

黄刚, 胡开明, 屈侠, 等. 2016. 热带印度洋海温海盆一致模的变化规律及其对东亚夏季气候影响的回顾 [J]. 大气科学, 40 (1): 121–130. Huang Gang, Hu Kaiming, Qu Xia, et al. 2016. A review about Indian Ocean basin mode and its impacts on East Asian summer climate [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (1): 121–130, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1505.15143.

热带印度洋海温海盆一致模的变化规律及其 对东亚夏季气候影响的回顾

黄刚^{1,2} 胡开明^{2,3} 屈侠^{2,3} 陶炜晨^{3,4} 姚帅磊^{1,4}
赵桂洁^{1,4} 姜文萍^{1,4}

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 全球变化研究协同创新中心, 北京 100875

3 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100190

4 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 近十几年, 热带印度洋对全球气候的作用越来越受到关注。本文从热带印度洋气候态特征、海温海盆一致模的变化规律以及对东亚夏季气候的影响方面回顾了这些研究工作, 并且对这些研究以及存在的不足做了系统的总结。

关键词 热带印度洋 东亚夏季气候 印度洋海盆一致模

文章编号 1006-9895(2016)01-0121-10

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1505.15143

A Review about Indian Ocean Basin Mode and Its Impacts on East Asian Summer Climate

HUANG Gang^{1,2}, HU Kaiming^{2,3}, QU Xia^{2,3}, TAO Weichen^{3,4}, YAO Shuailei^{1,4},
ZHAO Guijie^{1,4}, and JIANG Wenping^{1,4}

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Joint Center for Global Change Studies (JCGCS), Beijing 100875

3 Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract In recent years, more and more studies have paid attention to the impacts of Indian Ocean on global climate. This review provides a synopsis of the climatological characteristics over the Indian Ocean, Indian Ocean basin mode and its impacts on East Asian summer climate.

Keywords Indian Ocean, East Asian summer climate, Indian Ocean basin mode

收稿日期 2015-03-06; **网络预出版日期** 2015-05-25

作者简介 黄刚, 男, 1971 年出生, 研究员, 主要从事海气相互作用和东亚夏季风研究。E-mail: hg@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2012CB955604, 国家自然科学基金项目 91337105、41425019、41205049、41275083, 海洋公益性行业科研专项 201505013, 高原大气与环境四川省重点实验室开放课题 PAEKL-20124-K2

Founded by the National Basic Research Program of China (Grant 2012CB955604), National Nature Science Foundation of China (Grants 91337105, 41425019, 41205049, 41275083), Public Science and Technology Research Funds Projects of Ocean (Grant 201505013), Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province Open Project (Grant PAEKL-2014-K2)

1 引言

我国学者很早以前就研究了热带印度洋对东亚夏季气候的影响,并且提出了一些影响机理。相比太平洋海气耦合模态 ENSO (El Niño–Southern Oscillation), 热带印度洋的海温变率比较小,所以一直未被气候学家所重视 (Annamalai and Murtugudde, 2004)。

1997 年印度洋周边发生明显的气候异常。在印度洋西岸,北非发生严重的洪涝,引起数千人死亡和严重的经济损失,而在东岸发生了严重干旱,造成很多森林火灾。一些学者的研究表明该事件是由印度洋偶极子 (Indian Ocean Dipole) 导致的 (Saji et al., 1999; Webster et al., 1999)。于是印度洋的海温变化规律以及对全球气候的影响成为近十几年来国际气候研究的热点 (Schott et al., 2009)。

利用经验正交函数分析印度洋海温变化,第一模态为印度洋海盆一致模,表现为印度洋海盆一致性变暖或变冷,在 3~5 月期间达到峰值。早期的研究表明 ENSO 导致表面热通量异常,尤其是潜热通量和短波辐射通量异常,对维持印度洋海盆一致模有重要的作用 (Klein et al., 1999)。最近的研究发现印度洋海盆一致模不是简单的作为对 ENSO 强迫的被动响应,而是涉及到复杂的热带印度洋海气相互作用和海洋动力过程,并且对东亚夏季气候产生显著的影响。因此有必要对印度洋海盆一致模变化机制以及对东亚气候影响的研究进行系统地总结和回顾。

目前国内外对印度洋大洋环流以及对全球气候的影响有一些回顾性质的文章。例如 Annamalai and Murtugudde (2004) 回顾了印度洋海温与全球气候的被动和主动关系; Schott et al. (2009) 回顾了印度洋的海温变化规律以及对全球气候的影响。我国学者很早就研究了印度洋海盆一致模对中国以及东亚夏季气候的影响,但是这些研究工作没有被这些文献所总结。此外,近年来国际上对印度洋海盆一致模及其对东亚夏季气候影响的研究取得了很大的发展,但是这些研究工作也没有包含在前人回顾性质的文章中。因此全面的总结热带印度洋海盆一致模变化机制及其对东亚夏季气候的影响是很有必要的。

本文主要回顾了热带印度洋海盆一致模及其对东亚夏季气候的影响,同时包含了我国学者过去

对印度洋的研究。为了系统地回顾这些研究工作,本文安排了以下的章节:第 2 节是印度洋海温气候态特征及长期变化规律;第 3 节给出了海温海盆一致模的变化规律;第 4 节总结了印度洋海温海盆一致模对东亚夏季气候的影响;第 5 节给出了全文的总结和讨论。文章撰写的时候正值恩师叶笃正院士仙逝一周年,仅以此文表达哀思和怀念,也是为了纪念先生对东亚季风的卓越贡献。

2 印度洋海温气候态特征及长期变化规律

在全球海洋中,印度洋有其独特的变化特征。一方面,它有着比较独特的海域,其北面和西面分别被喜马拉雅山脉和非洲高原所包围,东临阿婆罗群岛和澳洲大陆,其东边界由许多岛屿组成,与热带西太平洋暖池通过印度尼西亚贯穿流相互贯通。印度洋在北半球主要分布在北纬 20°以南,在南半球一直到达南极洲。另一方面,它的热力结构也与其他的大洋不同。与太平洋和大西洋赤道上空盛行东风的气候特征明显不同,赤道印度洋上空年平均风场是西风,这使得热带印度洋的温跃层东厚西薄。与此同时,热带印度洋的海表温度比较高,就其年平均状况而言,60°E 以东,南北纬 10 度之间的热带印度洋表层海温在 28°C 以上,与西太平洋暖池连为一体 (周天军等, 2001)。

印度洋海表温度季节循环受到太阳辐射和季风环流的共同作用。在南印度洋的海温主要是受太阳辐射的影响,但北印度洋的海温受季风环流季节演变的影响很大。在春季,由于太阳辐射的增强北印度洋海温逐渐升高,但是到了夏季亚洲夏季风爆发,索马里沿岸海水上翻变冷,以及蒸发的作用使北半球海温在夏季偏低。赤道印度洋受季风循环影响的区域主要分布在西印度洋,而赤道东印度洋海温季节变化不明显,常年都在 28°C 以上 (Levitus et al., 2005)。

自上个世纪 50 年代以来,印度洋海表温度表现出明显的增温。Levitus et al. (2005) 利用 COADS (The Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) 和 WOA94 (the 1994 World Ocean Atlas) 的海温资料对近几十年来全球海表温度的变化趋势的研究表明,全球大部分热带海洋在增温,其中印度洋温度升高最为明显。周天军等 (2001) 利用 GISST (Global sea-Ice and Sea Surface Temperature) 海温

资料进一步证实, 印度洋自 20 世纪 50 年代中期以来持续变暖, 其中赤道印度洋增暖大约 0.6°C 。除了海表温度近几十年来持续增温, 印度洋深层也存在着长期变化趋势 (Alory et al., 2007; Alory and Meyers, 2009)。在印度洋副热带回流的南侧 $40^{\circ}\text{S}\sim 50^{\circ}\text{S}$ 区域海温从表层到深层近 40 年增加 1 至 2°C ; 在副热带回流的北侧 (25°S 附近) 有从海表延伸到 250 m 的增温; 在 $5^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{S}$ 区域, 在 20°C 等温面上层海水是增温的, 在次表层 (100~200 m) 海水却是降温的; 在 10°N 以北从表层到 250 m 深的海水都有明显增温趋势。

那么, 是什么原因造成印度洋不同海域、不同深度海水温度的长期变化趋势的不同? Alory et al. (2007) 等的研究表明, 印度洋南极绕流 (AAC) 北侧、副热带回流南侧海水温度的变化是由南印度洋副热带回流整体向南移动 0.5 纬度引起的。人类活动可能引起了近几十年来南极环状模态 (Southern Annular Mode) 和南极海冰的变化, 而这又引起了副热带回流的南移, 从而影响南印度洋海温异常 (Gille 2002; Aoki et al., 2003; Cai et al., 2005)。热带印度洋次表层海水变冷以及温跃层变浅可能是由于近几十年来热带太平洋的东风信风减弱引起的, 东风信风的减弱使得西太平洋暖池温跃层变浅, 并且这种信号通过印度尼西亚贯穿流导致热带印度洋温跃层变浅, 导致海洋混合层变薄和次表层海水变冷 (Alory and Meyers, 2009)。

3 印度洋海盆一致模

3.1 印度洋海盆一致模的发展过程

热带印度洋常常会伴随着 El Niño 事件逐渐变暖, 并且在滞后于 El Niño 事件成熟一个季度达到峰值。有两种过程会造成印度洋海盆模的发展。一种是大气桥过程 (Lau et al., 1997): 在 El Niño 年, 印度洋上空的对流活动被抑制从而海表接收更多的太阳短波辐射, 此外印度洋低层风速减小使海洋潜热释放减弱; 短波辐射增加和潜热释放的减弱导致了印度洋大部分区域的增暖 (Klein et al., 1999)。

另外一种海洋动力和局地海气过程。副热带西南印度洋上空低层盛行反气旋环流, 因此温跃层深度比较浅薄, 年平均只有 50 m 左右 (Xie et al., 2002; Lau and Nath, 2003)。在 El Niño 成熟期, 副热带东南印度洋低层有反气旋异常产生, 从而激发了向西传播的下沉罗斯贝波动, 波动在一个季度后

传播到了西南印度洋, 并且在温跃层比较浅薄的西南印度洋影响局地海温异常, 导致了副热带西南印度洋海温异常 (Huang and Kinter, 2002; Xie et al., 2002)。春季, 副热带西南印度洋温度异常会引起上空降水异常, 导致印度洋上空赤道南北反对称环流异常。当副热带西南印度洋气温偏暖时, 北印度洋有东风异常。初夏后, 印度季风和东亚西南季风爆发, 该东风异常会减弱气候态风场, 减少海洋向大气的潜热释放, 使北印度洋海温偏暖。该海气过程使印度洋海盆一致模态能较长时间的维持 (Du et al., 2009)。

热带印度洋海盆尺度增暖模态的维持时间长短存在着年代际变化, 在上世纪 70 年代末期以后热带印度洋海盆尺度增暖能维持到夏季, 而在前期这种海盆尺度模态衰退得很快不能维持到夏季 (Huang et al., 2010; Xie et al., 2010)。印度洋海盆尺度增暖模态的维持可能与印度洋春季反对称模态有关。Wu and Kirtman (2005) 用 1979 年后的观测资料指出, 印度洋春季海温、降水以及风场会出现反对称模态, 而且这种反对称模态和前冬赤道东太平洋海温异常有紧密联系。Du et al. (2009) 进一步指出这种反对称模态可能是热带西南印度洋激发的: 海洋波动导致了西南印度洋的增暖; 西南印度洋的增暖导致的上空对流异常形成了热带印度洋低层反对称跨赤道的流场; 这种反对称跨赤道流场从春季一直维持到初夏, 与初夏气候态风场相反, 从而减弱了印度洋低层的风场; 风场的减弱减少了海表潜热释放从而使得热带印度洋特别是北印度洋的海温异常能维持到夏季。然而, 在上世纪 70 年代末期以前, 春季风场的反对称模态和前冬中东赤道太平洋的海温关系并不密切, 从而导致了这种海盆尺度一致模消退得很快, 不能维持到夏季 (Huang et al., 2010)。

3.2 印度洋海盆一致模在全球变暖背景下的变化

在全球变暖背景下, 一类新型的 El Niño 事件自上世纪九十年代以来开始增多。与典型 El Niño 事件所对应整个中东太平洋暖海温异常不同的是, 这类新型 El Niño 事件呈现为中太平洋暖海温异常和东太平洋冷海温异常。通常将这一类称为中太平洋 El Niño 事件 (Ashok et al., 2007)。Tao et al. (2015) 研究了这两类 El Niño 事件对印度洋海温的不同作用 (图 1)。典型 El Niño 事件出现时, 印度洋呈现出整个海盆一致增暖的情况 (图 1)。而中太平洋

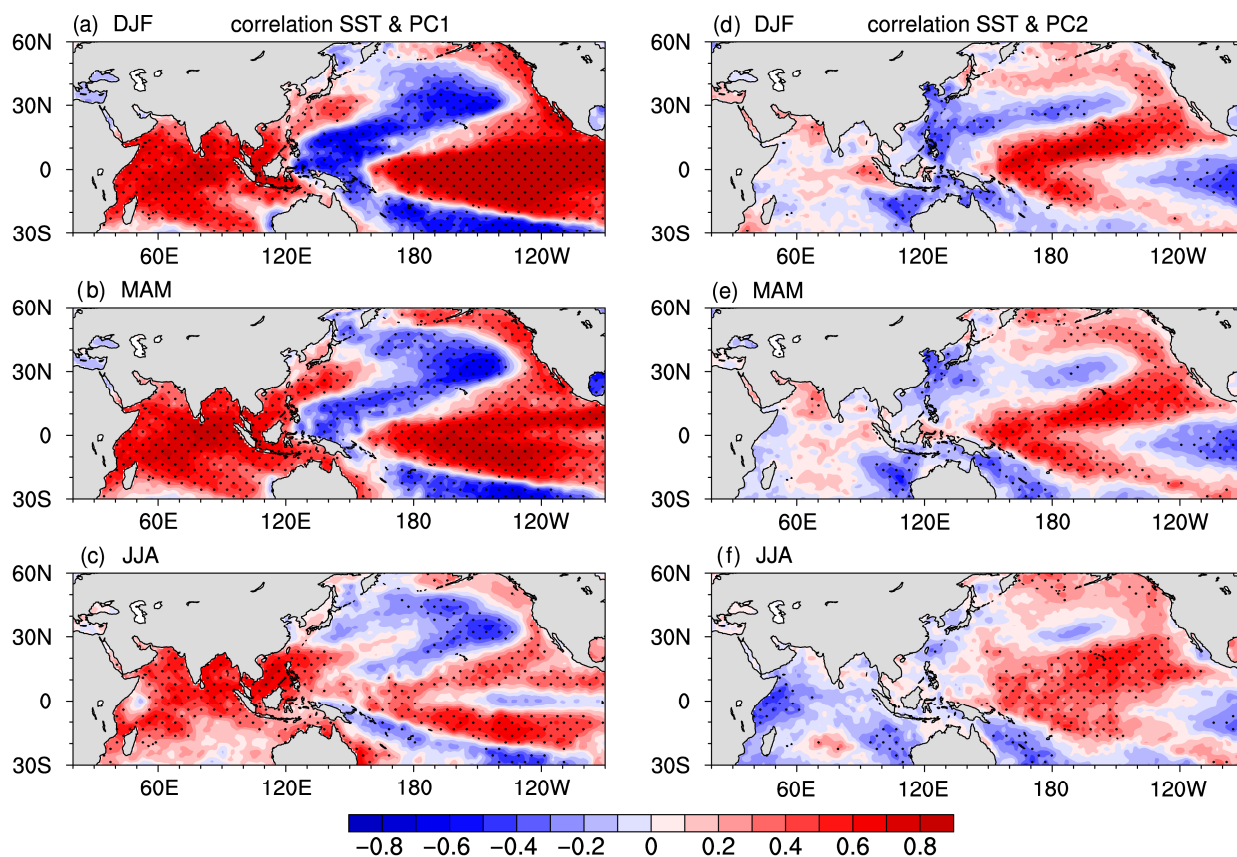


图1 印度洋海表温度与热带太平洋前冬(12月到2月)平均(a-c) Niño-3.4指数和(d-f) Modoki El Niño指数的相关系数分布季节演变:(a、d)冬季12~2月;(b、e)春季3~5月;(c、f)夏季6~8月。[引自Tao et al. (2014)]

Fig. 1 The correlations of seasonal TIO (the Indian Ocean) SST with the tropical Pacific Niño-3.4 index (right panels) and Modoki El Niño index (left panels), respectively. (a, d) Seasonal mean from December to February; (b, e) seasonal mean from March to May; (c, f) seasonal mean from June to August [From Tao et al. (2014)]

El Niño 事件发生时,印度洋海温却没有明显变化。这主要是由于发生 El Niño 事件出现时,赤道东太平洋降水异常造成大气 Matsuno-Gill 型环流响应,通过大气开尔文波动的传播,影响到印度洋;而中太平洋 El Niño 事件发生时,中太平洋降水偏多,而东太平洋降水减少,这种纬向反号降水异常不能造成明显的大气开尔文波动,从而对印度洋影响比较小。此外,中太平洋 El Niño 事件强度比典型 El Niño 事件强度偏弱,更容易受到其他大气或海洋信号干扰,从而对热带印度洋影响较弱。

Zheng et al. (2011) 利用 GFDL-CM2.1 模式研究了印度洋海盆一致模对全球变暖的响应。即使模式模拟的 ENSO 强度在未来有所减弱,且持续的时间变短,但是印度洋海盆一致模和电容器效应却增强了。这主要是由于 ENSO 在全球变暖背景下持续时间变短,使太平洋地区相应的海温异常消退得更

快,从而造成了印度洋与太平洋海温梯度的增大,增强了西北太平洋反气旋南支的异常东风。这支异常东风又会延伸到北印度洋,减弱印度洋上空的气候态风场,根据蒸发—风—海温机制会减少印度洋的蒸发,有利于印度洋海温异常的增强并持续更久。单纯利用一个模式,可能会使结论存在模式依赖性。由世界气候研究计划(WCRP)推动的“耦合模式比较计划(CMIP)”,尤其是最新组织实施的第五次耦合模式比较计划(CMIP5),为我们利用多模式研究气候变化提供了一次很好的机会。最近,Tao et al. (2015) 和 Hu et al. (2014) 利用多个 CMIP5 的海气耦合模式对印度洋海盆一致模在全球变暖背景下的变化进行了预估。他们的研究发现,在全球变暖背景下,印度洋增暖有所加强,这与水汽对海温在全球变暖下的响应增强有关。饱和水汽压和温度的关系方程是非线性的,随着温度的

增加, 同样温度的异常能造成更大的饱和水汽压的异常。因此在全球变暖背景下, 同样强度的 El Niño 事件, 能在中东太平洋大气对流层低层造成更多的气水汽异常。在热带地区, 大气对流层温廓线常常遵循湿对流调整, 当低层水汽增多时, 上空对流层温度也增加。从而导致全球变暖下, 对流层温度对 El Niño 海温异常响应的增强。对流层温度通过大气开尔文波动, 传播到印度洋, 使印度洋上空大气更温暖 [Tropospheric Temperature (简称 TT) 机制]。异常海气温差的增大导致向下的潜热通量的增大, 向上的潜热通量的减小, 从而使印度洋暖的异常变大。此外, 印度洋海温异常和西北太平洋的环流异常也存在着反馈作用: 印度洋暖海温异常能造成西北太平洋低层反气旋异常, 而其南支东风异常向西传播使热带北印度洋偏暖。在全球变暖背景下, 这两种反馈会增强, 使 El Niño 消退期印度洋暖海温异常维持得更久并且更强, 使印度洋海盆一致模和 ENSO 的联系变得更加紧密, 如图 2。

4 印度洋海温海盆一致模对东亚夏季气候的影响

在这一章节中, 我们首先回顾了早期我国学者关于印度洋海温对东亚夏季气候的影响的工作, 然后回顾了印度洋海盆一致模对东亚夏季气候的影响。

4.1 我国学者早期关于印度洋对东亚气候影响的工作

罗绍华等(1985)分析了印度洋和我国东部汛期降水的关系, 指出孟加拉湾和阿拉伯海前期冬季的海温和长江中下游梅雨期的降水有很好的关系, 当这些海区偏暖时长江流域多雨, 反之偏少。金祖辉和罗绍华(1986)指出长江流域梅雨期降水偏多时, 孟加拉湾到南海以及至西太平洋均为正海温距平, 而索马里沿岸为负的海温距平。陈烈庭(1991)提出了一个印度洋影响东亚夏季风的模型, 指出阿拉伯海至南海东暖西冷时期, 南海暖水区空气上升, 索马里沿岸冷水区气流下沉, 组成高空为南亚东风, 低层为西南季风的热成环流; 同时在赤道太平洋上常常也伴随着东冷西暖的海温异常分布, 从而导致了太平洋和印度洋上的沃克环流加强, 在南海暖水区附近形成强热带辐合带, 辐合带上升的空气向北输送, 在高空强东风急流的下方下沉, 使辐合带北侧的哈德莱环流发展, 造成副高西部脊线偏

南西伸; 而在阿拉伯海至南海东冷西暖时期, 沃克环流减弱, 整个赤道太平洋中西部为沃克反环流占据, 西太平洋下沉气流加强, 使辐合带北侧的哈德莱环流强度偏弱, 造成西太平洋副高脊偏弱偏北。

吴国雄等(2000)指出, 赤道中东太平洋的海温异常和中国气候的相关只是一种表面现象, 而印度洋的海温异常与中国气候却存在着直接的因果关系。印度洋上暖的海表温度异常加大了水汽蒸发和海气温差, 导致感热加热异常增大, 近地层出现气旋式环流。其东部异常发展的偏南风向北输送大量的水汽产生异常降水, 异常降水在向东北伸展的同时伴有深对流潜热加热, 这时对流层中低层由于加热随高度增加, 南风发展, 副热带高压在加热区东面加强。在对流层上层由于加热随高度减小, 北风发展, 副热带高压在加热区西边加强。于是当北印度洋出现正的海温异常时, 500 hPa 以及以下层次上西太平洋副热带高压将异常发展, 200 hPa 上南亚高压也将异常发展。

4.2 印度洋海盆一致模对东亚气候的影响

前人的研究表明印度洋海盆一致增暖能通过激发夏季西北太平洋反气旋异常。Xie et al. (2009)提出了印度洋激发西北太平洋反气旋的机理(如图 3 所示): 夏季热带印度洋的增暖能激发上空的暖性开尔文波动, 其向西太平洋伸展的低压槽能导致了西北太平洋低层有流向赤道的风场, 从而导致了西北太平洋边界层埃克曼辐散, 低层的辐散能抑制对流从而在西北侧激发反气旋异常, 而反气旋进一步抑制对流发展也进一步加强低层反气旋的发展。这样由印度洋激发的开尔文波动触发的局地对流一大尺度环流相互作用, 导致了西北太平洋低层反气旋异常形成和维持。并且, 西北太平洋反气旋异常能西传到北印度洋上空, 使印度洋海水变暖 (Kosaka et al., 2013)。在该过程中印度洋起一种信号储存的作用, 将冬季的 ENSO 信号储存起来, 并影响夏季东亚气候, 因此被称之为印度洋电容器效应 (Yang et al., 2007; Xie et al. 2009)。这种电容器效应在其他研究也得到证实 (Wu et al., 2009; Wu et al., 2010)。黄刚和胡开明(2008)指出北印度洋的海温在上述过程中起主要作用, 而南印度洋对西北太平洋异常反气旋的影响很弱。印度洋电容器效应对中国夏季气温以及极端高温灾害分布有重要的影响。当印度洋偏暖时, 我国夏季华南气温偏高、东北气温偏低、长江流域降水偏多 (Hu et al., 2011),

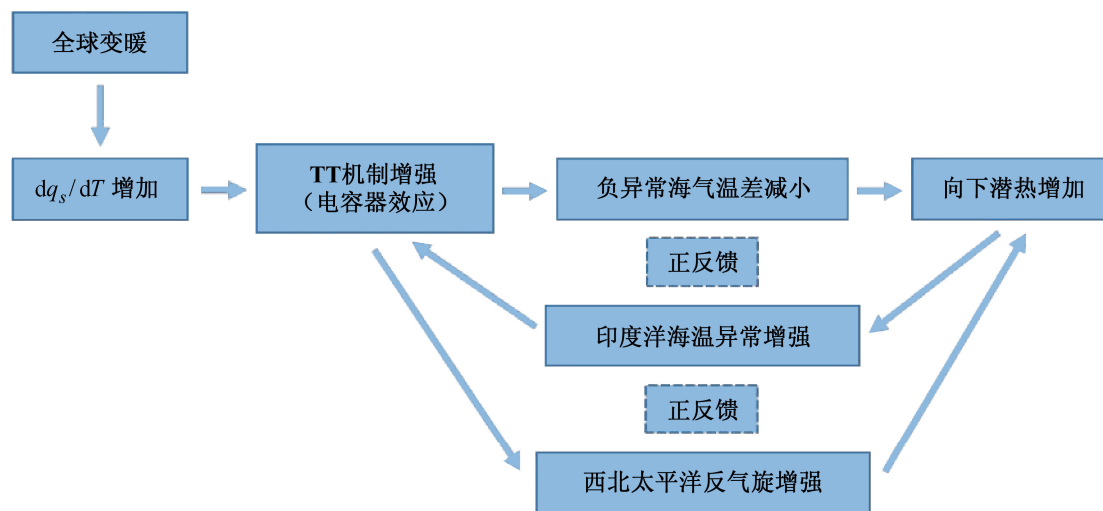


图2 气候变暖情景下印度洋海盆一致模增强的机理示意图, 其中 dq_s/dT 为大气绝对饱和湿度对气温的导数

Fig. 2 The mechanism for strengthening of TIO basin mode under global warming, and dq_s/dT represents the deviation of saturated specific humidity to air temperature

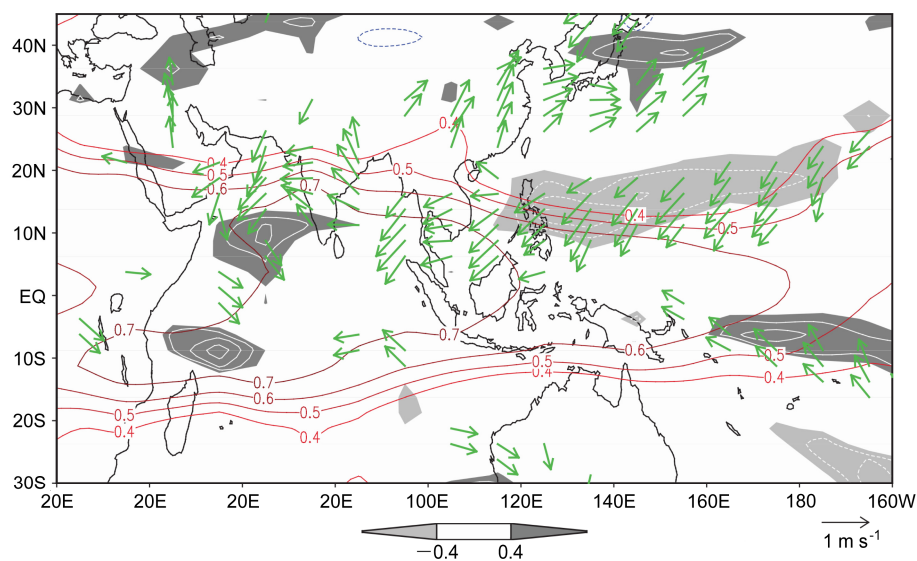


图3 夏季降水场(阴影, 间隔0.1)、850 hPa 风场(矢量)和对流层整层温度场(等值线)与冬季(12~2月) Niño3.4 指数的相关系数分布[引自 Xie et al. (2009)]

Fig. 3 Correlation of summer rainfall (shade, interval at 0.1), 850-hPa winds (vectors) and tropospheric temperature (contours, vertical average from 850 hPa to 200 hPa) with the previous winter Niño-3.4 index (seasonal mean from December to February). [From Xie et al. (2009)]

并且晚夏江南区域容易出现极端高温灾害(Hu et al., 2012, 2013)。除夏季外, 一些研究也表明冬季印度洋海盆一致模海温异常也能导致副热带西北太平洋反气旋异常(Watanabe and Jin, 2003)。

此外, Yang et al. (2007) 和 Huang et al. (2011) 指出印度洋也能影响南亚高压的变化。热带印度洋偏暖能激发上空大气 Matsuno-Gill 型响应, 引起对流层高层高度场异常从而导致南亚高压的强度偏

强位置偏南(图4)。并且, 研究发现印度洋能影响到东亚副热带高空急流位置和强度。在印度洋偏暖年, 一方面南亚高压偏强, 使南亚高压北侧气压梯度增强, 导致急流偏强; 另一方面, 印度洋抑制热带西北太平洋对流活动, 造成东亚—太平洋/太平洋—日本(EAP/PJ)遥相关波列异常, 使急流位置偏强偏南(Qu and Huang, 2012b)。而南亚高压和东亚西风急流的变化, 可引起东亚对流层中层西风带和

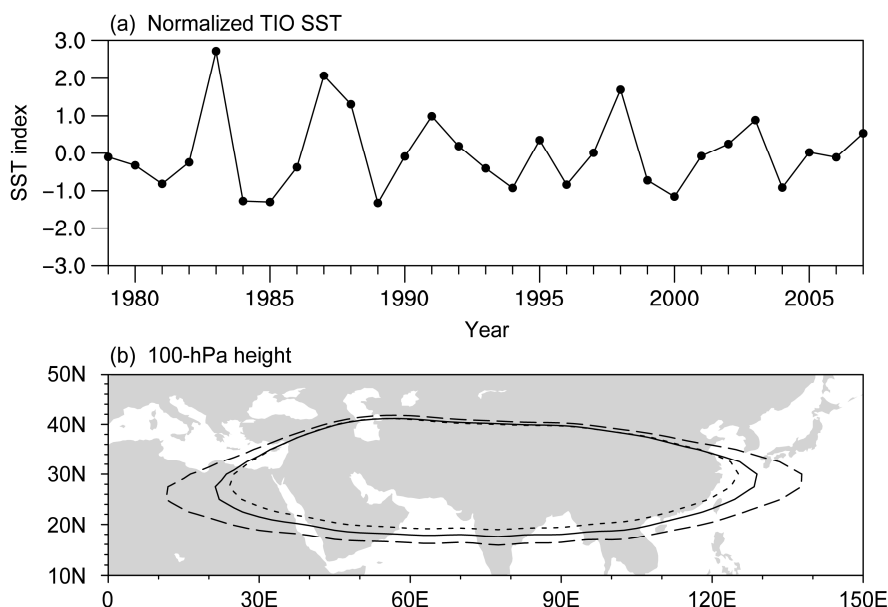


图4 1979~2007年印度洋夏季(a)区域(20°S~20°N, 40°E~100°E)平均海表温度的标准差和(b)100 hPa的16720 gpm位势高度等值线(实线、点虚线和虚线分别为气候态、印度洋暖和印度洋冷时的合成结果)。[引自 Huang et al. (2011)]

Fig. 4 (a) Normalized TIO (20°S~20°N, 40°E~100°E) SST in June–August (JJA) from 1979–2007. (b) Contour lines for 100-hPa 16720 gpm geopotential height when TIO SST is warm (dashed line), cold (dotted line) and climatological (solid line) in JJA. [From Huang et al. (2011)]

温度平流的调整, 导致上升运动的变化, 最终可影响到东亚夏季降水异常 (Kosaka et al., 2011)。

同时印度洋海盆一致模对东亚夏季气候的影响也存在着明显的年代际变化。Huang et al. (2010) 指出热带印度洋海盆模海温异常对西北太平洋反气旋的影响在近几十年明显增强(图5)。在1976/77年之前, 印度洋海盆一致模不能维持到夏季, 从而对西北太平洋反气旋的影响比较弱。与前期相比, 在1976/77年之后热带印度洋海盆模的维持时间更长, 所造成的夏季热带印度洋海温异常也更大。进一步研究表明, 印度洋上空开尔文波动的激发和海温异常的大小有关, 海温异常越大时, 波动也越强, 因此, 在1976/77年之后夏季热带印度洋海盆模海温异常更容易激发开尔文波动, 造成西北太平洋—东亚夏季气候异常; 而在1976/77年之前, 海盆模快速衰减, 夏季海温异常很弱, 其通过开尔文波对东亚—西北太平洋夏季气候所造成的影响也很弱。而这种年代际变化与印度洋海温状况有关, 在1976/77年后, 副热带西南印度洋的温跃层变浅, El Niño 激发的副热带南印度洋下沉海洋罗斯贝波对副热带西南印度洋表层海温增强, 从而使印度洋海盆一致模维持时间更久。

并且 Qu and Huang (2012a) 发现印度洋海盆一

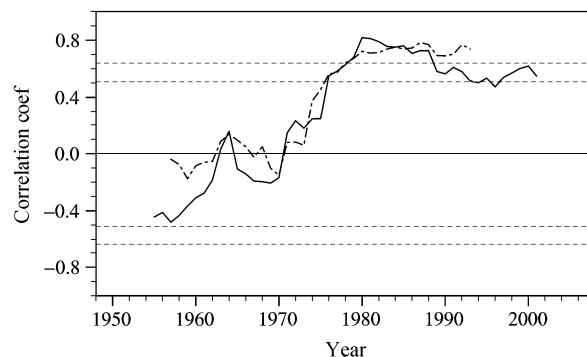


图5 观测的印度洋海盆一致模指数(夏季20°S~20°N印度洋平均温度)和西北太平洋反气旋指数的15年滑动相关(实线); 观测的NWP (northwestern Pacific) 反气旋指数与集合模式NWP反气旋指数结果的15年滑动相关(点虚线); 水平黑色虚线分别代表通过95%和99%信度检验。[引自 Huang et al. (2010)]

Fig. 5 The 15-year sliding correlations between the NWP (northwestern Pacific) anticyclone and JJA TIO SST indices of observation (solid line), and the 15-year sliding correlations of the NWP anticyclone index between observations and the ensemble-mean simulation (dash line). Horizontal black dash lines denote 95% and 99% confidence levels. [From Huang et al. (2010)]

致模对南亚高压的影响也存在明显的年代际变化。在近几十年印度洋对南亚高压的影响在增强。一方面, 这和印度洋海温变暖、海温变率增强有关。印

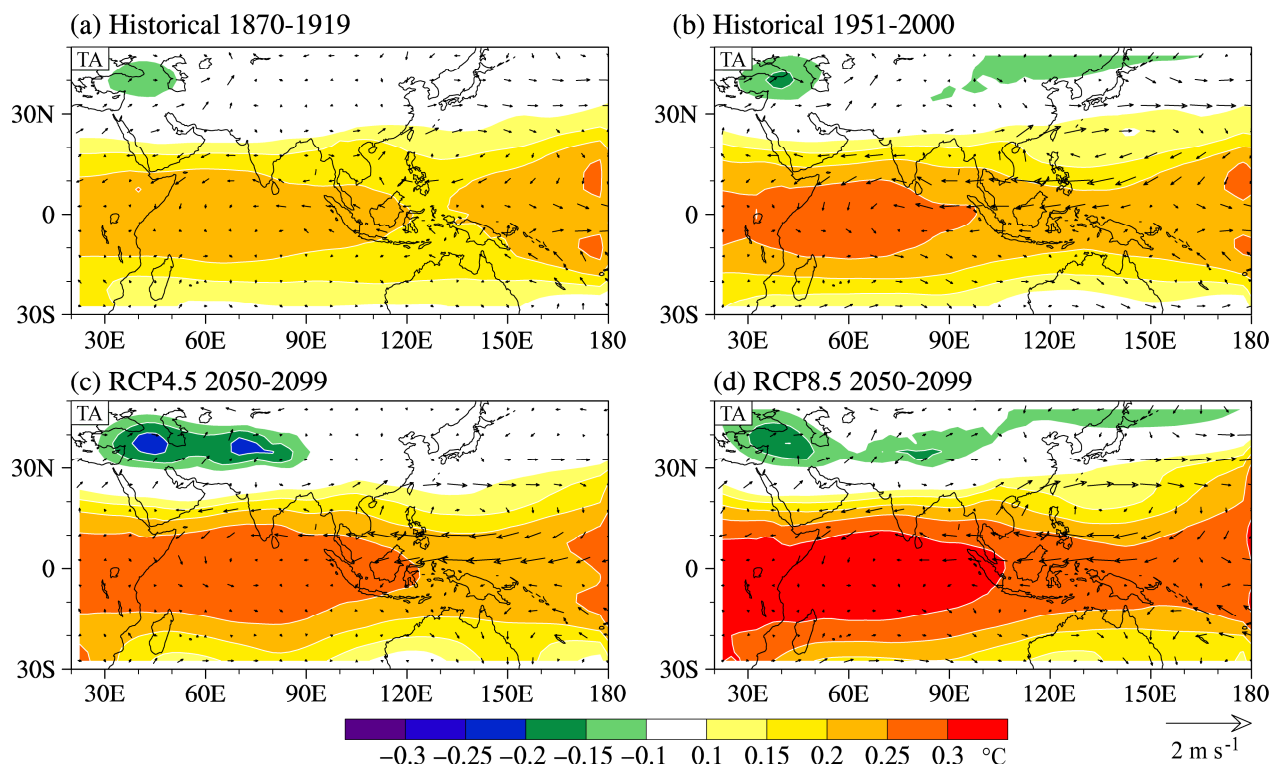


图6 CMIP5 中 (a) 1870~1919 年、(b) 1951~2000 年历史气候模拟以及 2050~2099 年 (c) RCP4.5、(d) RCP8.5 排放情景下夏季风距平场 (矢量) 和对流层温度距平场 (850~200 hPa 垂直平均, 填色, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 的对前冬 Niño-3.4 指数回归场。[引自 Hu et al. (2014)]

Fig. 6 The MME (Multiple Model Ensemble) mean of MJJ (May–June–July) tropospheric temperature anomalies (units: $^{\circ}\text{C}$; colors; vertical average from 850 to 200 hPa) and 850-hPa winds anomalies (vectors; m s^{-1}) obtained by regression on the normalized DJF (December–January–February) Niño-3.4 SST index during (a) 1870–1919 in the historical run, (b) 1951–2000 in the historical run, (c) 2050–2099 in the RCP4.5 run, and (d) 2050–2099 in the RCP8.5 run. [From Hu et al. (2014)]

度洋海温变暖, 海温变率变大, 使得印度洋能激发更强的局地对流层温度异常, 从而影响到南亚高压强度和位置。另一方面, 这种年代际变化受到印度洋海盆一致模态出现时伴随的西太平洋海温和印度上空降水状况的调节 (Qu and Huang, 2015)。印度洋海盆增暖年夏季, 如果西太平洋海水偏暖, 那么印度洋海盆一致模和南亚高压的关系紧密。同样, 印度洋海盆增暖年夏季, 如果印度上空降水偏弱, 那么印度洋海盆一致模和南亚高压的联系偏弱。

印度洋海盆一致模对东亚夏季气候的影响也受气候变暖的影响。我们研究发现全球变暖背景下印度洋海盆一致模对东亚夏季气候影响可能会增强 (Hu et al., 2014)。利用 19 个 CMIP5 海气耦合模式, 研究了 ENSO 对东亚—西北太平洋夏季气候的影响。在历史气候模拟中, 8 个模式能够模拟出 ENSO 对东亚—西北太平洋夏季气候影响的年代际变化特征。在高影响时间段, ENSO 能够通过影响印度洋海温及其导致的电容器效应影响到东亚—西北

太平洋夏季气候。在低影响时间段, 这种过程不明显。数值模式的结果和观测结果一致。此外, 我们利用 RCP4.5 (Representative Concentration Pathway 4.5) 和 RCP8.5 实验, 研究了 ENSO 对东亚—西北太平洋夏季气候影响的变化。研究发现, 随着温室气体浓度的升高, ENSO 导致的印度洋电容器效应增强, 从而对东亚—西北太平洋夏季气候的影响增强。增强机理是: 饱和水汽对温度的响应是非线性的, 全球变暖背景下, 同样的温度异常能造成更大的水汽异常; 在热带对流层温度受 SST 和低层绝对湿度控制, 因此同样的 SST 异常能造成更大的对流层温度异常, 从而使 El Niño 消退年印度洋电容器效应更强, 造成更大的东亚夏季气候的异常 (图 6)。

5 总结和展望

我国学者很早就关注到印度洋对东亚夏季气候的可能影响, 并且提出了一些可能的影响机制。

近 10 多年来随着印度洋观测资料的丰富, 国内外学者对印度洋的研究也越来越深入。本文系统地回顾了这些研究结果, 也仅以此文纪念恩师叶笃正先生对东亚季风研究的杰出贡献。

尽管目前研究从不同方面分析了印度洋海盆模的发生过程及其对东亚气候的影响机制, 但是目前研究还存在着以下不足。

首先, 目前研究表明热带印度洋海盆模能通过多个途径影响到东亚夏季气候。一些研究表明热带印度洋海盆模能通过激发开尔文波动造成副热带西北太平洋反气旋异常, 而导致东亚气候异常。另外一些研究也表明热带印度洋海盆模通过影响南亚高压和东亚高空急流而造成东亚夏季气候异常。而目前这些影响途径之间的关联尚不清楚。为了更好的理解印度洋海盆模对东亚夏季灾害性气候的影响, 需要在未来更全面的研究这些途径之间的相互抵消或促进作用。

其次, 印度洋海盆模发生过程常常伴随着其他区域海洋的海温异常, 如赤道太平洋海温异常、南海海温异常和大西洋海温异常。这些海温异常可能会干扰印度洋对东亚气候的影响, 从而影响了印度洋海盆模和东亚气候异常关系的稳定性。我们未来需要分析不同区域海温异常对东亚气候的协同或抵消作用。

最后, 目前研究表明印度洋海盆模的维持时间存在着年代际变化, 该变化机制可能和全球变暖有关, 也可能与印度洋次表层海温热力状况的年代际变化有关。为了更好的分析未来东亚气候异常, 我们需要预估接下来几十年印度洋海盆模的变化。

致谢 文章撰写的时候正值恩师叶笃正院士仙逝一周年, 回首往事, 历历在目, 仿佛您从未离去。仅以此文表达哀思和怀念, 也是将学生最近的工作进行系统的总结, 期待着更大的突破, 再次感谢先生多年教诲, 师恩深重, 心铭长存。

参考文献 (References)

陈烈庭. 1991. 阿拉伯海—南海海温距平纬向差异对长江中下游降水的影响 [J]. 大气科学, 15 (1): 33–42. Chen Lieting. 1991. Effect of zonal difference of sea surface temperature anomalies in the Arabian Sea and the South China Sea on summer rainfall over the Yantze River [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 15 (1): 33–42, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1991.01.04.
黄刚, 胡开明. 2008. 夏季北印度洋海温异常对西北太平洋低层反气旋异常的影响 [J]. 南京气象学院学报, 31 (6): 749–757. Huang Gang, Hu Kaiming. 2008. Impact of North Indian Ocean SSTA on Northwest

Pacific lower layer anomalous anticyclone in summer [J]. Journal of Nanjing Institute Meteorology (in Chinese), 31 (6): 749–757, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2008.06.001.
金祖辉, 罗绍华. 1986. 长江中下游梅雨期旱涝与南海海温异常关系的初步分析 [J]. 气象学报, 44 (3): 368–372. Jin Zuhui, Luo Shaohua. 1986. On the relationship between rainfall anomaly in middle and lower Yangtze valley during the Mei-Yu season and the anomaly on sea-surface temperature in South China Sea [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 44 (3): 368–372, doi:10.11676/qxxb1986.052.
罗绍华, 金祖辉, 陈烈庭. 1985. 印度洋和南海海温与长江中下游夏季降水的相关分析 [J]. 大气科学, 9 (3): 314–320. Luo Shaohua, Jin Zuhui, Chen Lieting. 1985. The correlation analysis of mid- and downstream Yangtze-River rainfall with the sea surface temperature of Indian Ocean and South China Sea [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 9 (3): 314–320, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1985.03.13.
吴国雄, 刘平, 刘屹岷, 等. 2000. 印度洋海温异常对西太平洋副热带高压的影响——大气中的两级热力适应 [J]. 气象学报, 58 (5): 513–522. Wu Guoxiong, Liu Ping, Liu Yimin, et al. 2000. Impacts of the sea surface temperature anomaly in the Indian Ocean on the subtropical anticyclone over the western Pacific—Two-stage thermal adaptation in the atmosphere [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58 (5): 513–522, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2000.05.001.
周天军, 宇如聪, 李薇, 等. 2001. 20 世纪印度洋气候变率特征 [J]. 气象学报, 59 (3): 257–270. Zhou Tianjun, Yu Rucong, Li Wei, et al. 2001. On the variability of the Indian Ocean during the 20th century [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 59 (3): 257–270, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2001.03.001.
Alory G, Meyers G. 2009. Warming of the upper equatorial Indian Ocean and changes in the heat budget (1960–99) [J]. J. Climate, 22: 93–113, doi:10.1175/2008JCLI2330.1.
Alory G, Wijffels S, Meyers G. 2007. Observed temperature trends in the Indian Ocean over 1960–1999 and associated mechanisms [J]. Geophys. Res. Lett., 34: L02606, doi:10.1029/2006GL028044.
Annamalai H, Murtugudde R. 2004. Role of the Indian Ocean in regional climate variability [M]// Wang C, Xie S -P, Carton J A. Earth Climate: The Ocean–Atmosphere Interaction. AGU Geophys. Monogr, 147: 213–246, doi:10.1029/147GM13.
Aoki S, Yoritaka M, Masuyama A. 2003. Multidecadal warming of subsurface temperature in the Indian sector of the Southern Ocean [J]. J. Geophys. Res., 108: 8081, doi:10.1029/2000JC000307.
Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al. 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection [J]. J. Geophys. Res., 112, doi:10.1029/2006JC003798.
Cai W, Shi G, Cowan T, et al. 2005. The response of the Southern Annular Mode, the East Australian Current, and the southern mid-latitude ocean circulation to global warming [J]. Geophys. Res. Lett., 32: 23706, doi:10.1029/2005GL024701.
Du Y, Xie S P, Huang G, et al. 2009. Role of air–sea interaction in the long persistence of El Niño-induced North Indian Ocean warming [J]. J. Climate, 22: 2023–2038, doi:10.1175/2008JCLI2590.1.
Gille S T. 2002. Warming of the Southern Ocean since the 1950s [J]. Science, 295: 1275–1277, doi:10.1126/science.1065863.

- Hu K M, Huang G, Huang R H. 2011. The impact of tropical Indian Ocean variability on summer surface air temperature in China [J]. *J. Climate*, 24: 5365–5377, doi:10.1175/2011JCLI4152.1.
- Hu K M, Huang G, Qu X, et al. 2012. The impact of Indian Ocean variability on high temperature extremes across the southern of Yangtze River valley in late summer [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 29: 91–100, doi:10.1007/s00376-011-0209-2.
- Hu K M, Huang G, Wu R G. 2013. A strengthened influence of ENSO on August high temperature extremes over the southern Yangtze River valley since the late 1980s [J]. *J. Climate*, 26: 2205–2221, doi:10.1175/JCLI-D-12-00277.1.
- Hu K M, Huang G, Zheng X T, et al. 2014. Interdecadal variations in ENSO influences on northwest Pacific–East Asian early summertime climate simulated in CMIP5 models [J]. *J. Climate*, 27: 5982–5998, doi:10.1175/JCLI-D-13-00268.1.
- Huang B H, Kinter III J L. 2002. Interannual variability in the tropical Indian Ocean [J]. *J. Geophys. Res.*, 107: 20–1–20–26, doi:10.1029/2001JC001278.
- Huang G, Hu K M, Xie S P. 2010. Strengthening of tropical Indian Ocean teleconnection to the northwest Pacific since the mid-1970s: An atmospheric GCM study [J]. *J. Climate*, 23: 5294–5304, doi:10.1175/2010JCLI3577.1.
- Huang G, Qu X, Hu K M. 2011. The impact of the tropical Indian Ocean on South Asian high in boreal summer [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28: 421–432, doi:10.1007/s00376-010-9224-y.
- Klein S A, Soden B J, Lau N -C. 1999. Remote sea surface temperature variations during ENSO: Evidence for a tropical atmospheric bridge [J]. *J. Climate*, 12: 917–932, doi:10.1175/1520-0442(1999)012<0917:RSSTVD>2.0.CO;2.
- Kosaka Y, Xie S P, Nakamura H. 2011. Dynamics of interannual variability in summer precipitation over East Asia [J]. *J. Climate*, 24: 5435–5453, doi:10.1175/2011JCLI4099.1.
- Kosaka Y, Xie S P, Lau N -C, et al. 2013. Origin of seasonal predictability for summer climate over the northwestern Pacific [J]. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 110: 7574–7579, doi:10.1073/pnas.1215582110.
- Lau K -M, Wu H T, Bony S. 1997. The role of large-scale atmospheric circulation in the relationship between tropical convection and sea surface temperature [J]. *J. Climate*, 10: 381–392, doi:10.1175/1520-0442(1997)010<0381:TROLSA>2.0.CO;2.
- Lau N -C, Nath M J. 2003. Atmosphere–ocean variations in the Indo-Pacific sector during ENSO episodes [J]. *J. Climate*, 16: 3–20, doi:10.1175/1520-0442(2003)016<0003:AOVITI>2.0.CO;2.
- Levitus S, Antonov J, Boyer T. 2005. Warming of the world ocean, 1955–2003 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32: L02604, doi:10.1029/2004GL021592.
- Qu X, Huang G. 2012a. An enhanced influence of tropical Indian Ocean on the South Asia high after the late 1970s [J]. *J. Climate*, 25: 6930–6941, doi:10.1175/JCLI-D-11-00696.1.
- Qu X, Huang G. 2012b. Impacts of tropical Indian Ocean SST on the meridional displacement of East Asian jet in boreal summer [J]. *Int. J. Climatol.*, 32: 2073–2080, doi:10.1002/joc.2378.
- Qu X, Huang G. 2015. The decadal variability of the tropical Indian Ocean SST–the South Asian high relation: CMIP5 model study [J]. *Climate Dyn.*, 45: 273–289, doi:10.1007/s00382-014-2285-3.
- Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N, et al. 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean [J]. *Nature*, 401: 360–363.
- Schott F A, Xie S P, McCreary J P Jr. 2009. Indian Ocean circulation and climate variability [J]. *Rev. Geophys.*, 47, doi:10.1029/2007RG000245.
- Tao W C, Huang G, Hu K M, et al. 2014. Different influences of two types of El Niños on the Indian Ocean SST variations [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 117: 475–484, doi:10.1007/s00704-013-1022-x.
- Tao W C, Huang G, Hu K M, et al. 2015. Interdecadal modulation of ENSO teleconnections to the Indian Ocean basin mode and their relationship under global warming in CMIP5 models [J]. *Int. J. Climatol.*, 35: 391–407, doi:10.1002/joc.3987.
- Watanabe M, F-F Jin. 2003. A moist linear baroclinic model: Coupled dynamical-convective response to El Niño [J]. *J. Climate*, 16: 1121–1139, doi:10.1175/1520-0442(2003)16<1121:AMLBMC>2.0.CO;2.
- Webster P J, Moore A M, Loschnigg J P, et al. 1999. Coupled ocean–atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997–1998 [J]. *Nature*, 401: 356–360, doi:10.1038/43848.
- Wu B, Zhou T J, Li T. 2009. Contrast of rainfall–SST relationships in the western North Pacific between the ENSO-developing and ENSO-decaying summers [J]. *J. Climate*, 22: 4398–4405, doi:10.1175/2009JCLI2648.1.
- Wu B, Li T, Zhou T J. 2010. Relative contributions of the Indian Ocean and local SST anomalies to the maintenance of the western North Pacific anomalous anticyclone during the El Niño decaying summer [J]. *J. Climate*, 23: 2974–2986, doi:10.1175/2010JCLI3300.1.
- Wu R G, Kirtman B P. 2005. Roles of Indian and Pacific Ocean air–sea coupling in tropical atmospheric variability [J]. *Clim. Dyn.*, 25: 155–170, doi:10.1007/s00382-005-0003-x.
- Xie S P, Annamalai H, Schott F A, et al. 2002. Structure and mechanisms of South Indian Ocean climate variability [J]. *J. Climate*, 15: 864–878, doi:10.1175/1520-0442(2002)015<0864:SAMOSI>2.0.CO;2.
- Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-Western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. *J. Climate*, 22: 730–747, doi:10.1175/2008JCLI2544.1.
- Xie S P, Du Y, Huang G, et al. 2010. Decadal shift in El Niño influences on Indo-Western Pacific and East Asian climate in the 1970s [J]. *J. Climate*, 23: 3352–3368, doi:10.1175/2010JCLI3429.1.
- Yang J L, Liu Q Y, Xie S P, et al. 2007. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34: L02708, doi: 10.1029/2006GL028571.
- Zheng X T, Xie S P, Liu Q Y. 2011. Response of the Indian Ocean basin mode and its capacitor effect to global warming [J]. *J. Climate*, 24: 6146–6164, doi:10.1175/2011JCLI4169.1.