

# 海洋资料同化:一个简单介绍

朱 江

中国科学院大气物理研究所

## 摘 要

物理海洋研究长久以来一直受到观测资料不足的制约。然而这一状况在过去的十年中得到了很大的改善。这主要归功于 TOPEX/Poseidon 高度计资料。在今后的十年中, SST 卫星资料、Jason-1 高度计资料、ARGO 资料和表面盐度卫星资料将和常规海洋船舶资料一起为海洋研究提供前所未有的海量观测资料。在这样巨大的资料面前,对于仅习惯于分析几个断面、航次温盐资料的物理海洋学家来说可能会是一个恶梦。而资料同化方法是从这些海量的数据中提取物理海洋学家们具有不同侧重点的相关信息的一个有效手段。本文的目的是鸟瞰目前海洋资料同化方面的研究进展、国际海洋资料同化相关的研究计划并展望今后的发展。本文首先,讨论海洋观测资料的过去、现在的情况和今后十年的发展。具体将包括(1)回顾过去 100 年间在中国海域的船舶观测的历史纪录情况;(2)卫星观测情况;(3)ARGO 观测。其次讨论目前海洋资料同化所使用的方法,并对其优缺点在理论和实用方面进行评述,并展望今后同化方法的发展方向。第三,介绍全球资料同化试验(GODAE)组织的情况、其研究计划和中国的参与情况。第四,介绍大气所的海洋资料同化系统的现状和今后的发展计划。目前大气所具有一个为 ENSO 预测服务的热带太平洋海洋资料同化系统和一个中国近海和中尺度模式耦合的海洋同化系统。其方法都是基于 3 维变分。目前,我们正发展新一代的同化系统,能够同化 T/P 和 Jason-1 高度计资料,能够同化 ARGO 盐度观测资料,具有新的算法(分层迭代方案、不需要计算背景场协方差逆矩阵),能够利用气候资料中揭示的温盐关系等特点。

## 一、海洋观测:过去、现在和今后十年

海洋的观测主要是船舶观测、卫星遥感观测、海岸水文站观测和浮标观测。过去的几百年主要采用船舶来进行海洋的温盐观测和海岸水文站的海温、盐度和水位、潮流观测。

### 1.1 船舶观测

图 1 显示了我国近海和周边海域的历史船舶观测的站位覆盖图。日本海域的观测是密度最高的。图 2 显示了 1940—1996 年间同样海域内的观测站位的个数。从图中可以看出从六十年代中期到七十年代初期，由于越战的影响，观测数量大幅度增加（主要在南海）。图 3 是 1972 年的观测站位分布。从图中可以看出历史的海洋资料（主要是海温资料，部分站位有盐度观测）已经可以对我国周边海洋的近几十年的气候海温和盐度状况提供较为可靠和较高分辨率的信息。

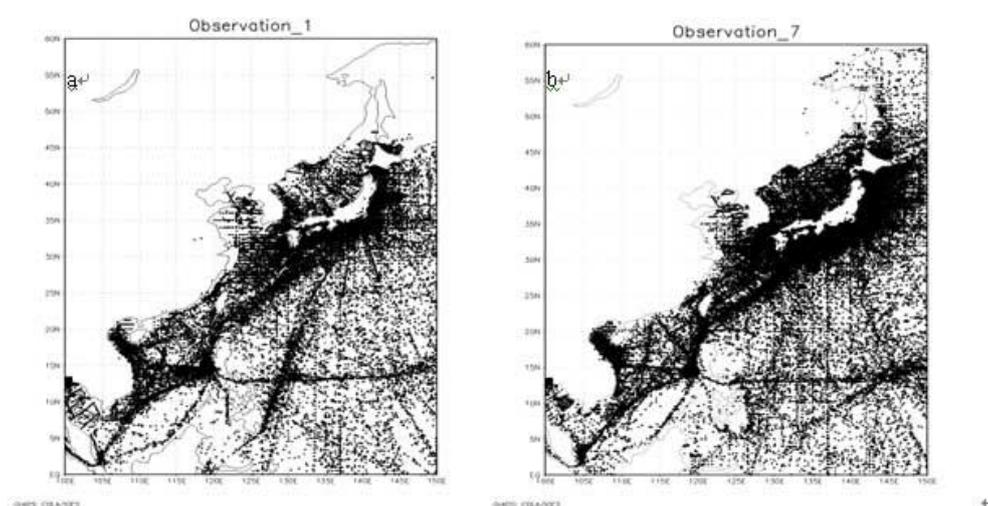


图 1 1940-1996 年我国周边海域船舶观测站位分布（资料来源：WORLD OCEAN DATABASE 1998）。

a: 一月累积； b: 七月累积。

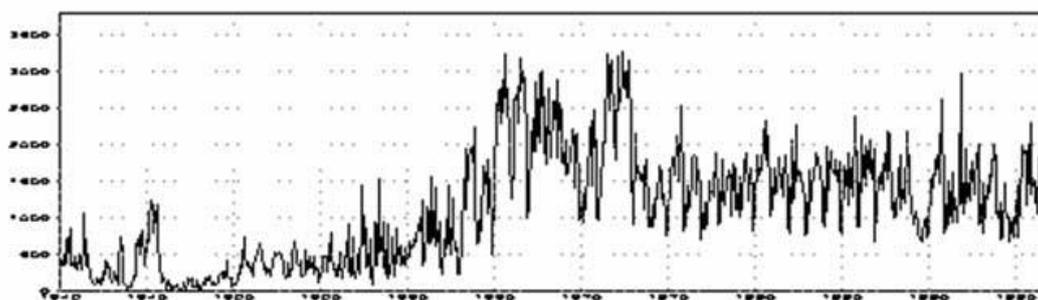


图 2 1940-1996 年我国周边海域船舶观测站位数（资料来源：WORLD OCEAN DATABASE 1998）。

图 2 1940-1996 年我国周边海域船舶观测站位数 (资料来源: WORLD OCEAN DATABASE 1998)。

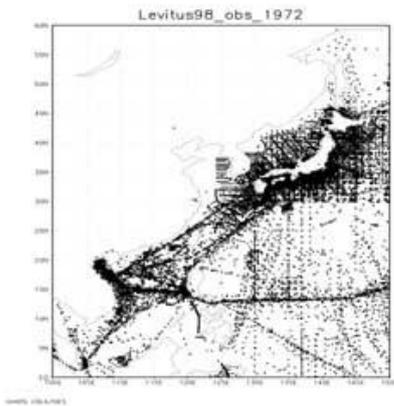


图 3 1972 年我国周边海域船舶观测站分布

(资料来源: WORLD OCEAN DATABASE 1998)。

卫星	国家	服役时间
Geosat	美国	1985.3—1990.1
Topex/Poseidon	美国/法国	1992.8—
ERS-2	欧洲	1991/1995—
Jason-1	美国/法国	2002.1—
Jason-2	美国/法国	2006—

海洋卫星高度计能够提供海面变化、海面风速和波高的信息, 广泛应用在大洋环流、潮汐和中、小尺度物理海洋学的研究中。其中 Topex/Poseidon 的成功远远超出了人们当初对她的期望。对大尺度应用, 她提供的海面高度变化的资料精度可达 2cm。其带来的研究成果在成千上万篇论文中得到体现, 可以说是物理海洋学历史上最成功的科学试验。目前其后继卫星 Jason-1 已经发射并提供数据, 而 Jason-2 也将在 2006 年计划发射 (见表 1)。

### 1.3 全球高精度 SST (GHRSSST) 卫星观测

全球海洋资料同化试验 (GODAE) 发起的多传感器高分辨率 SST 产品计划将于 2003-5 年间提供时间分辨率为 6 小时, 空间分辨率为 10km 的产品。参与此计划的有美国、欧洲、日本等国的宇航部门、研究部门和大学等。

### 1.4 Argo 浮标

国际 Argo 计划提出施放 3000 个剖面浮标组成一个海洋观测网, 以便实时观测全球海洋上层的温、盐度结构。浮标将被设置在几百到两千米水深附近漂移, 且每隔 10 天上浮一次, 把测量的温、盐度剖面资料 and 位置信息通过卫星传送到设在陆上的接收站。然后, 浮标再次下沉到预定的深度进行新一轮循环。目前已经有三百多个浮标在运行中。Argo 浮标对海洋资料同化的新挑战有两个: 一是

盐度资料的同化。这可以类似地用温度同化的方法来解决。二是浮标位置信息的同化，这需要考虑流场的散度约束和地转平衡之类的约束。这将是近几年海洋资料同化的主攻方向。

### 1.5 海面盐度卫星

最近发现 (Maes et al., 2002) 仅根据卫星测得的水温数据估计海水密度，而忽视了另一个影响密度的因素，即海水盐度会对 El Nino 的预测产生负面的影响。因此估计海水盐度成为这几年海洋资料同化研究的一个热点 (Han et al., 2003)。美国宇航局计划于 2006 年~2007 年间发射观测全球海水盐度的卫星。这将为海洋监测提供又一个手段。

### 1.6 其它

其它海洋观测还包括热带太平洋浮标阵列 (TAO)，GTS 船舶报资料等。

## 二、海洋资料同化的方法

最早的资料同化方法是较为机械的插值方法，比如线性插值或多项式插值以及逐步订正法等。这些方法都没有充分利用资料和模式结果的误差信息，同时也缺乏理论基础。直到 60 年代，最优插值法的提出，资料同化方法才有了基于统计估计理论的基础。目前的资料同化方法根据其理论原理可分为两类，一类是基于统计估计理论的，如最优插值、Kalman 滤波，Kalman 光滑，集合 Kalman 滤波等。另外一类是基于变分方法的，如 3 维变分 (3D-VAR)，强约束 4 维变分和弱约束 4 维变分等。

最优插值 (Derber and Rosati, 1989; Behringer et al., 1998; Carton et al., 2000) 的主要假设是背景场 (即模式预报结果) 误差的协方差矩阵是定常的。并且协方差矩阵的模型通常是用随距离呈指数递减的函数。这个模型通常无法拟和大气中常出现的槽脊系统和海洋中的涡漩。目前许多业务化部门采用这一方法 (例如日本气象厅和天气预报系统和海洋预报系统, 美国 NCEP 和 ENSO 预报系统

中的海洋资料同化系统)。目前的改进方法之一是引入背景场本身的信息,这样可以有效地改进最优插值法的基本假设。是对 Kalman 滤波的一种近似。

Kalman 滤波不假设背景场的误差是定常的,而是利用协方差矩阵预报方程来计算。其原理是先进的,但是在实际应用中却因为计算量和存储量太大,在可预见的将来,还无法应用到像最优插值方法现在应用到的那种规模的数值模式和观测系统。Kalman 光滑是 Kalman 滤波的一种完善,它可以利用后一时刻的资料来改进前一时刻的估计。分为固定区间光滑和固定时滞光滑两种,其计算量比 Kalman 滤波更大。目前多在研究 Kalman 滤波的简化形式,比如基于粗空间分辨率的模式来构造协方差矩阵预报方程。集合 Kalman 滤波(Evensen, 1994)是针对 Kalman 滤波中的协方差矩阵预报模式有时会出现计算不稳定等问题而提出的,其主要思想是抛弃协方差矩阵预报模式,而是直接利用 Monte-Carol 方法来多次积分模式,从而得到背景场的误差协方差矩阵。这个方法的计算存储量比 Kalman 滤波小很多,但是其计算量也不小。目前其研究的势头很热。

三维变分方法其实是最优插值方法的一般化,可以处理观测矩阵是非线性的情况。其计算量比最优插值要大。目前不少业务化单位使用这一方法,例如英国气象局,加拿大气象局和美国的 NCEP。日本气象厅的 ENSO 预报的海洋资料同化系统也采用这一方法(Kamachi et al, 2001)。强约束四维变分(Talagrand and Courtier, 1987)是目前主要业务化单位使用的最先进的方法,欧洲中期天气预报中心就于 1996 年底最先采用了这个方法(Courtier et al. 1994),其结果比三维变分方法要好。法国气象局也已经采用了强约束四维变分作为业务化系统,英国和加拿大的气象局将会是下一个采用此方法的部门。这一方法的计算量比三维变分要大很多。弱约束 4 维变分(Bennett and Thornburn, 1992; Courtier, 1997)是针对强约束四维变分的模式无误差的假设而提出来的,它把模式误差的因素考虑了。其它的方法还有如自适应滤波方法、自适应变分方法等。

### 三 研究计划和打算

图 4 简要地显示了大气所海洋资料同化系统发展的过去、现在和对未来的计划。从 1995 年起,大气所开发了大洋环流描述的资料同化系统(周广庆,李旭,

2000), 可以同化海温资料, 采用的方法为变分/最优插值。后来, 此系统应用到了 ElNino 预报的耦和模式中(周广庆, 曾庆存, 1999)。目前已经完成在中国及周边海域的十年资料同化。目前主要是进行新一代的海洋资料同化系统的研究, 要求能够同化温、盐和高度计资料。今后 2-3 年的发展主要是应用在 ElNino 数值预报系统和中国周边海域高分辨率海气耦和同化/预报系统的研发和三十年再分析资料集的生成。今后十年内的研究将会集中在更加先进的方法(如集合 Kalman 滤波)的研究和应用。

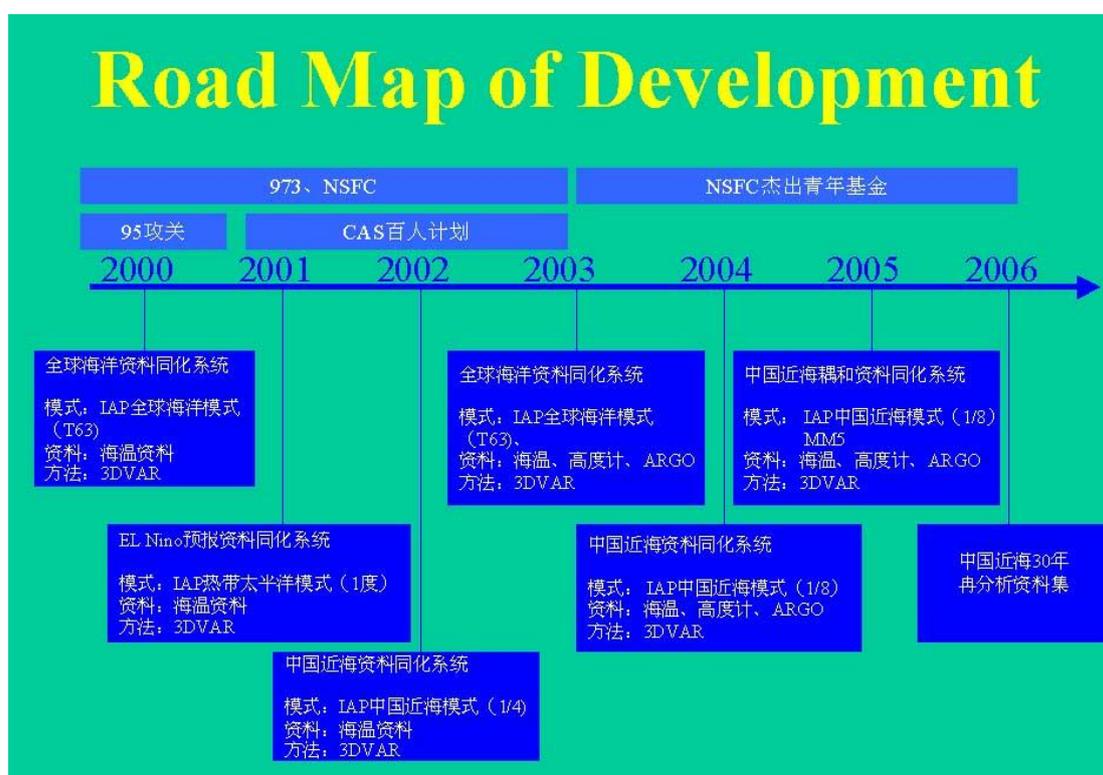


图 4 海洋资料同化系统发展路线图

海洋资料同化有许多没有解决的问题。在我们研究发展新一代海洋资料同化系统中遇到了许多挑战。在方法论上, 我们提出了子适应变分方法 (Zhu and Kamachi 2000), 为解决模式预报误差协方差矩阵确定的困难提供了一个选择。同时我们也应用此方法到 SST 资料同化中 (Zhu et al 2002)。前面已经提到海水盐度的估计对 El Nino 预报和海洋资料同化的重要性。然而由于盐度观测相对温度观测很少, 因此利用海水的温盐关系来在资料同化中估计盐度是当前海洋资料同化研究的一个重要问题。我们发展了一个这样的方法 (Han et al., 2003)。图 6 是利用温度资料同化来估计盐度并和盐度实际观测的比较得到的误差垂直

分布。在高度计同化算法上，我们提出了分层计算的算法 (Luo et al., 2003)，可以有效地减少对计算机内存的需求，这对应用在高分辨率模式具有重要的实际意义。资料同化中考虑不同变量间的平衡条件上十分重要的。比如地转平衡就提供了流和温盐的非线性平衡关系、温盐关系也是温度和盐度间的非线性关系。在应用三维变分方法时，我们提出了一个估计背景场误差协方差矩阵的新方法 (Fu et al. 2003)，其结果比用简单的协方差矩阵 (Behringer et al, 1998) 好。尽管三维变分在实际应用上被普遍采用，但是由于其利用预报误差协方差矩阵仅能够考虑到线性的平衡条件，我们提出了一个推广到[非线性平衡条件](#)的理论 (Zhu, 2004)，为在三维变分方法框架上考虑非线性平衡条件提供了新途径。

利用三维变分方法我们完成了近十年[中国近海及周边海域海温资料同化试验](#) (You et al, 2004)。模式为三重嵌套的 $\eta$  坐标海洋环流模式 (李荣凤, 曾庆存, 1993; 游小宝等, 2001)，太平洋区域模式： $10 \times 10$ ，中国海区域模式： $0.50 \times 0.50$ ，台湾周围（或南海）区域模式： $0.250 \times 0.250$ 。垂直 24 层。风应力采用 ECMWF 再分析 (1979–1993)。同化的海温资料在第一节已经介绍。图 7–9 给出了一些同化和未同化结果的比较。初步的海洋资料同化实验结果表明，虽然只同化温度场，海洋模式作为动力扩展，无论在时间或空间上，都能够把信息扩展到更广阔的区域，并调整其他变量，从而使得计算结果更为真实，比如：同化海温资料增强了黑潮的流速，并紧缩了黑潮的流幅，使黑潮向更真实的状况逼近；同化模式揭示了观测到的夏季黄海冷水团，并使得黄海暖流的季节变化与实际观测也更为接近；与观测的 275 米以上热容量变化相比较，同化模式比未同化模式能更好的揭示晚夏早秋南海所存在的偶极子涡现象及其中间的东向急流。

## 四 结论

- 今后十年我们将获得前所未有的海量海洋资料，这些海洋资料将使业务化海洋学成为现实；
- 资料同化是我们从这些海量的资料中提取信息、扩展对海洋的认识并且最终预报海洋在不同时间、空尺度变化的最有力手段；

- 今后十年, 先进的海洋资料同化方法如四维变分方法和集合 Kalman 滤波将会成为研究和应用的主要方法;
- 海洋资料同化产品的用户将会大量增加, 包括海洋科研、跨季度预报、海军应用、民用海上安全、渔业、海上产业(采油等)、海岸带管理等;
- 海洋资料的共享、预报/同化产品的公开将会成为共识。

## 参考文献

- Behringer, D. W., M. Ji, and A. Leetmaa, 1998: An Improved coupled model for ENSO prediction and implications for ocean initialization. Part I: The ocean data assimilation system. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 1013–1021.
- Bennett, A. and M. Thornburn, 1992: The generalized inverse of a non-linear quasi-geostrophic ocean circulation model. *J. Phys. Oceanogr.*, **3**, 213–230.
- Carton, J. A., G. Chepurin\*\*, X. Cao, and B. S. Giese, 2000: A Simple Ocean Data Assimilation analysis of the global upper ocean 1950–1995, Part 1: methodology, *J. Phys. Oceanogr.*, 30, 294–309.
- Courtier, P., J.-N. Thépaut and A. Hollingsworth, 1994: A strategy for operational implementation of 4D-VAR, using an incremental approach. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **120**, 1367–1387.
- Courtier, P., 1997: Dual formulation of four-dimensional variational assimilation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **123**, 2449–2461.
- Derber, J. and A. Rosati. 1989. A global oceanic assimilation system. *J. Phys. Oceanogr.* 19: 1, 333–1, 347.
- Evensen G., 1994, Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *J. Geophys. Res.*, 99(C5), 10143–10162.
- Fu, W., G. Zhou and H. Wang, 2003: Estimating background error covariances from model outputs for oceanic data assimilation. Submitted to *Advances in Atmospheric Science*.

- Han, G., J. Zhu and G. Zhou, 2003: Salinity Estimation Using T-S Relation in the Context of Variational Data Assimilation, submitted to *J. Geophys. Res.* (in revision).
- Kamachi, M., Kuragano, T., Yoshioka, N., Zhu, J., and Uboldi, F., 2001: Ocean data assimilation of satellite altimetry and predictability in the western North Pacific, *Advances in Atmospheric Science*, 18(9), 767-786.
- 李荣凤, 游小宝, Peter C Chu, 夏季西太平洋等位势密度面上的副热带逆流, 科学通报, 2002, 录用待刊
- 李荣凤, 曾庆存, 1993: 冬季中国海及其邻近海域海流系统的数值模拟, 中国科学(B), 23(12). 1329-1338.
- Luo, Z. D., J. Zhu, and Y. J. Wu, 2003: A decouple conjugate gradient--Gauss--Newton's iterative scheme for assimilating altimetry data problems, *Science in China* (D). (in press)
- Maes C., J. Picaut, and S. Belamari, 2002: Salinity barrier layer and onset of El Niño in a Pacific coupled model, *Geophys. Res. Lett.*, 29(24), 2206, doi:10.1029/2002GL016029.
- Talagrand, O. and P. Courtier, 1987: Variational assimilation of meteorological observations with the adjoint vorticity equation. I: Theory. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 113, 1311-1328.
- You X, L. Rongfeng, Z. Zhou, J. Zhu and Q. Zeng, 2004: Sea Temperature Variational Data Assimilation in the China Sea and its Adjacent Areas, China Science Bulltine.
- 游小宝、李荣凤、张铭、曾庆存, 2001: 三维斜压模式对冬季南海环流的数值计算, 海洋学报, 第 23 卷第 6 期.
- 周广庆, 曾庆存, 1999: 一个改进的海气耦合模式及其数值模拟, 自然科学进展, 9(6). 542-551.
- 周广庆, 李旭, 2000, 一个基于全球大洋环流模式的海洋资料同化系统, "气候模式资料前处理系统研制" 专题论文集, 国家重点科技攻关计划 96-908-02-06 专题资料汇编 (一), 34-43.
- Zhu, J., 2003: Nonlinear balance constraints in 3DVAR assimilation. Submitted to *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*

- Zhu J., M. Kamachi, and D. Wang, 2002: Estimation of air-sea heat flux from ocean measurements: an ill-posed problem. *J. Geophys. Res.*, Vol. 107, No. C10, 3159, doi: 10.1029/2001JC000995.
- Zhu J., W. Hui, and Zhou G., 2002: SST data assimilation experiments using an adaptive variational method. *Chinese Science Bulletin*, Vol. 47(23), 2010-2013.
- Zhu, J., M. Kamachi, and W. Hui, 2002: The improvement made by a modified TLM in 4DVAR with a geophysical boundary layer model. *Advances in Atmospheric Science*, Vol. 19(4), 563-582.
- Zhu, J., M. Kamachi, and G. Zhou, 2002: Nonsmooth Optimization Approaches to VDA of Models with on/off Parameterizations: Theoretical Issues. *Advances in Atmospheric Science*, Vol. 19(3), 405-424.
- Zhu, J. And M. Kamachi, 2000: The role of time-step size on numerical instability of tangent linear models. *Monthly Weather Review*, 128, 1562-1572.
- Zhu, J. And M. Kamachi, 2000: An adaptive variational method for data assimilation with imperfect models. *Tellus*, 52A, 265-279.