

# 混合坐标大洋环流模式 Hycom 的坐标选取 与参数化设置敏感性试验

王骥鹏, 闻 斌, 耿再兴, 万 雷

(61741 部队, 北京 100081)

摘 要: 在移植并拓展建立一个全球范围 Hycom 模式的基础上, 针对混合坐标的选取和参数化设置设计了几组敏感性试验, 初步揭示了选取不同的混合坐标和设置不同的参数值对模式模拟结果的影响。研究表明: 混合坐标中的  $z$  坐标的设置差异对混合层的模拟影响较大; 对混合坐标中的等密度坐标而言, 前几层取值稍小些会提高模拟效果; 动量耗散的辐散速度是影响模拟结果的重要参数。

关键词: Hycom; 混合坐标; 参数化; 敏感性试验

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1003 - 0239 (2008)3 - 0093 - 10

## 1 引言

一个理想的海洋环流模式应该具有四点特征: (1) 在百年时间尺度上要保持水团的特性(等密度坐标的特点); (2) 为了很好地表征热动力机制和生物化学机制, 表面混合层应该有高的垂直分辨率( $z$  坐标的特点); (3) 在非层结或弱层结区域维持足够高的垂直分辨率( $z$  坐标的特点); (4) 在近岸区域应该有高的垂直分辨率( $\sigma$  坐标的特点)。以往的海洋环流模式都采用单一垂直坐标的方法, 比如 MOM 采用  $z$  坐标, POM 采用  $\sigma$  坐标, MICOM 采用等密度坐标等。也就是说, 这些模式在表征海洋某一方面比较适用, 但就模拟整个大洋而言, 并不完全适用。那么, 有没有一个模式, 能集诸坐标的优势于一身, 很好的表征大洋的环流特征呢? 答案就是本文所采用的混合坐标大洋环流模式 Hycom。

## 2 模式介绍

混合坐标大洋环流模式 Hycom (Hybrid Coordinate Oceanic Circulation Model) 是在等密度坐标海洋模式 (MICOM) 的基础上发展改进的新一代原始方程海洋环流模式。通过合理性和有效性的研究 (Chassignet et al, 1996; Roberts et al, 1996; Marsh et al, 1996 等)<sup>[1~3]</sup> 和在数值海洋气候研究上的应用 (New and Bleck, 1995; New et al, 1995; Bleck 1998 等)<sup>[4~6]</sup>, MICOM 已经成为一个非常重要、非常有影响力的海洋环流模式。但由于垂直坐标的局

限性,在表示垂直混合和表示浅水以及弱层结区域海流方面受到了制约。

Hycom 在 MICOM 基础上对垂直坐标的选取方面做了科学的改进,采用了混合坐标。所谓混合坐标,是指 Hycom 模式在开放的、层结的海洋中垂直坐标取等密度坐标;在弱层结的上层海洋混合层中,垂直坐标平滑地过渡到  $z$  坐标;在浅水区域,过渡到随底垂向  $\sigma$  坐标;而在非常浅的区域,垂直坐标又回到了层坐标。这样的一种坐标选取,就吸收了  $z$  坐标、 $\sigma$  坐标和等密度坐标的各自优点,在模拟大洋环流上有更普遍的适用性。在参数化方面,Hycom 摒弃 Gaspar<sup>[7]</sup> 湍流动能平衡参数化方案,而采用 K 廓线参数化方案(KPP)。

美国海军准备在五年时间内大力发展和完善 Hycom 模式,并准备将其装配到 the Naval Oceanographic Office (NAVOCEANO), Stennis Space Center, MS, the Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center (FNMOC); NOAA 也准备在 the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) 中采用该模式。而国内对于 Hycom 模式的研究刚刚起步,甚至搜索不到相关的中文文献。鉴于 Hycom 先进合理的物理机制和国外学者所做的卓越的模拟效果,可以预言,它必将在海流分析预报工作中大显身手,具有广阔的应用前景。

### 3 准备工作(资料选取)

模式采用  $2^\circ \times 2^\circ$  分辨率,在低纬和中纬采用麦卡托投影网格,在高纬采用曲线网格;水深资料利用 NGDC(National Geophysical Data Center)提供的 TerrainBase  $5 \times 5$  的资料,包括全球陆地海拔高度和全球水深;表面风应力资料取 COADS(Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set project)全球风场数据;温、盐资料取自 Levitus(NOAA World Ocean Atlas)的数据。这些数据除了插值到固定深度层上的格点上外,还对盐度和位温进行了修正,以使位密垂直廓线达到稳定。

温度和盐度向随季节变化的气候值松弛,这样可以近似的恢复由于地转调整而引起海流的垂直切变;混合层方案选取 KPP 方案。

## 4 Hycom 坐标选取和参数化设置敏感性试验

### 4.1 问题的提出

在研究 Hycom 模式提供的示例数据结果(积分 20a 的结果)时发现,在所模拟的流场中,出现了多处“波状流”现象。所谓“波状流”是指相邻的格点上的速度的  $u$  分量方向一致,而  $v$  分量绝对值接近,但方向呈正负相间,结果使海流上下起伏着沿  $u$  方向流动,像波传播一样,故本文把该现象叫做“波状流”。从图 1 可以看出,模式已经很好的模拟出了湾流的形势,整体上环流形势与实测相符,但在赤道上方的局部区域有“波状流”的存在,如图中矩形框所示。

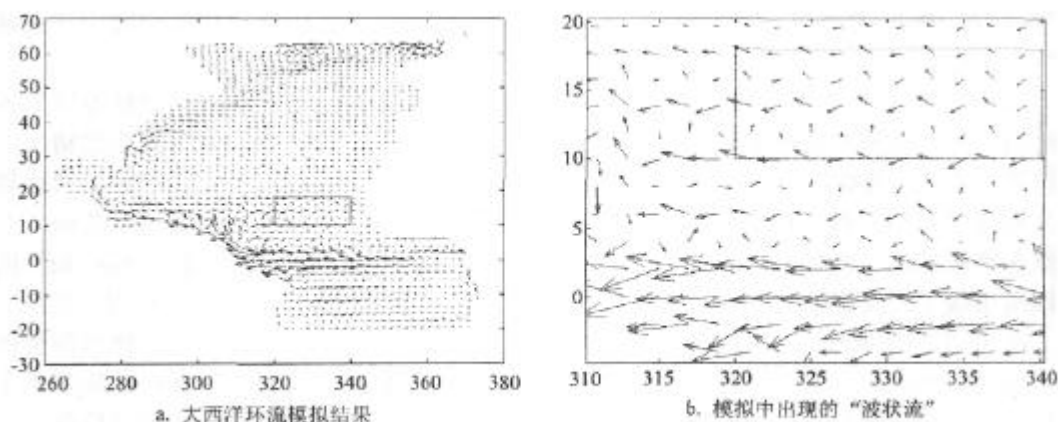


图1 Hycom模式自带的示例数据结果(积分20a的环流模拟结果)

为了找出问题原因所在,本文对 Levitus 1月全球密度资料的数据进行了分析,前面已经指出,这些数据是插值到固定深度层格点上的资料,共33层,深度依次为:0m、10m、20m、30m、50m、75m、100m、125m、150m、200m、250m、300m、400m、500m、600m、700m、800m、900m、1000m、1100m、1200m、1300m、1400m、1500m、1750m、2000m、2500m、3000m、3500m、4000m、4500m、5000m和5500m。本文取太平洋出现“波状流”的区域平均密度廓线,与墨西哥湾区域海流模拟效果较好的区域的平均密度廓线进行比较(见图2)。

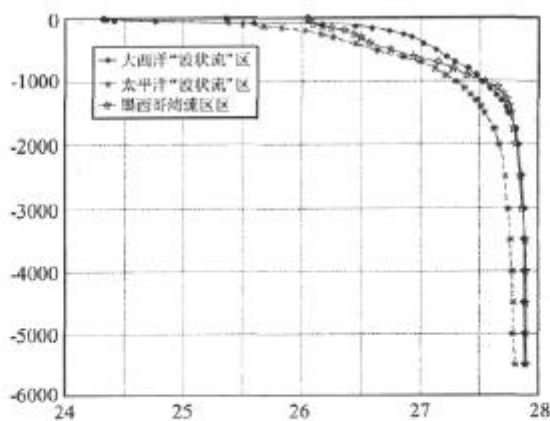


图2 三个不同区域平均密度随深度的变化

(\*划线代表太平洋区域(180°~221°E, 30°~40°N)平均密度随深度的变化,点划线代表大西洋区域(321°~341°E, 12°~16°N)平均密度随深度的变化,五角星划线代表(300°~320°E, 40°~45°N)平均密度随深度的变化),横轴单位为 $\sigma_t$ 密度单位,纵轴单位:m

从图2可以看出,在50m以上的各层,平均密度均是大西洋“波状流”区最小,太平洋“波状流”区次之,湾流区最大;从75m以下一直到1000m,大西洋“波状流”区密度都大于湾流区;太平洋“波状流”区密度始终小于湾流区密度;密度的梯度排列为大西洋“波状流”区最大,太平洋“波状流”区次之,而湾流区最小。特别是大西洋“波状

流”区,在 100m 之内,密度由 24.3 陡增到 26.2。那是不是大的密度梯度引起了“波状流”的出现呢?

为了检验这一设想,在模式中对温度、盐度和密度数据进行控制,把全球范围的各层的温、盐、密资料全部用湾流区的温、盐、密资料替代,构造一个假定的理想情况。从结果分析看(图略),原来出现“波状流”的太平洋区域已经没有了“波状流”,所比较大西洋区域的“波状流”也不复存在了,但在黑潮东部,非洲厄加勒斯角东北部,大洋洲东部区域的“波状流”依然存在。此外,原来中国南海和孟加拉湾没有“波状流”的区域也出现了“波状流”。总的看来,在开阔大洋上效果明显变好,但近岸却很不理想。

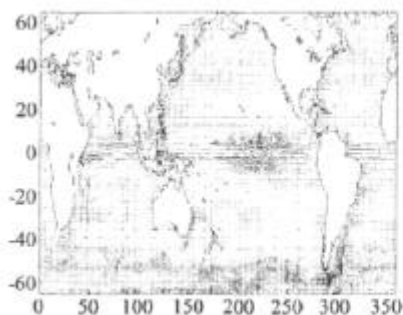
在所构造的理想情况基础上,通过调整水深资料,对其进一步理想化,把水深全部取为 500m(500m 是湾流区平均水深)。比较结果看出(图略),水深的改变对结果基本上没有什么影响。因此,本文认为,在密度梯度小的区域模拟效果好,而在密度梯度大的区域模拟效果差,这很有可能是因为模式分层的原因。

#### 4.2 混合坐标的设置试验(垂直分辨率试验)

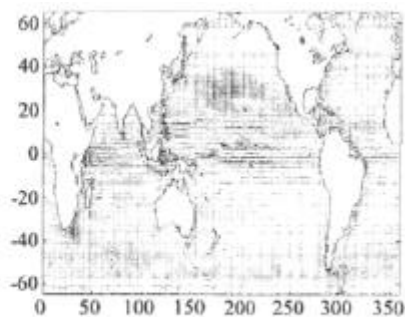
混合坐标模式的坐标混合包括等密度坐标与  $z$  坐标混合、等密度坐标与随底  $\sigma$  坐标混合以及三种坐标的同时混合。George R. Halliwell<sup>[8]</sup>指出:模式对垂直坐标类型的敏感性远不如模式对垂直分辨率和垂直混合方案的敏感性。为了更好地说明坐标间的混合关系,更清晰地展示不同设置所产生的混合效果差异,这里选择了等密度坐标与  $z$  坐标混合,混合方案都取最优的 KPP 方案。试验包括两部分:一是设置不同的  $z$  坐标的分层;二是设置不同的等密度分层,共分为 5 组。(具体试验方案数据略)

##### 4.2.1 流场的比较

图 3 是 5 组试验结果的全球大洋环流形式对比图。从总体上看,五组试验结果中都还存在着“波状流”的现象。但随着分层的改变,也就是说在取不同的垂直分辨率情况下,出现“波状流”的区域、范围以及强度等都不尽相同。试验 2 中赤道以北太平的海流几乎全部都有“波状流”现象;试验 1 中虽然北太平洋的“波状流”不明显,但整个南半球  $45^{\circ} \sim 60^{\circ}\text{S}$  的范围内海流基本上都呈波状分布;而试验 3、4、5 的结果关于“波状流”现象的差别不明显,基本上都出现在西北太平洋、大洋洲东部、南美洲福克兰群岛东部以及在非洲南端的厄加勒斯暖流区。



a. 试验 1 的结果



b. 试验 2 的结果

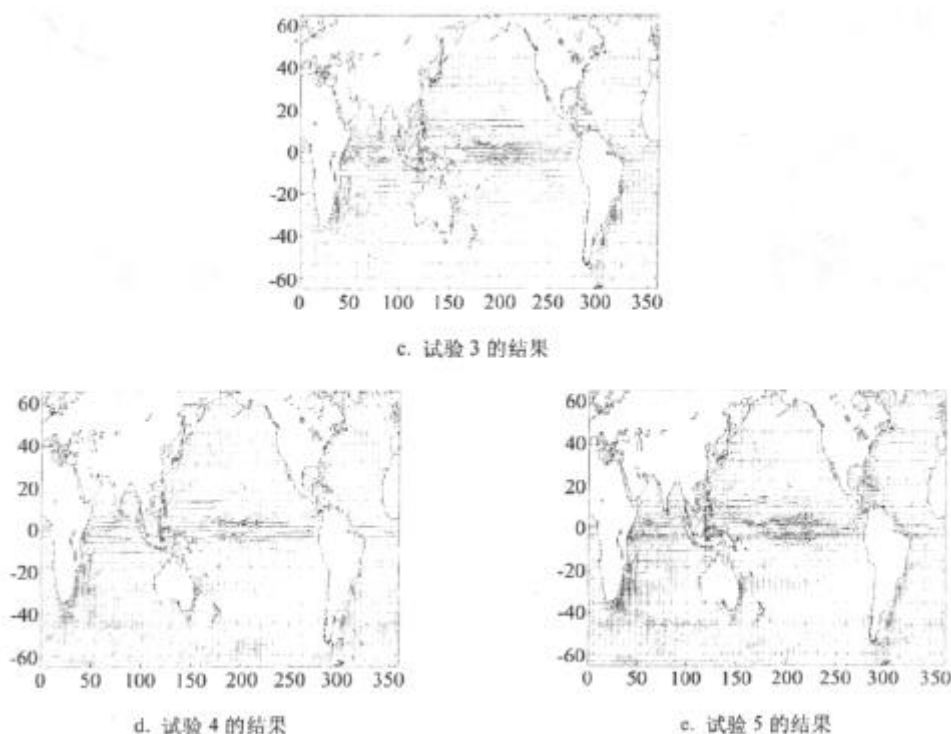


图 3 10m 深流场

比较图 3b 和图 3c、d、e 可见,在图 3b 中出现“波状流”的区域在图 3c、d、e 中海流已经变得规则。试验 3、4 的密度设置是在试验 2 的基础上向下加了四层,从理论上来说,对表层的影响应该不大。区别应该在于对  $z$  坐标中层厚度的设置。试验 3、4、5 中都加大了  $z$  坐标的厚度的最大值。可见  $z$  坐标的层厚度的极值设置对模拟结果有一定影响。

就试验 3 与试验 4 而言,试验 3 表层海流形式要好于试验 4。在广阔的南半球大洋上,试验 3 所模拟的海流基本规则,而试验 4 却还部分存在着明显的“波状流”。进一步比较试验 3 和试验 5 的结果,发现这两组试验尽管层厚度最大值相差很大,但模拟结果却基本相似。由此分析初步可知:在做全球大洋环流模拟时,层厚度的最大值不能取太小,但也不一定是越大越好,应该存在一个取值区间,当取值超过该区间后,模拟效果反而得不到提高。

#### 4.2.2 模式层剖面比较

为了更好地展现垂直坐标的结构,本文给出了  $135^{\circ}\text{E}$  温度经向剖面图(见图 4)。图中粗黑线是混合层的深度,而细黑线是代表了模式的分层结构。由图上可以看出:5 组试验中,温度的垂直分布变化不大,混合层的平均深度基本上也都在 100m 以内,除了试验 1 外,其余 4 组试验的混合层深度变化基本相似。

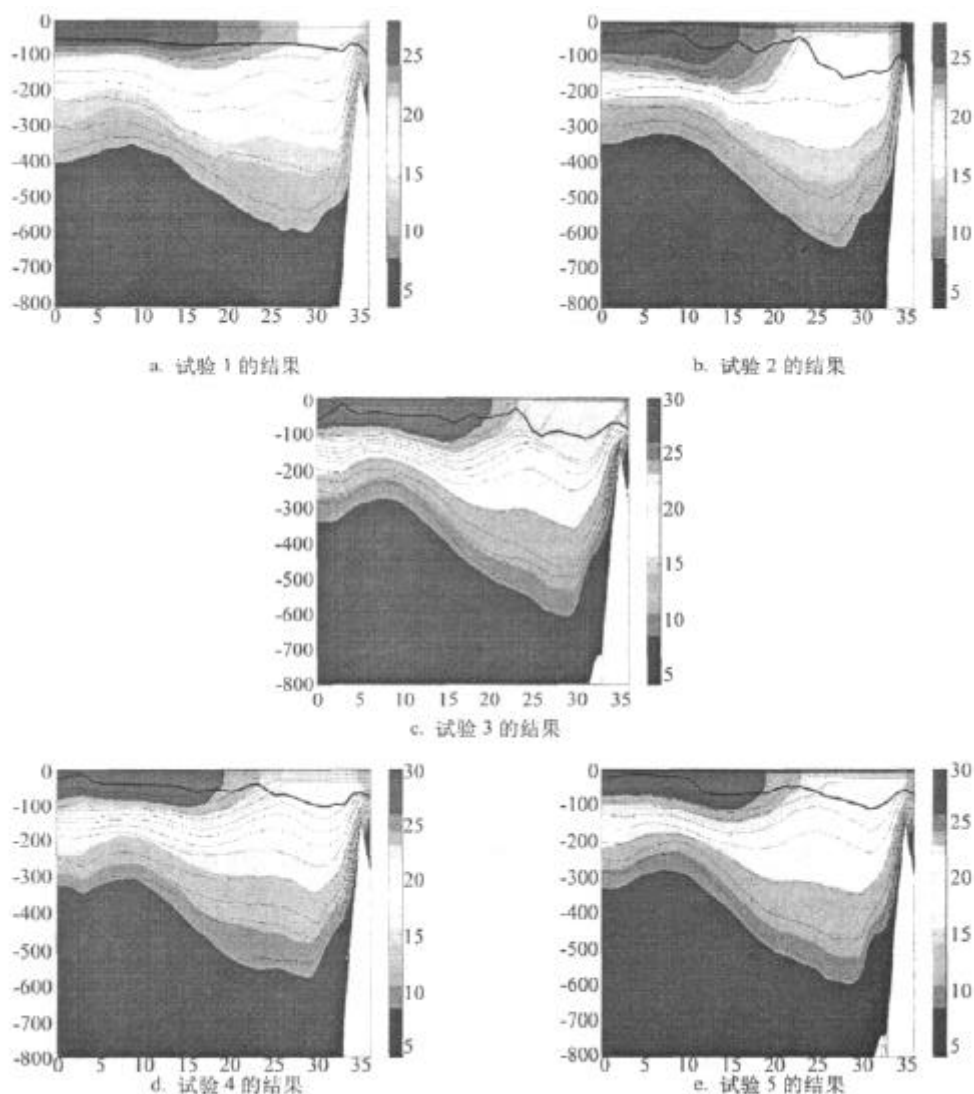


图 4 135°E 温度经向剖面图 (细黑线是各模式层的界面深度; 粗黑线是混合层深度)

图 4a 中, 在混合层之上只有 2 层分层, 这样的粗分辨率对于模拟上混合层无疑太少, 不能刻画混合层的物理过程; 图 4c 混合层分辨率虽然较高, 但都集中在近海表面, 只对 10 多米以上的海洋进行了较好地离散; 图 4b、d、e 的分层较为合理, 能较好地混合层进行分层。但在该图中, 试验 2、4、5 的差异与优劣得不到明显的体现。

分析 30°N 温度纬向剖面图可见(图略): 试验 2 中, 混合层呈锯齿状分布, 最深达到 150m, 而最浅仅 10 多米, 起伏达 100 多米, 这使得混合层内  $z$  坐标的离散也产生了很大差异。对混合层深的区域, 仅上半部分享受了较高的垂直分辨率, 其余大部分被误置于了等密度层中; 而对于浅的区域,  $z$  坐标又取得过于向下, 对于等密度区也进行了离散, 浪费了一部分分层。海表温度较其他几组试验明显偏低。温度分布和混合层深度

变化的异常可能与出现“波状流”有着必然的联系。

虽然通过试验确定了较为合理的垂直坐标的选取,并一定程度上改善了“波状流”现象,但可以看出,模式中还有着影响模拟效果的其它重要的因素,就“波状流”而言,尚未找到其根源之所在。

#### 4.3 部分参数的设置试验

通过模式垂直分辨率试验,本文确定了一组相对合理的设置方案。虽然分层较为合理,但并没有从根本上解决“波状流”的问题。为此,本文从物理过程着眼,从表征物理过程的几个参数入手,设置了一组试验(见表1)。通过调整参数值的大小及其组合方案,来比较不同参数对模拟结果的影响。垂直分层采用上节试验5的配置,混合方案仍为KPP混合方案。

表1 模式中几个参数的不同试验配置

	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4	试验 5	试验 6
Visco2	0.1	0.5	0.9	1.0	0.1	0.1
Visco4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Veldf2	0.03	0.15	0.27	0.03	0.03	0.3
Veldf4	0.01	0.05	0.09	0.01	0.01	0.1
Thkdf2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Thkdf4	0.05	0.25	0.45	0.05	0.5	0.05
Temdf2	0.015	0.075	0.0135	0.015	0.15	0.015

注\* visco2:由变形决定拉普拉斯粘性系数; visco4:由变形决定的双调和粘性系数; veldf2:拉普拉斯动量耗散的辐散速度(单位 m/s); veldf4:双调和动量耗散的辐散速度(单位 m/s); thkdf2:拉普拉斯厚度扩散的辐散速度(单位 m/s); thkdf4:双调和厚度扩散的辐散速度(单位 m/s); temdf2:拉普拉斯温度/盐度扩散的辐散速度(单位 m/s)。

##### 4.3.1 流场的比较

对试验结果进行比较分析(图略),由1和2可知:在七个参数都同时扩大5倍后,流场形势有了明显的变化。1中出现“波状流”的区域,在2中基本上都呈规则的流分布,但在中国南海以及大洋洲东部部分区域还有“波状流”存在;比较2和3可见,在参数都同时扩大9倍后,流场更加规则,基本上没有了“波状流”的现象,并且全球大洋环流中较为著名的几大流系均能有清晰地体现。由此可知,引起模拟结果中出现“波状流”的原因于模式程序本身而言,是默认的几个参数值配置不合理。

综合试验1、2、3,可以分析出:通过扩大七个参数值,可以解决模拟中出现“波状流”的问题,并且扩大9倍的效果要明显好于扩大5倍的效果,这说明分析抓住了问题的主要矛盾。为了更进一步找出主要矛盾中的主要方面,在试验4、5、6中对七个参数进行分类组合,单独扩大其中一组,通过比较结果(图略),试验6的结果较为理想,可见,真正对模拟结果影响较大的参数是动量耗散的辐散速度。

##### 4.3.2 热带上层环流的比较

从环流形势可以定性地比较出不同试验结果的效果好坏。为了定量地比较不同的参数对结果影响的大小,图5给出了140°W纬向流分布特征。

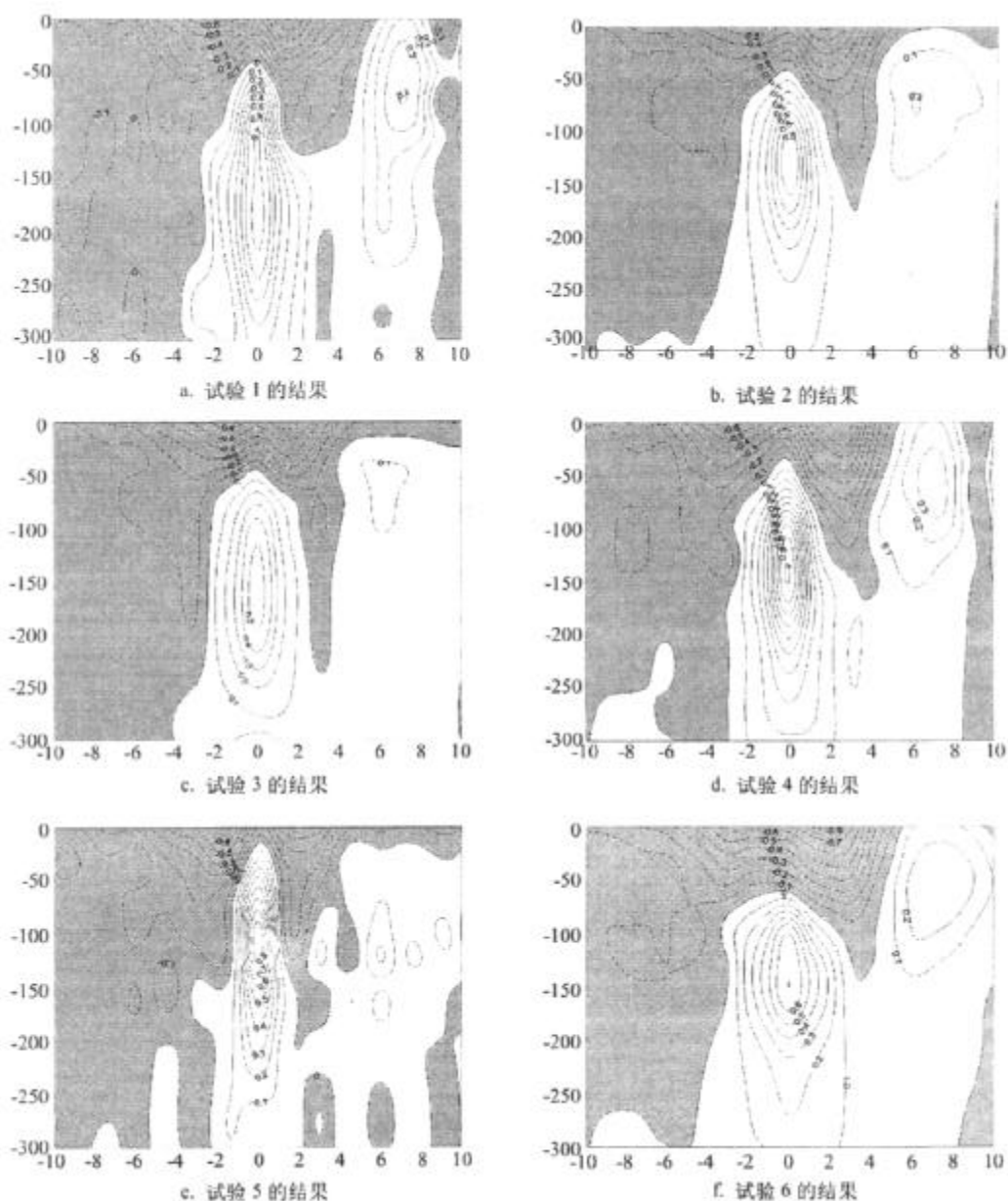


图 5 140°W 纬向流分布特征 (等值线间隔 1m/s, 阴影区为负值)

从图上可以看出, 几组试验所模拟的结果虽然在形势上基本相近, 但在数值上有明显的差别。在纬向流分布图上, 所有参数扩大 9 倍和动量扩散速度扩大 10 倍所得到的结果较为准确; 单独增大厚度扩散速度, 赤道潜流(EUC)中心明显升高, 但范围变窄。对经向流而言(图略), 增大粘性系数、增大厚度扩散速度和增大动量扩散速度都会减弱经向流速。相比之下, 动量扩散速度对经向速度影响最大, 粘性系数次之, 而厚度扩散速度最小。



## 5 结论

(1) 本文在分析海洋垂直结构的基础上,通过对 Hycom 模式垂直分层进行不同试验,探讨了垂直分辨率变化对海流模拟的影响。从试验结果可以看出:混合坐标中的  $z$  坐标的设置差异对混合层的模拟影响较大,虽然深度都在一百米左右,但混合层在经向、纬向上的分布却起伏较大。

(2) Hycom 模式的应用方面,在做全球大洋环流模拟时,对混合坐标中的  $z$  坐标而言,层厚度的最大值不能取太小,但也不一定是越大越好,应该存在一个取值区间,当取值超过该区间后,模拟效果反而得不到提高;对混合坐标中的等密度坐标而言,前几层要取值稍小些,这样会提高模拟效果。

(3) 通过对 Hycom 模式中几个重要参数做敏感性试验,找到了影响模式结果出现“波状流”的问题所在,即动量耗散的辐散速度对模拟结果影响较大。

(4) 每一个参数背后,本质上都是一个复杂的物理过程。例如,文中提到的厚度扩散速度,就是由于在不能得到足够高的分辨率和足够低的粘性情况下,而采用的次网格尺度涡动输运效应的参数。它用在等密度混合方案中,使得非涡分辨能够保持其垂向层结,还能减少假的沿坐标方向混合,但在斜压不稳定的海域就无法得到真实结果。所以,虽然本文通过试验找到了影响模拟效果的重要的参数,并确定了其合理的取值,但尚未从物理机制上给出一个明确的解释,这也是本文下一步研究的方向。

## 6 展望

Hycom 模式作为目前世界上较为先进的大洋环流模式,在国外研究和应用领域都越来越受关注。本文尝试应用 Hycom 模式对大洋环流进行模拟,力求对这一领域做一较为详细的介绍,希望能为后续研究工作提供一个先进的、有效的工具<sup>[9]</sup>,更希望本文能抛砖引玉,为 Hycom 模式在国内相关领域的发展尽微薄之力。

### 参考文献:

- [1] Chassignet E P, Smith L T, Bleck R, Bryan F O. A model comparison: Numerical simulations of the north and equatorial Atlantic oceanic circulation in depth and isopycnic coordinates. *J Phys Oceanogr*, 1996, 26 :1849 ~ 1867.
- [2] Roberts M J, Marsh P, New A L, Wood R A, An intercomparison of a Bryan-Cox-type ocean model and an isopycnic ocean model, Part I: The subpolar gyre and high-latitude process. *J Phys Oceanogr.*, 1996, 26 :1495 ~ 1527.
- [3] Marsh R, Roberts M J, Wood R A, New A L. An intercomparison of a Bryan-Cox-type ocean model and an isopycnic ocean model, Part II: The subtropical gyre and meridional heat transport. *J Phys Oceanogr*, 1996, 26 :1528 ~ 1551.
- [4] New A, Bleck R, Jia Y, Marsh R, Huddleston M, Barnard S. An isopycnic model of the North Atlantic, Part I: Model Experiments. *J Phys Oceanogr.*, 1995, 25 :2667 ~ 2699.
- [5] New A, Bleck R. An isopycnic model of the North Atlantic, Part II: Interdecadal variability of the subtropical gyre. *J Phys Oceanogr.*, 1995, 25 :2700 ~ 2714.
- [6] Bleck R. "Ocean Modeling in Isopycnic Coordinates" *Ocean Modeling and Parameterization*. Chassignet E P, Verson J, eds. NATO Science Series C: Mathematical and Physical Science, Kluwer Academic Publishers, P. 1998, 516 :4223 ~ 4488.

- [7] Gaspar P. Modeling the seasonal cycle of the upper ocean. *J Phys Oceanogr*, 1998,18 :161 ~ 180.
- [8] George R, Halliwell. Evaluation of vertical coordinate and vertical mixing algorithms in the HYbrid-Coordinate Ocean. *Ocean Modelling*, 2004,7 : 285 ~ 322.
- [9] 王骥鹏. 混合坐标大洋环流模式 Hycom 研究及应用. 解放军理工大学气象学院硕士学位论文, 2006.

## **Study of Sensitivity to the choices of Vertical Coordinate and Vertical Mixing Parameters in Hycom Model**

WANG Ji-peng , WEN Bin , GENG Zai-xing , WAN Lei

(The 61741 Army of the PLA, Beijing 100081 China)

**Abstract :** On the basis of transplanting , spreading and establishing the hybrid coordinate oceanic circulation model for the whole world , this paper designs several different experiments for choosing the vertical coordinate and setting the parameters , discovers the effect of choosing the different vertical coordinate and setting the different parameters for the simulation results. The results indicates that, the various of the setting of the z coordinate in the Hycom affects the simulation of the mixing layer obviously ; For the isopycnic coordinates in the Hycom, choosing smaller value on the first several layers will increase the simulation results ; The diffusion velocity (m/s) for biharmonic momentum dissip is an very important factor for the simulation results.

**Key words :** Hycom ; hybrid coordinate ; parameters ; sensitivity