

保形平流方案在海洋环流模式中的应用*

肖 潺^{1,2} 俞永强¹

1. 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), 北京 100029;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 通过将两步保形平流方案与二阶中央差物质输运平流方案进行对比, 发现对于理想的一维平流方程, 两步保形平流方案可以给出更准确的模拟. 进而将此方案引入到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)发展的海洋环流模式(LICOM)中替代温度和盐度方程中的二阶中央差平流方案, 发现在热带中、东太平洋区域, 相对于原模式, 模拟结果在温度场上有较大的改进, 较好地克服了以往存在的赤道太平洋冷舌过强的问题. 对比海表平流项变化和温度变化, 运用线性回归分析, 证明平流项的变化是改进中、东太平洋的重要原因, 也由此表明两步保形平流方案的优点.

关键词 保形平流方案 海洋环流模式 赤道太平洋冷舌

对现有气候模式的评估表明, 无论是对于单独的海洋模式还是耦合气候模式, 比较普遍的存在赤道太平洋模拟的 SST 误差, 主要体现在赤道冷舌偏强并过分西伸. LASG 最新版本的耦合模式也存在类似的问题^[1], 赤道冷舌一直向西伸到西太平洋暖池区域, 而原先位于西太平洋的暖池被冷舌分割为关于赤道对称的两部分, 这就是通常所说的“双赤道辐合带现象(Double ITCZ)”. 这种现象应该与大气和海洋模式本身的系统误差有关, 也许这些误差在单独的模式中并不大, 但是一旦两个模式耦合起来, 单独模式的误差就会通过海气相互作用而放大. 实际上, 单独的海洋模式即使在观测的强迫下在赤道中、东太平洋模拟的海温也偏低, 这肯定会对耦合模式模拟误差有所贡献.

对于一个海洋环流模式的改进, 目前做得比较多的工作是如何改进其中的物理过程参数化过程, 例如混合过程、太阳短波辐射穿透过程等. 而其动力框架部分一般较少变化, 例如 LASG 最新版本的

海洋模式 LICOM 的动力框架就与最初的 4 层大洋环流模式相比没有本质的区别. LICOM 及其前身的平流过程的处理都是采用 Asselin 滤波^[2]的时间中央差空间中央差方案, 这种差分格式简洁明了, 便于使用^[3]. 这并不是说明模式中已有的动力框架十分完美. 事实上, 最近利用 LICOM 进行的一些关于碳循环的研究工作指出, 目前海洋模式的动力框架, 尤其是物质平流输送过程急需改进^[1]. 同时, 海洋平流过程的描述, 对海洋生态系统动力学数值模拟而言, 也十分重要.

考虑到在赤道中、东太平洋区域的热力学方程主要是短波辐射、潜热通量和平流项 3 项互相平衡, 而前两项对于单独的海洋模式来说是外强迫; 另一方面赤道东太平洋温度的水平和垂直梯度比较大, 而梯度比较大的地区, 往往对平流的计算格式比较敏感, 所以本文的工作试图从改进物质平流输送的角度来考察平流方案的改进是否会对这一地区模拟结果产生影响.

2005-12-13 收稿, 2006-04-10 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 40231004, 40221503)和中国科学院创新团队国际合作伙伴计划“气候系统模式研发及应用研究”的共同资助

E-mail: cxiao@mail.iap.ac.cn

1) 李阳春, 2005, 个人通讯

要更加正确地描述平流过程的话,就得在众多的平流方案中选用比较合适的平流方案或者发展更合理的平流方案,目前,已有许多工作致力于设计新的平流算法,第一类主要是通过利用高阶格式,来减小耗散.另一类是依赖于局地判据,来校正或者抑制耗散的产生^[4].当在一个数值模式中考考虑具体选用何种平流格式时,一方面要看平流格式能否较好地描述流体的平流特征,比如质量守恒等物理属性;另一方面又要求模式在采用该平流方案的时候,计算时间不能太长,这样才能保证整个模式的运行效率,即所谓的经济格式.所以,一个好的方案,能够在这两个方面找到一个很好的平衡,宇如聪提出的两步保形平流方案^[5]比较好地满足了这两方面的要求,特别是该方案的可靠性已经在区域和全球大气模式中得到了验证.因此,本文将该平流方案引进到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)发展的气候系统海洋模式(LICOM)的温度方程和盐度方程,并对改进前后的模式模拟结果做了详细的对比和分析.

1 平流方案与模式介绍

1.1 两步保形平流方案

宇如聪在 Lax-Wendroff 格式、迎风差格式等一些格式基础上,提出两步保形平流方案,该方案综合了迎风差格式的低频散和 Lax-Wendroff 格式的低耗散的特点,对频散和耗散能够有较好的控制,特别是在物质输送(比如水汽)过程中,能够克服了物质为负值的非物理现象^[5].该方案最先在 LASG 发展的区域 Eta 坐标模式(REM)中得到应用^[6],并且利用该模式在 1993 和 1994 年对我国的汛期降水进行了预报试验,取得了比较好的效果^[7,8].后来又将该方案应用到一个 LASG 发展的北冰洋海冰模式中^[9]和 LASG 发展的格点大气环流模式(GAMIL)中^[10].

1.2 LASG/IAP 气候系统海洋模式(LICOM)

LICOM1.0^[11-13]是 LASG 在其第三代海洋环流模式 L30T63^[14]的基础上新发展的高分辨率准全

球海洋环流模式. LICOM1.0 继承了 L30T63 中的良好的动力框架和一些成熟的物理过程参数化方案,例如,沿等密度面的混合^[15]、热带海洋依赖于 Richardson 数的垂直混合等^[16]. LICOM1.0 的水平分辨率由 L30T63 的 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$ 提高到 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,垂直方向总共 30 层,其中最上面 12 层均匀分布在上层 300 m. LICOM1.0 是一个覆盖范围从 75°S — 65°N 的准全球模式.此外,模式同时采用了 MPI 和 OpenMP 并行计算方式使得模式能够满足长期积分的需要.模式地形来自美国海军海洋部(Naval Oceanographic Office)的 DBDB5(Digital Bathymetric Data Base 5 minute)海洋深度资料^[17].

目前本文中使用的模式版本与 LASG 最新发展的耦合气候系统模式 FGOALS 中海洋分量模式完全一致,该模式是在 LICOM1.0 的基础上,将水平分辨率从 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 降低为 $1^\circ \times 1^\circ$,并将模式的北边界从 65°N 扩展到 88°N ,同时对高纬度的滤波也进行了改进.

1.3 LICOM 原平流方案的介绍及其与保形平流方案的比较

LICOM 原模式中温度方程和盐度方程的平流方案是采用的 Asselin 滤波时间中央差分,空间中央差分(CTCS 方案)的形式.而两步保形平流方案(TSPAS 方案),不需要采用任何滤波,即可对频散和耗散进行有效的控制.为了证明两步保形平流方案相对原方案而言有更好的反映物质平流运输的特征,我们在一维周期边界条件下考虑了如下理想的一维平流方程,其中 F 是物质质量, u 为平流速度, t 为时间,

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} = 0. \quad (1)$$

将两种方案的结果进行了比较.(图 1)

如图 1 所示,时间步长和空间步长均为 1,平流速度取常数 0.2.图 1(a), (b) 两幅图从左至右,分别为初始场、100 步积分结果、800 步积分结果.图 1(a)是采用的加入了 Asselin 滤波的时间中央差、空间中央差方案,这也就是 LICOM 原来所采用的

1) 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. 中国科学院研究生院博士学位论文, 北京, 2002

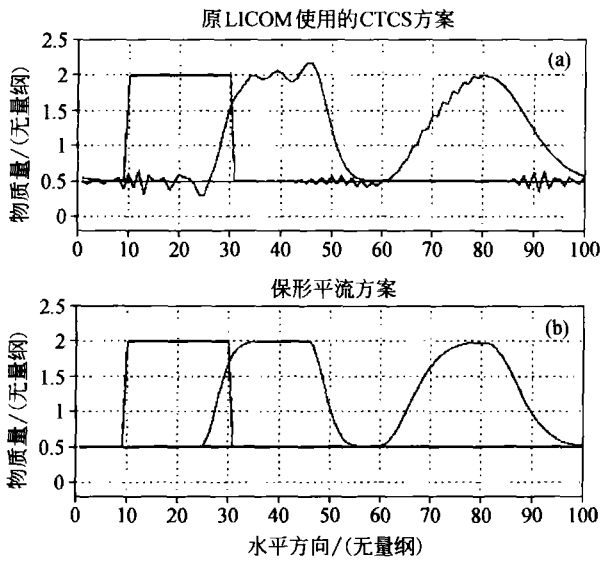


图1 在周期边界条件下,两种格式的平流特性
 (a) 采用 Asselin 滤波的时间中央差、空间中央差;
 (b) 两步保形平流方案

平流方案,这种平流方案简洁易用,事实上,很多的海洋模式都是采用这样的方案,但是在图1(a)中还是可以看到许多小的波动.图1(b)就是采用的本文介绍引进的两步保形平流方案,和图1(a)相比,在控制频散和保持属性初始状态等方面,有了更大的进步.因此,可以说,与LICOM原方案相比,两步保形平流方案具有优越性,这样引入该方案到模式中才具有意义.

2 数值试验设计及其结果

本文将 LICOM 从无运动状态开始,利用1月份的海温和盐度的 Levitus 资料作为初始场^[18,19],采用 MPI-OMIP 数据集的风应力、热通量和耦合系数强迫海洋模式进行了500年 spinup 积分^[20],计算海表强迫场时需要用到的观测海表盐度 SSS 和海表温度 SST 来自 WOV98 资料^[21].对于海洋模式全球平均的动能、表面位能以及海温的变化趋势等方面分析表明,模式基本达到平衡.然后,将两步保形平流方案应用到 LICOM 模式的温盐方程中,在原来模式500a spinup 积分结果的基础上,进行继续积分,完成了100a 稳定积分(称为试验一),各个物理量基本达到了平衡.图2给出了试验一这100a 积分过程中,最后30a 逐月平均全球海洋总动

能曲线,表明模式在加入新的平流方案之后,经过继续积分100a,已经基本达到平衡.同时,原模式也在500a spinup 积分结果的基础上,进行继续积分100a(称为控制试验).在本文以下的资料分析就是试验一得到的气候平均场、控制试验输出的气候平均场、Levitus 资料.

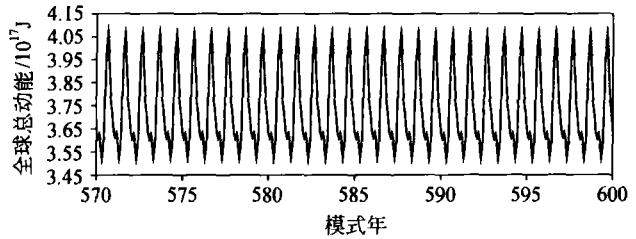


图2 TSPAS 方案(实验一)积分最后30a 逐月平均海洋总动能曲线

2.1 温度场

采用两步保形平流方案(试验一)模拟的平均海表温度与原方案(控制试验)模拟的平均海表温度之差,主要差别在以下几个区域:赤道中、东太平洋区域、西北大西洋湾流区域,这两个区域两个模式模拟的温度偏差中心区域超过了1°C;赤道大西洋中部区域、西北太平洋湾流区域、非洲大陆南端西南端阿古拉斯流区域、南美大陆西端秘鲁流区域,这些区域两个模式模拟的温度偏差中心区域达到了0.5°C.这些除了赤道中、东太平洋区域和赤道大西洋中部区域外,其他的地方主要出现在边界流区域,比如西北太平洋和西北大西洋区域,这正是两支强的西边界流所在位置.

以赤道中、东太平洋为例,图3为赤道中、东太平洋区域原模式(控制试验)结果与 Levitus 资料的之差(图3(a))和两步保形平流方案(试验一)与 Levitus 资料的之差(图3(b)),从(a),(b)两图的对比来看,在原模式中模拟的海表温度在赤道中东太平洋处有一个模拟偏低的区域(即图3(a)),这就造成了原模式模拟出现了冷舌过强,冷舌西伸加剧.而在两步保形平流方案的模式中,就比较好地克服了这一点.在对于冷舌的模拟比较接近实际(即图3(b)),模拟误差减小.

2.2 盐度场

图4是采用两步保形平流方案(试验一)模拟的

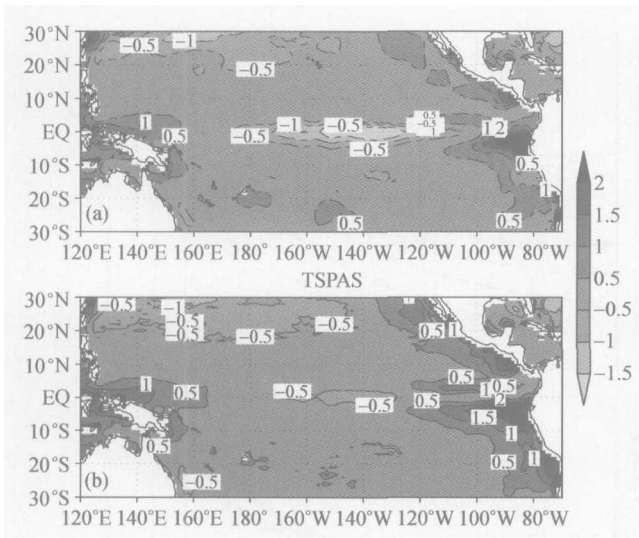


图3 LICOM采用不同的平流方案模拟的热带太平洋区域的海表温度与Levitus资料之差
(a) CTCS方案模拟结果与Levitus资料之差;
(b) TSPAS方案模拟结果与Levitus资料之差

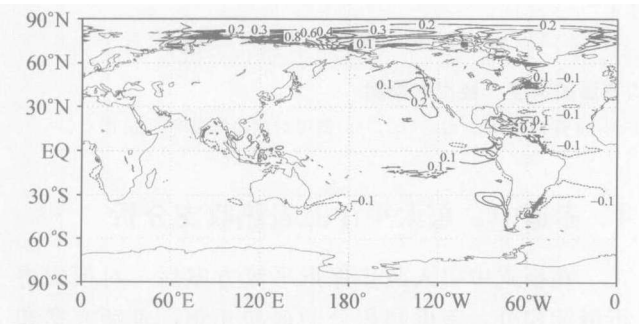


图4 采用两步保形平流方案(实验一)模拟的海表平均盐度与原方案(控制实验)模拟的海表平均盐度之差

海表平均盐度与原方案(控制实验)模拟的海表平均盐度之差,在这幅图上,可以看出,盐度模拟除了在北极区附近有稍微明显差别(最大的达到0.8 psu),其他的地区差异并不是明显,在0.1 psu左右,可以说,两种方法模拟的盐度差异很小.为什么同样作为示踪物,两种方法模拟的盐度差异幅度要小于温度模拟的差异幅度呢?这主要是因为盐度的分布要比温度的分布均匀得多,在一般情况下,属性分布越均匀,对格式的敏感程度越小,属性分布梯度越大,对格式的敏感程度越大.这也可以解释北极区附近两种方法模拟的盐度差异要比其他地区大,因为在北极地区的河流入海口有大量淡水的注入,使得北极区的盐度梯度比较大,所以,这一地区对平流方案也比较敏感.

3 赤道中、东太平洋区域的分析

如图3所示,在赤道中、东太平洋地区的模拟有明显的改进,改进的幅度达 1°C .对于这一改进,其意义是很重要的.一方面,赤道中东太平洋地区是一个备受关注的地区,很多事件的发生都与这一地区有着密切联系,比如,ENSO;另一方面,这一地区的模拟也始终不尽如人意, Mechoso等^[22]在对11个耦合气候模式的研究中发现,所有的模式在东太平洋区域,都产生了一个偏窄、偏强、偏西伸的冷舌,以及在东边界存在偏暖水,结果导致出现了与实际情况不相符合的双赤道辐合带结构.

再来看赤道太平洋地区 $2^{\circ}\text{S}-2^{\circ}\text{N}$ 平均海温的深度—经度剖面图(图5),图5(a)为采用两步保形平流方案(试验一)的模拟结果,图5(b)为原模式(控制试验)模拟结果,图5(c)为Levitus资料结果.比较这3张图,可以发现模式均能够模拟出倾斜的等温线这一特征,但是,与原来的平流方案相比(图5(b)),两步保形平流方案的模拟结果图5(a)更加接近于实际(图5(c)).具体体现在以下几个方面,对于图中的上层120 m而言,图5(b)中的 26°C 和 28°C 所围面积过小,即上层暖水模拟过弱,冷水过强;在200 m以下区域,两步保形平流方案(图5(a))模拟的 16°C 和 14°C 线和实际(图5(c))保持非常好的一致,而原模式(图5(b))模拟的要偏低 2°C 左右,即 12°C 线的位置对应于实际的 14°C 线的位置.图5(d)是图5(a), (b), (c)图中的 20°C 线的位置,即图5(a), (b), (c)图中的粗线条,通常,以 20°C 线的位置,作为温跃层深度,从图5(d)图上可以看出,总体上两步保形平流方案模拟的温跃层主体更为合理,但是在 130°W 以东,原方案更加接近实际.

此外,从热带太平洋区域($120^{\circ}\text{E}-110^{\circ}\text{W}$, $30^{\circ}\text{S}-30^{\circ}\text{N}$)的深度和温度的廓线图(图6),可以看出这一改进不光是在海表,在整个上层500 m都有比较明显的改进,从图6可以看出,加入两步保形平流方案后,温度深度廓线与Levitus资料更加一致.

因此,采用两步保形平流方案的LICOM海洋环流模式,能够模拟更加合理的热带太平洋地区冷舌结构,对于未来作为海洋分模式加入到耦合模式中,改进耦合模式对东太平洋区域的模拟能力,都将具有积极的意义.

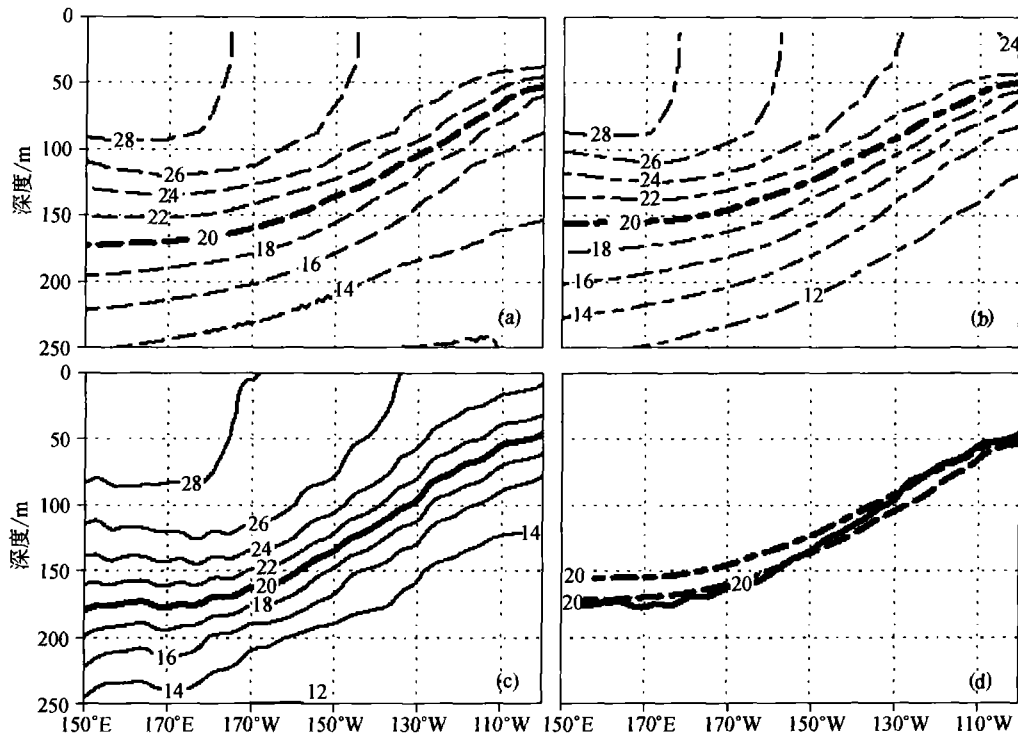


图5 赤道太平洋 2°S—2°N 平均海温的深度—经度剖面图

(a) 保形方案 (实验一); (b) 原模式平流方案 (控制实验); (c) Levitus 资料; (d) (a), (b), (c) 图中对应的海温 20°C 位置

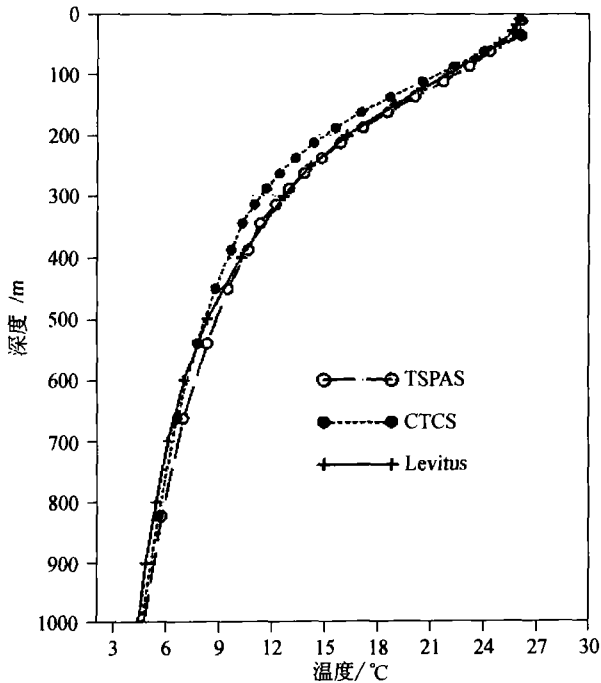


图6 120°E—110°W, 30°S—30°N 区域平均海温的深度廓线
带点的短虚线为控制实验结果, 带圈的长虚线为实验一结果,
带加号的实线为 Levitus 资料

4 赤道中、东太平洋海表热收支分析

在模式中引入两步保形平流方案后, 对模式进行继续积分, 考虑到积分的最初几年, 是新方案和模式的适应和调整时期, 在这段时间之内, 平流项各项之间的变化也最为明显. 同时, 基于模式中热带海洋上层的调整周期比较短这个事实, 10a 的继续积分已经能够比较全面地反映平流方案的作用. 因此, 下面工作主要对继续积分的前 10a (即试验一和控制试验的 501—510 年) 的结果进行分析, 找出模拟改进的原因.

取引入两步保形平流方案后模式积分的最初 10a (试验一), 即 501—510 模式年, 并与原方案的模式结果 (控制试验) 进行对比, 可以发现差别最大的区域出现在 4°S—2°N, 170°W—90°W, 见图 7, 这一区域的增温基本上超过了 0.6°C, 中心在 0.9°C 以上. 另外, 需要指出, 图 7 中 110W 以东新方案模拟相对原方案偏低, 主要是原方案在此区域模拟的次表层有虚假的下沉流, 而两步保形平流方案模拟的结果消除了次表层虚假的下沉流, 所以, 新方

案模拟海表温度相对原方案低。

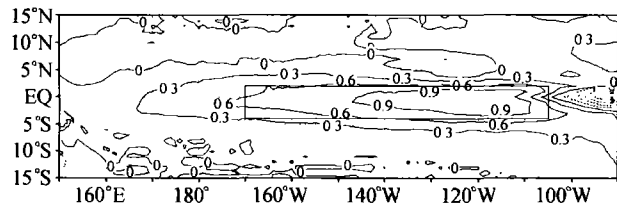


图7 模式从500a积分到510a, 两种方案(实验—控制实验)模拟的海表温度之差

对于海温预报方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{a \partial \theta} + u \frac{\partial T}{a \sin \theta \partial \lambda} + w \frac{\partial T}{\partial z} = F_T + Q_{pen}. \quad (2)$$

方程(2)由以下几项组成, 温度局地变化项 $\frac{\partial T}{\partial t}$,

平流项 $v \frac{\partial T}{a \partial \theta} + u \frac{\partial T}{a \sin \theta \partial \lambda} + w \frac{\partial T}{\partial z}$, 湍流扩散项 F_T , 穿透加热项 Q_{pen} . 平流项有3个分量组成(3个方向): X方向即纬向平流 $u \frac{\partial T}{a \sin \theta \partial \lambda}$, Y方向即经向平流 $v \frac{\partial T}{a \partial \theta}$, Z方向即垂直对流 $w \frac{\partial T}{\partial z}$; F_T ; 穿透加热项 ΔQ 是指上一层到达本层的热通量与穿出本层到达下一层的热通量之差。

对图7中的选定区域, 在10a的积分过程中, 将温度方程中各项的贡献输出, 通过对比两种平流方案模拟在这一区域平均温度以及区域平均平流项加热率的差异(图8), 来分析平流项对于温度变化的贡献. 图8中虚线是两个模式模拟的该区域年平均平流项差的变化图, 对应于右边纵坐标, 实线是两个模式模拟的该区域年平均海温差的变化图, 对应于左边纵坐标, 可以发现两者有非常一致的变化特征, 求得两者之间的相关系数达0.965, 这说明该区域海温模拟的改进主要是由平流计算方案的改变引起的。

平流格式的改进对次表层海温的变化也有明显的影响. 图9是采用两步保形平流方案(实验一)模拟的20°C等温面深度与原方案(控制实验)模拟的20°C等温面深度之差, 可以看出, 加入了两步保形平流方案之后, 模拟的温跃层深度在热带太平洋地

区加深了. 在东太平洋地区模拟的深度加深了5—10 m, 赤道冷舌附近加深了10—15 m, 往南、北纬方向至20°附近增加了15—20 m. 这与原方案模拟的温跃层较浅相比, 是一个重要的改进之处。

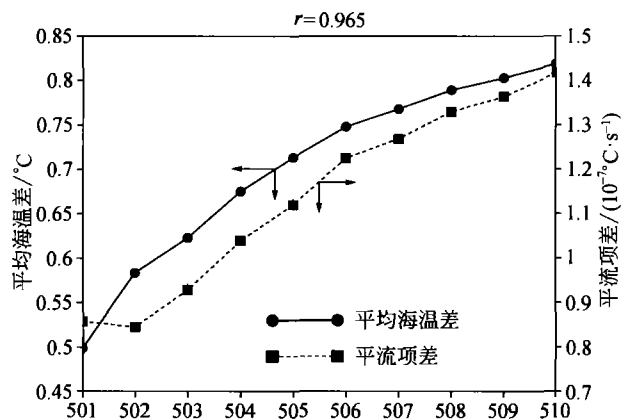


图8 保形方案与原方案的年平均海温之差(实线)与两种方案的计算的平流项之差(虚线)

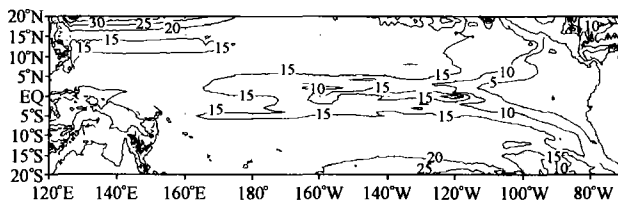


图9 采用两步保形平流方案(实验一)模拟的20°C等温面深度与原方案(控制实验)模拟的20°C等温面深度之差(单位: m)

5 总结与展望

本文首先对LASG发展的气候系统海洋模式(LICOM)的平流方案, 即采用Asselin滤波的时间中央差和空间中央差方案, 与两步保形平流方案, 在一维周期边界条件下, 对于理想的一维平流方程, 进行对比测试, 证明了两步保形平流方案具有更好的应用意义。

在此基础上, 将两步保形平流方案引入到LICOM海洋模式中, 通过了一百年的稳定积分, 将积分结果和原模式模拟结果的温度场、盐度场进行了比较, 对比发现, 温度场的模拟差异主要发生在赤道中东太平洋、赤道中部大西洋、西北太平洋、西北大西洋以及非洲南部阿古拉斯流, 温度场在赤道中东太平洋区域的改进使得模拟冷舌的能力提高; 盐度场的模拟差异, 除了在北极地区稍大一点

外,其他地方的差异均不是很明显.总体特征是温度场的变化大于盐度场的变化.

然后,以赤道中、东太平洋地区为例,通过将该地区的模拟结果和观测的 Levitus 资料对比,证明采用两步保形平流方案的模式具有较好的模拟能力.并且通过在积分过程中,将温度方程各项输出分析,通过分析,得出结论是两步保形平流方案通过合理的模拟温度平流项,使得这一方案能够更加合理的刻画热带太平洋的温度场分布,对冷舌的模式更加接近实际.进一步还通过赤道太平洋地区温跃层深度的分析,指出了两步保形平流方案对改善温跃层深度的贡献.

总之,本文的工作表明了平流方案的重要性,比如两步保形平流方案较远方案能够更加合理模拟冷舌、能够模拟更加合理的温跃层厚度等,使得 LICOM 海洋模式的模拟能力得到了提高.下一步工作是将改进的方案引入到 LASG 发展的耦合模式中,考察这一方案是否会对耦合模式模拟有所改进.

致谢 感谢张学洪、宇如聪研究员、刘海龙博士与作者有益的讨论.本文的数值计算工作是利用中国科学院超级计算中心的高性能计算机联想 6800 和中国科学院大气物理研究所科学计算和信息中心的计算机 IBM SP690 完成的.

参 考 文 献

- 1 Yu Y Q, Zhang X H, Guo Y F. Global coupled ocean-atmosphere general circulation models in LASG/IAP. *Adv Atmos Sci*, 2004, 21: 444—455
- 2 Asselin Richard. Frequency filter for time integrations. *Monthly Weather Review*, 1972, 100: 487—490
- 3 Zeng Q C, Zhang X H. Available energy conserving schemes for primitive equations on spherical baroclinic atmosphere. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1987, 11: 121—142
- 4 Haidvogel, Dale B, Aike Beckmann 著, 王东晓, 宏 波, 蔡树群, 等译. 海洋环流数值模拟. 北京: 气象出版社, 2005, 107—108
- 5 Yu R C. A two-step shape-preserving advection scheme. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1994, 11: 479—490
- 6 宇如聪, 薛纪善, 徐幼平. AREMS 中尺度暴雨数值预报模式系统. 北京: 气象出版社, 2004, 233
- 7 宇如聪. 一个 η 坐标有限区域数值预报模式对 1993 年中国汛期降水的实时预报试验. *大气科学*, 1994, 18: 284—292
- 8 宇如聪. LASG-REM 对 1994 年中国汛期降水的实时预报试验. *大气科学*, 1994, 18: 801—809
- 9 Yu R C, Jin X Z, Zhang X H. Design and numerical simulation of an Arctic Ocean circulation and thermodynamic sea-ice model. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1995, 12: 289—310
- 10 Wang B, Wan H, Ji Z Z, et al. Design of a new dynamical core for global atmospheric models based on some efficient numerical methods. *Science in China Ser. A: Mathematics*, 2004, 47: 4—21
- 11 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
- 12 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, 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG) 技术报告特刊. 北京: 科学出版社, 2003, 107
- 13 Liu H L, Zhang X H, Li W, et al. An eddy-permitting oceanic general circulation model and its preliminary evaluation. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, 21: 675—690
- 14 Jin X Z, Zhang X H, Zhou T J. Fundamental framework and experiments of the third generation of IAP/LASG world ocean general circulation model. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1999, 16: 197—215
- 15 Gent Peter R, James C, McWilliams. Isopycnal mixing in ocean circulation models. *Journal of Physical Oceanography*, 1990, 20: 150—155
- 16 Pacanowski R C, Philander S G H. Parameterization of vertical mixing in numerical models of the Tropical Ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 1981, 11, 1442—1451
- 17 Naval Oceanographic Office, DBDB5 (Digital Bathymetric Database 5 minute, [http://www7320.nrlssc.navy.mil/DBDB2_WWW\[2005-11-15\]](http://www7320.nrlssc.navy.mil/DBDB2_WWW[2005-11-15]))
- 18 Levitus S, Boyer T P. World Ocean Atlas 1994 Volume 4: Temperature. NOAA Atlas NESDIS 4, US Department of Commerce, Washington, DC. 1994, 117
- 19 Levitus S, Burgett R, Boyer T P. World Ocean Atlas 1994 Volume 3: Salinity. NOAA Atlas NESDIS 3, U. S. Department of Commerce, Washington, D. C. 1994, 99
- 20 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-Institute for Meteorology, Hamburg, 2001, 1—31
- 21 Levitus S, Boyer T P, Conkright M E, et al. NOAA Atlas NESDIS 18, World ocean database 1998, Vol. 1. Introduction. Washington D C; US Gov Printing Office, 346
- 22 Mechoso C R, Robertson A W, Barth N, et al. The seasonal cycle over the tropical Pacific in coupled ocean-atmosphere general circulation models. *Monthly Weather Review*, 1995, 123: 2825—2838