

# 伴随同化方法在中国近海海洋数值模拟中的应用\*

高秀敏<sup>1,2</sup>, 魏泽勋<sup>1,2\*</sup>, 吕咸青<sup>3</sup>, 王永刚<sup>1,2</sup>, 方国洪<sup>1,2</sup>

- (1. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;
2. 海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061;
3. 中国海洋大学 物理海洋实验室, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 简述了几种常用的资料同化方法, 并较为详细地阐述了伴随同化方法的基本原理。基于其在潮汐模式中、在海水温度场中和在海洋生态模型中的应用等三方面综述了伴随方法在中国近海海洋数值模拟中的应用研究现状和进展。并对伴随方法的应用前景进行了初步的评述, 指出该方法可对海洋观测方案的优化发挥重要作用, 其在生态学流体力学模式中的应用亦应得到充分重视。

**关键词:** 伴随方法; 中国近海; 数据同化

**中图分类号:** P731

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-6647(2010)04-0545-09

近年来, 随着观测手段的不断增多和计算方法及其设备的不断发展, 人们开始尝试将观测资料与数值模型相结合, 以使得数值模拟结果与实际尽可能地接近, 从而提高了数值模拟的精度, 这种将观测资料与动力学数值模型相结合的方法被称为数据同化方法。常用的数据同化方法包括最优插值法、Nudging 法、Kalman 滤波和伴随法, 而其中的伴随同化方法则是最常用的数据同化方法之一。国内不少学者都对伴随同化方法在海洋数值模拟中的应用进行过综述。王东晓等<sup>[1]</sup>, 兰健<sup>[2]</sup>综述了国外伴随方法在海洋数值模式中的应用研究进展。陈耀登等<sup>[3]</sup>从优化海洋数值模式的初始状态、优化海洋模式中的不确定参数、优化海洋模式的开边界条件三个方面综述了伴随法在海洋数值模式中的应用。本文侧重于伴随同化方法在中国近海的应用研究进展, 与以往的研究相比, 本文较全面具体, 且增加了伴随同化方法在海洋生态模型中的应用研究进展。

## 1 数据同化概述

数据同化思想始于 Panofsky<sup>[4]</sup> 1949 年发表的文章, 他提出了二维全局多项式插值法, 并利用此方法得到观测数据的客观分析场, 摒弃了以往的手工主观分析方法。Charney 等<sup>[5]</sup> 1969 年发表的文章也是早期数据同化的经典之作, 他提出了从不完整的历史资料推断大气现在状态的思想。随后数据同化技术得到不断发展。Ghil 等<sup>[6]</sup> 对数据同化方法在气象和海洋中的应用有一个较完备的综述。乔方利等<sup>[7]</sup> 对主要的现代海洋/大气资料同化方法的原理、算法设计和实际应用进行了系统的回顾。数据同化发展趋势主要有两大特点<sup>[8]</sup>: 一是由三维(仅空间分布分析)迈向四维(空间分布加时间分布分析); 二是由单纯对观测数据本身进行的静态客观分析迈向观测数据结合动力约束的动态分析。

\* 收稿日期: 2009-09-09

资助项目: 国家自然科学基金项目—中国近海及邻近海区海洋与地球潮汐相互作用研究(40076009), 印尼海潮波和潮混合的分析和数值研究(40606006); 国家高技术研究发展计划项目—南海内潮的多源信息同化技术(2007AA09Z118)

作者简介: 高秀敏(1984-), 女, 河北衡水人, 硕士研究生, 主要从事潮波数值模拟方面研究。E-mail: gaoxm@fio.org.cn

\* 通讯作者: 魏泽勋(1970-), 男, 安徽巢湖人, 研究员, 主要从事海洋环流和潮汐潮流方面研究。E-mail: weizx@fio.org.cn.

(杜素兰 编辑)

数据同化方法的分类有很多种,根据不同的分类标准,不同学者有不同的分类方法。

Smedstad 等<sup>[9]</sup>总结了过去几十年来发展起来的数据同化方法,并根据数据同化采用的不同的数学方法,将其归纳为以下三大类:

- 1) 多项式内插法(Local polynomial interpolation methods);
- 2) 统计(最优)插值法(Statistical (optimal) interpolation methods);
- 3) 变分数值分析法(Variational numerical analysis methods)。

Anderson 等<sup>[10]</sup>总结了运用数据同化方法解决物理海洋学问题的新进展,他们将数据同化方法分为两大类:

- 1) 顺序方法(Sequential Methods),包括 Kalman 滤波法、直接替代法、Nudging 法、逐步订正法、最优插值法等;
- 2) 变分方法(Variational Method)。

下面对常用的几种数据同化方法,包括 Nudging 法、最优插值法、Kalman 滤波法和变分法作简单地介绍。

### 1.1 Nudging 法

Nudging 方法最初被 Anthes<sup>[11]</sup>1974 年引入气象学领域,如今已成为海洋数值模拟中常用的数据同化方法之一。Nudging 法是在模式方程中加入人为的强迫项,通过积分模式而使模式结果向观测逼近。

$$\frac{da}{dt} = F(a, t) + G(t) \sum_i^N \omega_i (a_i - a) \quad (1)$$

式中,  $a$  为模型变量;  $F(a, t)$  为模型的强迫项;  $G(t)$  为 Nudging 系数;  $\omega_i$  为权重系数;  $a_i$  为观测值。

Nudging 同化方法比较简单,计算量相对较小,主要缺点是由于增加了强迫项,可能会造成动力扭曲。

### 1.2 最优插值法

最优插值法是一种主要的客观分析方法,其基本原理是格点上的分析值是由格点的背景值加上修订值而得到的,其修订值由周围各测站的观测值与背景值之间的差异加权求得,其权重系数应该使得网格点分析值的误差达到最小<sup>[12]</sup>。

$$x_a = x_b + \mathbf{K}(y - \mathbf{H}[x_b]) \quad (2)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{B}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^T + \mathbf{O})^{-1} \quad (3)$$

式中,  $x_a$  和  $x_b$  分别为分析场和背景场;  $\mathbf{K}$  为权重系数矩阵;  $y$  为观测资料;  $\mathbf{H}$  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;  $\mathbf{B}$  为背景场误差协方差矩阵;  $\mathbf{O}$  为观测场误差协方差矩阵。

最优插值法能够处理不同精度和不同来源的观测资料进行同化从而达到提高模拟精度的目的,其关键是如何求取最优权重系数。而权重系数矩阵又由观测误差和模拟误差所决定,这两个误差没有精确的数学表达来定义只能部分依靠经验来给定。这样便使得模式结果很大程度上取决于经验公式的选取,一旦选取不合理则会造成同化结果误差增大。

### 1.3 Kalman 滤波法

Kalman<sup>[13]</sup>1960 年提出了著名的 Kalman 滤波的思想, Jones<sup>[14]</sup>1965 年首次将 Kalman 滤波法引入气象学,随后 Kalman 滤波法在气象和海洋领域均得到了广泛的应用。

Kalman 滤波可以看作是最优插值法的拓展,克服了最优插值法模式误差独立于模式的动力与状态的缺陷,将模式误差和模式动力相结合,但它的计算量却比最优插值法要大得多。Kalman 滤波法的发展可以分为四个阶段<sup>[8]</sup>: 1) 标准(standard) Kalman 滤波; 2) 扩展(extended) Kalman 滤波; 3) 简化(simplified) Kal-

man 滤波;4)集合(ensemble)Kalman 滤波。其中应用较多的是集合 Kalman 滤波法。

#### 1.4 变分法

Sasaki<sup>[15-17]</sup>是较早运用变分法的,Bennett 等<sup>[18]</sup>,McIntosh 等<sup>[19]</sup>则是最早利用变分法来研究潮汐模型反问题的。

变分法可分为两种<sup>[20]</sup>:一种是利用 Lagrange 乘子法将原来的有约束问题转化为无约束问题,这种方法包括惩罚算法(Penalty Algorithm)、对偶算法(Duality Algorithm)和修正拉格朗日算法(Augmented Lagrangian Algorithm);另一种是基于最优控制理论的伴随法(Adjoint Method),该方法借助于泛函分析中的伴随算子理论,建立与动力约束相对应的伴随方程,其基本原理及其在中国近海潮汐潮流数值模拟中的应用研究进展将在下面详细给出。

## 2 伴随同化方法的基本原理

数据同化中的伴随方法是变分原理和最优控制理论相结合的一种方法。伴随同化方法在海洋研究中的应用是以海洋动力模型作为约束条件,由可观测到的海洋要素反演无法观测到的海洋要素,由海洋的表面信息推断海洋的内部结构<sup>[21]</sup>。伴随同化方法可用来解决许多不同类型的实际问题,其中包括对模型中的参数进行优化、对初始条件或边界条件进行优化等。

设海洋动力模型为

$$\frac{\partial x}{\partial t} = F(x, c) \quad (4)$$

式中,向量  $x$  是模型中随时间变化的量(如速度、水位、温度、盐度等); $F$  为模型中的强迫项;向量  $c$  为模型中的参数。模型方程(4)不封闭,还需加上相应的定解条件(初始条件、边界条件等)才能确定其唯一解。

我们的兴趣在于得到模型方程(4)的接近观测结果  $x'$  的解。这里的所谓接近用代价函数  $J$  来度量,用模型方程(4)的解与观测结果之间的距离来定义。我们定义代价函数来度量模型的解与观测结果的距离,其定义为:

$$J(x, c) = \frac{1}{2}(x - x')^T \mathbf{K}_x (x - x') + \frac{1}{2}(c - c')^T \mathbf{K}_c (c - c') \quad (5)$$

式中, $x'$  和  $c'$  分别表示观测值和估计值; $\mathbf{K}_x$  和  $\mathbf{K}_c$  分别是  $x$  和  $c$  所对应的权重矩阵,有观测值的点  $\mathbf{K}_x$  取为 1,否则取为 0。等式右边第一项称为数据差异,驱动伴随方程的外力可由此项导出,第二项之所以作为代价函数的部分是因为我们同时也要对模型中的参数进行估计。

以上所述问题是以模型方程(4)作为约束的约束最小值问题。此问题可转化为无约束最小值问题来求解。当把约束条件作为强约束条件来对待时,经典的拉格朗日乘子法为我们提供了坚实的理论基础。通过构造 Lagrange 函数可将约束问题转化为无约束问题,Lagrange 函数可构造为:

$$L(x, \lambda, y) = J(x, y) + \langle \lambda, G(x, c) \rangle \quad (6)$$

式中, $G(x, c) = \frac{\partial x}{\partial t} - F(x, c)$ , $\lambda$  是 Lagrange 乘子或伴随算子,等式右边最后一项是定义在  $G(x, c)$  所属 Hilbert 空间上的内积。在强约束条件  $G(x, c) = 0$  的限制下,确定泛函  $J(x, y)$  的驻点与确定拉格朗日函数关于变量  $x, \lambda$  和  $y$  的驻点是等价的。表示拉格朗日函数的驻点方程组称为约束最小值问题的欧拉-拉格朗日方程组。欧拉-拉格朗日最优条件(最优的  $x^*, \lambda^*, y^*$ )将由下述方程组确定:

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda}(x^*, \lambda^*, y^*) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x}(x^*, \lambda^*, y^*) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial L}{\partial y}(x^*, \lambda^*, y^*) = 0 \quad (9)$$

方程(7)就是原来的模型方程,方程(8)为方程(4)的伴随方程。模型方程随时间正向传播信息,而伴随方程随时间反向传播信息。至于方程(9),则给出了拉格朗日函数关于控制变量的梯度。

伴随同化方法的具体操作步骤如下:

- 1) 给定向量  $x$  的观测值  $x'$ , 计算权重矩阵  $K_x$ , 并给定控制参数的初猜值;
- 2) 向前积分模型方程, 计算模拟值到观测值的差异;
- 3) 反向积分伴随方程, 计算代价函数关于控制参数的梯度, 利用某种下降算法优化控制参数;
- 4) 计算代价函数  $J$ , 检查是否满足精度要求, 否则返回步骤 2) 继续循环直到满足精度要求为止。

伴随同化方法是利用变分方法将观测资料与动力模型有机结合, 利用观测资料来优化模式中的关键参数或变量等, 从而达到提高模拟精度的效果, 而非将模拟结果强制逼近观测, 具有清晰的数学和物理意义。伴随法还可以允许模式存在误差<sup>[22]</sup>, 并利用观测资料来弥补模式中的缺陷。利用伴随法进行资料同化时, 需要反复针对数值模式进行正向和反向积分, 一些关键的中间结果也需要存储, 因此计算量和存储量都较大, 需要高性能的计算和存储设备作支持。

### 3 伴随同化方法在中国近海海洋数值模拟中的应用

#### 3.1 在潮汐模式中的应用

有关中国近海潮汐潮流数值模拟方面的文献<sup>[23-27]</sup>很多, 但由于潮汐模型中某些参数的不确定性以及开边界条件的如何选取等, 使得这些数值模拟的精度受到一定条件的限制。中国近海潮汐潮流分布特征中还有许多需要进一步研究的问题<sup>[28]</sup>, 应用伴随同化法可以在一定程度上提高数值模拟的精度, 从而更好的体现中国近海潮汐潮流的分布特征。

##### 3.1.1 优化潮汐模式中的底摩擦系数

底摩擦系数的选取对无潮点的位置、潮流的大小和方向有很大的影响<sup>[29]</sup>。利用伴随同化方法优化潮汐模式中的底摩擦系数, 底摩擦系数如何假定是关键。大体上有以下几种情况:

1) 假定底摩擦系数为常数。吴自库等<sup>[30]</sup>把 T/P 资料同化到潮汐潮流数值模式中, 模拟了北部湾  $m_1$  和  $M_2$  分潮, 由计算结果绘制的  $m_1$  和  $M_2$  同潮图与夏华永等<sup>[31]</sup>相似。吕咸青等<sup>[32]</sup>假定底摩擦系数在每一点的值都各不相同, 根据渤、黄海的验潮站的潮汐调和常数, 通过利用伴随方法优化了给定的底摩擦系数, 实现了底摩擦系数的自动化。谷艺等<sup>[33]</sup>就如何利用潮位站的水位资料来优化渤海的底摩擦系数进行了尝试, 其方法为先利用伴随同化方法反演渤海、黄海、东海的开边界条件, 得到要研究海域渤海的较好的开边界条件, 然后, 把底摩擦系数当作函数来反演。

2) 假定底摩擦系数的取值与海底地形相关。吴自库等<sup>[34]</sup>利用伴随同化方法, 将初始底摩擦系数取为带有空间分布特征的与地形相关的形式, 把利用正交响应方法对南中国海的 T/P 卫星高度计资料进行谐波分析提取的沿轨分潮调和常数同化到二维非线性潮汐数值模式中去, 通过优化模型中的开边界条件和底摩擦系数, 较好地模拟了南海  $m_1$  和  $M_2$  分潮的潮汐。研究表明, 利用伴随同化方法把 T/P 资料同化到潮汐数值模式中去对模式进行校正是有效的。

3) 独立底摩擦系数的选取。即假定底摩擦系数具有空间分布特征, 在计算海区选取一些点给定底摩擦系数, 海区中任意一点的底摩擦系数由这些点的底摩擦系数线性插值得到。张继才等<sup>[35]</sup>将伴随同化方法应用于渤黄东海  $M_2$  分潮的数值模拟, 使用 T/P 资料成功反演出了给定的底摩擦系数的空间分布, 验证了此法的合理性和有效性。文章还探讨了影响半径、独立的底摩擦系数的个数和权重系数的选择对模拟结果的影响。张继才等<sup>[36]</sup>探讨了独立底摩擦系数如何选取的问题, 比较了两种选取方法: 一种是文献<sup>[35]</sup>中的做法, 即

在海区均匀选取独立底摩擦系数;另一种做法是根据地形的空间分布特征选取独立底摩擦系数。结果表明,与均匀选取的结果相比,在独立变量个数减少三分之一的情况下,数值模拟的精度反而得以提高。孙丽艳等<sup>[37,38]</sup>也曾做过与文献<sup>[35]</sup>类似的工作。

### 3.1.2 反演潮汐模式中的开边界条件

在中国近海潮汐潮流数值模拟中,开边界条件的选取起着决定性的作用。传统的开边界条件有两种取法<sup>[39]</sup>:一是由开边界点附近有效的观测值给出(这里包括验潮站资料与卫星资料);另一种是采用大洋或者全球潮汐模型的结果。近年来又发展了一种新方法,利用伴随同化方法来反演潮汐模式中的开边界条件,此方法大大提高了数值模拟的精度。

朱江等<sup>[40]</sup>从理论上证明利用伴随算子法从岸边潮位站资料来估计潮汐模式的开边界条件是可行的。

韩桂军等<sup>[41,42]</sup>采用基于最优控制理论的伴随法建立伴随模型,进行“孪生”数值试验,利用验潮站的水位资料以及 T/P 卫星测高数据在黄海、东海进行变分数据同化试验,优化了开边界条件,提高了数值预报的精度。试验表明利用上述资料对模型进行变分同化校正是可行的。

吕咸青等<sup>[43,44]</sup>采用伴随法,由渤海沿岸 19 个验潮站的潮汐调和常数来反演渤海海域的开边界条件,为了取得较好的数值模拟结果,文章还同时对给定的底摩擦系数进行校正并对水深进行了微调。数值模拟结果较好地体现了渤海  $m_1$  和  $M_2$  潮波的基本特征。

吕咸青等<sup>[45]</sup>采用伴随方法,利用渤、黄、东海的 64 个验潮站资料,通过反演渤、黄、东海的开边界条件,来实现渤、黄、东海  $M_2$  潮波的数值模拟。实验结果较好地体现了渤、黄、东海  $M_2$  分潮潮波的特征。

此外,丘仲锋等<sup>[46]</sup>做了两类对比试验,一类试验是针对不同的参数进行优化,一类试验是针对不同的资料进行同化。第一类试验表明:将开边界条件和底摩擦系数同时作为模型优化的控制参数,其结果明显优于单独优化开边界条件;第二类试验表明:同时同化高度计资料与验潮站资料,比单独同化其中任一种资料,对模式计算结果都有明显的改进。

## 3.2 在海水温度数值模拟中的应用

伴随同化方法还可以被用于优化海洋数值模型中的温度场。

韩桂军等<sup>[47]</sup>,何柏荣等<sup>[48]</sup>以一维海洋水温模型为例,利用伴随法对海洋水温观测数据进行同化试验,为水温垂直分布的数值预报提供了一个较准确的初始场,证明了利用伴随法优化海洋数值模型中的温度场是可行的。

马继瑞等<sup>[49]</sup>将变分伴随数据同化技术应用于海表面温度数值预报。采用中国近海海表面温度短期数值预报模式,将船舶测报海表面温度同化到该模型中,对 SST 初始场进行优化。文中给出了中国近海 SST 数值预报同化模型 5d 试报结果与观测值的比较,整个区域的均绝差由同化前的  $2.71\text{ }^{\circ}\text{C}$  降至  $0.87\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,即变分伴随数据同化对改进 SST 数值预报的效果是比较明显的,表明它可成为 SST 数值预报初始化的新方法。

李冬等<sup>[50]</sup>以二维断面海温分布模型为例,利用海温实际观测数据,将变分伴随方法应用于断面海温初始场的优化。数值试验的结果表明了变分伴随数据同化方法在海温数值计算和数值预报业务中的良好的应用前景。

## 3.3 在海洋生态模型中的应用

海洋生态模型不同于大气和海洋模型,模型中含有大量的未知参数难以确定。Lawson 等<sup>[51]</sup>1995 年首次将伴随同化方法应用到一个简单的捕食—被捕食海洋生态模型中,成功对模型参数和初始场进行了反演,随后此方法被广泛应用于海洋生态模型中。

徐青等<sup>[52]</sup>以渤、黄海 NPZD 生态数值模式为例,展示了伴随法的优越性。

徐青等<sup>[53]</sup>在渤、黄海海域建立了物理海洋模型与 NPZD 生态模型的耦合模型,就伴随同化技术应用中如何从众多模型参数中选取控制变量的问题做了深入研究。研究发现,对于渤、黄海海区的 NPZD 模型,除

了用传统的方法选取控制变量之外,代价函数关于模型参数的梯度信息也可以作为选取控制变量的标准之一,这从另一个角度解决了如何确定控制变量的问题。另外,通过孪生试验验证了在渤、黄海 NPZD 生态模式中使用伴随同化技术同化水色遥感数据的可行性,这为以后将水色卫星遥感数据同化到海洋生态模型中奠定了基础。

樊伟等<sup>[54]</sup>,周巍等<sup>[55]</sup>将伴随同化方法用于 NPZD 三维海洋生态系统模型中,并引入参数的空间分布<sup>[35]</sup>,同化 SeaWiFS 叶绿素资料。试验结果表明通过引入参数的空间分布来改进海洋生态系统的模拟是可行的。

## 4 结 语

本研究对数据同化方法分类、伴随同化方法基本原理及其在中国近海海洋数值模拟中的应用做了较为详细的阐述。

为了能够充分有效地利用越来越多的海洋观测资料,在海洋数值模拟中,数据同化方法的应用越来越受到重视。大量文献表明,Kalman 滤波法和伴随同化方法是将来海洋数据同化方法发展的主流,而伴随同化方法在将观测资料和海洋动力模型相结合方面更具有优越性。目前存在争议较多的是在利用伴随同化方法进行数值模拟时,究竟是使用伴随的差分还是使用差分的伴随来导出离散的伴随模型方程,至今尚无定论,仍需进一步的研究。此外,直接利用伴随方法优化得到的关键参数或者初始场、强迫场等,往往强烈的依赖于观测样本的多寡及其地理位置分布,如何对观测提出最优化的要求,也是今后需要解决的问题。海洋生态系统动力学模式中大量的关键参数,涉及生长、消亡、捕食等过程,一直以来都是制约该类模式发展的主要因素,也是海洋学家们努力的目标,除了生物化学方面的专家利用观测、实验等方法对这些参数进行更准确的估计之外,利用伴随同化方法基于海洋环境尤其是生物化学等要素的观测资料对这些参数进行优化也不失为一种重要的手段,值得海洋数值模拟方面的研究者努力尝试。

## 参考文献 (References):

- [1] WANG D X, ZHU J. Applications of the adjoint method to oceanic numerical models[J]. *Progress in Geophysics*, 1997, 12(1):98-107. 王东晓, 朱江. 伴随方法在海洋数值模式中的应用[J]. *地球物理学进展*, 1997, 12(1):98-107.
- [2] LAN J. The adjoint method of data assimilation and the present state of its applications to the oceans[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1998, 28(2):173-178. 兰健. 资料同化中的伴随方法及其在海洋中的应用[J]. *青岛海洋大学学报*, 1998, 28(2):173-178.
- [3] CHEN Y D, GAO Y F. Adjoint data assimilation method for marine numerical simulation[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2007, 35(5):599-603. 陈耀登, 高玉芳. 海洋数值模拟中的伴随数据同化方法[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(5):599-603.
- [4] PANOFKY H A. Objective weather-map analysis[J]. *Journal of Meteorology*, 1949, 6:386-392.
- [5] CHARNEY J, HALEM M, JASTROW R. Use of incomplete historical data to infer the present state of the atmosphere[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1969, 26:1160-1163.
- [6] GHIL M, MALANOTTE-RIZZOLI P. Data assimilation in meteorology and oceanography[J]. *Advances in Geophysics*, 1991, 33:141-266.
- [7] QIAO F L, ZHANG S Q. The unification and application reviews of modern oceanic/atmospheric data assimilation algorithms[J]. *Advances in Marine Science*, 2002, 20(4):79-93. 乔方利, ZHANG Shao-qing. 现代海洋/大气资料同化方法的统一性及其应用进展[J]. *海洋科学进展*, 2002, 20(4):79-93.
- [8] GAO S H, WU Z M, XIE H Q. The developments and applications of Kalman filters in meteorological data assimilation[J]. *Advances in Earth Sciences*, 2000, 15(5):571-575. 高山红, 吴增茂, 谢红芹. Kalman 滤波在气象数据同化中的发展与应用[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(5):571-575.
- [9] SMEDSTAD O M, O'BRIEN J J. Variational data assimilation and parameter estimation in an equatorial Pacific Ocean model[J]. *Progress in Oceanography*, 1991, 26:179-241.

- [10] ANDERSON D L T, SHEINBAUM J, HAINES K. Data assimilation in ocean models[J]. *Reports on Progress in Physics*, 1996, 59: 1209-1266.
- [11] ANTHES R A. Data assimilation and initialization of hurricane prediction models[J]. *Journal of the Atmospheric Science*, 1974, 31: 702-719.
- [12] MA Z P, JING A Q. Dynamic interpolation and its application in data assimilation[J]. *Journal of Hebei University: Natural Science Edition*, 2004, 24(6):574-580. 马寨璞, 井爱芹. 动态最优插值方法及其同化应用研究[J]. *河北大学学报: 自然科学版*, 2004, 24(6): 574-580.
- [13] KALMAN R E. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. *Transactions of the ASME-Journal of Basic Engineering*, 1960, 82D:34-45.
- [14] JONES R H. Optimal estimation of initial conditions for numerical prediction[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1965, 22:658-663.
- [15] SASAKI Y. Some basic formalisms in numerical variational analysis[J]. *Monthly Weather Review*, 1970, 98(12):875-883.
- [16] SASAKI Y. Numerical variational analysis formulated under the constraints as determined by long-wave equations as a low-pass filter [J]. *Monthly Weather Review*, 1970, 98(12):884-898.
- [17] SASAKI Y. Numerical variational analysis with weak constraint and application to the surface analysis of severe storm gust[J]. *Monthly Weather Review*, 1970, 98(12):899-910.
- [18] BENNETT A F, MCINTOSH P C. Open ocean modeling as an inverse problem: tidal theory[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1982, 12:1004-1018.
- [19] MCINTOSH P C, BENNETT A F. Open ocean modeling as an inverse problem: M2 tides in Bass Strait[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1984, 14:601-614.
- [20] LE DIMET F X, TALAGRAND O. Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations: Theoretical aspects[J]. *Tellus*, 1986, 38A:97-110.
- [21] LÜ X Q, LIU W J. Study on the adjoint method in data assimilation and the related problems[J]. *Marine Sciences*, 2001, 25(3):44-50. 吕咸青, 刘文剑. 数据同化中的伴随方法及其有关问题的研究[J]. *海洋科学*, 2001, 25(3):44-50.
- [22] HAN G J. A study on the application of adjoint method for numerical models of tide and sea temperature[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2001:1-3. 韩桂军. 伴随法在潮汐和海温数值计算中的应用研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2001:1-3.
- [23] FANG G H. Tide and tidal current charts for the marginal seas adjacent to China[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 1986, 4(1):1-16.
- [24] FANG G H, CAO D M, HUANG Q Z. Numerical simulation on tides and tidal currents in the South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1994, 16(4):1-12. 方国洪, 曹德明, 黄企洲. 南海潮汐潮流的数值模拟[J]. *海洋学报*, 1994, 16(4):1-12.
- [25] ZHAO B R, FANG G H, CAO D M. Numerical simulation on tides and tidal currents in the Bohai, Yellow and East China Seas[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1994, 16(5):1-10. 赵保仁, 方国洪, 曹德明. 渤、黄、东海潮汐潮流的数值模拟[J]. *海洋学报*, 1994, 16(5): 1-10.
- [26] WAN Z W, QIAO F L, YUAN Y L. Three-dimensional numerical modeling of tidal waves in the Bohai, Yellow and East China Seas [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1998, 29(6):611-616. 万振文, 乔方利, 袁业立. 渤、黄、东海三维潮汐运动数值模拟[J]. *海洋与湖沼*, 1998, 29(6):611-616.
- [27] WANG K, FANG G H, FENG S Z. A 3-D numerical simulation of M<sub>2</sub> tides and tidal currents in the Bohai Sea, the Huanghai Sea and the East China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1999, 21(4):1-13. 王凯, 方国洪, 冯士筭. 渤海、黄海、东海 M<sub>2</sub> 潮汐潮流的三维数值模拟[J]. *海洋学报*, 1999, 21(4):1-13.
- [28] FANG G H. Some unsolved problems on the distribution of tides and tidal currents in the seas adjacent to China[C]//*Proceedings of the First Symposium on Ocean Tides and Sea Level*. Tianjin: Marine Science and Technology Information Institute SOA, 1986:12-20. 方国洪. 关于中国近海潮汐潮流分布的若干有待进一步研究的问题[C]//*第一届潮汐与海平面学术讨论会论文集*. 天津: 国家海洋局海洋科技情报研究所, 1986:12-20.
- [29] SUN H L, HUANG W M. Three-dimensional numerical simulation for tide and tidal current in the Beibu Gulf[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(2):1-8. 孙洪亮, 黄卫民. 北部湾潮汐潮流的三维数值模拟[J]. *海洋学报*, 2001, 23(2):1-8.
- [30] WU Z K, WANG L Y, LÜ X Q, et al. A numerical model of tides in the Beibu Gulf by adjoint method[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 25(2):128-135. 吴自库, 王丽娅, 吕咸青, 等. 北部湾潮汐的伴随同化数值模拟[J]. *海洋学报*, 2003, 25(2):128-135.
- [31] XIA H Y, YIN Z B, GUO Z L, et al. Three-dimensional numerical modeling of tidal currents in the Beibu Gulf[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1997, 19(2):21-31. 夏华永, 殷忠斌, 郭芝兰, 等. 北部湾三维潮流数值模拟[J]. *海洋学报*, 1997, 19(2):21-31.

- [32] LÜ X Q, TIAN J W, WU Z K. The bottom friction coefficients of the Bohai Sea and the Huanghai Sea[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2003, 35(4):465-468. 吕咸青, 田纪伟, 吴自库. 渤、黄海的底摩擦系数[J]. *力学学报*, 2003, 35(4):465-468.
- [33] GU Y, WU Z K, LÜ X Q. Estimation of bottom friction coefficient for a 2-D nonlinear tidal model of the Bohai Sea by the adjoint method[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2005, (3):1-7. 谷艺, 吴自库, 吕咸青. 利用伴随同化方法估计渤海潮汐模式的底摩擦系数[J]. *海洋湖沼通报*, 2005, (3):1-7.
- [34] WU Z K, TIAN J W, LÜ X Q, et al. A numerical model of tides in the South China Sea by adjoint method[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2003, 34(1):101-108. 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, 34(1):101-108.
- [35] ZHANG J C, LÜ X Q. Inversion of the spacial varying bottom friction coefficient with the adjoint method[J]. *Progress in Natural Science*, 2005, 15(9):1086-1093. 张继才, 吕咸青. 空间分布底摩擦系数的伴随法反演研究[J]. *自然科学进展*, 2005, 15(9):1086-1093.
- [36] ZHANG J C, LÜ X Q. Inversion of the bottom friction coefficient in 2D tidal model of the Bohai, the Yellow and East China Seas[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2007, 24(4):430-435. 张继才, 吕咸青. 渤、黄、东海二维潮汐模式底摩擦系数的反演[J]. *计算力学学报*, 2007, 24(4):430-435.
- [37] SUN L Y, LÜ X Q. Study on bottom friction coefficient in the Bohai, Huanghai and East China Seas[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2007, (2):7-12. 孙丽艳, 吕咸青. 渤、黄、东海底摩擦系数的研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2007, (2):7-12.
- [38] SUN L Y, LÜ X Q. Study on bottom friction coefficient in the Bohai, Huanghai and East China Seas (II)[J]. *Marine Environmental Science*, 2008, 27(Supp. 2):49-54. 孙丽艳, 吕咸青. 渤、黄、东海底摩擦系数的研究(II)[J]. *海洋环境科学*, 2008, 27(增刊 2):49-54.
- [39] QIU Z F, HE Y J. Assimilation of the M2 tides in China Seas with TOPEX/POSEIDON data[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2005, 36(4):376-384. 丘仲锋, 何宜军. TOPEX/POSEIDON 高度计资料用于中国近海 M<sub>2</sub> 分潮的同化反演[J]. *海洋与湖沼*, 2005, 36(4):376-384.
- [40] ZHU J, ZENG Q C, GUO D J, et al. Estimation of open boundary condition for nearshore model from gauging station data using the adjoint operators method[J]. *Science in China: Series D*, 1997, 27(5):462-468. 朱江, 曾庆存, 郭冬建, 等. 利用伴随算子法从岸边潮位站资料估计近岸模式的开边界条件[J]. *中国科学: D 辑*, 1997, 27(5):462-468.
- [41] HAN G J, HE B R, MA J R, et al. Optimizing open boundary conditions of nonlinear tidal model using adjoint method I: The establishment of adjoint model and twin-experiment[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2000, 22(6):27-33. 韩桂军, 何柏荣, 马继瑞, 等. 利用伴随法优化非线性潮汐模型的开边界条件 I: 伴随方程的建立及“孪生”数值试验[J]. *海洋学报*, 2000, 22(6):27-33.
- [42] HAN G J, FANG G H, MA J R, et al. Optimizing open boundary conditions of nonlinear tidal model using adjoint method II: Assimilation experiment for tide in the Huanghai Sea and the East China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(2):25-31. 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.
- [43] LÜ X Q, FANG G H. Numerical experiments of the adjoint model for M<sub>2</sub> tide in the Bohai Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, 24(1):17-24. 吕咸青, 方国洪. 渤海 M<sub>2</sub> 分潮的伴随模式数值试验[J]. *海洋学报*, 2002, 24(1):17-24.
- [44] LÜ X Q, FANG G H. Inversion of the tides on the open boundary of the Bohai Sea by adjoint method[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(2):113-120. 吕咸青, 方国洪. 渤海开边界潮汐的伴随法反演[J]. *海洋与湖沼*, 2002, 33(2):113-120.
- [45] LÜ X Q, WU Z K, YIN Z B, et al. Inversion of the tides with the open boundaries of the Bohai, Huanghai and Donghai Seas[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2003, 33(2):165-172. 吕咸青, 吴自库, 殷忠斌, 等. 渤、黄、东海潮汐开边界的 1 种反演方法[J]. *青岛海洋大学学报*, 2003, 33(2):165-172.
- [46] QIU Z F, HE Y J, LÜ X Q. Tidal adjoint assimilation with the TOPEX/Poseidon altimeter data in the Huanghai and Bohai Seas[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(4):10-18. 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(4):10-18.
- [47] HAN G J, HE B R, MA J R, et al. A study on data assimilation for vertical distribution of sea temperature[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2000, 22(4):1-7. 韩桂军, 何柏荣, 马继瑞, 等. 海水水温垂直分布数据同化方法研究[J]. *海洋学报*, 2000, 22(4):1-7.
- [48] HE B R, MA J R, HAN G J, et al. A method of discrete adjoint operator in data assimilation for the prediction of the vertical distribution of sea temperature[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2000, 17(5):553-559. 何柏荣, 马继瑞, 韩桂军, 等. 海水温度垂直分布预报数据同化的离散伴随算子法[J]. *计算物理*, 2000, 17(5):553-559.
- [49] MA J R, HAN G J, LI D. A study on the application of variational adjoint data assimilation for numerical prediction of sea surface temperature[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, 24(5):1-7. 马继瑞, 韩桂军, 李冬. 变分伴随数据同化在海表面温度预报中的应用研究[J]. *海洋学报*, 2002, 24(5):1-7.
- [50] LI D, LIU K X, HAN G J. A study on the application of variational adjoint method to the numerical computation of sectional sea temperature[J]. *Marine Science Bulletin*, 2004, 23(4):1-8. 李冬, 刘克修, 韩桂军. 变分伴随数据同化方法在断面海温数值计算中的应用

- 研究[J]. 海洋通报, 2004, 23(4):1-8.
- [51] LAWSON L M, SPITZ Y H, HOFMANN E E, et al. A data assimilation technique applied to a predator-prey model[J]. *Bulletin of Mathematical Biology*, 1995, 57(4):593-617.
- [52] XU Q, LIU Y G, CHENG Y C, et al. Adjoint method in marine ecosystem models[J]. *Marine Science Bulletin*, 2005, 24(6):58-64. 徐青, 刘玉光, 程永存, 等. 海洋生态模型中的伴随同化方法[J]. 海洋通报, 2005, 24(6):58-64.
- [53] XU Q, LIU Y G, CHENG Y C, et al. Adjoint assimilation technique in a marine ecosystem model in the Bohai Sea and the Yellow Sea: control variables and twin experiments[J]. *Chinese High Technology Letters*, 2006, 16(1):78-83. 徐青, 刘玉光, 程永存, 等. 伴随同化技术在渤、黄海生态模式中的应用:控制变量的选取与李生实验[J]. 高技术通讯, 2006, 16(1):78-83.
- [54] FAN W, LÜ X Q. Marine ecosystem modeling based on spatial parameterizations[J]. *Advances in Marine Science*, 2009, 27(1):24-33. 樊伟, 吕咸青. 基于参数空间分布的海洋生态系统模拟[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(1):24-33.
- [55] ZHOU W, LÜ X Q. Adjoint assimilation method in a marine ecosystem model in the Bohai Sea and the Yellow Sea: the spatial distribution of ecological parameters[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2009, (1):19-28. 周巍, 吕咸青. 伴随同化方法在渤、黄海生态模式中的应用——生态参数的空间分布[J]. 海洋湖沼通报, 2009, (1):19-28.

## Applications of Adjoint Data-assimilation Method to Ocean Numerical Simulation for China Adjacent Seas

GAO Xiu-min<sup>1,2</sup>, WEI Ze-xun<sup>1,2</sup>, LÜ Xian-qing<sup>3</sup>, WANG Yong-gang<sup>1,2</sup>, FANG Guo-hong<sup>1,2</sup>

(1. *First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;*

2. *Key Lab of Marine Science and Numerical Modeling, SOA, Qingdao 266061, China;*

3. *Laboratory of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*)

**Abstract:** Several common data assimilation methods are briefly described, and the basic principles of the adjoint method is described in detail. Then based on the applications of the adjoint method to the tidal models, the sea temperature fields, and the marine ecosystem models, the present status and the progress of the adjoint method applications to the China adjacent seas are reviewed, and the prospects of the adjoint method applications are preliminarily discussed. Finally as it is pointed out, this method can play an important role for optimization of marine observational plan, and also sufficient importance should be attached to its applications to the dynamic ecosystem models.

**Key words:** adjoint method; China adjacent seas; data assimilation

**Received:** September 9, 2009