

海气交互来龙去脉：ENSO 和它的小伙伴们

邓楠 201928007313011 国家空间科学中心 dengnan2019@ucas.mail.cn

摘要 本文首先介绍了 Bjerknes ENSO 理论，南方涛动和厄尔尼诺海气交互的关系。然后解释 ENSO 产生机制和两类 ENSO。在其中穿插了很多相关的 ENSO 的小伙伴们如海气交互机制比如蒸发风反馈，还提及了海气交互中的海洋和大气是如何响应的理论比如 Gill 模态。最后在描述 ENSO 对全球其他地区产生的影响，并以印度洋为例进行了进一步的分析。经过概览 ENSO 的来龙去脉，更深刻的了解了海气交互的机理，为未来的研究打下了良好的基础。

1. 引言

在 20 世纪初期，海洋学家和大气学家分别各自研究自己的领域。直到后来海气交互理论的提出给了气候研究新的活力。尤其是对于 El Niño 的研究，(BJERKNES, 1969)第一次发现南方涛动和厄尔尼诺之间的联系，并深入探究此过程中海气交互作用。

海气交互的能量形式为潜热、感热、动能交换。海洋占地球表面积 70%，吸收了大量的太阳辐射。故海洋作为一个储热器，向大气释放着热量并在和大气的相互作用中维持着地球的热平衡。海洋和大气无时无刻不在进行着热交换，但是海洋对于大气的响应慢，大气相应海洋则会更快。因此，海洋对大气的影可以总结为：基本储热，传热给大气，全球热量平衡。并且通过海洋释放的潜热，大气可以产生云过程，从而保证着水圈的循环。

大气对海洋的影响，主要是通过风应力影响海流，海温。从而体现出了大气在温盐环流，遥相关中的重要性。

本文以 ENSO 为出发点，逐步探讨 ENSO 的发现（第二节）、机制（第三节）、以及 ENSO 对其他地区的影响（第四节）。ENSO 在海洋中表现为太平洋中、东部异常增暖的厄尔尼诺，在大气中表现为东太平洋高压，印度洋和西太平洋低压的南方涛动。ENSO 对于全球气候有着极大影响，例如热带对流层异常增暖，印度洋异常增暖、南极北极环状模(SAM/NAM)，Rossby 波列、副热带急流异常。更加是影响着各个大洲的季风。因此它被视为一个气候预报的重要因子。

2. ENSO 的发现

本节将介绍 Bjerknes 1966 年论文中如何将 El Niño 和南方涛动(Southern Oscillation)联系而提出“海气交互”这一经典理论。通过 1957-58 年、1963-64 和 1965-66 观测资料，Bjerknes 联系了赤道区域中东太平洋的海温正异常和东北太平洋上中纬度异常西风。推断出太平洋赤道区 Hadley 环流的上升支得到海洋的热量，进而将此角动量带给高纬度西风带，从而西风带能维持更久。

南方涛动如图 1 最早由 Sir Gilbert Walker 发现，太平洋的塔西提岛和达尔文岛的海平面气压总是处于跷跷板状态，因此被命名为南方涛动。实际上此机理则为 Walker 环流，在西太平洋上升，在东太平洋下沉，下文将详细描述。

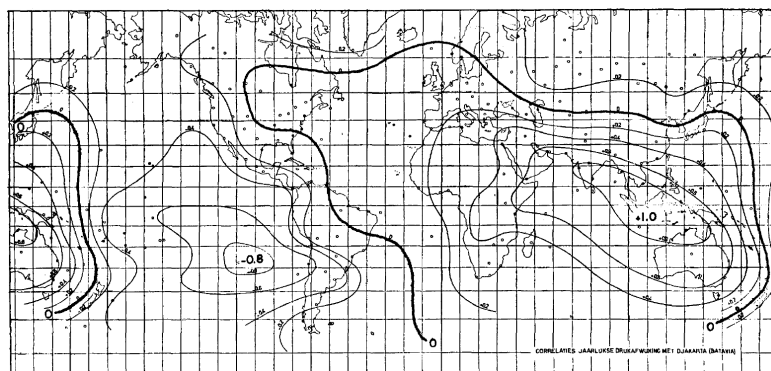


图 1 南方涛动

首先 Bjerknes 描述了西北太平洋海气交互。通过 1963-64 和 1965-1966 海平面气压发现了，东西太平洋气压呈跷跷板形式，一边升高另一边就会降低。并且通过海水温度观测资料发现，大气响应海温变化十分快速，可以在日变化的观测中体现出来，而海洋对于大气的相应更慢。

在解释赤道冷水上，文中给出许多地理因素。但是这里给出目前的理论，正常年份赤道上方为东风带。随着东北信风，东太平洋上暖水被吹向西太平洋上，造成西太平洋温跃层加深，于是东太平洋底层会有冷水上翻。在 El niño 年份的时候，上翻会因为温跃层的加深而减弱，整个温跃层趋于东西一样高。

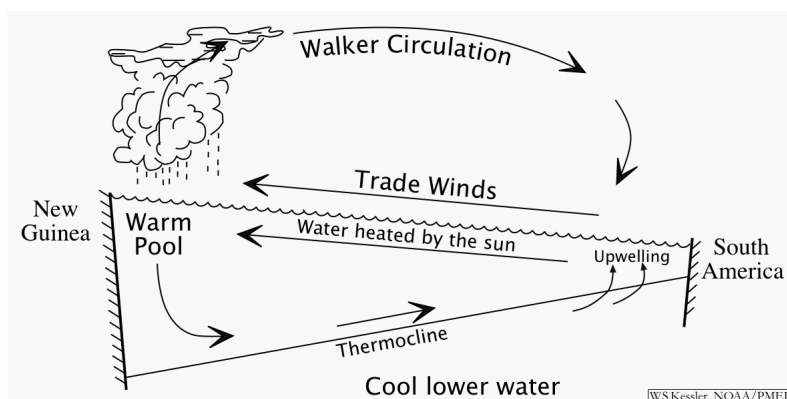


图 2 正常年海气交互剖面图

沃克环流(Walker Circulation)是一个在纬向环流，在温暖的西太平洋上升，在东太平洋下沉。它的发现基于南方涛动。南方涛动 SO 在印度尼西亚和东太平洋海平面气压呈跷跷板的状态。而南方涛动则是因为沃克环流。正常状态下，赤道东风主导则会在西太平洋由强烈的上升，导致印度尼西亚的负值，在东太平洋的强烈下沉则会由东太平洋的正值。然而当 El niño 时，西风异常存在则会使得沃克环流减弱向东太平洋移动，产生的另一个环流，在印度尼西亚气压下沉，于是印尼气压升高。又因为沃克环流的减弱，原本在东太平洋下沉的气流小了，使得原本的高气压下降。

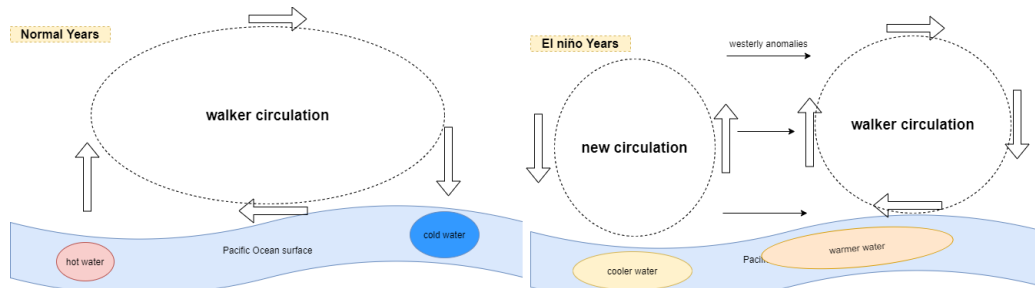


图 3 正常年和 El niño 年沃克环流

因此，ENSO 实际上就是 El niño 和南方涛动，两者分别表示了海洋和大气的 El niño 反应。它们之间可以通过 Waler 环流来解释机理。正常年 Walker 环流的东风部分将东太平洋的暖水带到西太平洋上，于是造成西暖高温跃层深厚的现象。而 El niño 年则因为西风异常，造成太平洋东部或中部偏暖，walker 环流减弱并东移。

3. ENSO 产生机制和两类 ENSO

ENSO 对于气候有着深刻的影响，例如东亚季风和印度洋海盆，可以带来很多气候灾害如暴雨。要预报 ENSO 就要从了解它的机制开始。本节将介绍海气交互的一些基础机制，并介绍 ENSO 循环的定义和相关指数。然后将介绍 ENSO 的机制和它的两种类型。

3.1. 海气交互经典的反馈型

海气交互主要的能量交换为动量和热量交换。海洋对大气风应力响应可以表现为温跃层梯度（或海标高度）。海洋的 SST 梯度影响着风应力的强度。其中，温跃层深度和 SST 呈正比。海洋对大气风应力的响应是通过 Rossby 波和 Kelvin 波的调整来实现。Rossby 波是南北方向的质量调整，周期为 6-12 个月较慢，Kelvin 波则是东西方向质量调整，周期 2 个月左右，是前者的 3 倍。Rossby 波西传，Kelvin 波则东传。其中还用到了 Sverdrup 理论，将在后文 ENSO 负反馈机制里详细解释。海洋对加热场的响应为 Gill 模态如图 4a，也为热源激发了南北两个 Rossby 波西传，和一个 Kelvin 波东传。原理为海洋加热大气，大气辐合上升，于是涡度增加但又因纬度守恒，因此涡度要向南北分别输送，于是产生了称道南北对称涡对。但实际上初始的热源并不会在开始就处于赤道南北对称，而往往都是偏北，因此就有了图 4b。

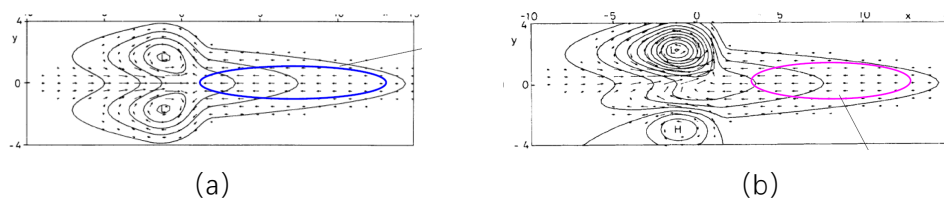


图 4 海洋大气热响应的 Gill 模态

其他海气交互理论还有大气桥理论。其主要用来解释热带的 ENSO 如何影响热带外海温。比如印度洋会在 ENSO 暖海温延后 3-8 个月也呈现暖海温趋势。其机理为，赤道东太平洋海温异常增高改变 Hadley 环流、Walker 环流，从而导致在印度洋上空有下沉运动，云量减少，以及减少印度洋上空绝对风速，从而导致印度洋海温有滞后于中东太平洋一个季度的增暖。这其中大气则被形象的称为桥，连接着两处的海温。

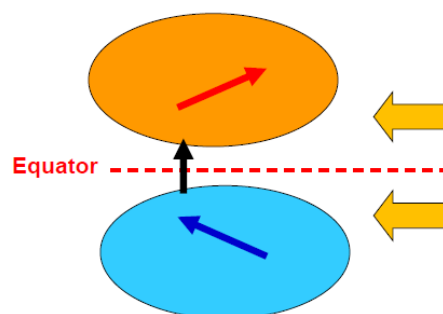


图 5 正反馈使得 ITCZ 处于被半球

另外海气交互正反馈还有经典的蒸发风反馈 WES。此被用来解释一些海洋上会持续很久的海温信号，因为和大气交互而使得其延长。比如热带太平洋和热带大西洋上，背景风下，

风异常增大，海面蒸发加强，海表温度降低，导致背景场上温度梯度的增大，进一步造成风异常增大。另外一个正反馈的例子是 ITCZ 处于北半球的机理。因为南北半球海陆分布存在差异，使得热海海洋北半球 SST 大于南半球的 SST，这种南北温度梯度造成跨越赤道的气流。南风跨赤道的过程中受到科氏力的影响，造成北半球西南风，南北球东南风。又由于赤道区域背景风均为东风，因此更加有利于北半球赤道区 SST 高。

同样的云反馈过程还有低云-辐射-SST 反馈理论。当海表面温度降低，就会使得局地的稳定度增加，从而使得低云量增加，进而组织辐射到达海表面，于是海表面温度进一步降低。

3.2. ENSO 定义和 ENSO 循环

为了更好的检测和描述 ENSO，4 个 Niño 指数被定义如图 3。其中最常用的有 3。大气中则表现为 SOI 指数。目前检测来看，ENSO 循环周期为 3~5 年。地理位置分为中太平洋型 CP 和东太平洋型 EP。并且 ENSO 具有锁相特征在冬季达到法阵的鼎盛点。因为 ENSO 不是孤立事件，而是由外界强迫造成的自身有规律振荡的过程，因此研究时会将其作为 ENSO 循环来研究。

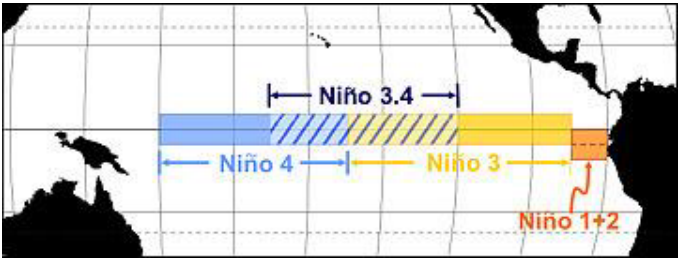


图 6 定义 ENSO 时常见 Niño 指数

一次 ENSO 循环中，有发展有减弱，则必定包含正反馈机制和负反馈机制。海气交互在过程中通常是热量和动量的交换。

3.3. CP 型 ENSO\ EP 型 ENSO

暖区在太平洋中部则称为 CP 型，在东部则称为 EP 型。图 3 左图中 EP 型的温跃层坡度较右图 CP 型的整体坡度更平缓。二者常带来完全不同的气候现象。目前在全球变暖的环境下，几个模拟较好的数值模式显示，CP 型可能会更加多。

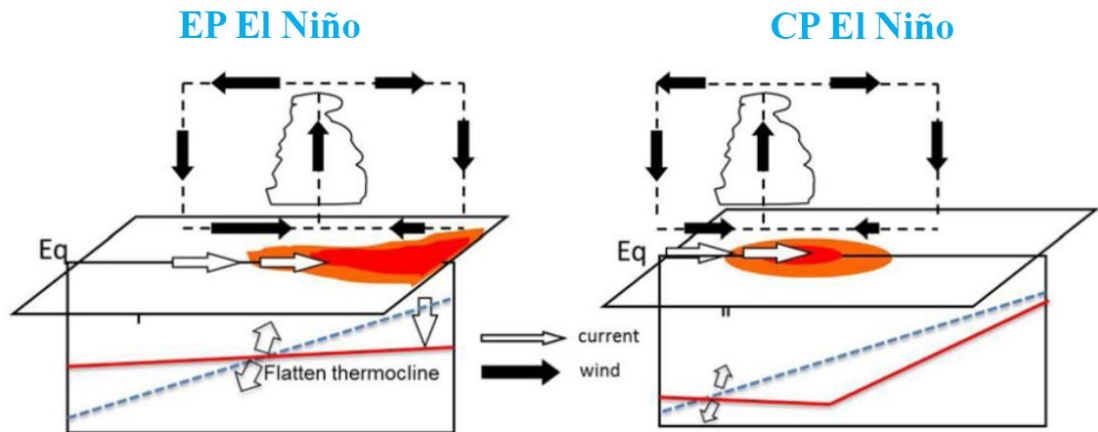


图 7 两型 ENSO，及各温跃层深度异常示意图。蓝色为平均，红色为异常。（Yeh et al. 2014）

3.4. 正反馈机制

经典的 Bejkness 正反馈机制指出，当东太平洋 SST 升高，导致太平洋 SST 纬向梯度减

小，从而使得在太平洋上的 Walker 环流减弱，南赤道流减弱，上翻冷水减少，使得纬向梯度进一步减少。

3.5. 负反馈机制

这里阐述两种经典负反馈机制，一为延迟振子理论，二为充电放电理论。

首先简述延迟阵子理论如图 7 所示，第一个阵子为 kelvin 波，在 El Nino 事件达到顶峰前，会有东太平洋增暖导致西风异常。在风应力趋势下，被赤道捕获的 Kelvin 波会东传，在东太平洋造成海水上翻，抑制其增暖。第二个阵子为 Rossby 波，在上述 kelvin 波被激发同时，在赤道外向西的 Rossby 波会被激发，在假设为刚性的边界的西边界会反射为 kelvin 波，再一轮抑制。Rossby 波反应度比 Kelvin 波慢，因此在检测时会出现如图 7 的时间延后序列。

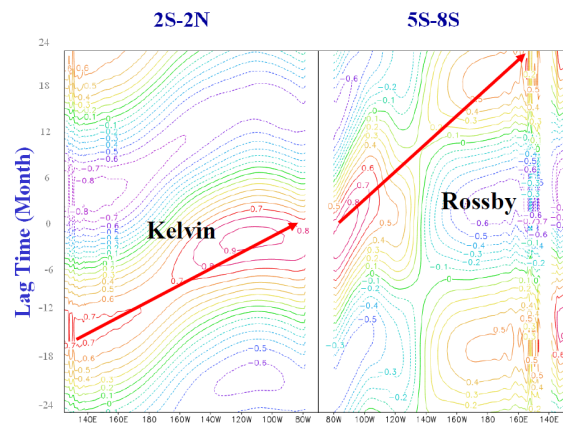


图 8 FGCM 模式模拟的 Nino3.4 指数与上层 300 米海洋热含量超前和滞后相关系数[licom 手册]

第二种反馈机制为充放电理论如图 9(Jin, 1997)。在 El Nino 事件发生前，整个东西太平洋整体暖水的持续累积，在结束后又会对应着冷水的积聚。该过程时 Sverdrup 理论的体现，西风异常的风应力驱动了海水相对涡度增加，为了使得绝对涡度守恒，海水会经向移动，于是导致了东太平洋的辐散，冷水上翻，抑制增暖。而 Rossby 波西移的原因是赤道的西风异常导致在西太平洋辐合，辐合导致的涡度增加，为使得涡度守恒，使得气团向北运动，从而进一步导致更多的辐合运动。

将充放电融入进入，放电过程可以理解为西风异常导致的赤道两侧的 Sverdrup 输送向两侧输送暖水，这一过程导致温跃层变浅，热带暖水容量减少。接着向充电过程过渡，当东太平洋出现冷异常，产生东风异常，Sverdrup 输送方向相反，开始重新一轮增暖，于是温跃层加深，热带暖水增多，向暖事件过渡。

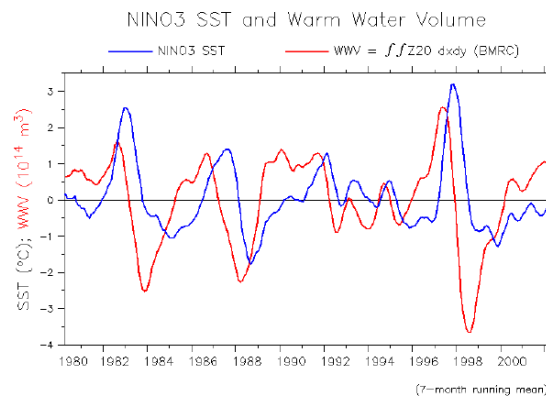


图 9 充放电过程，红色为暖水表示的充电，随后总有蓝色冷水体现出的放电。

4. ENSO 对其他系统的影响

ENSO 产生于热带太平洋上，一个全球最大的热库，也是能量收支最强的区域。它的变化深刻的影响着周边各个海盆、并通过大气对其他大气系统的遥相关作用影响着全球的天气，还会影响对流层的大气。本节将介绍 ENSO 通过海气交互作用对某些区域产生的影响。

4.1. ENSO 影响全球概览

总体来看，全球的热带对流层在 ENSO 发生时统一升高温度 $0.5-1^{\circ}\text{C}$ 。ENSO 还会通过海气交互对全球的其他海盆产生影响，大气在其中扮演的角色还被形象的称为“大气桥”。其他海盆对 ENSO 的滞后增暖如图所示，对流层平均温度在三个月内会有明显增暖(**TT 效应**)、**印度洋增暖**滞后三个月、**西北太平洋**在在之后的整个夏天会增暖影响西态反气旋而影响我国的季风、**北太平洋**会在第二年的冬天增暖并会产生副热带急流和波列(Wallace & Gutzler, 1981)、**南太平洋**也会在第二个冬天增暖并对**南极环状模 SAM**产生影响、**大西洋**则会通过海气相互作用在六个月之后增暖。

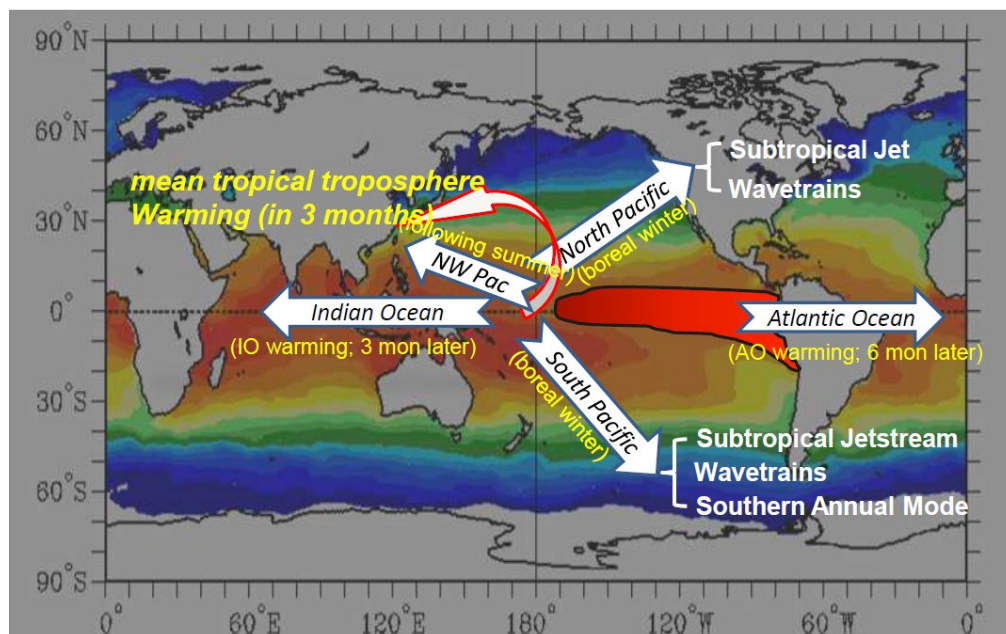


图 10 ENSO 通过海气耦合对其他海盆产生影响

4.2. ENSO 影响下的几个经典响应

在 ENSO 所影响下，有许多经典的理论诞生。比如**印度洋电容器效应**，热带印度洋增暖是对 El Nino 的响应(充电过程)，增暖后影响了印度洋及其周边的气候(放电过程)。热带西北太平洋对流活动激发 Rossby 波列产生 **PJ 遥相关**，进而对我国产生影响。对副热带急流的影响，El Nino 产生的 TT 效应使得热带对流层增暖，于是加强了 Hadley 环流。Hadley 环流的收缩使得副热带急流向赤道移动。随即中纬度涡旋驱动异常上升运动，于是中纬度产生绝热冷却，并因此影响**极地急流**(Lu et al. 2008)。下面对 ENSO 影响下的印度洋的海气交互做进一步的描述。

4.3. ENSO 的小伙伴印度洋海气交互

印度洋对东亚的气候有着深远的影响，比如会通过影响西北太平洋反气旋进而影响我国

的季风雨带。(Huang, Hu, & Xie, 2010)

近 50 年来观测数据显示印度洋 SST 不断上升且伴有海温振荡的加剧。然而次表层海温 (100-500m, 0-20°S) 却有变冷的趋势。热带印度洋表层升温可能是由于印度洋的次表层海水上翻减弱导致的。太平洋东风信风的减弱导致西太温跃层的变薄通过印度尼西亚贯穿流导致印度洋海温跃层变薄, 次表层海水变冷。关于 40-50° S 印度洋海水从表层到深层的变暖主要是由于副热带大涡 (subtropical gyre) 向南偏移了 0.5° 导致的。根据 Sverdrup 理论, subtropical gyre 向南移动, 低纬的暖水向极地移动导致了从表层到深层的增温。

印度洋中两大现象为印度洋偶极(IOD)和印度洋海盆一致模(IOBM)。IOD 印度洋类似于 ENSO 的一种海气相互反馈的气候事件, 成熟位相一般在秋季。IOD 的发生常常伴随着 ENSO 事件, 其特征也类似于 ENSO 海温东冷西暖, 海表东低西高如图图 11。IOBM 指热带印度洋滞后赤道中东太平洋一个季度的海温异常。这是由于赤道中东太平洋的海温异常引起了 Walker 环流的改变, 导致了印度洋一些区域太阳辐射加强, 大气热通量减少从而导致了印度洋海表温度有滞后于中东太平洋 3 个月左右的海温异常。热带西南印度洋的海温异常和大气海洋热通量之间关系不是很密切, 它的增温是由于海洋波动导致。而在 ENSO 之后 1975 年海温变率增强, 这则是与 ENSO 和 IOD 关联的次年春季印度洋上空反对称风场显著有关。(Xie et al., 2009)

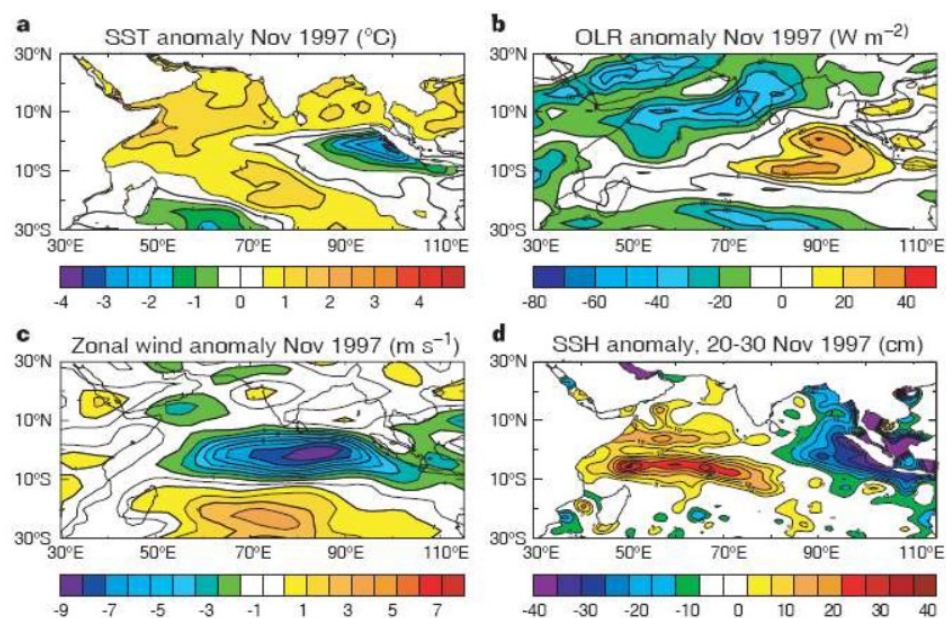


图 11 IOD 图示 a 海温东冷西暖; b 降水异常的东少西多; c 赤道有东风异常; d 海表高度的东低西高

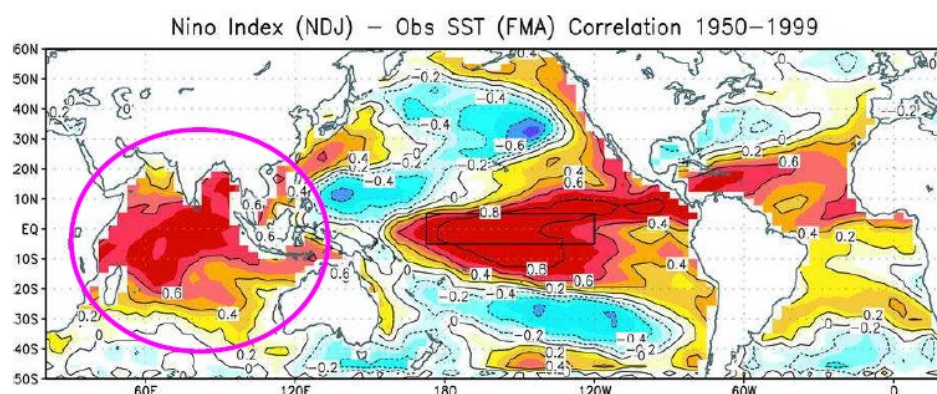


图 12 IOBM 模态, 印度洋有滞后于中东太平洋一个季度的海温异常。

IOD 对我国的影响可以归结如下。印度洋海温偶极振荡正位相时, 印度洋上空东风异常, 西太平洋副高偏西、偏南、偏强, 菲律宾附近对流活动减弱, 东亚夏季风偏强, 华南降水偏多; 印度洋海温偶极振荡负位相时, 西太平洋副高偏东、偏北, 东亚夏季风偏弱, 长江黄河之间有异常辐合, 降水偏多。(Xie et al., 2016)

IOBM 对我国气候的影响则是通过影响西北太平洋低层反气旋, 减弱了西北太平洋夏季风。还会影响南亚高压, 进而使得东亚夏季降水异常。

5. 结论

ENSO 是 El niño 和南方涛动, 分别表示了海洋和大气的 El niño 反应。两者是通过 walker 环流相联系起来的。ENSO 分为 EP 和 CP 型, 本文介绍了一种正反馈机制 Bjerknes, 和两种负反馈延迟振子理论和充电放电理论。最后叙述了 ENSO 是如何影响其他地区的比如西太平洋、印度洋、极地、东亚气候, 并简单描述了它们可能的机制。总览了 ENSO 的前生今世, 有利于我对海气交互的进一步认识于理解, 为以后的研究打下了良好的基础。

参考文献

- BJERKNES, J. (1969). ATMOSPHERIC TELECONNECTIONS FROM THE EQUATORIAL PACIFIC. *Monthly Weather Review*, 97(3), 163-172. doi:10.1175/1520-0493(1969)097<0163:Atftep>2.3.Co;2
- Huang, G., Hu, K., & Xie, S.-P. (2010). Strengthening of Tropical Indian Ocean Teleconnection to the Northwest Pacific since the Mid-1970s: An Atmospheric GCM Study. *Journal of Climate*, 23(19), 5294-5304. doi:10.1175/2010jcli3577.1
- Wallace, J. M., & Gutzler, D. S. (1981). Teleconnections in the Geopotential Height Field during the Northern Hemisphere Winter. *Monthly Weather Review*, 109(4), 784-812. doi:10.1175/1520-0493(1981)109<0784:Titghf>2.0.Co;2
- Jin, F., 1997: An Equatorial Ocean Recharge Paradigm for ENSO. Part I: Conceptual Model. *J. Atmos. Sci.*, 54, 811-829, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1997\)054<0811:AEORPF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1997)054<0811:AEORPF>2.0.CO;2)
- Xie, S.-P., Hu, K., Hafner, J., Tokinaga, H., Du, Y., Huang, G., & Sampe, T. (2009). Indian Ocean Capacitor Effect on Indo-Western Pacific Climate during the Summer following El Niño. *Journal of Climate*, 22(3), 730-747. doi:10.1175/2008jcli2544.1
- Xie, S.-P., Kosaka, Y., Du, Y., Hu, K., Chowdary, J. S., & Huang, G. (2016). Indo-western Pacific ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review. *Advances in Atmospheric Sciences*, 33(4), 411-432. doi:10.1007/s00376-015-5192-6