

◇ 研究报告 ◇

基于集合卡尔曼变换的东中国海声学敏感区判定方法*

崔宝龙^{1,2†} 笄良龙^{1,2} 过武宏^{1,2}

(1 海军潜艇学院 青岛 266199)

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

摘要 为改善海洋与水声环境预报质量,针对常规观测成本高、资料利用率低等问题,将适应性观测方法应用于海洋声学领域。结合海洋-声学耦合模式与集合卡尔曼转换敏感区诊断方法,以东中国海宫古海峡北部区域为验证区,计算并分析不同条件下海洋环境敏感区与声学敏感区分布,通过观测系统模拟试验验证适应性观测对验证区预报的提升效果。结果表明,两种敏感区位置随时间间隔增加均向验证区上游移动,海洋环境敏感区相比于声学敏感区分布更为集中,且平移特征更明显;对海洋环境敏感区和声学敏感区添加适应性观测均能提升海洋与水声环境的预报质量,提升效果随时间间隔增加而减小,在某种类型敏感区的适应性观测对相对应参数的预报质量提升效果优于对其他类型敏感区进行观测的效果。

关键词 适应性观测,海洋声场环境,敏感区诊断,集合卡尔曼变换

中图法分类号: TN566

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2018)06-0895-09

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.06.010

Identifying acoustic sensitive area of the East China Sea based on ensemble transform Kalman filter

CUI Baolong^{1,2} DA Lianglong^{1,2} GUO Wuhong^{1,2}

(1 Navy Submarine Academy, Qingdao 266199, China)

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

Abstract In order to improve the forecast quality of ocean and acoustic environment, the method of adaptive observation is applied in the ocean acoustic field to overcome the problems of conventional observation, such as high cost and low data utilization rate. An area in the north of Miyako Strait at the East China Sea is selected as the target area. Ocean and acoustic environment sensitive areas in different conditions are calculated and analyzed combining ocean-acoustic coupled mode with ensemble transform Kalman filter method. The effect of adaptive observation on the target area is verified through observation system simulation experiment. The results show that the sensitive areas of both kinds move towards the upriver area and the ocean environment sensitive area is more concentrated with greater panning features. The adaptive observation improves the ocean and acoustic environment forecast quality of target area and the improving effect declines with the time interval between the observation and verification time. The effect of adaptive observation in particular kind of sensitive area on corresponding forecast quality is greater than the adaptive observation on other kinds of sensitive areas.

Key words Adaptive observation, Ocean acoustic environment, Sensitive area identification, Ensemble transform Kalman filter

2018-01-30 收稿; 2018-05-01 定稿

*国家 530 专项 2015 年第一批任务研究与服务保障项目, 国防科技创新特区项目 (17-H863-05-ZT-001-024-01)

作者简介: 崔宝龙 (1988-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士研究生, 研究方向: 水声环境效应技术。

† 通讯作者 E-mail: cuibaolong0715@gmail.com

1 引言

海洋初始场是影响海洋环境预报质量的重要因素,而观测误差、观测时空覆盖范围不足、观测的时空尺度与预报模式不一致以及资料同化过程中的近似等因素都会引起海洋初始场存在不确定性。这些不确定性使得海洋预报面临失败的威胁,严重影响海洋资源开发、海洋航路安全、军事行动保障等国家重大利益。观测是减小海洋初始场不确定性的主要手段,但常规观测存在盲目性、成本高、资料利用率低及特殊时期特定区域无法观测等问题。针对观测配置最优化问题,专家学者于20世纪90年代提出适应性观测的概念^[1-4]。适应性观测是指,为了提升某一时刻(验证时刻)某一区域(验证区域)的预报质量,在验证时刻之前的某一时刻(目标时刻)对验证区域影响较大的区域(敏感区)进行加强观测,将额外的观测信息通过数据同化改善模式初值质量,进而提高模式预报准确度^[5-6],具体流程如图1所示。这是一个将观测系统与模式预报有机结合,建立观测与预报之间的互动机制,根据预报需求组织实施加强观测,从而提高数值预报准确度的新观念。近年来随着水下无人机,尤其是水下滑翔机等探测平台的应用^[7-9]使得海洋适应性观测可行性大大提升,因此,针对适应性观测在海洋声学环境方面的应用研究具有十分重要的意义。

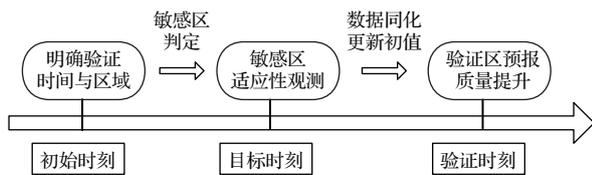


图1 适应性观测流程图

Fig. 1 The processing of adaptive observation

适应性观测核心是观测敏感区的判定,目前敏感区判定的主要方法有奇异矢量(Singular vector, SV)、增长模繁殖法(Breeding of growing modes, BGM)、条件非线性最优扰动(Conditional nonlinear optimal perturbation, CNOP)与集合卡尔曼变换(Ensemble transform Kalman filter, ETKF)等。SV方法^[10-11]假设一段时间内物理空间中初始时刻微小误差线性发展,认为增长最快的扰动是预报误差的主要来源,判定该扰动所在区域为敏感区。该方法只能对充分小的初始误差短期发展进

行分析,忽略模式预报误差,虽然存在对常规观测的分析误差计算不够准确的问题,但在外场试验中依然被证明是有效的^[12]。BGM方法通过重复培养限制尺度下的随机扰动来获取增长最快的模态,使用该方法可减小分析时刻的预报误差。欧洲中期天气预报中心和美国国家环境预报中心分别采用这种方法实现了业务化^[13-14],国内的于永锋等^[15]、关吉平等^[16]、高峰等^[17]学者也利用该方法进行了集合预报初始扰动、集合预报试验方面的研究,但该方法无法消除初始场的误差。Mu等^[18]学者提出了CNOP方法,并将其运用到适应性观测领域^[19-22]。条件非线性最优扰动是指在预报时刻具有最大非线性发展的一类初始扰动,是SV方法在非线性的推广,通过消除这种扰动从而提高预报技巧。该方法已前后应用于厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)的可预报性问题^[18]、海洋热流敏感性^[21]、强降水与台风等高影响天气的目标观测^[19,22]等问题。谭晓伟等^[23]、周非凡等^[24]也对基于CNOP的敏感区识别方法进行了改进研究。不过该方法需要复杂的伴随模式计算,计算复杂度过高。ETKF方法最早由Bishop等^[25-26]和Majumdar等^[27]提出,该方法利用了观测信息的分析误差协方差和转换公式将预报误差协方差变换为分析误差协方差,定量地计算不同观测配置引起的预报误差协方差减小量,可直接定量地识别出最佳目标观测区域,另外引入集合思想,利用线性组合的扰动表征误差方差,大幅减小计算量,避免了伴随方式的计算,同时还便于实现并行化。Szunyogh等^[28-29]将该方法应用于美国冬季风暴监测试验,并在美国国家环境预报中心进行适应性观测研究,均取得了成功;田伟红^[30]探索了ETKF方法在适应性观测中的实际应用;马旭林等^[6,31-32]结合GRAPES(Global regional analysis and prediction system)同化系统,建立了基于ETKF初始扰动方案的全球集合预报系统,在基于ETKF的适应性观测系统基础上,发展了我国中高尺度高影响天气系统敏感区识别的优化方案;张宇等^[33]在马旭林的敏感区估计方案基础上,考虑湿度因子的影响,对方案进行了优化。目前该方法已广泛应用于适应性观测的外场试验并取得了成功^[11,28-29]。

目前适应性观测的研究主要集中于大气领域,针对海洋环境的研究较少,而且目前尚未有适应性观测在水声领域的研究与应用。为了结合原本孤

立的海洋系统与水声系统, 笪良龙等^[34]、过武宏等^[35]构建了海洋-声学耦合模式(Ocean-acoustic coupled mode, OACM), 将声学计算纳入运动的海洋中, 实现水声计算和海洋环境的最佳匹配。本文结合ETKF敏感区诊断方法与OACM模式, 将适应性观测应用于海洋与水声环境预报, 基于区域海洋模型系统(Regional ocean model system, ROMS)海洋模式数据构建海洋环境与声传播损失的集合预报, 以东中国海宫古海峡北部海域为验证区进行敏感区诊断仿真计算, 分析不同条件下海洋环境敏感区与声学敏感区的仿真结果, 结合观测模拟系统试验(Observation simulation system experiment, OSSE)验证在敏感区实施适应性观测对提高预报质量的有效性。

2 基于ETKF的敏感区诊断方法

ETKF方法^[26-27]结合了集合转换与卡尔曼滤波方法, 计算适应性观测后验证时刻验证区内预报误差方差的减小量, 与其他敏感区判定方法通过寻找最快发展的扰动所在区域相比, 含义更加清晰, 可直接定量计算识别敏感区。假定集合预报误差线性传播, 通过卡尔曼滤波误差更新方程得到变换矩阵, 通过变换矩阵将预报误差转换为分析误差协方差。

基于ETKF方法的敏感区诊断计算的核心是由适应性观测带来的分析误差减小量^[4], 即 $\mathbf{S}(t_{i+M}|H_i)$, 其中 t_{i+M} 为第 M 个目标观测时间, H_i 为第 i 种适应性观测配置。具体计算步骤如下:

(1) 获取特定区域内单一或多项参数的集合预报, 构造关于集合均值的集合预报扰动 \mathbf{X}^f ,

$$\mathbf{X}^f = \frac{(x_1 - \bar{x}, x_2 - \bar{x}, \dots, x_N - \bar{x})}{\sqrt{K-1}}, \quad (1)$$

其中, x_i 为第 i 个预报数据, \bar{x} 为预报均值。该矩阵为 $N \times K$ 维, 其中 N 为单个预报中数据长度, K 为集合成员个数。

(2) 计算 $(H\mathbf{X}^f)^T \mathbf{R}^{-1} H\mathbf{X}^f$ 的非零特征值矩阵 $\mathbf{\Gamma}$ 及对应的特征向量矩阵 $\boldsymbol{\sigma}$, 其中 H 为观测算子, 不同的适应性观测配置对应不同的 H , \mathbf{R} 为观测误差协方差矩阵, 在实际运算过程中需要将部分绝对值较小的特征值及对应的特征向量剔除。

(3) 分析误差协方差的减小量为

$$\mathbf{S} = \mathbf{P}_{t_v}^f - \mathbf{P}_{t_v}^a = \mathbf{X}_{t_v}^f \boldsymbol{\sigma} \mathbf{\Gamma} (\mathbf{\Gamma} + \mathbf{I})^{-1} (\mathbf{X}_{t_v}^f \boldsymbol{\sigma})^T, \quad (2)$$

其中, $\mathbf{P}_{t_v}^f$ 是未经适应性观测的预报误差协方差矩阵, $\mathbf{P}_{t_v}^a$ 是经过适应性观测后的分析误差协方差矩阵, \mathbf{I} 是单位矩阵, $\mathbf{X}_{t_v}^f$ 是 t_v 时刻的集合预报扰动。根据 \mathbf{S} 中对应验证区的信号协方差矩阵的迹计算适应性观测的信号方差 σ ,

$$\sigma = \text{Tr}[L_v \mathbf{S}(t_{i+M}|H_i)], \quad (3)$$

其中, L_v 为局地化算子, 表示选取分析误差协方差减小量中验证区部分的对应关系。

重复步骤(2)、步骤(3), 得到不同观测方案 H_i 下的信号方差, 进一步构建信号方差分布图, 选取信号方差大值区为适应性观测敏感区, 本文中取敏感区大小等同于验证区大小。

3 数值试验与验证

3.1 基于海洋-声学耦合模式的集合预报

不确定性在海洋、声学之间并不是孤立和静止的, 呈现出相互作用与传递的特点, 海洋-声学耦合模式结合海洋模式与声学模型, 通过模拟海洋运动过程, 给出时变和空变的声场环境参数。

本文中, 首先通过ROMS海洋模式完成预报海区的温度、盐度等环境基础数据的预报, 模式输入与设置如表1、表2所示; 通过威尔逊公式由基础

表1 ROMS海洋模式输入

Table 1 The income of the ROMS

模式输入	数据类型	数据来源
初始场、边界场	温盐场、流场、海面高度场	HYCOM+NCODA
强迫场	海面热通量、海面风场	CFSR
地形资料	海底地形	ETOPO2

表2 ROMS海洋模式参数设置

Table 2 The settings of the ROMS

海区范围	23.5° ~ 41.5°N 117° ~ 133°E
水平空间分辨率	5 km
垂直层数	32
积分步长	120 s
垂向混合方案	KPP
正压流速	Flather
斜压流速、温盐	Radiation+Nudging

数据得到声速场的动态预报;在此基础上读取水声环境数据库中的海底地形、密度、声速、吸收系数等地声参数,结合声速场作为输入传递给波束位移射线简正波(Beam-displacement ray-mode, BDRM)声场计算模型,完成声源深度10 m、接收深度30 m、声源频率100 Hz、传播距离5000 m的相关海区声场计算。以上计算过程均通过高性能计算机并行计算实现,整体数据流程如图2所示。

采用模型预报结果作为初始真值,对海区整体添加扰动以获取30个初始场,在此基础上模拟运转20天得到集合预报。为检验集合预报误差发展情况,计算海区温度和声传播损失的均方根误差分布,模型运转10天后的分布如图3所示。海洋温度误差发展情况较为复杂,黄渤海区域内,初始扰动逐渐消

失;南部沿海地区,黑潮路径和朝鲜海峡附近,初始扰动得到了累积,符合东中国海动力学特征,但在模式开边界区域有一部分并不符合海洋环流特征的误差发展,这主要是模式本身的问题导致。与之相比,声传播损失的误差发展情况更加清晰,主要集中在黑潮流经区域,但在台湾北部地区稍有偏离,在模式开边界区域没有误差累积。

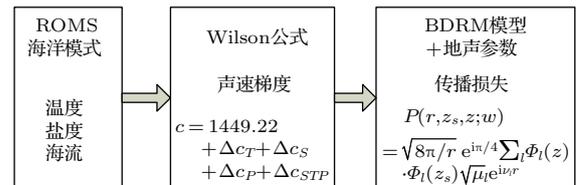


图2 基于海洋-声学耦合模式的数据流程图
Fig. 2 The data processing based on OACM

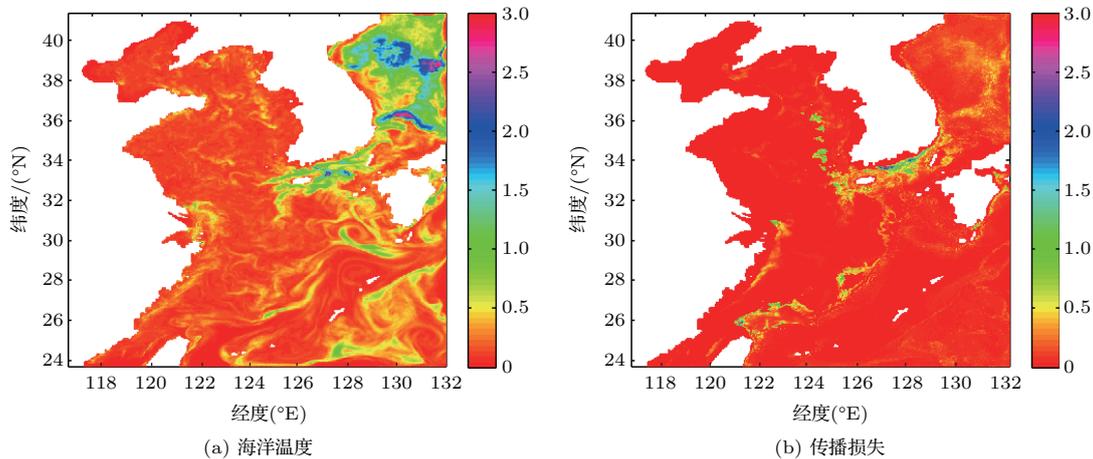


图3 集合预报均方根误差分布图
Fig. 3 The RMSE of ensemble forecast

3.2 敏感区诊断

东中国海宫古海峡北部海域是重要的海峡水道,具有十分重要的战略意义,同时该区域海洋环境复杂多变,众多海洋锋、涡等中尺度现象以及黑潮对该区域均有较大影响。以该区域为验证区,验证区海域范围为 $27.0^{\circ}\text{N}\sim 29.0^{\circ}\text{N}$ 、 $125^{\circ}\text{E}\sim 127^{\circ}\text{E}$,以预报第15天0时刻作为验证时刻,对敏感区分布进行仿真计算。分别计算在观测时间与验证时间间隔不同的条件下,海洋温度与声传播损失的敏感区分布,结果如图4、图5所示。

不难看出,随着时间间隔的增加,两种敏感区均向西南方向移动,即向验证区的黑潮上游区域移动,这与数值预报及动力学传播理论相符。两种敏感区的分布存在一定的重合,本文仿真中,重合百分比分别为70.2%、68.7%、65.6%、62.9%,也就是说,

对重合区域内实施适应性观测可同时提升海洋环境与声场环境的预报质量,但重合百分比随着时间间隔增加而逐渐减小,也体现出海洋-声学耦合模式下二者作用机理及发展模式的不同,该结论将在下文的验证试验中被进一步证实。从两种敏感区分布随时间的变化情况比较来看,海温敏感区的平移特征更为明显,这是由于造成海洋温度,尤其是表层温度的不确定性的主要原因是洋流,而声学敏感区始终在验证区东部边界区域有所分布,说明声场的部分影响因素并不随洋流运动,初步推断验证区东部区域为大陆架边缘地带,海底地形复杂、底质情况多变,海洋信道可能对某些初始的微小扰动更加敏感,使得较小的初始误差在该区域获得较快的发展,因此在该区域添加适应性观测能够更好地提升声场预报效果。

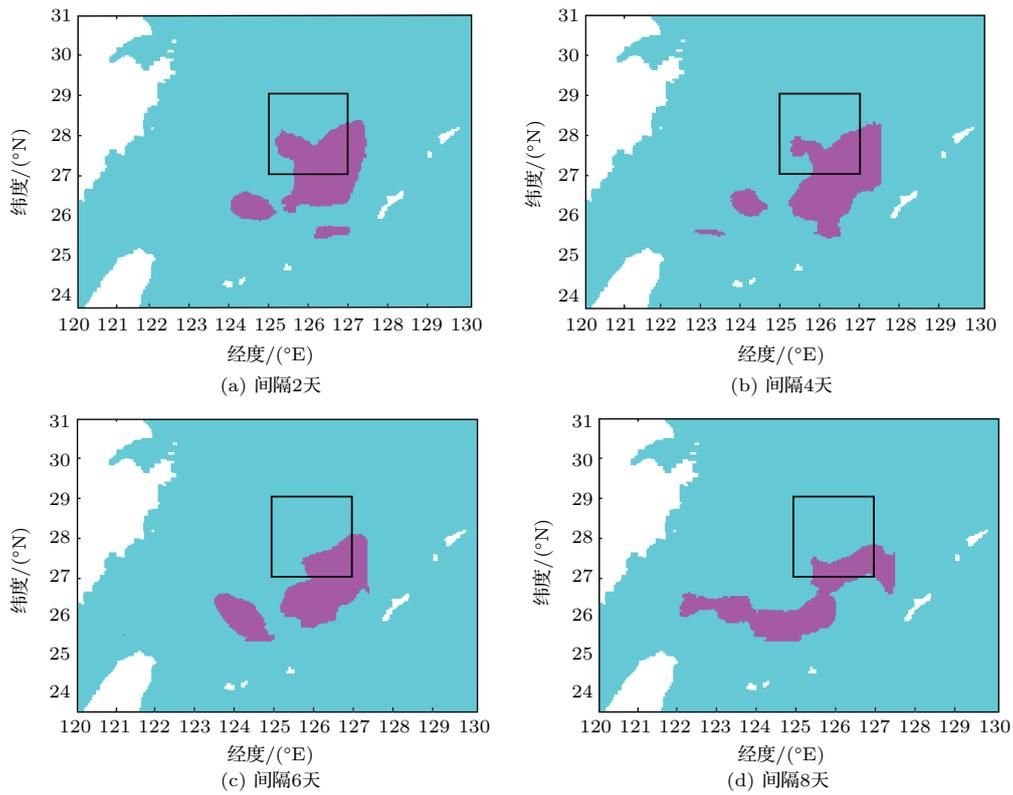


图4 海洋温度敏感区仿真结果

Fig. 4 The simulation results of ocean temperature sensitive area

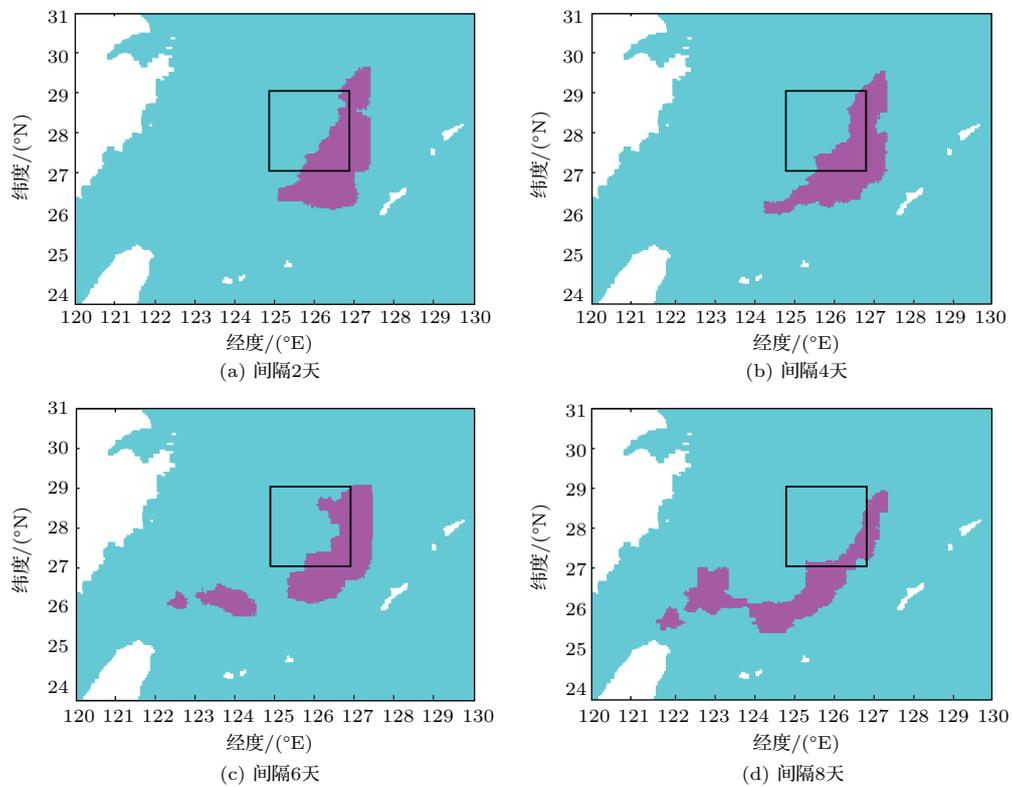


图5 声学敏感区仿真结果

Fig. 5 The simulation results of acoustic TL sensitive area

3.3 OSSE验证

目前用于评价目标观测方法效果的方法主要有两种:OSSE和外场试验。虽然适应性观测在大气领域已进行了大量的外场试验,但由于成本高、技术实现困难等原因,海洋领域的外场试验目前尚属于探索阶段。本文采用OSSE方法验证基于ETKF方法诊断所得敏感区的有效性:在集合预报中选取两组数据分别作为真实预报和控制预报,在观测时刻由真实预报产生模拟的观测数据,将观测数据同化到控制预报中从而得到新的初始场,再通过模式获取适应性观测后的预报结果。在验证时刻,比较控制预报和适应性观测预报两者在验证区内预报数据与真实预报的误差大小,从而评价适应性观测方法的效果,图6为流程示意图。

由图7、图8可得,在加入适应性观测前,观测预报与控制预报完全一致,加入适应性观测后验证区

数值预报与真实预报的均方根误差减小,即预报质量提升。黑框表示验证时刻的预报质量提升,该时刻预报的改善幅度是评价适应性观测有效性的核心指标。另外还可以看出,海温的均方根误差在培养过程中逐渐增加,经过10天后逐渐达到饱和,而声传播损失的均方根误差并不稳定,且在整个模式运转过程中也并不稳定。

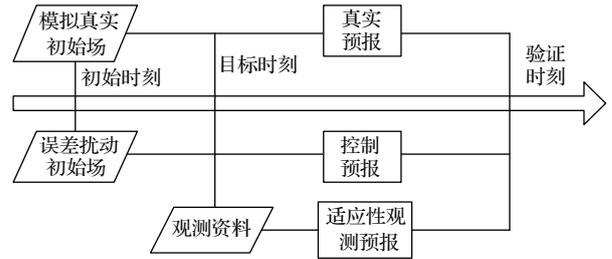


图6 OSSE流程图

Fig. 6 The processing of OSSE

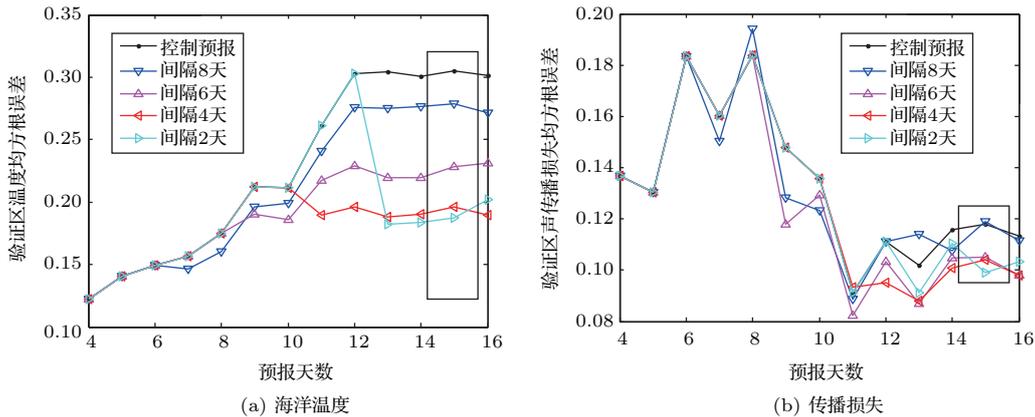


图7 对海温敏感区添加适应性观测后验证区的预报质量

Fig. 7 The forecast quality of target area after adaptive observation on ocean temperature sensitive area

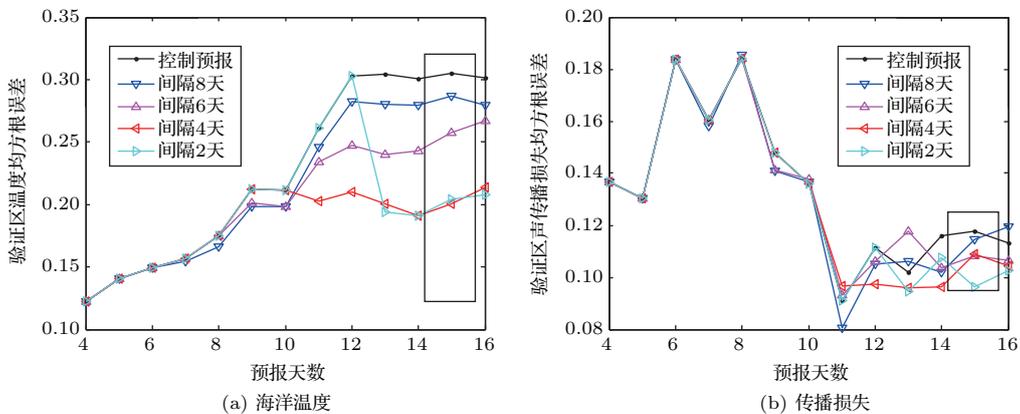


图8 对声学敏感区添加适应性观测后验证区的预报质量

Fig. 8 The forecast quality of target area after adaptive observation on acoustic sensitive area

表3、表4展示了对不同类型敏感区添加适应性观测对海洋环境和声场预报质量的影响,表内括号外的百分比数据为适应性观测后海洋温度与真实预报的均方根误差相比于控制预报的误差减小百分比,即海温预报质量提升效果,括号内的百分比

数据为声场预报的相应百分比。表中空白处是由于在对应时间点适应性观测尚未添加,故对预报质量无提升。可以看出在本文仿真中,适应性观测后预报质量改善效果逐步提升,一段时间后达到最高,随后改善幅度有一定程度的回落。

表3 对海温敏感区添加适应性观测对预报质量的影响

Table 3 The influence of adaptive observation on ocean temperature sensitive area

预报天数观测时间	第7天	第9天	第11天	第13天	第15天
第7天(间隔8天)	6%(6%)	8%(13%)	8%(3%)	10%(-9%)	9%(-1%)
第9天(间隔6天)		10%(20%)	17%(10%)	28%(15%)	25%(11%)
第11天(间隔4天)			27%(2%)	40%(13%)	36%(12%)
第13天(间隔2天)				40%(10%)	38%(16%)

表4 对声传播损失敏感区添加适应性观测对预报质量的影响

Table 4 The influence of adaptive observation on acoustic TL sensitive area

预报天数观测时间	第7天	第9天	第11天	第13天	第15天
第7天(间隔8天)	1%(1%)	7%(5%)	6%(12%)	8%(-4%)	7%(3%)
第9天(间隔6天)		5%(5%)	10%(-2%)	21%(-15%)	16%(8%)
第11天(间隔4天)			22%(-5%)	34%(9%)	34%(7%)
第13天(间隔2天)				36%(7%)	33%(18%)

通过对比验证结果可得:大多数情况下,对两种类型的敏感区进行适应性观测均能够提升验证区的海洋环境和声场预报质量,在验证时刻对海洋温度预报提升质量最高可达38%,对声场预报最高可达18%。预报质量提升效果随着观测时间与验证时间的间隔增加而减弱,海温从38%到9%,声场从18%到3%,提升效果下降幅度明显。对海温敏感区添加观测对海温预报的提升效果强于对声场敏感区添加观测,如在第11天(间隔4天)在海温敏感区添加观测对第15天(验证时刻)海温预报质量提升36%,而在同一天对声场敏感区添加观测则海温预报质量提高34%;与之类似,对声场敏感区添加观测对声场预报的提升效果强于对海温敏感区添加观测,如在第13天(间隔2天)在声场敏感区添加观测对验证时刻声场预报质量提升18%,强于在海温敏感区添加观测对声场提升16%,因此,适应性观测对相对应的预报质量提升效果强于在其他类型敏感

区进行观测。适应性观测并不能确保始终提升声场预报质量,在验证时刻之前,声场环境预报有一定的震荡;本文验证试验中还出现了降低预报质量的个例,即时间间隔8天条件下,对海温敏感区添加适应性观测使得对验证区声场预报在验证时刻降低了1%。因此,声学模型的作用对于预报误差的影响还有待进一步深入研究。

4 结论

本文结合ETKF敏感区诊断方法与OACM模式,将适应性观测应用于海洋与水声环境预报,基于ROMS海洋模式数据构建海洋环境与声传播损失的集合预报,以东中国海宫古海峡北部海域为验证区进行敏感区诊断仿真计算,分析不同条件下海洋环境敏感区与声学敏感区的仿真结果,结合观测模拟系统试验验证在敏感区实施适应性观测对提高预报质量的有效性,可以得到以下初步结论:

(1) 随着观测时间与验证时间间隔的增加,两种敏感区均向验证区上游方向移动,两种敏感区分布位置存在一定的重合现象,重合比例随着时间间隔增加而逐渐减小;

(2) 海温敏感区的平移特征更为明显,而声学敏感区分布更加分散,有部分敏感区始终处于验证区内;

(3) 大多数情况下,对两种类型的敏感区进行适应性观测均能够提升验证区的海洋环境和声场预报质量,预报质量提升效果随着观测时间与验证时间的间隔增加而减弱;

(4) 适应性观测对相对应的预报质量提升效果强于在其他类型敏感区进行观测;

(5) 存在个别适应性观测并不能提高预报质量的情况。

致谢 感谢南京信息工程大学的马旭林教授对本研究的指导。

参 考 文 献

- [1] Snyder C. Summary of a workshop on adaptive observation and FASTEX[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77: 953-961.
- [2] Rabier F, Klinker E, Coutier P, et al. Sensitivity of forecast errors to initial conditions[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1996, 122(529): 121-150.
- [3] Pu Z X, Kalnay E, Sela J, et al. Sensitivity of forecast errors to initial conditions with a quasi-inverse linear method[J]. *Monthly Weather Review*, 1997, 125(125): 2479-2503.
- [4] Bergot T, Hello G, Joly A, et al. Adaptive observations: a feasibility study[J]. *Monthly Weather Review*, 1999, 127(5): 743-765.
- [5] 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 Science*, 2013, 43(11): 1717-1725.
- [6] 马旭林, 于月明, 陈德辉. 适应性观测研究现状和展望 [J]. *气象学报*, 2015, 73(2): 221-235.
Ma Xulin, Yu Yueing, Chen Dehui. The present situation and prospects of the adaptive observation[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2015, 73(2): 221-235.
- [7] Curtin T B, Belcher E O. Innovation in oceanographic instrumentation[J]. *Oceanography*, 2008, 21(3): 44-53.
- [8] Alvarez A, Caffaz A, Caiti A, et al. Fòlaga: a low-cost autonomous underwater vehicle combining glider and AUV capabilities[J]. *Ocean Engineering*, 2009, 36(1): 24-38.
- [9] 刘璐, 兰世泉, 肖灵, 等. 基于水下滑翔机的海洋环境噪声测量系统 [J]. *应用声学*, 2017, 36(4): 370-376.
Liu Lu, Lan Shiquan, Xiao Ling, et al. Measurement system of ambient sea noise based on the underwater glider[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2017, 36(4): 370-376.
- [10] Palmer T N, Gelaro R, Barkmeijer J, et al. Singular vectors, metrics, and adaptive observation[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1998, 55(4): 633-653.
- [11] Buizza R, Montani A. Targeting observation using singular vectors[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1999, 56(17): 2965-2985.
- [12] Majumdar S J, Bishop C H, Buizza R, et al. A comparison of ensemble transform Kalman filter targeting guidance with ECMWF and NRL total-energy singular vector guidance[J]. *Quarterly Journal of the royal meteorological Society*, 2002, 128(585): 2527-2372.
- [13] Toth Z, Kalnay E. Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1993, 74(12): 2317-2330.
- [14] Toth Z, Kalnay E. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method[J]. *Monthly Weather Review*, 1997, 125(12): 3297-3319.
- [15] 于永锋, 张立凤. 基于增长模繁殖法的集合预报初始扰动饱和和分析 [J]. *大气科学*, 2005, 29(6): 955-964.
Yu Yongfeng, Zhang Lifeng. A study of initial perturbation saturation in ensemble prediction based on the "Breeding of Growing Modes" method[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2005, 29(6): 955-964.
- [16] 关吉平, 张立凤. 增长模繁殖法在华南暴雨中期集合预报中的应用 [J]. *热带气象学报*, 2009, 25(2): 246-250.
Guan Jiping, Zhang Lifeng. Ensemble forecasting experiments based on the BGM method[J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2009, 25(2): 246-250.
- [17] 高峰, 闵锦忠, 孔凡轴. 基于增长模繁殖法的风暴尺度集合预报试验 [J]. *高原气象*, 2010, 29(2): 429-436.
Gao Feng, Min Jinzhong, Kong Fanzhou. Experiment of the storm-scale ensemble forecast based on breeding of growing mode[J]. *Plateau Meteorology*, 2010, 29(2): 429-436.
- [18] Mu M, Duan W S, Wang B. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications[J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2003, 10(6): 493-501.
- [19] 穆穆, 王洪利, 周非凡. 条件非线性最优扰动方法在适应性观测研究中的初步应用 [J]. *大气科学*, 2007, 31(6): 1102-1112.
Mu Mu, Wang Hongli, Zhou Feifan. A preliminary application of conditional nonlinear optimal perturbation to adaptive observation[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, 31(6): 1102-1112.
- [20] 穆穆, 王强, 段晚锁, 等. 条件非线性最优扰动法在大气与海洋目标观测研究中的应用 [J]. *气象学报*, 2014, 72(5): 1001-1011.
Mu Mu, Wang Qiang, Duan Wansuo, et al. Application of conditional nonlinear optimal perturbation to targeted observation studies of the atmosphere and ocean[J]. *Acta*

- Meteorologica Sinica, 2014, 72(5): 1001–1011.
- [21] Mu M, Dijkstra H A. The sensitivity and stability of the ocean's thermohaline circulation of finite amplitude perturbation[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2004, 34(10): 2305–2315.
- [22] Mu M, Zhou F F, Wang H L. A method for identifying the sensitive areas in targeted observation for tropical cyclone prediction: conditional nonlinear optimal perturbation[J]. *Monthly Weather Review*, 2009, 137(5): 1623–1639.
- [23] 谭晓伟, 王斌, 王栋梁. 基于条件非线性最优扰动的目标观测中瞄准区不同引导性变量的影响试验研究[J]. *气象学报*, 2011, 69(3): 400–411.
- Tan Xiaowei, Wang Bin, Wang Dongliang. Experimental studies of the impacts of the different guidances of targeting areas on the targeting observations based on the CNOP method[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2011, 69(3): 400–411.
- [24] 周非凡, 张贺. 基于CNOP方法的台风目标观测中三种敏感区确定方案的比较研究[J]. *大气科学*, 2014, 38(2): 261–272.
- Zhou Feifan, Zhang He. Study of the schemes based on CNOP method to identify sensitive areas for typhoon targeted observations[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 38(2): 261–272.
- [25] Bishop C H, Toth Z. Ensemble transformation and adaptive observations[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1999, 56(11): 1748–1765.
- [26] 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.
- [27] Majumdar S J, Bishop C H, Etherton B J, et al. Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part II: Field program implementation[J]. *Monthly Weather Review*, 2002, 130(5): 1356–1369.
- [28] Szunyogh I, Toth Z, Zimin I, et al. Propagation of the effect of targeted observation: the 2000 winter storm reconnaissance program[J]. *Monthly Weather Review*, 2002, 130(130): 1144–1165.
- [29] Szunyogh I, Toth Z, Morse R E, et al. The effect of targeted dropsonde observation during the 1999 Winter Storm Reconnaissance Program[J]. *Monthly Weather Review*, 2000, 128(10): 3520–3537.
- [30] 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.
- [31] 马旭林, 薛纪善, 陆维松. GRAPES全球集合预报的集合卡尔曼变换初始扰动方案初步研究[J]. *气象学报*, 2008, 66(4): 526–536.
- Ma Xulin, Xue Jishan, Lu Weisong. Preliminary study on ensemble transform Kalman filter based on initial perturbation scheme in GRAPES global ensemble prediction[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, 66(4): 526–536.
- [32] 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. Optimization and influence experiment to identify sensitive areas for target observation on ETKF method [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2014, 37(6): 749–757.
- [33] 张宇, 陈德辉, 薛纪善, 等. 湿度因子对适应性观测敏感区估算的影响研究[J]. *气象学报*, 2012, 70(1): 91–100.
- Zhang Yu, Chen Dehui, Xue Jishan, et al. Study of the influence of the humidity factor on estimation in the adaptive observation sensitive region[J]. *Acta Meteor Sinica*, 2012, 70(1): 91–100.
- [34] 笪良龙, 过武宏, 赵建昕, 等. 海洋-声学耦合模式捕捉水声环境不确定性[J]. *声学学报*, 2015, 40(3): 477–486.
- Da Lianglong, Guo Wuhong, Zhao Jianxin, et al. Capture uncertainty of underwater environment by ocean-acoustic coupled model[J]. *Acta Acustica*, 2015, 40(3): 477–486.
- [35] 过武宏, 笪良龙, 赵建昕. 动态水声环境不确定性的估计与分析[J]. *应用声学*, 2013, 32(6): 464–472.
- Guo Wuhong, Da Lianglong, Zhao Jianxin. Uncertainty estimation and analysis for dynamic underwater acoustic environment[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2013, 32(6): 464–472.