

南海北部集合卡曼滤波同化 SST 试验*

舒业强¹, 隋丹丹¹, 王伟文¹, 肖贤俊²

(1. 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境动力学重点实验室, 广东 广州 510301; 2. 国家气候中心, 北京 100081)

摘要: 基于 POM (Princeton Ocean Model) 建立一个南海北部集合卡曼滤波的同化模式, 主要用于卫星海表面温度的同化。模式的平均水平分辨率为 5km, 垂向分层为 20 层; 侧边界条件嵌套到一个大范围的南海海洋模式, 在同化方案上采用一个均方根集合卡曼滤波算法, 避免观测的扰动; 适当引入局地化算子, 消除样本在空间上的虚假相关, 同时增加集合样本的自由度。该同化试验同化了 2008 年夏季 6 月到 7 月的 GHRSSST (Global High-Resolution Sea Surface Temperature), 然后采用 2008 年夏季 SCOPE (Northern South China Sea Coastal Oceanographic Process Experiment) 航次的温、盐数据对同化结果进行评估。结果表明, 相对于未同化模式模拟结果, 同化模式温度的改善比较明显, 表现在加强了南海北部的上升流, 校正了海表温度的偏差, 改善了温度的垂向分布。由于集合卡曼滤波是一种多变量调整的同化方法, 同化 SST 不仅能改善表层与次表层的温度分布, 而且对流场和盐度的调整也比较明显。

关键词: 集合卡曼滤波; 同化; 南海北部; SST

中图分类号: P731.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2010)05-0010-07

SST assimilation experiment in the northern South China Sea using ensemble Kalman filter

SHU Ye-qiang¹, SUI Dan-dan¹, WANG Wei-wen¹, XIAO Xian-jun²

(1. Key Laboratory of Tropical Environmental Dynamics, South China Sea Institute of Oceanology, CAS, Guangzhou 510301, China; 2. National Climate Center, Beijing 100081, China)

Abstract: An ensemble Kalman filter (EnKF) scheme is applied to assimilate sea surface temperature (SST) in the northern South China Sea (SCS) using the Princeton Ocean Model (POM). The assimilation model has a horizontal resolution of 5km and a vertical resolution of 20 layers. Lateral boundary conditions are provided by a larger domain SCS model. A square root filter is applied to avoid perturbations induced by observations. Localization is used in the assimilation system to remove pseudo correlations and to add rank of ensemble. The Global High-Resolution Sea Surface Temperature (GHRSSST) in June and July 2008 is assimilated in this study. To validate the assimilation results, hydrographic data from the Northern South China Sea Coastal Oceanographic Process Experiment (SCOPE) cruises are used. The results show that the assimilated SST can effectively improve the temperature distribution not only at surface but also in the subsurface. After the SST assimilation, upwelling in this region is strengthened and mixed layer is deepened. At the same time, because the EnKF is a multivariable assimilation scheme, salinity and currents are also corrected by assimilating SST.

Key words: ensemble Kalman filter; assimilation; northern South China Sea; SST.

南海是热带地区最大的边缘海, 其北部和南部两个宽广陆架区的平均水深小于 200m, 北部陆架区的平均宽度为 150km^[1], 从台湾岛向海南岛延伸到北纬 18°N。南海北部的环流结构主要受冬夏反向

季风, 海底地形, 南海大尺度环流以及南海与东海、北太平洋水交换等因素控制^[2]。在夏季, 南海北部上升流和珠江冲淡水这两个非常明显的物理现象备受人们关注^[2-3]。发展南海北部的海洋预报对于合理管

收稿日期: 2009-09-28; 修订日期: 2009-12-01。蔡卓平编辑

基金项目: 财政部行业专项(GYHY200706005); 中国科学院南海海洋研究所青年人才领域前沿项目(SQ200814); 中国气象局风云气象卫星遥感开发与应用项目(FIDAF-2-05)

作者简介: 舒业强(1978—), 男, 湖南省临澧县人, 博士, 主要从事海洋资料同化研究。E-mail: Shuyeq@scsio.ac.cn

* 感谢中国科学院南海海洋研究所王东晓研究员与中国科学院大气物理研究所朱江研究员对此工作给予的指导。

理区域海洋资源, 预警可能存在的海洋环境危险等方面都有重要的意义。然而, 由于不准确的大气强迫、开边界条件以及参数化过程等原因, 海洋模式存在一定的不确定性。随着卫星观测资料的不断增加, 最近几十年来海洋资料同化的发展使得海洋预报能力得到很大提高。

卫星观测只能提供一些海洋表面的信息, 而且这在时间或者空间上的分布都是不连续的。如何有效地同化卫星资料是近些年来海洋资料同化研究的一个重要内容。早期同化 SST (sea surface temperature) 的方法是利用松弛逼近、最优插值或者三维变分直接同化^[4-8], 这种同化方式会随着模式积分和观测信息迅速衰减, 不能有效地校正海洋次表层的模式变量, 而且直接同化会造成动力上的不平衡^[9]; 另一种较为有效的同化方法是投影表层的观测信息到次表层, 然后利用三维变分或者最优插值逐层同化^[9-11]。南海的资料同化研究近年来备受关注, Wu 等^[12]、王东晓等^[13]、肖贤俊等^[14]、高山等^[15]在南海对卫星高度计资料的同化进行研究; Shu 等^[16]在南海探讨了使用往下垂向投影海表面信息的方法同化卫星 SST。但以上在南海的同化研究都是基于松弛逼近、三维变分或最优插值的方法, 这些同化方法在同化过程中没有考虑各模式变量之间的协相关, 在一个复杂的陆架海洋过程中可能会导致动力上的不平衡。

集合卡尔曼滤波是 Evensen 等^[17]在 1994 年提出的基于蒙特卡罗方法的顺序同化算法, 它根据集合预报的结果估计模式状态变量之间的协方差, 然

后联合背景场、观测资料得到分析场集合, 继续向前预报。Burgers 等^[18]在 1998 年探讨了使用蒙特卡罗方法生成初始样本、模式噪音以及观测扰动; Pham^[19]在 2001 年对采样方案进行了进一步的改进; Anderson^[20]在 2001 年, Whitaker 和 Hamill^[21]在 2002 年, Evensen^[22]在 2004 年都发展了一些均方根的算法, 这些算法不需要扰动观测。基于这些理论研究, 近些年来集合卡曼滤波在实际海洋资料同化中也开始被广泛关注^[23-26]。集合卡曼滤波相对于最优插值和三维变分等同化方法的先进性在于前者的背景误差协方差矩阵是从基于模式无偏的条件下从样本集合直接得到的, 这样背景误差协方差矩阵是随着预报的不断更新而更新, 而且它可以包括所有模式预报量之间的协方差。因而在同化卫星遥感资料的时候, 海表面信息会随着背景误差协方差矩阵的结构传到海洋的次表层, 而且能同时对模式其他变量进行更新, 这样不会造成只更新被同化变量而导致模式动力不平衡的困难。此文的研究目的是在南海北部这样一个复杂的陆架区域模式里, 探讨利用先进的集合卡曼滤波同化方法对卫星海表温度资料的同化。

1 方法和数据

1.1 模式

本次同化试验所采用的是 POM 模式。水平采用曲线正交网格, 平均分辨率为 5km, 垂向是 sigma 坐标, 共 20 层。水深数据采用 ETOPO2.V2^[27] (the 2-min earth topography); 最小水深为 5m, 最大水深为 2800m。模式区域位于南海北部(图 1)。模式采用

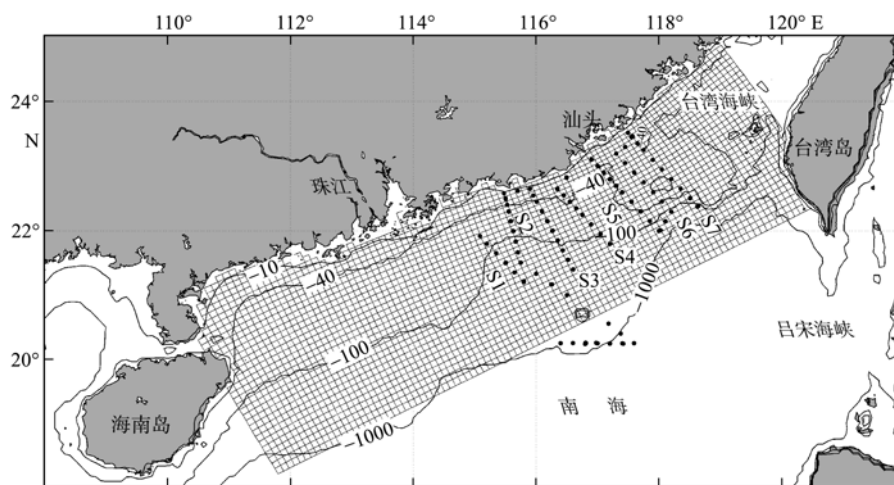


图 1 南海北部地形及模式网格

黑色线分别代表 10、40、100、1000 米水深; 黑色圆点为 SCOPE 航次 CTD 观测的站位

Fig. 1 Bathymetry of the northern South China Sea and model grid

The contours mark water depth of 10, 40, 100 and 1000m, respectively; the black dots indicate the position of the SCOPE cruise and CTD stations

WOA01^[28] (world ocean atlas 2001) 的温、盐, NCEP^[29] (National Centers for Environmental Prediction) 的气候态风场从静止开始初始化; 模式的边界嵌套到一个大区域的南海区域海洋模式^[16]。模式积分 10 年达到平衡状态后, 控制试验从 2008 年的 1 月 1 日开始积分, 到 2008 年 8 月 1 日结束。模式采用 NCEP 的风场、2m 处温度、相对湿度、表面大气压强、云覆盖率、降雨以及净短波辐射作为强迫场; 侧边界条件同样嵌套到较大范围的南海区域模式。

1.2 集合卡曼滤波

样本数为 N 的模式集合为 $A=(\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_i, \dots, \psi_N)$, 其中 ψ_i 是第 i 个模式样本, 包含了模式中的预报量温度(T), 盐度(S), 速度(U, V), 以及海表面高度(SSH)。背景误差协方差矩阵 P_b 为:

$P_b = \frac{A'(A)^T}{N-1}$, 这里 $A' = A - \bar{A}$, 为各个样本相对于样本平均的扰动量, 上标 T 表示矩阵的转置, N 为样本集合的个数, 在此为 100。

并且标准的集合卡曼滤波公式可以表达为:

$$A^a = A + P_b H^T (H P_b H^T + R_o)^{-1} \cdot (D - H A) \quad (1)$$

上式中 H 为双线性插值的观测算子, R_o 是观测误差协方差矩阵, D 为观测集合, A^a 为同化后的分析场。为了减少模式集合中的虚假相关, 同时增加样本的自由度^[30], 我们采用了一种局地化的处理办法:

$$A^a = A + C o (P_b H^T) \cdot [(C o (H P_b H^T) + R_o)^{-1}] \cdot (D - H A) \quad (2)$$

其中 C 为局地化因子, 它是一个负距离平方反比的指数衰减的结构:

$$C(i, j) = e^{-\frac{(r_{i,j}^2/r_o^2) - (h_z^2/h_o)}{2}} \quad (3)$$

水平局地化半径取 r_o 为 140km, 垂向局地化半径 h_o 为 100m, $r_{i,j}$ 为第 i 个模式格点与第 j 个模式格点之间的水平距离, h_z 为第 i 个模式格点与第 j 个模式格点之间的垂向距离。式(2)中 “ o ” 代表 Schur 乘积: $(C o P_b)_{i,j} = C(i, j) P_b(i, j)$ 。

为了避免同化过程中观测扰动, 本文采用了 Whitaker 和 Hamill^[21] 在 2001 年的均方根算法。这种均方根滤波算法是一种将样本集合平均与集合扰动量分别进行更新的计算方法:

$$\bar{A}^a = \bar{A} + K(\bar{D} - H\bar{A}) \quad (4-1)$$

$$A'^a = A' + \tilde{K}(-HA') \quad (4-2)$$

$$\tilde{K} = \left[1 + \sqrt{\frac{R_o}{C o (H P_b H^T)}} \right]^{-1} \cdot K \quad (4-3)$$

$$K = C o (P_b H^T) \cdot [C o (H P_b H^T) + R_o]^{-1} \quad (4-4)$$

式子中 “ $-$ ” 表示集合平均, “ \sim ” 表示扰动量, K 为卡曼增益矩阵。

把 2008 年 6 月 1 日的模式状态作为初始场, 对模式集合的温度使用 Evensen^[22] 在 2004 年的方法进行扰动, 所有的强迫场也使用类似的扰动方式, 这样得到 100 个初始的样本及其强迫场; 然后对模式积分 20 天, 使其每个样本在动力上平衡。从 6 月 21 日开始同化, 同化 10 天后, 把 2008 年 7 月 1 日到 7 月 15 日的结果用来分析。

1.3 数据

研究中被同化的资料是每日 GHR SST (Global High-resolution Sea Surface Temperature) 其中的一个产品: OSTIA (Operational SST and Sea Ice Analysis) 数据。这套数据的水平分辨率是 4km。Xie 等^[31] 曾验证过这套数据, 发现其质量较好, 但在水深小于 40m 的时候还是有一定的偏差, 因此在试验中只有水深大于 40m 处的 SST 数据才被用来同化。为了较少计算量, 在同化之前, 先将卫星 SST 数据插值到 0.25 度的空间分辨率上来稀疏观测数据。根据 Xie 等^[31] 的结论, 以及数据的质量说明, 将 SST 的误差设定为 0.5。在同化过程中, 假设观测之间是不相关的, 观测误差协方差为一对角矩阵, 对角线上的元素为观测方差, 即 0.25。

为了证实同化结果, 使用航次 “南海北部陆架区海洋学过程实验” (NSCS Coastal Oceanographic Process Experiment, SCOPE) 的 CTD 观测的温、盐数据。SCOPE 航次的调查时间是从 2008 年 6 月 30 日到 2008 年 7 月 14 日。由于 CTD 仪器的精度较高(系统误差范围为: 温度 0.001, 盐度 0.002‰), 即使加上压力传感器在深度上的误差以及人为产生的随机误差, CTD 观测的温、盐数据的误差也远小于卫星 SST 观测的误差, 因此将 CTD 观测的温、盐数据当成真实值来评估同化的结果。

2 同化结果

2.1 温度结果分析

夏季受西南季风的影响, 南海北部陆架区的环流主要是沿岸的东偏北的流场。在风场、地形等因素的影响下, 南海北部的流场在 117°E 附近存在着较明显的离岸流, 从而在南海北部形成夏季的上升流^[3]。图 2 对比了 SCOPE 航次期间平均的模式 SST、同化后的 SST 与观测的 GHR SST。在这里用来同化

的 GHRSSST 与用来证实其结果的 GHRSSST 只是分辨率不同, 这两种资料会存在着一种较强的相关。但在缺少大面积观测资料来检验同化结果的情况下, 同样可以用其来检查同化和模式与观测的匹配性。从结果看, 模式在一定程度上能模拟出南海北部夏季的上升流, 以及与东经 116°E 附近的离岸流匹配的温度分布等。但相对于观测, 模式的海表面温度在模式中部区域明显偏高。同化对模式海表温度的改善主要集中表现在两个方面, 一个是同化后相对于观测, 上升流强度明显增加。另一个改善是能有

效校正模式中部区域模拟结果偏暖的情况。

图 3 是温度沿 SCOPE 航次的 5 个温度剖面。对比模式与观测, 发现模式在混合层内的温度偏高, 混合层深度偏浅, 这可能是因为模式中没有潮汐, 而且风场是再分析资料给定的, 相对于实际风场更平滑, 以及模式中垂向混合参数化方案不够精确等, 使得模拟的混合层深度偏浅。同化后, 混合层内的温度相对模式明显改善, 主要表现在混合层内温度降低, 更接近于观测的温度, 而且混合层的深度有一定程度的增加。

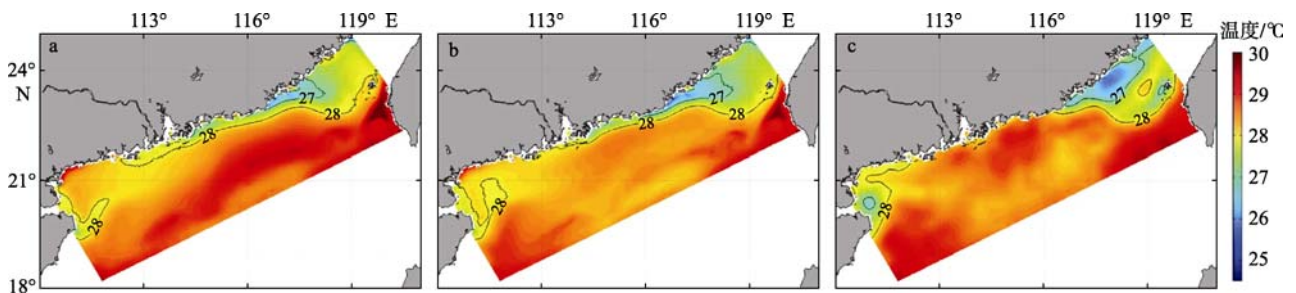


图 2 航次期间平均的模拟的 SST(a), 同化的 SST(b), 卫星观测的 GHRSSST(c)

Fig. 2 Mean SST during the SCOPE cruise of (a) model, (b) assimilation and (c) GHRSSST

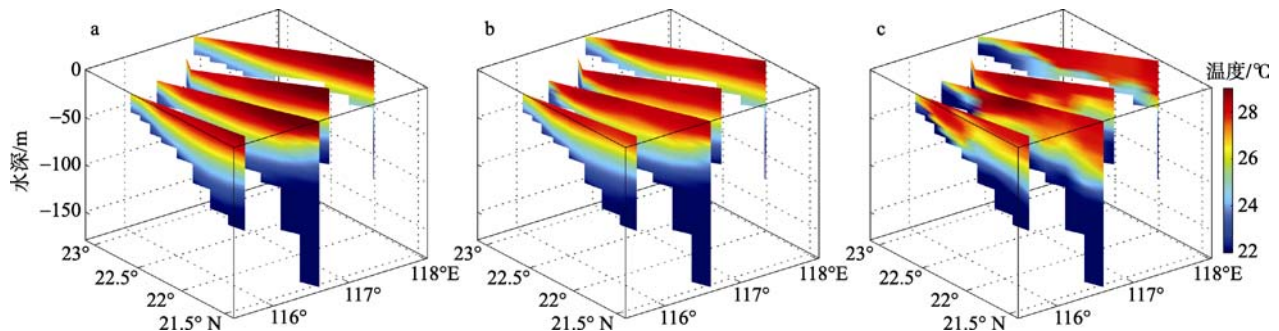


图 3 沿 SCOPE 航次 S2, S3, S4, S5 断面的温度分布

a. 模式结果; b. 同化结果; c. SCOPE 航次观测; 垂向坐标表示水深, 水平坐标对应经、纬度

Fig. 3 Vertical temperature sections along S2, S3, S4 and S5 of the SCOPE cruise of (a) model, (b) assimilation and (c) observations.

图 4a 是相对于 SCOPE 航次所有 CTD 观测温度的均方根误差(root mean square error, RMS)随深度的分布。同化 SST 能有效减小表层(0—20m)的 RMS, 但在 20—40m 之间, 同化后的 RMS 反而大于没有同化的结果; 在 40m 以下, 同化后 RMS 相对于没有同化的明显减小。

2.2 盐度结果分析

集合卡曼滤波是一种多变量同时更新的同化方法。背景误差协方差矩阵中同时包含了各个变量间协相关的信息, 因此同化 SST 应该对其余变量也产生一定的影响。夏季是珠江流域的丰水季节, 珠江河口的淡水在流场的作用下往东扩展, 一直可以到

达台湾浅滩附近^[29]。从图 5 可以看到, 模式模拟的珠江淡水盖的分布与传播途径是由于平流的作用从珠江口往东延伸, 并在 117°E 附近随流场有离岸的趋势。但对比于观测, 图 5c 表明模式的盐度明显偏低, 这可能是由于 2008 年夏季 SCOPE 航次期间珠江流域的降水量较往年要大, 而在模式中使用的是气候态的珠江淡水流量, 因此, 得到的模式盐度结果较 2008 年的盐度要高得多。但从图 5b、d 中可知, 同化 SST 能在一定程度上校正模式的盐度场; 同化后的盐度虽然与观测的盐度还存在一定的差距, 但较模式模拟的结果而言, 其盐度明显降低, 改善较为明显。

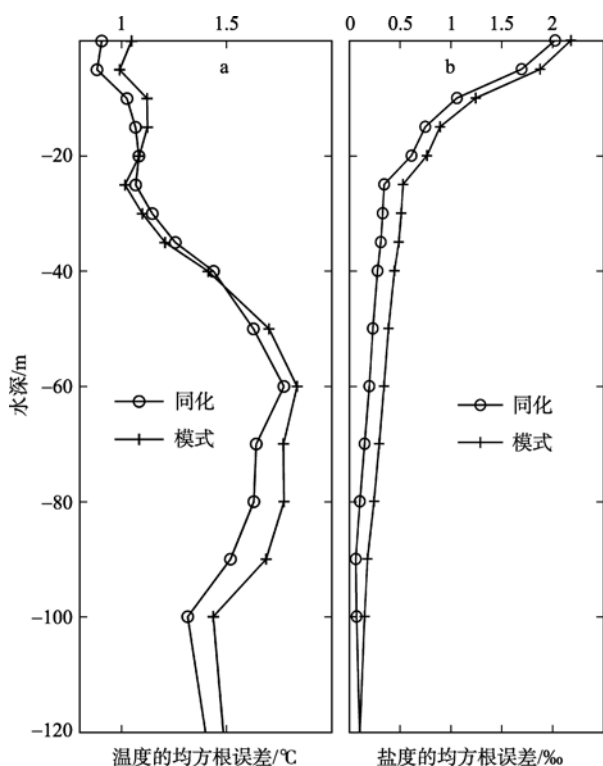


图 4 沿所有航次站位相对于 CTD 观测的模式模拟与同化模拟的 RMS 深度分布图

a. 温度的 RMS; b. 盐度的 RMS.

Fig. 4 RMSE from model and assimilation of (a) temperature and (b) salinity along all CTD stations of the SCOPE cruise

图 6 是盐度沿 SCOPE 航次的 5 个断面的分布。在垂向剖面上盐度的改善同样比较明显, 这种改善包含了两部分的情况。一部分是珠江冲淡水盐度在垂向分布上的改善, 这 5 个剖面上均能较明显地体现出来, 特别是在第 5 断面尤为显著, 这可能是因为如图 1 所示, 第 5 断面正处于地形变化显著的位置。在这里, 由于地转的作用, 流场会明显转向, 与之相应的温度以及盐度对于强迫场扰动的感应会较为敏感, 这样在此断面上温度与盐度的协方差会较大。另一部分的改善体现在 100m 以上, 模式的盐度相对于观测的盐度偏高, 同化后, 所有 5 个断面在 100m 以浅的深度上, 盐度的改善均较明显。

定量的误差分析表明, 集合卡曼滤波方法同化 SST 能有效减小盐度的误差(图 4b)。与对温度的改善情况有所不同的是, 同化 SST 在 120m 以上的整个垂向剖面上均能减小模拟的 RMS。

2.3 流速剖面分析

同样的道理, 由于集合卡曼滤波的背景误差协方差矩阵的多变量特征, 作者希望同化 SST 在改善温度的同时, 也能对流场进行有效改进, 以避免在陆架区域同化 SST 引起模式动力上的不平衡。由于缺乏有效的流场观测, 作者将流场的结果对比于温度与盐度的改善, 从而来分析流场是否具有与温、

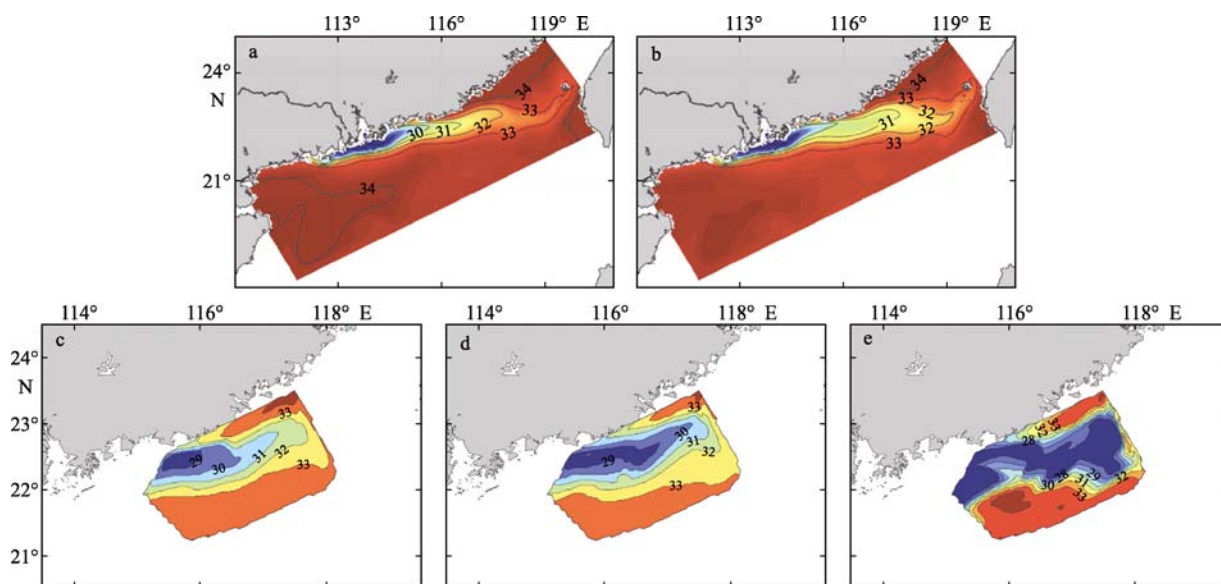


图 5 航次期间海表面盐度(‰)分布

a: 模拟的航次期间平均的 SSS; b: 同化的航次期间平均的 SSS; c: 模拟结果的 SSS 插值到 CTD 观测站位; d: 同化结果的 SSS 插值到 CTD 观测站位; e: SCOPE 航次 CTD 观测的 SSS

Fig. 5 Distribution of SSS

a: mean modeled SSS during the cruise; b: mean assimilated SSS during the cruise; c: SSS distribution of model in the cruise domain; d: SSS distribution of assimilation in the cruise domain; e: SSS distribution of observations from CTD of SCOPE cruise

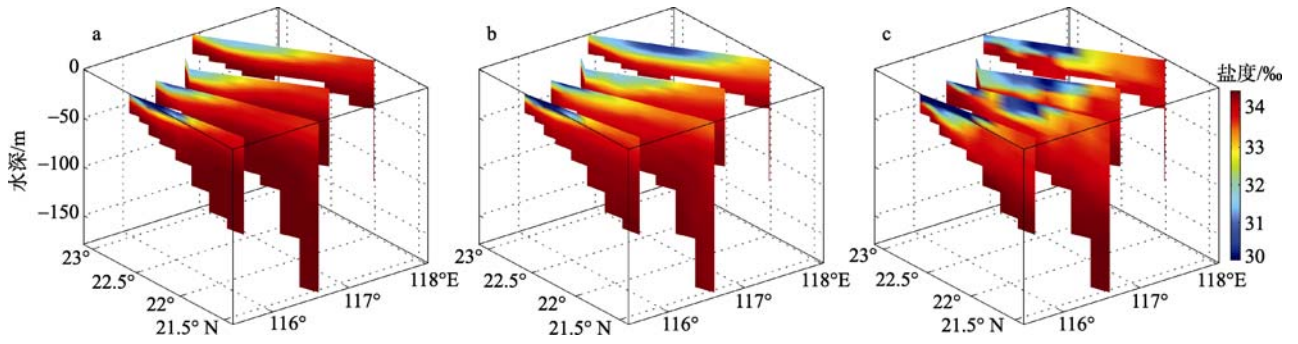


图 6 沿 SCOPE 航次 S2, S3, S4, S5 断面的盐度(‰)分布

a: 模式结果; b: 同化结果; c: SCOPE 航次观测

Fig. 6 Vertical salinity sections along S2, S3, S4 and S5 of the SCOPE cruise of (a) model, (b) assimilation and (c) observations.

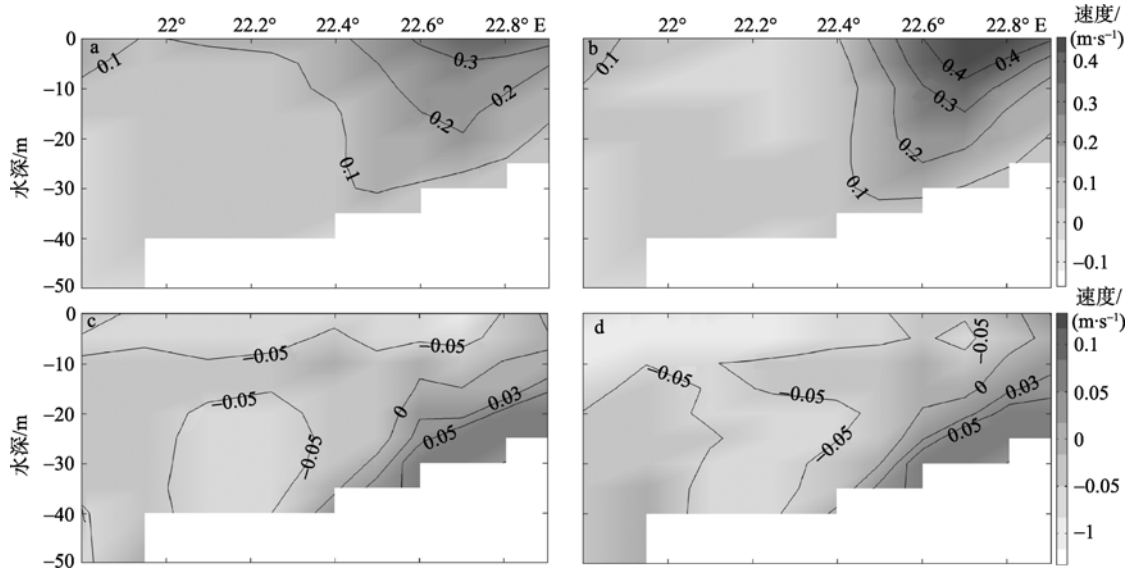


图 7 沿 S5 断面的速度($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)分布

a: 模式的沿岸速度; b: 同化的沿岸速度; c: 模式的垂直岸的速度; d: 同化的垂直岸的速度

Fig. 7 Along-shore velocity ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) of (a) the control run and (b) the assimilation along Section 5; cross-shore velocity of (c) the control run and (d) the assimilation along Section 5

盐在物理机制上一致的改善。图 6 揭示了模式与同化的沿岸速度与垂直岸速度在 S5 剖面上的分布。从前面的分析可知, 同化 SST 增强了沿流向向东扩展的珠江冲淡水, 降低了其盐度, 而冲淡水的盐度主要是通过平流作用往东扩展的, 因此伴随着盐度的改善, 沿岸的速度必然增加(图 7a 和 7b)。另外从图 2 知, 同化 SST 也适当扩大了上升流的范围。从图 7c 和 7d 垂直岸的速度分布中“0”线可以看出, 同化后相对于同化前, 其 0 线在岸边露头的区域扩大, 且沿海底向岸爬升的趋势有一定的增强。这正说明上升流增强。

3 结论

作者在南海北部发展了一套集合卡曼滤波同化系统, 并对此系统在 2008 年夏季进行了同化 SST 的

试验, 然后利用 SCOPE 航次期间的 CTD 的温度、盐度观测对此系统进行了评估, 得到以下结论:

1) 集合卡曼滤波方法同化 SST 能有效地改进模式在表层及此表层的温度分布, 改善南海北部上升流的模拟, 能一定程度上校正模式混合层的深度。

2) 集合卡曼滤波的背景误差协方差是随时间发展的, 而且能体现模式各变量之间的协相关, 是一种多变量同时更新的同化方法。同化 SST 在改善温度分布的同时, 盐度场的改善也很明显, 其表现在改善了模式中珠江冲淡水盐度过高的问题, 同时一定程度上校正了模式在 100m 浅的区域盐度偏高的问题。

3) 集合卡曼滤波同化 SST 在改善温度和盐度分布的同时, 流场也随之更新, 主要表现在于冲淡水盐度降低相匹配的沿岸流速的增加, 以及与上升流区域增加相匹配的垂直岸的速度的变化。

参考文献

- [1] HONG BO, WANG DONGXIAO. Diagnostic analysis on the northern South China Sea winter counter-wind current[J]. Chin Sci Bull, 2006, 51(Supp 2): 9–16.
- [2] CHEUNG Y Y. Modeling upwelling circulation over continental shelf in the northern South China sea [D]. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology, 2006: 11–14.
- [3] GAN JIANPING, LI LI, WANG DONGXIAO, et al. Interaction of a river plume with coastal upwelling in the northeastern South China Sea[J]. Cont Shelf Res, 2009, 29 (4): 728–740.
- [4] CHEN D, ZEBIAK S E, CANE M A. Initialization and predictability of a coupled ENSO forecast model[J]. Mon Weather Rev, 1997, 125: 773–788.
- [5] ROSATI A, MIYAKODA K, GUDGEL R. The impact of ocean initial conditions on ENSO forecasting with a coupled model[J]. Mon Weather Rev, 1997, 125: 754–772.
- [6] OBERHUBER J M, ROECKNER E, CHRISTOPH M, et al. Predicting the '97 El Niño event with a global climate model[J]. Geophys Res Lett, 1998, 25(13): 2273–2276.
- [7] SYU H H, NEELIN D. ENSO in a hybrid coupled model. Part II: prediction with piggyback data assimilation[J]. Climate Dyn, 2000, 16(1): 35–48.
- [8] TWIGT D J, DE GOEDE E D, SCHRAMA E J O, et al. Analysis and modeling of the seasonal South China Sea temperature cycle using remote sensing[J]. Ocean Dyn, 2007, 57(4/5): 467–484.
- [9] TANG Y, KLEEMAN R, MOORE A M. SST assimilation experiments in a tropical Pacific Ocean model[J]. J Phys Oceanogr, 2004, 34: 623–642.
- [10] BELL M J, FORBES R M, HINES A. Assessment of the FOAM global data assimilation system for real-time operational ocean forecasting[J]. J Mar Syst, 2000, 25(1): 1–22.
- [11] EZER T, MELLOR G L. Data assimilation experiments in the Gulf Stream region: how useful are satellite-derived surface data for nowcasting the subsurface fields?[J] J Atmos Oceanic Technol, 1997, 14: 1379–1391.
- [12] WU C, SHAW P, CHAO S Y. Assimilating altimetric data into a South China Sea model[J]. J Geophys Res, 1999, 104: 29987–30005.
- [13] 王东晓, 施平, 杨昆, 等. 南海 TOPEX 海面高度资料的合同化试验[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(1): 101–108.
- [14] 肖贤俊, 王东晓, 徐建军. 2000 年夏季南海西南部环流同化实验[J]. 科学通报, 2006, 51(增刊 2): 27–32.
- [15] 高山, 王凡, 李明悝, 等. 中尺度涡的高度计资料同化模拟[J]. 中国科学: D 辑(地球科学), 2007, 37(12): 1669–1678.
- [16] SHU YEQIANG, ZHU JIANG, WANG DONGXIAO, et al. Performance of four sea surface temperature assimilation schemes in the South China Sea[J]. Cont Shelf Res, 2009, 29(11/12): 1489–1501.
- [17] EVENSEN G. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics[J]. J Geophys Res, 1994, 99: 10143–10162.
- [18] BURGERS G, VAN LEEUWEN P J, EVENSEN G. Analysis scheme in the ensemble Kalman filter[J]. Mon Weather Rev, 1998, 126: 1719–1724.
- [19] PHAM D T. Stochastic methods for sequential data assimilation in strongly nonlinear systems[J]. Mon Weather Rev, 2001, 129: 1194–1207.
- [20] ANDERSON J L. An ensemble adjustment Kalman filter for data assimilation[J]. Mon Weather Rev, 2001, 129: 2884–2903.
- [21] WHITAKER J S, HAMILL T M. Ensemble Data Assimilation without Perturbed Observations[J]. Mon Weather Rev, 2002, 130 (7): 1913–1924.
- [22] EVENSEN G. Sampling strategies and square root analysis schemes for the EnKF[J]. Ocean Dyn, 2004, 54(6): 539–560.
- [23] LEEUWENBURGH O. Assimilation of along-track altimeter data in the Tropical Pacific region of a global OGCM ensemble[J]. J Roy Meteor Soc, 2005, 131: 2455–2472.
- [24] LEEUWENBURGH O. Validation of an EnKF system for OGCM initialization assimilating temperature, salinity, and surface height measurements[J]. Mon Weather Rev, 2007, 135: 125–139.
- [25] KEPPELNE C L, RIENECKER M M, KURKOWSKI N P, et al. Ensemble Kalman filter assimilation of temperature and altimeter data with bias correction and application to seasonal prediction[J]. Nonlin Processes Geophys, 2005, 12: 491–503.
- [26] ZHEN FEI, ZHU JIANG. Balanced multivariate model errors of an intermediate coupled model for ensemble Kalman filter data assimilation[J]. J Geophys Res, 2008, 113: 1–16.
- [27] KALNAY E, KANAMITSU M, KISTLER R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. Bull Am Meteorol Soc, 1996, 77(3): 437–471.
- [28] BOYER T, LEVITUS S, GARCIA H, et al. Objective analyses of annual, seasonal, and monthly temperature and salinity for the World Ocean on a 0.25° grid[J]. Int J Climatol, 2005, 25(7): 931–945.
- [29] MARKS K M, SMITH W H F. An evaluation of publicly available global bathymetry grids[J]. Marine Geophys Res, 2006, 27: 19–34.
- [30] OKE P R, SAKOV P, CORNEY S P. Impacts of localization in the EnKF and EnOI: experiments with a small model[J]. Ocean Dyn, 2007, 57(1): 32–45.
- [31] XIE J, ZHU J, LI Y. Assessment and inter-comparison of five high-resolution sea surface temperature products in the shelf and coastal seas around China[J]. Cont Shelf Res, 2008, 28(9): 1286–1293.