

最优插值方法在西北太平洋海温同化中的应用研究

李 云, 刘钦政, 张建华, 王 旭, 李 燕

(国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

摘 要: 本文开发出一套与三维温盐流数值模式 POM 相匹配的最优插值数值同化模块, 具有将船舶报资料和 Argo 海温数据加入数值模拟的能力。利用该同化系统, 本文对 2001 ~ 2002 年进行了数值模拟试验, 通过模拟结果和未加入同化的模拟结果的对比表明, 该同化系统能有效地改进三维海温模拟结果, 使之更为接近于观测值。

关键词: 资料同化; 最优插值; 船舶报资料; Argo 资料; 三维海洋数值模式

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1003 - 0239 (2008) 2 - 0025 - 08

1 引言

随着海洋观测数据的不断增加, 在物理海洋的科学研究中, 作为把空间上不规则分布的离散观测资料融合到数值模式中的资料同化技术受到越来越多的重视, 在海洋状态数值模拟中也得到越来越多的应用^[1-5], 是海洋环境数值预报初试场建立的核心和关键。

最优插值方法是国际上应用较多也较为成熟的一种资料同化方法, 它能考虑背景场和观测误差的统计特征, 即包含了观测、预报和分析之间的内在关系, 决定出最小二乘意义上的最佳权重, 从而使得分析误差能在统计意义上达到最小^[2]。现今日本气象厅的天气预报系统和海洋预报系统、美国 NCEP 的 ENSO 预报系统中的海洋资料同化系统中都使用最优插值方法作为观测数据的同化方案之一。

本文结合国家海洋环境预报中心西北太平洋三维温盐流预报模式, 利用船舶报资料和 Argo 海温资料进行温度同化, 以检验最优插值方法在三维温盐流预报中所起的作用。

2 海洋模式

本文采用国家海洋环境预报中心在 POM 模式基础上所发展的西北太平洋温盐流数值预报模式^[6], 模拟区域的東西范围从 $99^{\circ} \sim 150^{\circ}\text{E}$, 南北范围从 $2^{\circ} \sim 45^{\circ}\text{N}$, 包括了我国海全海域、日本海的大部和西北太平洋的大部分; 模式采用经纬度网格, 水平分辨率为 $15' \times 15'$, 垂直方向采用 σ 坐标, 分为不等距的 15 层, 最大水深限定为 4000m, 使模式最上层厚度不大于 10m; 时间积分采用内、外模分解算法, 外模时间步长为 15s, 内模时间步长为 600s; 模式的温盐背景场采用 SODA 全球 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ} \times 40$ 层的三维温度盐度月平均资料, 利用双线性插值方法计算得到模式网格上的月平均气候温盐场; 上边界强迫

收稿日期: 2007-07-06; 修订日期: 2008-03-11

基金资助: 国家基础研究重大项目前期研究专项 (编号 2001CCB00200)

作者简介: 李 云 (1981-), 男, 研究实习员, 主要从事三维温盐流预报研究。

采用 NCEP 一日 4 次的再分析资料,采用块体公式计算海气界面通量和海面感热潜热通量;侧边界采用辐射边界条件。

3 同化方案

温度同化方案采用最优插值同化方法,该方案基本算法为:

$$x_a = x_b + K(y - H[x_b]) \quad K = BH^T(HBH^T + O)^{-1}$$

其中 x_a 和 x_b 分别为分析场和背景场, K 为最优权重, y 为观测资料, H 为背景场值插值到观测位置的线性算子,上标 T 表示矩阵的转置, B 为背景场误差协方差矩阵, O 为观测场误差协方差矩阵。

为了充分利用有限的海洋观测资料,采用四维资料同化技术来研制和建立海洋资料同化系统^[7]。四维海洋资料同化技术的基本思想是利用海洋动力模式将观测到的海洋资料进行时空外推,在给定的某一时刻和某一区域,即便是没有海洋观测资料,可以根据其他区域以及过去时刻的观测资料,利用动力模式得到这一时刻该区域的物理量。这样得到的结果是比较合理可信的。同时,四维资料同化不仅协调各个物理量在动力模式框架内的相互关系,而且也提高了初始场与动力模式的相容性。在空间上,不仅考虑在同一层面上观测资料对模式计算场的影响,而且还考虑观测资料对相近深度的计算场的影响,使同化的结果不仅趋近于“真实状态”,而且能提高计算的稳定性。

为了增加数据量,在观测资料上开了一个长度为 10d 的时间窗口,在同化时刻前后 5d 的与同化时刻同时的数据都用于资料同化处理。所有数据所占的权重由与同化时刻的时间间隔决定,距离同化时刻近的资料权重重大,距离同化时刻远的资料权重小。

背景场误差协方差矩阵的求解按照文献[2]提出的经验公式 $\rho = ae^{-r^2/(b^2 \cos \varphi)}$ 计算测站和网格点之间的相关系数,矩阵 S 以及网格点之间的相关系数矩阵 R ,这里 ρ 代表相关系数。其中 a , b 是经验常数,取值为 0.01 和 570; r 是两点间的曲线距离,使用球面上的余弦定理求解;影响半径取为 500km; φ 代表纬度。

对于船舶报资料,由于只有海洋表层数据,所以考虑数据对深层的影响。根据中科院大气物理研究所 OVALS 模式(2004)^[8]垂直相关系数的选取:

$$\rho = \exp\left(-\frac{(\Delta T)^2}{L_T^2}\right) \exp\left(-\frac{(\Delta Z)^2}{L_{zT}^2}\right)$$

这里 ΔT , ΔZ 分别指表层和深层的温度和深度差,特征尺度取为 $L_T = 4$ $L_{zT} = 100\text{m}$ 。

观测误差协方差矩阵 O 定义为 $Or/(1 - \kappa \Delta t / 5)$,其中 Or 为观测误差估计,在西北太平洋上取为 $(1.0)^2$; Δt 为实测资料与背景场资料的时间间隔。

4 海温资料的质量控制

本文采用船舶报海表温度资料和 Argo 浮标的温度廓线资料作为用于同化的海洋资料。

考虑到观测资料由于偶然因素存在较大的误差, 在船舶报资料进入同化之前需要进行必要的检验, 剔除不真实或者重复的数据。对于船舶报数据的质量控制步骤如下:

- (1) 将落在模式地形场陆地点上的数据剔除;
- (2) 将小于 -2 或大于 35 的表面海温数据剔除;
- (3) 剔除重复的数据;
- (4) 由于船舶报资料的观测地点不具有连续性, 因此较难分析其统计特性。

本文我们以 SODA 月平均温度为基准, 以加减 2001 年 1 月 ~ 2002 年 12 月 SST 的标准差 σ 作为上、下界, 形成一个检验区, 当气候分析资料的变化遵循正常分布时, 95% 的观测资料都会落在该检验区内, 如果观测资料在这个分布区以外, 就认为这个数据无效而将被剔除。

经过质量控制的船舶报数据分布情况(见图 1a)

ARGO 浮标提供全球海洋 2000m 深度以浅的次表层海温资料具有水平分布广, 垂直深度深的特点。因此, Argo 资料可以提供三维的温度同化观测资料。

本文应用的 Argo 资料已经经过了 Argo 实时资料中心的质量控制, 所以本文只做简单处理。再读取资料时依据 Argo 自身质量控制的标识对数据进行筛选, 剔除探测资料深度在垂直方向上出现翻转的数据, 剔除重复记录的数据, 如果在垂直剖面上有多层没有资料, 则剔除整个廓线的资料。

经过质量控制后的 Argo 数据分布情况(见图 1b)

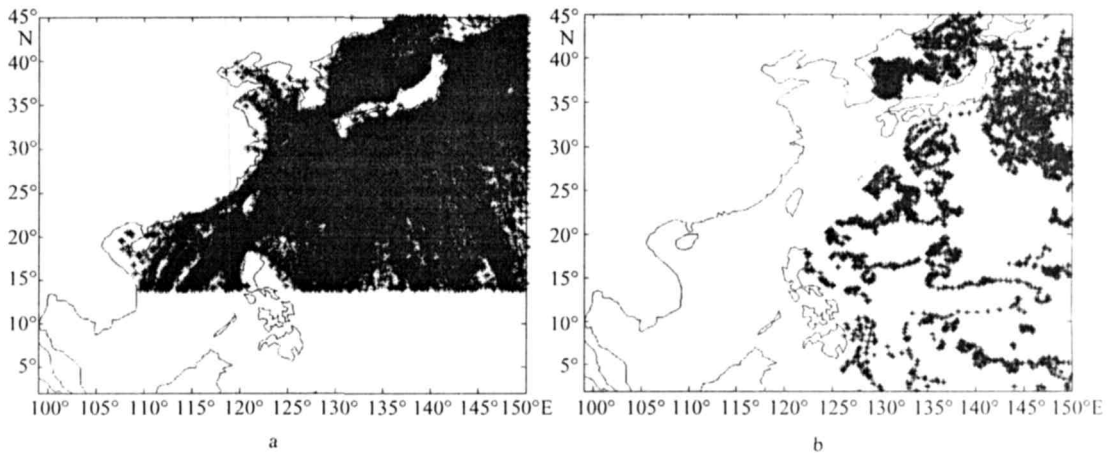


图 1 西北太平洋船舶报资料在 2001 年 1 月 ~ 2002 年 12 月的水平分布图 (a) 西北太平洋 Argo 资料在 2001 年 1 月 ~ 2002 年 12 月的水平分布图 (b)

5 2001 ~ 2002 年西北太平洋海域海温同化试验和分析

本文对 2001 年 1 月 1 日 ~ 2003 年 1 月 1 日期间, 对区域的三维海洋状态进行了同化模拟, 图 2(a ~ d) 是模拟的 2 月、5 月、8 月、11 月的西北太平洋海域的表层海温分布。

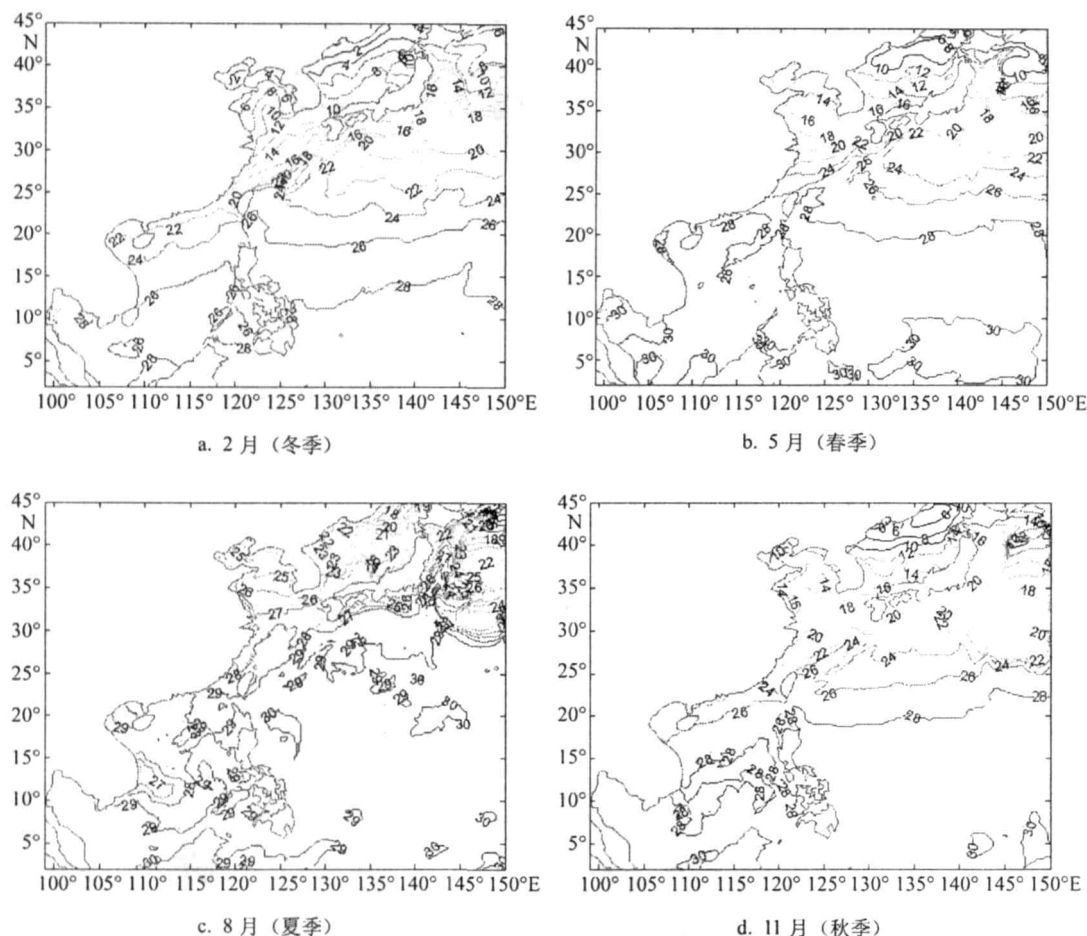


图2 西北太平洋海表温度分布

冬季(2月), 渤海的表层水温平均在 3℃ 以下, 黄海 2~15℃, 东海 8~26℃, 南海 20~29℃, 外缘海域最高海温可达 30℃。水温的最低值出现在渤海北部沿岸, 低于 0℃, 自济州岛附近有一条高温暖水舌伸入黄海, 一直延伸到山东半岛北部; 苏浙外海有一个较小的向东南方向延伸的高温水舌, 由于模式中未考虑长江冲淡水的影响, 所以与多年平均的资料相比, 此高温水舌较为不明显。在黑潮流域有一高温水舌自台湾岛东侧一直向东北方向延伸到九州岛以南。15°N 以北等温线基本呈东北-西南走向, 与海岸线近似平行, 由于广东外海一带受东北季风以及来自大陆冷高压、冷空气爆发的影响, 使得沿岸水温较低, 等温线较为密集。在菲律宾岛两侧都存在一支高温暖舌向北延伸, 西侧暖舌延伸至台湾岛南部, 东侧暖舌延伸至台湾岛东侧, 近岸水温高于离岸水温。在南沙群岛一带是冬季水温的高温区, 水温可达 28℃ 以上。外缘海域等温线分布均匀, 日本岛以东亲潮区有冷水明显自北向南输入。

春季(5月), 渤海和黄海区域已经显示出沿岸温度高, 海区中央温度低的夏季特征。

从观测数据可以看出, 黄海中部有一低温冷舌向南延伸, 而模式的模拟结果该低温冷舌显得不甚明显, 黑潮流域的暖舌仍较为明显, 位置与冬季基本相同。广东省沿岸等温线分布与冬季相似, 仍与海岸线近似平行, 但平均温度提升了约 6 。吕宋岛西北侧出现一个较大的低温区域, 中心温度低于 26 。

夏季(8 月), 全海区温度普遍达到最高值, 渤黄东海全海区温度基本在 24 以上, 渤海水温沿岸显著高于中部, 黄东海等温线分布很不规则, 但沿岸水温一般也较中部高, 黑潮区的高温暖舌变得不甚明显, 日本岛以东海域等温线分布非常密集, 温差较大。外缘海域最高水温可达 32 , 在沿岸和局部海域上升流活跃, 形成几个相对低温区域。

秋季(11 月), 水温逐渐降低, 由济州岛向黄渤海延伸的暖水舌重新出现, 表层水温的分布已呈现出沿岸低外海高的冬季特征, 等温线分布情况逐渐向冬季分布情况过渡, 南海等温线分布又开始向冬季的等温线分布情况靠拢, 北部近岸海域降温 5~6 , 中部降温 2~3 。等温线分布又恢复到较均匀的状态。

将模拟结果和观测资料^[9~10]对比, 可以看出在渤黄东海海域, 同化系统能比较成功的模拟出海表温度的大致分布情况和季节变化趋势。比如秋冬季在济州岛附近深入黄海的高温水舌, 春夏季岸边温度高于海区中温度的分布特征, 黑潮区由台湾岛向东北方向延伸的暖水舌等; 在南海及邻近海域, 同化系统也能较好的反映出等温线走向大致与海岸平行, 北部湾水温南北差异较大, 巴拉望岛以西海域常年存在一片高温暖水区等特征。

将模拟的 2002 年海表温度与 2002 年的 MGDSST 年平均资料进行对比, 图 3 为模拟海温与 MGDSST 资料之差。

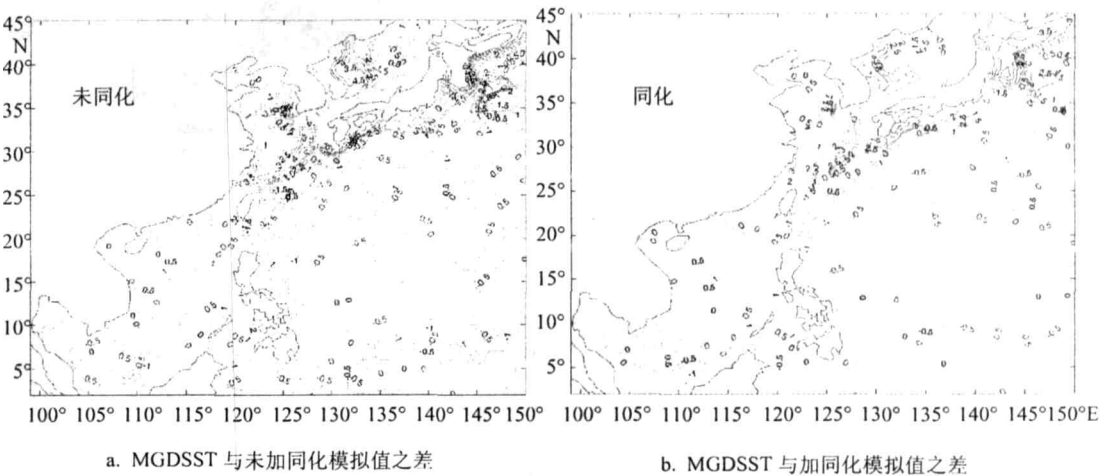


图 3 MGDSST 年平均资料与模拟温度之差

从图 3 可以看出, 黑潮区、亲潮区和日本海区域未加同化的模拟温度值偏高, 平均温差在 3 左右, 最大温差达到 5 以上, 说明模式在上述区域的模拟能力较差, 原因可能与上述区域地形梯度太大或者流系较强有关。通过同化处理, 这些差异得到了一定的修

正, 平均温差减小了 1 左右; 在 $130^{\circ} \sim 150^{\circ}\text{E}$, $5^{\circ} \sim 15^{\circ}\text{N}$ 海域内, 同化也有一定的效果, 平均温差减少了 0.5 左右。

将加入同化与未加入同化模拟的输出结果与对应时刻的 AVHRR 资料做均方根误差对比, 每 10 天做一次比较, 图 4 是全年的均方差曲线。

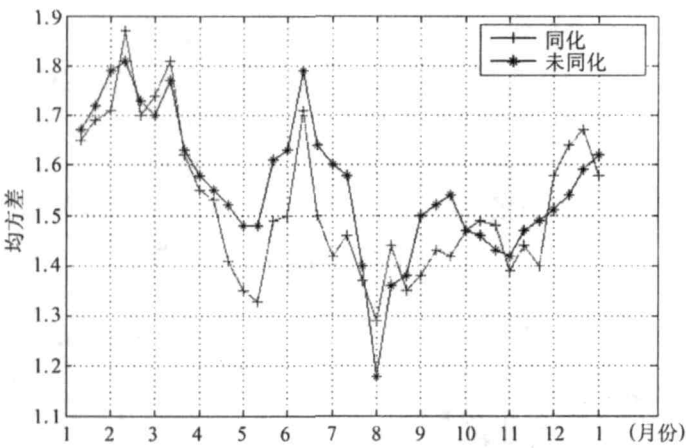
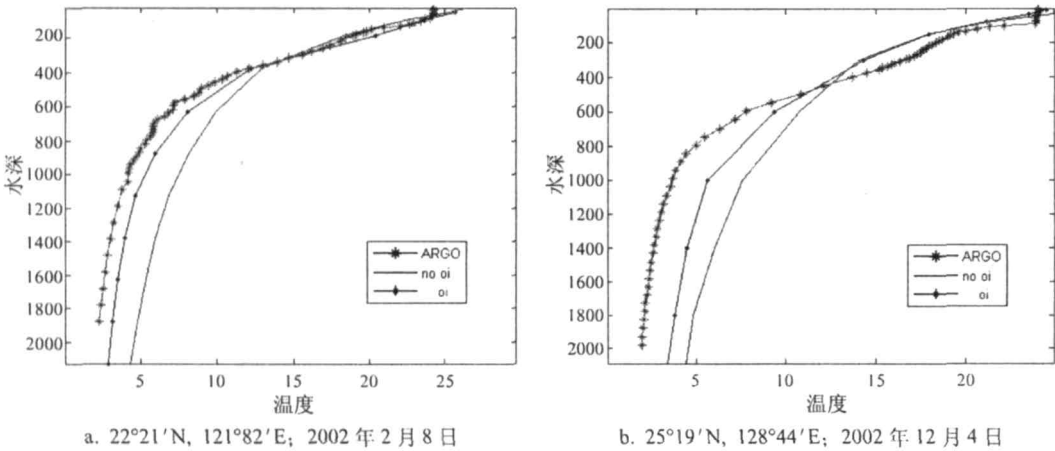


图 4 模拟值与卫星资料的均方差

图 4 “+”号曲线为加了同化的结果, “*” 是没有加同化的结果。从图中可以看出, 除 2 月、3 月、8 月、10 月、12 月的个别日期之外, 加了同化的模式模拟结果与卫星资料的吻合程度比未加同化的吻合程度都有所提高, 年平均均方差减少了大约 0.1。

我们用 ARGO 海温数据来验证模拟的深层海域的海温变化。选取 4 个 argo 浮标的观测数据(分别是 2 月、8 月、10 月、12 月), 将加入同化的模拟结果和未加同化的模拟结果与之进行比较 (见图 5):



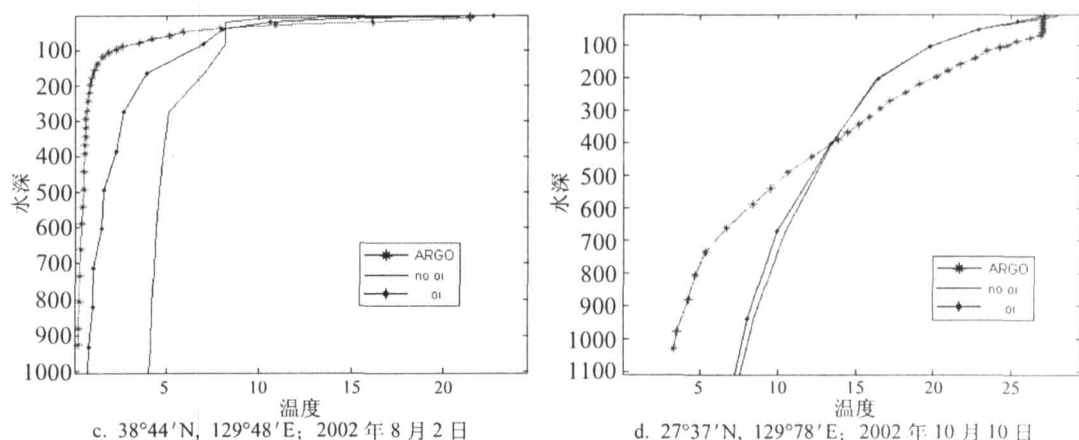


图 5 ARGO 数据与模拟结果的对比

图 5 “-” 线是未加入同化的模拟值, “·” 划线是加入同化的模拟值, “*” 线是 argo 浮标数据。由图可以看出, 在各个季节, 在海域的不同位置, 该同化系统不仅对浅层水域水温有一定影响, 对深层的温度也有较强的修正作用。例如在图 5c 中, 该廓线位置位于朝鲜半岛南部海域, 从水深 50m 处开始, 加入同化的模拟结果明显向实测值逼近, 到了约 900m 处误差已经由未加同化的 4 左右减少到不到 1, 在图 5(a、b、d) 各图中, 这种对深层水温的修正作用也各有体现。

6 小结

(1) 基于国家海洋环境预报中心三维温盐流预报模式, 本文根据最优插值方法发展了一个资料同化系统, 利用 2001 年 1 月 ~ 2002 年 12 月的船舶报海表温度资料和 Argo 浮标的温度廓线资料, 进行西北太平洋海区的连续同化模拟试验。结果表明, 该同化系统能够比较好的反映西北太平洋海域的温度一般分布规律; 将模拟结果与未加同化的海温模拟结果进行对比, 可以看出, 通过同化处理, 能有效地改进模拟结果, 使模拟结果更为接近“真实”值。

(2) 由于背景场误差协方差矩阵和表层海温对深层的影响系数均由经验公式得出, 使得观测资料与模式之间的协调带有一定的随机性。此外, 该同化系统只针对海温进行同化, 缺少多变量之间的协调分析, 这些均会导致很难得出“最优”的模拟结果。因此, 需要改进背景场误差协方差矩阵的结构和表层海温对深层的影响因子算法, 同时对模式动力计算部分进行改进, 实现多变量(海温、盐度、海面高度等)的协调同化。

参考文献:

- [1] Blumberg A F, G L Mellor. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, in Three-Dimensional Coastal Ocean Models edited by N. Heaps, 1987, 4: 208, American Geophysical Union Washington D C.
- [2] Derber J, A Rosati. A global oceanic data assimilation system. J Phys Oceanogr, 1989, 19: 1333 ~ 1347.

-
- [3] Daley, Roger. Atmospheric data analysis. Cambridge Univ Press. 1991.
- [4] F Bouttier, P Courtier. Data assimilation concepts and methods. Meteorological Training Course Lecture Series. 1999.
- [5] Zhou G Q, X Li. An oceanic data assimilation system based on a global OGCM, Corpus for pre-processing system for data input of climate models, documents for national key project-studies on short-term climate prediction system in China (1996-2000), sub-project 2-6 (96-908-02-06),2000,I 34 ~ 43.
- [6] 刘钦政, 张建华, 等. 渤海三维海洋温度和海流数值预报[J]. 海洋预报, 2005 22(S1) :27 ~ 34.
- [7] 刘益民, 李维京, 张培群. 国家气候中心全球海洋资料四维同化系统在热带太平洋的结果初步分析[J]. 海洋学报, 2005 27(1) :27 ~ 34.
- [8] 许 黎, 朱 江, 等. ARGO 浮标对于一个热带太平洋海洋资料同化系统的影响[C]. 第二届全国海洋资料同化学术研讨会会议交流材料. 2004,5 ~ 18.
- [9] 渤海、黄海、东海海洋图集. 海洋出版社, 1992.
- [10] 中国近海水文. 海洋出版社, 2005.

Optimal Interpolation and Its Application to Assimilation of Sea Temperature in Northwest Pacific Region

LI Yun, LIU Qin-zheng, ZHANG Jian-hua, WANG Xu, LI Yan

(National Marine Environmental Forecasting Center, beijing 100081 China)

Abstract : In this paper, an oceanic data assimilation module based on optimal interpolation is developed for a 3-dimensional ocean model (POM). Some experiments are designed to test the module's correctness and feasibility. By using the ocean observing data of ARGO and volunteer ship from 2001 to 2002, the simulation which the data assimilation for the region of Northwest Pacific is carried out. The comparison between the simulation result with data assimilation and without data assimilation reveals that the data assimilation is capable of improving the simulation results.

Key words : Data assimilation ; Optimal interpolation ; Volunteer ship data ; ARGO data ; 3-dimensional ocean model