效地区分 2 类 El Niño^[16]。以上研究表明,中部型 El Niño 的可预报性与传统 El Niño 有一定的不同;预报时间较长时,当前模式还难以准确预报出不同类型的 El Niño。

3.2 与暖池变异相关的热带太平洋海洋动力过程

影响暖池变异及其气候效应的海洋动力过程很多。其中,向西流入暖池的南、北赤道流(South Equatorial Current, SEC; North Equatorial Current, NEC)、向东流出暖池的北赤道逆流(North Equatorial Counter Current, NECC)、赤道潜流(Equatorial Un-

der Current, EUC) 等赤道流, 以及分别从南北半球流向暖池核心区的新几内亚沿岸流 (New Guinea Coastal Current, NGCC)、沿岸潜流 (New Guinea Coastal Under Current, NGCUC) 和棉兰老海流 (Mindanao Current, MC) 等西边界流, 通过质量辐聚和热、盐平流参与甚至决定了暖池 SST 和热含量的变异。垂向 (跨等密面) 混合和侧向 (沿等密面) 混合则是暖池热盐结构形成、维持与变异的重要控制因子, 对其正确的参数化是成功模拟暖池气候平均态及其变异的基础。

(1) 热带太平洋海洋环流及其变化规律

海洋环流在热带西太平洋的辐聚是暖池形成和维持的必要条件之一, 其季节、年际变化十分显著和复杂。数值试验结果表明, NEC、SEC 自东向西流至太平洋西边界后分别经由 MC、NGCC 相向流动并交汇, 所产生的辐聚效应或者热平流是暖池形成和维持的必要条件之一^[1, 17]。观测和同化资料均表明, NEC、SEC、NECC 和 MC、NGCC 的流量都具有显著的季节、年际变化规律, 与 El Niño 有不同程度的统计相关^[18-22]。由于所使用资料、观测断面位置、时段的差异, 有关季节变异规律的研究结果相差甚大。其年际变化虽大致与 ENSO 循环有关, 但由于赤道两侧 5° 之内流速长期观测的缺乏, MC 和 NGCC 的交汇等过程透过其下游 NECC 对暖池纬向伸缩的影响仍不十分清楚, 因此与 El Niño 之间的因果关系尚未建立。

海洋环流的年际变异深受涡旋等中尺度过程的调制。值得注意的是, 在 NECC 两侧、SEC 与 NEC 之间, 除棉兰老冷涡 (Mindanao Eddy, ME) 和哈马黑拉暖涡 (Halmahera Eddy, HE) 之外, 还存在相比于暖池区其他海域更为活跃的涡旋活动^[23-25], 并普遍存在 NECC 与 NEC、SEC 之间的水质点穿越行为。一直以来, 热带海洋被认为是以波动信号占主导地位, 季节内时间尺度的海洋涡旋及其相关联的中尺度海洋过程对海洋环流年际变化的调制作用和对跨流系质量、热量运输的作用, 及其对暖池纬向伸缩的影响, 并未引起足够的重视, 尚未开展系统深入的研究。

热带与热带外之间的次表层经向交换是影响 EUC 和赤道温跃层变异的重要因素。在温跃层附近, EUC 的年际变化被发现与 ENSO 循环有关, El Niño 年减弱甚至部分反向, 与之相伴随的是赤道温跃层起伏所引起的次表层海温异常信号东传^[26, 27]。自西向东流动过程中 EUC 不断从其南北两侧获得可观的输送量, 导致其流量在中太平洋最大^[28]。该

热带—热带外次表层经向交换过程是数值模拟所显示的副热带经向环流 (SubTropical Cell, STC) 的关键环节, 但观测方面仅在中太平洋有化学示踪物的佐证^[29]。迄今对其存在性、空间分布格局和变化规律及其对 EUC 和暖池温跃层、纬向伸缩等年际变化的影响尚缺乏直接的观测证据。

同样需要关注的是, 随着在暖池变异中盐度作用的不断凸显, 海洋环流驱动的盐度平流对暖池障碍层形成和变异、暖池区盐度层结及盐度收支, 进而对暖池密度层结、热盐结构和热收支的影响, 愈发变得重要。而迄今暖池区盐度观测与温度相比少之又少。

(2) 暖池区混合过程及其参数化

有限的观测显示赤道附近存在强烈的垂向混合。热带太平洋海区垂向混合研究始于 20 世纪 70 年代初。20 世纪 80 ~ 90 年代赤道中太平洋有过 3 次垂向混合观测试验, 而在赤道西太平洋仅在 TOGA 耦合海洋大气响应试验 (Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment, COARE) 强化观测期间 (Intensive Observing Period, IOP) 开展过垂向混合观测研究。这些观测试验初步揭示了赤道流系中复杂的垂向混合过程。然而, 迄今为止在热带太平洋开展的垂向混合观测均集中在赤道附近, 暖池内大部分区域垂向混合特征与控制机理尚不清楚。目前对侧向混合的观测还比较困难, 暖池区侧向混合的直接观测研究尚未开展。

如何正确参数化混合过程是一个极具挑战性的课题。目前的海洋环流模式 (Ocean General Circulation Model, OGCM) 对暖池热盐结构的模拟与观测相比存在不容忽视的偏差, 大部分 IPCC AR4 海气耦合模式 (Coupled General Circulation Model, CGCM) 对暖池气候态的模拟存在面积偏小、SST 和形态偏差过大的问题。其重要原因之一是现有的参数化模型无法准确刻画该海区的垂向混合特征^[30]。受观测资料的限制和长久以来的忽视, 侧向混合的参数化研究目前刚刚起步。目前的绝大多数 OGCM 与 CGCM 对侧向混合的处理只是出于控制模式计算稳定性的目的。然而, 数值实验表明, 热带太平洋海洋环流与暖池热盐结构的模拟结果对侧向混合的参数化方案非常敏感^[31]。国际上已开始尝试采用考虑该海区独特物理过程的侧向混合参数化方法, 以求显著提高 OGCM 与 CGCM 模拟能力。

3.3 国内研究现状和水平

自 20 世纪 80 年代中后期开始参与 TOGA、世

界大洋环流试验(World Ocean Circulation Experiment, WOCE)、气候变异和可预测性(Climatic Variability and Predictability, CLIVAR)等国际计划以来,我国科学家在热带太平洋环流与暖池结构和变异、ENSO和东亚季风的海气相互作用机制、ENSO可预报性等方面,开展了大量颇具特色的研究。基于观测资料发现了MUC等次表层潜流,并对其结构、水团性质和形成机制等做了一系列的分析研究;提出了海洋环流在暖池形成和维持过程中起重要作用、暖池SST和热含量变异对ENSO循环和南海季风有重要影响等国际上有影响力的观点;提出了条件非线性最优扰动(Conditional Nonlinear Optimal Perturbation, CNOP)方法,有效地应用于传统El Niño的可预报性研究;采用不同复杂程度的耦合模式和海洋资料同化方法,近年来发展了几个ENSO预报系统,在实际预报中取得了较好的预报效果。

我国“十一五”期间部署了3个国家重点基础研究发展计划项目和1个国家重大基金项目,不同程度地将西太平洋海洋环流作为重点研究对象,组织了几次一定规模的调查,为我国发起的NPOCE计划得到美、日、韩等国家的支持并最终获得CLIVAR的批准,发挥了积极作用。

随着NPOCE国际合作计划的启动,“十二五”期间,我国应不失时机地部署针对热带太平洋海洋环流和暖池的重大调查研究项目,提高我国在国际海洋环流与气候研究领域的科学地位和影响力,为进一步提升我国气候变异预报能力提供新的、可持续的海洋科学支撑。

3.4 取得突破的可能性

NPOCE、SPICE等国际合作计划的实施正在引发新的热带西太平洋国际合作调查研究热潮。在这轮热潮中,我国科学家实现了从TOGA、WOCE时期以跟踪国际前沿为主,到现在发起和引领国际前沿研究计划的重大转变。时隔十几年,国际海洋与大气科学界大规模重返热带西太平洋,表明经过多年的科学研究积累和调查研究手段的更新换代,热带西太平洋环流动力学与暖池动力学研究已经到了突破的前夜。在本项目支持下,一批中国科学家在未来5年及更长时间专注于热带太平洋海洋环流与暖池变异及其气候效应的研究,通过组织跨部门、跨学科的密切合作,可望在暖池核心区海洋环流及其相关物理过程的长期、直接观测分析,暖池热盐结构和变化的海洋动力调控机制,暖池对不同类型El Niño、东亚季风和我国气候变异的影响机理,有效改

进数值模式物理过程和ENSO预报能力的新方法等方面,取得重要突破。

4 关键科学问题及主要研究内容

4.1 关键科学问题

(1) 调控暖池形成和变异的海洋环流多尺度相互作用过程

在诸多调控暖池形成和变异的海洋动力过程中,海洋环流的多尺度相互作用过程殊为重要,其亟待回答的科学问题主要有:作为上游的低纬度西边界流的交汇过程怎样影响向东流出暖池的NECC,继而NECC与其两侧反向流动的NEC、SEC之间如何相互作用?涡旋、波动等动力过程对NECC及NEC的际年变化又有何调制作用?热带—热带外次表层经向交换过程如何影响EUC和赤道温跃层变异?赤道流系内部的水质点穿越行为如何影响暖池区的质量、热量运输与交换过程?

(2) 海洋动力过程在暖池热盐结构变异中的作用及其机理

包括海洋环流的多尺度相互作用过程在内的各种海洋动力过程直接或者间接地在暖池热盐结构形成和变异中起重要作用。其中,海洋环流多尺度相互作用过程所导致的热、盐平流辐聚效应在暖池热盐结构形成和变异中的作用机理是什么,如何通过影响障碍层和盐度收支改变暖池密度层结,进而影响暖池的热结构和热收支?垂向与侧向混合过程又怎样影响暖池热盐结构的变异,如何将其正确地参数化以改进数值模式?迄今均未被充分认识。

(3) 暖池变异对不同类型El Niño影响机理之异同和对东亚季风变异的调制机理

暖池变异影响或者调制不同类型El Niño和东亚季风变异的过程和机理显然各不相同,且认识程度不一。其中,暖池变异影响中部型El Niño及其可预报性的关键过程与传统型El Niño有何差异?暖池影响东亚夏季风爆发早晚的敏感区是否存在,机理是什么?暖池变异是否和如何通过中高纬大气环流系统影响东亚冬季风?中部型El Niño频繁发生的情况下暖池区海气相互作用及其对东亚冬、夏季风的影响有什么新特点?这些都是本项目重点研究的科学问题。

4.2 主要研究内容

围绕上述关键科学问题,拟开展的主要研究内容包括:

(1) 热带太平洋海洋环流和暖池的结构与变异

特征

重点研究热带太平洋环流的年际变化特征,赤道流系各分支(NECC、NEC、SEC)之间及与低纬度西边界流(MC、NGCC)相互作用过程,涡旋等中尺度过程对 NECC 等年际变化的调制作用和水质点穿越行为的影响,热带—热带外次表层经向交换过程的存在性和时空分布格局及对 EUC 变异的影响和相对贡献;暖池热盐结构及其年际变异特征,特别是暖池盐度收支以及障碍层形成与变异机制;暖池区海气界面、混合层、障碍层、温跃层垂向及侧向混合特征、机制及通量。

(2) 热带太平洋海洋环流与暖池相互作用的关键过程和机理

重点研究赤道流系和低纬度西边界流及其辐聚效应对暖池形成和变异,特别是对纬向伸缩的影响,环流过程对暖池热盐结构、热含量和热盐收支的影响;暖池热盐结构及其变异对海洋环流的影响;垂向与侧向混合对暖池热盐结构的影响;基于观测和理论研究的暖池区垂向和侧向混合参数化方案;暖池气候态和年际变化的 OGCM 和 CGCM 的数值模拟。

(3) 暖池变异的海洋—大气耦合过程及其气候效应

重点研究暖池区海洋、大气耦合响应过程及其空间差异;传统型 El Niño 和中部型 El Niño 与暖池的关系及对我国气候的影响机理;暖池与东亚夏季风、冬季风变异之间的关系及机理,特别是影响东亚季风及我国气候异常的敏感区及关键过程;2 类 El Niño 可预报性的差异及其原因;暖池气候效应的海气耦合同化预报技术的改进;2 类 El Niño 事件的预测试验。

4.3 学术思路

本项目围绕 3 个关键科学问题和 3 个方面主要研究内容,提出了以“一个核心,两个基本点,三个关键过程,两个应用出口”为总体学术思路的研究方案。“一个核心”,即以暖池变异为核心科学问题,围绕重点调查研究区域——“热带西太平洋暖池核心区”,开展总体调查研究方案设计。“两个基本点”,即以“影响暖池变异的关键海洋环流动力过程”和“暖池变异影响 ENSO 和东亚季风的过程与机理”为出发点和落脚点,作为总体研究方案的侧重点。“三个关键过程”,即以“热带西太平洋—中太平洋之间的纬向过程”、“热带—副热带太平洋之间的经向过程”、“海气界面—温跃层之间的垂向过程”为 3 个重点关注的关键过程,设计围绕“海洋环

流与暖池结构特征和变异机理”的研究方案。“两个应用出口”,即以“改进暖池和海洋环流的模拟能力和评估不同类型 El Niño 的可预报性”、“确定暖池影响东亚季风和我国气候变异的过程及其敏感区”为明确和具体化的应用出口,设计围绕“暖池变异的气候效应”的研究方案。

5 预期目标

5.1 总体目标

揭示热带西太平洋暖池的结构特征与变异机理,特别是海洋环流动力过程对其变异的调控机制,及对不同类型 El Niño 发生、发展和可预报性的影响;阐明暖池影响东亚季风和我国气候变异的过程、机理与敏感区;提出改进海洋模式和海气耦合模式的混合参数化方案和有效提高 ENSO 预报技巧的同化方案;为我国短期气候预测能力的提高和海洋环境保障能力的扩展提供海洋科学支撑;提升我国热带太平洋环流与气候研究水平和国际影响力。

5.2 5 年预期目标

(1) 阐释热带太平洋暖池区海洋环流的年际变异规律及对暖池变异的关键调控机理。阐明基于不同尺度海洋动力过程相互作用的海洋环流及其热平流辐聚效应的年际变化规律,以及对暖池变异,特别是纬向伸缩的影响机理;建立以障碍层和盐度收支为重要环节的暖池热盐结构变异机制,阐释海洋动力过程对暖池热盐结构变异的重要影响。

(2) 探明海洋混合过程对暖池变异的影响并提出有效的参数化改进方案。客观评估海洋垂向和侧向混合过程对暖池 SST 及其热盐结构的调控作用,揭示混合的特征、控制机理及其与大尺度海洋动力、热力结构和大气强迫之间的内在联系;发展理论合理、技术可行的混合参数化方案,提高热带太平洋海洋环流与暖池的模拟能力。

(3) 阐明暖池变异对不同类型 El Niño 和东亚季风变异的影响过程和机理。揭示暖池变异影响中部型 El Niño 发生、发展的过程与机理,及其与传统型 El Niño 的差异;搞清暖池变异影响东亚季风的过程、机理及可能存在的敏感区;为深刻认识暖池的气候效应,提高我国短期气候预测能力提供科学依据。

(4) 确定影响 El Niño 可预报性的主要误差来源和类型,提出改进预报技巧的思路和方法。确定影响中部型 El Niño 可预报性的主要误差来源和类型及其与传统型 El Niño 的差异;发展体现盐度作用的 ENSO 集合预报暨耦合同化系统,改善集合预报

效果,为提高我国短期气候预测水平提供科学支撑。

(5) 培养和建立一支优秀的热带海洋环流与气候研究团队,获得一批对热带海洋动力学和我国气候变异机理与预测能力发展有重要支撑作用的创新成果。

致谢: 本文主要依据国家重点基础研究发展计划项目“热带太平洋海洋环流与暖池的结构特征、变异机理和气候效应”的申报书撰写,该申报书由参与项目申报的所有科学家共同完成。

参考文献 (References):

- [1] Clement A C, Seager R, Murtugudde R. Why are there tropical warm pools? [J]. *Journal of Climate*, 2005, 18 (24): 5 294-5 311.
- [2] Picaut J, Ioualalen M, Menkes C, *et al.* Mechanism of the zonal displacements of the Pacific warm pool: Implications for ENSO [J]. *Science*, 1996, 274(5 292): 1 486-1 489.
- [3] Lukas R, Lindstrom E. The mixed layer of the western equatorial Pacific Ocean [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96: 3 343-3 358.
- [4] Chen D. Upper ocean response to surface momentum and freshwater fluxes in the western Pacific warm pool [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2004, 23(6): 1-15.
- [5] Fu C, Diaz H, Fletcher J. Characteristics of the response of sea surface temperature in the central Pacific associated with the warm episodes of the Southern Oscillation [J]. *Monthly Weather Review*, 1986, 114(9): 1 716-1 738.
- [6] Ashok K, Behera S K, Rao S, *et al.* El Niño Modoki and its possible teleconnection [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: C11007, doi: 10.1029/2007JC003798.
- [7] Kug J S, Jin F F, An S I. Two types of El Niño events: Cold tongue El Niño and warm pool El Niño [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(6): 1 499-1 515, doi: 10.1175/2008JCLI2624.1.
- [8] Nitta T S. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation [J]. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 1987, 65: 373-390.
- [9] Huang Ronghui, Li Weijing. Influence and mechanism of summer heat source anomaly over the western tropical Pacific Ocean on the subtropical high over the East Asia [J]. *Atmospheric Science*, 1988, (Suppl.): 95-107. [黄荣辉, 李维京. 夏季热带西太平洋上空的热源异常对东亚上空副热带高压的影响及其物理机制 [J]. *大气科学*, 1988, (增刊): 95-107.]
- [10] Chen Y, Hu D. Influence of heat content anomaly in the tropical Western Pacific warm pool region on onset of South China Sea summer monsoon [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 17 (Suppl.): 213-225.
- [11] Huang R, Gu L, Zhou L, *et al.* Impact of the thermal state of the tropical western Pacific on onset date and process of the South China Sea summer monsoon [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2006, 23(6): 909-924.
- [12] Hu D, Yu L. An approach to prediction of the South China Sea summer monsoon onset [J]. *Chinese Journal of Oceanology Limnology*, 2008, 26(4): 421-424.
- [13] Li S, Hoerling M P, Peng S, *et al.* The annular response to tropical Pacific SST forcing [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(9): 1 802-1 819.
- [14] Maes C, Picaut J, Belamari S. Salinity barrier layer and onset of El Niño in a Pacific coupled model [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(24): 2 206, doi: 10.1029/2002GL016029.
- [15] Jin E K. Two flavors of El Niño and its predictability [C] // US NOAA Climate Test Bed Joint Seminar Series. Maryland, 4 February, 2009.
- [16] Hendon H H, Lim E, Wang G, *et al.* Prospects for predicting two flavors of El Niño [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L19713, doi: 10.1029/2009GL040100.
- [17] Yuan D, Hu D. Roles of the Pacific western boundary and the Mindanao Current in the evolution of the equatorial “Warm Pool” [J]. *Marine Sciences*, 1991, 3(4): 30-32.
- [18] Wyrtki K. Sea level and the seasonal fluctuations of the equatorial currents in the Western Pacific Ocean [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1974, 4(1): 90-103.
- [19] Taft B A, Kessler W S. Variations of zonal currents in the central tropical Pacific during 1970 to 1987: Sea level and dynamic height measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(C7): 12 599-12 618.
- [20] Johnson G C, Sloyan B M, Kessler W S, *et al.* Direct measurements of upper ocean currents and water properties across the tropical Pacific during the 1990s [J]. *Progress in Oceanography*, 2002, 52(1): 31-61.
- [21] Wang F, Chang P, Hu D, *et al.* Circulation in the western tropical Pacific Ocean and its seasonal variation [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(7): 591-595.
- [22] Kashino Y, Espana N, Syamsudin F, *et al.* Observations of the North Equatorial Current, Mindanao Current and the Kuroshio Current system during the 2006/07 El Niño and 2007/08 La Niña [J]. *Journal of Oceanography*, 2009, 65(3): 325-333.
- [23] Qiu B, Mao M, Kashino Y, *et al.* Intraseasonal variability in the Indo-Pacific Throughflow and the regions surrounding the Indonesian Seas [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1999, 29(7): 1 599-1 618.
- [24] Scharffenberg M G, Stammer D. Seasonal variations of the large-scale geostrophic flow field and eddy kinetic energy inferred from the TOPEX/Poseidon and Jason-1 tandem mission data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: C02008, doi: 10.1029/2008JC005242.
- [25] Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies [J]. *Progress in Oceanography*, 2011, 91(2): 167-216.
- [26] Wyrtki K. El Niño—The dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1975, 5(4): 572-584.

- [27] Weisberg R H, Wang C. Slow variability in the equatorial west-central Pacific in relation to ENSO [J]. *Journal of Climate*, 1997, 10(8):1 998-2 017.
- [28] Johnson G C, McPhaden M J. Interior pycnocline flow from the subtropical to the equatorial Pacific Ocean [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1999, 29:3 073-3 089.
- [29] Wang Q, Huang R X. Decadal variability of Pycnocline flows from the subtropical to the equatorial Pacific [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2005, 35(10):1 861-1 875.
- [30] Moum J, Lien R, Perlin A, *et al.* Sea surface cooling at the Equator by subsurface mixing in tropical instability waves [J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2:761-765, doi:10.1038/NGEO657.
- [31] Richards K, Edwards N. Lateral mixing in the equatorial Pacific: The importance of inertial instability [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(17):1 888, doi:10.1029/2003GL017768.

Structure, Variations and Climatic Impacts of Ocean Circulation and the Warm Pool in the Tropical Pacific Ocean

Wang Fan¹, Hu Dunxin¹, Mu Mu¹, Wang Qi²,
He Jinhai³, Zhu Jiang⁴, Liu Zhiyu⁵

(1. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Key Laboratory of Physical Oceanography, MOE, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 3. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 4. International Center for Climate and Environment Science, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 5. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The warm pool in the western tropical Pacific Ocean is one of the major heat sources causing strong atmospheric convection, driving the Walker circulation and Hadley cell, hence influencing the global and East Asian climate. Facing the requirement of climate prediction, variations and climatic impacts of ocean circulation and the warm pool in the tropical Pacific Ocean, a project of the National Basic Research Program Structure, was approved by the Ministry of Science and Technology of China in July, 2011. Three key scientific issues that will be addressed in the project are as follows. ① Multi-scale interactions of oceanic dynamic processes associated with the formation and maintenance of the warm pool; ② Roles of oceanic processes in warm pool's thermohaline structure and its variations; ③ Influence of the warm pool variations on different types of El Nino and the East Asia Monsoon modulation. Focusing on the above key issues centered at the warm pool's variations and climatic impacts, three aspects of investigations will be conducted under the project: ① Structures and variations of ocean circulation and warm pool in the tropical Pacific Ocean; ② Key processes and mechanisms of ocean circulation-warm pool interactions; ③ Ocean-atmosphere interactions associated with the warm pool variations and their climatic impacts. In this project, we will try to identify and understand the processes, mechanisms and sensitive areas of the warm pool variations influencing the East Asian Monsoon and climate variations in China, and offer scientific and methodological bases for improving the capacity of the short term climate prediction by developing ocean model's mixing parameterization and assimilation schemes of coupled model for the ENSO prediction.

Key words: The western tropical Pacific Ocean; The warm pool; Ocean circulation; ENSO; The East Asian Monsoon.