

ENSO 发生发展阶段赤道西太平洋西风异常长时间维持的分析

刘长征^{1,2} 薛 峰¹

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029
2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 根据 NCEP/NCAR 再分析资料和美国气候预测中心提供的赤道太平洋信风指数, 发现在 ENSO 年 3~5 月 (MAM) 和 8~10 月 (ASO), 赤道西太平洋存在两次显著的西风异常盛行期, 并分析了这两次西风异常长时间维持的原因。研究结果表明, 南北两半球中低纬度异常经向风向赤道西太平洋地区的输送, 以及海气耦合模式中反 Walker 环流的自维持, 是这两次西风异常维持的主要原因。其中, 经向风输送在 MAM 时期以北半球为主, 而在 ASO 时期以南半球为主。在上述两个时段, 作为对赤道西太平洋西风异常的响应, 赤道印度洋呈现为东风异常。此外, 南太平洋中高纬存在一正压结构的气压偶极子模态, 该模态在 MAM 时期由海冰异常维持, 其部分气流向赤道辐散, 并汇入赤道西太平洋西风异常中, 因此对西风异常有直接贡献。而在 ASO 时期, 这一模态由西风异常引起的赤道太平洋海水变暖所激发的大气遥相关波列维持, 因此它是对热带 ENSO 信号的响应。

关键词 ENSO 西风异常 赤道西太平洋
文章编号 1006-9585 (2008) 02-0161-10 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

The Persistent Maintenance of the Strong Westerly Anomalies over the Equatorial Western Pacific during the Onset and Development Phase of ENSO

LIU Chang-Zheng^{1,2} and XUE Feng¹

1 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*
2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract Based on NCEP/NCAR reanalysis data and the trade wind indices provided by the Climate Prediction Center, it is revealed that during the onset and development phase of ENSO, the equatorial western Pacific westerly anomalies (WPWA) prevail during March-April-May (MAM) and August-September-October (ASO), respectively. The following two factors are responsible for the maintenance of WPWA. One is the equatorward transport of the anomalous meridional wind from middle-to-low latitudes of the two hemispheres into the equatorial western Pacific, and the other is the self-maintenance of the anomalous Walker Circulation associated with ENSO. It is also found that the equatorward transport is dominated by the Northern Hemisphere meridional flow during MAM. In contrast, it is maintained mainly by the Southern Hemisphere meridional flow during ASO. Besides, the easterly anomalies prevail over the equatorial Indian Ocean as a response to WPWA during the two periods. Moreover, there exists a barotropic dipole mode in sea level pressure over mid-high latitudes of the South Pacific. This mode is maintained by sea ice anomaly during MAM, one branch diverges equatorward and joins the WPWA. During ASO, how-

ever, it is maintained by the atmospheric teleconnection pattern associated with the warming over the tropical Pacific, so it is a response to the ENSO signal associated with WPWA.

Key words ENSO, westerly anomalies, equatorial western Pacific

1 引言

作为典型的海气耦合现象, El Niño—南方涛动 (ENSO) 是气候系统年际变化的最强信号, 它对全球气候异常以及中国气候异常都有重要影响和预报意义, 因此受到广泛关注^[1,2]。赤道太平洋信风变化即通常所说的西风异常 (尤其西太平洋部分) 是 ENSO 发生和发展的一个先决条件。Bjerknes^[3]认为 Walker 环流偏强将引发东西向气压梯度改变, 从而信风增强, 赤道东太平洋海水上翻增强, 东西向海表温度梯度增大, 这使得 Walker 环流进一步增强。基于这种链式正反馈过程, 他把大气现象的南方涛动和海洋现象的 El Niño 联系起来, 提出 ENSO 系统的概念。Philander^[4]认为, 大约 1~2 周左右一定强度的赤道西太平洋西风爆发可引发 ENSO, 而合成分析结果表明, 大范围而稳定的西风异常伴随 ENSO 从发生至消亡整个过程^[5]。张人禾等^[6]在研究赤道东太平洋混合层变厚机制时, 强调了首先出现在西太平洋的纬向风应力异常及其东传对 ENSO 的重要性。张韧^[7]应用模糊系统理论这一数学方法检测和证明了 1970~1990 年期间赤道太平洋西风异常在不同 ENSO 事件中的触发作用和加强作用。薛洪斌等^[8]用海洋模式模拟和分析了西风异常对次表层海温异常东传并引发 ENSO 事件的触发作用。

在赤道西太平洋西风异常的来源及其对 ENSO 的影响方面已经有了大量研究。Keen^[9]认为中西太平洋赤道两侧气旋对是西风异常的成因。Barnett^[10]认为在年际尺度上有海平面气压和纬向风信号从印度洋东传至太平洋。Lau 等^[11]也认为这种西风异常东传存在, 但认为是热带季节内振荡东移的结果。Chu 等^[12,13]基于天气尺度的个例分析, 认为南北半球的中纬度冷涌向印尼低压区的质量输送可以改变赤道太平洋东西向的气压梯度, 从而引发西风爆发。Gao 等^[14]认为冬半球的强冬季风引起越赤道流和西太平洋两侧的台风活

动增强可以导致 ENSO 的发生和发展。观测分析和模式模拟表明了强东亚冬季风导致赤道西太平洋西风异常出现并向东扩展, 从而激发 ENSO^[15,16]。张祖强等^[17]研究了 1958~1997 年的 ENSO 事件, 认为在赤道中东太平洋增暖的当年春季 (4 月为主) 和夏季 (7 月为主), 赤道西太平洋地区存在两次显著的赤道西风局地增强过程。Xu 等^[18]认为澳大利亚东北侧南风气流出现在 4 月或 7 月是春季型或夏季型 ENSO 即将发生的指示因子, 即该南风气流出现后规律性的西太平洋西风出现, 从而 ENSO 达到 0.5 °C 的强度标准, 这也支持了张祖强等有关西风异常两次增强的观点。薛峰等^[19]发现外热带大气扰动通过经向风异常影响了 ENSO 从发生至发展到衰减的全过程, 提出了热带外大气扰动和 ENSO 相互作用的机制。

以上研究表明, 赤道西太平洋西风异常 (WPWA) 对 ENSO 的发生发展起着极为重要的作用。但需强调指出, 在 ENSO 年 WPWA 并不是一直趋强的, 而是存在两个约 3 个月的盛行期 (见文献^[17]中图 12)。现有研究强调了 WPWA 的快速增强过程, 但没有对 WPWA 的长时间维持进行详细分析。该西风异常维持长达约 3 个月, 从时间尺度来看, 这可能是边界强迫下复杂系统作用的结果。本文对 ENSO 年赤道太平洋西风异常做了进一步研究, 以探讨这两次盛行期 WPWA 维持的机理和差异。

2 资料和方法

本文所用的海平面气压 (SLP)、850 hPa 经向风及纬向风、位势高度场和地面向外长波辐射 (OLR) 数据来自于 NCEP/NCAR 再分析月平均资料集^[20]。海表温度 (SST) 资料为美国国家海洋大气局 (NOAA) 发展的 ERSST 的第二个版本^[21], 海冰资料来自于英国 Hadley 气候预测中心^[22]。因为同化了卫星观测结果, 这些数据在 1979 年后具有很高的可靠性, 因此取 1979~2004 年时段进行分析。采用 Nino3.4 指数^[23]来定义

ENSO 的强度, 即 ($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $170^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{W}$) 地区的 SST 异常平均值。使用的 Niño3.4 指数和赤道太平洋分区信风指数均来自于美国气候预测中心^[24]。赤道太平洋被划分为西太平洋 ($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $135^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}\text{W}$)、中太平洋 ($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $175^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{W}$) 和东太平洋 ($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $135^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{W}$)。信风指数定义为区域纬向风异常的平均值, 由于赤道地区信风为东风, 赤道西风异常与信风异常符号相反 (即原值的负数)。本文研究主要使用了超前/滞后回归分析, 其具体过程类似 Terry 等^[25]的工作。对 ENSO 年 12 月和次年 1 月的 Niño3.4 指数做平均, 建立了 ENSO 指数的年变化序列。此外, 对 3~5 月和 8~10 月这两个盛行期的 WPWA 分别做平均, 建立西风指数来表征 WPWA 的强度。之后, 基于这两个西风指数序列对同期环流场数据做回归计算, 得到 WPWA 相关的大气环流和 SST 异常分布等, 同时给出了 t 分布信度检验。

3 ENSO 过程中赤道太平洋西风异常的演化

3.1 ENSO 演化过程中赤道太平洋西风异常的回溯

在 ENSO 发生发展中, 如图 1 所示, 赤道纬向风异常变化是个同时包含连续变化和突然变化的过程。由于该图显示的是 ENSO 指数回归的结果,

即 Niño3.4 区平均海温增高 1°C 对应的西风异常值, 因此, 图中异常强度较个例和 ENSO 事件合成结果相对偏弱。图 1 也表明, 在 ENSO 发生发展时期, 西风异常在西太平洋地区近似同步出现。ENSO 发生发展阶段西风异常主体在西太平洋, 而在 ENSO 接近成熟和成熟阶段, 西风异常主体在中太平洋面, 而东太平洋西风异常只是中太平洋异常的外围部分, 在 ENSO 成熟阶段才最强。

3.2 ENSO 演化过程中西太平洋、中太平洋、东太平洋西风异常的比较

图 1 表明, 赤道太平洋西风异常主要发生在 ENSO 发生发展阶段, 为了进一步比较赤道太平洋不同地区西风异常的不同, 给出了由 ENSO 指数超前回归 (相关) 得到的赤道西太平洋、中太平洋和东太平洋西风异常指数的强度 (相关系数) 逐月变化 (图 2)。

从相关程度来看 (图 2a), 在 ENSO 发生发展阶段, ENSO 指数与西太平洋西风异常的相关程度要显著高于它与中太平洋和东太平洋西风异常的关系。虽然在 2 月西太平洋西风异常和 ENSO 指数的相关不明显 (明显低于 0.05 的信度), 但自 3 月起, 二者相关便超过 0.01 的信度。二者关系在 ENSO 年 9 月最密切, 其相关系数接近 1.0。相比前者, 赤道中太平洋信风异常的重要性自 6 月才开始体现 (达到 0.01 信度), 而后缓慢增加, 并在 10 月达到平稳峰值。至于东太平洋西风异常, 它对 ENSO 的重要性自 10 月才出现。以

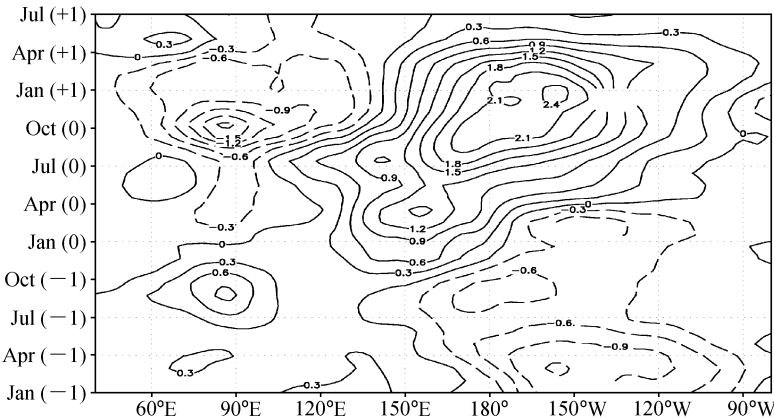


图 1 根据 ENSO 指数回归的 $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ 平均纬向风异常 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 的时间—经度剖面 (纵坐标为时间, -1、0 和 +1 分别指 ENSO 前一年、当年和次年)

Fig. 1 The time-latitude cross-section of the zonal wind anomalies (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) averaged over $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ regressed by the ENSO index (-1, 0, and +1 denote the preceding, current, and succeeding year of ENSO, respectively)

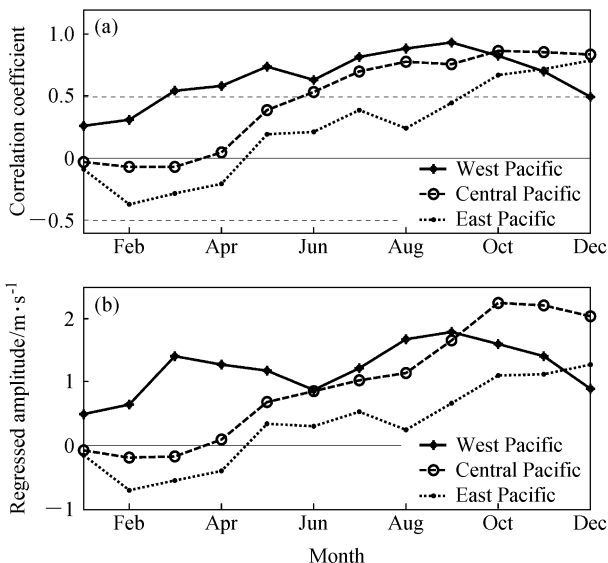


图2 ENSO指数和不同月份赤道西太平洋、中太平洋和东太平洋西风异常的(a)相关系数(水平横虚线表示0.01的置信区间)和(b)回归强度

Fig. 2 (a) The coefficient (horizontal dotted lines representing the 0.01 significance level) correlated to and (b) the amplitude of monthly westerly anomalies over equatorial west, central and east Pacific regressed by the ENSO index

上分析表明, WPWA 在 ENSO 发生发展阶段非常重要, 而中太平洋和东太平洋西风异常在 ENSO 接近成熟至成熟阶段非常重要。

进一步分析 ENSO 年赤道太平洋 3 个地区西风异常的强弱变化。图 2b 表明中太平洋和东太平洋异常是持续增强的。东太平洋在 2~3 月虽然为东风异常, 但该异常并没达到 0.05 的统计信度, 此区域西风异常强度在年终最大(12 月), 当 Niño3.4 区 SST 升高 1°C 时东太平洋信风平均异常可达 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。赤道中太平洋的西风异常是 3 个分区中最强的, 其最大强度出现在 11~12 月, 达到 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。相对前二者, 西太平洋地区的西风异常最复杂, 它表现为双峰型。WPWA 的第 1 个强度峰值出现在 3~5 月 (MAM), 第 2 个出现在夏末秋初 8~10 月 (ASO), 回归结果给出的风速在这两个时段都明显超过 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 并且西太平洋西风异常在 ASO 时期略强于 MAM 时段。张祖强等^[17]把赤道太平洋划分为 $100^\circ\sim 140^\circ\text{E}$ 、 $140^\circ\text{E}\sim 180^\circ$ 和 $180^\circ\sim 120^\circ\text{W}$ 3 个部分, 给出了 ENSO 事件发生当年合成的 850 hPa 赤道纬向风异常变化(基于 1958~1997 年数据), 其结

果显示后两个地区西风异常变化分别类似于本文分析的赤道西太平洋和中太平洋。此外, 他们提出的春季和夏季两次西太平洋西风局地增幅的概念, 与本节提及的春季和夏末秋初两个西太平洋西风盛行期在时间上比较吻合。

4 西太平洋西风异常两次盛行期的环流配置

以上分析了 ENSO 年赤道太平洋不同区域西风异常的变化规律, 研究结果确认了 WPWA 在 ENSO 发生发展阶段的重要作用, 并且发现该西风异常在 MAM 和 ASO 两个时期最为显著。我们将进一步分析这两个西风异常盛行期对应的环流场配置, 并解释其维持的原因。

MAM 和 ASO 西风指数分别表现了这两个时段的 WPWA 强度, MAM 和 ASO 西风指数都是以 1 年为时间间隔的序列, 并且变化相当一致(二者相关系数为 0.63, 达到 0.01 信度)。为了比较 MAM 和 ASO 时段 WPWA 的成因和气流来源, 给出由 MAM 西风指数(图 3)和 ASO 西风指数(图 4)回归得到的 850 hPa 风场、SLP、SST 异常和 OLR 异常。

4.1 850 hPa 风场

850 hPa 风回归场(图 3a)清晰再现了赤道西太平洋地区的大范围西风异常, 表明有 3 支水平方向的异常环流系统与之密切联系。与 WPWA 直接对应的一支是赤道西太平洋和中太平洋的大范围纬向风异常, 菲律宾东侧海洋上的强异常经向风在赤道附近转向汇入其中, 并在流经中东太平洋交界处后部分离开赤道向北, 形成一个赤道北侧的热带太平洋异常环流系统。另一支为贯穿海洋大陆和热带印度洋的气旋性异常气流, 在赤道地区体现为系统性的东风异常, 该异常气流在索马里急流位置转向进入南半球, 并在 $10^\circ\sim 30^\circ\text{S}$ 变为向东南方向。以上两支异常环流系统的气流流向与相应的 5 月气候平均态基本相反。除了以上两个热带系统, 在中高纬度南太平洋, 存在一个范围很大的异常气旋对, 对称轴大约在 55°S , 其中低纬度一侧为异常气旋, 高纬度一侧为异常反气旋, 并且后者比前者更强。

从异常气流的强度上看, 以上 3 支水平方向

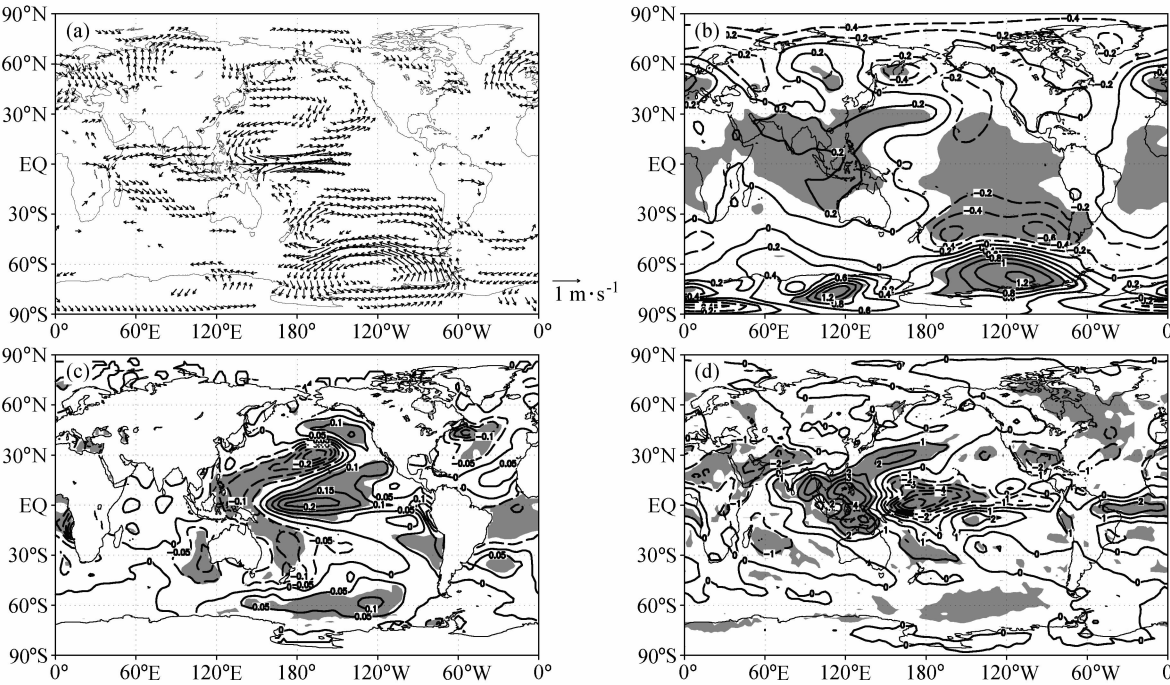


图 3 根据 MAM 西风指数回归的 3~5 月 (a) 850 hPa 风场、(b) 海平面气压 (单位: hPa)、(c) 海表温度 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 和 (d) 向外长波辐射 (单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) 异常分布 (阴影区为超过 0.05 置信水平的地区)

Fig. 3 The (a) 850 hPa wind, (b) SLP (units: hPa), (c) SST (units: $^{\circ}\text{C}$) and (d) OLR (units: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) anomalies during March-April-May regressed on the MAM WPWA index (shaded areas are 0.05 significance level above)

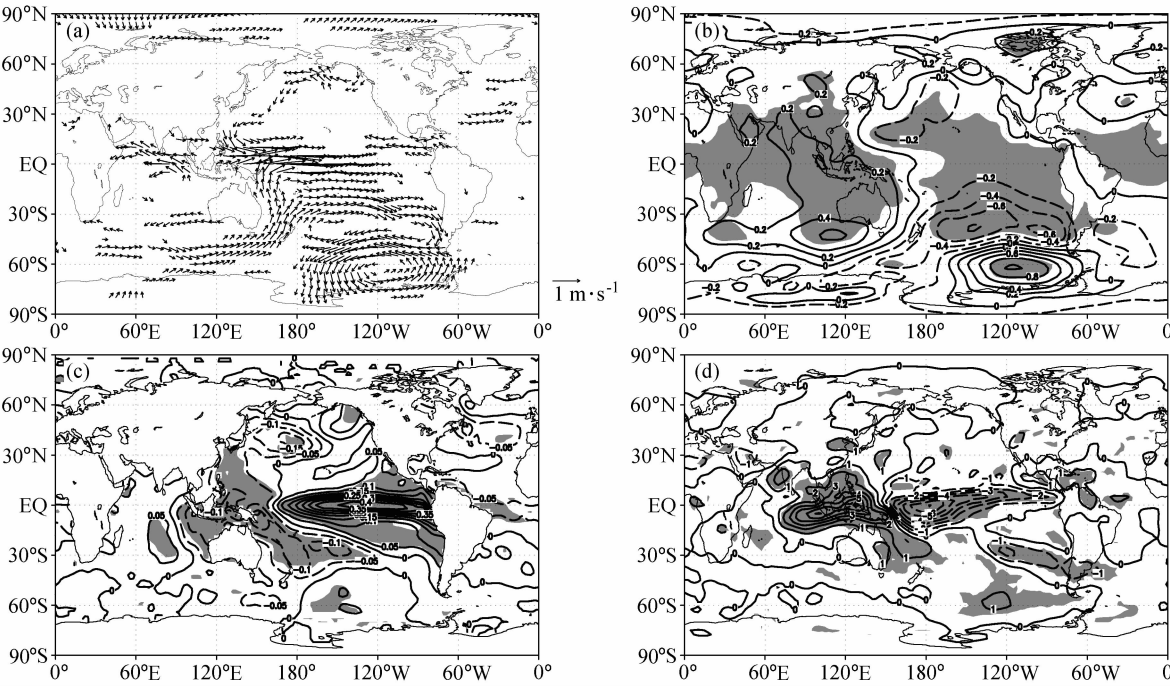


图 4 根据 ASO 西风指数回归的 8~10 月 (a) 850 hPa 风场、(b) 海平面气压 (单位: hPa)、(c) 海表温度 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 和 (d) 向外长波辐射 (单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) 异常分布 (阴影区为超过 0.05 置信水平的地区)

Fig. 4 The (a) 850 hPa wind, (b) SLP (units: hPa), (c) SST (units: $^{\circ}\text{C}$) and (d) OLR (units: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) anomalies during August-September-October regressed on the ASO WPWA index (shaded areas are 0.05 significance level above)

的气流系统对 WPWA 的作用和贡献有所区别。首先,赤道北侧的热带太平洋中低纬气流系统汇入赤道西太平洋的异常气流很强,因此是 WPWA 的主要贡献者;其次,南太平洋异常气旋对有弱辐散气流流向赤道西太平洋,并在那里和菲律宾东侧经向风辐合,因此它作为 WPWA 的相当弱的次要贡献者存在;再其次,热带印度洋表现为东风异常,因此只是 WPWA 的一种大气环流响应。

对 ASO 西风指数而言,则有 4 支水平异常环流系统与同期赤道西太平洋西风密切相关(图 4a)。与 MAM 西风指数的回归场相比,南太平洋的异常气旋对仍然存在;热带印度洋东风异常减弱,并且气流局限于赤道附近地区;赤道北侧热带太平洋气旋性环流大幅度减弱。此外,一支强中纬度气流从南印度洋向东延伸到澳大利亚南侧,并在澳大利亚东南侧向赤道方向转向,并于 30°S 附近分成 2 支,其中一支经澳大利亚东北侧进入赤道地区,再次转向汇入西太平洋西风气流,而另一支向东发散,汇入南太平洋气旋对气流。因此,在对 ASO 时期 WPWA 的作用和贡献上,澳大利亚外侧的强大转向流是主要贡献者,赤道太平洋北侧的中低纬地区弱气旋性环流是次要并且较弱的贡献者,赤道印度洋东风异常是 WPWA 的响应,而从气流流向上看,此时南太平洋中高纬异常气旋对与 WPWA 没有直接联系。

通过对 MAM 和 ASO 西风指数回归的 850 hPa 风场进行比较,可以得到如下结果:1)虽然南北半球流向赤道的两支气流在强度上差异很大,但这种经向风辐合和质量输送对这两个时段 WPWA 的维持都有重要作用;2)异常经向风受季节循环控制,在 MAM 时期,WPWA 主要靠北半球环流场维持,此时菲律宾东侧海域经向风异常很强,而 ASO 时期 WPWA 主要靠南半球环流场维持,此时澳大利亚东侧海域存在强而有组织的经向风异常;3)这两个时期赤道印度洋都表现为东风异常,因此该地区环流异常只是对 WPWA 的大气响应,对后者并不起主动作用;4)在这两次 WPWA 维持期间,南太平洋都存在一异常气旋对,约以 55°S 为界,在高纬度为反气旋结构,在中纬度为气旋结构。

4.2 海平面气压场

MAM 和 ASO 西风指数回归的 SLP 异常场和相应的 850 hPa 异常风场一致。对 MAM 西风指数而言,热带太平洋和印度洋表现为显著的南方涛动负位相形态(图 3b)。与 WPWA 最显著的负相关出现在赤道东太平洋,即海温变化的关键区,而最强的低压异常出现在副热带东南太平洋,与其对应的北半球副热带高压地区(夏威夷附近)也存在一个相对偏弱的低压异常带,它们分别与澳大利亚北部至东南亚及西北太平洋的高压异常带之间形成强气压差,从而促使异常经向风流向赤道方向,并在赤道地区进行辐合。在南太平洋,其高纬度部分以及临近南极地区存在一强大高压异常,而其中纬度则为低压异常形态,这一气压偶极子形态和 850 hPa 风场的异常气旋对相对应。以上气压异常分布在 ASO 盛行期依旧作为主体特征存在(图 4b),虽然两者间也有些差异,比如,热带印度洋至澳大利亚的高压异常在 ASO 指数回归场明显比 MAM 回归场偏强。此外,在 MAM 时期,南半球中高纬度存在较均匀的纬向模态,在 30~50°S 为低压异常,在 50°S 以南则为大范围的高压异常,这种配置形态即为负位相的南极涛动^[26];而在 ASO 时期,虽然南太平洋气压偶极子模基本保持不变,但此时西半球变成了南极涛动正位相模态。这种西半球南极涛动位相的变化,应当是热带 ENSO 发展过程中赤道 ENSO 波在东移过程中其边界向中纬度扩展造成的。

150°W 经线穿越上段所述大部分气压异常的中心或接近中心地带,因此可以用位势高度场的 150°W 经线垂直剖面来判断与上一段所述 WPWA 相关的气压异常的性质。沿 150°W 的 MAM 和 ASO 西风指数分别回归的高度场异常分布(图略)显示在热带太平洋海平面为低压异常,但对流层顶则为显著的高压异常,这说明这种异常为斜压结构;此外,副热带和热带外地区气压异常则为正压结构,比如南太平洋的偶极子形态和夏威夷附近的海平面低压异常在 200 hPa 仍显著存在。

4.3 海表温度异常场

进一步考察 MAM 和 ASO 时期与 WPWA 相关的 SST 异常(图 3c 和图 4c),并结合 SLP 和 850 hPa 风场来确定与 WPWA 有关的环流异常系

统的存在机制。MAM 和 ASO 西风指数对应的热带 SST 异常主要模态比较相似, 在热带地区为中西太平洋低温异常马蹄形态, 该形态半包容赤道中东太平洋的高温异常, 这种半包围结构是 ENSO 在 SST 场上的主体特征, 在海平面气压场上则和南方涛动负位相模态相对应^[1]。此特征在 MAM 和 ASO 两个时期有一定差异。对 MAM 西风指数而言, 赤道增暖发生在中太平洋, 即 Niño 4 地区, $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西风异常对应 0.2°C 的海温异常; 马蹄形低温异常基本呈南北半球对称, 并且北半球部分强于南半球部分, 其最大值出现在副热带北太平洋中心, 异常中心值在 0.25°C 以上, 强度超过赤道增暖, 因此它对 ENSO 具有独立地位, 参考 850 hPa 风场, 可知该 SST 异常是流向赤道的北半球经向风环流系统的强迫冷源。对 ASO 西风指数而言, 海水增暖发生在赤道东太平洋, 即传统的 Niño3 区, 中心强度为 0.4°C , 不仅显著强于 MAM 时期, 而且远远强于其西部及两侧的低压马蹄形态 (约 0.1°C), 因此此时不存在 ENSO 之外的边界强迫。低温异常的马蹄形态以赤道地区为中心, 并且异常延伸向南半球。

对 MAM 西风指数和 ASO 西风指数而言, 在南太平洋中高纬度以 60°S 为中心都有一强度较小但又相关显著的高温异常, 和海平面上的气压偶极子模态相对应。气压异常可引起风场变化, 进一步引发温度平流并改变下垫面海温, 而海温异常又加强了气压异常, 因此, 气压—风—海温之间可形成正反馈, 这即热带外海洋常见的蒸发—风反馈机制。在南太平洋, SST 场的弱高温异常和 SLP 场气压偶极子和 850 hPa 风场的气旋对正是这种 SLP—风—SST 配置, 因此, 蒸发—风反馈机制对南太平洋环流异常的维持起着重要作用。

此外, 南太平洋弱高温异常的分布范围在 MAM 和 ASO 西风指数之间有所不同, 这种差异与该高温异常在这两个时段的存在机制不同有关。该异常在 MAM 时期范围很大, 东西向带状分布, 约跨 100 个经度, 而在 ASO 时期则成小块状, 以 150°W 为中心, 东西方向约 30 个经度, 分布范围显著小于前者。这种 MAM 时期的带状海温异常是南太平洋海冰偏少造成的。比较高和低 MAM 西风指数年 (高指数年为 1980、1982、1987、1990、1991、1993 和 1997 年; 低指数年为 1984、

1988、1989、1996、1999 和 2000 年) MAM 时期平均海冰分布之差 (图略), 发现强年和弱年相比, 南大洋的太平洋部分海冰北界偏南, 海冰偏少, 并且区域分布和 SST 异常相一致。如对 ENSO 年做类似合成, 结果类似 (图略)。而在 ASO 时期 (高指数年为 1982、1991、1994、1997 和 2002 年; 低指数年为 1988、1989、1995、1998、1999 和 2000 年), 同 MAM 时期一样, 强 WPWA 对应海冰大面积偏少, 跨 $100\sim 180^\circ\text{W}$ 约 80 个经度, 但相应的 SST 异常却仅限于 $140\sim 170^\circ\text{W}$ 约 30 个经度, 并且强度相对 MAM 时期很小, 因此该时期 SST 异常不是海冰异常的产物。在 ASO 时期, 南太平洋海温异常面积很小, 而大气气压偶极子和气旋对面积很大 (东西跨 100 个经度以上), 这说明海冰和海温异常是大气风场异常形成的。此外, 这种风场异常是由 ENSO 强迫的热带外气压异常维持的。低纬度地区地面热源可引起大气 Rossby 波沿圆弧路径向中高纬传播^[27], 这在南半球表现为 ENSO 激发的太平洋—南美遥相关波列^[28]。这种波传播在纬向风为西风背景下最明显, 因此遥相关型在冬半球最显著。ASO 时期为南半球冬半年的中后期, 同时 ENSO 已经接近成熟期, 所以产生很强的对热带外大气强迫。Yuan^[29]研究 ENSO 影响下南极海冰的工作中给出了 ENSO 年 9~11 月 SLP、SST 和海冰的异常, 这和 ASO 西风回归结果非常类似, 支持了上述分析结果。

4.4 反 Walker 环流自维持和经向风输送对 WPWA 维持的共同作用

以上 3 小节内容分析了水平方向上 MAM 和 ASO 西风指数对应的 850 hPa 风场、SLP 和 SST 异常场上的分布, 清晰显示了在西太平洋地区经向风向赤道的质量输送对 WPWA 维持的巨大作用, 除此之外, 在垂直方向上, 热带海气耦合作用下反 Walker 环流的自维持也是 WPWA 长时间维持的另一种原因。Walker 环流通过风应力维持赤道太平洋西部比东部海面偏高和海水偏暖, 而海洋通过东西热力差异维持东西太平洋的强气压差, 使得 Walker 环流得以维持。这种正反馈机制不仅维持了 Walker 环流的平均态, 同时也是 Walker 环流异常维持的一个重要原因^[3,30]。因此, 作为 Walker 环流异常的低层表现, WPWA 可以

通过这种正反馈机制进行自我维持。OLR 异常能够描述热带地区对流和垂直运动的异常变化, 因此可显示 Walker 环流的异常。图 3d 和 4d 表明, MAM 和 ASO 西风指数对应的异常分布形态基本相同, 都对应赤道中太平洋强负异常和其西部与两侧的马蹄形正异常, 这即反 Walker 环流异常。但是, 二者在正负异常的强度上却有明显差异, 就强度而言, 当 MAM 西风指数为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 中太平洋负异常中心强度为 $-5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 印尼正异常中心为 $4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 并且中心面积较小; 而对 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的 ASO 西风指数而言, 中太平洋负异常中心强度为 $-6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 印尼正异常中心为 $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 并且中心面积在 MAM 西风时期的 3 倍以上。因此, 在 ASO 期间 OLR 异常显著强于 MAM 期间, 这表明同样强度的 MAM 西风指数对应的反 Walker 环流相对 ASO 指数明显偏弱, 即反 Walker 环流对 MAM 时期的 WPWA 的贡献要显著弱于它对 ASO 时期西风的贡献。

此外, 这两种机制对 WPWA 的维持在 MAM 时期和 ASO 时期的相对地位有所不同。如上节所述, 在 ASO 时期, 赤道东太平洋海水增暖在 SST 异常场占着绝对优势地位, 此时西太平洋和热带外海温异常都作为 ENSO 的响应存在, 且并不存在显著的边界强迫, 因此, 反 Walker 环流的自维持是同期 WPWA 维持的主要原因, 在西太平洋异常经向风对赤道的输送为次要原因。但在 MAM 时期, 副热带北太平洋中部海水负异常强于同期赤道中太平洋海水增暖的强度, 它和南太平洋海冰偏少引起的海温正异常都独立于 ENSO, 这种赤道外地区环流异常通过异常气流的向赤道输送不但可以引起 WPWA 的爆发^[14], 而且可以支持 WPWA 在更大时间尺度上的维持, 因此两种机制对 MAM 时期 WPWA 的维持有着同样重要的地位。我们对 OLR 异常的分析结果也支持了这种结论。

5 结论

通过对 ENSO 年赤道西太平洋西风异常 (WPWA) 的分析, 确认西风异常存在 3~5 月 (MAM) 和 8~10 月 (ASO) 两个盛行期。这两次 ENSO 相关的 WPWA 持续长达 3 个月, 从时

间尺度上看, 这可能是海洋边界强迫和海气相互作用共同的结果。通过建立西风指数对低空风场、SST、SLP、高度场和 OLR 场异常的回归分析证明了这种设想。

在西太平洋南北半球的经向风向赤道输送以及海气耦合作用维持的反 Walker 环流异常是 MAM 和 ASO 时期 WPWA 长期维持的主要原因。在 MAM 时期, 赤道太平洋海水增暖刚开始出现, 东西向气压差偏小, 反 Walker 环流偏弱, 此时副热带北太平洋中部作为外强迫冷源维持的异常经向风, 汇入赤道西太平洋来维持 WPWA, 并作为强激发因子增强反 Walker 环流, 增大热带太平洋东西方向的气压差, 使得 ENSO 进一步发展。在 ASO 时期, ENSO 接近成熟时期, 作为一个热带海气相互作用的正反馈机制典型, 海温异常和反 Walker 环流, 太平洋东西向气压差一起形成了一个强的自维持系统, 因此, 该时期 ENSO 对 WPWA 的依赖程度显著下降, 赤道外地区气流对 WPWA 以质量补充作用为主。

此外, 在这两个时期内, WPWA 的维持也有一定区别。在 MAM 时期, 海温异常和反 Walker 环流偏弱, 从季节循环来看, 下垫面强迫以北半球为主, 因此与副热带北太平洋中部低温异常相关的北半球经向风对赤道西风的输送和反 Walker 环流自维持对 WPWA 的维持同样重要, 而由南太平洋海冰偏少带来的南半球经向风输送相对北半球很弱, 只起次要作用。而在 ASO 时期, 赤道中东太平洋海温异常很强, 海气耦合作用下反 Walker 环流很强, 这是同期 WPWA 维持的主要原因; 此外, 此时下垫面强迫以南半球为主, 在南方涛动形态下南半球中纬度经向风向赤道的输送也较强, 此为赤道西风维持的次要原因, 而北半球经向风输送作用虽然依旧明显, 但强度相对更弱, 因此其作用更小。

虽然赤道印度洋地区的西风东传可对 WPWA 起激发作用, 但该地区在 MAM 和 ASO 两个盛行期都表现为东风异常, 即只是对 WPWA 和 ENSO 的被动大气响应。此外, 在 MAM 和 ASO 两个 WPWA 盛行时段, 南太平洋都存在正压性的气压偶极子模态, 约在 55°S 以北为低压异常, 以南为高压模态。这种偶极子在 MAM 时期是由于同期海冰偏少引起的, 并且该配置下气旋对辐散的气

流对 WPWA 的维持有主动作用;而在 ASO 时期,该模态是由赤道太平洋海温增高引起的遥相关波列维持的,因此只是 WPWA 和 ENSO 的被动响应。

参考文献 (References)

- [1] Wallace J M, Rasmusson E M, Mitchell T P. On the structure and evolution of ENSO-related climate variability in the tropical Pacific: Lessons from TOGA. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**: 14241~14259
- [2] 高辉, 王永光. ENSO 对中国夏季降水可预测性变化的研究. *气象学报*, 2007, **65**: 131~136
Gao Hui, Wang Yongguang. On the weakening relationship between summer precipitation in China and ENSO. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2007, **65**: 131~136
- [3] Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, 1969, **18**: 820~829
- [4] Philander S. El Niño Southern Oscillation phenomena. *Nature*, 1983, **302**: 295~301
- [5] Rasmusson E M, Carpenter T H. Variations in the tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110**: 354~384
- [6] 张人禾, 黄荣辉. El Niño 事件发生和消亡中热带太平洋纬向风应力的动力作用 I——资料诊断和理论分析. *大气科学*, 1998, **22**: 587~599
Zhang Renhe, Huang Ronghui. Dynamical roles of zonal wind stresses over the tropical Pacific on the occurring and vanishing of El Niño. Part I: Diagnostic and theoretical analyses. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1998, **22**: 587~599
- [7] 张韧. El Niño/La Niña 过程影响因子的模糊诊断分析. *热带海洋学报*, 2001, **20**: 8~14
Zhang Ren. Fuzzy diagnoses and analysis on influence factors of El Niño/La Niña. *Journal of Tropical Oceanography* (in Chinese), 2001, **20**: 8~14
- [8] 薛洪斌, 张铭, 王业贵. 热带太平洋地区风场异常和与 El Niño 有关的年际变化. *气候与环境研究*, 2006, **11**: 457~469
Xue hongbin, Zhang Ming, Wang Yegui. Wind anomalies of the tropical Pacific and interannual variability associated with the El Niño. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11**: 457~469
- [9] Keen R A. The role of cross equatorial tropical cyclone pairs in the Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110**: 1405~1416
- [10] Barnett T P. Interaction of the monsoon and Pacific trade wind system at interannual timescales. Part I: The Equatorial Zone. *Mon. Wea. Rev.*, 1984, **111**: 756~773
- [11] Lau K M, Chan P H. Interannual and intraseasonal variation of tropical convection: A possible link between the 40-50 day mode and ENSO. *J. Atmos. Sci.*, 1986, **45**: 506~521
- [12] Chu P S. Extratropical forcing and the burst of equatorial easterlies in the western Pacific: A synoptic study. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1988, **66**: 549~564
- [13] Chu P S, Frederick J. Westerly wind burst and surface heat flux in the equatorial western Pacific in May 1982. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1990, **68**: 523~537
- [14] Gao Shiyang, Wang Jingshu, Ding Yihui. The triggering effect of near-equatorial cyclones on El Niño. *Adv. Atmos. Sci.*, 1988, **5**: 87~95
- [15] 李崇银, 穆明权. 东亚冬季风—暖池状况—ENSO 循环的关系. *科学通报*, 2000, **45** (1): 678~685
Li Chongyin, Mu Mingquan. Relationship between East Asian winter monsoon, warm pool situation and ENSO cycle. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2000, **45** (1): 678~685
- [16] 杨辉, 陈隽, 孙淑清. 东亚冬季风异常激发 El Niño 现象的数值试验研究. *大气科学*, 2005, **29**: 321~222
Yang Hui, Chen Jun, Sun Shuqing. Numerical experiment on the El Niño event stimulated by the East Asian winter monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29**: 321~222
- [17] 张祖强, 丁一汇, 赵宗慈. ENSO 发生前与发展初期赤道西太平洋西风异常的爆发问题. *气象学报*, 2000, **58**: 11~24
Zhang Zuqiang, Ding Yihui, Zhao Zongci. On the westerly wind outburst in equatorial western Pacific during the onset and development phase of ENSO and before. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2000, **58**: 11~24
- [18] Xu Jianjun, Chan C L. The role of the Asian-Australian Monsoon system in the onset time of El Niño Events. *J. Climate*, 2001, **14** (3): 418~433
- [19] 薛峰, 何卷雄. 外热带大气扰动对 ENSO 的影响. *地球物理学报*, 2007, **50**: 1311~1318
Xue Feng, He Juanxiong. The Influence on ENSO of the extra-tropical atmospheric disturbance. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2007, **50**: 1311~1318
- [20] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**: 437~471
- [21] Smith T M, Reynolds R W. Improved extended reconstruction of SST (1854~1997). *J. Climate*, 2004, **17**: 2466~2477
- [22] Rayner N A, Brohan P, Parher D E, et al. Improved an-

- alyses of changes and uncertainties in sea surface temperature measured in situ since the mid-nineteenth century: The HadSST2 dataset. *J. Climate*, 2006, **19** (3): 446~469
- [23] Trenberth E K. The definition of El Niño. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, **78**: 2771~2777
- [24] <http://www.cpc.noaa.gov/data/indices/>
- [25] Terry P, Dominiak S. Indian Ocean sea surface temperature and El Niño-Southern Oscillation: A new perspective. *J. Climate*, 2005, **18**: 1351~1368
- [26] Gong Daoyi, Wang Shaowu. Definition of Antarctic oscillation index. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26**: 459~462
- [27] Hoskins B J, Karoly D J. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. *J. Atmos. Sci.*, 1981, **38**: 1179~1196
- [28] Karoly D J. Southern Hemisphere circulation features associated with El Niño Southern Oscillation events. *J. Climate*, 1989, **2**: 1239~1252
- [29] Yuan Xiaojun. ENSO-related impacts on Antarctic sea ice: A synthesis of phenomenon and mechanisms. *Antarctic Science*, 2004, **16**: 415~425
- [30] Wyrski K. El Niño-the dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing. *J. Phys. Oceanogr.*, 1975, **5**: 572~584