

ENSO 及热带海—气相互作用 动力学研究的新进展

黄 荣 辉

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文回顾了最近几年关于 ENSO 事件及热带海—气相互作用动力学方面研究的最新成就及新发现的观测事实, 还指出热带西太平洋海—气相互作用对北半球大气环流异常的作用。

关键词: ENSO 事件; 西风爆发; 低频振荡。

一、引 言

由于热带地区的科氏参数较小, 热带海洋对大气异常的响应比较快, 所以热带海洋运动容易产生不稳定; 并且热带大气对海洋运动异常的响应, 特别是对海表温度异常的响应要比中、高纬度大气响应快, 它的响应时间尺度是月—季度, 故它对大气环流月—季度、年际的变化有很大影响。并且, 由于准定常行星波会从低纬度对流层准水平地传播到高纬度, 故热带海—气相互作用的结果将会引起北半球大气环流的异常。

ENSO 事件可以认为是热带地区, 特别是赤道地区海—气相互作用最集中的一个反映。所谓 ENSO, 它是埃尔尼诺 (EL Niño) 与南方涛动 (Southern Oscillation) 的简称。虽然埃尔尼诺现象发生在海洋, 而南方涛动发生在大气, 但这两现象是紧密相关的, 因此, 近年来全世界把这两现象作为一种事件来看待。由于在赤道东太平洋这种 ENSO 事件一旦发生, 将会给全球, 特别是北半球, 带来严重的气候异常, 从而造成世界各地严重旱涝与低温, 给世界各国的工农业生产带来严重损失。为此, 世界各国的气象学家与海洋学家非常重视这一现象的规律及其机理的研究, 以达到有朝一日可以预测这一现象的发生, 并且会给气候灾害的预测提供可靠的讯息及物理依据。

为搞清气候变化与异常规律及其物理成因, 从而预测气候变化与异常, 由国际科联 (ICSU) 与世界气象组织 (WMO) 联合组织了一个为期 10 年的世界气候研究计划 (WCRP), 在这个计划中最重要的一项观测研究计划就是热带海洋与全球大气的研究计划 (TOGA), 这个研究计划将会大大促进 ENSO 产生规律及其成因的研究。

1987 年 11 月在日本东京召开了日美关于 ENSO 现象讨论会 (Japan—U.S. Workshop on The El Niño Southern Oscillation Phenomena) 及在美国洛杉矶召开了纪念 Bjerknes 国际海—气相互作用学术讨论会。这两个会议可以说是交流海—气相互作用研

究的国际学术盛会.在这两次盛会上的学术交流充分反映了最近几年世界各国对 ENSO 动力学的研究取得很大进展,并且观测到许多有助于更好揭开热带海-气相互作用物理机制的现象;特别是西太平洋对 ENSO 现象产生的作用及其对东亚、北美大气环流异常的作用受到世界各国气象学家与海洋学家的重视.

本文主要回顾在这两个会议上报告过的关于 ENSO 现象和热带海-气相互作用动力学的研究成就,以及最近几年关于 ENSO 产生的物理机制的研究进展和新观测到的热带海-气相互作用的现象;本文还回顾了关于热带西太平洋海-气相互作用对东亚大气环流异常的作用.

二、Bjerknes 关于 ENSO 现象产生机制的假设及其缺陷

在赤道太平洋地区,一般是西太平洋的海表水温高,而东太平洋的海表水温低,故一般在赤道东太平洋的海平面气压偏高,而赤道西太平洋地区的海平面气压偏低.这造成气流在赤道西太平洋地区上升,而在赤道东太平洋地区下沉,在赤道太平洋的海表面附近,气流从东向西流,这就是所谓的沃克(Walker)环流.

1966 年 Bjerknes 首先提出了关于 ENSO 现象产生机制的假设^[1].根据他所提出的理论,一旦在秘鲁沿岸的赤道东太平洋海表温度(SST)升高,则赤道东太平洋的气压下降,这样就造成赤道东西太平洋的气压梯度变弱,从而就使得自东向西流的赤道信风减弱,由此使得赤道东太平洋到中太平洋的海水上翻减弱,这就造成从赤道东太平洋到赤道中太平洋的海表温度异常升高;于是使得 ENSO 现象产生.相反,如果秘鲁沿岸的赤道东太平洋海表温度一旦降低,则赤道东西太平洋的气压梯度就变大,这样就使得从赤道东太平洋到赤道中太平洋的海水上翻加强,从而造成赤道东太平洋到赤道中太平洋的海表温度下降.

Bjerknes 在国际上首先提出 ENSO 现象是海-气相互作用的结果,他的假设无论对海洋科学或大气科学的发展都起到很重要的作用.以后,许多气象学家及海洋学家都是引用或证实 Bjerknes 的假设.Rasmusson 和 Carpenter(1982)综合了历史上所发生的 ENSO 事件海表温度的演变过程^[2],给出了 ENSO 事件在不同阶段的海温异常距平分布情况(如图 1 所示).从图 1 可以看到一般 ENSO 现象开始于春季,这时

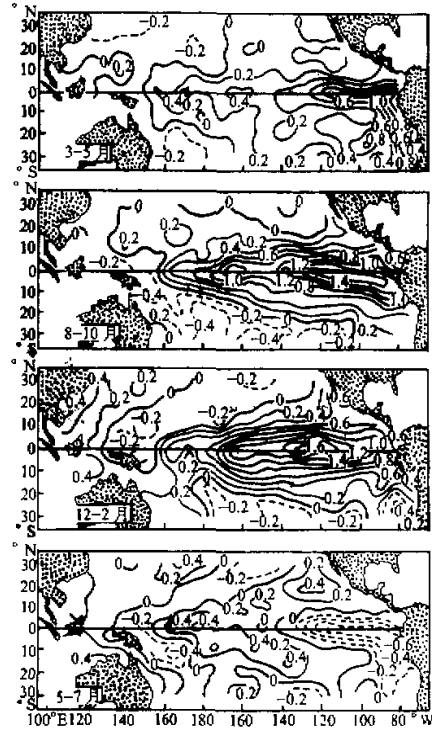


图 1 由八个 ENSO 事件合成而得到的不同阶段的海温分布^[2].

在秘鲁沿岸的赤道东太平洋海面温度升高;到了晚夏与初秋,暖水渐渐从赤道东太平洋延伸到赤道中太平洋,ENSO 现象处于发展时期;到了晚秋与早冬,从赤道东太平洋到赤道中太平洋海面温度增暖到了顶点,这是 ENSO 现象的成熟期;到了第二年的春季,从赤道东太平洋到赤道中太平洋的海面温度渐渐下降,恢复正常,即从赤道东太平洋到赤道中太平洋的海水又渐渐变成冷水。

但是, Bjerknes 的假设中也有很大缺陷,第一,他没有考虑西太平洋在 ENSO 产生中的作用,而西太平洋海面温度一般是高的,它是全球大气最大的热量来源,这里的海-气热交换最剧烈,可以说是全球海-气系统中一部大热机。显然,不考虑西太平洋对 ENSO 事件爆发的作用是不行的;第二,在 Bjerknes 的假设中没有考虑赤道波动的作用。由于赤道波动是 Matsuno 于 1966 年所发现^[3],所以在 Bjerknes 的假设中还不可能考虑到;第三,在 Bjerknes 的假设中没有考虑赤道东太平洋海水的冷水期与暖水期的关系。许多观测事实表明 ENSO 现象不仅仅是一事件,更重要的是一循环,在赤道东太平洋的海水是冷水与暖水交替出现,周而复始的现象。ENSO 现象仅仅是海水异常增暖的时期,而当冷水期时意味着下一循环的 ENSO 现象正在孕育着。

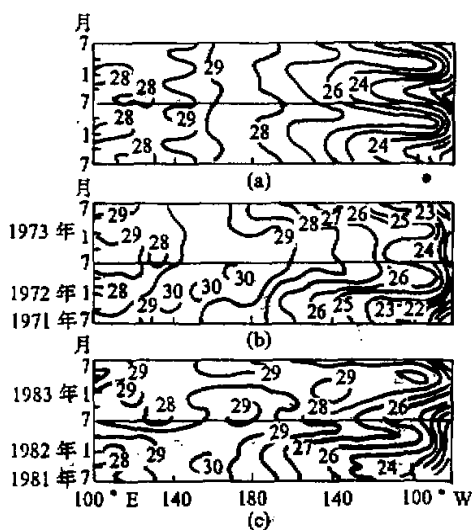


图 2 一般 ENSO 事件(b)与 1972/1973 年 ENSO 事件(c)1982/1983 年 ENSO 事件(a)海温的时间-经度剖面图

了浓厚的兴趣,在近年来掀起了研究热潮。

众所周知,埃尔尼诺现象是秘鲁沿岸赤道东太平洋所发生的现象,而南方涛动是 Walker(1924)就 1899 年由于印度季风大异常而发生的大饥荒气候灾害中从西太平洋所发生的现象中所提出的^[4],因此,赤道东西太平洋对 ENSO 现象产生的作用一直是争论的问题。自从 Bjerknes 提出 ENSO 产生机制的假设以来,东西太平洋对 ENSO 现象的作用更是争论不休。

然而,1982/1983 年所爆发的 ENSO 事件是有史以来最强的一次(如图 2 所示),这次事件其增温特征并不是先从赤道东太平洋开始,而是先从赤道中太平洋开始,这就使得人们不得不怀疑 Bjerknes 对 ENSO 机制的假设,从而使人们对 ENSO 产生机制及其海-气相互作用的研究产生

三、关于 ENSO 循环产生物理机制的研究

许多观测事实说明了 ENSO 现象不仅仅是一种事件,而是一种循环。关于这种循环的动力学最近已有不少研究,尤其是 McCreay(1983),McCreay 和 Anderson(1984),Anderson 和 McCreay(1985)较系统地研究了 ENSO 循环的物理机制^[5-7]。他们从观测事

实及理论上提出一种关于 ENSO 循环的物理机制. 根据他们的理论, 一旦有暖的 Kelvin 波在赤道太平洋的西岸产生, 它就会沿赤道附近向东传播. 当此暖的 Kelvin 波传播到东太平洋, 就会在东太平洋引起 ENSO 现象. 在这之后, 暖的 Rossby 波从赤道太平洋东岸向西反射. 由于暖的 Rossby 波的作用, 海表面上升, 并且由于 Hadley 环流的作用, 使得东太平洋混合层变薄. 而混合层变薄, 又会产生 Walker 环流加强, Walker 环流的作用使得赤道东太平洋的海温变冷, 从而 ENSO 现象消失. 另一方面, 由于偏离赤道暖的 Rossby 波继续向西传播, 并且由于 Walker 环流的风系, 使得大量的海水从东往西运输, 在这两者共同作用下, 使赤道西太平洋海温变暖, 这将产生暖的 Kelvin 波, 为下一个 ENSO 事件的产生作准备.

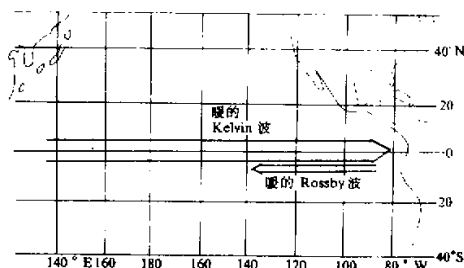


图3 ENSO 循环机制的概念图

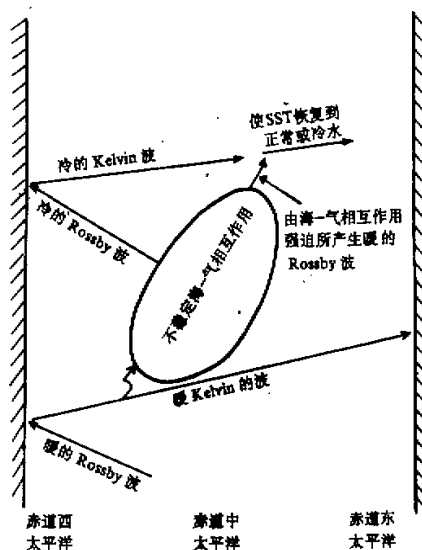


图4 ENSO 循环机制的概念图

McCreay 虽然利用赤道波动说明了 ENSO 循环形成的物理机制, 并且也说明了东西太平洋海温的关系, 但是, 他的理论还是重视东太平洋的作用, 他认为西太平洋水位高是东太平洋 ENSO 衰亡的结果.

从上面可以看到 McCreay 所提出的 ENSO 循环动力机制也存在着缺陷. 最近, Schopf 和 Suarez (1988) 提出了一个令人比较信服的机制^[8]. 图 4 给出了他们所提出的物理机制. 他们认为一般热带西太平洋的海表温度是比较高的, 在这里就会产生东传的 Kelvin 波, 当这个暖的 Kelvin 波移到赤道中太平洋时就会产生剧烈的海-气相互作用. Philander 等 (1984), Yamagata (1985), 巢纪平等 (1988) 都提出这种海-气相互作用可以产生不稳定波动^[9-11]. 因此, 由于海-气相互作用的结果

就会产生大气西风的异常, 从而激起冷的 Rossby 波. 上面所说的 Kelvin 波继续向东传播, 当它移到赤道东太平洋就会产生 ENSO 现象. 而由海-气相互作用产生的冷的 Rossby 波向西传播, 当它传到赤道太平洋的西岸, 会被反射产生冷的 Kelvin 波, 这种冷的 Kelvin 波边增幅边向东传, 当它传到东太平洋就会产生冷的海水, 使 ENSO 现象消失, 甚至会出现反 EL Nino 现象. 另一方面, 这种冷的 Kelvin 波又会在赤道中太平洋产生剧烈的海-气相互作用, 因而产生暖的 Rossby 波, 这种暖的 Rossby 波在赤道太平洋的西岸反射又产生暖的 Kelvin 波, 从而为下一次 ENSO 事件的爆发提供条件. 他们的观点不是注意赤道东太平洋地区, 而是注意赤道西太平洋以东的赤道中太平洋地区, 他的理论从根本上打破了 Bjerknes 的观点. 最近, Takeuchi (1987) 也从观测事实说明了 Schopf 和 Suarez

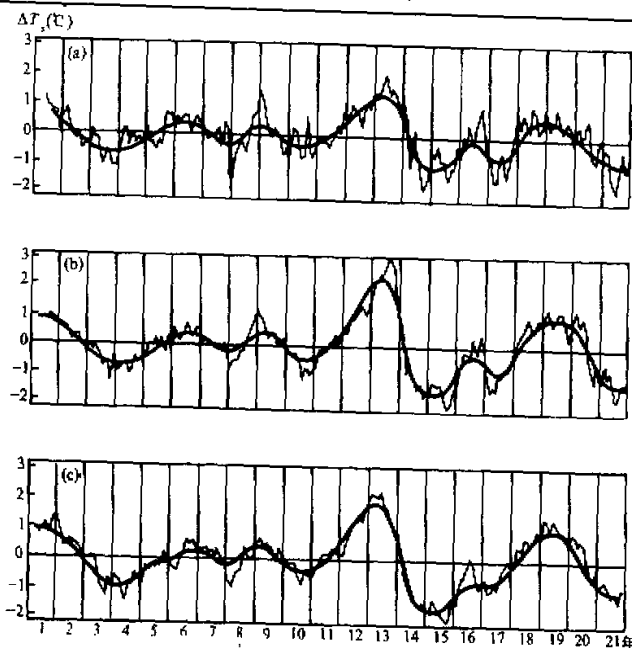


图5 由海—气耦合模式计算得到的 2.25°N — 2.25°S 海温距平随时间的分布^[15]

粗线为滑动平均海温异常距平,细线为月平均海温异常距平.

(a) 82.5° — 105°W , (b) 105° — 142.5°W , (c) 142.5° — 180°W .

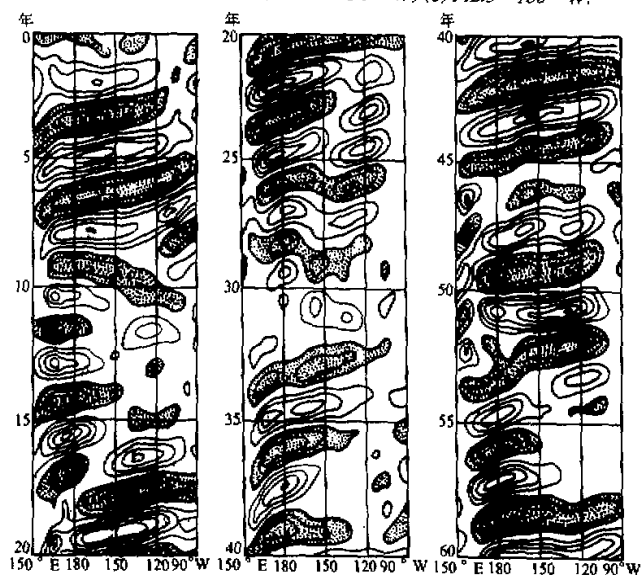


图6 由海—气耦合模式计算所得到的海温距平随时间的分布

等值线间隔为 0.1°C ,阴影区表示 $\Delta T_s < 0.1^{\circ}\text{C}$ ^[13]

机制的正确性^[12].

从上面可以看到由于赤道波动及赤道中太平洋海-气相互作用产生了 ENSO 循环,使得赤道东太平洋冷暖海水交替出现。

由于在 ENSO 循环动力学的机制方面搞清楚了一些,因此许多海洋学家与气象学家开始讨论 ENSO 的可预报性。Cane 等(1986)利用海-气耦合模式讨论了 1986/1987 年 ENSO 事件的预报问题^[13]。Philander 和 Seigei(1985),刘雅章(1987)利用一个比较复杂的海-气耦合模式讨论了 ENSO 循环的可预报性问题^[14,15]。刘雅章利用一个 9 层大气环流及一个 27 层的海洋模式耦合计算了 21 年太平洋海温的循环情况。图 5 是他所计算的 2.25°N — 2.25°S 各个经度带海面温度异常的距平随时间的分布。从图 5 可以看到利用一个高分辨率的海-气耦合模式可以很好地模拟海面温度异常的循环,它们呈现出一种振荡,振荡的振幅可以为 $1\text{--}3^{\circ}\text{C}$,而这种振荡的周期是 3—5 年。此外从图 6 还可以看到模式计算的暖水有的情况是从东向西传播,有的情况是从西向东传播。

从上面可以看到赤道东太平洋冷水期、暖水期的循环是可以很好地模拟出来的,这意味着 ENSO 循环的各个阶段是可以预测的。

四、热带大气 30—50 天周期的低频振荡与 ENSO 的关系

在大气中存在着 30—50 天周期的低频振荡^[16],刘家铭(1987)提出这种振荡可以激发 ENSO 事件的爆发^[17]。最近 Nitta 和 Motoki(1987),Nitta(1987),Nakazawa(1987)分析了 1986/1987 年这次 ENSO 事件的对流活动情况^[18-20]。他们发现在 1986 年 ENSO 事件爆发时有大型云团(Supper cluster)的向东移动。在 1986 年 11 月初在印度洋发现有超大型云团出现;而到 11 月 10 日起,这种超大型云团在西太平洋猛烈发展并且东移;到了 11 月下旬,这超大型云团移到日期变更线附近,以后一直停留在那里,从而引起 ENSO 事件的爆发。他们指出这种 30—50 天周期振荡的超大型云团活动可以诱导出西风爆发(Westerly bursts)。这种西风爆发对于 ENSO 事件的爆发起了触发作用。Harrison(1987)的分析结果也说明了 Nitta 与 Nakazawa 分析的正确性^[21]。

令人感兴趣的是从超大型云团的整体来看是自西向东运动,但从每个大型云团的移动来看却是从东向西运动。这些云团的水平尺度为几百公里,其生命史为 2 天左右。这就说明这里存在着一种 30—50 天周期的低频振荡与天气尺度系统的相互作用。因此,这种超大型云团活动不仅对于 30—50 天周期的低频振荡起着重要作用,而且对于 ENSO 事件的触发也起着重要的作用。

此外,Keen 发现位于中太平洋的赤道气旋对(twin cyclone vortex)对产生与保持赤道区域大气环流的异常起着非常重要的作用,并且指出这种位于中太平洋热带气旋的年际变化与 ENSO 事件的产生有密切关系。这种热带气旋对之间的赤道西风似乎对于暖水向东传播起着重要作用^[22]。Nitta^[19]的分析再一次证明 Keen 的结果是正确的。

五、热带西太平洋海-气相互作用对北半球

夏季大气环流异常的作用

关于 ENSO 事件对北半球大气环流异常的作用已有不少研究。如 Horel 和 Wallace(1981),Rasmusson and Carpenter(1982),Rasmusson 和 Wallace(1983),Shukla 和

Wallace(1983), 黄荣辉(1985)已详细讨论了 ENSO 事件的产生可以引起北半球 PNA 型大气环流的异常^[23-26]. 黄荣辉(1986)不仅从观测事实, 而且从理论上及数值试验方面说明了冬季赤道上空为准定常行星波可以准水平地通过对流层传播到中高纬度地区, 从而形成北半球 PNA 型大气环流的异常^[27].

然而, 长久以来, 关于热带西太平洋海-气相互作用对北半球夏季大气环流异常的作用却研究不多. 而热带西太平洋是全球海洋最热的区域, 这里的海-气相互作用非常剧烈, 它是全球大气的最大热源之一. Nitta(1986)研究表明热带西太平洋上空的云量存在着很大的年际变化^[28], 这种变化与热带西太平洋的海面温度有很大关系. Kurihara 和 Kawahara(1986)也指出同样现象^[29].

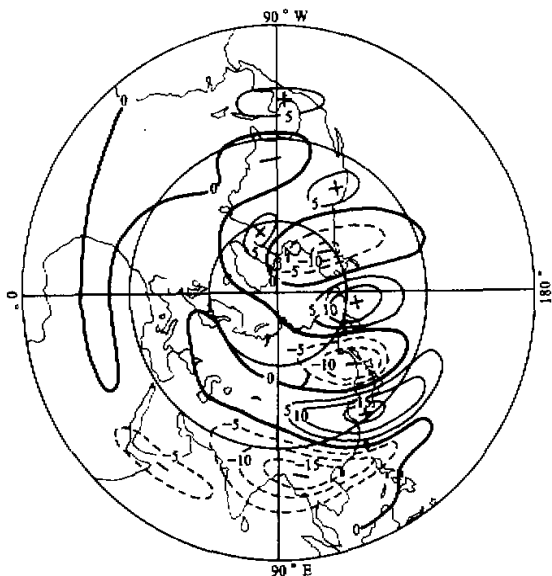


图 7 由菲律宾周围对流加强而引起的北半球大气环流异常的遥相关型

黄荣辉^[30,31]首先指出当热带西太平洋海表温度增高时, 由于菲律宾海域及印度尼西亚一带对流活动增强, 从而造成在这个区域上空的热源增强, 由于准定常行星波的传播, 它引起了东亚夏季副热带高压偏北; 并且从理论上及数值计算方面研究了热带太平洋上空, 特别是菲律宾周围的对流活动所引起的热源加强, 从而引起的北半球夏季大气环流异常的遥相关型(见图 7). 结果表明当菲律宾周围对流活动的增强不仅可以影响东亚大气环流的异常, 而且也可以引起北美大气环流的异常. Nitta(1987)从卫星取得的高云量也得到类似的遥相关型, 他特别指出在菲律宾周围的对流活动与日本上空的云量之间

存在着“翘翘板”的效应, 即称之为“PJ 振荡”.

最近, 黄荣辉与吴仪芳(1987)从 30 年观测资料统计得出东亚夏季的旱涝与 ENSO 事件的不同阶段有关^[32]. 从大量的分析资料表明, 当 ENSO 事件处于发展阶段, 我国江淮及日本的本州雨量多, 在夏季往往发生涝, 而黄河流域及华北、江南及日本的九州一带往往雨量偏少, 甚至发生旱; 而在 ENSO 事件处于恢复阶段, 我国江淮流域及日本的本州一带雨量偏少, 往往发生旱, 而黄河流域及华北、江南一带往往雨量偏多. 研究结果还表明, 赤道东太平洋的海温与热带西太平洋的海温之间存在着“翘翘板”效应, 即当赤道东太平洋的海温低, 如 ENSO 事件处于恢复阶段, 菲律宾周围的热带西太平洋的海温就高, 在此海域就有大量的对流活动产生, 从而造成西太平洋副热带高压的位置偏北, 引起我国江淮一带、日本本州的雨量偏少. 最近, 黄荣辉与卢里(1988)用数值模拟方法模拟得出当热带西太平洋的海温高时, 在菲律宾周围就有大量的对流活动产生, 从而引起北半球大气环流

异常及降水异常的遥相关型^[33]. 这些研究不仅引起东亚其它国家的兴趣, 也引起了欧美一些国家气象学家的兴趣.

目前热带西太平洋海-气相互作用对北半球夏季大气环流异常的作用正在日益引起国际气象学家的关注.

六、结 束 语

虽然目前关于 ENSO 事件及热带海-气相互作用动力学的研究取得不少进展, 但是, 离揭示 ENSO 事件特别是 ENSO 循环的物理机制还很远. 目前关于 ENSO 事件及热带海-气相互作用动力学的研究主要集中在以下几个问题:

(1) 从观测事实来弄清热带超大型云团的结构、特征以及它对赤道西风爆发的作用, 从而弄清热带超大型云团在 ENSO 事件发生中的作用.

(2) 由海-气耦合的动力模式, 从海-气相互作用的不稳定性来揭示 ENSO 循环的动力机制, 并且利用数值模式来模拟 ENSO 循环, 从而预测 ENSO 事件的产生.

(3) 不同时间尺度、空间尺度系统的相互作用对 ENSO 事件产生的作用. 即几天的超大型云团、30—50 天周期的低频振荡、准两年周期振荡(QBO)的相互作用对 ENSO 事件产生的作用.

(4) 热带西太平洋海-气相互作用对 ENSO 事件产生的作用.

总之, 目前关于 ENSO 循环物理机制的研究正在深入, 这个研究课题正在吸引着全世界的大气物理学家、海洋学家及气象学家, 弄清 ENSO 循环的物理机制为期不远了.

本文曾在第二次全国 ENSO 学术讨论会上报告过, 秦曾灏教授等对此进行了热烈讨论, 在此表示感谢.

参 考 文 献

- [1] Bjerknes, J., 1966, A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature, *Tellus*, **18**, 820—829.
- [2] Rasmusson, E.M. and T.H. Carpenter, 1982, Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation / EL Niño, *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 354—384.
- [3] Matsuno, T., 1966, Quasi-geostrophic motions in equatorial areas, *J. Met. Soc. Japan*, **44**, 25—43.
- [4] Walker, G.T., 1924, Correlation in seasonal variations of weather IX. *Mem. India Meteor. Dept.*, **24**, 275—332.
- [5] McCreary, J.P., 1983, A model of tropical ocean-atmosphere interaction, *Mon. Wea. Rev.*, **111**, 370—387.
- [6] McCreary, J.P. and D.L.T. Anderson, 1984, A simple model of EL Niño and the Southern Oscillation, *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 934—946.
- [7] Anderson, D.L.T. and J.P. McCreary, 1985, Slowly propagating disturbances in a coupled ocean-atmosphere model, *J. Atmos. Sci.*, **42**, 615—628.
- [8] Schopf, P.S. and M.J. Suarez, 1988, Vacillations in a coupled ocean-atmosphere model, *J. Atmos. Sci.*, **45**, 549—566.
- [9] Philander, S.G.H., T. Yamagata and R.C. Pacanowsky, 1984, Unstable air-sea interactions in the tropics, *J. Atmos. Sci.*, **41**, 604—613.
- [10] Yamagata, T., 1985, stability of a simple air-sea coupled model in the tropics, in: *Coupled Ocean-Atmosphere Model*, ed. J.C.J. Nihoul, Elsevier, Amsterdam, 767 pp.
- [11] Chao Jiping and Zhang Renhe, 1988, The air-sea interaction waves in the tropics and their instabilities, *Acta*

- Meteor. Sinica*, **2**, 275—287.
- [12] Takeuchi, K., 1987, Roles of equatorial waves in the onsets and terminations of ENSO in the Hokkaido University ocean model, *Meteor. Rea. Rep.*, Japan U.S. Workshop on the EL Niño—Southern Oscillation phenomenon, Nov. 3—7, 1987.
 - [13] Cane, M.A., S.E. Zebiak and S.C. Dolan, 1986, Experimental forecasts of EL Nino, *Nature*, **321**, p.827—832.
 - [14] Philander, S.G.H. and A.D. Seigel, 1985, Simulation of EL Niño of 1982—1983, *Proc. 16th Int. Leige Colloquium on Ocean Hydrodynamics*, Chapt 33, Elsevier Oceanography Series, 40, 767 pp.
 - [15] Lau, N.C., 1987, Modeling of ENSO phenomena at GFDL, *Meteor. Rea. Report*, Japan U.S. Workshop on the EL Niño—Southern Oscillation phenomenon, Nov. 3—7, 1987.
 - [16] Madden, R.A. and P.R. Julian, 1972, Description of global scale circulation cells in the tropics with a 40—50 day period, *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1109—1123.
 - [17] Lau, K.M., 1987, Low-frequency oscillation in the tropics: The Southern-Oscillation-Family phenomena, *Meteor. Rea. Report*, Japan U.S. Workshop on the EL Niño—Southern Oscillation Phenomenon, Nov. 3—7, 1987.
 - [18] Nitta, Ts. and T. Motoki, 1987, Abrupt enhancement of convective activity and low-level westerly burst during the onset phase of the 1986—87 EL Niño, *J. Meteor. Soc. Japan*, **65**, 497—506.
 - [19] Nitta, Ts., 1987, Variations in the tropical atmosphere and ocean during the onset phase of an EL Niño, *Meteor. Rea. Report*, Japan U.S. Workshop on the EL Niño—Southern Oscillation phenomenon, Nov. 3—7, 1987.
 - [20] Nakazawa, T., 1987, Tropical super-clusters under intraseasonal variation, *Meteor. Rea. Report*, Japan U.S. Workshop on the EL Niño—Southern Oscillation phenomenon, Nov. 3—7, 1987.
 - [21] Harrison, D.E., 1987, Recent tropical Pacific surface wind variability studies, *Meteor. Rea. Report*, Japan U.S. Workshop on the EL Niño—Southern Oscillation phenomenon, Nov. 3—7, 1987.
 - [22] Keen, R.A., 1982, The role of cross-equatorial tropical cyclone pairs in the Southern Oscillation, *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 1405—1416.
 - [23] Horel, J.D. and J.M. Wallace, 1981, Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation, *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 813—829.
 - [24] Rasmusson, E.M. and J.M. Wallace, 1983, Meteorological aspects of the El Niño / Southern Oscillation, *Science*, **222**, 1195—1202.
 - [25] Shukla, J. and J.M. Wallace, 1983, Numerical simulation of the atmospheric response to equatorial sea surface temperature anomalies, *J. Atmos. Sci.*, **40**, p.1613—1630.
 - [26] 黄荣辉, 1985, 冬季低纬度热源异常在北半球对流层大气环流异常中的作用, *气象学报*, 43卷, 411—423.
 - [27] Huang, R.H. (黄荣辉), 1986, Physical mechanism of influence of heat source anomaly over low latitudes on general circulation over Northern Hemisphere in winter, *Scientia Sinica (Series B)*, **29**, 970—985.
 - [28] Nitta, Ts., 1986, Long-term variations of cloud amount in the western Pacific region, *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 373—390.
 - [29] Kurihara, K. and M. Kawahara, 1986, Extremes of East Asian weather during the post ENSO years of 1983 / 84—Severe cold winter and hot dry summer, *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 493—503.
 - [30] Huang R.H. (黄荣辉) and W.J. Li (李维京), 1987, Influence of the heat source anomaly over the western tropical Pacific for the subtropic high over East Asia, *Proceedings in International Conference on the General Circulation of East Asia*, April 10—15, 1987, Chengdu, China.
 - [31] 黄荣辉, 李维京, 1988, 夏季热带西太平洋上空的热源异常对东亚上空副热带高压的影响及其物理机制, *大气科学*, 纪念大气物理所成立六十周年特刊, 107—116.
 - [32] Huang, R.H. and Y.F. Wu, 1987, The influence of ENSO on the Climate change in China and its mechanism, *Meteor. Rea. Report*, Japan U.S. Workshop on the EL Niño—Southern Oscillation phenomenon, Nov. 3—7, 1987.
 - [33] Huang, R.H. (黄荣辉) and Lu Li (卢里), 1988, Numerical simulation of the relationship between the anomaly of subtropical high over East Asia and the convective activities in the western tropical Pacific, *Adv. Atmos. Sci.*, **6**, 202—214.