

低纬度涛动——全球热带的 甚低频振荡现象

符淙斌 叶笃正

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文在论证所谓“北方涛动”存在性的基础上,分析了这一现象与经典的“南方涛动”的关系和它们的性质,提出了“低纬度涛动”的概念。

研究发现,这两类振荡在低频域内具有相同的振荡频率,处于同一振荡系统内。实质上反映了印度洋和太平洋低纬地区三个主要活动中心——赤道低压和南、北太平洋副热带高压的年际变化之间的联系。

这个振荡系统,在气压场上表现为,横跨赤道南北各约30个纬距的东西向的“跷跷板”(seesaw)现象,且有以赤道为界的两个分量,即南方涛动和北方涛动。在温度、湿度场和低层大气稳定度场上,主要表现为热带太平洋上高温、高湿和强不稳定与低温、低湿和弱不稳定的交替出现;在云量场上表现为主要对流区的东西向位移;在海面温度场上为赤道太平洋增暖和降温的交替出现。它们之间通过热力和动力过程耦合起来,组成了全球热带海洋大气系统的振荡,这是低纬度大气环流年际变化的一个基本特征,我们称它为“低纬度涛动”。

分析表明,它的振荡周期平均约为40个月,为区别于40—60天的热带低频振荡,这一年际尺度的振荡可称为“甚低频振荡”。

作者用全球热带海平面气压第一特征向量的时间系数定义“低纬度涛动指数”,它能客观地同时描写气压场上振荡的两个分量,以及温度、湿度、云量和低层大气稳定度等的甚低频振荡特征。

一、前 言

本世纪20年代初^[1], Walker 在研究世界各地海平面气压变化之间关系的基础上,提出了“三大涛动”的概念:南方涛动、北大西洋涛动和北太平洋涛动。其中最出名的是南方涛动,它描写了全球热带(40°N—40°S),主要是印度洋和太平洋地区东西向的气压反相振荡(称之为 Seesaw)。这种反相振荡的实际图象曾经用印度尼西亚的雅加达年平均气压距平与全球各地方相应气压值的相关场来表示^[2]。因为描述这种反相振荡主要的正、负相关中心即振荡中心位于赤道以南,所以被称为“南方涛动”(SO)。但实际上,东西向气压反相变化不仅存在于南半球,而且也存在于北半球,只是北半球无明显的振荡中心。随着资料条件的改善,南方涛动图象虽然在细节上有所差别,但基本特征并无变化。最近,陈烈庭(1984)指出,在北太平洋存在着分别以马尼拉和船舶天气站 N

1987年3月13日收到,5月9日收到修改稿。

为中心的的东西向的反相气压振荡. 他认为这是与南方涛动对称的赤道以北部分, 称之为北方涛动(NO)^[3]. 但是, 他只计算了 10°N 以北的北太平洋气压场的相关, 自然不可能论证这个存在于赤道以北的振荡, 是整个南方涛动在赤道以北的延伸部分呢, 还是独立于南方涛动的另一类涛动. 因此, 很难了解它的性质及其与南方涛动的关系.

另一方面, 以往计算所用的海平面气压场资料主要是根据陆地测站和海洋上为数不多的岛屿站和天气船的观测, 通过分析内插得到的网格点值, 这很有可能把海洋上本来比较复杂的结构平滑了.

本文从全球热带的角度来考察所谓“北方涛动”的存在及其与经典的南方涛动的关系. 我们采用由美国整编的全球海洋大气资料集(COADS)的一个修改本: GTOADS. 它是对 COADS 从 $20^{\circ}\text{N} - 30^{\circ}\text{S}$ 范围内的资料经过最优插值后得到的产品^[4]. 资料年代为 1950—1979 年. 虽然这份资料只包括海洋上的记录, 但由于全球热带大部分为海洋所覆盖, 故仍能较好地描写全球热带振荡的特征. 考虑到所讨论的涛动的低频性质, 采用了月平均值. 首先, 用两组不同来源资料的 EOF 分析和相关分析方法研究了全球热带海平面气压场的时空结构, 给出了东西向反相气压振荡的总貌; 研究了 SO 与 NO 之间的共性和区别; 同时, 通过对涛动的空间分布和气压场上主要大气活动中心之间关系的分析, 讨论了涛动的性质. 进一步, 揭示了伴随气压场的变化所出现的其它大气要素的甚低频振荡及其与海面温度变化的关系, 最后, 提出了“低纬度涛动”(LLO)的概念, 给出了它的物理图象以及用以描写它的主要特征的低纬度涛动指数.

二、所谓“北方涛动”的存在性检验

不同于陈的资料和方法, 本文采用 GTOADS 资料, 用四个区的区域平均海平面气压的各月距平值, 来描写 SO 与 NO 四个振荡中心的气压变化. 图 1 标出了四个区域的具体位置. 区域 1: 菲律宾附近海域 ($10^{\circ} - 20^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ} - 130^{\circ}\text{E}$); 区域 2: 天气船 N 附近海域 ($25^{\circ} - 35^{\circ}\text{N}$, $135^{\circ} - 145^{\circ}\text{W}$); 区域 3: 达尔文附近海域 ($10^{\circ} - 20^{\circ}\text{S}$, $125^{\circ} - 135^{\circ}\text{E}$); 区域 4: 塔希提附近海域 ($15^{\circ} - 25^{\circ}\text{S}$, $145^{\circ} - 155^{\circ}\text{W}$). 由于各区域之间变率有很大的不同, 对四个区的气压值经过了标准化处理, 并用了 6 个月滑动平均. 图 1 下部给出了相应与 NO 与 SO 的两对反相振荡的气压曲线. 它的主要特征与使用岛屿和陆地上单站资料的分析结果是一致的, 从而证实了赤道两侧反相振荡现象的存在.

下面用 EOF 的分析方法进一步了解振荡的空间结构. 图 2a 是年平均热带海平面气压场的第一特征向量(由于其它区域信号很弱, 只给出 $60^{\circ}\text{E} - 80^{\circ}\text{W}$ 的范围). 该图清楚地呈现出以日界线附近为零线的东西向气压的反相振荡, 它伸展于赤道南北两侧. 振荡具有四个中心, 赤道以南的两个符号相反的中心就是经典的南方涛动图象; 在赤道以北也有两个反相的振荡中心, 它们描写了所谓“北方涛动”. 但是, 从强度来看, 后者比前者要弱得多. 因此, 全球热带海平面气压场的第一特征向量已清楚地描写了南方涛动和北方涛动的基本特征. 图 3 中曲线 6, 气压距平第一特征向量的时间系数表现出清晰的低频特性.

为了进一步考察 NO 的存在及其与 SO 的关系, 我们对这套新的资料, 用描写经典

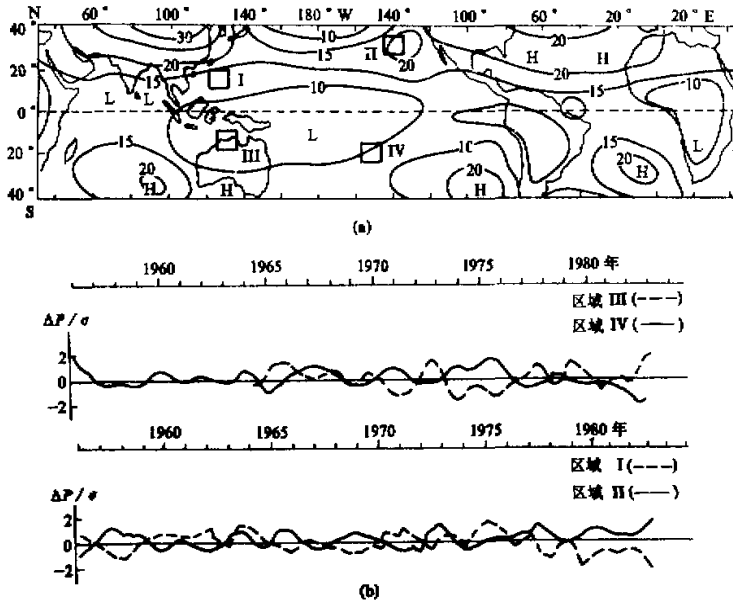


图1 用以描写南方涛动和北方涛动的四个区的位置和冬季平均海平面气压场(a)和四个区气压的变化曲线(b).

南方涛动的单点相关法, 分别计算达尔文和马尼拉两个站的气压与全球热带气压场的相关。结果表明, 它们揭露了比经典图象更详细的结构, 特别是北方涛动的存在。

在以马尼拉为基点的图上(图4a), 可以明显地看到南、北方涛动的存在。除东西反相的基本特征外, 相关场呈现以赤道为界的分支现象。在西太平洋, 赤道南北各存在一个明显的正相关中心: 一个在马尼拉周围, 另一个在达尔文附近。在东太平洋, 赤道南北各有一个负中心, 它们被赤道附近的正区所隔开。它表明, 北方涛动似乎是独立于南方涛动而存在的赤道以北的现象。但是, 与图2给出的特征一样, 从强度来看, 北方涛动较弱。在以达尔文为基点的图上(图4b), 清楚地给出了南方涛动图象, 且比图4a表现得更强些。另一方面在赤道以北, 西太平洋存在着一个较小范围的正相关中心, 在东北太平洋也有一个较弱的负相关区, 这就是所谓“北方涛动”的反映。但是它与以马尼拉为基点的图4a相比要弱得多。这再次说明所谓“北方涛动”主要是太平洋北部的现象。

顺便要指出的是, 在图4a和4b上, 在大西洋上存在的南北方向的反相振荡, 其零线在20°N左右, 它与所谓“北大西洋涛动”是不同的^[5], 是跨越南北大西洋的一类振荡, 值得进一步研究。

下面讨论在不同季节“北方涛动”的信号。

图2b-e给出了各季节气压场的EOF第一特征向量。在北半球冬季(2b), 南方涛动和北方涛动的信号都很清楚, 且前者比后者要强些。这一特征与图3给出的年气压场EOF第一特征向量的基本特征相一致。在北半球春季(2c), 南方涛动仍很清楚, 但赤道

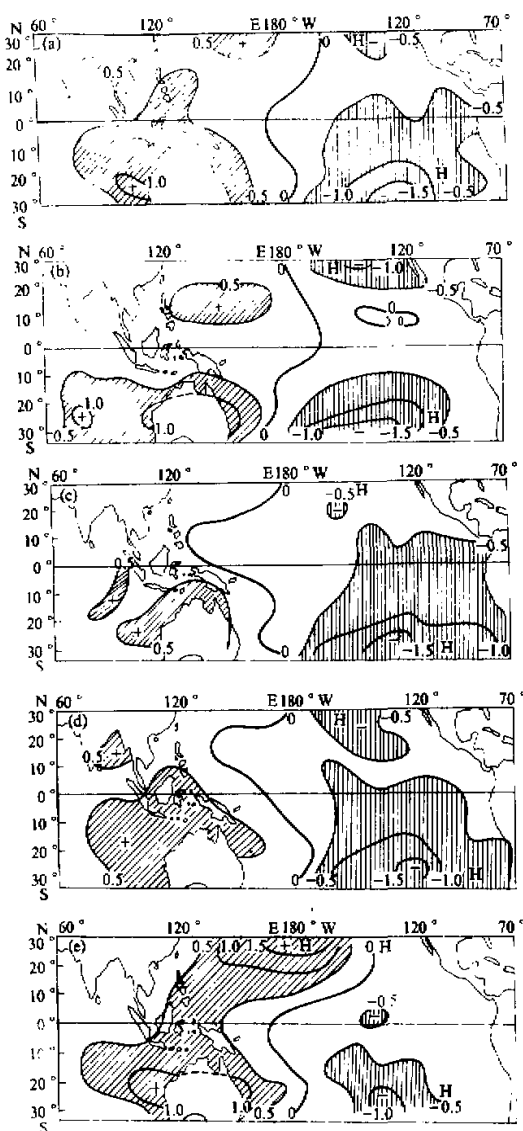


图2 热带海平面气压第一特征向量
(a)年; (b)冬季; (c)春季; (d)夏季;
(e)秋季(均对北半球而言)

带大气环流变化的一个主要特征,但是它比起经典的南方涛动来说,信号明显偏弱。

(2) 南方涛动是在四季气压场上都存在的现象,它的强度的季节变化不大;但北方涛动则主要存在于北半球冬季,在北半球夏季,由于季风低压的强烈发展,北方涛动的西部中心已不在西太平洋,而移到了孟加拉湾附近地区。

以北西太平洋无明显正中心存在,东太平洋的负中心也很弱,可见,所谓“北方涛动”的信号已近乎消失,在北半球夏季(2d),南方涛动信号进一步加强,同时赤道以北,太平洋东部的负中心也明显加强,但此时另一个正中心不是在西太平洋,而移到了孟加拉湾附近,这是季风低压强烈发展的结果,这样构成了印度季风低压区和北太平洋副热带高压区之间的东西向反相振荡。虽然与最初的北方涛动的定义不同,但是应当把它看作为北方涛动的另一种形式。在第四节中,我们将谈到由于大气环流明显的季节变化,涛动中心也有明显季节变化,因此,固定地理位置可能会歪曲实际的变化中心。在北半球秋季(2e),情况又有较大的变化,除了南方涛动的信号继续存在外,整个北太平洋副热带高压区为很强的正值区,其东部无负中心存在,因此,所谓“北方涛动”的信号已消失。但是,上述正中心与东南太平洋的负中心之间似乎存在着一个跨赤道的反相振荡,叠加于南方涛动之上,呈现出以东南太平洋的负区为中心的另一方向的分支现象,这就是所谓“北方涛动”明显的季节性特征。

根据以上分析可以得到如下初步结论:

(1) 所谓“北方涛动”,作为南方涛动在赤道以北的一个“对应物”,在年气压场上是确实存在的,是热

(3) 在过渡季节, 北方涛动的信息变得很弱, 但此时可能存在着跨赤道的西北—东南向的反相振荡, 叠加于经典的南方涛动之上, 这一点在秋季尤其清楚。

在各季节气压场的相关图上也显示出类似的特征(图略)。

三、南方涛动与北方涛动之间的关系——它们的共性和区别

为进一步了解北方涛动与南方涛动之间的关系, 根据经典的南方涛动指数(SOI)和陈烈庭的北方涛动指数(NOI)的定义, 用上一节所选择的四个区的区域平均海平面气压值和塔希提、达尔文、马尼拉和船舶天气站N四个站的海平面气压记录, 构成了两组南方涛动指数和北方涛动指数的时间序列(图5)。为了消除年变化和其它噪音影响, 上述资料均经过标准化处理和12个月的滑动平均。

图5a和5b直观地表明了两种来源不同的资料所描写的南、北方涛动指数之间的一致性和南、北方涛动指数长期变化之间的密切关系。图5c给出了未经滑动处理的NOI和SOI月平均值之间相关

程度随频域的变化。在低频域内(周期为40个月左右), 它们之间有最好的相关(同调值达0.66), 根据协谱和位相谱, 两者之间为无时滞现象的正相关(图略)。因此, SOI与NOI存在着同相的低频耦合关系, 处于周期大约为40个月的低频振荡系统内。

但是, 该图还表明, 在较“高”频域内(周期短于1年), 两者无明显的关系。SOI和NOI各自的谱分布表明: SOI存在周期大约为44个月的低频振荡和周期约2个月的振荡。后者接近于反映季节内变化的40—60天的所谓热带低频振荡^[6]。NOI除了存在与SOI相接近的低频振荡外, 在较“高”频域内与SOI的谱分布呈现出近乎反相的特征。在这个频域内NOI有两种显著的振荡周期: 8个月和3个月, 但是SOI只有2个月的周期(图略)。

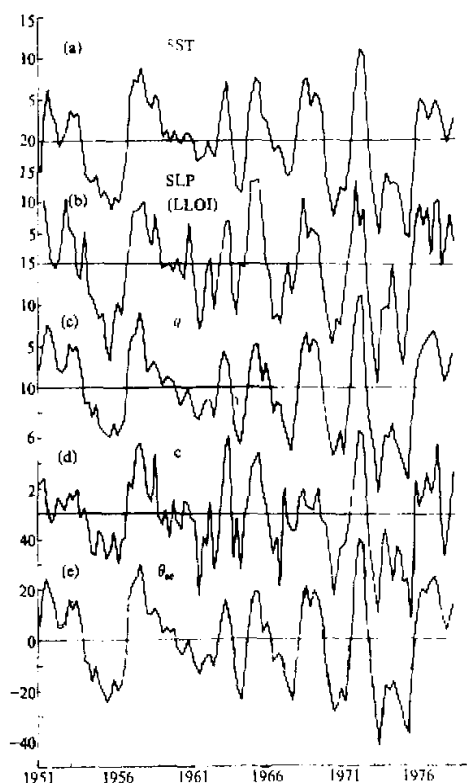


图3 第一特征向量的时间系数

(a) 全球热带海面温度; (b) 海平面气压, 按第四节定义, 又称低纬度涛动指数(LLOI); (c) 湿度; (d) 云量; (e) 假相当位温。

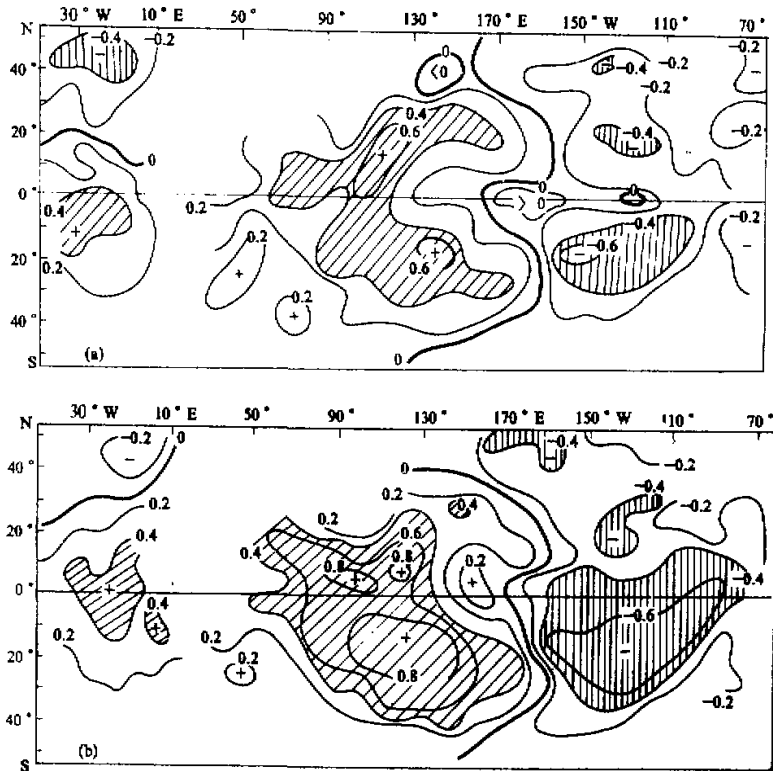


图 4 马尼拉 (a) 和达尔文 (b) 年平均地面气压与全球海洋海平面气压的相关场

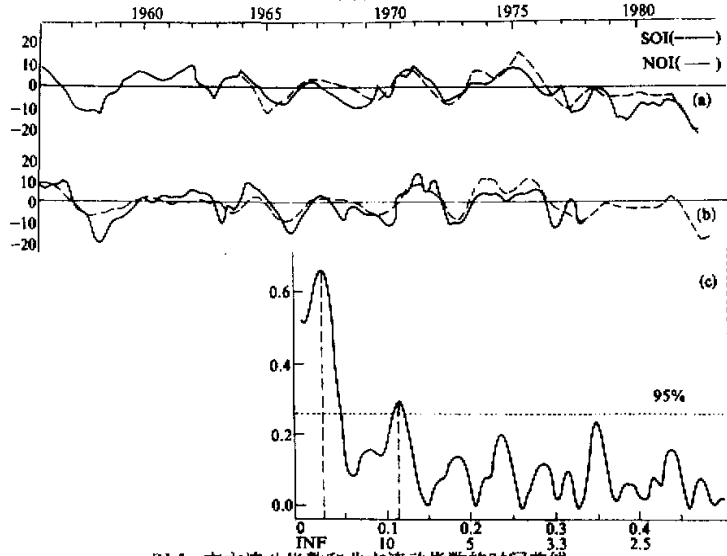


图 5 南方涛动指数和北方涛动指数的时间曲线

(a) 由船舶观测的区域平均资料求得; (b) 由岛屿测站求得
(实线为 NOI, 虚线为 SOI) (c) 它们之间的交叉谱 (coherence)

因此, 可以认为, 南、北方涛动在低频域内(40个月左右)有十分密切的关系, 但是在较高频域内它们的变化彼此是相对独立的. 为了区别于所谓40—60天的热带低频振荡, 我们把周期为40个月左右的年际尺度振荡称为“甚低频振荡”(简称VLFO).

四、低纬度涛动——热带甚低频振荡的物理图象

为了了解上述甚低频振荡的性质, 我们首先把气压场上其甚低频振荡的空间结构(图2)和海平面气压场上大气环流状况(图1)进行对比研究. 在气压场上, 以日界线为界的東西向气压反相振荡, 主要描写了赤道低压带和南、北太平洋副热带高压带这三个准永久性大气活动中心的位置和强度的年际变化关系. 西部的两个正中心主要反映了赤道低压带的强度和位置的变化, 东部赤道以北的负中心主要反映了北太平洋副热带高压的变化, 而赤道以南的负中心则主要反映南太平洋副热带高压的变化. 所谓“北方涛动”主要是描写低压带与北太平洋副高的关系, 而南方涛动则主要是描写低压带与南太平洋副高的关系. 尽管低纬度还有其它一些气压系统存在, 如南印度洋高压(即马斯加林斯高压), 但那里的信号较弱. 伴随气压振荡所表现出来的大气环流特征是, 在振荡的高指数时期, 南、北太平洋副高加强并靠近赤道, 赤道低压中心附近加深, 但位置偏西. 在低指数时, 两半球副高带减弱离开赤道, 低压带明显向东伸展.

另一方面, 北方涛动的季节性特征也与北太平洋副高明显的季节变化有关. 它的中心位置不仅有显著南北位移, 而且有明显的东西伸展(图2标出了高压中心各季位置). 只有在北半球冬季, 它位于东北太平洋上, 与赤道低压带之间构成强烈的气压对比, 此时北方涛动的信号就比较强. 在其它季节, 由于该高压明显向西伸展, 太平洋上东西向气压对比就减弱, 北方涛动特征也相应减弱. 在夏季当大陆季风低压发展时, 实际上构成了由海陆热力对比为主所产生的涛动.

伴随着气压场的变化, 低层大气的湿度、稳定性和云量等以及海面温度也表现出明显的甚低频振荡特征. 图3分别给出了各要素第一特征向量的时间系数, 显示了它们之间一致的年际振荡关系. 它们的能谱特征显示出近似相同的甚低频振荡周期(40个月左右), 各要素变化之间无明显的时滞关系(图略).

如图6所给出的, 甚低频振荡在云量场上的主要表现为, 西太平洋(130°E)和中太平洋(180°E)云量变化的反相关系, 即原位于日界线以西的最强热带对流活动区的東西振荡, 也就是 Walker 环流上升分支的東西振荡.

在低层大气湿度场(图6d)、湿不稳定度(图6e)和海面温度场(图6q)上, 则主要表现为赤道附近——主要是中东太平洋上增温、增湿和湿不稳定的发展与降温、变干和对流不稳定程度受到压制这两种状态之间的振荡. 与此同时, 南北太平洋副热带地区则呈现出与此相反方向的振荡现象.

上述甚低频振荡, 在海洋中还表现为赤道太平洋主要海流强度的变化, 在大气中还表现为经向和纬向大气环流指数的变化^[6].

可见, 上述甚低频振荡本质上是热带海洋—大气系统的整体行为, 除气压场外, 并不存在以赤道为对称的分支现象. 因此, 应当把它称之为“低纬度涛动”, 而所谓“北方涛动”和南方涛动则是它在气压场上表现出来的两个分量.

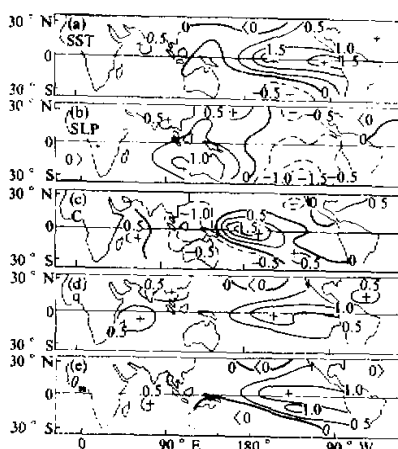


图 6 海面温度 (a), 海平面气压 (b), 去量 (c), 比湿 (d) 和 θ_{se} (e) 的第一特征向量

鉴于海平面气压场的第一特征向量同时包括了南、北方涛动的主要信息, 它与其它要素的低频振荡有一致的关系, 我们把它的时间系数定义为“低纬度涛动指数” (LLOI), 作为描写低纬度甚低频振荡强度的指标. 由特征向量场上的符号所决定, 低指数时时间系数为正值, 反之则为负值. 这个指数与热带海面温度第一特征向量的时间系数之间有十分密切的关系, 它们之间的相关系数达到 $+0.84$, 远远超过 0.01 的信度要求. 这个指数的变化清楚地给出了各次 ENSO 事件的强信号 (见图 3a, 图中数字标出各次 ENSO 事件的年份.).

通过分析以上所述各要素场变化之间的内在联系, 可以得出低纬度涛动的基本物理图象. 它由两种基本状态和其间的过渡状态所组成 (图 7).

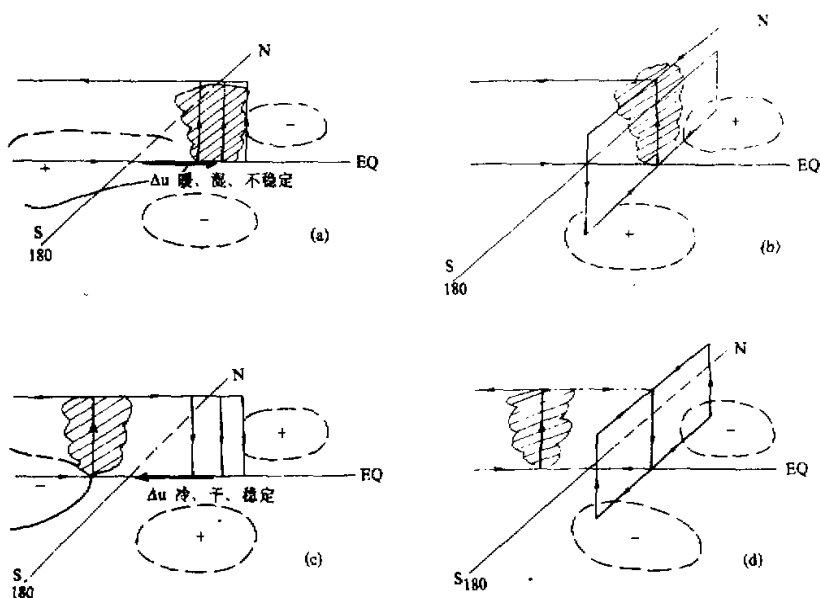


图 7 低纬度涛动的物理图象

(a) $t=0$; (b) $t=\pi/2$; (c) $t=\pi$; (d) $t=-\pi/2$.

在涛动的低指数时期 ($t=0$, 图 7a), 赤道低压带主体减弱, 但前端向东伸展, 此时南北太平洋上副热带高压带减弱, 并离开赤道, 其结果必然导致信风减弱, 赤道西风发展^[9], 在这样的大气环流条件下, 有利于赤道西太平洋暖水的向东扩展和输送, 同时中

东太平洋的赤道上翻亦相应减弱, 造成中东太平洋海面温度升高. 在高海温作用下, 低层大气湿度加大, 湿不稳定得以发展. 因此, 赤道主要对流区的东移, 即西太平洋对流减弱, 中太平洋对流加强, 也就是 Walker 环流上升分支发展和东移的现象.

在气压涛动的高指数时期, 情况完全相反 ($t = \pi$, 图 7c), 南北太平洋副高加强且向赤道靠拢, 赤道低压主体加强, 但其东端西撤. 其结果必然导致信风加强, 赤道东太平洋冷水带强烈发展, 且向西平流, 造成大范围海面降温, 低层大气变干, 湿不稳定受抑制. 因此, 主要赤道对流区萎缩在西太平洋, 也就是 Walker 环流上升分支西移的过程.

这两种状态之间的转换看来主要通过副热带高压强度和位置变化这个重要环节.

如图 7b ($t = \pi/2$) 所示, 在低指数时期, 在海面温度增暖的作用下, 将导致 Hadley 环流的加强^[10], 这个加强的 Hadley 环流的下沉分支, 将产生使副热带高压由弱变强的趋势, 即当造成低指数时期副高减弱的外部影响因子被由内部过程发展起来的使副高加强的影响所克服时, 将出现由低指数向高指数的转变. 同样, 在高指数时期 ($t = -\pi/2$), 低的赤道温度又有使 Hadley 环流减弱的作用, 从而使副热带高压减弱, 产生由高指数向低指数的转变. 实现整个过程转变所需要的时间, 就是低纬度振荡的平均周期.

以上低纬度涛动的物理图象, 不仅能够较好地描写所谓埃尔尼诺/南方涛动现象的基本特征, 而且说明了产生准周期性振荡的可能物理过程. 这个图象把南方涛动和北方涛动与埃尔尼诺现象的联系统一起来了, 把它们与南、北太平洋副热带高压的变化之间的联系统一起来了. 因此, 所谓 ENSO 现象, 并不是那一个半球的行为^[11,12], 而是两半球大气环流作用下, 低纬度大气-海洋相互作用的现象.

以上分析还表明, 低纬度涛动在太平洋地区有最强的信号, 其原因值得进一步研究. 但是, 可以期望, 西太平洋最暖海区 and 相应的最强大气热源的存在可能是产生上述甚低频振荡的主要能量来源. 这个暖水区的热力和动力学惯性可能是这一地区海气系统中缓慢运动发展和维持的主要机制.

五、结 论

根据上述分析, 可以得到如下主要结论:

(1) 在全球热带存在着周期大约为 40 个月的振荡现象, 它是热带海气系统年际变化的主要特征. 为了区别于周期为 40—60 天的季节内热带低频振荡, 可称它为“甚低频振荡”.

(2) 这一类甚低频振荡是热带海洋-大气系统的总体行为, 主要反映全球热带三个主要的准永久性活动中心, 赤道低压带, 南太平洋副高和北太平洋副高的强度和位置年际变化的关系及相伴随的低纬度大气云量、温度、湿度和稳定度等的变化, 是热带大气年际变化的基本特征之一, 似应称为“低纬度涛动”.

(3) 低纬度涛动在气压场上表现为以日界线为界的東西反相的气压变化, 且存在着以赤道对称的两个分量, 即众所周知的南方涛动和所谓“北方涛动”. 两者在甚低频域内有十分一致的关系. 但在周期短于一年的“高”频域内, 它们呈近乎反相的谱特征. 这是两类不同尺度的运动.

(4) 本文给出的低纬度物理图象, 它的两种基本状况和其间的过渡状况, 不仅可以较好地解释 ENSO 现象的基本特征和它的振荡过程, 而且把南方涛动、北方涛动与 ENSO 现象的关系统一在一个系统中。ENSO 现象并不是那一个半球的行为, 而是两半球大气环流作用下, 低纬度海洋-大气系统的整体行为。

参 考 文 献

- [1] Walker, G.T. 1923, Correlation in seasonal variation of weather. VIII. A preliminary study of world weather, *Mem. Indian Meteor. Dep.*, 24, 75 — 131.
- [2] Berlage, H.P. 1966, Fluctuations in the general atmospheric circulation of more than one year, their nature and prognostic value, *K. Ned. Meteor. Inst. Meded. Verh.*, 88, 152.
- [3] 陈烈庭, 1984, 北方涛动与赤道太平洋海温 and 降水, *科学通报*, 29 卷, 1190 — 1192.
- [4] Slutz, R. et al., 1985, Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (COADS), Release 1, Climate Research Program, ERL, NOAA, Boulder, Co. 262.
- [5] Lamb, H.H. 1972, *Climate, present, past and future. Vol. 1, Fundamentals and climate now*, Methuen and CO LTD., London, 243 — 247.
- [6] Madden, R.A. and P.R. Julian, 1971, Detection of a 40—60 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific, *J. Atmos. Sci.*, 28, 702 — 708.
- [7] Atkinson, G.D. 1971, *Forecasters guide to tropical meteorology*, MAC, U.S. Air Force, 304.
- [8] 符淙斌, 苏炳凯, 1981, 热带太平洋海气系统低频振荡, *海洋与湖沼*, 增刊, 19 — 28.
- [9] Bjerknes, J. 1969, Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific, *Mon. Wea. Rev.*, 97, 163 — 172.
- [10] 符淙斌, 1979, 赤道海温异常和大气的垂直环流圈, *大气科学*, 3 卷, 50 — 57.
- [11] Namias, J. 1976, Some statistical and synoptic characteristics associated with El Nino, *J. Phy. Ocean*, 6, 130 — 138.
- [12] Rasmusson, E.M. and J.M. Wallace, 1983, Meteorological aspects of the ElNino/Southern Oscillation, *Science*, 222, 1195 — 1202.