

海洋环流模式中卫星遥感资料同化的应用进展

Advancement in application to satellite data assimilation in the ocean circulation model

何 娜¹, 张祖强², 肖贤俊², 郭品文¹

(1. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044; 2. 国家气候中心, 北京 100081)

中图分类号: P73; O242

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2008)12-0092-05

物理海洋研究长久以来一直受到观测资料不足的制约,然而这一状况随着现代观测技术的迅猛发展得到了很大的改善。卫星遥感技术的发展提供了覆盖全球的、连续、实时的卫星观测数据,这是其他任何资料都无法比拟的。这些数据大部分难以直接运用来改善气候预测或数值模拟分析,然而资料同化技术的出现和发展改善了这一情况。

资料同化是根据一定的优化标准和方法,将不同时间、不同空间、采用不同观测手段获得的观测资料与数学模型有机结合,纳入统一的分析与预报系统,使得数值预报模式不断吸收消化观测资料,建立模型与资料相互协调的优化关系,使计算分析结果的误差最小,从而模式状态越来越接近真实大气和海洋的过程^[1]。

在物理海洋中通过资料同化可以有效利用遥感数据来改进数值模式结果;提供再分析资料集,用于分析研究;进行观测系统试验;调试海洋模式参数。目前,资料同化技术已经广泛应用于物理海洋模式之中,尤其是遥感资料的同化近年来得到了很大重视。多种卫星遥感资料,包括高度计资料、海表温度资料、海洋水色遥感数据等的同化技术快速发展。本文将对海洋环流模式中遥感资料同化的应用作一总结,讨论其发展方向。

1 海洋资料同化中主要的卫星遥感资料

1.1 卫星高度计资料

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。卫星高度计的发展起始于 20 世纪 70 年代,Skylab, GEOS-3 和 Seasat 等卫星的发射,成为研究海洋的基础,随后美国海军发射的 Geosat 和欧洲宇航局发射的 ERS-1, ERS-2, GFO 等都为卫星高度计测量提供了有效数据,20 世纪 90 年代美国和法国宇航局又发射了周期为 10 d 的 TOPEX/Poseidon 卫星,该卫星对大尺度应用提供的海面高度变化资料精度可达 2 cm。其后继卫星 Jason-1 和 Jason-2 也成功发射并开始提供数据^[1]。

1.2 海表温度遥感资料

海洋表面温度(SST)是一个重要的海洋环境参数。几乎所有的海洋过程,特别是海洋动力过程都直接或间接与海温有关。卫星遥感测定的 SST 方法有热红外测量和被动微波辐射测量两种。

热红外传感器的优点是探测空间分辨率较高,较长的使用历史,但缺点是精度受云、水汽、气溶胶等的影响比较大,需要做大气校正。目前,AVHRR, AATSR, MVISR 和 MODIS 是 SST 数据的主要来源。AATSR 和 MODIS 可以提供良好的精度,但 AVHRR 可以提供更大的覆盖范围。MODIS 与 AVHRR 相比,在数据波段数目、应用范围、分辨率、数据接收和数据格式等方面都做了较大的改进。微波传感器的探测不受云的影响,并且容易纠正大气的影响,但空间分辨率较低,对地表的辐射较为敏感。目前测量海洋表面温度的微波遥感仪器包括 JMR, AMSR, SMMR, TRMM, TMI 等。对于这些传感器遥感 SST 的验证对比国内外已有学者进行。

值得一提的是,目前全球海洋同化试验(GODAE)计划鉴于不同传感器的优缺点和海洋在不同时空尺度变化的复杂过程,将综合运用多源遥感资料,取长补短,建立一套准确可靠的、高时空分辨率的全球 SST 产品(GHRST-PP)。该产品的空间分辨率达 10 km(部分区域可达到 2 km),时间分辨率为 6 h。

1.3 海洋水色遥感资料

进行海洋水色遥感主要是为了获取富有植物浓度、悬浮泥沙含量和黄色物质分布等信息,以进行相关科学研究和应用。海洋水色遥感的资料主要包括叶绿素浓度、浮游植物浓度、悬浮泥沙含量和黄色物质分布等。第一代卫星水色传感器是 1978 年 NASA

收稿日期:2008-09-01;修回日期:2008-10-15

基金项目:财政部行业专项(GYHY(QX)2007-6-5);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:何娜(1984-),女,新疆吐鲁番人,硕士研究生,主要从事海洋资料同化研究,电话:010-68407085, E-mail: Hena0105@163.com

发射的 Nimbus-7 卫星上搭载的 CZCS,之后就是 20 世纪 90 年代的 MOS, OCTS, POLDER, SeaWiFS 等一系列的水色扫描仪。MODIS 是中分辨率成像光谱仪,其通道设置和水色产品的反演算法都与 SeaWiFS 相似,但由于其光谱分辨率高,因而接受的数据可靠性更高。

1.4 海面盐度遥感资料

Maes 等^[2]发现仅根据卫星测得的水温数据估计海水密度,会忽视了海水盐度会对 El Nino 的预测产生负面的影响。因此估计海水盐度成为海洋资料同化研究的一个新热点^[3]。目前,国际上有两个大的盐度遥感研究计划正在执行,即欧洲的 SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) 计划和美国的 Aquarius 计划,两颗盐度遥感卫星分别计划于 2008 年和 2009 年发射,这将为海洋监测提供又一个手段。

2 各种资料同化的方法及其优缺点

资料同化的分类方法有很多种。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,如最优插值法(OI)、Kalman 滤波、Kalman 平滑、集合 Kalman 滤波等。另一类是基于变分方法的,如三维变分(Three-dimensional variational analysis)、四维变分(Four-dimensional variational analysis)等。

早期的资料同化方法是经验性同化方法包括逐步订正法(SCM)^[4]、松弛逼近法(Nudging)^[5]等插值方法,其复杂程度最低。因为其先验的统计假设认为数据是完全正确的,没有充分利用资料和模式结果的误差信息并且缺乏理论基础,所以没有被广泛普及。直到 OI 的提出,资料同化才有了基于统计估计理论的基础。在海洋资料同化研究中,有一些学者

使用过这些方法^[6,7]。

OI 是 Gandin 在 Eliassen 工作的基础上,通过引入统计方法推导出了多元最优插值方程而提出的。其是将空间分布不规则的观测资料插值进网格格点上得到最优估计的一种方法。80 年代开始,OI 在世界上得到广泛应用,成为业务使用最多的一种同化方法。

Kalman 滤波是针对一个线性的动力系统提出的,其基本思想为:首先进行模式状态的预报,接着引入观测数据,然后根据观测数据对模式状态进行重新分析,随着模式状态预报的持续进行和新的观测数据的陆续输入,整个过程可以不断向前推进^[1]。Kalman 平滑是 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,其计算量比 Kalman 滤波更大。集合 Kalman 滤波(EnKF)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提出的,其主要思想是抛弃协方差矩阵预报模式,直接利用 Monte-Carlo 方法来多次积分模式从而得到背景场的误差协方差矩阵,该法的计算存储量比 Kalman 滤波小得多,但计算量也很大。

变分法利用了变分原理,使得包括预报场和所有的观测资料进行全局调整,从而使得分析场得到统计意义上的最优。变分方法又包括三维变分(简称 3D-Var)和四维变分(简称 4D-Var)。目前不少业务化单位使用 3D-Var,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。国内海洋资料同化中,周广庆等^[8]、Zhu^[9]、游小宝等^[10]、Xiao 等^[11,12]和国家气候中心全球海洋资料四维同化系统都是采用了 3D-Var。欧洲中期天气预报中心于 1996 年底最先采用了 4D-Var。表 1 对这几种同化方法的优缺点进行了比较。

表 1 各种资料同化方法的优缺点

同化方法	优 点	缺 点
OI	1. 简单易行;2. 能够处理精度不同的各种资料;3. 分析中考虑了变量间所有的线性关系;4. 如果能够正确估计出选择的观测量的值,那么计算代价相对较小。	1. 分析过程中,假定水平和垂直方向相互独立的相关系数的计算并没有实际的物理依据;2. 观测资料是以线性的形式来影响分析,而实际情况却是非线性的,因此同化后的初始条件将面临和海洋动力模式不协调的问题。
Kalman 滤波	克服了 OI 的缺陷,模式预报误差随模式向前积分随时调整,与模式动力保持一致。	计算量、存储空间和怎样获得模式状态误差协方差矩阵的精确初值,其中存贮问题仍是主要的限制。
变分法	1. 变分同化更能体现复杂的非线性约束关系;2. 无需进行观测筛选,能同时使用所有有效观测;3. 确定误差协方差时具有更大自由度,对新型观测数据的应用能力更强;4. 可在代价函数中包含物理过程,还能以模式本身作为动力约束,因而变分同化结果具有物理一致性和动力协调性。	对于复杂的约束关系,求解其控制方程需要较高的数学技巧和巨大的运算量,实际操作较困难。

3 海洋卫星遥感资料同化方法的应用

虽然卫星遥感资料可以覆盖全球,而且精度较

高,但是卫星直接测量只能获取海洋表层信息;另一方面,受探测仪器类型限制,卫星观测受云覆盖的影响较大,即使是最近几年出现的微波探测器,在云层

覆盖较厚的暴雨区域也不能得到较好的观测数据。所以卫星遥感海洋资料同化必须考虑资料的特点,针对性地设计同化方案。本文将在这一节重点介绍海洋环流模式中卫星遥感资料同化方法的运用。

3.1 卫星高度计资料同化方法

目前,国外的卫星高度计的同化方法从垂向投影特点来看可以分为两类:一类是统计法,就是利用海表动力高度与次表层变量的统计关系,将海表信息投影到次表层;另一类是动力方法,即利用动力约束,将表层的高度信息向次表层传递。下面分别对这两种方法作一介绍。

统计法中,De Mey 等^[13]首先将高度计数据转换为流函数,然后用 OI 在表层进行同化,最后利用经验正交函数将表层流函数向次表层传递。Holland 等^[14]将海表高度与模式的流函数联系起来,在海表层的涡度方程中加入牛顿松弛项或 Nudging 项得到新的位涡,然后将描述新位涡的三维 Helmholtz 算子转置得到新的流函数,从而订正模式中所有层次的流场。Mellor 等^[15]的同化方案是首先将海面高度数据利用 OI 方法同化到模式格点上,然后根据高度场异常与次表层温、盐场异常的相关计算出相应的权重和温盐的垂直分布廓线,进而求得次表层的温盐场分布。Carnes 等^[16]采用动力高度和温度垂直廓线的经验正交分解(EOF)将卫星高度计资料投影向深层。统计方法要求大量的次表层的观测资料来进行统计计算,但是在世界大洋的大部分区域内观测值都较为稀少,无法得到全球范围内的可靠的统计数据,因此该方法具有一定的局限性。

动力方法中,White 等^[17]使用 OI 方法将卫星高度计资料同化进加利福尼亚流的准地转模型中的表层,然后用高度计信息订正模式的流函数,表层信息通过模式动力约束进行垂向投影。Haines^[18]将高度计数据插入到表层的流函数上,同时保持位涡不变,然后用插值后的瞬时海表流函数去调整模式每一层的流场信息,重新构建深层流场。Oschlies 等^[19]将海表高度场和流场联系起来,用海表速度增量去调整模式的预测结果并利用线性回归方法投影计算得到深层的速度增量,然后保持 T/S 关系不变,由热成风关系计算密度场的变化。该方案与 Ezer 等的方案比较,更加明确地保留了等密度面上水团的性质,使模式对中尺度涡的分辨能力有了显著的提高。Cooper 等^[20]在同化中提出了位涡守恒方案,假设海表动力高度改变时,水团只进行垂直向的绝热交换。首先计算出每个模式格点的密度,并在垂直向临近的模式层次用线性插值计算出密度层的深度,这样就保证了等密度面上所有的性质都会向深层传递,接下来计算每个层次或者等密度面上的位涡,在修正海表动力高度时保持位涡守恒,流场会随位涡的改变而变化。Alves 等^[21]在一个孪生实验中分析了高度计信息垂直向投影的误差来源,同化方案是基

于 Cooper 等^[20]1996 年建立的,该方案利用海面高度异常和位涡的关系,在假定每个水柱底部压力不变的情况下水团只进行垂向运动,由此将表层信息传递至深层,实验结果表明:这种同化方法可以有效地订正两种类型的误差:一种来自于模式初始状态误差,另一种是由不准确的强迫引起的误差。动力方法虽然比统计方法复杂一些,但是动力约束的引入使得同化后变量之间更为协调。

相对于国外,国内的高度计同化在海洋学中的应用研究方面起步较晚,但是也相继做了不少工作。在卫星高度计资料同化研究的初期,王东晓等^[22]将 TOPEX/Poseidon(T/P)高度计资料通过简单的线性插值处理到海洋数值模式表层的网格点后,进行简单的平滑处理,然后根据标准方差计算出同化权重系数,最后采用 Nudging 方法计算出分析海表高度。虽然他只将高度计资料同化在海洋模式的表层,但是同化结果却有效地修正了南海环流的大尺度特征。随着同化方法的逐步成熟,韩桂军等^[23]采用基于最优控制理论的伴随法和 Lagrange 算子建立了伴随模型,利用验潮站的水位资料以及 T/P 卫星测高数据在黄海、东海区域对模型进行了校正。吴自库等^[24]利用正交方法从 T/P 资料中提取沿轨道分潮调和常数,然后插值到计算网格点上对潮汐数值模式进行校正。丘仲锋等^[25]将大约 10 年的 T/P 高度计资料沿星下轨迹点做潮汐调和分析,提取得到各分潮的调和常数,利用伴随同化方法,同化到二维非线性潮汐数值模式中,模拟了黄海、渤海区域的 4 个潮汐分潮并将计算值与观测值进行对比,两者符合良好。Zhu 等^[9]设计的 OVALS 同化系统中,在海表高度的同化中引入了一个新的基于三维变分的同化方案,它考虑了背景场误差的垂直相关性和非线性的温-盐关系,用高度计资料直接调整模式的温度和盐度场。Xiao 等^[11]建立了一个南海三维变分海洋同化系统,该系统首先把 T/P 资料沿轨道反演成一个温盐剖面,然后将剖面上的温盐插值到模式的每一水平层上,最后在水平层上对反演得到的温、盐值进行最优插值,得到温、盐分析场。

3.2 卫星遥感海表温度资料同化方法

卫星遥感 SST 资料垂直向的投影同化方案主要采用统计的方法。Derber 等^[26]的同化方案中,先对数据进行了质量控制,与地形数据比较去掉陆地上的点,并保证 SST 在 $-5^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 之间,之后将数据垂直插入模式的上 11 层(248 m 以上)并与 Levitus 气候态数据进行比较剔除,质量控制的最后一步将模式对观测的解决方案与经过质量检验的数据比较检验剔除。经过质量检验的数据再用三维变分方案进行同化,该三维变分方案将观测误差协方差矩阵中的垂直相关部分忽略了。Ezer 等^[27]将卫星遥感沿轨道的 SST 数据用 OI 插值到模式格点上,得到水平的海表温度场分布,然后利用最优温度插值系统

(OTIS)的数据计算表层与次表层温度异常相关,由此得出温度观测误差协方差,最后求出次表层温度场的分布。1998年, Oberhuber 等^[28]成功建立了一个海气环流耦合模式,利用 Nudging 方案将观测的海表温度异常投影到深层,成功地预测了几次 ENSO 事件,但是该方案应用到其他模式^[29]效果却很不理想。追究其可能的原因是,使用 SST 资料的同化方案不能有效地纠正次表层的海洋状态。SST 在海洋模式中是预报量,因而一般的 SST 同化方法是 OI,但是该法会导致在同化过程中产生热力场和动力场之间的不平衡。解决这个问题关键是定义好模式和观测值间的误差协方差矩阵,这是重点也是难点。Lermusiaux 等^[30]提出了一套基于误差子空间统计估计(ESSE)的方案,该方案利用观测资料与动力各自的主要不确定性将二者联系起来。但是由于其计算量花费太大,所以其应用性受到了限制。之后, Tang 等^[31]提出了一套相对简单的方案,该方案将观测 SST 的前三个 EOF 模态的时间序列与经过控制实验得到的相应模式 SST 场的乘积作为观测 SST 的代用资料并和模式近表层的厚度资料(模式第一层和第二层的高度差,也即模式第二层的界面位置)同化进海洋模式,保证了观测的强迫作用不会在模式与观测显著不同的 SST 区域很强,次表层温度能够很好地调整。这种使用统计计算从 SST 中得到次表层信息的方法与 Fox 等^[32]使用的较相似。Tang 等^[33]的研究中发现如果使用表层与其他所有深层的 SST 相关进行分析时,随着深度的增加相关性递减,但仅使用相邻两层的相关进行投影时,效果要明显优于前者。在 Tang 的试验中将热带太平洋分为 7 个区域,选取每个区域 250m 以上的代表性层次,使用不同的统计方法进行了统计分析,作为该区域的统计模型。最后用该方案的结果与 Derber 等^[26]的同化方案结果对模拟的海洋形式进行比较,发现新方案结果更能有效调整海洋的热力场和动力场,并且能够产生更接近真实的次表层热力结构温度场。赵骞等^[34]基于 Holland^[14]等给出的数据方法,结合 AVHRR SST 遥感数据的特点,提出了一种改进的 Nudging 同化方法,该法中将一般 Nudging 法中的松弛因子改进为随时间和空间变化的函数,用改进的同化方法模拟渤海、黄海、东海的温度场,模拟结果能较好地反映其海流场和温度场的基本特征。

还有一些学者在卫星高度计和卫星遥感海表温度的同化研究中也作了很多工作,其同化方法基本包含在上文讨论之中,只是具体做法有所不同,因为篇幅所限,在此不再赘述。

4 总结与讨论

海洋环流模式中的卫星遥感资料同化已经取得了很多有意义的成果,这是一个活跃的研究领域,研究正在深入发展。展望以后的研究,仍有许多工作

需要作。

首先,多变量的协调问题。由于海温观测的相对完善,早期海洋环流模式中的卫星遥感资料同化主要考虑单变量(即海温)的同化问题,而使盐度和流场在同化中保持不变,仅通过动力学进行调整^[35]。随着卫星遥感技术的不断发展,遥感资料的种类和数量的不断增加,一些新的观测资料(如盐度)加入到了同化中,对模拟的温盐场分布进行了有效的改善^[36]。但随着越来越多新型观测资料的加入,同化过程将面临着多变量的协调问题。因为同化过程中,不但要保持温盐场的协调,还要兼顾流场和速度场的平衡等,这是海洋资料同化亟待解决的问题之一。对于温盐关系的调节,已经有很多学者提出了有效的调整方案,今后的研究重点是如何保持流场和速度场的平衡。其次,对卫星遥感资料提供的大量非常规观测资料与常规观测资料的结合使用还不充分。有学者做过研究^[27],同化不同的遥感资料能够改善海洋中不同层次(混合层、温跃层)温盐模拟效果。目前国内很多学者只研究某一种遥感资料对同化效果的改善作用,且尚未将常规观测资料与其结合使用,这样势必会影响海洋整体温盐模拟的效果。由此可见,将多种常规观测与多种非常规观测资料结合使用,也是海洋资料同化的研究趋势。最后,由于卫星遥感仪器的精度问题不够,遥感数据的反演方法不够完善,使得遥感资料的误差成了一个显著的问题。因此遥感观测资料的误差应有精细化考虑。已有学者对偏差订正作了研究^[37],但在这方面仍存在很大的研究空间。

从同化方法来看,各种同化方法都有其优缺点。在实际的应用过程中采取何种同化方案还要取决于具体的海洋模式,资料的类型,可用的计算资源。资料同化在海洋上应用起步较晚,因此理论研究的深度还不够,同化方法也过于单一。随着研究的深入,计算机计算存储能力的提高,相信在不久的将来,海洋资料同化方法将会有长足的发展,提高对海洋环境的预测能力。

参考文献:

- [1] 万莉颖. 集合同化方法在太平洋海洋高度计资料同化中的应用研究[D]. 北京:中国科学院大气物理研究所, 2006.
- [2] Maes C, Picaut J, Belamari S. Salinity barrier layer and onset of El Nino in a Pacific coupled model[J]. **Geophys Res Lett**, 2002, 29(24): 2206, doi: 10.1029/2002GL016029.
- [3] Han G, Zhu J, Zhou G. Salinity estimation using T-S relation in the context of variational data assimilation[J]. **J Geophys Res**, 2004, 109: C03018, doi:10.1029/2003JC001781.
- [4] Berghthorsson P, Doos B. Numerical weather map analysis[J]. **Tellus**, 1955, 7: 329-340.
- [5] Hoke J, Anthes R. The initialization of numerical

- models by a dynamic relaxation technique[J]. **Mon Wea Rev**, 1976, 104: 1 551-1 556.
- [6] De Mey P, Menard Y. Synoptic analysis and dynamical adjustment of Geos 3 and Seasat altimeter eddy fields in the Northwest Atlantic[J]. **J Geophys Res**, 1989, 94: 6 221-6 230
- [7] Hurlburt H E, Fox D N, Metzger J. Statistical inference of weakly correlated subthermocline fields from satellite altimeter data[J]. **J Geophys Res**, 1990, 95: 11 375-11 409.
- [8] 周广庆,李旭. 一个基于全球大洋环流模式的海洋资料同化系统[A]. 丁一汇. “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)[C]. 北京:气象出版社,2000. 34-43.
- [9] Zhu J, Zhou G Q, Yan C X, *et al.* A three-dimensional variational ocean data assimilation system: Scheme and preliminary results [J]. **Science in China (D)**, 2006, 49 (12): 1 212-1 222.
- [10] 游小宝,周广庆,朱江,等. 中国及周边海海温资料同化系统[J]. 科学通报, 2003, 48(增刊): 5-10.
- [11] Xiao X J, Wang D X, Yan C X, *et al.* Evaluation of a 3dVAR system for the South China Sea [J]. **Prog Nat Sci**, 2008, 18: 547-554.
- [12] Xiao X J, Wang D X, Xu J J. The assimilation experiment in the southwestern South China Sea in summer 2000 [J]. **Chinese Sci Bul**, 2006, 51: 31-37.
- [13] De Mey P, Robinson A R. Assimilation of altimeter eddy fields into a limited-area quasi-geostrophic model [J]. **J Phys Oceanogr**, 1987, 17(12): 2 280-2 293.
- [14] Holland W R, Malanotte-Rizzoli P. Assimilation of altimeter data into an ocean model: Space versus time resolution studies [J]. **J Phys Oceanogr**, 1989, 19: 1 507-1 534.
- [15] Mellor G L, Ezer T. A Gulf Stream model and an altimetry assimilation scheme[J]. **J Geophys Res**, 1991, 96: 8 779-8 795.
- [16] Carnes M R, Mitchell J L, DeWitt P W. Synthetic temperature profiles derived from Geosat altimetry: Comparison with air-dropped expendable bathythermograph profiles[J]. **J Geophys Res**, 1990, 95: 17 979-17 992.
- [17] White W B, Tai G K, Holland W R. Continuous assimilation of Geosat altimetric sea level observations into a numerical synoptic ocean model of the California Current [J]. **J Geophys Res**, 1990, 95(C3): 3 127-3 148.
- [18] Haines K. A direct method for assimilating sea surface height data into ocean models with adjustments to the deep circulation[J]. **J Phys Oceanogr**, 1991, 21: 843-868.
- [19] Oschlies A, Willebrand J. Assimilation of Geosat altimeter data into an eddy-resolving primitive equation model of the North Atlantic Ocean[J]. **J Geophys Res**, 1996, 101(C6): 14 175-14 190.
- [20] Cooper M, Haines K. Altimetric assimilation with water property conservation[J]. **J Geophys Res**, 1996, 101: 1 059-1 077.
- [21] Alves J O S, Haines K, Anderson D L T. Sea level assimilation experiments in the tropical Pacific[J]. **J Phys Oceanogr**, 2001, 31: 305-323.
- [22] 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.
- [23] 韩桂军,方国洪,马继瑞,等. 利用伴随法优化非线性潮汐模型的开边界条件 II: 黄海、东海潮汐资料的同化试验[J]. 海洋学报, 2001, 23(2): 25-31.
- [24] 吴自库,田纪伟,吕咸青,等. 南海潮汐的伴随同化数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 2003, 31(1): 101-108.
- [25] 丘仲锋,何宜军,吕咸青. 黄海、渤海 TOPEX/ Poseidon 高度计资料潮汐伴随同化[J]. 海洋学报, 2005, 27(7): 10-18.
- [26] Derber J, Rosati A. A global oceanic data assimilation system[J]. **J Phys Oceanogr**, 1989, 19: 1 333-1 347.
- [27] Ezer T, Mellor G L. Data assimilation experiments in the Gulf Stream region: How useful are satellite-derived surface data for now-casting and the subsurface fields? [J]. **J Atmos Oceanic Technol**, 1997, 14: 1 379-1 391.
- [28] Oberhuber J, Roeckner E, Christoph M, *et al.* Predicting the '97 El Niño event with a global climate model[J]. **Geophys Res Lett**, 1998, 25: 2 273-2 276.
- [29] Chen D, Zebiak S, Cane M A. Initialization and predictability of a coupled ENSO forecast model[J]. **Mon Weather Rev**, 1997, 125: 773-788.
- [30] Lermusiaux P F J, Robinson A R. Data assimilation via error subspace statistical estimation. Part I: Theory and schemes [J]. **Mon Weather Rev**, 1999, 127: 1 385-1 407.
- [31] Tang Y M, Kleeman R. A new strategy for assimilating SST data for ENSO predictions[J]. **Geophys Res Lett**, 2002, 29: 1841, doi: 10.1029/2002GL014860 6.
- [32] Fox D N, Teague W J, Barron C N. The modular ocean data assimilation system (MODAS) [J]. **J Atmos Oceanic Technol**, 2002, 19: 240-252.
- [33] Tang Y M, Kleeman R, Andrew M M. SST assimilation experiments in a tropical Pacific Ocean model[J]. **J Phys Oceanogr**, 2004, 34: 623-642.
- [34] 赵骞,田纪伟,曹从华,等. 渤海、黄海、东海冬季海流场温度场数值模拟和同化技术[J]. 海洋学报, 2005, 27(1): 1-6.
- [35] Clancy R M, Phoebus P A, Pollak K D. An operational global-scale ocean thermal analysis system[J]. **J Atmos Oceanic Technol**, 1990, 7: 233-254.
- [36] Ji M, Reynolds R W, Behringer D W. Use of TOPEX/ Poseidon sea level data for ocean analyses and ENSO prediction: Some early results[J]. **J Clim**, 2000, 13: 216-231.
- [37] Aulign é T, McNally A P, Dee D P. Adaptive bias correction for satellite data in a numerical weather prediction system [J]. **Q J R Meteorol Soc**, 2007, 133: 631-642. A. R.