

一个太平洋海盆尺度环流模式及其模拟结果

徐永福¹ 李阳春^{1,2} 赵亮³ 李荣凤⁴ 俞永强⁴

1 中国科学院大气物理研究所大气边界层和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 中国海洋大学物理海洋研究所, 青岛 266003

4 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 在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(LASG)发展的全球气候海洋环流模式(LICOM)的基础上构建了一个太平洋海盆环流模式, 并对其模拟结果进行了深入的分析。在模拟中对中尺度示踪物输送采用了两种方案, 即传统的水平扩散方案(HOR)和包括涡旋诱导速度的等密度面扩散方案(GM)。对这两个试验的气候平衡态结果分析发现, 该模式较好地模拟出了太平洋的环流特征, 包括副热带涡、副极地涡旋以及南极绕流(ACC)等。赤道附近的各种流系亦得到了较好的模拟, 模拟的150°W赤道潜流的最大流速为40 cm/s, 出现在次表层130 m左右, 虽然模拟值比基于NCEP资料估计的最大流速80 cm/s小, 但与其位置十分相近。两个试验均较好地模拟出了温盐的分布结构, 包括北太平洋和南太平洋中层水的形成以及南极底层水的输送等。通过详细分析两个试验结果发现, 总的说来在目前模式所采用的参数条件下, GM的结果稍好于HOR的结果。这些模拟结果表明, 在LICOM基础上构建的太平洋环流模式从总体上是能再现许多观测特征的, 可为今后进一步研究被动示踪物在北太平洋的分布等问题提供一个十分有用的工具。

关键词 海洋环流模式 太平洋 中尺度示踪物输送 温盐环流 水团

文章编号 1006-9895(2006)05-0927-12

中图分类号 P732

文献标识码 A

A Basinwide Ocean General Circulation Model of the Pacific Ocean and Its Simulation Results

XU Yong-Fu¹, LI Yang-Chun^{1,2}, ZHAO Liang³, LI Rong-Feng⁴, and YU Yong-Qiang⁴

1 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Physical Oceanography Laboratory, Ocean University of China, Qingdao 266003

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

Abstract A basinwide ocean general circulation model of the Pacific Ocean is configured from a global ocean general circulation model called LICOM that was developed by the State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics of the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, from which the modeled results are analyzed. Two numerical experiments are conducted that are identical in every manner except their representation of mesoscale transports of tracers. The cases include a run with traditional horizontal diffusion (Laplace) (HOR) and a run (GM) in which isopycnal diffusion and eddy-induced transport ve-

收稿日期 2006-04-30, 2006-06-09 收修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重大项目 KZCX1-SW-01-1, 国家自然科学基金资助项目 40231004、40221503

作者简介 徐永福, 男, 1962 年出生, 博士, 研究员, 主要从事大气化学与全球环境变化研究。E-mail: xyf@mail.iap.ac.cn

locities are included following Gent and McWilliams (1990). From the equilibrium results of the two cases, it is found that our model well reproduces the circulation characteristics of the Pacific Ocean, including subtropical gyre, subpolar gyre, Antarctic Circumpolar Current (ACC), etc. The maximum value of 180 Sv for ACC is larger than data-based estimate and LICOM estimate. The maximum and minimum values of the simulated annual mean northward heat transport are 0.8 PW and -0.8 PW, which appear at 15°N and 15°S , respectively. These results are in good agreement with those from some data-based estimates. There is no significant difference for heat transport between HOR and GM. The current system in the equatorial region is well simulated, which is quite associated with horizontal resolution. The maximum of 40 cm/s for the simulated equatorial undercurrent appears at the subsurface of 130 m. The position is quite consistent with that from NCEP data, but the value is much smaller than that of 80 cm/s obtained by NCEP, and larger than that obtained by a model with 2° resolution. Although the patterns from GM and HOR are quite similar, the values from GM are generally larger than those from HOR. The model well reproduces the strong upwelling velocities in the eastern equatorial region with the largest value of about 3×10^{-5} m/s. The area of upwelling from GM is generally larger than that from HOR. Our model well simulates the distributions of temperature and salinity, including the warm pool in the western equatorial region and cold tongue in the eastern equatorial region. The vertical profiles of simulated model ocean-averaged temperature and salinity are in good agreement with those obtained with observations. In the thermocline, the largest difference in temperature is not larger than 0.5°C . The simulated profiles of salinity reflect high saline waters of subsurface and low saline waters of the intermediate water. The vertical profile of the simulated density reflects the total effect of temperature and salinity, which is in good agreement with that obtained by observations. It can be seen from the distributions of zonally averaged temperature that both HOR and GM generate that the isotherms larger than 8°C in the southern subtropics are shallower than those in the northern subtropics. The model is able to produce the transports of the North Pacific intermediate water, South Pacific intermediate water and Antarctic bottom water. According to the simulated results of circulation characteristics and water masses, the model with GM is slightly better than the model with HOR under the chosen values of parameters used in this work. It should be pointed out that the current model uses the restoration conditions at both higher northern and southern latitudes because ice is not included in the model. Although the restoration is weak, it may affect the distributions of simulated temperature and salinity. Therefore, the possible effects of restoration at the higher latitudes need to be explored, and validation of the model in terms of passive tracers should be examined in the future. Meanwhile, the sensitivity of some parameters to the model should be further studied.

Key words ocean general circulation model, the Pacific Ocean, mesoscale tracer transport, thermohaline circulation, water masses

1 引言

作为地球系统的一个主要组成部分,海洋在调节气候和大气化学成分中扮演着十分重要的角色,如它是人为 CO_2 重要的汇。据观测资料和模式的估计,目前全球海洋每年吸收碳约 2 Gt (2×10^9 吨)^[1]。但该汇的大小尚有争议,未来的变化趋势,特别是与气候变化的相互作用至今仍有许多不明之处。最近, Orr 等^[2] 比较了四个三维全球海洋碳循环模式对人为 CO_2 的吸收,发现不同模式得到的结果存在着一定的差别,尤其在区域尺度上有较大的差别。

由于计算资源是有限的,在未来相当长的时间内,对于长时间的积分要采用高分辨率的全球模式是难以做到的。为此,人们一直在寻找较好的中尺

度参数化方案。Gent 等^[3, 4] 提出了一种示踪物混合参数化方案(常称 GM90,即包括等密度面扩散和涡旋诱导速度),Danabasoglu 等^[5] 首先将该方案引入到 MOM 中,发现模拟结果比用传统的水平扩散方案的结果有较大的改进。尽管已注意到了该方案还有很多不足之处^[6],但是该方案目前已被广泛地用在 Z 坐标的模式中。

选择合理的计算区域也是有效利用计算资源的途径。前人对包括北大西洋、南大洋、北太平洋和近海的海盆或区域尺度的环流特征和物理过程作过不少研究。涡旋分辨的 FRAM^[7] 就以此为目的研究南大洋的环流特征。Boning 等^[8, 9] 采用非涡旋分辨的北大西洋模式和涡旋分辨的区域模式对北大西洋的温盐环流和亚极地的物理过程进行了深入的研

究。太平洋在调节气候变化中起着十分重要的作用,近年来有些学者提出北太平洋对人为 CO_2 的汇的估计可能被低估了。为了较准确地估计太平洋对人为 CO_2 的吸收以及评估碳循环对气候变化的响应,拥有一个好的海洋环流模式是必不可少的。很多学者对太平洋作过研究,其中包括热带西太平洋环流及其季节变化的研究^[10],1997 年夏季西北太平洋环流的研究^[11]以及南海海温的年变化^[12]。此类工作主要是对国外模式的发展和应用。我国研究人员在 20 世纪 80 年代就开始发展自己的海洋模式,张荣华等^[13]使用我国自己发展的模式对太平洋大尺度环流进行了模拟研究。中国科学院大气物理研究所从 1983 年开始基于曾庆存提出的海洋-大气耦合模式中简单版本的设计思想^[14]发展了一系列正压模式,这些模式的应用区域从小范围的南海发展到整个太平洋^[15]。通过这些模式,再现了中国南海乃至整个中国海的海流系统^[16]。20 世纪 90 年代初,中国科学院大气物理研究所开始建立并发展了近海和区域三维斜压海洋环流模式^[17],另外,也发展了四代三维全球海洋模式,并成功地实现了与大气模式的耦合^[18],其中包括第三代的 L30T63^[19]和第四代的 LICOM^[20]。

人们认识到北太平洋的中层水的形成可能对北太平洋环流及其混合过程有重要的影响。Yamanaka 等^[21]使用基于 Bryan 思想^[22]发展的模式(类似于 MOM)研究过 GM90 对北太平洋中层水形成的影响。Xu 等将 GM90 方法引入到一个 20°S 以北的海盆尺度环流模式中,讨论了中尺度参数化方案对 CFCs 在北太平洋的分布和储存的影响,模式的南边界取在 20°S ,采用刚壁边界条件^[23];并进一步研究了北太平洋对人为 CO_2 的吸收作用,发现整个北太平洋在 20 世纪 90 年代所吸收的人为 CO_2 占全球吸收量的 20% 左右^[24]。Sabine 等^[25]基于观测发现人为 CO_2 的存储量比 Xu 等^[24]基于模式得到的要小,还指出在 Xu 等^[24]讨论的几个个例中,最小的扩散系数更接近他们的观测结果。但是,最近 Xu 等^[26]再一次证实较大的等密度面扩散系数使模拟结果最符合实际观测结果。同时,赵亮和徐永福^[27]已经注意到这种海盆尺度的模式经常要用到的南边界问题。Xu 等^[23, 24]采用了在南边界速度为 0 和温盐恢复的边界条件,而对于人为示踪物由于没有观测资料,采用了刚壁边界条件,造成了被动

示踪物在边界附近的堆积。赵亮和徐永福^[27]采用 Stevens^[28]的开边界方法,消除了南边界附近假的较强的下沉流,使 CFCs 的模拟结果得到了很大的改进。

为了深入研究太平洋特别是北太平洋对全球变化的响应以及对大气 CO_2 的吸收和贮存,寻求一个更好的海盆尺度的环流模式是十分必要的。本工作试图在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(简称 LASG)发展的 LICOM 基础上构造一个太平洋海盆尺度的环流模式,研究其模拟能力,讨论示踪物参数化方案,为今后进一步选择合理的参数值以及用其研究碳循环和海洋生态奠定较好的基础。

2 模式描述和试验设计

本工作所用的模式是从 LICOM 1.0 的全球海洋模式 ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) 构建的, LICOM 是 LASG 发展的第四代模式。以下只简要地给出本模式的一些最基本的特点,有关模式的物理框架、设计思路、计算方法等可参阅文献^[20, 29]。

本太平洋模式范围包括从 98°E 到 291°E (69°W),从 79°S 到北极点(计算区域从南纬 72°S 到北纬 65°N)的太平洋海区,水平分辨率为 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$,模式垂直共分 26 层,其中前 10 层为 10 m 一层,深水部分格距较大,最深为 5500 m。该垂直分辨率与原来的 LICOM 有较大的差别,因为本模式的一个目的是为未来的碳循环或海洋生态系统的模拟构建的,并且试图考察中层水形成的重要作用。

模式的垂直坐标采用 η 坐标,该坐标的优点在于可以更方便地描述自由海面和处理海底地形,它与 Z 坐标的转化关系如下:

$$\eta = -\frac{z_0 - z}{z_0 + H_b} \times \eta_s,$$

其中, $\eta_s = H_b/H_m$, z_0 为海表起伏, H_b 为准阶梯状的海底地形深度, H_m 为最大地形深度。

太平洋模式继承了全球模式的主要特点,除垂直坐标为 η 坐标以外,还包括海表为自由表面,网格为 B 网格,海表热通量为 Newton 冷却形式,盐度为恢复形式等,太平洋模式中盐度恢复时间仍采用了全球模式的 30 天。由于 LICOM 1.0 为一个准全球模式,模式范围从 75°S 到 65°N ,在没有引入

热力学海冰模式的情况下,高纬度地区温盐采用了恢复,北边界内 20°纬度和南边界 20°纬度在温盐方程除第一层外分别加入了恢复项,恢复系数分别为南半球半年、北半球一年。太平洋模式采用了相同的恢复方法。

模式中对于次网格尺度运动的描述,动量方程包含了粘性系数为 Laplace 形式(水平和垂直)以及依赖于 Richardson 数形式(在 30°S~30°N 海区使用)的湍流粘性项。需要特别指出的是,为了得到较为合理的南极绕流,在考虑到绕极流区物理属性沿纬圈较为一致的情况下,我们将太平洋模式的东西边界处理成类似 LICOM 的循环边界,为保证计算的可行性,最东边两列与最西边两列在运算过程中需要保持重合,因此我们人为地将最西边两列即 98°E 和 99°E 处从北极点到南纬 50°S 的水点处理成陆点,东边的大西洋部分区域填成陆地,南美洲的最南端往北直到 50°S 改成了水点。也就是说在尽量不影响太平洋内部区域的情况下,我们将太平洋模式改造成成了一个可纬向循环的海盆模式。

模式所用资料除地形外均取自全球模式的太平洋区域,温盐的初始值取自 Levitus 资料^[30, 31],强迫场中的风应力、净短波辐射、非短波辐射以及耦合系数(温度)都使用 MPI-OMIP 气候月平均强迫场^[32]。用于恢复的温度和盐度来自 WOA98^[33]。为配合太平洋模式的东西循环边界,模式所用资料均同地形资料一样做了相应处理,即东西两列数据分别对应相等。

模式分别采用传统的水平扩散(HOR)和 GM90 的参数化方案描述中尺度涡旋对示踪物输送的作用。在实验 1(HOR)中,水平扩散系数取为 $2.0 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$,实验 2(GM)中等密度面扩散系数和倾斜扩散系数(常称厚度扩散系数)相等均为 $1.0 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$ 。其他一些重要的参数列在表 1 中。这两个实验都从静止状态开始积分,温盐初值取自 Levitus 资料^[30, 31]的年平均值,在 MPI-OMIP 气候年平均强迫场的驱动下积分 1000 年,在 1000 年结果的基础上再使用 MPI-OMIP 气候月平均强迫场驱动积分 500 年以上,达到稳态。以下讨论的是平衡态的结果。经计算,最后的 100 年,每层的模式海洋平均温度变化量均小于 0.005°C ,盐度变化量最大不超过 0.0015 psu (Practical Salinity Unit,为实用盐度单位)。

表 1 试验所采用的混合参数

Table 1 Some mixing parameters used in the numerical experiments

参数 Parameter	名称 Name	取值 Value
AH	Laplace 水平扩散系数	$2.0 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$
	Horizontal diffusivity of Laplace scheme	
AHv	Laplace 垂直扩散系数	$0.3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
	Vertical diffusivity of Laplace scheme	
AHISOP	等密度面扩散系数	$1.0 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$
ATHKDF	厚度扩散系数	$1.0 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$
	Thickness diffusivity	
AM	水平粘性系数	$2.0 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{s}$
	Horizontal viscosity	
AMV	垂直粘性系数	$1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
	Vertical viscosity	
AMB	背景垂直粘性系数	$1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
	Background vertical viscosity	
AHB	背景垂直扩散系数	$1.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
	Background vertical diffusivity	
Av0	最大扩散(粘性)系数	$5.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
	Maximum vertical diffusivity (viscosity)	

3 结果与讨论

以下讨论一些重要的物理场的模拟结果来评估本太平洋海盆模式的模拟能力,同时讨论本工作采用的两种示踪物的参数化方案的差异。我们主要讨论来自这两个试验的环流特征和水团,并与可用的观测资料进行比较。

3.1 环流特征

大尺度的环流在输送被动示踪物中起了十分重要的作用。本模式较好地模拟出了太平洋存在的一些大的流系和涡旋,比如:黑潮、北赤道流、北赤道逆流、赤道潜流等。由于本模式是自由表面的,因而模式模拟了海表高度的变化。图 1 为模拟的年平均海平面高度。模拟的基本特征与 L30T63^[19]和 LICOM^[29]相近,在南北副热带海区出现高水位,从西到东渐减;在热带海洋沿经圈槽脊分明,它们与热带表层环流相对应。从约 40°S 以南出现低水位并水位渐减,最低到-2 m 左右,这低于 L30T63 模拟的值(-1 m),也低于 LICOM 1.0 的模拟值

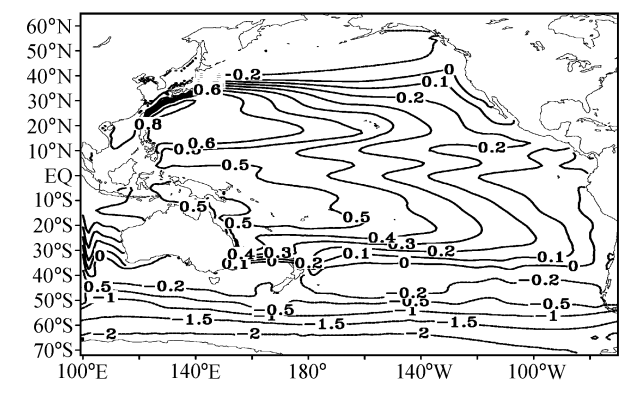


图1 GM试验年平均海表面高度(单位:m)
Fig.1 Annual mean sea surface height (m) from GM

(-1.4 m)。两个试验结果相差不大,因此只给出了GM试验结果。

除风生环流以外,大洋环流还包括热盐环流,即由密度场驱动的环流。该模式模拟的正压流函数(垂直积分体积流函数)和斜压流函数(经向翻转流函数)都反映了北太平洋环流的基本特征,与一些理论估计和其他模式模拟的值相近。正压流函数显示在北太平洋副热带大涡的最大输送为40 Sv(流量单位,1 Sv=10⁶ m³/s),在西部赤道附近气旋性大涡为-40 Sv,在南太平洋副热带大涡的最大输送不到-40 Sv,南极绕流(ACC)输送达到了180 Sv。因GM与HOR所得结果的差异不明显,图2只给出了GM试验的模拟结果。与L30T63全球模式^[19]相比,西部赤道附近气旋性大涡偏大(绝对值),ACC得到了很大的增强,比L30T63所得的结果有了很大的改进,这可能与温盐的模拟结果有较大的关系。因为本模式继续采用了LICOM中所用的高纬度恢复,使得模拟的南大洋温盐结果较好。与LICOM^[34]的比较接近观测结果的130 Sv相比,我们的模拟结果有些过强。这些结果与Hirst等^[35]使用MOM全球模式所得的结果相比,我们模拟的西部赤道附近气旋性大涡稍偏大,南太平洋副热带大涡的最大输送偏小,他们得到的值超过了一50 Sv,而他们的ACC的最大值达到了260 Sv,通过德雷克通道(Drake Passage)的最大值也达到了250 Sv。我们模拟的结果在北太平洋与基于观测的估计相一致,但ACC远远大于基于观测的估计^[36],小于Hirst等^[35]的模拟结果。

图3表示了二个试验模拟的经向翻转流函数。图3a和b准确模拟出赤道两旁的二个经向翻转,

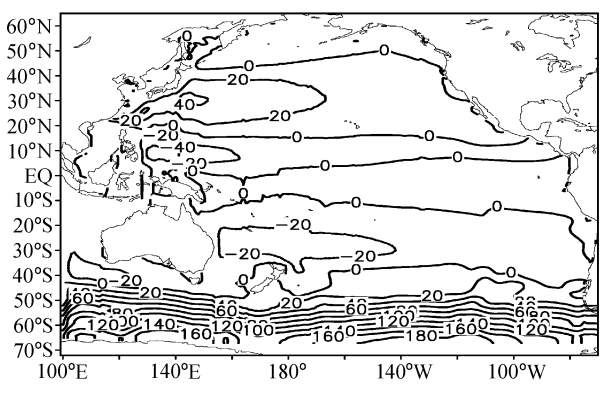


图2 GM年平均正压流函数(单位:Sv)
Fig.2 Annual mean barotropic streamfunction (Sv) from GM

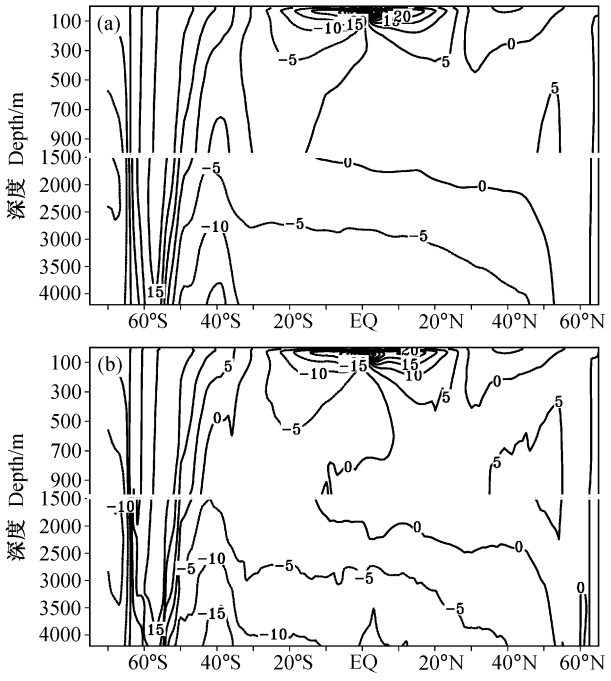


图3 年平均经向流函数(单位:Sv):(a)GM(欧拉流速);(b)HOR
Fig.3 Annual mean meridional streamfunction (Sv) from (a) GM (Eulerian velocity) and (b) HOR

北半球中层水的下沉及南向输送,以及南大洋底层水的下沉和北向输送。南半球50°S~60°S的Deacon cell在两个个例中基本上一直下到了最底层,最大值为15 Sv。模式模拟得到的总体特征与一些来自全球模式所得结果相似^[35, 37, 38]。在50°S以北1000 m以下,较大范围水域有弱的上升流。不过我们的模式产生的从深水到赤道附近的两个翻转区的输送远远弱于上述提到的全球模式结果,亦弱于Xu等^[24]从北太平洋海盆模式所得到的结果,但与Aumont等^[39]的结果相近。Aumont等^[39]认为过强

的底层水上涌到赤道表层是由于模式低分辨率所致, Maier-Reimer 等^[37]的模式约高估了 10 Sv 水的上涌。虽然两个试验反映的整体特征很相近, 但仍然有细微差别, 如赤道到南纬 30°S 附近的上层翻转在 HOR 试验中要略强于 GM 试验, 同时也使得 300 m 到 700 m 的北太平洋水的南向输送变弱。

张学洪等^[18]对 LICOM 的基本评估指出, LICOM 能够合理再现大尺度环流的基本气候特征, 其中, 对于赤道流系的模拟, LICOM 相对于 L30T63 有明显改进。这主要得益于分辨率的提高, 太平洋模式的分辨率介于这两个模式之间, 从图 4 给出的两个试验所模拟的 150°W 垂直断面的年平均纬向流可以看出, 太平洋模式模拟的赤道潜流和北赤道逆流较之 NCEP 资料和 LICOM^[29]略微偏弱, 但比 L30T63^[19]明显加强。另外, 值得注意的是, 与 L30T63 未能模拟出南赤道流“W”形的南北分支结构和 LICOM 模拟的南北分支强度大致相当相比, 太平洋模式模拟的南赤道流“W”形的南北分支结构更接近 NCEP 资料。两个试验的模拟结果比较相似, 存在的主要差异仍是赤道潜流和北赤道逆流强度不同, 在 GM 试验中北赤道逆流的流速可以达到 15 cm/s 以上, 略大于 HOR 试验模拟结果, 且赤道潜流中心最大流速仍是 GM 试验模拟结果较强, 更接近 NCEP 同化资料。

垂直平流是一个将人为示踪物(如 CO₂)从上层水输送到中深层水的重要过程, 也是深水上翻的主要过程。垂直速度是从连续方程计算得到。计算的上层海洋的上升流主要出现在赤道东部, 图 5 表示热带太平洋 35 m 深度上两个试验模拟所得结果。两个试验都模拟出了在赤道区域的较强的上升流特征。在东赤道区域的上升流中心强度略有差异。虽然两个试验在该处的垂直速度最大均可达到 3×10^{-5} m/s, 但 GM 试验得到的上升流区域范围要大于 HOR 试验的模拟结果。以 2×10^{-5} m/s 等值线为例, GM 试验模拟结果在东西方向上所跨过的经度值要比 HOR 试验模拟结果多将近 20°。较强的上升流既使得 GM 试验该处海表温度低温范围大于 HOR 试验, 也会使得温跃层在该处较 HOR 试验模拟结果更加陡峭(见下一节的讨论)。经向热输送是大尺度环流的一个重要特征。有关热输送的大小在众多研究中估计的方法不尽相同, 结果亦有较大的差异, 出现最大热输送量位置也不相同。如在文献[40]中就提到

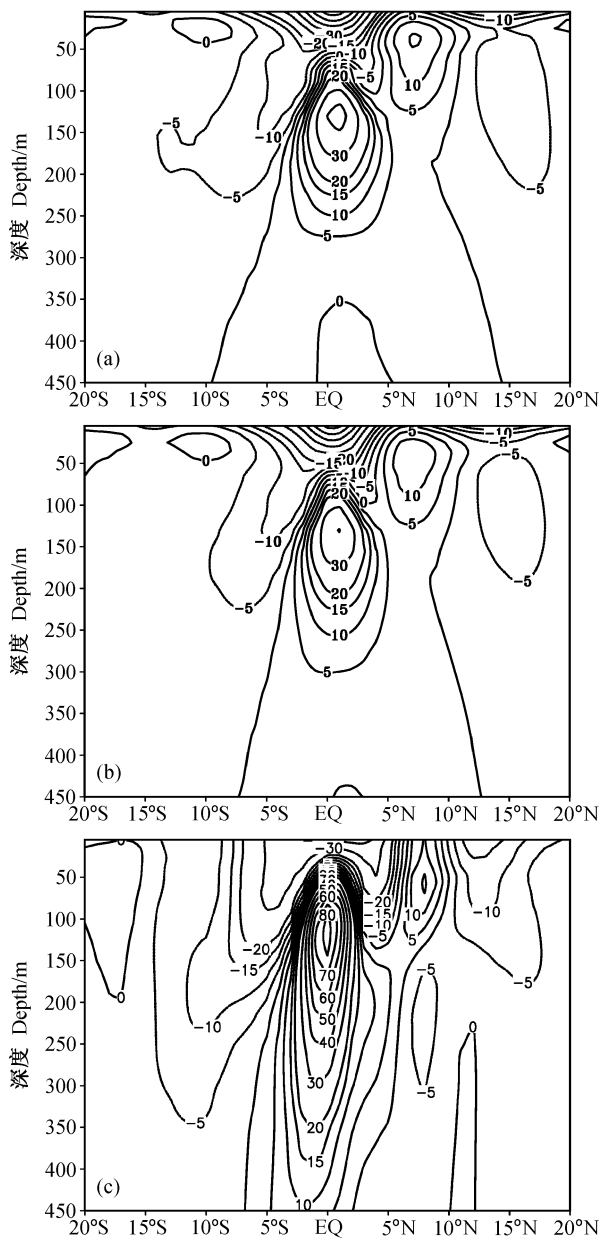


图 4 150°W 450 m 以上年平均纬向流(单位: cm/s, 向东为正): (a) GM; (b) HOR; (c) NCEP 同化资料

Fig. 4 Annual mean zonal velocities (cm/s) above 450 m at 150°W from (a) GM, (b) HOR, and (c) NCEP. Positive values indicate eastward flow

了众多研究者的结果(见文献[40]中的图 1)。在北太平洋最大值落在 0.3~1.2 PW (1 PW=10¹⁵ W) 之间, 最大值的位置出现在 5°N~15°N 之间。Trenberth 和 Caron^[41]根据 NCEP 和 ECMWF 资料, 估计了太平洋的热输送, 从 NCEP 资料, 他们得到最大值为 1.0 PW, 最小值为 -0.95 PW, 分别出现在 12°N 和 12°S 附近。基于 ECMWF 估计的最大值和最小值的位置与

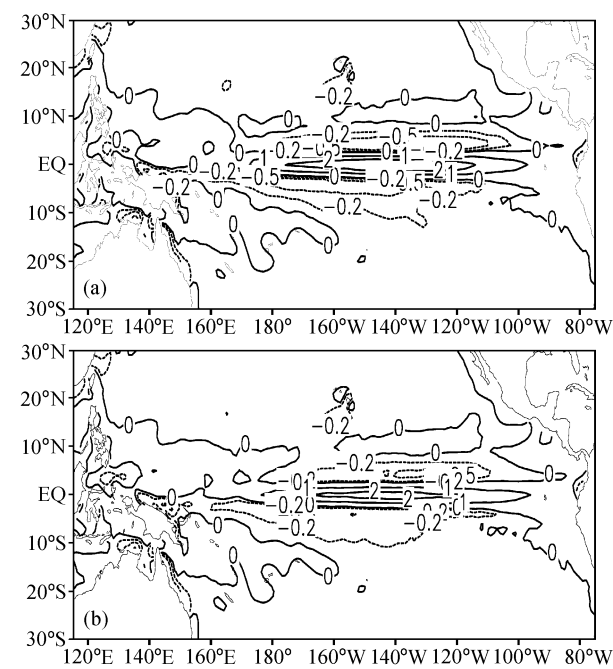


图 5 35 m 年平均垂直速度 (10^{-5} m/s, 向上为正): (a) GM; (b) HOR

Fig. 5 Annual mean vertical velocities (10^{-5} m/s) at 35 m from (a) GM and (b) HOR. Positive values indicate upwelling

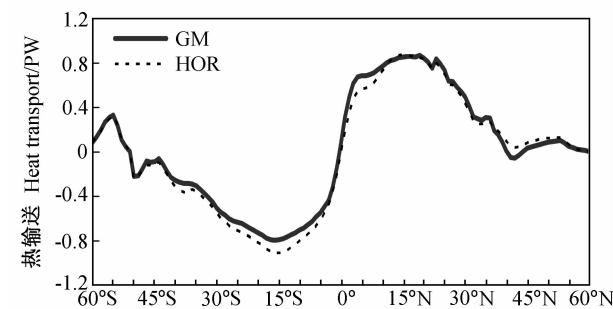


图 6 年平均整层北向热输送

Fig. 6 Annual mean northward heat transport

来自 NCEP 的相差不大,但数值发生了一些变化,分别为 0.7 PW 和 -1.2 PW。图 6 表示了本模式计算的结果,最大值和最小值分别出现在 15°N 和 15°S 附近,其值为 0.8 PW 和 -0.8 PW 左右,GM 和 HOR 所得结果非常相近,说明了经向大尺度的环流特征差异较小。该结果与 Trenberth 和 Caron^[41]的结果比较一致。

3.2 垂直层结和水团

温盐分布结构决定了大洋密度场的分布,从而决定了大洋温盐环流的走向和强度。在十年以上尺度上,温盐环流对水分和热量的输送对气候变化起到重要的调节作用。除此之外,由于主动示踪物(温盐)与被动示踪物(除温盐以外的其他示踪物)

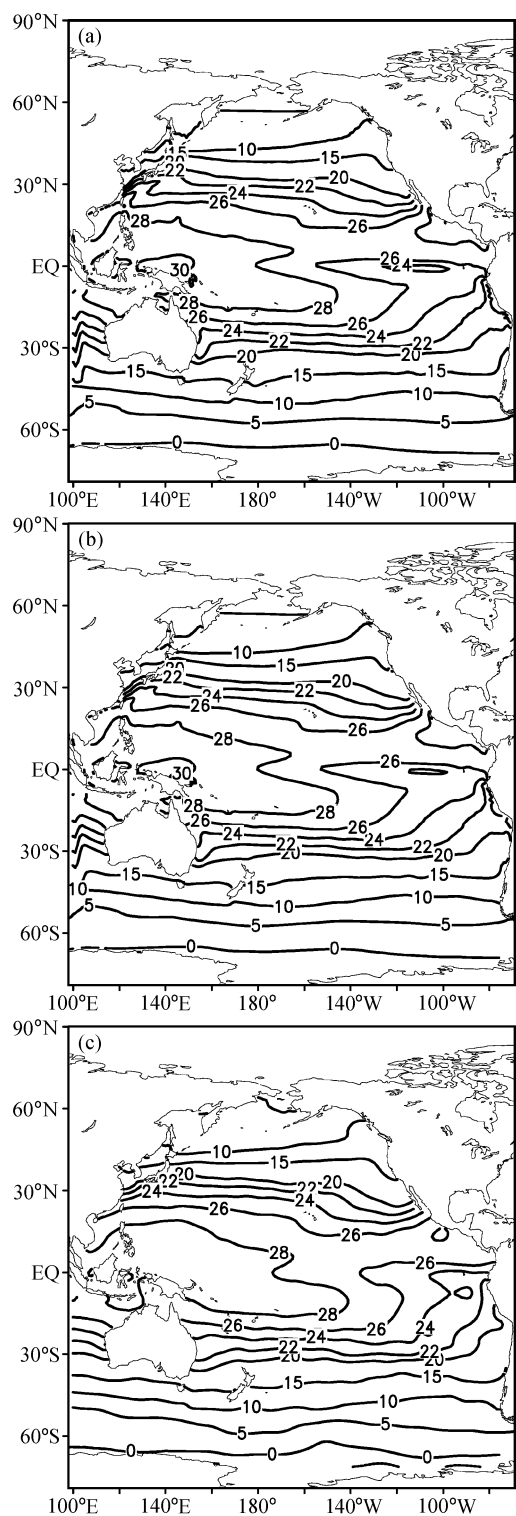


图 7 年平均海表温度 (单位: $^{\circ}\text{C}$): (a) GM; (b) HOR; (c) Levitus98

Fig. 7 Annual mean sea surface temperature ($^{\circ}\text{C}$) from (a) GM, (b) HOR and (c) Levitus98

的扩散主要是沿着等位密度面进行的,因此温盐结构又在很大程度上决定了海洋通风温跃层过程以及对温室气体的吸收。

我们首先讨论海表的分布状况。图 7 给出 GM 与 HOR 两个试验年平均海表温度分布,并与 Levitus 年平均海表温度分布做了对比。从图 7 上看,两个试验与观测资料反映的温度分布特征一致,如赤道地区出现西高东低的梯度分布,且在赤道东太平洋出现低于 24°C 的低温区域;副热带等温线基本呈带状分布,且西边界等值线较东边界密集等。值得注意的是,尽管在南半球 50°S 以南该太平洋模式采用了人为假设的循环边界,但该区域温度分布仍与观测资料基本一致。两个试验与观测资料存在的差异主要体现在模式结果中新几内亚以北出现了小范围的高于 30°C 的高温,但 28°C 等温线形态及其所包围的区域与观测结果非常接近。Jin 等^[19]曾对 LICOM 的上一代全球海洋模式 L30T63 进行分析,指出在赤道西太平洋出现高温是网格分辨率在不能满足完整分辨赤道流系的情况下海洋模式的通病。与 L30T63 模拟结果^[19]对比可知,在网格分辨率从 $1.875^{\circ}\times 1.875^{\circ}$ 提高到 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的情况下,赤道西太平洋海温高于 30°C 的区域明显缩小了,暖池偏暖的现象因分辨率的提高得到了改善。两个试验的差异体现在赤道东太平洋低温范围不同,GM 试验得到的低温范围略大于 HOR 试验的结果,这反映了两个试验所模拟的该处上升流强度有所差异(见图 5)。

为了大概评估模式海洋水团的模拟情况,图 8 给出了模式海洋平均的年平均温度、盐度和密度的垂直廓线。从图 8a 知,模拟的温度垂直廓线与观

测资料非常吻合,这一方面可能与我们高纬度采用了恢复有关,另一方面根据 GM 试验与 HOR 试验的对比可以看出,从 110 m 到 450 m HOR 模拟的温度平均值比 Levitus 1994 年观测资料均高 0.5°C 以上,而 GM 试验仅在 450 m 处比观测资料低 0.4°C ,其他深度上均小于 0.3°C ,因此,使用 GM90 方案能提高对温度的模拟是显而易见的,可以显著改善对海洋永久温跃层的模拟。另外,从图 8b 发现模拟的盐度特征与观测资料相似,无论是高盐值还是低盐值出现的深度均与观测资料一致。主要的问题在于在 225 m 模拟的盐度值低观测资料近 0.1 psu,次表层海水盐度偏低主要是与模式所采用的海表恢复条件有关^[42],这种恢复方法使得副热带海区的盐度高值区略低于观测资料。另外,700 m 处的低盐值比观测资料还低,这是由于副热带海区的高盐水舌下伸强度不够所致。

温度和盐度作为主动示踪物对于海洋洋流以及被动示踪物的影响最终体现在由这二者决定的密度分布上,图 8c 是两个试验与观测资料位密度垂直廓线,从图上可以看出两个试验结果均与观测资料反映的特征一致,整个太平洋位密度随着海洋深度的加深从 24.17 kg/m^3 逐渐加大到 27.85 kg/m^3 ,且 500 m 以上垂直梯度远远大于 500 m 以下,这与温盐的垂直分布特征相符。两个试验模拟的太平洋密度垂直分布在 300 m 到 600 m (略有差异),GM 试验结果与观测资料非常吻合,而 HOR 试验在该处密度略小于观测资料和 GM 试验,这与 HOR 试

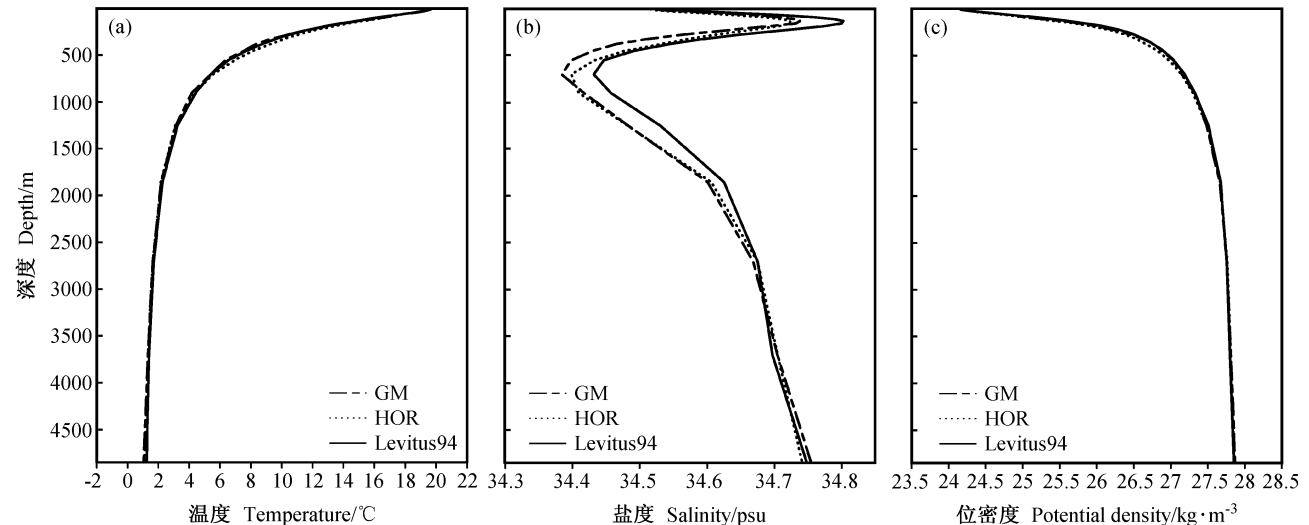


图 8 整个区域平均的温度 (a)、盐度 (b) 和位密度 (c) 垂直廓线

Fig. 8 Vertical profiles of (a) temperature, (b) salinity, and (c) potential density

验模拟得到的温度分布在该深度范围偏高 GM 试验及观测资料有关 (见图 8a)。由于密度分布是否合理直接影响到被动示踪物的输送与存贮, 因此 GM90 方案更适合用于研究海洋对温室气体的吸收。

为了更为详细地比较分析模拟的水团分布, 特别是一些重要的水团特征, 如北太平洋中层水、南大洋深水以及南大洋中层水等, 图 9、10 分别给出了纬向平均的年平均的温度和盐度分布的观测和模拟结果。从图 9 看, 两个试验所反映出来的温度垂直结构与观测资料基本吻合, 包括温跃层结构大致

呈“W”形状, 两个试验均反映出北纬 10°N 为等值线向上弯曲。除此以外, 在整个大洋, 两个试验所得的温度等值线的分布与观测资料基本吻合, 如 8°C 等值线南半球最大深度均在 560 m 左右, 且两个试验与观测资料均体现了 8°C 等值线以上北半球副热带温度略高于南半球副热带温度的现象, 这符合人们对表层流系影响上层水温分布的认识。模拟结果显示, 在深层 2500 m 以下太平洋纬向平均温度在 2°C 以下, 南太平洋 40°S 以南的底层海水温度低于 1°C, 这些均与观测结果吻合, 反映了南极底层水得到了较好的模拟。以上说明该太平洋模式对

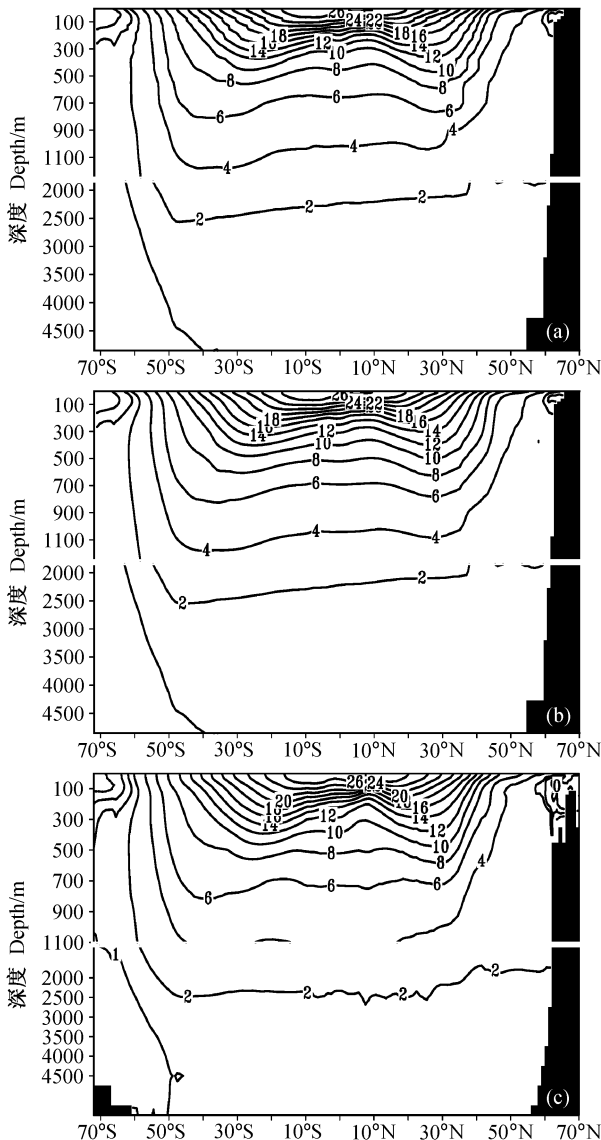


图 9 纬向平均的年平均温度 (单位: °C): (a) GM; (b) HOR; (c) Levitus94

Fig. 9 Zonally averaged annual mean temperature (°C) from (a) GM, (b) HOR, and (c) Levitus94

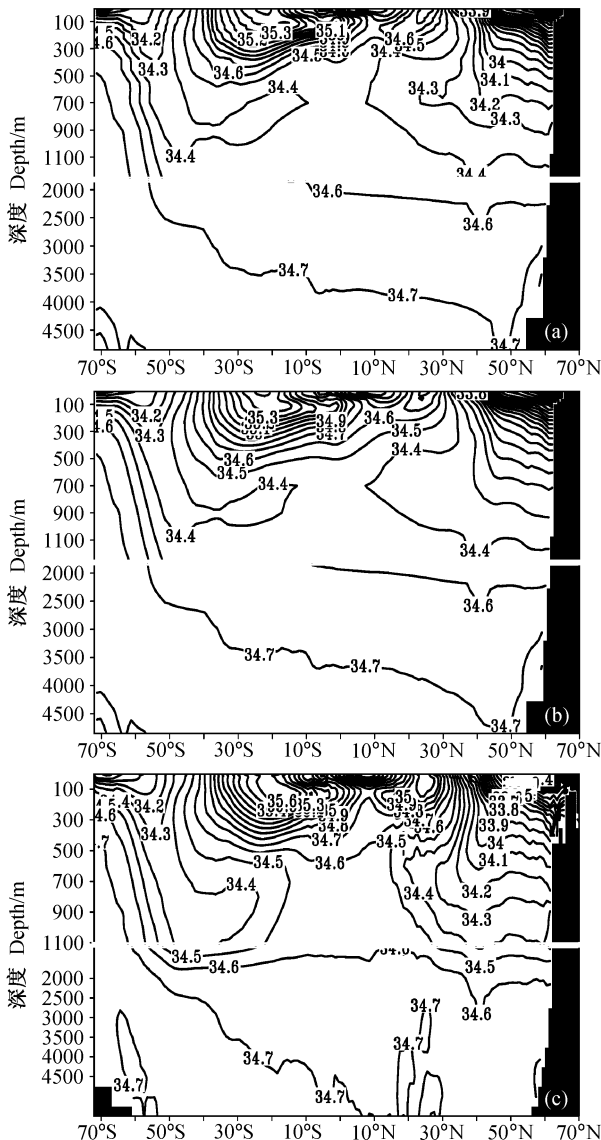


图 10 纬向平均的年平均盐度 (单位: psu): (a) GM; (b) HOR; (c) Levitus94

Fig. 10 Zonally averaged annual mean salinity (psu) from (a) GM, (b) HOR, and (c) Levitus94

温度的模拟是比较理想的。除以上共同点,两个试验之间还存在一些差异,主要体现在对温跃层的模拟。从图 9 上可以看出,使用了 GM90 方案的 GM 试验在温跃层得到的温度等值线与使用 Laplace 方案的 HOR 所得结果相比更加陡峭,更接近观测资料,这与 Danabasoglu 等^[5]的研究结果一致。结合图 4 的分析可知,使用 GM90 方案不仅有利于对风生流的模拟,同样有利于温盐的模拟。

作为反映水团形成和输送特征的盐度垂直结构,模拟结果与观测资料所体现的特征基本一致(图 10)。从象征中层水形成的低盐水舌(如 34.3 psu)的下伸与象征南极底层水的高盐等值线(34.7 psu)的北扩看,无论是南北太平洋中层水的形成抑或是南极底层水的北向输送,在该模式结果中都得到了很好的反映。从图 10 a、b、c 的对比可以看出, HOR 试验模拟的北太平洋 34.3 psu 等值线往南输送不足,未达到观测资料和 GM 试验所到达的 30°N,说明北太平洋中层水在 HOR 试验模拟的强度不够。这符合前人得到的 GM90 湍流扩散方案在描述示踪物输送方面优于 Laplace 方案的结论^[21, 23]。

4 结论和展望

在中国科学院大气物理研究所 LASG 发展的全球海洋环流模式 LICOM 的基础上,构建了一个 1°×1° 水平分辨率,垂直 26 层太平洋环流模式,并对其模拟能力进行了分析讨论。模式采用两种示踪物参数化方案描述中尺度示踪物输送,即传统的水平扩散方案(HOR)和 GM90 (GM) 方案,主要结论如下:

(1) 环流模式能较好地模拟出海面高度的变化和大尺度环流的分布特征。模拟的海面高度在热带海区沿经圈槽脊分明,并与热带表层环流相对应。模式较好地模拟出了北太平洋副热带大涡,南极绕流 ACC 等结构。发现在给定的参数条件下 HOR 和 GM 对大尺度环流特征并没有实质性的影响。ACC 的最大值大于基于观测的估计值和使用 LICOM 模拟的值,小于 Hirst 等^[35]使用 MOM 全球海洋模式所得的结果。模拟的向北经向热输送的最大值和最小值分别出现在 15°N 和 15°S 附近,其值为 0.8 PW 和 -0.8 PW 左右, GM 和 HOR 的结果比较接近。

(2) 赤道附近的各种流系得到了较好的模拟,模拟的 150°W 赤道潜流的最大流速为 40 cm/s,出现在 130 m 左右,该值出现的位置与 NCEP 资料所得的位置很相近,但小于 NCEP 估计的 80 cm/s,明显大于 2°水平分辨率模式的结果。HOR 和 GM 模拟的特征十分相近,但总的来说 GM 模拟的流速大于 HOR 的模拟值。模式较好地模拟出赤道东太平洋的较强上升流特征,35 m 深度上最大速度均大于 3×10^{-5} m/s。GM 模拟所得的上升流范围大于 HOR 的结果。

(3) 两个试验都较好地模拟出温盐的水平和垂直分布结构,如赤道西太平洋暖池和赤道东太平洋的冷舌。模式海洋平均廓线与观测资料非常吻合,在温跃层最大温差都不超过 (0.5°C),盐度廓线较好地反映出次表层的高盐水和低盐水的中层水。模拟的密度廓线与观测资料非常相近,两个试验均模拟出了观测资料所反映的 8°C 等值以上北半球副热带温度略高于南半球副热带温度的现象。北太平洋中层水的向下向南输送、南太平洋中层水的形成以及南极底层水的输送等均得到了较好的模拟。

(4) 纵观环流特征和水团分布等的模拟结果,在目前所做两个试验的参数条件下, GM 比 HOR 的结果稍好一些,二者在模拟海表面高度、正压流函数和经向流函数等大尺度的环流特征方面没有明显的差异。需指出的是由于本模式没有考虑海冰,南北高纬度均使用恢复条件,虽然恢复系数较小,但对温盐的分布会有一定的影响。在未来,要进一步探讨该恢复条件的可能影响,同时使用一些被动示踪物来进一步检验本模式,同时考虑做一些敏感性试验。目前的研究结果已为进一步研究太平洋碳循环及其对全球变化的响应等科学问题打下较好的物理基础。

致谢 曾与刘海龙博士以及游小宝同志进行有益的讨论。本文的数值计算主要是在中国科学院大气物理研究所科学计算和信息中心的高性能计算机 IBM SP690 上完成的。在此一并表示衷心感谢!

参考文献 (References)

- [1] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001
- [2] Orr J, Maier-Reimer E, Mikolajewicz U, et al. Estimates of anthropogenic carbon uptake from four 3-D global ocean models. *Global Biogeochem. Cycles*, 2001, **15**: 43~60

- [3] Gent P R, McWilliams J C. Isopycnal mixing in ocean circulation models. *J. Phys. Oceanogr.*, 1990, **25**: 463~474
- [4] Gent P R, Willebrand J, McDougall T J, et al. Parameterizing eddy-induced tracer transports in ocean circulation models. *J. Phys. Oceanogr.*, 1995, **25**: 463~474
- [5] Danabasoglu G, McWilliam J C, Gent P R. The role of mesoscale tracer transport in the global ocean circulation. *Science*, 1994, **264**: 1123~1126
- [6] England M H, Rahmstorf S. Sensitivity of ventilation rates and radiocarbon uptake to subgrid-scale mixing in ocean models. *J. Phys. Oceanogr.*, 1999, **29**: 2802~827
- [7] The FRAM Group (Webb D J, et al.). An eddy-resolving model of the Southern Ocean. *EOS, Transactions of the American Geophysical Union*, 1991, **72** (15): 169~174
- [8] Böning C W, Holland W R, Bryan F O, et al. An overlooked problem in model simulations of the thermohaline circulation and heat transport in the Atlantic Ocean. *J. Climate*, 1995, **8**: 515~523
- [9] Böning C W, Bryan F O, Holland W R, et al. Deep-water formation and meridional overturning in a high-resolution model of the North Atlantic. *J. Phys. Oceanogr.*, 1996, **26**: 1142~1164
- [10] Wang Fan, Chang Ping, Hu Dunxin, et al. Circulation in the western tropical Pacific Ocean and its seasonal variation. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47** (7): 591~595
- [11] 许东峰, 袁耀初. 1997 年夏季西北太平洋环流模拟. 海洋学报, 2001, **23**(3): 18~25.
Xu Dongfeng, Yuan Yaochu. The simulation of Northwest Pacific circulation in summer of 1997. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 2001, **23** (3): 18~25
- [12] 钱永甫, 王谦谦, 朱伯承. POM 对南海海温年变化的模拟. 大气科学, 2000, **24** (3): 373~380
Qian Yongfu, Wang Qianqian, Zhu Bocheng. Simulations of the annual cycle of the South China Sea temperature by POM. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2000, **24** (3): 373~380
- [13] 张荣华, 曾庆存, 张学洪. 太平洋大尺度环流数值模拟 I. 数学模式及其性能. 大气科学, 1991, **15**: 1~16
Zhang Ronghua, Zeng Qingcun, Zhang Xuehong. Numerical simulations of oceanic circulation in the Pacific Ocean, Part 1: Mathematical model and its performance. *Chinese J. Atmos. Sci.* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1991, **15**: 1~16
- [14] Zeng Qingcun. Some numerical ocean-atmosphere coupling models. in: Proceedings of the First International Symposium on Integrated Global Ocean Modelling, Tullin, USSR, 1983
- [15] 李荣凤, 游小宝. 海洋环流模式的发展和应用 II. 近海和区域环流模式. 大气科学, 2003, **27** (4): 729~739
Li Rongfeng, You Xiaobao. The development and application of the oceanic general circulation models, Part II. The regional oceanic general circulation models. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2003, **27** (4): 729~739
- [16] 李荣凤, 黄企洲, 王文质. 南海上层海流的数值模拟. 海洋学报. 1994, **16** (4): 13~22
Li Rongfeng, Huang Qizhou, Wang Wenzhi. Numerical simulations of currents in the upper layers of the South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 1994, **16** (4): 13~22
- [17] 游小宝, 李荣凤, 张铭, 等. 三维斜压模式对冬季南海环流的数值计算. 海洋学报, 2001, **23** (6): 1~10
You Xiaobao, Li Rongfeng, Zhang Ming, et al. Numerical calculation of the wintertime circulation in the South China Sea by using a baroclinic model. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 2001, **23** (6): 1~10
- [18] 张学洪, 俞永强, 刘海龙. 海洋环流模式的发展和应用 I. 全球海洋环流模式. 大气科学, 2003, **27**: 607~617
Zhang Xuehong, Yu Yongqiang, Liu Hailong. The development and application of the oceanic general circulation models, Part I. The global oceanic general circulation models. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2003, **27**: 607~617
- [19] Jin Xiangze, Zhang Xuehong, Zhou Tianjun. Fundamental framework and experiments of the third generation of IAP/LASG world ocean general circulation model. *Adv. Atmos. Sci.* 1999, **16**: 197~215
- [20] 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. 178 pp
Liu Hailong. High resolution oceanic general circulation model and the simulation of the upper ocean circulation in the tropical Pacific. Ph.D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002, 178pp
- [21] Yamanaka G, Kitamura Y, Endoh M. Formation of North Pacific intermediate water in Meteorological Research Institute ocean general circulation model, 1. Subgrid-scale mixing and marginal sea fresh water. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**: 30885~30903
- [22] Bryan K. A numerical method for the study of the circulation of the world ocean. *J. Comput. Phys.*, 1969, **4**: 347~376
- [23] Xu Yongfu, Nakata K, Ishida A, et al. Simulations of chlorofluorocarbon uptake in a model of the North Pacific. *J. Adv. Mar. Sci. Tech. Soci.*, 1999, **5**: 1~18
- [24] Xu Yongfu, Watanabe Y W, Aoki S, et al. Simulations of storage of anthropogenic carbon dioxide in the North Pacific using an ocean general circulation model. *Marine Chemistry*, 2000, **72**: 221~238
- [25] Sabine C L, Feely R A, Key R M, et al. Distribution of anthropogenic CO₂ in the Pacific Ocean. *Global Biogeochem. Cycles*, 2002, **16** (4): doi:10.1029/2001GB011639

- [26] Xu Yongfu, Aoki S, Harada K. Sensitivity of the simulated distributions of water masses, CFCs, and bomb ^{14}C to parameterizations of mesoscale tracer transports in a model of the North Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, 2006, **36**: 273~285
- [27] 赵亮, 徐永福. 开边界海盆尺度环流模式模拟北太平洋 CFCs 分布. 地球物理学报, 2005, **48**: 798~806
Zhao Liang, Xu Yongfu. Simulation of CFCs distribution in the North Pacific using a basin-wide ocean general circulation model with an open boundary. *Chinese J. Geophys.*, 2005, **48**: 870~879
- [28] Stevens D P. The open boundary condition in the United Kingdom fine-resolution Antarctic model. *J. Phys. Oceanogr.*, 1991, **21**: 1494~1499
- [29] 刘海龙, 俞永强, 李薇, 等. LASG/IAP 气候系统海洋模式 (LICOM1.0) 参考手册. 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技术报告. 北京: 科学出版社, 2004. 107pp
Liu Hailong, Yu Yongqiang, Li Wei, et al. *Reference Manual of LASG/IAP Climate System Ocean Model (LICOM)* (in Chinese). Technical Report of the State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. Beijing: Science Press, 2004. 107pp
- [30] Levitus S, Burgett R, Boyer T P. World Ocean Atlas 1994 Volume 3: Salinity, NOAA Atlas NESDIS 3, NODC, Washington, DC, 1994. 99pp
- [31] Levitus S, Boyer T P. World Ocean Atlas 1994 Volume 4: Temperature, NOAA Atlas NESDIS 4, NODC, Washington, DC, 1994. 117pp
- [32] Frank R. An atlas of surface fluxes based on the ECMWF reanalysis-a climatological dataset to force global ocean general circulation models. Report NO. 323, Max Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, 2001. 1~31
<http://www.nodc.gov/>
- [33] Liu Hailong, Zhang Xuehong, Li Wei, et al. An eddy-permitting oceanic general circulation model and its preliminary evaluation. *Adv. Atmos. Sci.*, 2004, **21**: 675~690
- [34] Hirst A C, Godfrey J S. The role of Indonesian throughflow in a global ocean GCM. *J. Phys. Oceanogr.*, 1993, **23**: 1057~1086
- [35] Godfrey J S. A Sverdrup model of the depth-integrated flow for the world ocean allowing for island circulation. *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, 1989, **45**: 89~112
- [36] Maier-Reimer E, Mikolajewicz U, Hasselmann K. Mean circulation of the Hamburg LSG OGCM and its sensitivity to the thermohaline surface forcing. *J. Phys. Oceanogr.*, 1993, **23**: 731~757
- [37] England M H. The age of water and ventilation time-scales in a global ocean model. *J. Phys. Oceanogr.*, 1995, **25**: 2756~2777
- [38] Amount O, Orr J C, Monfray P, et al. Nutrient trapping in the equatorial Pacific: the ocean circulation solution. *Global Biogeochem. Cycles*, 1999, **13**: 351~369
- [39] Wang J, Carton J A. Seasonal heat budgets of the North Pacific and North Atlantic Oceans. *J. Phys. Oceanogr.*, 2002, **32**: 3474~3489
- [40] Trenberth K E, Caron J M. Estimates of meridional atmosphere and ocean heat transports. *J. Climate*, 2001, **14**: 3433~3443
- [41] 周天军, 张学洪, 王绍武. 全球水循环的海洋分量研究. 气象学报, 1999, **57**: 264~282
Zhou Tianjun, Zhang Xuehong, Wang Shaowu. The air-sea fresh water exchange derived from NCEP/NCAR reanalysis data. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1999, **57**: 264~282