◇ 李启虎院士八十华诞学术论文 ◇

# 海洋水声环境敏感区诊断与适应性观测研究进展

笪良龙<sup>1,2</sup> 过武宏<sup>1,2†</sup> 崔宝龙<sup>1,2</sup> 刘敬一<sup>1,2</sup>

(1 海军潜艇学院 青岛 266199)

(2 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋军民融合联合实验室 青岛 266237)

**摘要** 传统的海洋水声环境观测通常是局部区域范围内短时间的有限观测,非常时期观测平台在作战海区实施系统观测十分困难,如何利用适当的观测方式获取有效的观测数据来提高观测效率是目前亟需解决的问题。 该文介绍了海洋声学敏感区诊断与适应性观测概念,总结了相关研究进展,该项工作有助于改进目前传统的 观测系统设计,提高观测网建设效益,根据敏感区分布特点建立移动的补充观测系统开展适应性观测,从而发 展我国新型的海洋观测体系,为改善海洋水声环境预报质量提供技术支撑。

关键词 水声环境,敏感区诊断,适应性观测 中图法分类号: TP391 文献标识码: A

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2019.04.012

文章编号:1000-310X(2019)04-0553-09

#### Ocean acoustic sensitive region diagnose and adaptive observation

DA Lianglong<sup>1,2</sup> GUO Wuhong<sup>1,2</sup> CUI Baolong<sup>1,2</sup> LIU Jingyi<sup>1,2</sup>

(1 Navy Submarine Academy, Qingdao 266199, China)

(2 Joint Laboratory for Marine Civil-Military Integration of Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

**Abstract** As the traditional acoustic environment observation is not targeted, and hard to be applied in some times, how to utilize the limited observation resource to obtain valuable data and improve the observation efficiency is an urgent problem to be solved. This paper presents the concept of ocean acoustic sensitive region diagnose and adaptive observation, the related research progress is introduced. According to this research, we can greatly improve the traditional observation system design, enhance the observation network construction efficiency and with the location reference of the sensitive region, construct mobile supplementary observation system and command system. Accordingly, new oceanic observation pattern can be built up, which can provide valid observation data to decrease the uncertainty in the underwater acoustic environment. **Key words** Acoustic environment, Sensitive region diagnose, Adaptive observation

2019-02-15 收稿; 2019-04-05 定稿

†通讯作者 E-mail: g1w2h31980@163.com

作者简介: 笪良龙 (1967-), 男, 安徽桐城人, 博士, 教授, 研究方向: 海洋环境效应技术。

# 0 引言

海洋观测是海洋学研究的基础,特别是进行海 洋水声环境预报和水声装备性能评估时,更需要以 精确的环境参数信息为前提。然而海洋水声环境观 测投入巨大、费时费力、实施困难,致使传统的海洋 环境观测无法满足日益深入的海洋水声环境相关 研究与应用,主要体现在:一是传统的海洋环境观测 通常是局部区域范围内短时间的有限观测,即观测 区域范围小、时间短;二是针对给定区域进行的现 场实地观测,战时由于观测平台无法进入作战海区, 获取实地观测数据实施困难;三是观测平台和资源 有限,大范围、高密度现场观测成本高昂;四是由于 观测区域与未知的关注海区存在差异,观测数据对 提高关注海区的环境预报质量贡献不大,观测数据 使用效果差。针对上述问题,科学家开始构思新型 的观测系统,其中最为关键的问题在于怎样以最精 简的观测布局和最少的观测成本获得最有效的观 测效果,即在研究区域内是否存在最优的观测系统 配置方案,使得同化观测系统的观测数据后研究区 域内海洋状态背景场的不确定性能够得到最大程 度的降低,也就是说如何将应用需求和条件约束反 馈给观测系统,从而优化观测系统建设。在大气环 境研究领域,目前主要采用敏感区诊断技术去实现 这一反馈目标。本文根据海洋水声环境特点,介绍 了水声环境敏感区诊断与适应性观测的概念,并进 行了一定的探索性研究。

海洋水声环境敏感区是指某一海区的海洋水 声环境初始误差对未来某一时刻所关注海区的水 声环境预报、水声探测及其指挥决策具有显著影响, 则称该海区为关注海区的海洋水声环境敏感区。针 对预报时限找出并确定关注海区的敏感区,即敏感 区诊断。适应性观测就是针对某一预报问题(海洋 水声环境状况、时效、地点),在敏感区加强观测,将 新的敏感区观测信息进行数据同化,构建数值预报 初始背景场,提高数值预报初值质量,进而提升关注 海区模式预报准确率。

# 1 敏感区诊断基本方法

美国海军高度重视海洋环境敏感区诊断研究, 2002年前后,美国海军研究局(Office of naval research, ONR)在部级创新计划中与欧盟发展了适 应性快速环境评估系统<sup>[1]</sup>(Adaptive rapid environmental assessment, AREA),该系统将观测、海洋、 声学和决策有机结合形成一个闭环的复杂巨系统, 该系统可根据海洋声学预报误差发展情况和决策 要求,优化观测方案,从而实现对作战和训练海区的 快速环境效能评估。相对于传统的环境评估系统, 该系统的最大改进和优势在于对观测系统和观测 方案的优化反馈,如图1<sup>[1]</sup>所示,而敏感区诊断方法 是实现这一反馈目标的关键技术。目前该系统仍在 发展完善过程中。

敏感区诊断和适应性观测思想起源于数值天 气预报发展的早期,当时研究人员就发现某一区域



图 1 AREA 系统结构图 Fig. 1 Structure of AREA System

的初始条件对特定区域数值预报有很大影响<sup>[2]</sup>。适应性观测作为一种提高特定区域数值预报质量的 有效方法,其关键在于准确识别敏感区位置,即敏 感区诊断。针对这一问题,国际上在气象领域开展 了一系列外场试验,如锋面和大西洋风暴追踪试验 (FASTEX)、北太平洋试验(NORPEX)、冬季风暴 观测试验(WSR)、热带气旋监测计划(DOTSTAR)、 全球观测系统研究与可预报性试验(THORPEX)、 THORPEX 亚太地区试验(T-PARC)等<sup>[3]</sup>,这些外 场试验的结果表明适应性观测及敏感区诊断可在 一定程度上提高数值预报水平。

敏感区诊断方法伴随着数值预报的发展,也逐渐由根据主观经验的判断发展为综合考虑动力过程及物理机制。目前,敏感区诊断的方法主要有增长模繁殖法 (Breeding of growing modes, BGM)<sup>[4]</sup>、线性奇异向量法 (Linear singular vector, LSV)<sup>[5]</sup>、集合转换卡尔曼滤波法 (Ensemble transform Kalman filter, ETKF)<sup>[6]</sup> 以及条件非线性最优扰动法 (Conditional nonlinear optimal perturbation, CNOP)<sup>[7]</sup>等。

#### 1.1 增长模繁殖法(BGM)

增长模繁殖法(BGM)最早是由Toth等<sup>[8]</sup>提 出,并在美国国家环境预报中心(National centers for environmental prediction, NCEP) 投入业务化 使用<sup>[9]</sup>。相关研究结果表明,模式的初始误差场中 既存在随机的、非增长的误差分量,也存在与预报 模型有动力联系、快速增长的误差分量,其中非增 长的误差将在预报开始后逐渐转换到增长的方向, 增长的误差比非增长的误差在决定预报水平上更 为重要<sup>[10]</sup>。该方法用相同的非线性模式对未加扰 动的初始场和扰动初始场进行积分,在固定时间间 隔内对扰动预报与控制预报之差进行处理,再将处 理过的差值反馈到对应时刻的分析场上,重复以上 过程,直至扰动增长饱和,由此得到最终的扰动繁殖 模<sup>[9]</sup>。该方法的优点是计算量少,易于工程实施;但 缺点在于初始扰动方差是由不随时间变化的气候 场分析误差限定的,且扰动之间并未接近正交[11]。

在应用研究方面, Yang 等<sup>[12]</sup> 发现利用 BGM 方法生成初始扰动场,进而实施集合预报能提高季 节到年际变化的预报水平; Yin 等<sup>[13]</sup> 利用 BGM 方 法生成了海洋环流初始状态的集合,发现针对墨西 哥湾环状流位置和强度的集合预报结果要好于传 统的单一预报结果。

#### 1.2 线性奇异向量法(LSV)

线性奇异向量法(LSV)具有完备的数学理 论基础,最早是由欧洲中期天气预报中心(European centre for medium-range weather forecast, ECMWF)提出,并在其全球的业务化预报系统中 得到了成功的应用。具体而言,非线性动力学系统 在有限时间内是基本稳定的,假若初始扰动比较小, 在一定时间内,扰动的发展可以用模式线性近似进 行描述,通过求取切线性模式的最大奇异值,可以得 到在相空间中线性增长最快的初始扰动,通过消除 初始扰动中的快速增长部分,可以有效提高预报质 量。但是LSV应用的前提是切线性模式能够近似描 述初始扰动的发展,它不能揭示非线性对初始扰动 增长的影响。因而,LSV不能代表非线性模式中的 增长最快的有限振幅初始扰动<sup>[11]</sup>,这在很大程度上 限制了该方法在目标观测非线性系统中的应用。

近年来,有研究人员利用LSV方法开展海洋 可预报性问题的相关研究,如Xue等<sup>[14]</sup>和Chen 等<sup>[15]</sup>利用LSV方法研究厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)预报结果不确 定性问题,并分析了其中的动力学过程;另外, 邹广安<sup>[16]</sup>利用LSV方法及POM(Princeton ocean model)模式研究了日本南部黑潮路径变异的可预 报性问题。

#### 1.3 集合变换卡尔曼滤波(ETKF)

集合变换卡尔曼滤波(ETKF)是一种根据卡尔 曼滤波理论发展的敏感区诊断方法,该方法将集合 预报误差协方差信息结合观测误差信息,计算引入 适应性观测资料引起的验证区域内预报误差方差 的减少量,进而确定敏感区<sup>[17]</sup>。ETKF方法克服了 BGM方法中分析误差方差固定不变及其扰动难以 保持正交性的缺陷,同时避免了使用伴随模式,计算 资源花费较少,并且可以实现并行计算,从而为其在 业务化预报中的推广奠定了基础。但ETKF方法的 应用也存在一定限制:首先,为了提供准确的背景场 误差,分析误差协方差矩阵必须足够精确;其次,初 始扰动必须足够小,以满足线性近似的条件;最后, 集合扰动的样本必须足够丰富<sup>[18]</sup>。 国内外针对ETKF方法已开展了大量研究,其 中Bishop等<sup>[18]</sup>、Hamill等<sup>[19]</sup>、田伟红<sup>[20]</sup>等研究均 表明,ETKF方法能有效诊断适应性观测的敏感区, 有一定的业务化应用潜力;在此基础上,马旭林<sup>[21]</sup> 研究发展了基于ETKF的适应性观测系统。

#### 1.4 条件非线性最优扰动法(CNOP)

为解决LSV只能描述非线性模式中有限时段 内小扰动的发展,不能揭示初始扰动的非线性增长 的问题, Mu等<sup>[7]</sup>提出CNOP的思想, 它是LSV方 法在非线性框架下的推广,可以表征非线性空间内 增长最快的初始扰动。具体来说, CNOP 在预报时 刻的非线性发展最大,代表在预报时刻对预报结果 有最大影响的一类初始扰动。综合现有的几种方 法, CNOP 能更好地考虑非线性过程对初始扰动发 展的影响。目前,就非线性动力系统适应性观测敏 感区的诊断问题,CNOP方法在理论层面较为完备, 但是计算过程较为复杂,其本身是一个条件约束非 线性最优化问题,在求解过程中需准确获得目标函 数关于优化变量的梯度。然而,由于海洋数值模式 中包含了复杂的动力过程,用定义法求解梯度的难 度非常大,当前的研究多采用数值模式的伴随模式 计算目标函数的梯度[22],对于大型的三维海洋数值 模式而言,其切线性模式及伴随模式的计算实现难 度较大,同时运行伴随模式需要巨大的计算量,这些 因素在一定程度上限制了CNOP方法在海洋数值 预报研究中的推广应用<sup>[23]</sup>。

应用方面, Mu等<sup>[24]</sup>采用该方法捕获事件发展 的早期信号并有效提升ENSO的预报水平; Wang 等<sup>[25]</sup>研究了黑潮路径变异中的适应性观测敏感 区诊断问题, 在此基础上, 邹广安<sup>[26]</sup>对CNOP及 LSV进行了对比研究, 证明CNOP方法更为有效; Li等<sup>[27]</sup>利用CNOP方法配合POM模式, 针对南 中国海西边界流 (SCSWBC)的中期预报问题, 设计 了适应性观测方案, 结果表明CNOP型敏感区内的 初始条件质量对于预报结果有显著的影响; Peng 等<sup>[28-29]</sup>利用三维海洋模式POM的切线性模式及 伴随模式开展了海洋环境参数敏感区诊断研究。

#### 2 海洋水声环境敏感区诊断

海洋水声环境敏感区诊断研究有众多科学问题有待探索,一是误差传递与发展规律问题,即初始误差从海洋运动变化到声场计算评估,最终到辅助决策应用的时空变化发展规律;二是海洋环境参数和声场要素敏感区在时空关系上是否具有一致性的问题,该问题是从机理上研究海洋水声环境敏感区诊断的基础;三是适应性优化观测问题,获得敏感区信息的主要目的是开展快速的、有针对性的适应性观测,当前满足无人、快速、低成本、区域化环境观测的技术装备尚不成熟。

由于海洋水声环境敏感区诊断尚在起步阶段, 在可见的海洋环境敏感区诊断文献中,研究对象多 为海洋动力环境参数,如流场数据等,而海洋水声 环境更关注的是海洋热力环境参数,如温度场数据。 以下是几项针对海洋水声环境开展的敏感区诊断 研究进展情况。

# 2.1 基于最大Lyapunov指数的温度场预报敏感 区诊断

海洋环境时域、地域差异悬殊,带有显著的混 沌特征,而最大Lyapunov指数是描述混沌特征的 一个非常重要的特征量,它度量了相空间中邻近 点的发散性,当其为正时,一般认为该系统具有混 沌特性,因此,可用Lyapunov指数进行海洋水声环 境的敏感区诊断研究。为此,可以通过改进重构相 空间方法(如图2<sup>[30]</sup>所示),将传统的通过经验试探 性的重复选择来确定嵌入维数,改变为利用C-C方 法重构相空间,同时获取嵌入维数和时间延迟,改 进小数据量方法计算最大Lyapunov指数<sup>[30]</sup>。改进 方法相对于传统方法在相空间的嵌入维数、重建延 时、观测噪声等方面具有较好的鲁棒性,且在计算 Lyapunov指数时对分析的时序长度要求较低。





为了进一步验证该方法,采用海洋数值模式稳 定运行5年时长温度序列作为混沌研究对象,利用 改进的最大Lyapunov指数算法,仿真研究了东中 国海不同深度层的混沌稳定性分区结果。如图3<sup>[30]</sup> 所示,东中国海台湾北部海区最大Lyapunov指数 大于零且数值较大,表明该海域存在较为明显的混 沌特征,因此对该区域的预报结果较为不稳定,在此 基础上设定预报区、强混沌区、弱混沌区进行观测 系统模拟试验。试验方案和结果如表1<sup>[30]</sup>所示,结 果显示,只在弱混沌区进行观测,预报区预报均方根 误差较大;而只在强混沌区进行观测,预报区预报结 果和全局观测的预报结果较为接近,可以有效节约 观测成本和改善观测质量。



图 3 温度时序的东中国海稳定性分区图 (深度 30 m) Fig. 3 Stability of temperature sequence at China East Sea

表1 三种试验方案条件下的温度均方根误差对比 Table 1 Temperature root mean square error comparison under three test scenarios

粉估试验主安	预报区温度均方根误差/℃		
奴匪讽挜刀杀	单点温	30 m 层	北纬 27°
	度剖面	水平面	垂直断面
方案一 (弱混沌区观测)	3.0824	6.2414	6.3871
方案二 (强混沌区观测)	2.9276	5.8179	5.7533
方案三 (全局观测)	2.8760	5.7996	5.7060

## 2.2 基于 CNOP 方法的温度场预报敏感区诊断

条件非线性最优扰动 (CNOP) 是指选取适当的范数 ||·||,初始扰动在  $||\vec{u}_0|| \leq \delta$ 的约束条件下,

当且仅当 $J(\vec{u}_{0\delta}) = \max ||\vec{u}_0|| \leq \delta ||M_T(\vec{U}_0 + \vec{u}_0) - M_T(\vec{U}_0)||$ ,此时,称初始扰动 $\vec{u}_{0\delta}$ 为CNOP。易见, 在此约束条件下,非线性最优扰动 $\vec{u}_{0\delta}$ 在预报时刻 T的增长最大。因此,CNOP这种初始扰动结构,满 足在指定的预报时刻、初始约束条件 $||\vec{u}_0|| \leq \delta$ 下, 检验区内所关心的预报增量能达到的最大非线性 增长。

传统 CNOP 的求解都是使用基于伴随的非线 性优化迭代方法,具体优化过程是采用伴随模式计 算目标函数的梯度,计算量非常大,而且对于大型的 数值预报模式,其伴随模式的计算实现十分复杂,这 在一定程度上限制了该方法的推广使用。为了减少 计算量,尽量避免计算伴随模式,通过其他方法替代 伴随模式来计算 CNOP,改进提出一种基于经验正 交分解 (Empirical orthogonal function, EOF) 求解 CNOP 的快速算法,算法处理流程如图 4<sup>[31]</sup> 所示。



图 4 EOF-CNOP 算法处理流程 Fig. 4 Algorithm flow for EOF-CNOP

采用该方法针对预先选取的预报区 (图5<sup>[31]</sup> 虚 线框)进行敏感区诊断,计算 CNOP 能量范数 (如 图 6<sup>[31]</sup> 所示),对 CNOP 能量范数垂向求和,并进行 从大到小排序,取前 1% 个位置点,可得到最为敏感 的区域位置 (如图 5 所示)。

在此基础上,设计了5种试验方案开展观测系 统模拟试验研究,如图7<sup>[31]</sup>所示。模拟试验结果显 示,利用敏感区温度观测数据进行预报的温度均方 根误差一直相对较小,且在3天后温度均方根误差 低于采用预报区本地温度观测数据进行的预报,而 其余观测方案对预报结果几乎没有改善,由此可以 认为,在CNOP识别获取的温度敏感区内进行加密 观测,可有效实现预报区一周内温度场的预报。



图 5 质量控制后的 CNOP 能量范数 (敏感区) Fig. 5 CNOP energy norm after quality control (sensitive area)



图 6 CNOP 能量范数 Fig. 6 CNOP energy norm



图 7 基于 EOF-CNOP 的敏感区观测系统模拟试验预报均方根误差发展情况 Fig. 7 Prediction of root mean square error of simulation test of sensitive area observation system based on EOF-CNOP

### 2.3 基于 ETKF 方法的传播损失预报敏感区诊断

集合变换卡尔曼滤波方法(ETKF)基于集合变 换思想并结合有效的观测信息能够快速得到特定 观测配置的分析误差协方差矩阵,进而估算出该特 定观测配置能够在多大程度上提高我们对研究区 域的海洋状态的估计水平。ETKF方法使用一组模 式结果作为初始样本集合,在卡尔曼滤波理论框架 下,结合观测误差信息对协方差矩阵进行更新,然后 通过最小化分析误差来获取最优观测点。相对于变 分资料同化中背景误差协方差是预先给定的(静态 背景误差协方差),即背景误差协方差不依赖于进行 同化的背景场,ETKF方法是基于集合变换思想,由 背景场的集合样本统计出背景误差特征,并用相同 的背景场进行资料同化,这样的背景误差协方差依 赖于本次同化的背景场,被称为"流依赖"背景误差 协方差,因此该方法可以直接计算得到由观测导致 的具有流依赖性质的误差协方差矩阵的减少量,是目前最优观测研究的较常用的方法。具体模型与实现过程如图8<sup>[32]</sup>所示。

为进一步研究海洋温度场初始误差对声传播 损失预报的影响,利用该方法对声传播损失预报敏 感区进行诊断。图9<sup>[32]</sup>是利用该方法对所关注的预 报区(虚线框)进行声传播损失预报的敏感区诊断 结果,传播损失采用BDRM 声场计算模型,声源深 度10 m,接收深度30 m,声源频率100 Hz,传播距 离5 km,每间隔100 m计算一个传播损失,取均值。 从图9中可以看出,针对固定的预报时刻,预报提前 时间不同,其敏感区位置也有所差异,该图分别给出 了间隔2天、4天、6天、8天预报的敏感区位置,不难 看出,随着时间间隔增加,敏感区位置逐渐向黑潮流 域上游区域移动,该结果与海洋动力过程具有一致 性<sup>[32]</sup>。从图10<sup>[32]</sup>可以看出,针对不同的预报起始 时刻,采用敏感区观测数据调整初始场,声传播损失 预报均方根误差均有所降低,表明采用ETKF方法 可以提高声传播损失预报质量,具体改善程度可参 见文献[32]。



图 8 ETKF 方法处理流程 Fig. 8 ETKF method processing flow





Fig. 9 Sensitive area location acquired at different intervals based on ETKF method



图 10 基于 ETKF 方法适应性观测对声场传播损 失预报的影响

Fig. 10 Influence of adaptive observation based on ETKF method on prediction of sound field propagation loss

# 3 总结与展望

环境敏感区诊断与适应性观测是近几年国际 上提出改善环境预报精度的有效方法,是当前环境 数值预报领域研究的前沿热点问题。虽然在大气和 海洋领域有所涉及,但仍处在起步发展阶段,海洋水 声环境敏感区诊断及适应性观测研究是一项跨学 科的前沿基础性研究,具有一定的难度和挑战。研 究一旦取得突破,将对我国水声观测系统建设及优 化使用产生深远影响,颠覆当前水声环境保障的方 法和技术,促进我国水声行业的发展。

**致谢** 特别感谢李启虎院士在本项研究论证阶段给 予的大力支持和关注,谨以此文庆祝李启虎院士八 十华诞。



- Schmidt H. AREA: adaptive rapid environment assessment[M]//Pace N G, Jensen F B. Impact of littoral environmental variability on acoustic predictions and sonar performance. Kluwer Academic Publishers, 2002: 587–594.
- [2] Riehl H, Haggard W H, Sanborn R W. On the prediction of 24-hour hurricane motion[J] Journal of Atmospheric Sciences, 1956, 13(5): 415–420.
- [3] 穆穆. 目标观测的方法、现状与发展展望 [J]. 中国科学: 地球 科学, 2013, 43(11): 1717–1725.
   Mu Mu. Methods, current status, and prospect of targeted observation[J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 43(11): 1717–1725.

- [4] Lorenz E N, Emanuel K A. Optimal sites for supplementary weather observation sites: simulation with a small model[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1998, 55(3): 399–414.
- [5] Palmer T N, Gelaro R, Barkmeijer J, et al. Singular vectors, metrics, and adaptive observations[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1998, 55(4): 633–653.
- [6] Bishop C H, Etherton B J, Majumdar S J. Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part I: theoretical aspects[J]. Monthly Weather Review, 2001, 129(3): 420–436.
- [7] Mu M, Duan W S, Wang B. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications[J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2003, 10(6): 493–501.
- [8] Toth Z, Kalnay E. Ensemble forecasting at NMC: the generation of perturbations[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1993, 74(12): 2317–2330.
- [9] Toth Z, Kalnay E. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method[J]. Monthly Weather Review, 1997, 125(12): 3297–3319.
- [10] 关吉平, 张立凤, 马环字. 基于增长模繁殖法的初始分析误差 计算及集合预报试验 [J]. 气象科学, 2009, 29(3): 317–322. Guan Jiping, Zhang Lifeng, Ma Huanyu. Computation of initial analysis error and ensemble forecast based on the method of "BGM"[J]. Scientia Meteorological Sinica, 2009, 29(3): 317–322.
- [11] 王辉, 刘娜, 李本霞, 等. 海洋可预报性和集合预报研究综述 [J]. 地球科学进展, 2014, 29(11): 1212–1225.
  Wang Hui, Liu Na, Li Benxia, et al. An overview of ocean predictability and ocean ensemble forecast[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(11): 1212–1225.
- [12] Yang S C, Keppenne C, Rienecker M, et al. Application of coupled bred vectors to seasonal-to-interannual forecasting and ocean data assimilation[J]. Journal of Climate, 2009, 22(11): 2850–2870.
- [13] Yin X Q, Oey L Y. Bred-ensemble ocean forecast of loop current and rings[J]. Ocean Modelling, 2007, 17(4): 300–326.
- [14] Xue Y, Cane M A, Zebiak S E, et al. Predictability of a coupled model of ENSO using singular vector analysis[J]. Monthly Weather Review, 1997, 125(9): 2043–2056.
- [15] Chen Y Q, Battisti D S, Palmer T N, et al. A study of the predictability of tropical pacific SST in a coupled atmosphere-ocean model using singular vector analysis: the role of the annual cycle and the ENSO cycle[J]. Monthly Weather Review, 1997, 125(5): 831–845.
- [16] 邹广安. POM 模式在日本南部黑潮路径变异研究中的应用 [J]. 海洋科学, 2016, 40(2): 151–158.
  Zou Guang'an. Application of the POM model to study the path variations of Kuroshio currents in southern Japan seas[J]. Marine Sciences, 2016, 40(2): 151–158.
- [17] 马旭林,于月明,姜胜,等.基于集合卡尔曼变换的目标观测敏感区识别系统优化及影响试验[J].大气科学学报,2014, 37(6):749-757.

Ma Xulin, Yu Yueming, Jiang Sheng, et al. Optimiza-

笪良龙等:

- [18] Bishop C H, Toth Z. Ensemble transformation and adaptive observations[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1999, 56(11): 1748–1765.
- [19] Hamill T M, Snyder C. Using improved background error covariances from an ensemble Kalman filter for adaptive observations[J]. Monthly Weather Review, 2000, 130(6): 1552–1572.
- [20] 田伟红.集合变换卡尔曼滤波方法在集合预报和适应性观测中的初步应用[D].北京:中国气象科学研究院,2006.
- [21] 马旭林. 基于集合卡尔曼变换 (ETKF) 理论的适应性观测研 究与应用 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008.
- [22] 孙国栋, 穆穆, 段晚锁, 等. 条件非线性最优扰动 (CNOP): 简 介与数值求解 [J]. 气象科技进展, 2016, 6(6): 6–14. Sun Guodong, Mu Mu, Duan Wansuo, et al. Conditional nonlinear optimal perturbation: introduction and numerical computation[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2016, 6(6): 6–14.
- [23] 谭晓伟. CNOP新算法研究及其在目标观测中的应用检验[D].北京:中国科学院大气物理研究所, 2009.
- [24] Mu M, Yu Y S, Xu H, et al. Similarities between optimal precursors for ENSO events and optimally growing initial errors in El Niño predictions[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2014, 115(3/4): 416–469.
- [25] Wang Q, Mu M, Dijkstra H A. The similarity between optimal precursor and optimally growing initial error in prediction of Kuroshio large meander and its application to

海洋水声环境敏感区诊断与适应性观测研究进展

targeted observation[J]. Journal of Geophysical Research C: Oceans, 2013, 118(2): 869–884.

- [26] 邹广安.黑潮大弯曲路径预报研究中的目标观测问题 [D].青岛:中国科学院海洋研究所, 2015.
- [27] Li Y, Peng S, Liu D. Adaptive observation in the South China Sea using CNOP approach based on a 3-D ocean circulation model and its adjoint model[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2014, 119(12): 8973–8986.
- [28] Peng S Q, Xie L. Effect of determining initial conditions by four-dimensional variational data assimilation on storm surge forecasting[J]. Ocean Modelling, 2006, 14(1/2): 1–18.
- [29] Peng S Q, Xie L, Pietrafesa L J. Correcting the errors in the initial conditions and wind stress in storm surge simulation using an adjoint optimal technique[J]. Ocean Modelling, 2007, 18(3/4): 175–193.
- [30] 笪良龙,熊张浩,过武宏.海洋温度场稳定性与可预报性研究[J].海洋技术学报,2015,34(1):55-61.
  Da Lianglong, Xiong Zhanghao, Guo Wuhong. Analysis of stability and predictability for ocean temperature field[J]. Journal of Marine Technology, 2015, 34(1):55-61.
- [31] 刘敬一. 基于 CNOP 的适应性观测敏感区诊断方法研究 [D].青岛:海军潜艇学院, 2017.
- [32] 崔宝龙, 笪良龙, 过武宏. 基于集合卡尔曼变换的东中国海声 学敏感区判定方法 [J]. 应用声学, 2018, 37(6): 895–903.
  Cui Baolong, Da Lianglong, Guo Wuhong. Identifying acoustic sensitive area of the East China Sea based on ensemble transform Kalman filter[J]. Journal of Applied Acoustics, 2018, 37(6): 895–903.