东亚冬季风异常激发 El Niño 现象的 数值试验研究

杨辉陈隽孙淑清

中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室,北京 100029

摘 要 用全球海气耦合气候模式和海洋模式进行各种敏感性试验,研究东亚冬季风异常对 El Niño 事件形成的作用。 结果表明东亚冬季风异常对于海洋热状态起了很大的作用。强冬季风年冬季所对应的海温距平为 La Niña 型,但在与 冬季风异常相对应的风应力作用下,通过海气相互作用,由于赤道西太平洋西风异常和海温正距平的东传,可以使海 温向着 El Niño 型分布发展,弱冬季风年冬季所对应的海温距平为 El Niño 型,后期则会转成 La Niña 型。冬季风异常的 偏北风分量及赤道西风分量对海温所产生的影响各有差异,前者更多地影响太平洋西岸及暖池区,后者则对整个赤道 太平洋热状态特别是 El Niño 形成起了重要的作用。在 El Niño 发展过程中起决定作用的主要不是风应力的强度,更关 键的是异常风应力的持续时间。由于风应力的持续作用,El Niño 发展特征更加显著。与冬季风异常相对应的纬向风 分量特别是西风异常在 El Niño 发展中起主导作用,在单纯的海洋模式中经向风异常只能改变局地的西太平洋海温,并 不能使东太平洋海温产生响应,即没有出现赤道暖水的东传过程。试验表明,海气耦合模式较单纯的海洋模式能更好 地反映海气相互作用及 El Niño 的形成。

关键词 东亚冬季风 海气相互作用 El Niño 事件 文章编号 1006 – 9895(2005)02 – 0321 – 13 中图分类号 P461 文献标识码 A

Numerical Experiment on the El Niño Event Stimulated by the East Asian Winter Monsoon

YANG Hui, CHEN Jun, and SUN Shu-Qing

State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Based on numerical experiments of the Global Ocean-Atmosphere-Land System Model and the oceanic general circulation model developed by State Key Laboratory of Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics , the influence of East Asian winter monsoon (EAWM for brief) on the occurrence of El Niño is studied. Sensitivity experiments show that the anomalous EAWM would greatly affect SST in the tropical region. The strong EAWM is associated with a La Niña pattern of SSTA (SST anomaly) in the tropical region in winter and even to the following summer. However it would gradually change to an El Niño pattern from the following autumn resulting from the forcing of west wind stress connected with the strong EAWM in the western tropical Pacific. The warm SSTA center in the western Pacific shifts eastward. For the weak EAWM situation , the process will be reverse. The SSTA would vary from an El Niño pattern in the winter associated with the weaker EAWM to a La Niña pattern after the following autumn. The effects from meridional and zonal components of EAWM on the SST are different. For the former , the main effect is concentrated on the western coast of the Pacific and the warm pool area. However the zonal component of EAWM would influence the SSTA in the whole tropical region , and then stimulate the development of the El Niño event. The decisive factor for the wind stress forcing on the development of the El Niño is how long the forcing effects rather than the strength itself. When

收稿日期 2003-09-04 收到 2004-02-02 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究专项经费(编号 2004CB418303),国家自然科学基金项目 40135020 ,40233033 和 40325015

作者简介 杨辉,女,1962年出生,副研究员,主要从事气候变化的研究。E-mail:yanghui@mail.iap.ac.cn

an ocean model is used instead, it indicates that the zonal component of EAWM play a main role in the development of El Niño. For the meridional component of EAWM, the variation of SSTA only occurs in the western Pacific region and there is no shift of warm SSTA center from the western Pacific to the east. It indicates that the air-sea coupled model is much better to describe the air-sea interaction and the development of the El Niño, in comparison with the ocean model. **Kev words** East Asian winter monsoon, air-sea interaction, ENSO

1 引言

在大气与外界系统的联系中,海气相互作用是最 为重要的过程之一,尤其在热带地区,海洋和大气之间 的能量和水汽交换规模大且持续时间长,在气候变化 过程中有重要地位。在研究冬季风异常及与之相关联 的季节性全球大气环流变异以及隔季相关时,人们自 然会注意到海温所起的作用。但是反过来,大尺度流 场的季节性变异及其持续影响,必将对海洋热状况发 生影响。

许多研究表明,异常冬季风与热带海温有密切关系,而且强弱冬季风所对应的海温距平大体上呈 La Niña/ El Niño 分布^[1,2]。因此,有必要深入考察冬季风 与 El Niño 现象的关系。

朱乾根^[3]、郭其蕴^[4]等曾经对 El Niño 与东亚冬季 风的相互关系作过个例和统计分析 指出在 El Niño 事 件发生后的当年冬季,东亚冬季风偏弱。郭其蕴还指 出 El Niño事件发生后的当年冬季,东亚大陆冷空气 南下路径偏东(即冬季风弱),东亚冬季风经圈环流异 常 这表现为近赤道地区出现下沉距平 而南北半球副 热带地区为上升距平,因此,冬季我国南方多雨。La Niña 年情况则相反。Tomohiko 等⁵]曾指出强的东亚冬 季风可以影响南海和印度洋海温及对流,并通过 Walker 环流及赤道西风的变化激发后期的 El Niño。 李崇银^{67]}在研究中指出,异常冬季风与 ENSO 有明显 的相互作用 而强(弱) 冬季风对 El Niñ (La Niña) 有激 发作用。他对 10 次 El Niño 和 7 次 La Niña 年进行合 成分析 ,考察在该事件发生前后各个要素场 ,包括海平 面气压、500 hPa 东亚大槽的高度值、东亚大陆气温以 及海平面经纬向风场等的逐月变化 表明在 El Niño 发 生前的冬季 ,东亚大槽偏强(大槽区高度偏低) ,东亚大 陆气压偏高,气温偏低,且有较强的偏北风。这显然是 强冬季风的标志。在随后的冬季即爆发 El Niño 事件。 而 La Niña 事件前各要素的合成结果却相反 前冬为一 个弱冬季风的特征。分析还表明:在 El Niñd La Niña) 发生后的冬季,冬季风将减弱(增强)。李崇银和穆明 权^[8]在海气耦合模式中对亚洲大陆的北部地区引入正 气压距平和负气温距平以示强的冬季风,计算赤道中

东太平洋海温的逐月变化。结果发现:无论是 Niño3 区还是 Niño1 + 2 区 ,都出现了持续的海温正距平。海 温的水平分布形势与 El Niño 分布也十分相似。

可见,冬季风的异常与海洋热状态,特别是与 El Niño 现象有密切联系,深入研究冬季风对下垫面尤其 是对海洋的影响,进而对 El Niño 形成的作用,是十分 有意义的。气候模式特别是全球海气耦合模式已经成 为大气科学研究的主要工具之一。气候模式研究可以 弥补观测资料分析的不足,尤其是模式的敏感性试验 更有助于探讨气候异常的主要因子和影响机制。本文 将利用全球海气耦合模式来研究冬季风异常对热带海 温特别是 El Niño 现象的作用。

2 冬季风异常与海温关系的分析研究

在进行数值试验之前,我们先给出冬季风与不同 时期海温关系的分析结果。这里用17年资料(1980~ 1996年)对冬季风与海温两个场进行 SVD(奇异值分 解)分析。SVD 方法的数理推导及其在气象学中的应 用已由 Wallace 等⁹¹详细论述,它能够描述两个要素场 的线性关系。

用 1000 hPa 风场代表冬季风,与同期海温进行 SVD 分析。它们的第一对奇异向量解释方差为 47%, 时间系数之间的相关系数高达 93%(图略),说明能够 反映风场与海温的最佳耦合特征。从异性相关图看, 风场的分布特征是东亚大陆沿岸为较强的负相关区, 相对应的 SST 场则是东亚沿海及黑潮区为负相关区, 热带西太平洋为正相关区,热带中东太平洋为负相关 区。这种空间分布型表明当冬季风偏强时,东亚沿海 及黑潮区海温偏低,热带西太平洋海温偏高,热带中东 太平洋海温偏低。这种海温分布类似 La Niña 的特征, 这与强冬季风年海温距平的特征几乎完全一致^[10]。

下面重点来关注冬季风与后期海温的关系。图 1 为 1000 hPa 风场与春季海温的第一模态异性相关图, 可以看到主要特征与上面描述的冬季情况是一样的, 即风场的分布特征是东亚大陆沿岸为较强的负相关 区 *SST*场则是东亚沿海及黑潮区为负相关区、热带西 太平洋为正相关区、热带中东太平洋为负相关区,这也 反映了强冬季风对应LaNina型海温的配置。第一对



图 1 冬季 1000 hPa 经向风(a) 与后期春季 SST(b) SVD 分析第一耦合模态的异性相关图

Fig. 1 Heterogeneous correlation patterns for the first singular value decomposition (SVD) mode of the meridional wind at 1000 hPa in winter (a) and SST in the following spring (b)



图 2 冬季 1000 hPa 经向风(a) 与后期秋季 SST(b) SVD 分析第二耦合模态的异性相关图

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for the second SVD mode of the meridional wind at 1000 hPa in winter(a) and SST in the following autumn(b)

奇异向量解释方差为49%,两个场时间系数之间的相 关系数为0.93,这些都与冬季同期相关的情况非常接 近。这不仅说明海温确实能够把冬季风异常变化的信 息"记忆"下来,而且也反映了冬季风的异常对热带海 温的变化具有较大时间尺度的影响。

夏季的情况也基本如此。第一模(图略)的相关分 布说明,当冬季风偏强时,夏季的海温仍维持 La Niña 型分布,只是风场与海温的奇异向量的两个场时间系 数之间的相关系数为0.83,比冬季和夏季减小一些, 暖池区的正相关系数也有所减弱,正相关系数中心已 显著东移。

上述持续现象到秋季就发生了变化。从第二模的 异性相关分布(图2)看,东亚及沿岸的风场为负相关 区,热带西太平洋为负相关区,热带中、东太平洋为正 相关区,说明当强冬季风时,后期所对应的海温分布则 为热带中、东太平洋正距平,而热带西太平洋为负距 平。这是东高西低的 El Niño 型;反之,也可以看成是 弱冬季风与 La Niña 型相对应。这与冬、春、夏季的情 况相比发生了很大的变化。风场和秋季海温的这种配 置在气候变化中出现的概率较大,解释方差为22%, 两个场时间系数之间的相关系数也很高(0.83),第二 模的同性相关相应的风、海温分布分别解释各自场方 差的23%和17%。也就是说,强的冬季风在冬、春甚 至夏季都对应为 La Niña 型海温,但是它逐渐减弱,至 秋季则变成 El Niño 型分布。这种冬季风异常与 El Niño发生的关系是值得重视的。这也是下面数值试验所要研究的主要问题。

3 模式和试验方案简介

采用中国科学院大气物理研究所大气科学和地球 流体力学数值模拟国家重点实验室研制的全球海气耦 合气候模式(简称 CGCM)^{Π,12]}。其中海洋模式^[13](简 称 OGCM)是一个原始方程海洋模式,在垂直方向使用 了" Eta "坐标,分为不等距的二十层,在其上边界是一 自由面而不是使用刚盖近似。大气模式是一个九层十 五波菱形截断的 σ坐标谱模式^[14],物理过程包括辐射 强迫、对流调整、边界层通量以及垂直和水平方向的次 网格扩散项。模式还包括陆面过程。

CGCM 模式能够克服" 气候漂移"问题,对大气和 海洋的气候平均态及其年际变化有较好的模拟能 力^[12]。模式能够较好地描述大气与海洋状况的年际 变化,而且它所体现的冬季风异常特征与观测资料分 析结果基本一致,因此其计算结果是可信的(图略)。

试验主要分为两个部分:

(1)通过完整的海气耦合模式(CGCM)的冬季风异 常型风应力敏感性试验考察冬季风异常对大气和海洋 状态的影响。

AL在冬、春甚 (2)为了揭示大气环流对海洋的影响作用,把 医渐减弱,至 CCCM中的大气变化过程去掉,以冬季风异常型风应
AL异常与EL 力强迫其中的海洋环流模式(OCCM),研究重点是海表1 敏感性试验一览表

模式	名称	异常强迫源		强迫时间
Model	Name	Wind stress forcing	Area of forcing	Duration of forcing
CGCM	C1	实际风矢量		
		Real wind vector		
	C2	实际纬向风	季风区(10°S ~ 50°N , 40°E ~ 160°E)	三个月
		Real zonal wind	($10^{\circ}\mathrm{S}\sim50^{\circ}\mathrm{N}$, $40^{\circ}\mathrm{E}\sim160^{\circ}\mathrm{E}$)	3 months
	C3	实际经向风		
		Real meridional wind		
OGCM	01	实际风矢量		三个月
		Real wind vector		3 months
	O1b	加倍风矢量	季风区(10°S ~ 50°N , 40°E ~ 160°E)	三个月
		Real double wind vector	($10^{\circ}\mathrm{S}\sim50^{\circ}\mathrm{N}$, $40^{\circ}\mathrm{E}\sim160^{\circ}\mathrm{E}$)	3 months
	O1c	实际风矢量		六个月
		Real wind vector		6 months
	02		季风区(10°S~50°N,40°E~160°E) (10°S~50°N,40°E~160°E)	
	O2b	实际纬向风	东亚低纬(10°N~20°N,100°E~150°E)	三个月
		Real zonal wind	($10^{\circ}N \sim 20^{\circ}N$, $100^{\circ}E \sim 150^{\circ}E$)	3 months
	O2c		东亚中纬(20°N~50°N,100°E~150°E)	
			($10^{\circ}N \sim 20^{\circ}N$, $100^{\circ}E \sim 150^{\circ}E$)	
	03	实际经向风	季风区(10°S~50°N , 40°E~160°E)	三个月
		Real meridional wind	($10^{\circ}\mathrm{S}\sim50^{\circ}\mathrm{N}$, $40^{\circ}\mathrm{E}\sim160^{\circ}\mathrm{E}$)	3 months

 Tabel 1
 Sensitivity experiments

洋状态对冬季风异常的响应。

由于本文着重从东亚冬季风异常入手,力图探讨 冬季风异常在大气和海洋的气候变异中的作用,因此 在设计耦合模式的敏感性试验时主要考虑与东亚冬季 风异常相应的风应力异常强迫。异常风应力的计算公 式为: $T = \rho_a C_D | \Delta V | V$,其中 T 为风应力,V 为异常 风, ρ_a 为大气密度(取 1.275 kg·m⁻³), C_D 为粘滞系数 (取 2.2×10⁻³), $|\Delta V| = \sqrt{u^2 + v^2}$ 是大气风速值。所 取的风应力强迫范围和时间如表 1,每个试验中风应 力异常从 1月开始持续至一定的时间,然后撤消,即恢 复气候状态的风应力。分别讨论水平风矢量应力异常 以及其中的纬向风分量、经向风分量异常(图 3)对大 气和海洋气候变化尤其是对后期异常的影响。冬季风 的异常强迫分别来源于实际资料的强弱冬季风年^[15] 冬季(DJF)平均的合成分析结果。由于东亚冬季风异 常体现为季风区环流的异常^[16],所取的风应力范围较 大。从图 3 也可以看到,在强冬季风年合成的 1000 hPa距平风场上,从我国大陆东部及沿海地区到菲律 宾一带地区出现一支强大的偏北风,其气候背景场正 好是东亚冬季风最强的路径,值得注意的是热带西太 平洋上不但出现偏北风距平,而且有来自澳大利亚的 偏南风距平且东北信风减弱,因此形成了气旋性差值 环流,中心位于菲律宾以东的暖池区。此外,北印度洋 地区的冬季风场也有相应变化,西部偏北风距平,东部 偏南风距平,热带偏西风距平,从而在孟加拉湾出现偏 差气旋环流。从弱冬季风年的情况看,东亚冬季风减 弱 北印度洋为北风距平、热带偏东风距平。

把源于强冬季风年水平风场距平的异常风应力敏 感性试验称为"强风试验",源于弱冬季风年距平风场 的试验为"弱风试验"。为节约篇幅,以下在数值试验 中只给强风试验减去弱风试验的结果,它们相当于放 大的强风试验与控制试验之差,事实上强风试验和弱 风试验与控制试验的对比结果基本呈相反趋势(图略)。



图 3 CGCM 敏感性试验风应力异常强迫示意图(单位:N·m⁻²)(a) 强年风矢量(b) 弱年风矢量(c) 强年纬向风(d) 弱年纬向风(e) 强 年经向风(f) 强弱年经向风

Fig. 3 Anomalous wind stress forcing (units $: N \cdot m^{-2}$): (a) strong wind vector; (b) weak wind vector; (c) strong zonal wind; (d) weak zonal wind; (e) strong meridional wind; (f) weak meridional wind

4 冬季风异常对海温的影响

控制试验以海气耦合模式第 2300 年 12 月 31 日 最后一个时刻输出的大气和海洋积分结果作为初始 场,然后在气候平均的反照率、辐射、海温、雪盖、冰盖、 植被等条件下积分一年,并把其输出结果作为各个敏 感性试验(表 1)的参照状态。敏感性试验的步骤与控 制试验基本相同,唯一的差别是在某个时期对海洋模 式进行积分时加上一定的异常风应力。

4.1 海气耦合模式下冬季风矢量异常强迫试验——
 试验 C1

由于冬季风的异常,海温也出现明显的异常。强 冬季风使得东亚沿海尤其是南海从冬季至夏季一直维 持着冷海温距平(图4),而热带太平洋则大体为西高 东低分布,即La Niña型海温距平。这与观测分析结果 是一致的^{10]}。值得注意的是,从冬季到夏季,西太平 洋暖海温有向东扩展的趋势,而东太平洋的冷海温也 逐渐东退,这种传播将有利于未来 El Niño 的发生。

图 2 的 SVD 分析也表明,后期秋季海温距平的分 布证实了暖海温的进一步东传。为了更清楚地显示这 个过程,图 5 给出了每隔两个月的海温距平差值状态。 图 5 中的阴影为海温距平≥2℃的正距平,从 2 月到 12 月,阴影区有自西往东移动的趋势 2 月份,阴影区只 在暖池区附近;4 月份东移到 Niño4 区(5°S~5°N, 160°E~150°W);此后 8 月、10 月维持且缓慢东扩;12 月就已基本进入 Niño3 区(5°S~5°N,150°W~90°W), 此时西北太平洋赤道和暖池区已完全为海温负距平所 控制,形成了 El Niño 型海温分布。

由以上讨论可见,强冬季风年冬季所对应的海温 距平为 La Niña 型,但在与异常冬季风相联系的风应力 作用下,通过海气之间相互调节,其后期可能会逐渐转 成 El Niño 型;而赤道东太平洋暖海温区的出现是由西 太平洋暖海温距平区东传的结果,这与 El Niño 的形成 过程是相一致的。弱冬季风年冬季所对应的海温距平 为 El Niño 型,后期则会转成 La Niña 型。李崇银等^[81] 在海气耦合模式中对亚洲大陆的北部地区引入正气压 距平和负气温距平代表强的冬季风,计算赤道中东太 平洋海温的逐月变化。结果发现无论是 Niño 3 区还是 Niño 1+2 区,都出现了持续的海温正距平,海温的水 平分布形势与 El Niño 分布也十分相似。增温最大值 出现在夏季,这个时间要比本试验出现的时间早几个 月。但不管怎样,冬季风异常确是 El Niño 爆发的一个 重要条件。

为了揭示风场异常与海温异常的关系,这里考察 了在海气相互作用下 850 hPa 纬向风异常的逐月变化 过程(图略)。发现2月份热带西太平洋尚未出现西风



图 4 CGCM 风矢量强迫试验 C1 的海温距平差值(强风试验与弱风试验之差)季节演变 (a) 冬季 (b) 春季 (c) 夏季 Fig. 4 SSTA (SST anomaly) difference (the strong minus weak wind stress forcing) in the C1 experiments for (a) winter ,(b) spring , and (c) summer



图 5 CGCM 风矢量强迫试验 C1 的海温距平差值(强风试验与弱风试验之差)逐月演变:(a)2月(b)4月(c)6月(d)8月(e)10月; (f)12月。阴影为海温距平≥2℃

Fig.5 Same as Fig. 4, but for (a) February , (b) April , (c) June , (d) August , (e) October , and (f) December. The shading shows SSTA greater than 2°C

异常 ;4 月,西太平洋开始出现西风异常并向东扩大; 从 6 月到 8 月,西风异常迅速增强和东扩;10 月,西风 异常似有衰弱,但仍维持;至 12 月,西风异常又发展壮 大且继续向东传播。对比图 5 海温的变化不难发现, 海温异常与西风异常的发展过程是比较一致的。这说 明热带地区的海洋热状态和大气之间的变化存在着十 分紧密的联系。下面,我们就西风异常对海温的作用 作进一步试验。

4.2 纬向风和经向风应力异常对海温的影响——试验 C2 ,C3

只有实际矢量风的纬向和经向风分量强迫下的试验与试验 C1 相似,也包括"强风试验"与"弱风试验", 其异常风应力分布见图 3c~f。

先看纬向风强迫的情况。可以看出,虽然强迫范 围较大,但实际西风异常主要表现在热带地区。从春 季开始,热带西太平洋上的西风异常也逐渐发展起来 (图略)。这与试验 C1 的结果是较为相似的。

在单纯的纬向风异常作用下,海温场也发生显著 的变化。冬季海温正距平中心在菲律宾附近(图略), 春季热带西太平洋海温正距平除了菲律宾附近的强中 心继续维持外,范围有所扩大,赤道中东太平洋的负值 中心也很强。夏季赤道西太平洋的正值区发展起来, 其中心则向东移到了 Niño 4 区。

海温距平区的移动可从逐月的海温演变(图6)来 看。它的变化要到6月时才比较明显 850 hPa的西风 也有类似过程。这说明赤道西风异常在 El Niño 的发 展过程中确实起到了重要的作用。不过,与试验 C1 中的结果对比可以发现,这个结果不如风矢量场异常 的模拟结果理想,也就是说,异常经向风的强迫作用也 不能忽视。下面我们来讨论这个问题。

经向风异常强迫试验中 ; 强风试验 "与" 弱风试 验 "中的异常风应力如图 3e , f 所示 ,其地域范围及持 续强迫时间与前两个试验相同。在季风区 ,实际上主 要为北风异常的强迫。积分三个月后 ,赤道西风异常 开始出现 ,只是强度没有前两个试验大。

在海温场上,冬季的南海海温为负距平(见图7), 这与试验 C2(纬向风强迫)的结果不同,但与试验 C1 (风矢量强迫)相同,这说明大陆沿海及南海地区的海 温变化受冬季风影响很大,特别是它的偏北风分量。 当冬季风加强时,随着寒潮的南下,东亚沿海海温发生 很大的降温,南海海温异常还能随着季节发生滞后响 应,周发 等¹⁷¹发现,对于南海水温的变化,海面风的 强迫是重要的。冬季风异常对南海水温的影响是决定 性的,主要通过经向风分量的变化对南海混合层产生



图 6 CGCM 纬向风强迫试验 C2 的海温距平差值(强风试验与弱风试验之差)逐月演变:(a)2月(b)4月(c)6月(d)8月(e)10月; (f)12月。阴影为海温距平≥0.5℃

Fig.6 SSTA difference (the strong minus weak wind stress forcing) in the C2 experiments for (a) February , (b) April , (c) June , (d) August , (e) October , and (f) December. The shading shows SSTA greater than 0.5° C



图 7 CGCM 经向风强迫试验 C3 的海温距平差值(强风试验与弱风试验之差)季节演变:(a)冬季(b)春季(c)夏季 Fig. 7 SSTA difference(the strong minus weak wind stress forcing) in the C3 experiments for(a) winter,(b) spring, and(c) summer

YANG Hui, et al. Numerical Experiment on the El Niño Event Stimulated by the East Asian Winter Monsoon

影响,因此,冬季北风偏强将导致该海域海温异常冷, 反之,冬季风弱则海温升高。孙柏民等^{18]}的研究也得 出十分一致的结果。在此后的春夏季节中,La Niña型 海温分布更加明显,西太平洋的暖海温仍有随季节而 东传之势(见图7b,c)。

此外,在逐月演变的海温距平图上(图略),我们也 能看到东移的正距平中心,虽然没有前两个试验的结 果那么清晰,但足以说明海气之间的紧密联系以及东 亚冬季风异常对 El Niño发生发展所起的重要影响。

由以上三个敏感性试验结果可见,冬季风异常对 El Niño 发生发展起到重要作用,而它的偏西风分量与 偏北风分量所产生的作用略有差异。但正如前面所指 出的那样,CGCM 中海洋和大气状态时时变化,而且两 者存在非线性相互作用,为了更加深入探索各个因子 的作用,下面进行单纯海洋环流模式的试验。

5 海洋环流模式风应力敏感性试验

以上 CGCM 试验是海气相互作用的结果,为了突 出大气环流变异对海温变化所起的作用,我们把 CGCM 中的大气变化过程关闭,以单纯的海洋环流模 式(简称 OGCM)来考察冬季风异常如何影响海温,以 比较它与海气耦合模式结果的差别。OGCM 控制试验 与上一节的 CGCM 控制试验基本相同,仍以第 2300 年 12月31日海洋模式最后一个时刻的输出结果为初始 场,在气候平均状态的冰盖等条件下积分一年,以其输 出结果作为敏感性试验的参照状态。异常冬季风应力 敏感试验步骤也基本与上节的 CGCM 风应力敏感性试 验相同,即先考察水平风矢量异常的作用,再分别对其 中的纬向风和经向风分量作用进行研究。风应力的地 域范围、强度、强迫持续时间见表 1。

5.1 OGCM 模式下风矢量应力异常强迫试验——试验 O1

首先,做了只加冬季三个月异常风强迫的试验(试验 01)。下面给出冬、春、夏各季的海温差值("强风试验")分布(图略),以便与同等强迫条件下的 CCCM 试验(试验 C1)结果相比较。

风矢量异常对中高纬海洋的温度影响不大,但却 显著改变热带地区的海温。从冬季的分布情况来看, 在风应力直接作用的冬季风区内,东亚沿海及南海海 温下降,西太平洋暖池区和东印度洋海温上升;在风应 力作用区外的赤道中东太平洋海温也有响应,出现了 较弱的冷海温,与西太平洋暖海温形成 La Niña 型分 布。在以后的春夏季节中,海温的 La Niña 型分布继续 维持,而且西太平洋的暖水区沿着赤道逐渐东移,使海 温异常朝着有利于 El Niño 生成的方向发展。

每隔两月的海温异常分布(图8)表明,从2月到4 月阴影区的东移很快,在此后的6月到8月传播速度 减缓,到了10月之后强度减弱,但仍能东传,赤道东太 平洋出现海温正距平,与西太平洋海温负距平形成 El Niño型分布。上述结果与试验 C1的海温异常演变结 果大致是一致的。

由此看来,不论在 OGCM 还是在 CGCM 中,冬季风 异常所产生的风应力对海温变化尤其是对 El Niño 发 展的影响都是非常重要的。不过,仔细对比便会发现 两者还是存在很大差别的。差别主要表现在后期。从 春季开始,两者的差别无论在形态还是量值上都比较 大。CGCM 试验结果的异常暖水区更加偏东,冷暖中 心值更大。到了夏季,OGCM 的距平值急剧减弱,其赤 道暖水区的 + 1℃线只移到 165°W 位置,而 CGCM 的 + 2℃线已东移到 160°W,暖水中心量级仍与春季相 同,达到 + 4℃。

值得注意的是,试验 O1 和试验 C1 是在同等强迫 条件下进行的,所以它们的结果差异只能由模式包含 的物理过程不同引起。试验 C1(CGCM)除了包括试验 O1(OGCM)中的海洋变化过程之外,还含有大气和陆 面过程,而且从冬季至夏季模式自身都产生了新的异 常风场。因此,CGCM 中的异常风应力无论在强度还 是在持续时间上都优于 OGCM。

在 OGCM 中,把异常风应力强度加大,持续时间延长,分别看它们对海温变化乃至 El Niño 发展产生多大变化。

先来看风应力强度加倍试验(试验 Olb)的结果。 它所模拟的冬季海温异常分布形势与未加倍试验(试 验 01 的结果相似 强度增大 几乎可与 CGCM 试验 C1 的结果相当。其异常值并没有加倍,也就是说,海温异 常与风应力的异常不是简单的线性关系。由于风应力 加倍后冬季海温异常幅度已经很大,而海洋又具有较 大的后延性 因此在后期的春夏季节中 虽然已撤消异 常风强迫 但海温异常仍维持和发展 强冬季风所产生 的西太平洋海温正距平中心强度比试验 O1 的结果更 大,零线位置也更加偏东(大约10个经距)。不过,从 海温距平的逐月演变过程(图9)来看,从8月份开始, 加倍试验与未加倍试验的差别就不太显著了。从秋季 开始 暖海温距平中心值也与试验 01 一样,很快减 小 至冬季已不大明显了。由此看来 仅仅加大冬季三 个月的风应力强迫,只能对后期春夏季海温产生显著 影响 而对更长时间以后的海温影响作用可能不大。

试验 Olc 在不加大风应力强度的情况下把异常风





图 8 OGCM 风矢量强迫试验 OI 的海温距平差值(强风试验与弱风试验之差)逐月演变:(a)2月(b)4月(c)6月(d)8月(e)10月; (f)12月。阴影为海温距平≥0.5℃

Fig.8 SSTA difference (the strong minus weak wind stress forcing) in the O1 experiments for (a) February ,(b) April ,(c) June ,(d) August ,(e) October , and (f) December. The shading shows SSTA greater than 0.5 °C



图 9 OGCM 加倍风矢量强迫试验 OIb 的海温距平差值(强风试验与弱风试验之差)逐月演变:(a)2月(b)4月(c)6月(d)8月(e)10 月(f)12月。阴影为海温距平≥0.5℃

Fig.9 SSTA difference (the strong minus weak wind stress forcing) in the O1b experiments for (a) February , (b) April , (c) June , (d) August , (e) October , and (f) December. The shading shows SSTA greater than 0.5° C



图 10 OGCM 风矢量延时强迫试验 Olc的海温距平差值(强风试验与弱风试验之差)逐月演变:(a)2月(b)4月(c)6月(d)8月(e) 10月(f)12月。阴影为海温距平≥0.5℃

Fig. 10 SSTA difference (the strong minus weak wind stress forcing) in the O1c experiments for (a) February ,(b) April ,(c)June ,(d) August ,(e) October , and (f) December. The shading show SSTA greather than 0.5 °C

应力强迫时限加长三个月,即强迫时间从1月持续至 6月。这时,冬季海温距平分布与试验O1的相同,这 是可以理解的。从春季开始,海温距平分布与前两个 试验都不一样了。春季,由于风应力持续强迫,海温异 常的强度比试验O1结果要大,中心可达到+6℃以 上 暖海温区域也更偏东(图10b);但与风应力加倍的 试验O1b对比异常幅度相对较小,暖海温中心也相对 偏西,因为此时风应力加强作用还很大。到了夏季之 后,暖海温范围已基本赶上试验O1b,而且海温异常幅 度更大(图10c)。此后,暖中心已东扩至160°W以东, 但是中心强度仍没有达到海气耦合模式下相当的强 度。由此可见,在 El Niño发展过程中起决定作用的并 非风应力的强度,更关键的是风应力的持续时间。

5.2 纬向风和经向风分量风应力异常强迫试验—— 试验 O2,O3

下面,简单介绍在海洋模式下由异常冬季风的纬向和经向风分量强迫的结果(试验 O2 和 O3)。与试验 O1 相比,单纯考虑纬向风的强迫,赤道西太平洋地区的暖海温逐渐东传的特征仍是一致的。而当纬向风分量强迫的范围分别局限于低纬(10°S~20°N)和中高纬(20°N~50°N)时,前者的结果基本上与 O2 的一致;而

对后者,海温则基本上没有响应,这说明低纬地区的纬 向风强迫对海温的变化起了至关重要的作用。

由单纯经向风试验(03)模拟的冬季海温与试验 C3相比可见,它们都明显地使南海海温下降、西太平 洋暖池区海温上升。这两个模式积分结果的相似性说 明,北风异常对海洋的影响除了在近海地区产生持续 降温之外,还通过海洋内部变化引起大洋温度改变。 试验 03 和试验 C3 之间最显著的差别在于暖海水的 传播现象。在单纯的海洋模式中,经向风异常只能改 变局地的西太平洋海温,并不能使东太平洋海温产生 响应,即没有出现赤道暖水的东传过程,而在海气耦合 模式中,经向风异常也能使东太平洋海温发生变化。 这种差别说明了海气相互作用的重要性,海气之间的 相互作用导致了 El Niño 的发展以及后期环流的变化, 而单纯的海洋模式却没有这种过程。

6 结论

采用中国科学院大气物理研究所大气科学和地球 流体力学数值模拟实验室(LASG)研制的全球海气耦 合气候模式和海洋模式进行各种敏感性试验,研究东 亚冬季风异常对 El Niño 事件形成的作用。 (1)东亚冬季风异常对于海洋热状态,起了很大的 作用。强冬季风年冬季所对应的海温距平为 La Niña 型,但在与冬季风异常相对应的风应力作用下,通过海 气相互作用,由于赤道西太平洋西风异常和海温正距 平的东传,可以使海温向着 El Niño 型分布发展;弱冬 季风年冬季所对应的海温距平为 El Niño 型,后期则会 转成 La Niña 型。

(2)冬季风异常的偏北风分量及赤道西风分量对 海温所产生的影响各有差异。前者更多地影响太平洋 西岸及暖池区,后者则对整个赤道太平洋热状态,特别 是 El Niño 形成起了重要的作用。

(3)在 El Niño 发展过程中起决定作用的并非风应 力的强度,更关键的是风应力的持续时间。仅仅加大 冬季三个月的风应力强迫,只能对后期春夏季海温产 生显著影响,而对更长时间以后的海温影响作用可能 不大。由于风应力的持续作用,El Niño 发展特征更加 显著。

(4) 与冬季风异常相对应的纬向风分量特别是西 风异常在 El Niño 发展中起主导作用, 在单纯的海洋模 式中经向风异常只能改变局地的西太平洋海温,并不 能使东太平洋海温产生响应,即没有出现赤道暖水的 东传过程。

试验表明,海气耦合模式较单纯的海洋模式能更 好地反映海气相互作用及 El Niño 的形成。

参考文献

[1] 孙淑清,陈隽.冬季风异常与环流的隔季相关.见:何金海主 编.亚洲季风研究的新进展——中日亚洲季风机制合作研究论 文集.北京:气象出版社,1996,99~107

> Sun Shuqing, Chen Jun. The anomalous winter monsoon and its relation to the interseasonal connection of circulation. The Recent Advances in Asian Monsoon Research—The Proceedings of P. R. China-Japan Cooperation Research Project on Asian Monsoon Mechanism (in Chinese), He Jinhai, Ed. Beijing : China Meteorological Press, 1996, 99 ~ 107

- [2] Chen Wen, Graf H F. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to global circulation. Max-Plank-Institute for Meteorology, Report No. 250, 1998
- [3] 朱乾根,谢立安.1986~1987年北半球冬季亚、澳地区大气环流 异常及其与西太平洋 SST 异常的联系.热带气象,1988,4(3): 254~262

Zhu Qiangen , Xie Lian. Relation between the general circulation anomaly over Asia and Australia and SSTA in the western Pacific in 1986 \sim 1987. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese) , 1988 \not (3): 254 \sim 262

[4] 郭其蕴,王日升.东亚冬季风活动与厄·尼诺的关系.地理学报, 1990 **A5**:68~87

Guo Qiyun , Wang Risheng. The relationship between the winter monsoon activity over East Asia and the El Niño events. Acta Geographica Sinica

(in Chinese) , 1990 , $\mathbf{45:}68\sim77$

- [5] Tomohiko T, Yasunari T. Role of the northeast winter monsoon on the biennial oscillation of the ENSO/monsoon system. J. Meteor. Soc. Japan, 1996, 74(4): 399 ~ 413
- [6] 李崇银.频繁的强东亚大槽活动与 El Niño 的发生.中国科学(B 辑),1988,**31**(6):667~674 Li Chongyin. Frequent activities of stronger aerotroughs in East Asia

wintertime and occurrence of the El Niño event , Science in China (Series B , in Chinese) , 1988 , $31(\,6\,):667\sim674$

[7] 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 **AS**(7):678~685 Li Chongyin, Mu Mingquan. Relationship between East Asian winter

monsoon , warm pool situation and ENSO cycle. Chinese Sci. Bull. (in Chinese) , 2000 , $45(\ 7\):678\sim685$

[8] 李崇银,穆明权.异常东亚冬季风激发 ENSO 的数值模拟研究. 大气科学,1998, 22:393~403

Li Chongyin , Mu Mingquan. The numerical simulations of anomalous winter monsoon in East Asia exciting ENSO. Chinese J. Atmos. Sci. , 1998 , $22:393 \sim 403$

- [9] Wallace J M, Smith C, Bretherton C S. Singular value decomposition of wintertime sea surface temperature and 500-mb height anomalies. J. Climate, 1992, 5:561 ~ 576
- [10] 陈隽,孙淑清.东亚冬季风异常与全球大气环流变化 II. 冬季风 异常对全球热带海温变化的影响.大气科学,1999,23(3):286 ~295

Chen Jun, Sun Shuqing. Eastern Asian winter monsoon anomaly and variation of global circulation. Part II: Influence on SST by winter monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, 23(3):286 ~ 295

- [11] Liu Hui, Jin Xiangze, Zhang Xuehong, et al. A coupling experiment of an atmosphere and an ocean model with a monthly anomaly exchange scheme. Advances in Atmospheric Sciences, 1996, 13: 133 ~ 146
- [12] 吴国雄,张学洪,刘辉,等.LASG全球海洋-大气-陆面系统 模式(GOALS/LASG)及其模拟研究.应用气象学报,1997,8:15 ~28

Wu Guoxiong, Zhang Xuehong, Liu Hui, et al. Global oceanatmosphere-land system model of LASG (GOALS/LASG) and its performance in simulation study. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1997, **8**:15 ~ 28

- [13] Zhang Xuehong, Chen Keming, Jin Xiangze, et al. Simulation of thermohailine circulation with a twenty-layer oceanic general circulation model. *Theor. Appl. Climatol.*, 1996, 55:65~88
- [14] Wu Guoxiong, Liu Hui, Zhao Yu-Cheng, et al. A nine-layer atmospheric general circulation model and its performance. Advances in Atmospheric Sciences, 1996, 13(1):1~18
- [15] 孙淑清,陈隽.异常东亚冬季风对夏季南海地区风场及热力场的影响. 气候与环境研究 2000 f(4):400~416 Sun Shuqing, Chen Jun. Influences of anomalous East Asian winter monsoon on the wind and thermal fields of the South China Sea monsoon. *Climate and Environmental Research* (in Chinese), 2000, f(4):400~ 416

[16] 陈隽,孙淑清.东亚冬季风异常与全球大气环流变化 [.强弱

冬季风影响的对比研究.大气科学,1999,23(1):101~111

Chen Jun, Sun Shuqing. Eastern Asian winter monsoon anomaly and variation of global circulation. Part I: A comparison study on strong and weak winter monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23**(1):101~111

[17] 周发 ,于慎余,傅刚,等.南海经向风的年际振荡及其对海温的影响.第三届东亚及西太平洋气象与气候研讨会——南海季风实验科学规划会议文集,北京:气象出版社,1996,361~362 Zhou Faxiou, Yu Shenyu,Fu Gang, et al. Interannual oscillation of meridional wind over the South China Sea and its influence on SST. The Third Symposium on Meteorology and Climate in East Asia and the Western Pacific—Collection of Symposium on Program for the South China Sea Monsoon Experiments (in Chinese), Beijing: China Meteorological Press, 1996, 361 ~ 362

- [18] 孙柏民,孙淑清.海温在东亚冬季风影响江淮流域旱涝中的作用.见;黄荣辉等主编.灾害性气候的过程及诊断.北京:气象 出版社,1996,46~53
 - Sun Bomin , Sun Shuqing. The role of SST on the East Asian winter monsoon affecting the dryness and wetness of Yangtze-Huaihe River. Prediction of the Catastrophic Climatic and Its Influence on the Agricultural Yield and Preparations for Hydrological Resources (in Chinese), Huang Ronghui , et al. , Eds. Beijing : China Meteorological Press , 1996 , 46 ~ 53