

基于 Cressman 客观分析的南海北部海区数据同化实验*

陈飞^{1,2}, 施平^{1,3}, 杜岩¹, 王东晓¹

(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. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 中国科学院烟台海岸带可持续发展研究所, 山东 烟台 264003)

摘要: 利用 POM 模式和空间插值法构造的同化方案对南海北部的航次观测资料进行了数据同化模拟。结果表明, 数据同化有效兼顾了模式模拟和航次观测, 在一定程度上纠正了模式模拟值相对于真实数据的误差; 同化结果与模拟结果相比更接近观测值, 在航次断面及其附近海域同化结果误差较小; 另一方面, 由于航次资料站点相对较少, 在无观测数据的海域模式同化不是很理想, 有待改进。此方法可为南海大型航次及其他资料同化提供一个再分析资料的实验性参考。

关键词: 数据同化; 空间插值; POM 模式; 航次资料

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2010)04-0001-07

Assimilation of hydrographic data in the northern South China Sea based on the Cressman objective analysis

CHEN Fei^{1,2}, SHI Ping^{1,3}, DU Yan¹, WANG Dong-xiao¹

(1. Key Laboratory of Tropical Marine Environmental Dynamics, South China Sea Institute of Oceanology, CAS, Guangzhou 510301, China; 2. Graduate University of CAS, Beijing 100049, China; 3. Yantai Institute of Coastal Zone Research for Sustainable Development, CAS, Yantai 264003, China)

Abstract: The authors assimilate cruise data in the northern South China Sea using the Princeton Ocean Model (POM). The results show that the model assimilation improves the simulation effectively by reducing model errors, namely making the model results closer to the observations. The assimilation results, however, are not quite ideal in the regions where cruise observations are absent, indicating the method needs to be improved. This assimilation method once improved can provide re-analysis dataset for studying the South China Sea.

Key words: data assimilation; interpolation method; Princeton Ocean Model (POM); cruise data

利用数值模式对南海进行环流预报是南海研究的一个重要组成部分。目前数值计算的模式架构和参数化方案不能完全模拟真实海洋状况, 单纯的数值模式难以做到准确。引入观测资料, 对数值模式模拟进行同化是改进模拟结果的一种有效途径。作为一种数值模拟优化方法, 资料同化将观测资料融合进模式以模拟真实海洋状态, 实质是利用观测数据改进模式的模拟。目前所采用的同化方法主要包括逐步订正法、最优插值、变分方法和 Kalman 滤

波等^[1]。

数值同化在国外发展较快、较成熟, 在常规海洋观测资料和卫星遥感资料同化方面都有大量研究工作。发展前景广阔的伴随法、Kalman 滤波法等均着眼于卫星遥感资料的应用, 是数据同化研究领域的前沿。目前, 国内的数值同化研究大都集中在卫星遥感资料同化方面^[2-6], 朱江等^[7]在综合利用卫星遥感资料和 Argo 漂流浮标资料、船舶报海温及其他常规资料方面走在国内前列。卫星高度计的同化过

收稿日期: 2008-12-08; 修订日期: 2009-06-08。孙淑杰编辑

基金项目: 科学院知识创新项目(KZCX2-YW-BR-04, KZCX1-YW-12-01, KZCX2-YW-Q11-02); 自然科学基金项目(40876007)

作者简介: 陈飞(1984—), 男, 陕西省汉中市人, 硕士研究生, 现从事物理海洋数值研究。E-mail: chenfei206@mails.gucas.ac.cn

通信作者: 杜岩。duyan@scsio.ac.cn

* 本文得到朱江研究员和舒业强博士在同化方法方面的建议和帮助, 特此致谢。

程将海面高度反演为温盐伪观测数据,在一定程度上引入了计算误差,故国内外仍十分重视常规海洋观测资料的同化。因为常规观测资料在海洋垂向深度上获得了直接且高精度的数据,代表了海区的真实物理场。另外,常规海洋资料在卫星遥感资料的校验方面起着举足轻重的作用^[8]。

国内学者在利用常规观测资料方面取得了一系列成果。Zhu 等^[9]利用 Lotus 的海面及次表面锚系浮标观测资料进行了同化实验;李云等^[10]利用船舶报资料和 Argo 海温数据改善模式初始场;张大明等^[11]利用热带大气海洋观测阵列(TAO)的浮标所获得的温度数据对热带太平洋赤道附近的 SST 数据进行了同化试验,取得了不错的结果。他们的实验所选取的原始同化数据均为船舶浮标等海表及次表层温度资料,同化结果受到资料状况的一定限制。一方面,仅同化温度资料,对模式各项输出数据的改善并不明显;另一方面,只有海表及次表层温度资料,使得模式同化在垂向的效果并不能令人满意。目前南海海域还没有利用航次资料与模式相结合的同化实验。本研究将尝试在这方面进行同化实验。

本文同化研究采用的常规观测资料为 2004 年 9 月南海公开航次的 CTD 温盐数据。测点集中于南海北部,便于研究南海北部环流、温盐场。相对于通常同化采用的观测资料,航次资料有其明显特点:空间覆盖率低,只有几十个站位;垂向数据精度高,站点垂直采样以米为间隔单位。在观测数据的时间特征上,整个航次观测历时 20d,测点之间观测时间平均间隔为 6h,每个测点对应惟一观测时刻,无法进行随时间的同化。在模式的误差来源上,初值场相对于真实海洋状况的偏差是一个主要影响因子,故此同化实验将 2004 年 9 月南海北部 CTD 垂向温盐观测资料加以利用,改善模式的初始场,使其更接近真实情况下的海洋状况,在初始场的基础上用逐日风场驱动得到结果。应指出的是,忽略不同测点的观测时间差异会在一定程度上引入误差,是本方案下一步需要解决的问题。

针对同化数据特点和改善初始场的同化策略,放弃了较繁琐的数值同化算法,将空间插值的 Cressman 方法拓展到三维,计算每个网格点相邻一定半径内所有观测点对网格点的改善情况,实验结果证明方法简单有效。

1 模式简介及参数设置

本文采用三维斜压原始方程普林斯顿海洋模式

(POM)。POM 主要具有以下特性:1)垂向采用 sigma 坐标。2)垂向混合系数由二阶湍流闭合模型确定。3)水平有限插分为 Arakawa C 型。4)采用时间分裂算法,外模二维基于 CFL 条件和重力波波速,时间步长较短;内模三维基于 CFL 条件和内波波速,时间步长较长。

模式水平网格数 100×70 ,采用非均匀正交网格,空间分辨率为 20—30km,垂向 20 层。地形基于 ETOPO5^[12],深于 2000m 地形取为平底,底边界采用松弛边界条件。模式计算区域为整个南海,除东边界外三边为闭边界,东边界取至 120°E 以东的太平洋海域。开边界条件采用全球海洋再分析产品 ECCO 输出的流场、温盐和海平面高度。热强迫场采用 NCEP 月平均感热、潜热、长短波辐射通量所计算的净热通量。初始场所用的温盐资料为 WOA05 的 9 月份多年平均气候态;初始场风场资料为 ERS1^[13]的 9 月份多年平均气候态。模式从静止态积分,计算 10 年达到平衡。航次资料为 2004 年 9 月南海北部开放航次 CTD 温盐资料。将温、盐观测插值到初始场(见后文第三节)后,采用 ERS1 的 2004 年 9 月日均海表风场逐日驱动、积分 30d 后得到的资料作为同化结果。同时对未插值的初始场采用同样的风场驱动,积分 30d 后,作为未添加同化数据的模拟结果与之进行对比。在参与对比的观测数据处理上,考虑到参与同化的观测数据不再是独立样本,会对同化效果分析产生较大影响,将 CTD 观测数据中参与同化的温盐资料剔除,用以检验同化结果。在一定程度上减小了观测样本与被同化资料的相关性。

2 航次资料介绍

本次实验所用观测资料为 2004 年 9 月南海开放航次所获得的 CTD 温盐数据。航次调查海域为南海北部海区及西部局部海区,位于 $18^\circ\text{—}23^\circ\text{N}$ 、 $110^\circ\text{—}120^\circ\text{E}$ 之间,共设主要调查断面 7 条,站位 71 个。航次站点分布如图 1 所示。

航次调查站位集中于北部,尤其是陆坡到南海海盆深度剧烈变化的断面、吕宋口断面和 18°N 断面。此站位分布方便研究南海北部粤东沿岸上升流、吕宋口水交换、冷暖涡等问题。

在进行模式同化前,先对原始 CTD 温盐数据进行了处理,剔除了不合理点和异常值。其中对重复采样的站位资料,通过比较将精度较差的予以剔除;某些站位的温盐值过于偏离气候态,也予以剔除。

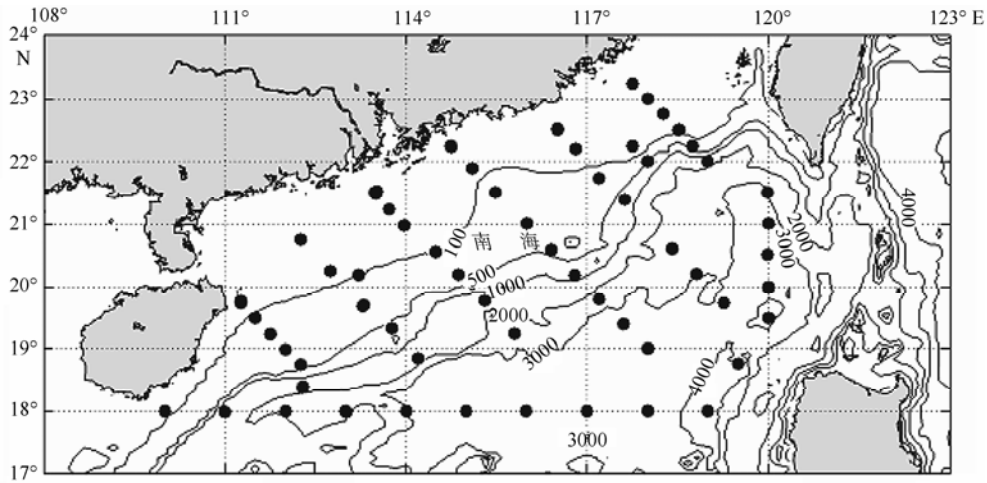


图1 航次站点分布

Fig. 1 Distribution of cruise data.

3 同化方法

本实验处理的航次资料采样点相对稀疏,在空间分布上具有不均匀性,需对观测数据进行特别的同化处理。资料同化的起源最早可以追溯到气象学中的客观分析(objective analysis),就是将分布于不规则点上的观测值插值到规则网格上,为用数值模式进行预报准备初始场^[14],此方法对于模式模拟预测和诊断分析至关重要。其中,利用特定区域已知的离散观测数据来估计该规则格点上的数值属于“空间内插”。通过空间插值算法,使原始数据包含的物理特征在格点数据中得到保存,使构造出的模型更逼近真实的模型。

空间内插作为研究区域空间变量和分布的基本方法,根据数据空间分布的特征,其不同插值方法结果之间的精确性存在很大的变化。常用的有距离反比加权、Kriging 法和 Cressman 客观分析等,根据冯锦明等^[15]对这几种插值方法的具体分析可知,在站点分布密集的区域,不同空间内插方法之间差异较小;较稀疏的区域差异较大,Cressman 客观分析方法的插值结果与观测结果最为接近,反距离加权次之,而 Kriging 的偏离较大。故我们采用 Cressman 插值并将其推广到三维空间,网格点上的值由一个预设半径邻域内的所有观测点来修正。

Cressman 客观分析采用的逐步订正法已被广泛应用于各种气候诊断分析和数值模拟研究中,其思想是根据先给定的初始场,然后用实际观测场修正初始场,使订正后的场逼近观测记录^[16]。

$$\alpha' = \alpha_0 + \Delta\alpha_{ijk}$$

其中

$$\Delta\alpha_{ijk} = \frac{\sum_{l=1}^L (W_{ijkl}^2 \Delta\alpha_l)}{\sum_{l=1}^L W_{ijkl}}$$

式中 α 为温度或盐度, α_0 为背景场的变量 α 在格点 (i, j, k) 上的值, α' 为同化后的变量 α 在格点 (i, j, k) 上的值; $\Delta\alpha_l$ 为观测点 l 上的观测值与初始值 α_0 之差; W_{ijkl} 为权重因子,在 0—1 之间变化; L 为影响半径 R 内的观测点数。Cressman 客观分析方法最重要的是权重函数 W_{ijkl} 的确定,它的一般形式为

$$W_{ijkl} = \begin{cases} \frac{R^2 - d_{ijkl}^2}{R^2 + d_{ijkl}^2} & (d_{ijkl} < R) \\ 0 & (d_{ijkl} \geq R) \end{cases}$$

其中 d_{ijkl} 是网格点 (i, j, k) 到观测点 l 的距离。影响半径 R 的选取具有人为因素,一般选取原则是由小及大进行扫描。本次同化实验的 CTD 观测数据垂向分辨率为 1m,在综合考虑样本数量对原始数据的修正效果、计算误差的基础上,取 R 为 5m。Cressman 客观分析方法的缺点是统计平滑功能差,在采样点稀疏、观测资料贫乏的区域进行空间数据内插时会出现很多空值点。

4 结果分析

4.1 水团特征

选取与航次观测采样点对应空间位置的 WOA01 9 月份气候态资料与观测作对比验证,效果如图 2。两者整体趋势吻合,说明观测数据真实可信。

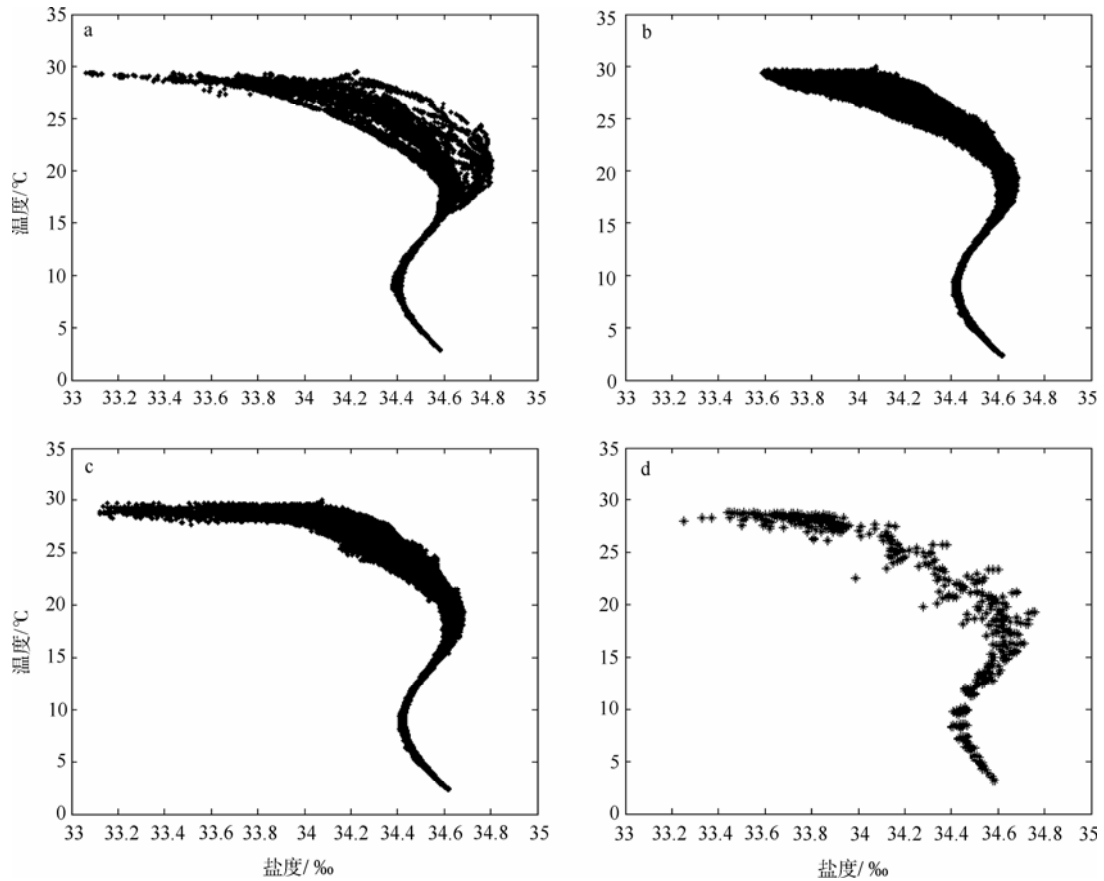


图2 温盐点聚

a. 观测; b. 模式; c. 同化; d. WOA01

Fig. 2 Water mass analysis, with (a) for cruise observations, (b) for model simulation, (c) for assimilation, and (d) for WOA01

模拟和同化的结果均能清晰分辨出南海表层、次表层、中层、深层水。对比同化和模式结果发现,盐度模拟结果集中在 33.6‰ — 34‰ , 而同化的表层高温低盐盐度稍低, 集中在 33.2‰ — 33.8‰ , 体现了夏季风降水形成的低盐水体, 同化结果与无同化的模拟相比有很大改善。温度方面, 模拟的表层高温水集中在 28 — 30 , 而同化结果集中在 27 — 29 。上层海洋温度同化结果较模拟结果为低, 这在下面的断面及表层温盐图分析中也有体现。在中深层水中模拟和同化结果区别不大。

4.2 18°N 温盐断面

为方便与实测资料对比, 我们选取航次资料断面跨度最大的 18°N , 跨度从 110°E 到 119°E 。

如图 3, 与观测资料相比, 模拟结果的海表温度平均偏高 0.5 左右, 中层水温度偏高 1 — 2 , 主要原因在于 POM 模式对季节转变期间的温跃层模拟不够理想, 模拟的温跃层起伏过强; 这种偏离可能由于用单一月份的强迫场驱动造成。对比 WOA01 的数据, 相对于气候态资料 50m 以浅的上层海洋, 模拟、同化的温度均有不同程度的偏高, 这主要由

于所选特别年份与气候态间的差异造成。同化结果大体趋势与观测吻合, 模拟的表层高温水体有了明显的改善。然而, 同化后的混合层和温跃层仍然偏浅, 次表层温度偏低, 显示模式的上层混合不够强。究其原因, 风应力强迫和表面热通量对上层海洋热力结构有决定性的作用, 而本次实验选取的月平均强迫场的时间、空间分辨率不能达到模拟要求。

温跃层变化在深于 2000m 的海域模拟较差, 而在 110°E 浅水区域比较接近实测资料。这是因为模式在垂直方向采用的是 σ 坐标系统, 垂直方向分 20 层导致深水区域的垂向分辨率不够, 不能精确描述真实的物理现象, 只有在较浅的区域才能比较精细地刻画温跃层的变化。这就显示了在处理小尺度的精细物理现象上使用 σ 坐标的 POM 模式有一定的不足; 与垂直坐标分层比较灵活的 HYCOM 相比, POM 结果不尽如人意^[17]。另外模式结果在 250 — 300m 深度上的温度偏高 1 — 2 , 可能由于模式的垂向混合不够; 同化结果有明显改善, 更接近实测资料。

如图 4, 在盐度分布上气候态资料与 2004 年的

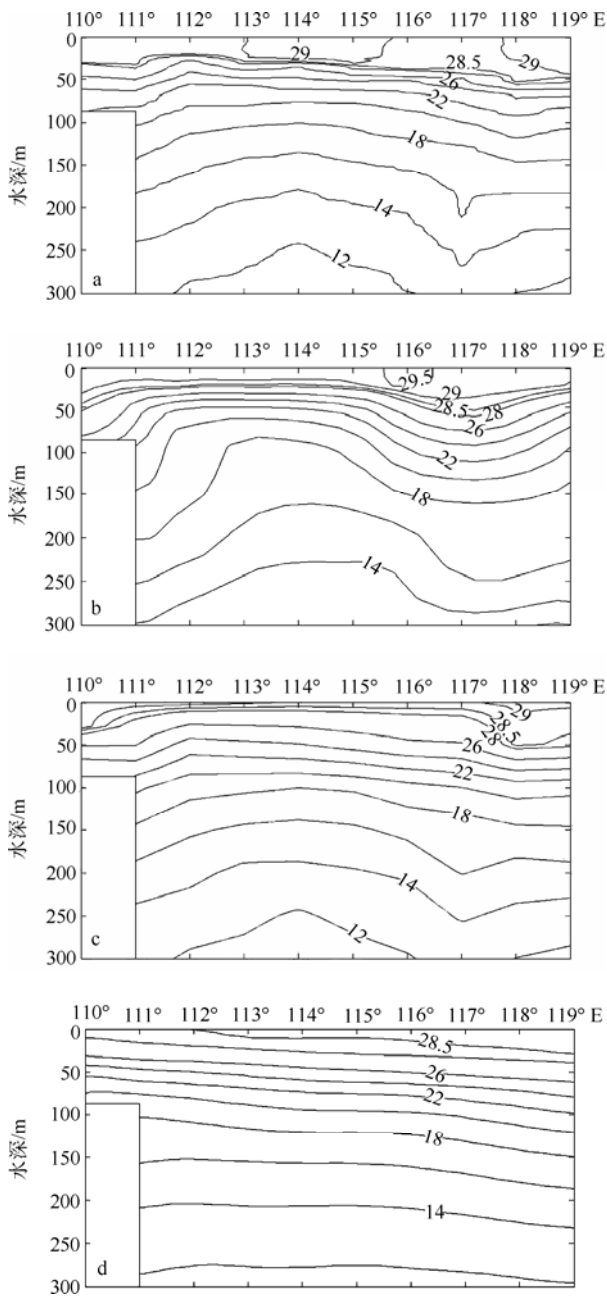


图 3 18°N 温度(单位: °C)断面图
a. 观测; b. 模式; c. 同化; d. WOA01

Fig. 3 Temperature (units: °C) profiles along 18°N, with (a) for cruise observations, (b) for model simulation, (c) for assimilation, and (d) for WOA01

资料表现出明显的差异。WOA01 的数据显示在 110°—113°E 的上层海洋有一个低盐水团, 这在 2004 年的观测中没有体现; 另外, 200—300m 深度上 2004 年观测中的盐度比气候态有明显异常。通过数值同化, 模拟的盐度场在上层得到很大改善, 基本重现了南海夏季的淡水盖。南海处于季风区, 夏季充沛的降水降低海面盐度形成低盐区, 这是南海上层的一个重要特征, 它对局地环流结构、热量垂向扩散都有极大影响, 同化的结果清晰地反映了此现象。

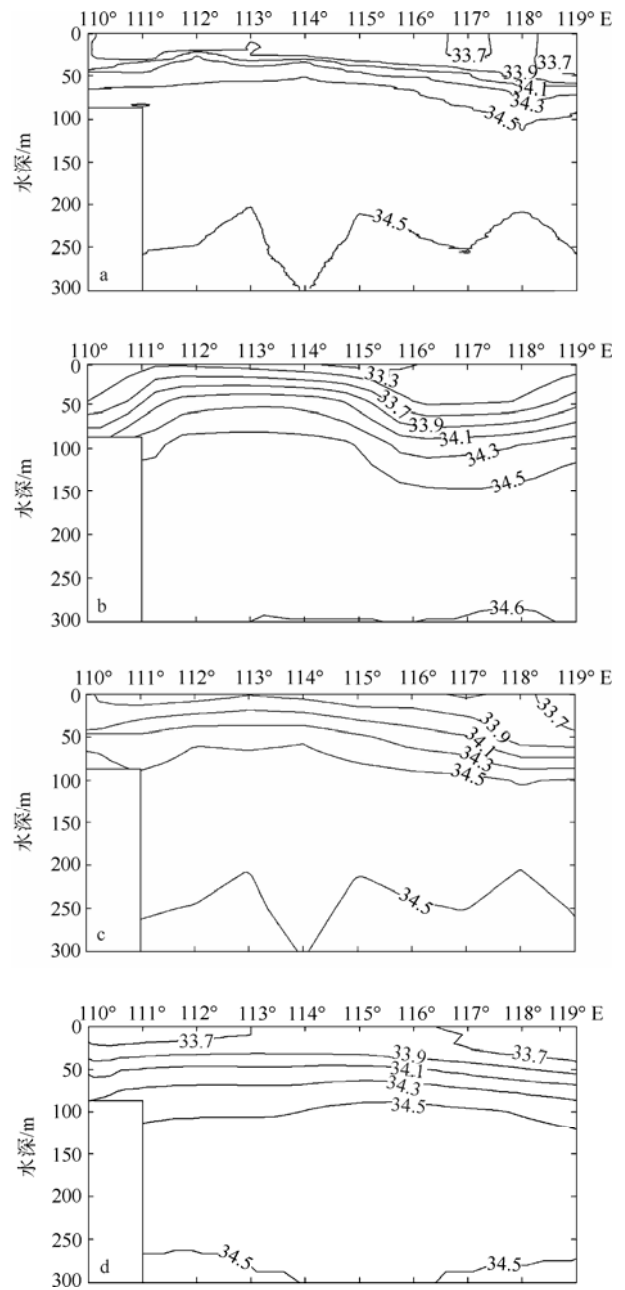


图 4 18°N 盐度(单位: ‰)断面图
a. 观测; b. 模式; c. 同化; d. WOA01

Fig. 4 Same as Fig. 3, except for salinity (units: ‰) profiles along 18°N, with (a) for cruise observations, (b) for model simulation, (c) for assimilation, and (d) for WOA01

断面上层 50m 观测盐度约为 33.7‰—33.9‰, 模拟结果集中在 33.3‰—33.7‰, 同化有效地校正了模拟的盐度偏差。同化后盐度有所升高。模拟和同化结果的淡水盖、海表低盐核位置均在 119°E 附近, 这与观测结果吻合。

4.3 表层温度场

如图 5, 模式结果与卫星实测对比差异较大; 尤其是 115°E、18°N 附近区域, 表层高温水团与实测结果不符, 这是由于模式采用气候态资料, 所得

结果更贴近气候态 9 月的情况, 与特定年份的情况有一定出入。同化之后, 模式的模拟有了明显改善。由图 5 可见同化后大体上再现了南海北部夏季的冷暖涡特征, 这与 AMSR-E 卫星遥感对应时期的 SST 大体上吻合, 效果比较好。吕宋海峡以外的区域, 温度场与观测资料有一定差异, 这是因为此区域无航次观测, 模式模拟得不到改善。另外, 海南岛附近的暖涡位置稍稍偏西, 海南岛东北及雷州半岛附近的改善也不明显, 这是因为这些地方观测站点稀疏, Cressman 插值在处理稀疏站点的效果并不理想。

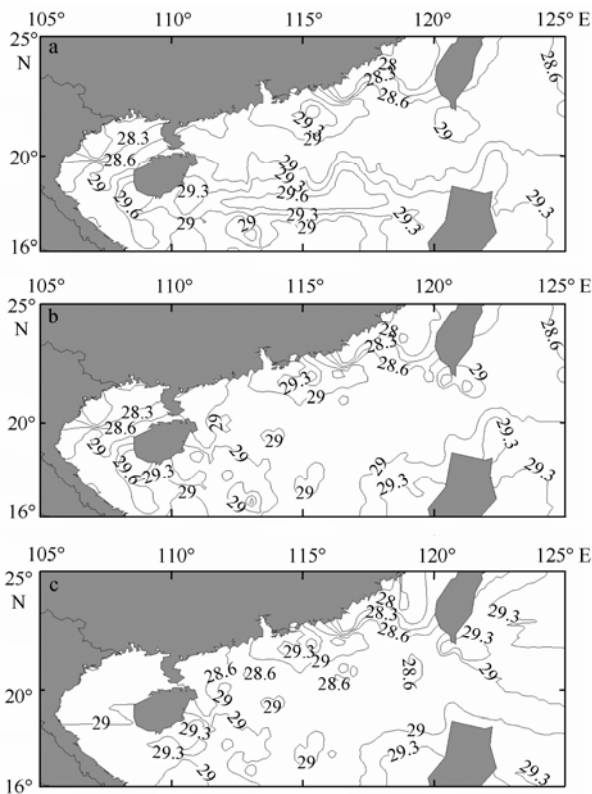


图 5 海表温度(单位: $^{\circ}\text{C}$)场
a. 模式; b. 同化; c. AMSR-E 卫星遥感图像
Fig. 5 Sea-surface temperature (units: $^{\circ}\text{C}$), with (a) for cruise observations, (b) for model simulation, and (c) for AMSR-E data

总而言之, 经过数值同化 POM 的模拟结果在很大程度上改善了南海北部的海表温度结构, 更为细致地再现了南海北部的特征, 与同期卫星遥感资料相比, 结果真实可信。

4.4 同化效果分析

我们采用张大明等^[11]的方法以验证同化效果。设模拟值与观测值的差为 a , 同化后分析值与观测值之差为 b , 用 b/a 的大小表示同化分析的效果。当 $b/a=1$ 时表明同化没有起作用; 当 $b/a=0$ 时表明同化

起决定作用, 分析值与观测值完全一致, 同化效果最好; 当 b/a 介于 0—1 之间表明同化起部分作用, b/a 越小表明同化效果越好。该方法效果直观, 便于观察比较分析。

选取 18°N 断面进行分析, 得到如下的同化效果分布(图 6)。由图中可以看出, 平均同化程度为 0.3—0.4, 50m 以上和 250m 以下的同化改善最为明显, 这与前面温盐断面的分析吻合。在 100—200m 层同化效果并不明显, 这是因为模拟结果在此层比较接近实测数据, 同化改善较小。其他各断面及水平层次的分析类似上图, 同化系数被有效地控制在 0.5 左右, 对模式结果有显著的改善效果。

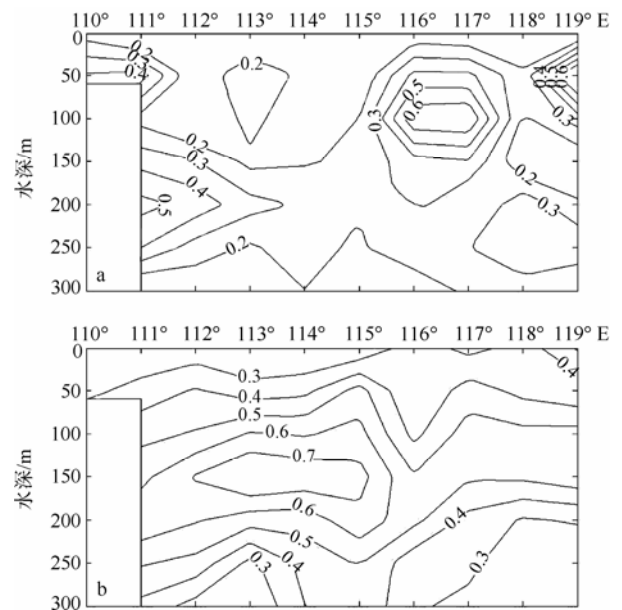


图 6 18°N 断面同化效果分析图
a. 温度(单位: $^{\circ}\text{C}$); b. 盐度(单位: ‰)
Fig. 6 Assimilation analysis along 18°N , for (a) temperature (units: $^{\circ}\text{C}$), and (b) salinity (units: ‰)

5 结论

本文利用 POM 模式和 Cressman 插值构造了一个利用航次资料进行同化的方案, 并针对 2004 年 9 月南海公开航次数据进行了同化实验。结果表明, 本次实验有效地将航次观测所包含的温、盐信息垂向同化入模式。同化结果相对于模式模拟结果有所改善, 体现了很好的稳定性, 同化效果显著。经过数据同化, 重现了南海的水团特征及上层海洋的淡水盖特征, 表层温度场的结果更为接近实测结果。但同时也应看到, 由于航次资料本身的局限性, 使结果存在一定缺陷。对于资料空缺的海区, 例如吕宋

海峡外侧, 同化效果较差, 这些亟需改进。

利用航次观测作为同化资料有其优点和局限性, 可以作为目前通行的遥感资料同化的有效补充。就长远发展来看, 一方面可以采用大范围站位的航次资料作为同化对象, 同时改进同化算法, 选取更合适的数值模式将垂直方向上的资料尽可能多地利用起来; 另一方面, 可将航次资料和卫星资料结合起来, 采用联合同化方案; 再者, 就是不考虑资料的

年际变化, 用模式气候态的结果做背景场进行变分同化, 来得到南海的一套气候态的再分析资料。对于最后一点, 可考虑在模式中耦合利用温盐推算流场的 P 矢量诊断法进一步同化流场; 也可通过航次的 ADCP 得到的流场资料同化。卜献卫等^[18]利用温盐资料诊断的流场在一定程度上真实可靠, 可作为模式中流场的改善。我们将在以后的工作中进一步改善本文的同化方法。

参考文献

- [1] 官元红, 周广庆, 陆维松, 等. 资料同化方法的理论发展及应用综述[J]. 气象与减灾研究, 2007, 30(4): 1-8.
- [2] 王东晓, 施平, 杨昆, 等. 南海 TOPEX 海面高度资料的混合同化试验[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(1): 101-108.
- [3] 万莉颖. 集合同化方法在太平洋海面高度计资料同化中的应用研究[D]. 中国科学院研究生院(大气物理研究所), 2006.
- [4] 王云峰, 王斌, 马刚, 等. 多种观测资料的四维变分同化对台风路径预报的影响[J]. 科学通报, 2003, 48(2): 82-86.
- [5] 许小永, 郑国光, 刘黎平. 多普勒雷达资料 4DVAR 同化反演的模拟研究[J]. 气象学报, 2004, 62(4): 410-421.
- [6] 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, 2007, 37(12): 1669-1687.
- [7] 朱江, 周广庆, 闫长香, 等. 一个三维变分海洋资料同化系统的设计和初步应用[J]. 中国科学, 2007, 37(12): 261-271.
- [8] 韩桂军, 李冬, 马继瑞, 等. 数据同化在海洋数值产品制作及预报中的应用研究[J]. 海洋通报, 1999, 18(5): 54-62.
- [9] ZHU J, HUI W, ZHOU G. SST data assimilation experiments using an adaptive variational method[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(23): 2010-2013.
- [10] 李云, 刘钦政, 张建华, 等. 最优插值方法在西太平洋海温同化中的应用研究[J]. 海洋预报, 2008, 25(2): 25-32.
- [11] 张大明, 许东峰, 章本照, 等. 最优插值法及其在热带太平洋海表温度数据同化中的应用[J]. 海洋学研究, 2005, 23(4): 1-7.
- [12] 王勇, 许泽厚, 詹金刚. 中国海及其邻近海域高分辨率海底地形[J]. 科学通报, 2001, 46(11): 956-960.
- [13] 谢强, 王东晓, 王卫强, 等. 南海几种海面风应力资料的对比分析[J]. 热带海洋学报, 2001, 20(1): 91-100.
- [14] BOUTTIER F, COURTIER P. Data assimilation concepts and methods[M]/ECMWF. Meteorological training course lecture Series, 2002: 1-59.
- [15] 冯锦明, 赵天保, 张英娟. 基于台站降水资料对不同空间内插方法的比较[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(2): 261-276.
- [16] CRESSMAN G P. An operational objective analysis system[J]. Mon Wea Rev, 1959, 87: 367-374.
- [17] 高松, 吕咸青, 王海棠. HYCOM 模式对赤道及北太平洋海表温度的模拟[J]. 海洋通报: 英文版, 2008, 10(1): 1-14.
- [18] 卜献卫, 袁耀初, 刘勇刚. P 矢量方法在南海夏季环流诊断计算中的应用[J]. 海洋学报, 2001, 23(3): 8-17.