



郑佳喻¹ 徐康¹ 陈更新¹ 胡开明² 陈洁鹏¹
 杨磊¹ 王强³ 王鑫¹ 王卫强¹ 王东晓¹

热带印度洋环流动力与季风相互作用研究进展

摘要

围绕中国科学院战略性先导科技专项“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”之子课题“热带印度洋环流动力与季风相互作用及其影响”,从热带印度洋上层海洋环流、盐度变异对印度洋典型海气耦合过程的影响、印度洋海气相互作用及其对泛第三极水汽输送的影响方面回顾了热带印度洋环流动力与季风相互作用的研究进展.针对国内外研究发展的现状,提出热带印度洋上层经向、纬向、垂向流系间三维联动机制,海盆尺度热盐再分配对局地海-气模态变异的响应和反馈机制,热带印度洋典型海气耦合模态对泛第三极地区气候变化的影响机理等关键科学问题亟待解决.开展该子课题研究的最终目标是:全面认识和理解热带印度洋上层环流体系,加深印度洋海洋环流动力与海气相互作用及其对泛第三极经向水汽输送作用的理解,提高泛第三极地区气候预测水平,提升丝绸之路海上观测航道监测保障能力,从而为“一带一路”倡议和“21世纪海上丝绸之路”建设服务.

关键词

热带印度洋;上层海洋环流;热盐再分配;季风活动;泛第三极;水汽输送

中图分类号 P466;P732.5

文献标志码 A

收稿日期 2018-04-11

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20060502);国家自然科学基金(41521005,41505074,41776023,41731173,41676013);热带海洋环境国家重点实验室(中国科学院南海海洋研究所)自主研究项目(LTOZZ1702)

作者简介

郑佳喻,男,博士,助理研究员,主要研究季风与海气相互作用.jyzheng@scsio.ac.cn

徐康(通信作者),男,博士,副研究员,主要研究热带海气相互作用.xukang@scsio.ac.cn

- 1 中国科学院南海海洋研究所 热带海洋环境国家重点实验室,广州,510301
- 2 中国科学院大气物理研究所 季风系统研究中心,北京,100029
- 3 中国科学院海洋研究所 海洋环流与波动重点实验室,青岛,266071

0 引言

我国“一带一路”倡议已经进入全面推进阶段,其中“21世纪海上丝绸之路”重点方向之一为“连接中国-中南半岛经济走廊,经南海向西进入印度洋,衔接中巴、孟中印缅经济走廊,共同建设中国-印度洋-非洲-地中海蓝色经济通道”,而热带印度洋作为桥梁,地理位置的重要性不言而喻.随着“一带一路”倡议不断推进,我国在印度洋沿岸国家投资成倍增长,一大批重点投资建设的基础设施项目相继动工.例如,作为“孟中印缅经济走廊”的重要港口之一,斯里兰卡的汉班托塔港于2017年底已正式由中国招商局集团运营.因此,加强热带印度洋海洋环流与海气相互作用的研究以及保障海上互联互通,不但关系到我国海上石油运输航线是否通畅,而且对我国护航编队补给和安全也至关重要.

泛第三极(Pan-Third Pole)地区泛指以青藏高原为核心的第三极和受其影响的东亚、南亚、中亚、中东欧等广阔地区^[1],其与“丝绸之路经济带”高度重合,是“一带一路”的核心区.泛第三极地区面积约2 000多万km²,包括20多个国家和地区,涵盖30多亿人口,亦是季风变化主导的南北向断面核心区(图1).为了应对“一带一路”建设中的资源环境重大挑战,中国科学院实施了战略性先导科技专项“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”.西风和季风相互作用是触发泛第三极环境变化的动力源^[1],因此,研究泛第三极地区由季风引起的水汽输送乃至气候变率,不仅直接关系到30多亿人的生产生活,而且能为研究泛第三极的水资源变化提供气候背景,从而为建设绿色丝绸之路服务.

热带印度洋是全球海洋热量高度聚集海域之一,也是全球海-气界面上的能量、动量和物质交换最强烈的地区之一,其巨大的热惯性对泛第三极和东亚-西北太平洋等地区气候变化产生重要影响.热带印度洋,尤其是与泛第三极接壤的北印度洋(图1红线方框区),是“一带一路”顺利推进的关键海域,不仅是我国未来大西南能源通道的可选航道,也是通过季风活动将水汽输送至泛第三极地区的重要源地(图1绿线方框区).夏季南亚季风爆发,会从温暖的印度洋洋面携带大量的水汽进入南亚、泛第三极乃至东亚地区,形成当地季风雨季.因此,热带印度洋海洋环流和海气耦合过程的变异将影响泛第三极地区和中国气候变化,特别是我国西南和西北地区旱涝状况,从而间接影响我国粮食安全战略.

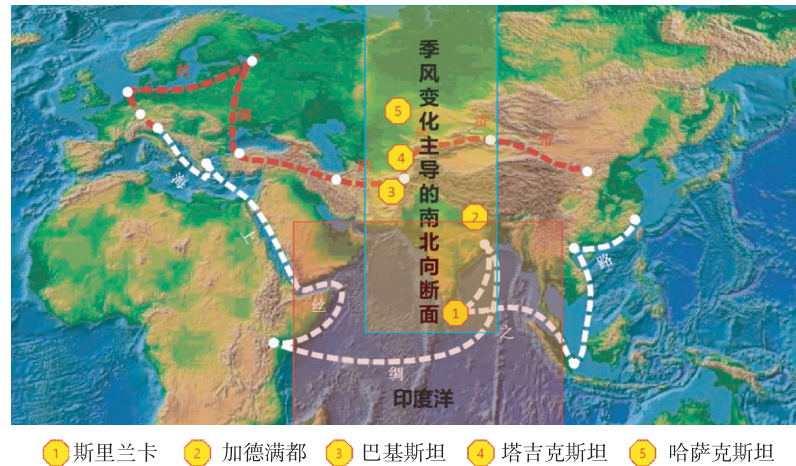


图1 季风变化主导的南北向断面,红虚线为陆上丝绸之路,白虚线为海上丝绸之路,绿线方框为受季风活动影响的南北向断面,红线方框为热带印度洋,本图由文献[1]中图2修改而得
Fig. 1 The meridional section dominated by monsoon variabilities, red (white) dashed line denotes the Silk Road on land (sea) and green-line (red-line) box indicates the monsoon-influenced meridional section (tropical Indian Ocean region). The figure is modified from the study of YAO et al.^[1] (see their Fig. 2)

本文试图从热带印度洋上层海洋环流、盐度变异对印度洋典型海气耦合过程的影响、印度洋海气相互作用及其对泛第三极地区水汽输送的影响等三个方面进行国内外研究现状回顾,并基于此提出亟待进一步深入研究的科学问题.中国科学院战略性先导科技专项“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”(以下简称“Pan-TPE 专项”)之子课题“热带印度洋环流动力与季风相互作用及其影响”,选择热带印度洋作为关键区,以研究区域海洋环流与海气耦合模态的变异为切入点,从季风活动和水汽输送角度,系统研究热带印度洋环流动力与季风相互作用及其影响机理.其目的是要揭示热带印度洋海气耦合过程影响泛第三极地区经向水汽运输的规律,提高北印度洋海洋环流和泛第三极气候预测水平,并提升丝绸之路海上观测航道监测保障能力.

1 热带印度洋上层海洋环流

热带印度洋上层海洋环流系统在纬向方向上主要由南北赤道流和逆流、赤道潜流组成,在经向方向上主要包括西边界流在内的浅层经向翻转环流(Shallow Meridional Overturning Circulation, SMOC).然而,与其他大洋不同的是,热带印度洋受信风和季风同时控制:在 10°S 以南,全年盛行的是东南信风;在 10°S 以北,表层风场受季风控制,冬季为东北季风而夏季为西南季风,并且在赤道上印度洋没有持续的东风,因而不存在赤道上升流^[2],这导致印度洋

SMOC 与其他两个大洋有着不同的特征.在年平均意义下,在太平洋和大西洋分别存在南北半球对称的两支副热带经圈环流;在印度洋,其浅层翻转环流结构主要由与跨赤道环流(Cross-Equatorial Cell, CEC)相关的翻转结构和位于南半球的STC(subtropical cell)组成^[3-7](详见文献[6]的图1).此外,印度洋还通过印尼贯穿流和南海贯穿流等关键海洋通道与热带西太平洋相沟通,这些独特的地理位置和海洋动力与热力强迫使得热带印度洋上层海洋环流系统明显区别于其他大洋.

赤道流系、浅层经向翻转流和边缘海环流是热带印度洋环流体系的重要组成部分.它们对东西海盆两侧、近赤道区和边缘海区域的热盐再分配起到重要作用,进而影响区域乃至全球气候变化.不同于世界其他大洋,印度洋赤道上空平均风场为弱西风,并有重要的半年周期.与之对应的是,印度洋赤道流系呈现复杂的多尺度变化特征,尤以位于上混合层的Wyrcki急流、温跃层的赤道潜流、温跃层底部的赤道中层流最为显著.随着能量被波动过程传输至近赤道区域和边缘海,赤道动力过程调制着边缘海的环流结构.然而,热带印度洋环流体系特征与变异仍需进一步研究加以揭示.特别是,间歇性的赤道潜流及赤道中层流变异特征尚不清楚,其能否将西印度洋相对偏冷水水输运至东印度洋?赤道动力过程对边缘海的环流结构的影响亦不明确.

印度洋经向翻转环流亦不同于其他大洋经向翻

转流,由 CEC 相关的翻转结构和位于南半球的 STC 组成,呈位于浅层、不关于赤道对称的独特特征.STC 主要由信风驱动,而 CEC 是经向压力梯度和跨赤道流相互平衡的结果^[8].由于热带印度洋大部分处于热带低纬度区域,涌升的冷水获得可观的热量收入,其携带的热量(约 $-0.2\sim-0.8$ PW)是南北半球印度洋区域乃至全球南北半球海洋之间的热量运输中的重要组成部分.印度洋跨赤道经向热运输从季节内尺度到年际尺度都有很强的变率.在季节变化上,夏(冬)季向南(北)输运,且夏季比冬季输运大.年际尺度上,跨赤道热运输的准两年变率最为显著^[9-11].关于跨赤道经向热运输,多数研究没有在经向翻转的大框架下考虑问题,对经向水体与热运输的估算未联系 CEC 的上下支.因此,不考虑 CEC 的变异对热运输的影响,也就无法刻画 CEC 对印度洋上层海洋热含量的调制.

印度洋赤道动力过程与边缘海环流结构密切联系^[12-16].在风场的驱动下,赤道开尔文波传播至印度洋东边界和印度尼西亚海域,显著影响着苏门答腊和爪哇岛沿岸海平面^[17]和印度尼西亚贯穿流的多尺度变化^[18-19].沿岸开尔文波反射出的罗斯贝波,对孟加拉湾中北部^[20-21]和东南印度洋海平面和温跃层的变异产生重要调制(详见文献[12]中图13).赤道风场亦能通过波动的方式影响孟加拉湾等边缘海环流结构等的变异.这意味着,赤道纬向流和边缘海环流的年际变异皆受赤道风应力年际振荡的重要驱动.例如,当赤道开尔文波到达大洋东边界时,会在以赤道南北 5° 左右为中心反射出关于赤道对称的罗斯贝波,显著调制着近赤道区域的海平面和环流结构^[22].由于印度洋东边界岸线倾斜和纬向环流的强剪切,赤道对称波在印度洋会变得不对称,呈现北强南弱的结构^[23].中国科学院南海海洋研究所在近赤道东印度洋($90.5^\circ\text{E}, 5^\circ\text{N}$)处所布潜标观测到了强经向流速,其本质上与赤道对称/不对称波密切相关^[16].赤道对称波在东印度洋产生类似涡旋结构,同时影响 5°N 断面经向流和赤道纬向流.类似涡旋结构的西传,影响整个印度洋赤道区和孟加拉湾等边缘海环流结构的变异.

2 盐度变异对印度洋典型海气耦合过程的影响

盐度是调控海洋热动力过程最重要的物理参数之一,能够反映海洋对大气异常的响应,亦是全球水

循环和气候异常的关键要素.许多研究指出热带太平洋盐度与 ENSO 联系紧密^[24-26].首先,热带太平洋盐度的变化受到 ENSO 的显著影响,在 El Niño 年太平洋中部海表面高温区域的蒸发增强,西太平洋和印尼贯穿流海域降水增强^[24];其次,盐度也可以反过来调节 ENSO 的变化.Zheng 等^[25]的研究指出 La Niña 发展年热带中西太平洋负异常的淡水通量和正异常的盐度增加海水密度和降低上层海洋稳定度,同时使得正的浮力通量减小和混合层加深,这些海洋过程加强混合层的垂直混合和次表层海水的卷夹,从而加强热带中东太平洋的海表温度负异常.

随着越来越多的研究结果揭示热带印度洋和太平洋的海气耦合过程具有紧密的联系^[27],热带印度洋海气过程(如淡水通量和盐度效应等)对海气耦合年际模态的调制影响逐渐受到重视.赤道和边缘海环流变异对盐度再分配也有重要影响,其中淡水通量对海表盐度变化贡献较小,而平流输送是导致盐度变化的主要因素.研究表明,纬向 Wyrki 急流对赤道印度洋盐度变化有重要影响^[28],同时赤道潜流被证实能引起显著的次表层高盐水舌东侵^[29],对印度洋东西海盆次表层盐度交换起着重要作用.此外,在夏季风盛行期间,由于河水的大量注入,淡水通量对孟加拉湾沿岸的盐度也有显著的影响^[30].

相反地,印度洋的盐度异常也可以通过改变上层海洋的层结和海洋环流,影响海洋热力和动力过程,特别对热带印度洋主要海气耦合过程(如印度洋偶极子(IOD)和印度洋海温海盆一致模(IOB))起到调控作用^[29,31-35].Du 等^[35]研究指出在 IOD 负(正)位相,赤道异常西风(东风)减弱(加强)爪哇-苏门答腊沿岸上升流,使得盐度升高(降低).在 IOD 正位相成熟期,低盐水向西平流,减小赤道西印度洋的混合层深度,有利于赤道西印度洋海表温度的升高.在 IOD 正位相衰减期,低盐水越过赤道向西南印度洋输送,当叠加 El Niño 的影响时,离赤道的低盐水向极平流加强^[29].另外,在正 IOD 事件中,热带东南印度洋表层高盐水使得局地混合层的密度增加,破坏上层海洋的稳定层结稳定性,即垂向对流加强,导致温跃层中的冷水通过卷夹效应进入混合层,引起表层海温降低,对 IOD 的发展产生正反馈^[31-32].热带印度洋盐度的主模态呈西北-东南倾向偶极型^[36],秋季印度洋盐度偶极型对印度洋海温 IOD 的形成也具有正反馈作用^[37].盐度对热带印度洋压强梯度力的水平和垂向分布有着重要影响,表层盐度梯度引

起的压强梯度力变化加强赤道印度洋秋季 Wyrki 激流的流速和进一步向东延伸^[38], 从而对 IOD 的发展演变起到反馈作用^[29]. 目前, 印度洋水平环流对热盐再分配的影响尚待系统研究加以刻画, 盐度对印度洋海气耦合年际模态(如 IOB, IOD 等)的反馈也需要进一步研究加以揭示. 开展热带印度洋盐度变异与海气耦合模态关系的研究, 能提高对印度洋海洋环流与气候变率的理解, 从而提高印度洋气候变率及泛第三极地区气候变率的预测和预估水平.

3 印度洋海气相互作用及其对泛第三极水汽输送的影响

泛第三极地区是“一带一路”的核心区(图 1), 主要以青藏高原为主体的第三极向西扩展, 涵盖青藏高原、帕米尔高原、兴都库什、天山、伊朗高原、高加索、喀尔巴阡等山脉. 西风和印度季风相互作用是触发泛第三极环境变化的动力源, 而热带印度洋是泛第三极地区重要的水汽来源. 夏季西南季风爆发, 会从温暖的印度洋洋面携带大量的水汽进入南亚、泛第三极以及东亚地区, 形成当地季风雨季. 研究发现, 夏季热带印度洋, 特别是北印度洋海表温度异常, 能通过影响热带季风环流变异, 从而影响到泛第三极核心区的水汽输送. 当北印度洋海水偏暖时, 从印度洋到西北太平洋的西季风减弱^[39], 而西北太平洋副热带高压西侧的西南和东南季风增强^[39-40], 导致青藏高原东侧降水明显偏多^[41]. 此外, 北印度洋偏暖时, 南亚高压偏南偏强^[42], 副热带高空急流偏南^[43], 这也可能会影响到泛第三极地区水汽输送. Dong 等^[44]揭示北印度洋海表温度异常导致的南亚强对流活动可以将低层水汽输送到高层大气, 并输送到青藏高原地区, 对第三极当地降水有明显的影响. 因此, 要研究印度洋对泛第三极水汽输送的影响, 还需要加强对热带印度洋海洋环流动力和海气相互作用的研究.

夏季北印度洋海温异常受前期春季热带印度洋跨赤道反对称模态影响. 在年际尺度上, 北半球春季热带印度洋对流以及风场的主导模态主要表现为热带印度洋对流和海温南北跷跷板震荡以及大气低层 C 型跨赤道环流异常^[45-46]. 当反对称模态表现为北印度洋东风异常南印度洋西风异常时, 太阳辐射增强以及蒸发减弱将使北印度洋在夏季显著偏暖. 研究表明, 印度洋春季反对称模态受到 ENSO 的影响: 在 El Niño 消退期, 热带南印度洋下沉海洋 Rossby

波动会造成热带西南印度洋偏暖以及对流偏强^[47], 激发大气反对称 Rossby 型环流异常, 形成跨赤道反对称模态^[46]. 因此该跨赤道反对称模态是冬季 ENSO 影响夏季印度洋海温及周边气候的关键桥梁. 此外, 热带印度洋局部海气耦合反馈过程也会造成这种跨赤道反对称模态^[45]. 春季印度洋反对称模态和 ENSO 关系并不稳定^[48], 且其不稳定的成因尚不清楚. 虽有一些研究表明这可能与印度洋热盐结构的变化^[49]、印度洋海气耦合过程变化^[50]等因素有关, 但还是影响着夏季印度洋海温以及泛第三极地区水汽输送的预测水平, 增加了泛第三极地区气候预测的难度. 总之, 我们对春季印度洋反对称模态的形成机制认识并不充分, 有必要进一步阐述热带印度洋春季跨赤道反对称模态形成机制, 并定量探讨其对泛第三极水汽输送及气候的影响.

4 关键科学问题和主要研究内容

根据 Pan-TPE 专项子课题立项计划书, 回顾了热带印度洋上层海洋环流、盐度变异对印度洋典型海气耦合过程的影响和印度洋海气相互作用及其对泛第三极水汽输送的影响等方面的研究进展. 本子课题拟围绕“热带印度洋环流动力与季风相互作用及其影响”这一核心主题, 解决下面 3 个关键科学问题: 1) 热带印度洋上层海洋流系间三维联动机制; 2) 海盆尺度热盐再分配对局地海-气模态变异的响应和反馈机制; 3) 热带印度洋海气相互作用对季风环流和泛第三极经向水汽输送的影响.

围绕上述关键科学问题, 主要开展了以下研究:

1) 季风作用下热带印度洋上层环流年际变异及其机理研究. 利用观测资料和模式资料, 重点考察印度洋上层环流的垂直结构与联系, 探讨它们对波动能量垂向传播的影响; 刻画赤道动力过程与边缘海环流结构变异的动力联系, 完善和丰富北印度洋环流年际变化的动力框架; 年际尺度上, 刻画印度洋赤道流系和跨赤道翻转环流的联系, 丰富热带印度洋上层经向、纬向和垂向流系间三维联动机制.

2) 热盐结构变异对印度洋典型海气耦合过程和季风环流的影响研究. 综合考虑经向和纬向相结合的海盆尺度环流变异对热盐输运的影响, 阐明印度洋环流变异与热盐再分配的物理联系; 通过统计和诊断分析, 并结合数值模拟实验, 厘清盐度对印度洋海温、上层层结和环流变异的调制作用, 揭示其对印度洋海气耦合过程和季风环流的反馈.

3) 热带印度洋海气相互作用对泛第三极经向水汽输送的影响研究. 在众多典型海气耦合模态中, 重点研究春季反对称模态. 利用观测资料和海气耦合模式, 诊断影响春季反对称模态的外部强迫因子、海洋动力过程和海气耦合反馈过程, 根据外部强迫和气候内部变率的贡献, 构建热带印度洋春季反对称模态的形成机制; 定量研究热带印度洋海气相互作用对印度洋海温及其上空季风环流的影响, 并探讨其对泛第三极经向水汽输送与气候变化的影响.

5 总结

泛第三极地区以青藏高原为核心并向西扩展, 与“丝绸之路经济带”高度重合, 其环境变化的重要性受到全球关注. 作为与泛第三极地区直接接壤的海洋, 印度洋是“21 世纪海上丝绸之路”的重要组成部分. 因此, 热带印度洋是“一带一路”顺利推进的关键海域, 不仅是我国未来大西南能源通道的可选航道, 也是泛第三极地区重要的水汽来源地. 随着“一带一路”建设的实施, 研究热带印度洋环流动力与季风相互作用, 并探讨它们的关键物理过程及其对泛第三极气候变化的影响, 具有重要的科学和社会价值.

北印度洋独特的地理位置与海洋热/动力强迫使得热带印度洋上层海洋环流系统明显区别于其他大洋. 本课题从热带印度洋上层海洋环流、盐度变异对印度洋典型海气耦合过程的影响、印度洋海气相互作用及其对泛第三极水汽输送的影响这 3 个方面详细回顾了热带印度洋环流动力与季风相互作用的研究进展. 针对国内外研究发展的现状, 提出 3 个亟待解决的关键科学问题: 1) 热带印度洋上层经向、纬向、垂向流系间三维联动机制; 2) 海盆尺度热盐再分配对局地海-气模态变异的响应和反馈机制; 3) 热带印度洋典型海气耦合模态对泛第三极地区气候变化的影响机理. 开展该课题研究的最终目标是: 全面认识和理解热带印度洋上层环流体系, 加深印度洋海洋环流动力与海气相互作用及其对泛第三极经向水汽输送作用的理解, 提高泛第三极地区气候预测水平, 提升丝绸之路海上观测航道监测保障能力, 从而为“一带一路”倡议和“21 世纪海上丝绸之路”建设服务.

致谢 本文主要依据中国科学院战略性先导科技专项“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”之子

课题“热带印度洋环流动力与季风相互作用及其影响”的实施方案撰写. 该实施方案是在项目申报过程中, 由参与子课题申报的所有科学家共同完成的, 作者为项目起草小组成员. 另外, 本文还得到了中国科学院率先行动“百人计划”学术帅才项目、广东省引进领军人才项目、中国科学院国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划的资助.

参考文献

References

- [1] 姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏, 等. 从青藏高原到第三极和泛第三极[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(9): 924-931
YAO Tandong, CHEN Fahu, CUI Peng, et al. From Tibetan Plateau to Third Pole and Pan-Third Pole[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(9): 924-931
- [2] Schott F A, Xie S P, McCreary J P. Indian Ocean circulation and climate variability[J]. Reviews of Geophysics, 2009, 47(1): RG1002
- [3] McCreary J P Jr, Kundu P K, Molinari R L. A numerical investigation of dynamics, thermodynamics and mixed-layer processes in the Indian Ocean[J]. Progress in Oceanography, 1993, 31(3): 181-244
- [4] Schott F A, Dengler M, Schoenfeldt R. The shallow overturning circulation of the Indian Ocean[J]. Progress in Oceanography, 2002, 53(1): 57-103
- [5] Schott F A. Shallow overturning circulation of the western Indian Ocean[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A (Mathematical, Physical and Engineering Sciences), 2005, 363(1826): 143-149
- [6] Lee T. Decadal weakening of the shallow overturning circulation in the south Indian Ocean[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(18): 355-366
- [7] Trenary L L, Han W. Causes of decadal subsurface cooling in the tropical Indian Ocean during 1961-2000[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35:L17602
- [8] Pérez-Hernández M D, Hernández-Guerra A, Joyce T M, et al. Wind-driven cross-equatorial flow in the Indian Ocean[J]. Journal of Physical Oceanography, 2012, 42(12): 2234-2253
- [9] Jayne S R, Marotzke J. The dynamics of ocean heat transport variability[J]. Reviews of Geophysics, 2001, 39(3): 385-411
- [10] Loschnigg J, Meehl G A, Webster P J, et al. The Asian monsoon, the tropospheric biennial oscillation, and the Indian Ocean zonal mode in the NCAR CSM[J]. Journal of Climate, 2003, 16(11): 1617-1642
- [11] Chirokova G, Webster P J. Interannual variability of Indian Ocean heat transport[J]. Journal of Climate, 2006, 19(6): 1013-1031
- [12] Chen G X, Li Y L, Xie Q, et al. Origins of eddy kinetic energy in the Bay of Bengal[J]. J Geophys Res, 2018, DOI: 10.1002/2017JC013455
- [13] Chen G X, Han W Q, Li Y L, et al. Intraseasonal

- variability of upwelling in the equatorial eastern Indian Ocean[J]. *J Geophys Res*, 2015, 120(11): 7598-7615
- [14] Chen G X, Han W Q, Li Y L, et al. Interannual variability of equatorial eastern Indian Ocean upwelling; local versus remote forcing [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2016, 46(3): 789-807
- [15] Chen G X, Han W Q, Shu Y Q, et al. The role of equatorial undercurrent in sustaining the eastern Indian Ocean upwelling [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(12): 6444-6451
- [16] Chen G X, Han W Q, Li Y L, et al. Strong intraseasonal variability of meridional currents near 5°N in the eastern Indian Ocean; characteristics and causes [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2017, 47(5): 979-998
- [17] Iskandar I, Mardiansyah W, Masumoto Y, et al. Intraseasonal Kelvin waves along the southern coast of Sumatra and Java [J]. *J Geophys Res*, 2005, 110(C4): C04013
- [18] Qiu B, Mao M, Kashino Y. Intraseasonal variability in the Indo-Pacific throughflow and the regions surrounding the Indonesian Seas [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1999, 29(7): 1599-1618
- [19] Pujiana K, Gordon A L, Sprintall J. Intraseasonal Kelvin wave in Makassar Strait [J]. *J Geophys Res*, 2013, 118(4): 2023-2034.
- [20] Cheng X H, Xie S P, McCreary J P, et al. Intraseasonal variability of sea surface height in the Bay of Bengal [J]. *J Geophys Res*, 2013, 118(2): 816-830
- [21] Girishkumar M S, Ravichandran M, McPhaden M J. Temperature inversions and their influence on the mixed layer heat budget during the winters of 2006–2007 and 2007–2008 in the Bay of Bengal [J]. *J Geophys Res*, 2013, 118(5): 2426-2437
- [22] Moore D W. Modeling of the tropical oceanic circulation [M] // Hill M N. *The sea: ideas and observations on progress in the study of the seas*. New York: John Wiley & Sons, 1977: 319-361
- [23] Han W Q, Lawrence D M, Webster P J. Dynamical response of equatorial Indian Ocean to intraseasonal winds; zonal flow [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(22): 4215-4218
- [24] Curtis S. The El Niño-southern oscillation and global precipitation [J]. *Geography Compass*, 2008, 2(3): 600-619
- [25] Zheng F, Zhang R H. Effects of interannual salinity variability and freshwater flux forcing on the development of the 2007/08 La Niña event diagnosed from Argo and satellite data [J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2012, 57: 45-57
- [26] Gouriou Y, Delcroix T. Seasonal and ENSO variations of sea surface salinity and temperature in the south Pacific convergence zone during 1976–2000 [J]. *J Geophys Res*, 2002, 107(C12): 8011
- [27] Klein S A, Soden B J, Lau N C. Remote sea surface temperature variations during ENSO: evidence for a tropical atmospheric bridge [J]. *Journal of Climate*, 1999, 12(4): 917-932
- [28] Zhang Y H, Du Y, Zheng S J, et al. Impact of Indian Ocean Dipole on the salinity budget in the equatorial Indian Ocean [J]. *J Geophys Res*, 2013, 118(10): 4911-4923
- [29] Chen G X, Han W Q, Li Y L, et al. Seasonal-to-interannual time-scale dynamics of the equatorial undercurrent in the Indian Ocean [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2015, 45(6): 1532-1553
- [30] Rao R R, Sivakumar R. Seasonal variability of sea surface salinity and salt budget of the mixed layer of the north Indian Ocean [J]. *J Geophys Res*, 2003, 108(C1): 3009
- [31] Masson S, Delecluse P, Boulanger J P, et al. A model study of the seasonal variability and formation mechanisms of the barrier layer in the eastern equatorial Indian Ocean [J]. *J Geophys Res*, 2002, 107(C12): 8017
- [32] Masson S, Boulanger J P, Menkes C, et al. Impact of salinity on the 1997 Indian Ocean dipole event in a numerical experiment [J]. *J Geophys Res*, 2004, 109(C2): C02002
- [33] Qu T D, Meyers G. Seasonal variation of barrier layer in the southeastern tropical Indian Ocean [J]. *J Geophys Res*, 2005, 110(C11): C11003
- [34] Qiu Y, Cai W J, Li L, et al. Argo profiles variability of barrier layer in the tropical Indian Ocean and its relationship with the Indian Ocean dipole [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(8): 8605
- [35] Du Y, Zhang Y H. Satellite and Argo observed surface salinity variations in the tropical Indian Ocean and their association with the Indian Ocean dipole mode [J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(2): 695-713
- [36] Zhang Y H, Du Y, Qu T D. A sea surface salinity dipole mode in the tropical Indian Ocean [J]. *Climate Dynamics*, 2016, 47(7/8): 2573-2585
- [37] Li J D, Liang C J, Tang Y M, et al. A new dipole index of the salinity anomalies of the tropical Indian Ocean [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24260
- [38] Masson S, Menkes C, Delecluse P, et al. Impacts of salinity on the eastern Indian Ocean during the termination of the fall Wyrski Jet [J]. *J Geophys Res*, 2003, 108(C3): 3067
- [39] Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(3): 730-747
- [40] Hu K M, Huang G, Huang R H. The impact of tropical Indian Ocean variability on summer surface air temperature in China [J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(20): 5365-5377
- [41] Hu K M, Xie S P, Huang G. Orographically anchored El Niño effect on summer rainfall in central China [J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(24): 10037-10045
- [42] Huang G, Qu X, Hu K M. The impact of the tropical Indian Ocean on south Asian high in boreal summer [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011, 28(2): 421-432
- [43] Qu X, Huang G. Impacts of tropical Indian Ocean SST on the meridional displacement of east Asian jet in boreal summer [J]. *International Journal of Climatology*, 2012, 32(13): 2073-2080
- [44] Dong W H, Lin Y L, Wright J S, et al. Summer rainfall over the southwestern Tibetan Plateau controlled by deep convection over the Indian subcontinent [J]. *Nature Com-*

- munications, 2016, 7(3): 10925
- [45] Wu R G, Kirtman B P, Krishnamurthy V. An asymmetric mode of tropical Indian Ocean rainfall variability in boreal spring [J]. *J Geophys Res*, 2008, 113 (D5): D05104
- [46] Du Y, Xie S P, Huang G, et al. Role of air-sea interaction in the long persistence of El Niño-induced north Indian Ocean warming [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22 (8): 2023-2038
- [47] Xie S P, Annamalai H, Schott F A, et al. Structure and mechanisms of south Indian Ocean climate variability [J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(8): 864-878
- [48] Huang G, Hu K M, Xie S P. Strengthening of tropical Indian Ocean teleconnection to the northwest Pacific since the mid-1970s: an atmospheric GCM study [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(19): 5294-5304
- [49] Xie S P, Du Y, Huang G, et al. Decadal shift in El Niño influences on Indo-western Pacific and East Asian climate in the 1970s [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23 (12): 3352-3368
- [50] Hu K M, Huang G, Zheng X T, et al. Interdecadal variations in ENSO influences on northwest Pacific-east Asian early summertime climate simulated in CMIP5 models [J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(15): 5982-5998

Research progress on the interaction between tropical Indian Ocean circulation dynamics and monsoon

ZHENG Jiayu¹ XU Kang¹ CHEN Gengxin¹ HU Kaiming² CHEN Jiepeng¹
 YANG Lei¹ WANG Qiang³ WANG Xin¹ WANG Weiqiang¹ WANG Dongxiao¹

¹ State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301

² Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

³ Key Laboratory of Ocean Circulation and Wave Studies, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071

Abstract Based on the sub-project “Interaction between tropical Indian Ocean circulation dynamics and monsoon and its effect” of the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences “Pan-Third Pole environment change study for green Silk Road development”, this paper summarizes research progresses on the upper tropical Indian Ocean circulations, the effect of salinity variability on the classical air-sea coupled processes in the Indian Ocean, and the climatic influence of air-sea interaction in the Indian Ocean on the moisture transport over the Pan-Third Pole. Three key scientific issues are then emphasized as follow: three-dimensional linkage mechanism of the upper Indian Ocean circulation variability, response and feedback mechanism of air-sea interactions to the basin-scale thermohaline redistribution in the Indian Ocean, and influence mechanism of Indian Ocean air-sea coupled modes on the climate change over the Pan-Third Pole. Finally, the ultimate objective of this sub-project are also stated, which are: to overall understand the upper ocean circulation systems in the tropical Indian Ocean and advance the understanding of the influence of air-sea interaction in the Indian Ocean on the moisture transport over the Pan-Third Pole; to improve the prediction skill of the Pan-Third Pole climate and promote the security ability of Indian Ocean expedition and channel monitor on the maritime Silk Road; and finally to serve the Belt and Road Initiative.

Key words tropical Indian Ocean; upper ocean circulation; thermohaline redistribution; monsoon activity; Pan-Third Pole; moisture transport