

# 海洋环流模式的发展和应用

## I. 全球海洋环流模式\*

张学洪 俞永强 刘海龙

(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** 概述近 10 年来中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体动力学数值模拟国家重点实验室全球海洋环流模式的发展及其在全球海气耦合模式的发展和气候模拟方面的应用。重点是: 一个 30 层、 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  的准全球海洋环流模式 LICOM 的建立及其模拟的热带太平洋海洋环流和印度尼西亚贯穿流; 以 20 层海洋模式为海洋分量建立的全局海洋—大气—陆面系统耦合模式 GOALS 在气候变化模拟方面的应用, 和以海洋模式 L30T63 为海洋分量建立的灵活的耦合环流模式 FGCM-0 在热带太平洋—印度洋海气相互作用及古海洋—古气候模拟方面的应用。

**关键词:** 海洋环流模式; 热盐环流; 风生环流; 印度尼西亚贯穿流; LICOM

## 1 引言

中国科学院大气物理研究所 (IAP) 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG) 发展的第一个多层海洋环流模式是一个格距为  $4^\circ \times 5^\circ$ , 南北范围  $60^\circ\text{S} \sim 60^\circ\text{N}$  的 4 层模式<sup>[1,2]</sup>。该模式经过改进后实现了同 IAP 两层大气环流模式<sup>[3]</sup> 的耦合, 并成功地模拟出热带太平洋的年际气候变动<sup>[4]</sup>。

第二个 IAP/LASG 全球海洋环流模式是一个同样格距的 20 层模式, 它的原始版本<sup>[5,6]</sup> 的南北范围是从南极大陆沿岸至  $70^\circ\text{N}$ , 修订版本<sup>[7]</sup> 的北边界扩展到北极点邻近。同 4 层模式相比, 20 层模式的主要改进是合理地模拟出了以北大西洋深水为主要特征的热盐环流, 模式中还包括了海冰的热力学过程, 因而被用于分别同 IAP 两层大气环流模式和 9 层 R15 截谱大气模式<sup>[8]</sup> 耦合, 以研究更长时间尺度的气候振荡和气候变化问题<sup>[5,7,9]</sup>。IAP/LASG 全球海洋—大气—陆地系统 (GOALS) 模式<sup>[10,11]</sup> 就是在 20 层海洋模式和 9 层截谱大气模式的基础上发展起来的。

20 世纪 90 年代末, 金向泽等<sup>[12]</sup> 发展了 LASG 的第三个全球海洋环流模式。这是一个 30 层模式, 水平格距约为  $1.875^\circ \times 1.875^\circ$ , 为了方便同截谱大气环流模式的耦合, 水平布网采用 63 波三角形截谱 (T63) 方式, 故该模式简称为 “L30T63”。L30T63 模式中引进了 Gent 和 McWilliams 的中尺度涡参数化方案<sup>[13]</sup> (即 “GM90”), 该方案已

2003-01-20 收到, 2003-04-08 收到修改稿

\* 中国科学院知识创新工程重要方向项目 ZKCX2-SW-210、国家自然科学基金资助项目 40233031、国家重点基础研究发展规划项目 G2000078502、国家自然科学基金资助项目 40231004 和国家重点基础研究发展规划项目 G1999043803 共同资助

被证实对改进恒定温跃层 (permanent thermocline) 的模拟有显著效果<sup>[14]</sup>。为改进对热带上层海洋环流的模拟, 在南北纬  $30^\circ$  之间还采用了 Pacanowski-Philander (P-P) 的海洋上层垂直混合方案<sup>[15]</sup>。利用 L30T63 海洋模式进行了一系列试验, 其中最重要的是模式对不同来源的风应力响应的敏感性试验<sup>[16]</sup>和模式模拟的西风爆发期间赤道西太平洋暖池热量平衡状况演变过程的试验<sup>[17]</sup>。

俞永强等<sup>[18]</sup>实现了海洋模式 L30T63 和 NCAR 的大气环流模式 CCM3<sup>[19]</sup> 的耦合, 推出了一个新的全球海气耦合模式 FGCM-0 (Flexible coupled ocean-atmosphere General Circulation Model), 该模式正在被用于热带海气相互作用的研究以及古海洋和古气候的研究。

应当指出, 尽管 L30T63 模式的空间分辨率达到了略高于 20 世纪末国际上全球海洋模式的平均分辨率的水平, 但同“大洋环流试验”(WOCE) 计划所推崇的全球“涡分辨”模式<sup>[20]</sup>以及许多用于研究 El Niño 的热带太平洋模式<sup>[21,22]</sup>相比, 其分辨率仍然偏低。为了增强 LASG 全球海洋模式模拟海洋环流的能力, 最近, 刘海龙<sup>[23]</sup>已经将 L30T63 的水平分辨率提高到  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , 在许多方面显著地改进了 L30T63 的模拟结果, 这是 LASG 全球海洋环流模式的一个新发展。

由以上的回顾可以看出, LASG 全球海洋环流模式经历了一个不断发展的过程, 这个过程始终是和海气耦合模式的发展和应用结合进行的。作为例子, 以下将择要介绍 30 层、 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  海洋模式的模拟结果 (第 2 节) 和海气耦合模式 GOALS 和 FGCM-0 的模拟结果 (第 3 节)。

## 2 LASG 全球海洋环流模式的新发展

随着研究重点向热带太平洋、印度洋海域聚焦, L30T63 模式在热带太平洋上层环流的模拟<sup>[14]</sup>、以及海陆地形非常复杂的印度尼西亚海域环流的模拟等方面仍表现出分辨率不够精细的局限性。提高模式分辨率能够改进对热带环流、西边界流、经向热量输送等的模拟能力<sup>[24]</sup>, 这一点已经被国内外海洋环流模式的发展所证实。目前, 全球海洋模式的水平分辨率已经可以达到  $1/6^\circ$ <sup>[25]</sup>。因此, 进一步提高水平分辨率成为改进 L30T63 模式的关键内容, 同时也是模式参与国际交流的前提。

在 L30T63 基础上, 刘海龙<sup>[23]</sup>从 2001 年开始发展更高分辨率的全球海洋模式。兼顾物理问题的精度要求和实际的计算条件, 将模式水平分辨率提高到  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  (垂直分层暂时不变), 可基本满足分辨出赤道波导和印度尼西亚贯穿流 (Indonesian Throughflow, 简称 ITF) 主要通道的要求。模式的南北范围取  $75^\circ\text{S} \sim 65^\circ\text{N}$  (不包括北冰洋), 南北侧边界采用了温度和盐度的恢复条件。利用 Hellerman 和 Rosenstein 气候风应力<sup>[26]</sup>, 以 Levitus 的海表温度 (SST)<sup>[27]</sup> 和海表盐度 (SSS)<sup>[28]</sup> 作为热通量和淡水通量恢复边界条件, 模式积分了 40 年。从全球平均的动能和 SST 的时间序列来看, 模式上层基本达到稳定 (图略)。在此基础上, 分别进行了针对热带上层环流的水平粘性系数试验、风应力试验, 针对 ITF 模拟的印度尼西亚海域通道地形试验等。

在分析上述试验结果的基础上, 对印度尼西亚海域的模式地形作了修正使之更加

接近实际<sup>1)</sup>，并以欧洲中心再分析 (ECMWF Reanalysis, 又称 ERA15)<sup>[29]</sup> 的逐日的风应力和 COADS (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set)<sup>[30]</sup> 的气候大气变量为强迫场, 采取 Haney 型热通量边界条件<sup>[31]</sup>, 将模式积分了 15 年 (1979~1993 年, 称为 EXP5 试验), 以下图表都是基于 EXP5 之 1980~1989 年结果给出的。至此, 我们已经初步推出了 LASG 的第四个全球海洋环流模式 (目前的版本是准全球的, 未来的版本将把北冰洋也包括在内), 它所采用的  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  的水平分辨率可以更好地满足模拟太平洋—印度洋风生环流和相应的气候问题的需要。这个模式将被简称为 LICOM (LASG/IAP Climate systems Ocean Model)。

基本评估表明, LICOM 合理再现了大尺度环流的基本气候特征。与 L30T63 相比, 主要的改进表现在模拟的大洋环流的许多重要成员更加接近观测事实, 其中尤以赤道太平洋上层风生环流、北大西洋和北太平洋西边界流及其延伸体、南极绕极环流以及 Agulhas 海流及其回流区最为明显。就经圈环流而言, LICOM 模拟底水输送加强, Deacon Cell 加深, 低纬度风生环流加强。环流的加强, 尤其是西边界流加强, 导致 LICOM 经向热输送增加。作为例子, 以下将给出赤道太平洋上层环流、SST 和 ITF 的年平均模拟结果, 说明 LICOM 相对于 L30T63 的改进。

图 1 是沿  $150^{\circ}\text{W}$  的纬度—深度剖面上的纬向流。与 NCEP 海洋同化资料<sup>[32]</sup> 相比, L30T63 模拟的主要问题是赤道潜流和北赤道逆流的强度偏弱, 而且南赤道流的流速中心在赤道上。从 LICOM 的模拟结果来看, 赤道潜流和北赤道逆流都有明显加强, 南赤道流“W”形的南北分支结构也较接近同化资料结果。

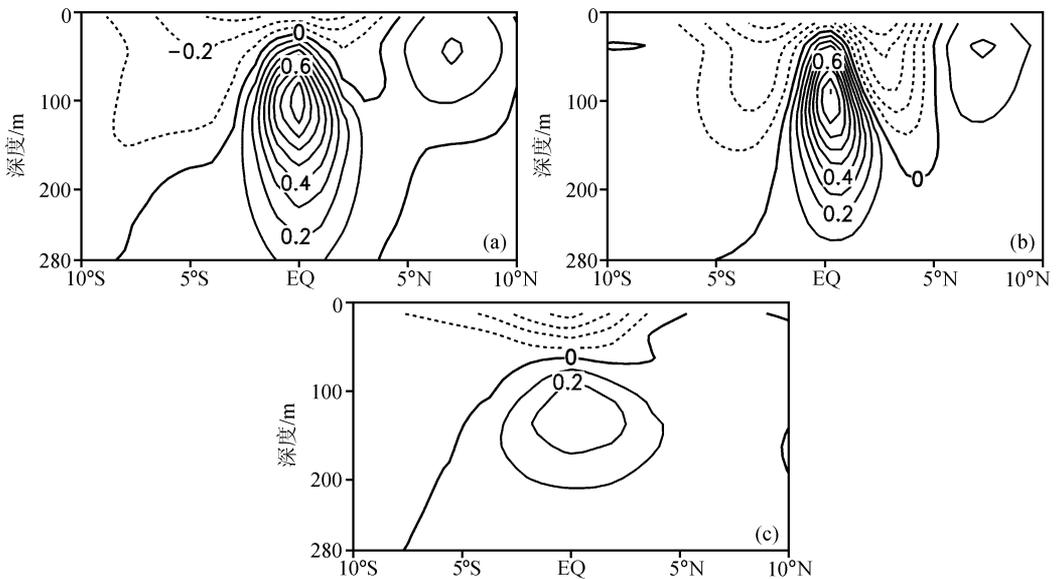


图 1 热带太平洋  $150^{\circ}\text{W}$  处上层 280 m 的年平均纬向流 (单位:  $\text{m s}^{-1}$ )

(a) NCEP 海洋同化资料; (b) LICOM; (c) L30T63

1) 例如, 自动生成模式地形的程序通常要求每一个海洋格点至少有 5 层, 这样就夸大了像 Torres 海峡和 Karimata 海峡等较浅的通道。为此, 在以下的试验中我们对实际情形对模式地形做了个别调整。

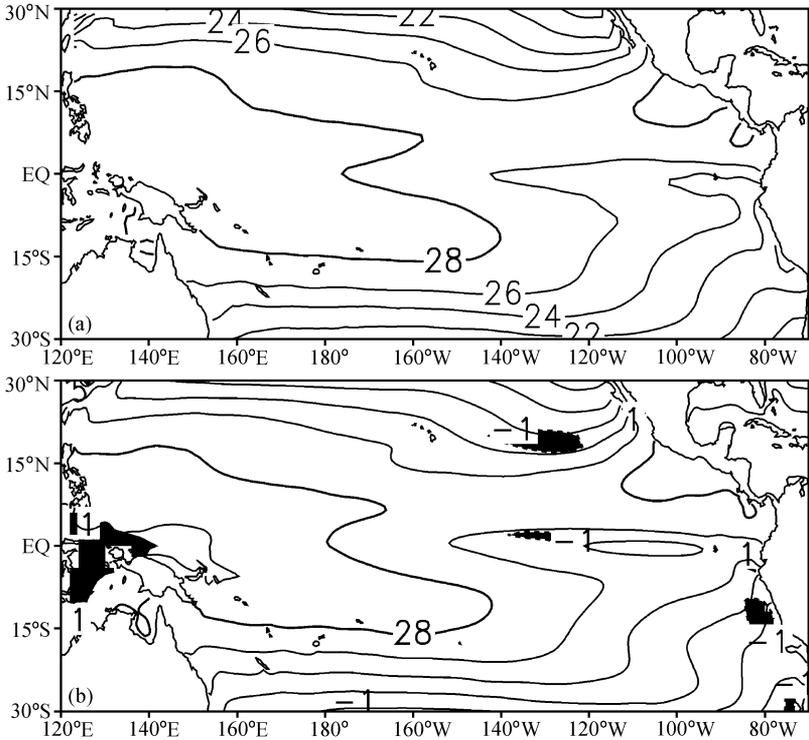


图2 热带太平洋年平均海表温度 NCEP 海洋同化资料 (a) 和 LICOM (b)  
单位:°C, 阴影表示 LICOM 与 NCEP 的差大于 1°C

LICOM 模拟热带太平洋上层环流的改进有益于合理再现其动量和热量的平衡。这体现在 LICOM 对模拟热带太平洋 SST 平均状态的改进 (图 2)。虽然 LICOM 仍然有模拟东太平洋偏冷, 西太平洋偏暖的问题, 与 L30T63 模拟误差的特征类似 (参看文献 [12] 之图 2), 但 LICOM 模拟结果中 SST 偏差的幅度总体较小。其中, 在赤道东太平洋 140°W ~ 120°W, LICOM 模拟 SST 偏冷 1°C, 比 L30T63 的冷偏差 (2°C) 有了较大的改善。而 LICOM 中 140°E 以西的西太平洋 SST 偏暖 1~2°C 的误差, 与 L30T63 接近。

0.5°分辨率使得 LICOM 模式能够分辨出印度尼西亚海域的几个主要海峡 (表 1), 从而有可能正确模拟 ITF 的流径, 这是很有意义的, 因为 ITF 对于暖池热收支, 以至全球海洋环流的重要性已在许多观测和模拟研究中得到证实<sup>[33~37]</sup>。

表 1 LICOM 模拟的和观测的印度尼西亚海域主要通道  
年平均体积输送 (向北、向东为正) Sv

	总流量	Makassar	Lombok	Ombai	Timor
模拟	-12.2	-6.5	-5.1	-5.9	-0.02
观测	-12 <sup>①</sup>	-9.3 <sup>②</sup>	-1.7 <sup>③</sup>	-5 <sup>④</sup>	-4.5 <sup>⑤</sup> 或-4.3 <sup>⑥</sup>

注: ①由 Levitus 年平均温度盐度估算的澳大利亚至苏门答腊的地转流, 引自文献 [38]; ②由 Makassar 海峡中 3°S 附近的浮标测量, 1997 年年平均, 引自文献 [39]; ③由流量计测量, 1985 年 1 月~1986 年 3 月, 引自文献 [40]; ④由单独浮标测量的流量, 1995 年, 引自文献 [41]; ⑤由流量计测量的 140~1040 米流量, 1989 年, 引自文献 [42]; ⑥由 ADCP 测量的 0~1250 米流量, 1992 年, 引自文献 [42]。

根据图 3a, LICOM 模拟的 ITF 在上层基本来自棉兰老流 (Mindanao Current, MC), 主要经 Makassar 海峡进入印度尼西亚海域。南侧岛弧中的 Lombok 海峡、Ombai 海峡和 Timor 通道也是 ITF 流入印度洋的主要路径。由表一可见, 模拟的总流量、Makassar 海峡和 Ombai 海峡的流量都与观测较接近, 但 Lombok 海峡流量偏大, 而 Timor 通道流量偏小。前者也是目前 ITF 模拟中存在的普遍问题<sup>[43]</sup>。

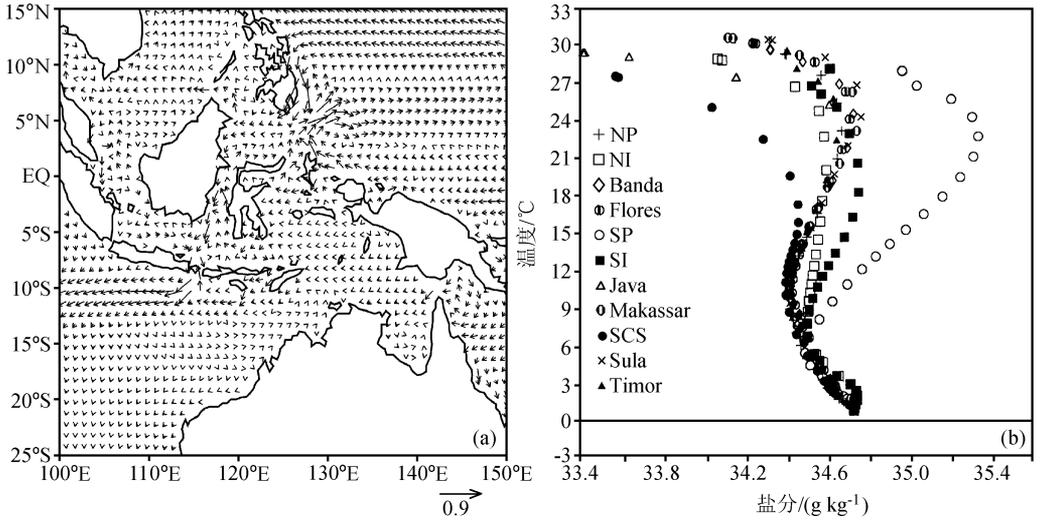


图 3 (a) 年平均印度尼西亚海域上层 300 m 平均环流, 单位:  $\text{m s}^{-1}$ ;

(b) 印度尼西亚海域及其邻近海域的水团性质

NP: 北太平洋; SP: 南太平洋; SCS: 南中国海; NI: 印度洋出口北侧; SI: 印度洋出口南侧; Sula: Sulawesi 海; Banda: Banda 海; Java: Java 海; Timor: Timor 海; Flores: Flores 海; Makassar: Makassar 海峡

由于南、北太平洋上层海水的温盐特征不同, 利用水团分析的方法也可追溯 ITF 的来源。图 3b 显示了印度尼西亚海域及其附近海水的温盐垂直结构。可以看出, 印度尼西亚海域内的上层水团性质与北太平洋水的特点基本一致, 只有 Java 海表层受到经 Karimata 海峡流入的南中国海水的影响。结合图 3a 的结果, 可以认为 LICOM 模拟的 ITF 路径是与观测基本一致的。

对 LICOM 模拟 ITF 流量的气候变化的分析表明, 在季节尺度上, ITF 从太平洋向印度洋的质量输运在冬-春季较小 (最小 6.0 Sv), 夏-秋季较大 (最大 18.5 Sv)。在年际尺度上, ITF 流量在 El Niño 期间减小, 而在 La Niña 期间增大, ITF 流量与 Niño3 区 SST 异常指数有较好的正相关。

### 3 大洋环流模式在全球海气耦合模式中的应用

LASG 发展全球海洋模式的一个主要目的是进行气候研究。因此, 海洋模式的发展和始终是同全球海气耦合模式的发展和始终结合进行的。从 20 世纪 80 年代末到现在为止, 已经推出了四个全球海气耦合模式 (表 2)。

表 2 LASG 发展的全球海气耦合模式

耦合模式名称	海洋模式分辨率	大气模式分辨率	耦合方案	耦合变量	时间积分长度	气候漂移状况
M2+4 <sup>[4]</sup>	4 层, 4°×5°	2 层, 4°×5°	预估—校正的月通量距平耦合 <sup>[4]</sup>	风应力 热通量	40 年	无
M2+20 <sup>[5]</sup>	20 层, 4°×5°	2 层, 4°×5°	预估—校正的月通量距平耦合 <sup>[4]</sup>	风应力 热通量	225 年	冷漂移
GOALS <sup>[10,11]</sup>	20 层, 4°×5°	9 层, R15	修正的月通量距平耦合 <sup>[44]</sup> 和逐日耦合 <sup>[45]</sup>	风应力 热通量 淡水通量	1000 年	无
FGCM-0 <sup>[18]</sup>	30 层, T63	18 层, T42 *	直接耦合	风应力 热通量	60 年	无

\* FGCM-0 的大气分模式是 NCAR CCM3<sup>[19]</sup>.

表 2 中的前 3 个模式都是基于“通量距平耦合”方案<sup>[4,44,45]</sup>建立的,其中以全球海洋—大气—陆面系统模式 GOALS<sup>[10,11]</sup>最为完善;FGCM-0<sup>[18]</sup>是 LASG 推出的第一个比较成功的非通量调整型全球海气耦合模式(简称直接耦合模式)。以下将择要介绍 GOALS 和 FGCM-0 以及它们在气候研究中的应用。

### 3.1 GOALS 模式在气候变化研究中的应用

GOALS 是一个全球海洋—大气—陆面—海冰耦合模式<sup>[10,11]</sup>,有 4 个版本,总共完成了长达 1000 年的模拟试验,得到了多方面的检验和应用<sup>[46~49]</sup>。GOALS 模式的第二和第四版本的结果参加了国际耦合模式比较计划的第一和第二阶段(CMIP1 和 CMIP2)<sup>[50]</sup>,并被 IPCC 2001 年出版的第三次科学评估报告<sup>[51]</sup>所引用。

参加国际耦合模式比较计划第二阶段(CMIP2)的海气耦合模式共有 18 个,来自澳大利亚、英国、加拿大、中国、法国、德国、日本、英国等国家的十几个气候研究机构。LASG 参加 CMIP2 的模式是 GOALS-4 的第 4 版本(GOALS-4),其中海气界面上的通量交换不仅包括动量和热量,而且也考虑了淡水通量。利用 GOALS-4 完成了一个 80 年的控制试验(大气二氧化碳浓度不变)和一个 80 年的敏感性试验(二氧化碳浓度以每年 1% 的速率等比递增)。到温室气体浓度加倍时(大约 70 年左右),GOALS-4 模拟的全球平均地面气温增加了 1.65°C,接近于 IPCC 2001 年报告中给出的所有模式模拟结果的平均值(图略,可参看文献 [9] 和 [51])。

利用 GOALS-4 还完成了一个工业革命以来气候变化的数值模拟试验<sup>[52]</sup>。结果表明:造成过去一百年间全球平均地面气温增加的主要原因是人类活动引起的大气温室气体增加,但是气溶胶和太阳活动的影响也不可以忽略,其中气溶胶主要起降温作用,太阳活动在 20 世纪前半叶有一定增温作用。如果同时考虑温室气体、气溶胶和太阳活动的共同作用,模式模拟的过去一百年全球平均气温增加 0.65°C,这和观测结果很相近。目前的主要问题是模拟的 20~40 年代气温明显偏低(图 4)。

### 3.2 直接耦合模式 FGCM-0 的应用

#### 3.2.1 热带海气相互作用的模拟

FGCM-0<sup>[18]</sup>是由 LASG 的大洋环流模式 L30T63<sup>[12]</sup>和 NCAR 的大气环流模式 CCM3<sup>[19]</sup>利用 NCAR 气候系统模式 CSM<sup>[53]</sup>的框架耦合而成的。FGCM-0 已经稳定积分了 60 年,模式没有出现明显的气候漂移,并可以模拟出大尺度的海洋和大气环流的

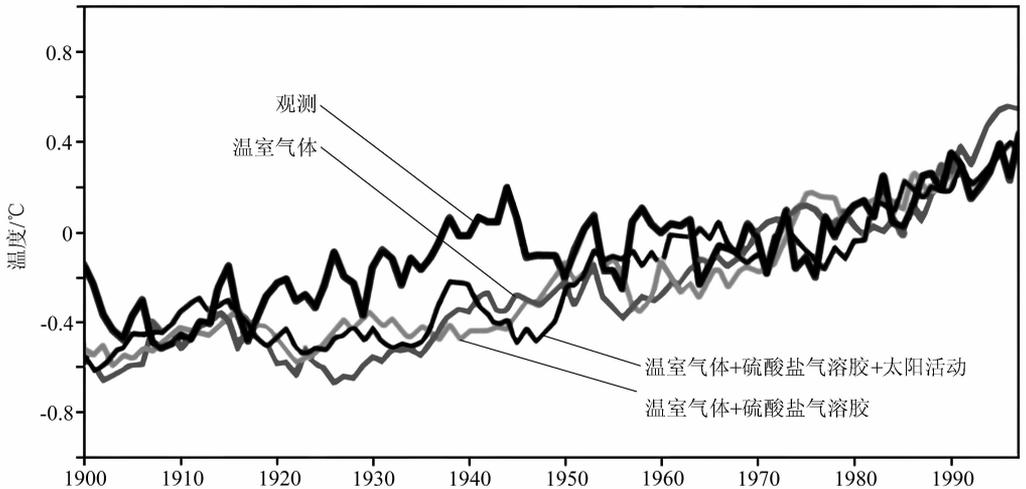


图4 GOLAS模式模拟的过去100年全球平均地面气温距平（相对于1960~1990年30年平均）随时间的变化（引自文献[52]）

基本特征。

对年际气候变化的模拟能力，特别是重现赤道太平洋 ENSO 变率的能力，是评价耦合气候系统模式重要指标之一。FGCM-0 耦合模式六十年的积分结果表明，模式可以相当真实地模拟出赤道太平洋类似 ENSO 事件的年际气候变化特征。同 LASG 的前三个全球海气耦合模式相比，FGCM-0 模拟的 ENSO 事件的振幅明显增加，其空间分布特征也与观测更为接近。最显著的改进出现在赤道太平洋的次表层，FGCM-0 模式模拟的最大海温距平出现海洋温跃层附近，并且表现出沿赤道向东传播、在赤道外（5~8°N 左右）向西传播的特征，这与观测事实和理论研究结果在定性上基本一致（详见文献[18]）。

FGCM-0 不仅能够模拟赤道太平洋海气相互作用的基本特征，而且还可以刻画赤道印度洋的偶极子现象。图 5a 是 FGCM-0 模拟的印度洋偶极子指数 [DMI, 赤道西印度洋（50~70°E, 10°S~10°N）SST 距平与赤道东印度洋（90~110°E, 10°S~0°）SST 距平之差]<sup>[54]</sup>，图 5b 和 c 分别是模拟的 DMI 与模拟的 SST 和上层海洋热含量的相关系数，两者都显示出类似观测的印度洋偶极子特征，表明模拟的赤道印度洋偶极子不仅表现为 SST 的分布，而且次表层温度的变化也有类似的特征。同时，印度洋偶极子指数与赤道印度洋纬向西风应力存在显著的相关关系（图 5d），这意味着印度洋偶极子现象应该是海气相互作用的结果。进一步分析还表明，在 FGCM-0 模拟的 ENSO 事件和赤道印度洋的偶极子之间存在密切的联系，赤道印度洋的偶极子并不是一个独立的事件，它与赤道太平洋的 ENSO 事件有着密不可分的关系<sup>[18]</sup>。

### 3.2.2 古海洋和古气候模拟

在评估 FGCM-0 模拟当代气候能力的基础上，利用 FGCM-0 及其海洋分模式进行了古海洋和古气候数值模拟试验：分别采用现代、6 Ma 和 14 Ma 前的海底地形，利用单独的海洋模式 L30T63 和耦合模式 FGCM-0 进行数值试验，研究澳大利亚板块北移对热带海洋环流特别是赤道西太平洋暖池形成的作用<sup>[55]</sup>。单独的海洋模式模拟结果表

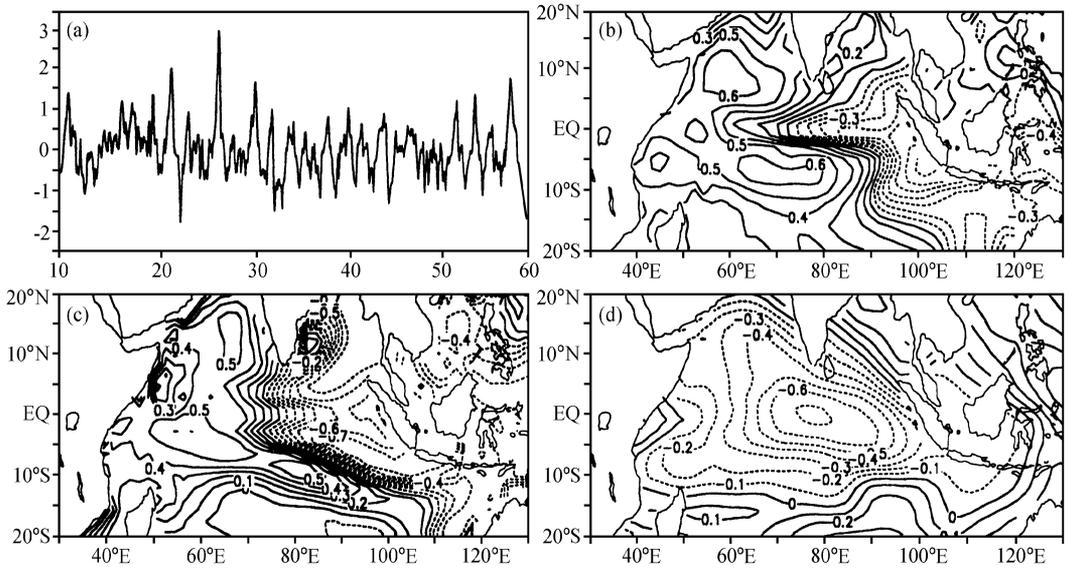


图5 (a) FGCM-0 模拟印度洋 Dipole 指数 DMI; (b) 模拟的 DMI 与 SST 的相关系数; (c) 模拟的 DMI 与上层 300 m 热含量的相关系数; (d) 模拟的 DMI 与纬向风应力的相关系数

明, 随着澳大利亚板块向北移动, 印度尼西亚通道逐渐变窄, 太平洋海温增加, 赤道印度洋变冷; 并且通过印度尼西亚通道从太平洋流入印度洋的海水来源也在变化, 即在 14Ma 前流入印度洋的水主要来自南赤道流, 而在现代则主要来自北赤道流。海气耦合模式的结果在定性上与单独海洋模式结果基本一致 (图 6)。

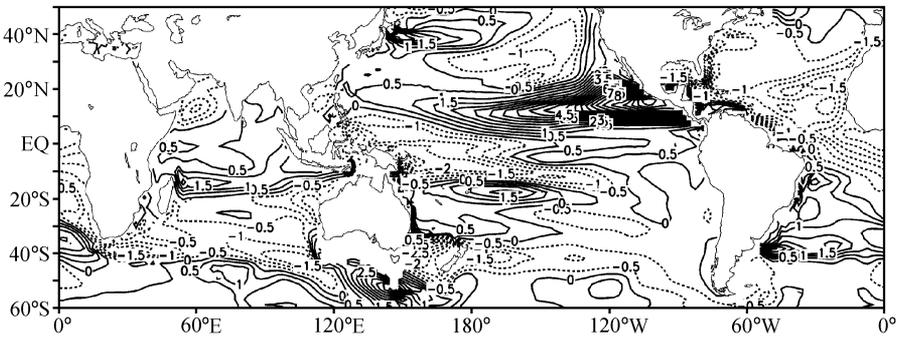


图6 FGCM-0 模拟的现代海洋次表层 200 m 处的海温与 14 Ma 前的差值

**致谢:** 作者感谢金向泽、宇如聪、周天军和李薇, 他们在海洋模式 L30T63 和 LICOM、耦合模式 FGCM-0 的发展, 以及 GOALS 模式的应用方面做了重要贡献; 感谢刘辉、吴国雄、郭裕福和石广玉, 他们在 GOALS 模式的建立过程中做了重要贡献。

## 参 考 文 献

- 1 Zhang Xuehong, and Liang Xinzhong, A numerical world ocean general circulation model, *Adv. Atmos. Sci.*, 1989, **6**(1), 43~61.

- 2 Zhang Xuehong, Bao Ning, and Wang Wanqiu, Numerical simulation of seasonal cycle of world oceanic general circulation, In The Proceedings of The Sixth Japan and East China Sea Study Workshop (JECSS-VI), Fukuoda, Japan, April 22-27, 1991. (*La mer*, 1993, **30**, 73~82).
- 3 Zeng Qingcun, Zhang Xuehong, Liang Xinzhong et al., *Documentation of IAP Two-Level Atmospheric General Circulation Model*. DOE/ER/60314-H1, TR044, 1989, 383pp.
- 4 Zhang Xuehong, Bao Ning, Yu Rucong et al., Coupling scheme experiments based on an atmospheric and an oceanic GCM, *Chinese J. Atmos. Sci.*, 1992, **16**(2), 129~144.
- 5 陈克明, IAP 全球海气耦合环流模式的改进及温室气体引起的气候变化的数值模拟研究, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1994, 145pp.
- 6 Zhang Xuehong, Chen Keming, Jin Xiangze et al., Simulation of thermohaline circulation with a twenty-layer oceanic general circulation model, *Theoretical and Applied Climatology*, 1996, **55**(1-4), 65~87.
- 7 俞永强, 海-冰-气耦合方案的设计及年代际气候变化的数值模拟研究, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1997, 130pp.
- 8 Wu Guoxiong, Liu Hui, Zhao Yucheng et al., A nine-layer atmospheric general circulation model and its performance, *Adv. Atmos. Sci.*, 1996, **13**(1), 1~18.
- 9 Guo Yufu, Yu Yongqiang, Liu Xiying et al., Simulation of Climate Change Induced by CO<sub>2</sub> Increasing for East Asia with IAP/LASG GOALS Model, *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18**, 53~66.
- 10 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** (增刊), 15~28.
- 11 Zhang Xuehong, Shi Guangyu, Liu Hui et al. (Editors), *IAP Global Ocean-Atmosphere-Land System Model*, Beijing, Science Press, 2000, 259pp.
- 12 Jin Xiangze, Zhang Xuehong, and Zhou Tianjun, Fundamental Framework and Experiments of the Third Generation of IAP/LASG World Ocean General Circulation Model, *Adv. Atmos. Sci.*, 1999, **16**(2), 197~215.
- 13 Gent, P. R., and J. C. McWilliams, Isopycnal mixing in ocean circulation models, *J. Phys. Oceanogr.*, 1990, **20**, 150~155.
- 14 金向泽、俞永强、张学洪等, L30T63 海洋模式模拟的热盐环流和风生洋流, 国家“九五”重中之重 96-908 科技项目《我国短期气候预测系统的研究》之二-短期气候预测业务动力模式的研制, 北京: 气象出版社, 2000, 170~182.
- 15 Pacanowski, R. C., and G. Philander, Parameterization of vertical mixing in numerical models of the tropical ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, 1981, **11**, 1442~1451.
- 16 俞永强、A. Izard、郭裕福等, IAP/LASG OGCM 全球海洋环流模式对风应力的响应, *大气科学*, 2001, **25**, 721~739.
- 17 刘海龙、李薇、张学洪等, 一个大洋环流模式中赤道西太平洋暖池海面温度对西风爆发的响应, *大气科学*, 2002, **26**, 172~184.
- 18 Yu Yongqiang, Yu Rucong, Zhang Xuehong et al., A Flexible Global Coupled Climate Model, *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19**, 169~190.
- 19 Kiehl, J. T., J. J. Hack, G. B. Bonan et al., The National Center for Atmospheric Research Community Climate Model: CCM3, *J. Climate*, 1998, **11**(6), 1131~1149.
- 20 Semtner, A. J., Sixth-degree global ocean model. U. S. WOCE report 1994, U. S. WOCE Office, Texas A&M University, College Station, TX, 1994, 34~36.
- 21 Mechoso, C. R., A. W. Robertson, N. Barth et al., The Seasonal Cycle over the Tropical Pacific in Coupled Ocean-Atmosphere general Circulation Models, *Mon. Wea. Rev.*, 1995, **123**, 3825~3838.
- 22 Stockdale, T. N., A. J. Busalacchi, D. E. Harrison et al., Ocean modeling for ENSO, *J. Geophys. Res.*, 1998, **103** (C7), 14325~14355.
- 23 刘海龙, 高分辨率海洋环流模式和热带太平洋上层环流的模拟研究, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2002, 178pp.

- 24 Semtner, A. J., and R. M. Chervin, Ocean general circulation from a global eddy-resolving model, *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**, 5493~5550.
- 25 Maltrud, M. E., R. D. Smith, A. J. Semtner et al., Global eddy-resolving ocean simulations driven by 1985-1995 atmospheric winds. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**, 30825~30852.
- 26 Hellerman, S., and M. Rosenstein, Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates, *J. Phys. Oceanogr.*, 1983, **13**, 1093~1104.
- 27 Levitus S., and T. P. Boyer, *World Ocean Atlas 1994 Volume 4: Temperature*. NOAA Atlas NESDIS 4, U. S. Department of Commerce, Washington, D. C., 1994, 117 pp.
- 28 Levitus S., R. Burgett, and T. P. Boyer, *World Ocean Atlas 1994 Volume 3: Salinity*. NOAA Atlas NESDIS 3, U. S. Department of Commerce, Washington, D. C., 1994, 99 pp.
- 29 Gibson, J. K., P. K llberg, S. Uppala et al., *ECMWF Re-Analysis Project Report Series*, 1997.
- 30 da Silva, A. M., C. C. Young, and S. Levitus, *Atlas of Surface Marine Data 1994, Volume 2: Anomalies of Directly Observed Quantities*. NOAA Atlas NESDIS 7S, 1994.
- 31 Haney, R. L., Surface thermal boundary condition for ocean circulation models, *J. Phys. Oceanogr.*, 1971, **1**, 241~248.
- 32 Ji, M., A. Leetmaa, and V. E. Kousky, Coupled model predictions of ENSO during the 1980s and the 1990s at the National Center for Environmental Prediction, *J. Climate*, 1996, **9**, 3105~3120.
- 33 Webster, P. J., and R. Lukas, TOGA COARE: The Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1992, **73**, 1377~1417.
- 34 Hirst, A. C., and J. S. Godfrey, The role of the Indonesian Throughflow in a global GCM, *J. Phys. Oceanogr.*, 1993, **23**, 1057~1086.
- 35 Schneider, N., The Indonesian Throughflow and the global climate system, *J. Climate*, 1998, **11**, 676~689.
- 36 Banks, H. T., Indonesian Throughflow in a coupled climate model and the sensitivity of the heat budget and deep overturning, *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**, 26135~26150.
- 37 Wajswowicz, R. C., and E. K. Schneider, The Indonesian Throughflows effect on global climate determined from the COLA coupled climate system, *J. Climate*, 2001, **14**, 3029~3042.
- 38 Godfrey, J. S., A Sverdrup model of the depth-integrated flow for the World Ocean, allowing for island circulations, *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, 1989, **45**, 89~112.
- 39 Gordon, A. L., R. D. Susanto, and A. L. Ffield, Throughflow within Makassar Strait, *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26**, 3325~3328.
- 40 Murray, S. P., and D. Arief, Throughflow into the Indian Ocean through Lombok Strait, January 1985-January 1986, *Nature*, 1988, **333**, 444~447.
- 41 Molcard, R., M. Fieux, and F. Syamsudinb, The throughflow within Ombai Strait, *Deep-sea Res.*, 2001, **48**, 1237~1253.
- 42 Molcard, R., M. Fieux, and A. G. Ilahude, The Indo-Pacific throughflow in the Timor Passage, *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**, 12411~12420.
- 43 Gordon, A. L., and J. L. McClean, Thermohaline stratification of the Indonesian Seas: Model and Observations, *J. Phys. Oceanogr.*, 1999, **29**, 198~216.
- 44 俞永强、张学洪, 一个修正的海气通量距平耦合方案, *科学通报*, 1998, **43** (8), 866~870.
- 45 Yu Yongqiang, Zhang Xuehong, Liu Hui et al., Schemes for Coupling AGCM and OGCM, In *IAP Global Ocean-Atmosphere-Land System Model*, Edited by Zhang et al., Beijing: Science Press, 2000, 100~112.
- 46 Guo Yufu, Yu Yongqiang, and Zhang Tao, Evaluation of IAP/LASG GOALS Model. In *IAP Global Ocean-Atmosphere-Land System Model*, Edited by Zhang et al., Science Press, Beijing, New York, 2000, 115~137.
- 47 Yu Yongqiang, Guo Yufu, and Zhang Xuehong, Interdecadal Climate Variability. In *IAP Global Ocean-Atmosphere-Land System Model*, Edited by Zhang et al., Science Press, Beijing, New York, 2000, 155~170.
- 48 Zhou Tianjun, Zhang Xuehong, Yu Yongqiang et al., The North Atlantic Oscillation Simulated by Versions 2

- and 4 of IAP/LASG GOALS Model, *Adv. Atmos. Sci.*, 2000, **17**, 601~616.
- 49 李薇、俞永强, 大气季节内振荡的耦合模式数值模拟, 大气科学, 2001, **25**, 118~132.
- 50 Meehl, G. A., G. J. Boer, C. Covey et al., The Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2000, **81**, 313~318.
- 51 IPCC, *Climate Change 2001: The Scientific Basis: Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Houghton, J., Y. Ding, D. Griggs, M. Noguer, P. van der Linden, and D. Xiaosu (Eds), 2001, 944 pp.
- 52 马晓燕, 外部强迫因子对气候变化影响的数值模拟研究, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2000, 137pp.
- 53 Boville, B. A., and P. R. Gent, The NCAR Climate System Model, Version One, *J. Climate*, 1998, **11**(6), 1115~1130.
- 54 Saji, N. N., B. N. Goswami, P. N. Vinayachandran et al., A dipole mode in the tropical Indian Ocean, *Nature*, 1999, **401**, 360~363.
- 55 汪品先, 深海研究和新世纪的地球科学, 百年科技回顾与展望, 路甬祥主编, 上海: 上海教育出版社, 2000: 181~211.

# The Development and Application of the Oceanic General Circulation Models

## Part I. the Global Oceanic General Circulation Models

Zhang Xuehong, Yu Yongqiang, and Liu Hailong

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

**Abstract** The development of the global oceanic general circulation models, as well as their applications in the globally coupled climate models and the modeling studies of climate in the State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics (IAP) during the last decade are summarized. There are three subjects. The first is the development of a quasi-global oceanic general circulation model, LASG/IAP Climate system Ocean Model (LICOM), with 30 levels and homogeneous  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  horizontal resolution and its simulation of tropical Pacific circulation and the Indonesian Throughflow. The second is the application of the Global Ocean-Atmosphere-Land System model (GOALS), whose oceanic component is the 20-level version of LICOM, to simulate the climate change. The third is the application of the Flexible coupled General Circulation Model (version 0) (FGCM-0), which employs L30T63 (also the earlier version of LICOM) as its oceanic component, to investigate the air-sea interaction in the tropical Indo-Pacific and paleoceanography and paleoclimate.

**Key words:** oceanic general circulation model; thermohaline circulation; wind driven circulation; Indonesian Throughflow; LICOM