DOI:10.11737/j.issn.1003-0239.2013.01.012

海洋温盐度资料多变量同化研究进展

张春玲[1,3]，李宏[1]，许建平[1,2]，王振峰[4]

(1.国家海洋局第二海洋研究所,浙江 杭州 310012;2.卫星海洋环境动力学国家重点实验室,浙江 杭州 310012;3.中国海洋大学海洋环境学院,山东 青岛 266003;4. 东海舰队司令部海洋水文气象中心,浙江 宁波 312122)

摘　要:早期海洋资料同化仅考虑温度的调整而忽略盐度的变化,这往往会带来虚假信息,可能导致密度场被严重恶化,同化后的结果甚至比没有同化任何观测资料时还要差。为了解决这个问题,海洋资料同化中的一些温、盐度多变量调整方案便被提出来了。本文对广泛应用于多变量分析的资料同化方法及不同温、盐度多变量调整方案进行了系统的回顾,对它们的优缺点进行了分析与讨论,并指出了不同调整方案的适用条件及应用现状,最后对Argo资料在海洋资料同化中的重要性及今后的研究重点进行了探讨。

关键词:海洋资料同化;多变量调整;Argo 资料;网格化;海洋模式

中图分类号:P731　**文献标志码**:A　**文章编号**:1003-0239(2013)01-0086-07

1　引言

至少在Argo计划出现以前,海洋盐度观测资料比较匮乏,海温观测资料相对丰富些;另一方面,在平均状态下,由温度引起的密度变化要远大于由盐度引起的密度变化[1-2],这使得人们在研究一般海洋环流特征时,通常忽略盐度的影响。所以早期的海洋资料同化主要考虑单个变量即海温资料的同化问题,而盐度和流场在同化中保持不变,仅仅是通过动力学模式来调整。

近些年来,人们研究发现盐度变化对密度场和海洋环流的影响是不可忽略的,单变量(海温)的数据同化有时会严重地恶化密度场,导致模式计算的流场比没有同化观测资料时还要差[3],所以有关盐度的变化对全球海洋的影响成了人们非常关注的问题。实际上,对于一致的模式动力学来说,温度和盐度应该同时被监测,尤其在西太平洋海域,这一点显得更为重要[4]。盐度垂直结构对于西太平洋热量再分布具有重大的影响,盐度变化对海水层化的改变可以影响西太平洋地区上层海洋的热量和动量收支[5-6];在太平洋暖池,由盐度控制下的热传输代表了影响此区域热预算的一个重要过程;并且,近些年的研究表明,只修正温度的单变量同化系统是有缺陷的,如,1996年美国国家环境预报中心西太平洋赤道海区的业务化海洋分析结果中,海面动力高度就有5—10 cm的误差,这很可能是由于缺乏盐度实测资料而忽略盐度变化引起的[7];Troccoli等[8]发现当只同化温度时,要得到一个好的温度同化场就必须正常地调整盐度廓线。这些研究都表明了在海洋资料同化中纠正盐度的重要性。

为了弥补盐度观测资料的不足,解决同化中只有温度没有盐度的问题,需要把盐度和温度或海面高度关联起来,比如可以引入温、盐度之间的约束关系。因此,许多学者针对一些目前被广泛应用的资料同化方法,例如最优插值(OI)、集合卡尔曼滤波(EnKF)、集合最优插值(EnOI)和三维变分(3D-VAR)等,提出了不同的温、盐度多变量调整方案,力求在同化过程中,能够保证温、盐度场均能得

收稿日期:2011-12-23
基金项目:海洋公益性专项(201005033);科技基础性工作专项(2012FY112300);国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项(JT0904)
作者简介:张春玲(1981-),女,博士研究生,主要从事物理海洋学资料分析研究。E-mail:zhangchunling81@163.com

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

到调整。

2 用于多变量分析的几种主要的海洋资料同化方法

目前的资料同化方法根据其理论可分为两类,一类是基于统计估计理论的,如最优插值、卡尔曼滤波、集合卡尔曼滤波、集合最有插值等;另外一类是基于变分方法的,如三维变分,强约束四维变分和弱约束四维变分等。这里简单回顾广泛用于多变量分析的海洋资料同化方法的基本原理,主要包括:最优插值、集合卡尔曼滤波、集合最优插值及三维变分等四种。

2.1 最优插值法(OI)

Gandin[9]首次独立地推出了多元OI方程组,并把它们应用于在前苏联进行的客观分析。在OI方法中,分析场是背景场与由权重矩阵加权的修正量之和,采用最小二乘方法求得最佳线性无偏估计方程中的最优权重矩阵。此方法的基本假设是,对于一个模型变量,在确定它的增量时,只有几个观测值是重要的。因此,OI易于编码,并且计算量相对较小,这是它的主要优点。但基于这一假设,也使得OI分析结果并非全局最优,分析在空间上不协调[10],并且,OI所用协方差矩阵是固定的,不随时间变化,这就限制了它不能将动力模式和观测信息很好地融合在一起;另外,OI是针对线性系统发展起来的,难以处理观测算子非线性的情况;无法确保大小尺度分析的一致性。

2.2 集合卡尔曼滤波(EnKF)

1994年Evensen[11]在Kalman滤波方法[12]的基础上,发展了基于蒙特卡罗算法的集合卡尔曼滤波方法。它结合了Kalman滤波和集合预报的优点,即用有限的集合样本来估算误差协方差矩阵的不确定性,这样计算量明显减小。在系统为线性,且样本数量趋于无穷时,EnKF和KF是等价的[13]。由于其概念简单,不需要作线性假设,不需要求解模式的切线性及其伴随,适合于并行计算等优点,是一个目前比较流行的方法。但由于EnKF是通过选取有限的样本来构造背景场误差协方差,这势必使得样本集合离散度不够(样本量有限),产生样本误差问题;在实际操作中,系统的非线性性,及通常利用扰动观测法获取样本初值,使得这种样本误差问题更为明显;另外,EnKF计算量依然很大。

2.3 集合最优插值(EnOI))

Evensen[14-16]将集合思想吸收到最优插值同化技术中,提出了集合最优插值数据同化法:格点的分析值在一个固定的模式向量样本集合(如长时间序列的模式积分)空间内进行计算,模式统计误差不随时间变化,从而减少计算量。但在误差计算时仍沿用EnKF集合预报的方式,以获得较传统OI方法更优的分析值。EnOI能够保持准动力一致性,避免假设均匀和各向同性等[17],并且EnOI的计算量要比EnKF小得多。但由于模式误差不随模式积分时间改变,EnOI较EnKF得到一个次优解。我国有学者[18-19]将此方法与其他同化方法进行了对比同化试验,EnOI是一种崭新的数据同化方法,近年来逐渐被国内外学者广泛研究应用[20-22]。

2.4 三维变分(3D–VAR)

三维变分基于极大似然估计的理论基础,通过求解一个目标函数(也称代价函数)的极小值(一般利用目标函数的梯度求其极小值),产生一个分析时刻的综合考虑背景场和观测值的大气或海洋真实状态的最大似然估计,并且给出背景场和观测场各自相应的精度。3D-VAR进行的是三维空间的全局分析,避免了分析不是全局最优的问题;也可以处理观测算子是非线性的情况,这样可以同化各种不同来源的观测资料[23-24]。但此方法是在某一时刻进行的分析,前一时刻的同化结果可作为后一时刻模式运行的初始场。但在使用时,无法用后面时刻的资料来订正前面的结果,同化的解在时间上不连续。

3 不同的温、盐度多变量调整方案

单纯的温度资料同化只能够调整温度场,而盐度场得不到任何订正,即便是温、盐度两种观测资料同时进入同化系统中,独立地订正温度场、盐度场,而不考虑温、盐度之间的约束关系,也往往会带来虚假信息。那么在缺乏盐度直接观测的情况下,如何来估计和调整盐度场成为海洋学家们备受关注的问题。目前,国内外学者提出了一些能够同时调整温度和盐度的方案,并将其应用于上述海洋资料同化方法中。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.1 基于温–盐(T–S)关系估计盐度场

海水温度和盐度是反映海水物理性质的两个基本变量,某一地区的水团特性通常对应某种特定的温盐关系。Stommel[25]基于从气候态数据集得到的温度与盐度之间的统计相关性,即温-盐(T-S)关系,首次提出了由温度观测来估计盐度的思想。后来,许多学者[26-27]改进了这种思想方法,以扩展其应用范围。

这种方法的基本思想是,当温度分析场在单变量温度资料同化中获取后,通过局地T-S关系,计算出对应的盐度分析场,而当有盐度资料时,再同化盐度资料,进而修正T-S关系。此方案基于两个基本假设:一是仅考虑海水的温度和盐度随深度的变化关系,并且温、盐度垂直剖面数据的物理(或统计)相关性(T-S关系)在一定时间和区域内是保持不变的,Troccoli 等[28-29]的研究指出,在热带海域,这种T-S关系能够保持2到4周;二是假定海洋混合层深度对温度和盐度来说是一致的。第一个基本假设是该方法的核心。

构造一种较好的T-S关系是此方法的关键问题, Reynolds等[30]曾指出,如果我们能够选取一种表现形式来有效刻画海表盐度观测信息,那么我们可以借助这一信息来改善上层海洋500m的盐度垂直剖面。最初有学者从气候态温、盐度资料通过函数拟合来构造T-S关系,但气候态资料一般是长时期的平均态资料,不能捕捉到季节变化特征,且不能充分构建出密度场的变化特性[7],通常情况下,这是一种可行但比较粗略的方法。因此,更为可靠的是利用时间和空间上更为连续的温、盐度场来构造这一关系,Troccoli 等[31]建议利用模式预报温、盐度场,而韩桂军等则是利用就近的CTD温、盐度观测资料。韩桂军等[32]借鉴Troccoli 的盐度调整方案,利用多重网格三维变分海洋数据同化方法,开发了中国近海及邻近海域海面高度和三维温盐流的23年海洋再分析产品。

然而,T-S关系并不是一个很精确的假设,而且在海洋非等熵动力过程存在的地方(比如混合层,河流入海口等区域),温度和盐度垂直剖面会变得高度不相关。此时,利用T-S关系根据温度场来构造盐度场就不太可取,对海洋混合层而言,额外的海表盐度观测值的加入能够弥补T-S约束在此时的不适用性。在这些特殊区域,对盐度一般不作调整[7]。

3.2 利用耦合温–盐EOF方法构造盐度场

通过温-盐关系来调整盐度场,虽然简单易行,但在某些海区T-S关系具有很大的不确定性。Maes[1]呼吁要关注T-S关系随时间的变化,并建议用一种新的途径来估计上层盐度剖面数据:将以温-盐函数关系为基础的经验正交函数(Empirical Orthogonal Functions, EOFs)与海表盐度及海表动力高度数据相结合来估计温盐廓线。通过用原始的独立数据集进行误差估计表明,与利用传统的温-盐关系调整盐度场的方法相比,该方法在一定程度上是成功的。此方法是通过把观测到的海面变率、海表温度和海表盐度从诸多模态中分离出来实现的,充足的温、盐度观测资料是这种方法的基础。

在热带太平洋海域,海洋观测资料较其他地区相对充足,Maes 等[33]在此海区,使用历史CTD资料,先将一段时期的温、盐度剖面资料按区域进行划分,在选取的每个小区域中,构造耦合的温-盐EOF模态,并选取几个主要的模态作为重新构造温、盐度变化场的基函数,再现温、盐度变率,通过求权重函数最小值来确定系数,并在权重函数中加入盐度约束项,以保证盐度值在合理的范围之内;并通过增添高度计数据拓展了上述方法[29];Fujii等[34]也用同样的方法,借助于变分同化方法重构了日本东部海域的温、盐度分布场;另外,Bellucci 等[35]借鉴Maes提出的耦合温-盐EOF模态,并针对盐度同化的困难,利用耦合温-盐来构建背景场误差协方差,同时考虑背景场协方差的时空结构对盐度的影响,发展了一个多变量降秩最优插值同化系统。

利用耦合温-盐EOF方法来构造盐度场可以将不同的海洋观测信息加入到权重函数中作为约束条件,从而提高精确度,并能根据我们重点关心的问题来选择对应的EOF信号。但耦合温-盐EOF方法要求温、盐度剖面数据越多的时候,其反映的信号越全面真实,由于海洋观测资料空间分布的不均匀,此方法难以推广到全球海洋。

3.3 借助海面动力高度订正盐度场

海面动力高度也是海洋中一个很重要的变量,其能捕捉到海洋中固定参考层上的所有斜压过程,这些斜压过程与温度、盐度的变化有着密切联系。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

因此,在海洋资料同化中,海面高度信息对盐度场的订正有着积极的意义。Vossepoel 等[36-37]提出了一种基于海面动力高度信息的盐度调整方案,并将这一盐度订正方案融入到三维变分同化系统中,在常规三维变分代价函数的基础上加入了与海面动力高度相关的温、盐度订正项,以此来强迫海面动力高度对温、盐度的一致性约束。该方案先利用温度观测资料和气候态T-S关系获取盐度估计值,然后根据由温、盐度观测值计算的动力高度观测值与由温度观测值和盐度估计值计算的动力高度估计值之差来计算盐度订正值。在此基础上,闫长香等[38]考虑了背景误差协方差矩阵的垂向相关,利用海面动力高度观测数据来估计温、盐度垂向剖面。目前,海面动力高度观测资料较为丰富:继20世纪90年代成功实施了Topex/Poseidon卫星高度计观测计划后,Jason-1海面高度观测卫星(Jason-1 Mission)也在2001年12月发射升空,这个观测系统可以提供几乎全球覆盖(范围为66°N—66°S)、时间分辨率为10 d的海面高度观测资料。因此利用这一方法来构造温、盐度场,可以弥补某些区域资料的不足,也可作为订正温、盐度资料的一个参考方法。

3.4 基于平衡约束的温、盐度多变量调整方案

平衡约束是另外一种可以订正盐度的方案。在有温、盐度两个模式变量的最优插值或三维变分同化方案中,背景场误差协方差是一个至关重要的量,其决定了不同变量之间的空间分布信息。如果不考虑温、盐度之间的任何约束,那么背景误差协方差矩阵就是一个块对角矩阵,而实际海洋中温盐关系是存在的。Derber 等[39]提出了一种线性平衡约束方案,假设温度及盐度的背景场与真实场的偏差之间存在线性约束关系,引入一个约束温度和盐度关系的线性平衡算子,从而保证温、盐度场之间具有相关性。此时,仅同化温度或盐度资料时,可以将温度和盐度间的信息相互传递,使得温、盐度场都能同时得到调整。在此基础上,Ricci 等[2]沿用Troccoli 等[7]的方式,采用了一种代表局地背景场温、盐度约束关系的方案:假设在任何分析格点,盐度可表示为一个背景场温度的函数,并且此函数是可微分的,盐度扰动量可以根据温度扰动量来计算。并鉴于温-盐关系在海洋混合层难以得到保持,引进一个控制系数来控制不同垂直深度上的温度和盐度扰动量之间的关系,使得在混合层等一些特殊区域,对盐度不作调整。

线性约束方案的一个优点是,单一的观测资料进入同化系统时能够对温、盐度资料进行同步调整。然而在海洋中,平衡约束可以是非线性的,甚至是强非线性的。

韩桂军等[31]人的研究表明,一些温-盐关系具有高阶多项式(如四阶)的形式,并提出了一个把温-盐关系作为弱约束的3D-VAR同化方案,利用历史CTD资料,通过多项式拟合来构造局地温-盐关系,给出了包含温、盐度两个分析变量的垂向一维代价函数,其最后一项包括非线性的温盐约束关系,并通过代价函数最小化同时求得温度和盐度的最优分析场。基于三维变分中Derber[38]提出的线性平衡约束形式,朱江[23]针对那些作用于模式变量(而不是增量变量)上的约束,导出背景场很好的满足平衡关系和背景场不必满足平衡约束两种情况下的非线性形式,提出了在三维变分同化中考虑非线性平衡约束的方案;并利用该方案,进行了从海面动力高度来估计温、盐度的资料同化数值试验。结果表明,采用了非线性平衡约束可以提高同化的质量;如果背景场的平衡关系满足不好的话,第二种形式将产生较第一种形式更好的结果。朱江等[40]介绍了新完成的一个海洋资料三维变分同化系统OVALS(Ocean Variational Analysis System)的设计方案,并利用热带太平洋的大洋环流模式进行了实际海洋温度、盐度和卫星高度计资料21a的同化实验,对此系统的性能进行了检验。结果表明,经过同化后,温度和盐度场较非同化试验产生了显著的改善。OVALS的设计方案考虑了背景误差的垂向相关和非线性的温-盐关系,通过同化高度计资料来直接调整模式的温度和盐度场。就当前的观测系统而言,OVALS可以说是一个比较全面的同化系统,可以对多种观测资料进行同化,并对多变量进行分析。

4 小结与讨论

随着研究的加深,这些不同的盐度调整方案将对大型海洋数值模式及同化系统的建立起到积极的推动作用。但任何温盐约束调整方案都无法完全解决由单变量同化所带来的一系列问题,必须依靠直接同化温度和盐度观测资料来解决这些问题,

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

特别是次表层盐度观测资料的同化，而盐度观测在时空分布上的严重不足是阻碍直接对其同化的一个重要因素。

2000年底正式启动国际Argo计划，其观测目标是能取得世界大洋中精确度分别为±0.005℃和±0.01的海水温度和盐度资料[41]。由3000个自动剖面观测浮标(简称Argo浮标)组成的全球Argo实时海洋观测网也已于2007年10月末初步建成。截止到2010年12月底，国际Argo计划在全球海洋0—2000m深度范围内累计获得的温、盐度剖面已达70余万条，并正以每年10万条剖面以上的速度在增加。Argo剖面浮标观测资料以其水平分布广，观测深度深、层次密以及数据量大和测量精度高的优势，在很大程度上改善了海洋盐度观测资料匮乏的现状。由2011年5月召开的第六届全国海洋资料同化研讨会的情况来看，随着Argo资料的逐渐积累，盐度资料相对匮乏的问题已经得到改善，使直接进行海洋温盐同步同化成为可能。

但由于Argo资料空间分布不均匀，而且缺少表层(0 m层)观测，一般海洋模式用户在直接使用时存在较大困难，从而使得丰富的Argo温、盐度观测资料不能充分发挥其优势。而2005年正式开始实施的高分辨率海面温度计划(high-resolution sea surface temperature Pilot Project, 简称GHRSST-PP)，针对业务化海洋学和气候研究与预测，可提供全球覆盖的高时空分辨率的海面温度观测资料, 其空间分辨率为10 km(部分地区可以达到2 km), 时间分辨率可达到6 h[42]。纵观其余如卫星遥感资料的应用过程，其获得普遍使用主要是解决了网格化和等时间间隔数据集的制作问题，从而便于模式引用。因此，将Argo资料与卫星遥感SST数据融合，尽快推出适用于海洋模式的Argo数据产品或网格数据集，是进一步扩大和推进Argo数据应用的重中之重。

参考文献：

[1] Maes C. A note on the vertical scales of temperature and salinity and their signature in dynamic height in the western Pacific Ocean : Implications for data assimilation [J]. J. Geophys. Res, 1999, 104: 15575-15585.

[2] Ricci S A, Weaver J, Vialard, Rogel P. Incorporating State dependent temperature salinity constraints in the background error covariance of variational ocean data assimilation. Mon [J]. Wea. Rev. 2005, 133: 317-338.

[3] Cooper N S. The effect of salinity in tropical ocean models [J]. J. Phys.Oceanogr, 1988, 18: 1333-1347.

[4] Woodgate R A. Can we assimilate temperature data alone into a full equation of state model [J]. Ocean Model, 1997, 114: 4-5.

[5] Vialard J, Delecluse P. An OGCM study for the TOGA Decade. Part I: Role of salinity in the physics of the western Pacific fresh pool [J]. J Phys.Oceanogr, 1998a, 28: 1071-1088.

[6] Vialard J, Delecluse P. An OGCM study for the TOGA decade. Part II: Barrier layer formation and variability [J]. J. Phys. Oceanogr, 1998b, 28: 1089-1106.

[7] Troccoli A, Coauthors. Salinity adjustments in the presence of temperature data assimilation [J]. Mon. Wea. Rev, 2002, 130: 89-102.

[8] Ji M, Reynolds R W, Behringer D. Use of TOPEX/Poseidon sea level data for ocean analysis and ENSO prediction: Some early results [J]. J Clim 2000, 13: 216- 231.

[9] Gandin L S. Objective analysis of meteorological fields [M]. Gidromet: Leningrad, 1963. 1-242.

[10] Kalnay E. Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 1-343.

[11] 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.

[12] Kalman R E, Bucy R. New results in linear filtering and predication theory [J]. Journal of Basic Engineering, 1961, 83: 95-108.

[13] Houtekamer P L, Mitchell H L. Ensemble Kalman filtering [J]. Meteorol. Soc, 2005, 131: 3269-3289.

[14] Evensen G. The Ensemble Kalman Filter: theoretical formulation and practical implementation [J]. Ocean Dyn., 2003, 53: 343-367.

[15] Oke P, Brassington G B, et al. The bluelink ocean data assimilation system (BODAS) [J]. Ocean Model, 2008, 21: 46-70.

[16] Counillon F, Bertino L. Ensemble Optimal Interpolation: multivariate properties in the Gulf of Mexico. Tellus -A, 2009, 61: 296-308.

[17] Oke P, Brassington G B, et al. Ocean data assimilation: a case for ensemble optimal interpolation [J]. Australian Meteorological and Oceanographic Journal, 2010, 59: 67-76.

[18] Fu W, Zhu J, Yan C. A comparison between 3DVAR and EnOI techniques for satellite altimetry data assimilation [J]. Ocean Model, 2009, 26: 206-16.

[19] Wan L, Bertino L, Zhu J. Assimilating Altimetry Data into a HYCOM Model of the Pacific: Ensemble Optimal Interpolation versus Ensemble Kalman Filter [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2010, 27: 753-765.

[20] Bertino L, Lisaeter K A. The TOPAZ monitoring and prediction system for the Atlantic and Arctic Oceans [J]. Operat. Oceanogr, 2008, 2: 15-18.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[21] Xie J, Zhu J. Ensemble optimal interpolation schemes for assimilating Argo profiles into a hybrid coordinate ocean model [J]. Ocean Model, 2010, 33: 283-298.

[22] Yan Changxiang, Zhu Jiang, Xie Jiping. An ocean reanalysis system for the joining area of Asia and Indian-Pacific ocean [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2010, 3(2) : 81-86

[23] 朱江,闫长香. 三维变分资料同化中的非线性平衡约束[J].中国科学D辑:地球科学, 2005,35(12): 1187-1192.

[24] 高山, 王凡, 李明. 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.

[25] Stommel H M. Note on the use of T-S correlation for dynamic height anomaly computation [J].J Mar Res,1947, 6: 85-92.

[26] Flierl G R. Correcting expendable bathythermograph (XBT) data for salinity effects to compute dynamic heights in Gulf Stream rings [J]. Deep-Sea Res I, 1978, 25: 129-134.

[27] Kessler W S, Taft B A. Dynamic heights and zonal geostrophic transports in the central tropical Pacific during 1979-84[J]. J. Phys. Oceanogr, 1987, 17: 97-122.

[28] Emery W J, Dewar L J. Mean temperature–salinity, salinity-depth, and temperature-depth curves in the North Atlantic and North Pacific [J]. Progress in Oceanography, 1982, 16: 219-305.

[29] Maes C, Behringer D. Using Satellite-derived Sea Level and Temperature Profiles for Determining the Salinity Variability: A New Approach [J]. J. Geophys Res, 2000b, 105: 8537-8547.

[30] Reynolds R W, Ji M, Leetmaa A. Use of salinity to improve ocean modeling [J]. Phys Chem Earth, 1998, 23: 545-555.

[31] Han G, Zhu J, Zhou G. Salinity estimation using the T-S relation in the context of variational data assimilation [J]. J Geophys Res, 2004, 109, C03018, doi :10. 1029 /2003 JC 001781.

[32] 韩桂军,李威,张学峰, 等. 中国近海及邻近海域海洋再分析技术报告 [R]. 天津:国家海洋信息中心, 2009,1-6.

[33] Maes C, Behringer D, Reynolds R W. Retrospective analysis of the salinity variability in the western Tropical Pacific Ocean using an indirect minimization approach [J]. J. Atmos Ocean Technol, 2000a, 17:512—524.

[34] Fujii Y, Kamachi M. A reconstruction of observed profiles in the Sea East of Japan using vertical coupled temperature-salinity EOF modes [J]. J Oceanogr, 2003, 59: 173-186.

[35] Bellucci A, Masina S, DiPietro P, Navarra A. Using temperature-salinity relations in a global ocean implementation of a multivariate data assimilation scheme [J]. Mon. Weather Rev. 2007, 135: 3785-3807.

[36] Vossepoel F, Reynolds R W, Miller L. The use of sea level observations to estimate salinity variability in the tropical Pacific [J]. J Atmos Oceanic Technol, 1999, 16: 1400-1414.

[37] Vossepoel F, Behringer D. Impact of sea level assimilation on salinity variability in the western equatorial Pacific [J]. J Phys Oceanogr, 2000, 30: 1706-1721.

[38] Yan Changxiang, Jiang Zhu, Rongfeng Li, Guangqing Zhou. Roles of vertical correlations of background error and T-S relations in estimation of temperature and salinity profiles from sea surface dynamic height [J]. J. Geophys. Res., 2004, 109, C08010, doi:10.1029/2003JC0022 24.

[39] Derber J, Bouttier F. A reformulation of the background error covariance in ECMWF global data assimilation [J]. Tellus, 1999, 51: 195-221.

[40] 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D辑:地球科学,2007,37(2): 261-271.

[41] 许建平, 刘增宏. 中国Argo大洋观测网试验 [M].北京:气象出版社, 2007:4-5.

[42] GHRSST Porject Office. The GHRSST-PP Development and Im-plementation Plan [R]. UK : Met Office, 2003. 1-6.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Review of ocean data assimilation for temperature and salinity

ZHANG Chun-ling[1,3], LI Hong[1], XU Jian-ping[1,2], WANG Zhen-feng,

(1.Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012 China; 2.State Key Laboratory of Satellite Oceanography Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012 china; 3. Institute of Marine Environment, Ocean University of China, Qingdao 266003 China ; 4. Marine hydrologic meteorological center, East China sea fleet command, Ningbo 312122, China)

Abstract: Early ocean data assimilation only considered temperature adjustment and ignored the salinity changes, which often brings false information and lead to density field deteriorated seriously. The assimilation results were even worse than that without assimilating any observation data. In order to solve this problem, some multivariable assimilation schemes for temperature and salinity were brought up. In this paper, we reviewed the data assimilation methods widely used in multivariate analysis and different temperature and salinity adjustment schemes, discussed the advantages and disadvantages of them, and pointed out their application situation respectively. Finally, the importance of Argo data and the key research of future data assimilation were discussed in this paper.

Key words: ocean data assimilation; multivariable adjustment; Argo data; gridding; ocean model

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net