

南海 TOPEX 海面高度资料的混合同化试验*

王东晓 施平 杨昆 齐义泉

(中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境动力学开放实验室 广州 510301)

摘要 应用普林斯顿海洋模式(POM),对冬季南海由 TOPEX/Poseidon 得到的卫星遥感海面高度资料进行混合(blending)同化试验。混合同化的权重系数由以下两者决定:南海 POM 模式对冬季风强迫产生响应的海面高度场之标准方差;对应期间 TOPEX 海面高度资料的标准方差。同化结果表明,混合同化方法不失为一种简单而又有效的同化方案。同化得到的南海环流结构与未同化的模式响应场比较可以发现:海面高度资料的同化试验能够有效地修正南海环流的若干大尺度特征,特别是对冬季黑潮入侵南海东北部的动力过程,同化结果有了更准确的描述。同时,另一个重要的修正表现在:同化试验中瞬变的中等尺度涡旋得到加强,体现了南海海洋天气尺度涡被资料同化所“唤醒”(trigger)。这种“唤醒”不仅明显地反映在表层环流场中,对南海次表层动力、热盐结构也有一定的影响。

关键词 混合同化,海面高度,南海,天气尺度涡旋

中图分类号 P73

海洋环境的监测与预报是一个备受人们关注的大课题。一个海洋环境预测系统的成功关键一般取决于以下几个方面(王东晓等,1999):首先是预测系统数学物理模型的有效性,它显示了数理模式对所关心物理过程的刻画能力;其次是供预报用的实时资料的信息度量,包括资料的容量、精度和时空配置等;再次是预测系统中所采用的资料同化方案的性能。

海洋常规观测资料远远不能满足有效地预报海洋环境场的要求(Busalacchi, 1997)。以往的研究已经指出,卫星遥感高度资料由于具有实时、全天候、高精度、周期短等特点已经越来越多地应用到海洋环境和海洋气候的监测和预报之中(Fu *et al*, 1994)。

海洋资料同化研究已经有几十年的发展。就同化方法而言,包括直接插值、最优插值(optimal interpolation)、卡曼滤波方法(Kalman filter)、混合法(blending)、张弛法(nudging)和变分法(variational algorithm)等等(Ghil *et al*, 1991; De Mey, 1997)。卫星遥感提供的多源信息,特别是卫星高度资料、卫星反演海面风场、海洋亮温估计的海面水温和海洋水色资料的获取极大地推动了海洋资料同化的开展(Anderson *et al*, 1996; Malanotte-Rizzoli, 1996)。例如, Smedstad 等(1995)用一个六层原始方程环流模式,采用张弛方法同化 ERS-1 和 TOPEX/Poseidon 高度资料,研究了太平洋大尺度环流结构,取得了与观测较为一致的结果。

* 国家重点基础研究发展规划 G1999043806、国家自然科学基金项目 49636230 号、863 计划 818-06-05 课题联合资助。王东晓,男,出生于 1969 年 2 月,博士,研究员, E-mail: dxwang@scsio. ac. cn

收稿日期: 1999-09-15, 收修改稿日期: 1999-12-30

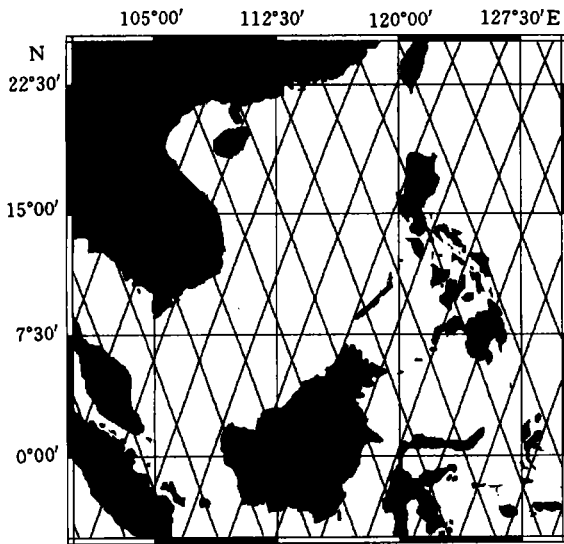


图1 南海附近区域 TOPEX/Poseidon 卫星轨道图

Fig.1 Satellite track map of TOPEX/Poseidon
over the area adjacent to the SCS

南海是一个被 TOPEX 卫星测高轨道良好覆盖的边缘海海盆(图 1)。TOPEX 观测的海面高度资料多年平均得到的季节特征(特别是冬、夏季风盛行季节)与迄今为止从常规观测途径所形成的南海季节性表层环流水平结构基本一致,(杨昆,1999)¹⁾。

南海海洋资料同化的研究目前尚未见诸报道。本研究依据简单与有效相结合的尝试原则,首次选用混合同化方法对 1995 年冬季南海 TOPEX 高度资料进行初步同化试验,以分析高度资料的简单同化对南海动力场乃至热盐场的影响。

1 模式、资料与同化方案

本文所采用的模式为 Blumberg 等(1987)建立起来的一个三维斜压原始方程数值海洋模式,即普林斯顿海洋

模式(POM)。

模式计算域在水平方向上覆盖了介于 0.25° — 27.75° N、 99.25° — 124.75° E 之间的区域,包括整个南海和泰国湾,以及台湾以北、吕宋岛以东部分海域。水平网格距为 $\Delta\theta = \Delta\gamma = 0.5^{\circ}$,在垂直方向上,模式采用不均匀间隔的 16 个分层。因为文中讨论的主要是海面高度,从动力学上讲,深水流程的缓慢变化对其影响不大,因而将整个南海海盆及巴士海峡深水区中超过 1000m 的地形取为 1000m 平底地形。风应力取自 Hellerman 等(1983)提供的气候风应力场。关于模式积分方案、开边界条件的描述详见文献(杨昆等,2000)。

首先经过 1200 天由年平均气候风场强迫驱动后,模式达到全区总动能稳定态(图略)。

根据对 TOPEX 高度计 1995—1997 年高分辨率海面高度(SSH)资料的初步分析,选用 1995 年 10 月 1 日至 11 月 20 日(第 112—第 117 周期)具有明显的中尺度涡入侵的 6 个周期的海面高度资料(杨昆,1999)¹⁾。所用资料通过简单线性插值处理到数值模式所需的 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 网格点上,并进行了平滑处理,去除了存在的噪音(主要是某些没有完全滤去的潮汐信号)。

未同化的参照试验:在模式达到稳定态后,应用了与 TOPEX 资料准同步的 10 月份平均风场强迫 65 天。相应地,模式开边界条件也依据 Wyrтки(1961)的资料进行调整。

1) 杨 昆,1999:冬季南海北部中尺度涡旋的遥感与数值研究。青岛海洋大学硕士学位论文,1—55

混合同化试验:在模式达到稳定态后,采用混合法同化海面高度资料,其他条件与参照试验完全一致。设计同化方案如下:在计算时间的第 5、15、25、35、45、55 天(此 6 个时刻称为同化节点),依次引入 TOPEX 海面高度的第 112 周期至第 117 周期资料。

设 TOPEX 的 SSH 为 η_T , 模式计算的 SSH 为 η_m , 节点处同化后的 SSH 为 η_{new} , 利用:

$$\eta_{new} = \alpha\eta_T + (1 - \alpha)\eta_m \quad (1)$$

在积分的中间时刻将 TOPEX 海面高度资料线性内插至各积分步长上。

对同化权重系数的选取参考了模式计算结果与 TOPEX 海面高度资料的标准方差。图 2a 为 1995 年冬季 TOPEX 海面高度资料的标准方差,图 2b 为标准模式积分(参照试验)前 60 天计算海面动力高度的标准方差。可以看到,模式计算结果的海面高度标准方差很小,为 2,而 TOPEX 海面高度资料的标准方差较大,为 10。

根据下式确定 α 的取值:

$$\alpha = \frac{\sigma_0}{\sigma_0 + \sigma_m} = \frac{10}{10 + 2} \approx 0.8 \quad (2)$$

其中,模式参照试验积分海面高度的标准方差为 σ_m , TOPEX 观测的海面高度标准方差为 σ_0 。

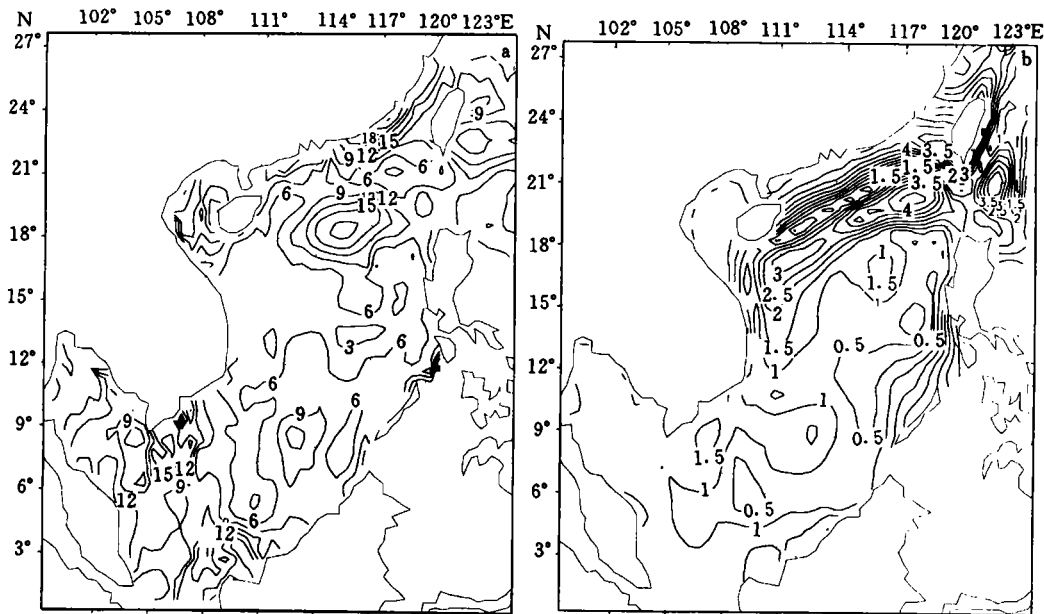


图 2 南海海面高度标准方差分布图

Fig. 2 Standard deviations in SSH in the SCS

- a. TOPEX 海面高度计 1995 冬季共 5 个周期资料计算得到(等值线间隔 3cm);
b. POM 模式参照试验积分 60 天(5 天一次采样)海面高度计算得到(等值线间隔 0.5cm)

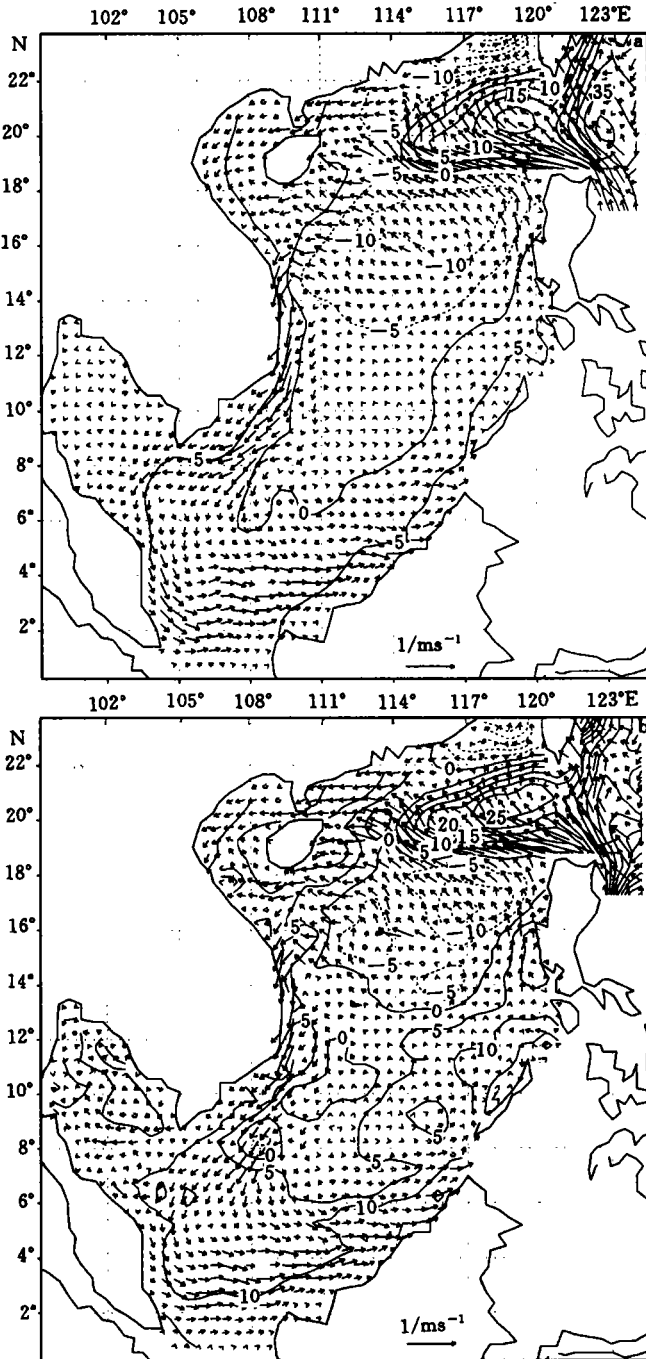
2 同化结果分析

本文将从大尺度和中尺度两个方面分析 TOPEX 高度资料混合同化对南海环流的影

响。值得注意的是南海环流具有明显的多涡结构,海洋中尺度涡旋的演变(时间上的生消和空间上的迁移)是南海环流季节调整的主要方式,所以南海环流大尺度特征与中尺度结构是密不可分的(王东晓等,1996)。

2.1 对环流大尺度结构的影响

图 3a 和图 3b 分别为积分 25 天时参照试验和同化试验所得到的表层流场和海面高



度场。参照试验得到的冬季南海环流特征及主要涡旋体系与以往观测分析和数值研究的结果基本相似(黄企洲等, 1992; 苏纪兰等, 1999; Wang *et al.*, 1997), 特别是海盆尺度的气旋式环流, 黑潮以吕宋流套和黑潮南海分支两种相辅相成的方式影响着南海东北部海域、以及菲律宾内侧、黑潮南海分支南侧的大冷涡(Shaw 等, 1996)(图 3a)。

与参照试验相比较, 同化试验得到的环流结构主要特征与之相似, 但环流细节更为复杂。同化得到的黑潮南海分支(或称为东沙海流)以北的高 SSH 暖舌更为西进, 且强度有所增加(图 3c), 更具有某种类似“黑潮分离流环”的状态(李立等, 1997)。南海海域(10°N 以南)的环流得到加强, 这与越南南部外海上升流加强有关。

现选取南海中西部的一个经向剖面来分析海面高度资料同化对次表层海洋的影响。图 4a 和 4b 为积分 25 天时位于 110.75°E — 111.25°E 处同化改变的经向垂直流速分别叠加温度、盐度场的剖面图。从图 4 可以看出, 在次表层(混合层以下至 300m)处, 不论是流场还是温盐场都有一定的改变。从剖面北部经向流的改变来看, 修正达到了原来量值的 20% 左右。海南岛外海暖异常也印证了来自吕宋的 SSH 暖舌西进和黑潮南海分支(或称东沙海流)强化的现象(图 4a)。与此同时, 来自巴士海峡的高盐水的信号也很明显(图 4b)。

2.2 对环流中尺度结构的影响

由于模式应用了气候风场进行强迫, 一些中小尺度风应力的涡旋被滤掉, 参照试验得到的 SSH 场的中小尺度信号较弱。而经过海面高度资料同化后, 因为 TOPEX 资料中存在中尺度的信号, 这种信号被带入模式, 增强了 SSH 场中的中尺度现象。这一明显的变化在图 3c 中已有清晰的表现。

图 3c 初步揭示资料同化强化南海中尺度活动的的能力, 这一现象可以通过比较参照试

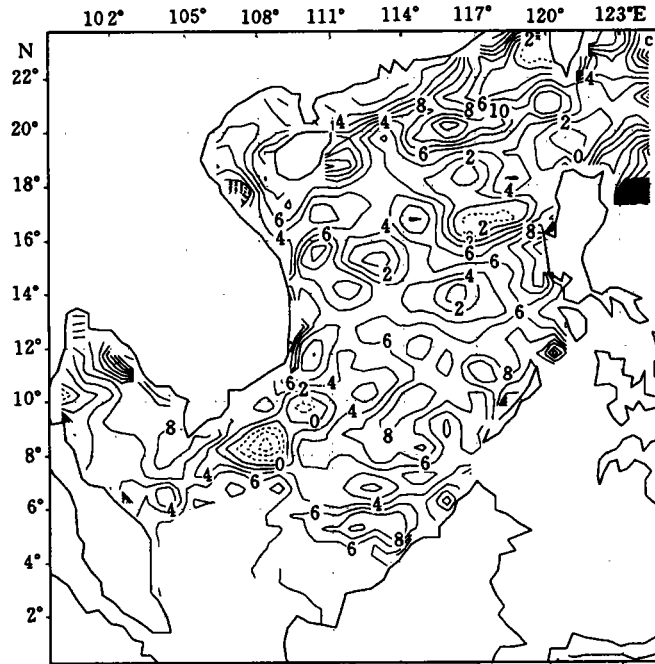


图 3 第 25 个模式天时刻同化试验与参照试验的海面高度与流场以及两者的差异

Fig. 3 SSH and current field in assimilating run and control run for the 25th day and their differences
a. 参照试验; b. 同化试验; c. b 减去 a 的差值场。
等值线间隔: a、b 为 5cm; c 为 2cm

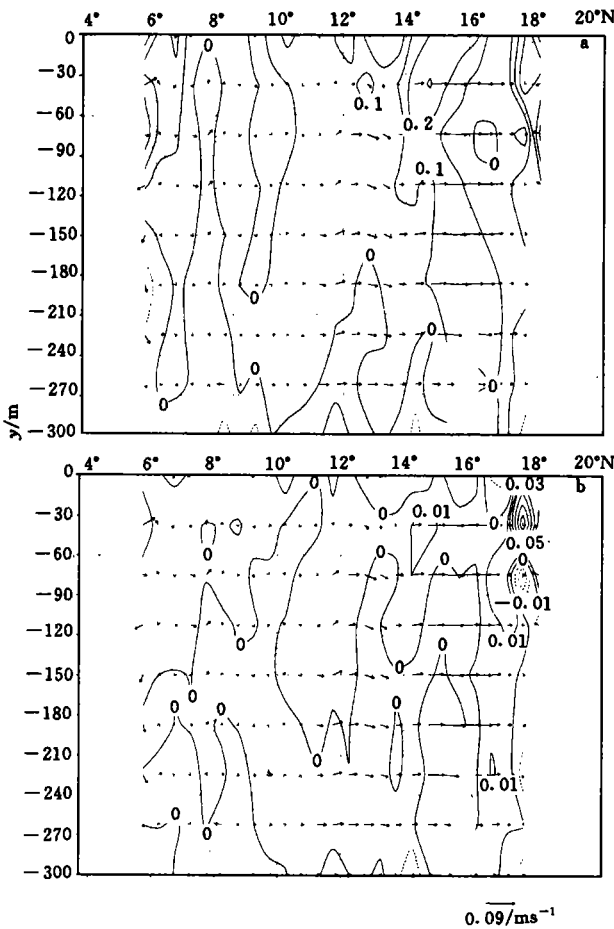


图4 经向剖面上同化试验与参照试验的
环流及温、盐差值场

Fig. 4 Differences of current, temperature and salinity fields between control run and assimilating run at the meridional section

a. 差值环流叠加温度差值场, 温度等值线间隔为 0.1℃;

b. 差值环流叠加盐度差值场, 盐度等值线间隔为 0.01

该剖面分布为 110.5° 和 111.25° 两个断面平均的合成图, 流场由

v 分量和 w 分量组成, v 分量矢量标尺见图右下处,

单位为 m/s ; w 分量只代表方向, 不示量值。

垂直方向 (y 轴) 向上取为正, 坐标单位为 m

感资料中清晰看到的现象。

海面高度资料的混合同化试验能够有效地修正南海环流的大尺度特征。这种修正不仅明显地反映在表层环流场中, 而且对南海次表层动力、热盐结构也有一定的影响。同化试验能够加强瞬变的中等尺度涡旋, 体现了南海海洋天气尺度涡被资料同化所“唤醒”。

应该特别指出的是, 文中所涉及的同化方法较为简单, 而且没有考虑遥感信息的垂向投影技术。今后将在南海海洋资料同化中尝试张弛法、伴随法, 逐步实现对南海试验性海

验和同化试验的扰动动能差异来得到量化的描述。图 5a 和图 5b 分别为表层及次表层 (100m) 深处同化对扰动动能的改进。

定义扰动流速:

$$\vec{u}' = \vec{u} - \bar{\vec{u}} \quad (3)$$

其中, $\bar{\vec{u}}$ 为模式积分 50 天时间平均量。

扰动动能:

$$PKE = \frac{1}{2} (u'^2 + v'^2) \quad (4)$$

在南海北部的表层, 除去吕宋海峡及菲律宾西北海域参照试验的中尺度活动受一定抑制以外, 可以看到来源于黑潮的中尺度涡给西侧带来的扰动动能的正距平 (图 5a)。在南海的其它海域, 扰动动能的差值场也以正距平为主。此处不妨将这一现象称为资料同化对南海海洋天气尺度涡的“唤醒”。从图 5b 可以看到, 资料同化带来的“唤醒”影响已经达到次表层, 这是与图 4 看到的次表层流场和温盐场的改变相一致的。

3 结语

卫星遥感海面高度资料可以较好地引入数值计算模式中, 修正数值模拟的结果。因为数值计算的自由度较大, 当遥感资料具有较强的可信度时, 将其与数值模拟结合起来会使人们更好地分析所关心的一些海洋现象, 尤其是一些可以在遥

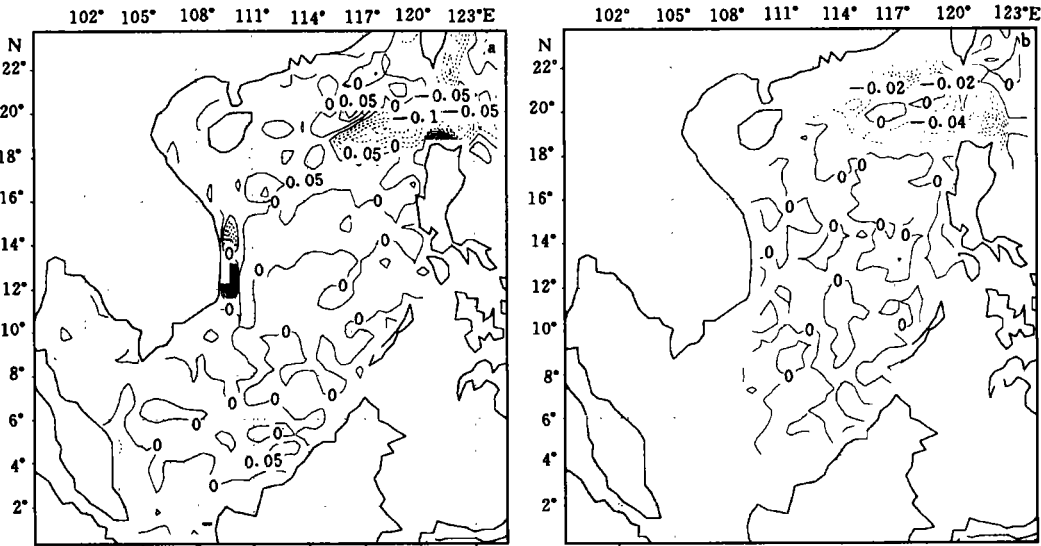


图 5 同化实验与参照实验扰动动能的差值场(m^2/s^2)

Fig. 5 Difference in the perturbation kinetic energy (m^2/s^2) between the assimilating run and the control run
a. 表层(0m层),等值线间隔为 0.5;b. 次表层(100m层)等值线间隔为 0.02;实线为正,虚线为负

洋环境预测系统的改进和完善。

致谢 本文工作得到了甘子钧研究员的指导;南海 POM 模式由中国科学院大气物理研究所游小宝提供;TOPEX 资料承蒙美国 NASA 所属 JPL 的 PO.DAAC 资料中心惠允使用;两位审稿者的意见使本文有了较大改进,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

王东晓,兰 健,吴国雄等,1999. 一个海洋环流模式伴随同化系统的初步试验. 自然科学进展,9(9):824—833

王东晓,周发秀,秦曾灏,1996. 南海上层海洋环流两层半模式的数值模拟 I. 闭边界海盆季节性环流. 海洋学报,18(5):30—40

李 立,苏纪兰,许建平,1997. 黑潮的南海分离流环. 热带海洋,16(2):43—57

苏纪兰,许建平,蔡树群等,1999. 南海的环流和涡旋. 见丁一汇、李崇银编. “南海季风爆发和演变及其与海洋的相互作用”. 北京:气象出版社,66—72

杨 昆,施 平,王东晓等,2000. 冬季南海北部中尺度涡旋的数值研究. 海洋学报,22(1):27—34

黄企洲,王文质等,1992. 南海海流和涡旋概况. 地球科学进展,7(5):1—9

Anderson D L T, Sheinbaum J, Haines K, 1996. Data assimilation in ocean models. Rep Prog Phys, 59: 1—58

Blumberg A F, Mellor G L, 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: Heaps N ed. Coastal and Estuarine Sciences, 5. Washington, D C: American Geophysical Union, 208

Busalacchi A J, 1997. Oceanic observations In: M Ghil, K Ide, A Bennett ed. Data assimilation in Meteorology and Oceanography: Theory and practice. Tokyo: Meteorological Society of Japan, 131—154

De Mey P, 1997. Data assimilation at the oceanic mesoscale: A review. J Meteorol Soc Japan, 75(1B): 415—427

Fu L L, Christensen E J, Yamarone C A *et al*, 1994. TOPEX/POSEIDON mission overview. J Geophys Res, 99: 24 369—24 382

Ghil M and Malanotte-Rizzoli P, 1991. Data Assimilation in Meteorology and Oceanography. Adv Geophys, 33: 141—266

- Hellerman S, Rosenstein M, 1983. Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates. *J Phys Oceanogr*, 13:1 093—1 104
- Malanotte-Rizzoli P, 1996. *Modern Approaches to Data Assimilation in Ocean Modeling*. Oxford: Elsevier Science td, 455
- Shaw P T, Chao S Y, Liu K K, *et al*, 1996. Winter upwelling off Luzon in the northeastern South China Sea. *J Geophys Res*, 101(C16):16 435—16 448
- Smedatad O M, Carnes M R, Fox D N, 1995. ERS-1 and TOPEX/Poseidon altimeter sea surface height assimilation in a 6-layer primitive equation model of the Pacific Ocean. *Second International Symposium on Assimilation of Observations in Meteorology and Oceanography*. Geneva: WMO, PWPR Report Series, WMO/TD, No. 651, I :323—328
- Wang Dongxiao, Qin Zenghao, Li Yongping, 1997. Modelling of the upper oceanic circulation in the South China Sea during Northeast Monsoon. *Chin J Oceanol Limnol*, 15(3):242—251
- Wyrtki K, 1961. Physical oceanography of the southeast Asia waters. *NAGA Report*, 2:1—195

ASSIMILATION EXPERIMENT OF BLENDING TOPEX ALTIMETER DATA IN THE SOUTH CHINA SEA

WANG Dong-Xiao, SHI Ping, YANG Kun, QI Yi-Quan

(*South China Sea Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510301*)

Abstract The Princeton Ocean Model(POM) is applied here to assimilate TOPEX/Poseidon altimeter data in the South China Sea(SCS) in winter with a blending scheme. The blending coefficient, which weighs TOPEX sea surface height(SSH) over the modeled value, is derived from the standard deviations in SSH both from the response of POM to winter monsoon forcing and corresponding TOPEX data.

Comparison between the control run and the assimilating run indicates that blending TOPEX altimeter data can modify reasonably the large-scale circulation in the SCS, such as the dynamic process relevant to the impact on the northeastern SCS caused by Kuroshio's intrusion. In the assimilating run the mid-scale eddy activity is enhanced due to the more synoptic eddies in the SCS, triggered by such blending assimilation. Modification can be found in both the dynamic and thermal structures, not only at the surface, but also at the sub-surface.

Key words Blending assimilation, Sea surface height, South China Sea, Synoptic eddy