

热带太平洋地区海气系统的耦合振荡

杨义碧 陈隆勋

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文讨论了东太平洋赤道海温和太平洋月平均云量距平的关系,结果表明:(1)东太平洋赤道海温距平和中太平洋赤道云量距平有很好的正相关,而与东、西太平洋赤道云量距平有很好的负相关。所以太平洋赤道上空应该存在二个距平的东西向环流。(2)云和海温存在周期为34—38个月的耦合振荡,我们提出了云-辐射-海温机制来作解释。(3)在东太平洋海温暖水月的前12个月到后6个月期间,东太平洋赤道云量是负距平的(即偏少),这表明此期间可能是大气在影响海洋,亦即 Walker 环流影响海温变化,而不是海温影响了 Walker 环流。海温和 Walker 环流是相互作用的,这种相互作用组成了大气和海洋之间的一种耦合振荡。(4)东太平洋海温、中太平洋云和北半球中、西太平洋信风亦有很好的相关。

一、引 言

我们知道,海洋学家经常用前期的大气环流变化来解释后期的海洋环流变化(如 Wyrki^[1])。与此相反,气象学家却经常用前期的海洋变化来解释后期的大气环流变化,这方面,大气物理所长期预报组^[2]就成功地利用前期的海温来预告我国长江中下游汛期的降水。既然双方均能以对方的前期变化来解释另一方的后期变化,这表明存在一种海气系统间相互反馈的过程。这种耦合振荡的机制可以是动力的,也可以是热力的,流场既可以通过应力也可通过云和辐射机制影响海温,而海温又通过海气交换和辐射影响云和大气从而影响大气环流。Pike^[3]在作热带辐合带数值试验时曾提出过这种过程可以造成辐合带的半个月周期振荡。

本文直接利用卫星观测推算的太平洋云量变化来讨论它与东太平洋热带海温的相互反馈过程。结果表明,云和海温之间存在周期约为34—38个月左右的耦合振荡。我们计算的辐射场,有可能支持云-辐射-海温机制。我们还讨论了云量和北太平洋信风的关系,发现云和北太平洋信风之间也有一个类似的相关分布,海温和北太平洋信风之间也存在很好相关,这表明云和北太平洋信风以及海温之间有一个反馈过程。

二、海温和云量的相关分析

图1曲线a是东太平洋赤道140—120°W间月平均海温距平的6个月滑动平均值,

1980年2月23日收到,4月10日收到修改稿。

时期自 1965 年 2 月到 1973 年 7 月, 共 102 个月。图中可见有三个正距平峰值, 平均周期约为 3.5 年左右, 这与近 20 年来发生的 El Nino 周期是一致的^[4]。其中, 1972 年 3 月到 1973 年 6 月的一次 El Nino 现象是近代最强的一次。

夏威夷大学出版了 1965 年 2 月到 1973 年 7 月间由气象卫星观测推算的月平均云量^[5]。由平均云量分布来看, 太平洋赤道的云量终年是自西向东减少的, 最少处约在 130°W , 而最多处约在 $130^{\circ}\text{—}150^{\circ}\text{E}$, 由少云区的平均云量来看, 东太平洋应该盛行下沉运动。但上述多云区云量在北纬 $0^{\circ}\text{—}5^{\circ}\text{N}$ 间不足以说明存在强上升区, 而在南纬 $0^{\circ}\text{—}5^{\circ}\text{S}$ 间到可以说存在上升区, 而与东太平洋赤道的下沉区组成一个 Bjerknes^[6] 提出的东西向环流。

Ramage^[7] 分析了 1972—1973 年 El Nino 现象期间赤道地区的云量分布, 他得到的结论如下: 在 1972 年夏季, 中太平洋赤道地区云量显著增加, 而西太平洋赤道地区有减少, 东太平洋则无明确的关系, 因而认为海洋和大气间无确定的对应关系。根据我们的分析, 东太平洋赤道地区在这次 El Nino 现象的前期和中期均为少云区, 而此时期中太平洋即为多云量而西太平洋即已为少云区。这表明 1972 年夏季赤道上存在二个正反的东西向环流圈, 即中太平洋赤道上升向两侧下沉, 这与陈隆勋和罗绍华^[8]对该夏季的环流分析结果是一致的, 西太平洋赤道的下沉支对于该年西太平洋热带辐合带的盛行有十分重要的作用。

我们作了以东太平洋赤道海温距平(资料即图 1 中曲线 a 所示)为中心与其 10 个月前以及 14 个月后的整个太平洋云量距平的相关分析。对于海温资料, 我们取不平滑的和经 6 个月滑动平均的二种, 结果表明两者相关系数相差 0.02—0.05 左右, 平滑的相关系数较大, 其分布基本一致。图 2 是赤道地区 ($0^{\circ}\text{—}2^{\circ}\text{N}$) 海温和云量距平经平滑平均的相关分布, 由图可见:

(1) 相关系数分布明显地表现有三个区, 即 140°E 以西的西太平洋地区, $140^{\circ}\text{E—}150^{\circ}\text{W}$ 的中太平洋地区和 150°W 以东的东太平洋地区。在相关月份前后数月内, 西太平洋和东太平洋地区海温和云量是负相关, 而中太平洋为正相关, 相关月份附近数月内相关系数均超过 0.001 信度*, 表明是可信的。这说明, 当 El Nino 发生的前后数月内, 东太

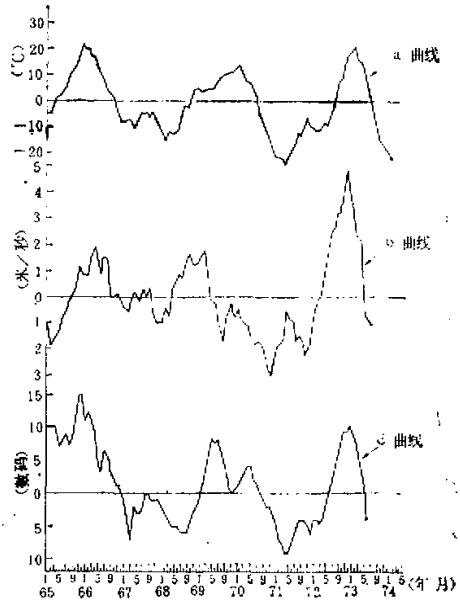


图 1 1965 年 2 月至 1973 年 7 月经 6 个月滑动平均的时间序列曲线

a 为东太平洋赤道 $140^{\circ}\text{—}120^{\circ}\text{W}$ 间月平均海表温度距平值; b 为 Majuro 岛月平均纬向风距平值; c 为赤道 ($0^{\circ}\text{—}2^{\circ}\text{N}$) $165^{\circ}\text{—}170^{\circ}\text{E}$ 间云量月平均距平值。

* 根据我们资料序列, 达到信度 0.001 的相关系数应为 0.32, 信度 0.01 为 0.25。

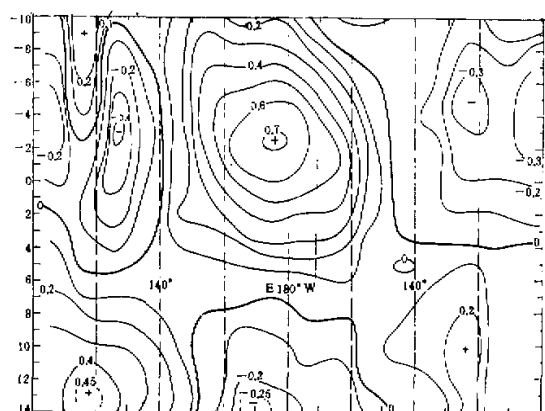


图2 赤道地区海温和云量相关分布, 纵坐标为相关的前后月份, 负数为海温发生月份与前几个月云量的相关, 横坐标为经度

平洋和西太平洋赤道地区是少云的, 而中太平洋是多云的, 相反, 在东太平洋冷水强盛期前后数月内, 东和西太平洋赤道地区云量是偏多的, 而中太平洋是偏少的。中太平洋相关系数最大, 可达 0.7, 而东和西太平洋达 0.35—0.42, 均已满足信度 0.001 的要求。这些最大值发生于海温相关月的前 3—4 个月, 表明 3—4 个月前的云量对 3—4 个月后的海温影响最大。

(2) 为了叙述方便, 我们称东和西太平洋海温和云量为负相关而中太平洋为正相关的情况为甲型分布, 称东和西太平洋为正相关而中太平洋为负相关的情况为乙型分布。我们看到, 甲型分布发生的月份各区略有差异。对西太平洋, 甲型分布发生于前 9 个月到后 5 个月(平滑海温)或前 6 个月到后 7 个月(不平滑海温), 所以共为 14—15 个月。中太平洋约为前 12 个月到后 7 个月(或前 9 个月到后 9 个月)共约 19 个月。东太平洋为前 13 个月到后 3 个月(或前 12 个月到后 6 个月)约为 17—18 个月。我们还看到, 相关月 9 个月后, 各地区的相关系数均反了过来, 成为乙型分布, 并且相关系数越来越大, 在 13—14 个月后西和中太平洋相关系数已达 0.001 信度以上。可以预计, 乙型相关分布也将维持同样月份, 所以甲型和乙型相关的交替组成了海温和云量的一次振荡。其振荡周期约为 34—38 个月, 这可能是海气系统长期的振荡周期。

从以上的事实可以看到二点。第一, 东、中和西太平洋赤道地区存在明显遥相关, 但这种遥相关并不是以前所说的东和西太平洋趋势相反的遥相关, 而是东、西太平洋趋势一致而与中太平洋相反的遥相关。由此可以推论: 在东太平洋海温异常年份均有二个正反的东西向异常距平环流圈。在暖水年, 中太平洋距平上升而东西太平洋距平下沉, 冷水年反之。第二, 东太平洋赤道海温正距平时, 该区并不是多云的而是少云的。依不平滑海温相关分布情况来看, 远在 12 个月前应开始为云量负距平, 到前 2—3 个月云量负距平与海温正距平相关最大。这种情况一直延续到相关月后 6 个月, 随后云量才开始为正距平。这一点是可以用云-辐射-海温机制来解释的。前期少云, 有利于直达辐射增加, 海洋吸收的辐射增加而变暖, 形成海温和云量负相关值逐渐增加, 这个时期可以认为是云通过辐射影

响海洋的时期,海温出现正距平,正距平出现后反过来增加海气潜热交换和增加大气不稳定层结,有利于云量增加,海温正距平出现后使云量负距平减少的时期为海洋影响大气的时期。云量的增加又不利于海温变暖,相关值又渐趋变小,所以在相关月后一定月份,相关月的海温和几个月后的云量变为正相关,此时海温变为负距平,云量为正距平。这种海气系统相互反馈而形成的振荡,其周期约 34—38 个月。

在东、中、西太平洋赤道上,以中太平洋云量和东太平洋海温相关最大。这表明中太

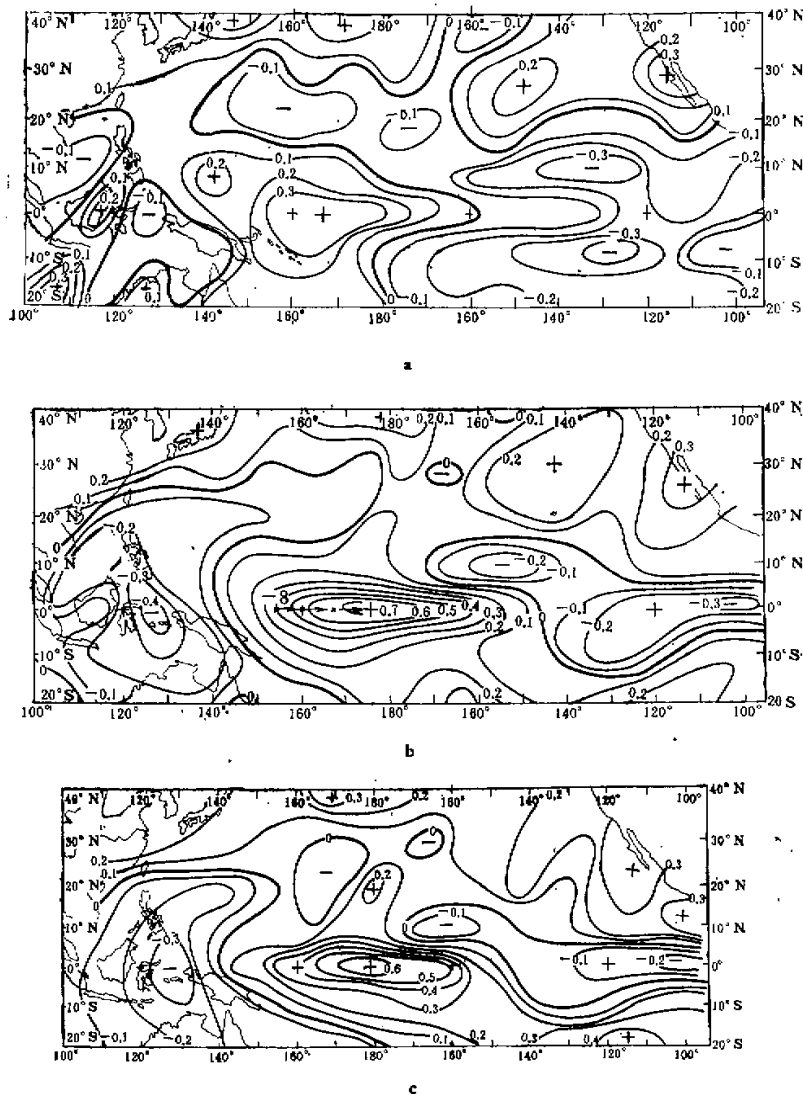


图 3 东太平洋赤道海温与太平洋地区云量相关前 8 个月 (a)、3 个月 (b) 和当月 (c) 的相关系数分布

平洋赤道是一个十分关键地区。在 1972—1973 年 El Nino 中,中太平洋云量自 1972 年 4 月起就开始稳定地为正距平,而东太平洋自 1972 年 6 月起才开始在 115°W 以东稳定地出现负距平。在某种意义上,可以认为中太平洋赤道地区是先启动的,它先开始云量正距平,然后影响东太平洋云量负距平。

图 3a—c 分别是相关月的前 8、3 个月和当月的东太平洋赤道海温和云量的相关系数分布图。我们看到,8 个月前赤道附近相关分布即已为甲型分布,中太平洋及东太平洋南北二侧 10 个纬度内的相关系数即已满足信度以上。但西太平洋地区以及东太平洋赤道上空的相关系数尚未满足信度。在前 8 个月的图 3a 上,可以看到,中太平洋赤道及 10°N 上在海温正距平时,云量偏多,而其北侧 20° — 30°N 间原副高少云带上为负相关,则云量偏少,这表示此时中太平洋 Hadley 环流偏强。相反,冷水时刻偏弱。至于东太平洋,只能说此时北半球热带辐合带云带偏弱而南半球近赤道少云带偏强,对经圈环流并无明确的影响。到前 3 个月(图 3b),甲型相关系数分布已最为清楚。此月与相关月(图 3c)的分布已几乎完全相似。西太平洋负相关中心已十分清楚。我们看到, 20°N 以南全为负相关, 30°N 以北为正相关。这表明在暖水年,西太平洋赤道少云,可能为下沉区,而西风带云带偏强,故中纬逆环流偏强,季风环流下沉支偏强。

在前 3 个月的图上亦可看到,在南北纬 10° 的中太平洋均为正相关区、最大相关系数达 +0.7。在图 3b 上画出了该中心在各月的位置,可见是 -8 月生成于 150°E 赤道上,5 个月向东移了约 25 个经度,平均以每月 5 个经度东移。可以看到,在东太平洋暖水年,中太平洋西部 (140° — 175°E) 的赤道少云带将消失,使 10°N — 10°S 成为 Hadley 环流的上升支。而 20° — 30°N 为负相关,故暖水年云量偏少,所以 140° — 170°E 间赤道逆环流消失而北半球 Hadley 环流及北半球中纬逆环流加强,南北半球热带逆环流亦加强,西太平洋辐合带云带亦东伸到中太平洋,这一点与陈隆勋等^[9]分析的 1972 年太平洋环流特征是一致的。我们看到,在 170° — 150°W 间,赤道是正相关, 10°N 为负相关, 20°N 又为正相关,所以在暖水年该区的 Hadley 环流偏弱。我们知道, 130°W 以西赤道是少云区而美洲东岸外大洋是多云区,现在刚好是赤道负相关,东岸外是正相关,所以暖水年正好加强了这种少云和多云分布。总之,这种相关场的分布,既造成了暖水年有二环的距平东西环流,又影响了经圈环流。

相关月以后的第三个月相关分布,和图 3b、c 基本一致,但系数值变小(图略)。这表明海温增暖及降冷正在影响云量朝反方向发展。到 13 个月后,可以看到,相关分布和图 3a—b 完全相反,即成乙型分布。西太平洋成正区,中太平洋为负区而东太平洋为正区。这表明海气系统已趋于振荡的相反周期,即海温影响云量阶段。

三、辐射场和信风场的特征

我们认为,要完全的解释这种耦合振荡,要解决二个问题,第一是云-海温相互作用是通过什么过程?第二是云和环流的关系如何与海温连系起来,甲型和乙型相关分布又是如何解释。对第一个问题,我们认为,云-海温相互作用是通过辐射过程来完成的。作为示意说明这个问题,我们计算了 1973 年 1 月海面热量平衡,计算方法取自[9],其中包括

辐射、感热和潜热交换, 该月是暖水月份。

图 4 是 1973 年 1 月热量平衡图。可以看到中太平洋赤道是负区, 即海洋支出热量, 而东、西太平洋赤道为正区, 即海洋有净得热量。但我们看到, 在 145°W 以东, 又为负区, 正是这个负区, 使该年海温正距平自 1 月以后逐渐减弱。检查这些正负区, 我们发现, 中太平洋负区主要是海面对太阳辐射吸收量小和海水潜热交换大而形成, 而东太平洋负区主要是潜热大而形成。这表明东太平洋大气将得到大量水汽, 既加热了大气又使云量增加, 而海温却因海洋失热而开始下降。中太平洋也是如此。实况的结果是中太平洋云量

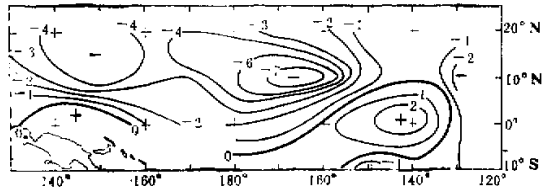


图 4 太平洋热带地区 1973 年 1 月热量平衡图。单位: 千卡/米²·月

仍维持正距平到 1973 年 4 月, 而东太平洋云量立即开始出现正距平, 而海温下降。这表明东太平洋赤道地区已开始有了变化, 而中太平洋赤道仍如 El Nino 年特征。

云的变化和信风变化是相互连系的现象。Wyrtki^[2] 以南太平洋中部信风的前期变化来解释东太平洋赤道海温的变化。我们认为, 北半球中太平洋的信风也是有相当作用的。我们作了 Majuro 岛 (1965, 2—1973, 7) 的 850mb 上各月纬向风距平值, 图 1 中的 b 曲线是其时间序列曲线, 把此曲线与海温曲线 (图 1 中的 a 曲线) 和中太平洋云量曲线 (图 1 中的 c 曲线) 比较, 可看到, 云量曲线和海温曲线相当一致, 但云量曲线超前 3—5 个月。我们看到, 纬向风曲线亦有 3.5 年左右的振荡周期, 并且东太平洋赤道海温正距平时期亦是纬向风正距平时期, 即暖水时期正是北半球中太平洋信风弱或西风 (季风) 强时期, 冷水期相反。但二者仍有明显的位相差。纬向风曲线和云量曲线一致, 而比海温曲线超前 3—5 月。我们作了东太平洋赤道海温对于中太平洋热带 Majuro 岛 850mb 纬向风的相关

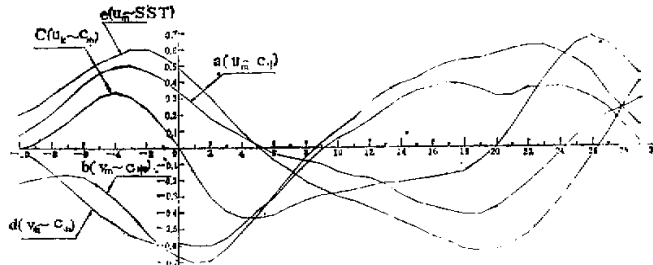


图 5 Majuro 岛和 Koror 岛 850mb 上的纬向风和经向风与中太平洋赤道云量和东太平洋赤道海表温度的相关曲线。纵坐标为相关值, 横坐标为相关月份。a、c 分别为 Majuro 岛和 Koror 岛纬向风和中太平洋赤道云量的相关曲线; b、d 分别为该两岛经向风和东太平洋赤道云量的相关曲线; e 为 Majuro 岛纬向风和东太平洋赤道海温相关曲线

是不对称的,从图 5a、5e 看到,自最大正相关到最大负相关需 22—23 个月,而自最大负相关到最大正相关只需 15—16 个月。由此组成 34—39 个月的耦合振荡周期。我们作了中太平洋赤道云量对该站 850mb 经向风曲线(图 5b)和云量对北太平洋西部热带的 Koror 岛(91408 站)的 850mb 纬向风(图 5c)和经向风(图 5d)的相关曲线,我们看到曲线 5c 和 5e 基本一致,表明中太平洋和西太平洋纬向风相关规律均是一致的。另外,纬向风和中太平洋云量和东太平洋海温正相关期间,经向风和云以及海温为负相关,所以在中太平洋赤道多云期间,从西太平洋到中太平洋,北半球低空热带为东南信风偏弱或西北风偏强。但云和经向风相关曲线最大负相关发生在当月相关,即在经过前 10 个月强偏北风(或弱偏南)后,云量一开始正距平,偏北风就开始减弱(或偏南风开始增强)到 9 个月后,转变为强偏南风(或弱偏北风)。来自南半球的东南信风偏强不利于中太平洋赤道多云,是以前已知的规律。东太平洋暖海水时期低空偏北风强表示 Hadley 环流增强,这与前节中讨论的结论是一致的。以上结果表明,对于东太平洋赤道海温的变化而言,除了它与南半球信风的相互作用外,还与北半球信风相互作用。但是这种相互作用是通过云来调节的。我们设想可由表 1 的过程来完成。其中信风和云之间有一反馈过程,云和海温间有一反馈过程。

以上是海气间热力作用耦合过程的一个设想。自然,信风和海温间尚有动力耦合过程。图 1 中的 b 曲线和 a 曲线相关十分好,表明北太平洋中部信风和东太平洋赤道海温有相当好的相关,这其中一定会存在某种动力耦合过程,这种过程尚不清楚。另外,南太平洋中部信风同东太平洋赤道之间亦有相当好的耦合过程,这二种是否是同一个过程,还需进一步讨论。

四、讨 论

从以上讨论,我们可以得到以下结论:

1. 东太平洋赤道海温距平和赤道云量距平有十分好的相关。海温距平和西太平洋赤道云量距平为负相关,与中太平洋赤道云量距平为正相关,而与东太平洋云量距平本身为负相关。其中,和中太平洋的相关最大。所以,东太平洋赤道海温正距平前期或盛期年份,该地区上空云量是负距平少云的,并不是多云的。另外,暖水年在太平洋赤道上空应该存在二个东西向距平环流。在冷水年则反之。

2. 以上相关场分布存在于海温相关月前后约 8—9 个月。在相关月 8—9 个月以后,相关分布就完全反了过来,即东和西太平洋赤道变为多云而中太平洋变为少云。由此可估计海气之间存在一种周期为 34—38 个月的耦合振荡,我们认为,这种振荡可能主要是热力造成的。

3. 西太平洋 Koror 和中太平洋 Majuro 二站的 850mb 纬向风与中太平洋赤道云量在相关月前期有很好的正相关,后期有负相关。该二站经向风则在相关月前后 8—10 个月内有强的负相关。这表明中太平洋赤道云量大的年份,相关月前后为中、西太平洋热带信风弱(季风强)、偏北风强的时间。东太平洋海温和北太平洋中部热带低空纬向风之间也有强的正相关,但位相则纬向风超前,即信风弱的出现超前于海温正距平约 5—6 个月。我们认为海温和云之间存在一个耦合反馈过程,这个反馈过程是通过辐射-云机制来完成,

然后通过二个东西向环流和中太平洋的 Hadley 环流使太平洋赤道各地有强的遥相关。信风和云之间亦有一个耦合反馈过程,这个过程也可通过经向环流及东西向环流来完成,这二个反馈过程又通过云把北半球信风和海温连系了起来,其连系过程可能如表 1 所示。我们认为,信风和海温除了动力耦合外,更重要的是通过云和辐射的热力耦合。

信风和云有很强的相关,云又和海温有很强的相关,则海温和北太平洋信风亦应有很好相关。图 5 曲线 c 即是东太平洋赤道海温和 Majuro 岛 850 mb 纬向风相关曲线,表明在相关月前后有很好正相关,即暖年信风弱(季风强),冷年反之。这和陈隆勋等^[2]看法是一致的。

4. 赤道太平洋存在强的遥相关,东西太平洋趋势一致,中太平洋相反的遥相关。例如,暖水年,东西太平洋少云,中太平洋多云,冷水年反之。所以,在异常年份,存在二个而不是一个距平东西环流。

5. 中太平洋赤道是一个关键区域,在许多事件中,常是它先开始变化,在与东太平洋海温及北半球热带中西太平洋信风相关中,相关系数也最大。在暖水期,由于该区云量有强的正距平,造成了二环的距平东西向环流以及中太平洋的强 Hadley 环流。

这里要说明一点,我们讨论的是距平值相关,所以暖水月的二环东西向环流指的是距平环流。东太平洋赤道暖水月,中太平洋云量正距平而东、西太平洋负距平。

从卫星云量来看,平均为西太平洋赤道多云而东太平洋赤道少云,于是可以推论出一个东西向 Walker 环流,与^[6]一致。但在云图上,中太平洋亦为少云区,不可能是强上升区。[6]中图 8 在中太平洋上升支与事实并不相符。

从本文结果来看,赤道上空东西向环流和海温之间是相互反馈的。海温影响东西向环流而东西向环流亦反过来影响海温。所以,说东西向环流完全由海温决定是不怎么合乎事实的。至少在海温变暖的前、中期,东西向环流对海温的影响是不能忽略的。在环流和海温之间的反馈机制中,云起了重要的调节作用,看来云-辐射机制对海表的温度和一个月以内中期的环流-海温反馈起作用,对大范围深层的海温以及长期的环流-海温反馈也起很重要的作用。在利用海温做长期预告时需要小心从事。

致谢:在工作完成后,陶诗言同志和巢纪平同志提了宝贵意见,另外,本文是利用林学椿同志的计算程序进行的,特此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Wyrthi, K., El Niño—the dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 5, No. 4, 572—584, 1975.
- [2] 大气物理研究所长期预报组, 冬季太平洋海水温度异常对我国汛期降水的影响, 中国科学院大气物理所集刊第 6 号《海气相互作用与旱涝长期天气预报》, 科学出版社, 1978.
- [3] Arthur C. Pike, Intertropical convergence zone studied with an interaction atmosphere and ocean model, *Mon. Wea. Rev.*, 1971.
- [4] Elmar R. Reiter, The interannual variability of the Ocean-Atmosphere System, *J. Atmos. Sci.*, 35, 349—370, 1978.
- [5] Pacific Ocean cloudiness from satellite, UHMET, 76—01.
- [6] Bjerknes, Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific, *Mon. wea. Rev.* 97, 163—172, 1969.
- [7] Ramage, Preliminary discussion of the meteorology of the 1972—73 El Nino, *Bull. Amer. Me-*

teor. Soc., 56, 234—242, 1975.

[8] 陈逢勋、罗绍华, 北太平洋西部地区强和弱热带辐合带时期低纬大气环流的分析, 大气物理所集刊第8期, 科学出版社, 1978.

[9] Будыко, М. И., Тепловой баланс земли, Гидрометеиздат, 1978.

THE COUPLED OSCILLATION OF AIR-SEA SYSTEM IN THE TROPICAL PACIFIC OCEAN

Yang Yi-bi Chen Long-xun

(*Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica*)

Abstract

In this paper, the relationship between the sea surface temperature (SST) over the eastern equatorial Pacific and the monthly mean cloudiness anomalies is discussed. The main results are as follows:

(1) There exists a positive correlation between SST anomalies over the eastern equatorial Pacific and the monthly mean cloudiness anomalies over central Pacific Ocean and a negative correlation between SST and cloudiness over the eastern and western Pacific Ocean. Therefore, there are two zonal anomalous cycles over the equatorial Pacific Ocean.

(2) There are coupled oscillations between the anomalies of SST and the monthly mean cloudiness anomalies. Its period is about 34—38 months. This phenomenon may be explained with the cloud-radiation feedback mechanism.

(3) The monthly mean cloudiness anomalies over eastern equatorial Pacific Ocean are negative in the period ranging from 12 months before the warm SST to 6 months after that. From this, we could conclude that during this period the atmosphere can influence the ocean, i.e. the Walker circulation can influence SST.

(4) The SST over eastern Pacific Ocean and the monthly mean cloudiness anomalies over central Pacific also correlate highly with the trade over the central and western Pacific Ocean in the northern hemisphere.