

静态集合样本的构造及其在全球 海浪滤波同化中的应用*

孙 盟^{1,2} 尹训强^{1,2} 杨永增^{1,2}

(1. 国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266061; 2. 海洋环境科学与数值模拟国家海洋局重点实验室 青岛 266061)

提要 本文提出一种最佳静态集合样本的构造方法,利用不同时段内海浪有效波高的模拟偏差构造静态集合样本,并将其与由模拟结果和观测资料统计的模式误差进行概率密度分布及时空相关性分析,结果表明 24h 间隔有效波高偏差与后者的相关性最好,称为最佳静态集合样本,可用于近似背景误差。将所构造的静态集合样本应用于滤波同化调整过程,采用 MASNUM 海浪模式,利用 Jason-1 卫星高度计数据,对 2008 年全球海域开展海浪同化实验,实验结果表明,基于最佳静态集合样本的海浪同化调整,可以有效地改善海浪模式的模拟效果。

关键词 静态集合样本;背景误差;海浪同化

中图分类号 P731 **doi:** 10.11693/hyhz20131000149

随着卫星遥感技术的发展,海洋观测数据日益丰富,极大地促进了海洋资料同化的研究。海浪资料同化以海浪自身演变规律(动力学方程或模式)作为约束,利用包含观测误差(噪声)的空间分布不均匀的实测资料给出海浪状态的最优估计。海浪资料同化能够提高海浪的模拟和预报水平,影响海浪资料同化效果的一个重要因素是背景误差协方差的准确性。在海浪滤波同化中,模式的背景误差通常由集合模式的积分得到。然而,随着集合样本数的增加,集合模式的计算量成倍增长,限制了海浪滤波同化在业务化海洋预报中的应用。

背景误差是模式背景值与“真值”之间的偏差。但“真值”是未知的,因此必须寻求其他方法来近似表示或者计算背景误差。在气象学和海洋学中,已有许多方法用来估计背景误差的相关性。Hollingsworth 等(1986)提出观测法,该方法统计(从长期的、密集的、均匀的观测网获取的)观测数据和背景数据的总偏差,并假设观测误差空间不相关,进而由总偏差分解计

算得到背景误差和观测误差。观测法的优点是能够直接计算背景误差,确定背景误差的空间结构,但具有合理时空采样特征的长期观测网格的缺乏使观测法很难被应用于海洋学或气象学领域。Parrish 等(1992)提出 NMC 方法,即以同一时刻不同预报时效的预报值之差作为背景误差。NMC 方法需要积累足够多的样本,统计出背景误差协方差。该方法可以很好地保持模式的动力约束和平衡关系,不受观测资料分布密度的限制,在业务化预报中容易实现。集合预报方法(Evensen, 1994),即在一定误差范围内通过随机扰动一组初值而得到一组预报值,利用这些预报值构成的资料序列统计出预报误差协方差。其优点是不受观测限制,但计算量较大,受集合样本数限制。

以上是研究背景误差相关性的主要方法,对背景误差协方差矩阵的研究还可以转化为背景误差相关函数的研究。Lionello 等(1992)提出了海浪背景误差相关函数的各向同性表示形式,较早开展了卫星高度计有效波高资料的最优插值同化研究。Masten-

*国家重点基础研究发展计划(973 项目), 2010CB950404 号; 国家高技术研究发展计划(863 项目), 2013AA09A506 号; 海洋可再生能源专项资金项目, GHME2011ZC07 号; 国家自然科学基金, 41106032 号; 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金, GY02-2012G24 号。孙盟, 硕士研究生, Email: sunm-ocean@163.com

通讯作者: 杨永增, 研究员, Email: yangyz@fio.org.cn

收稿日期: 2013-10-16, 收修改稿日期: 2013-12-12

broek等(1994), Breivi等(1994), Young等(1996), Bender等(1996), Greenslade(2001)等提出了诸多相关函数的改进形式, 对卫星遥感有效波高资料进行了同化试验, 并应用于数值预报。Hasselmann等(1997), Voorrips等(1997), Dunlap等(1998), Breivik等(1998)等建立了谱空间上的相关函数形式, 对卫星SAR海浪谱反演资料进行了最优插值同化试验研究, 较好地改善了模拟效果。国内张志旭等(2003), 郭衍游等(2006), 齐鹏等(2013), 任启峰等(2010)基于各向同性相关函数对卫星高度计及SAR资料开展了海浪的最优插值同化研究。Greenslade等(2004)对文献中出现的各种背景误差相关函数进行了总结, 这些背景误差相关函数通常取为各向同性和均质性的指数衰减或自回归函数形式; 然而, 背景误差实际可能是各向异性的, Greenslade等(2005a, b)给出了椭圆形状的各向异性背景误差相关函数。任启峰(2010)将间隔 24h 的有效波高预报之差作为有效波高背景误差的近似, 进而得到有效波高的误差协方差矩阵, 并提出了两类椭圆形状各向异性的背景误差相关函数以改进海浪资料同化的最优插值同化。但文中并未分析利用 24h 有效波高预报之差作为有效波高背景误差近似的合理性, 对该构造方法的可行性也没有给出明确的验证。另外, 无论圆形还是椭圆形近似方法, 都是一种较为理想的近似, 实际上背景误差相关结构要更加复杂, 统计方法较近似方法更能准确地描述背景误差协方差矩阵的结构, 进而影响同化的整体效果。

综上所述, 现有的背景误差协方差矩阵的构造方法存在各自的优缺点, 需要寻求一种更为合理的做法, 将模式误差的主要分量的统计特征用于数据同化, 改进同化的效果。大洋区域海浪模式中的扰动(或误差)通常会在一段时间内成长, 而增长到最大之后便开始逐渐衰减(杨永增, 2000, 2001); 处在增长过程中的这些扰动对预报结果具有重要的影响。为了获取模式误差主要部分, 我们借鉴了繁殖向量法集合预报(Toth *et al*, 1993, 1996, 1997)中的一些观点。繁殖向量法通过对模式扰动量的不断标准化调整(re-scale), 使随模式积分逐渐衰减的扰动分量和随模式积分不变的分量从全部模式扰动量中消除, 最终获得随模式积分增长最快的扰动分量。增长最快的扰动分量称为繁殖向量, 相应的调整过程称为繁殖循环。借鉴繁殖向量法集合预报中对模式误差分类处理的概念, 本文采用不同时间间隔的海浪模式预报偏

差构造了模式背景误差的集合, 使其代表海浪模式中处于增长过程的扰动分量, 以改善数据同化的效果。

1 静态集合样本的构造及检验

1.1 背景误差的构造

背景误差是背景场与未知“真值”的偏差, 也是影响同化效果的主要因素, 因此如何构造误差序列来近似背景误差显得尤为重要。利用模拟与观测的差异作为模式误差(背景误差), 理论上是比较理想的, 但长期的、均匀的、密集的、连续的观测资料难以获取, 为构造模式误差带来了困难。本文拟借鉴繁殖向量法集合预报中的观点, 并结合 NMC 方法, 构造一组合理的海浪模式背景误差的集合用于海浪观测资料的同化实验中, 提高资料同化的效果。

在基于繁殖向量法的集合预报研究中, 数值模式的误差被分为了三种分量: 增长分量、恒定分量和衰减分量。其中, 增长分量将随着模式的积分不断成长, 恒定分量不随模式的积分改变, 衰减分量则随着模式的积分不断减小。类似 NMC 方法, 若采用固定时间间隔的模拟结果的差异代替模式的背景误差, 这个差异将包含误差分量的增长分量和衰减分量, 以及间隔后的模式变量的演变差异。如上所述, 误差的增长分量在增长过程中不同时间的差异为后面时刻的误差的一个主要部分。类似地, 衰减分量作为一个小量, 其不同时间上的差异可视为前一时刻的一部分误差。本研究将这两类误差分量在固定时间间隔的误差的总和作为后一时刻的背景误差。当误差以增长分量为主时, 所构造的误差将与实际误差较为接近。当误差以衰减分量为主时, 所构造的误差将与实际误差相反。

接下来我们讨论模式变量本身在这个固定时间间隔上的变化。假定某时段内的模式变量是随时间线性变化的一种简单变量, 模式控制方程可简单记为

$$\frac{\partial x}{\partial t} = a。$$

若模式误差相对模式变量是个小量, 且在某个范围内变化, 则变量在某固定间隔的差异将接近一个常数, 因误差的存在导致这个差异随时间不断变化。沿时间轴进行采样, 当样本数目足够时, 这个差异的均值将与该变量本身在固定时间间隔内的改变量接近。对于真实的海浪模式, 模式变量随时间的变化较为复杂, 但在有限较短时段内, 这一变化可近似

为线性。鉴于此, 可对模式变量在固定时间间隔差异的频繁采样的均值作为变量本身在这个时间间隔上的变化。从构造的差异中将变量本身的变化减掉, 用于构造背景误差的静态集合样本。

首先, 基于 MASNUM 海浪模式在 2006—2007 年的模拟结果, 根据不同的时间间隔, 构造六组静态集合样本。为了验证静态集合样本作为背景误差的可行性, 利用同一时段内的海浪模拟结果与有效波高多颗卫星融合观测资料的偏差, 统计计算模式误差, 六组静态集合样本与模式误差的综合对比分析将在 1.2 节给出。

本文采用基于球坐标系下的第三代海浪模式 MASNUM (Marine Science and Numerical Modeling) (Yuan *et al.*, 1991; Yuan *et al.*, 1992; Yang *et al.*, 2005) 的模拟结果构造静态集合样本。该模式应用了基于统计波理论发展的海浪破碎耗散源函数 (Yuan *et al.*, 1986), 并采用复杂特征线嵌入计算格式。波数谱被离散成 24 个方向和 25 个波数, 对应频率范围是 0.042—0.413 Hz。该模式计算覆盖区域为: 79°S—65.5°N; 0°E—360°E, 水平分辨率为 0.5°×0.5°, 时间步长为 10 min, 模式输出为 1 h 一次。模式驱动风场数据采用 Quikscat 融合风场, 由 Quikscat 卫星散射计观测数据融合 NCEP 分析数据得出。该融合风场提供距海面 10 m 高处经向和纬向风速分量, 时间间隔为 6 h, 空间分辨率为 0.5°×0.5°, 覆盖范围为 88°S—88°N; 0°E—360°E。

海浪有效波高多颗卫星融合高度计数据由 AVISO (Archivage, validation et interpretation des donnees des satellite oceanographiques) 网站提供, 用于海洋大气方面的相关研究。该观测资料为分辨率 1°×1° 的格点数据, 可覆盖全球海域 (0°E—360°E, 90°S—89°N), 产品输出频率为 1 天。

本文将某时刻的模拟结果与观测数据的差异作为此时的误差, 对 2006—2007 年的模拟与观测数据进行逐日统计, 得到模式误差。由于观测数据为逐日的融合数据, 模式结果也做了相应的日平均处理。此外, 观测数据与本文模式的网格分辨率不同, 分别为 1°×1° 和 0.5°×0.5°, 海浪模式的分辨率明显高于融合数据的分辨率。为了便于比较, 本文在获取模式误差和构造静态集合样本时均采用了水平空间上的双线性插值。对应观测数据的分布时段, 分别准备了模式误差和静态集合样本。其中静态集合样本为间隔 N 小时的模拟结果之间的差异, N 的取值分别为 6、12、

24、36、48 和 72。但用于数据同化的静态样本没有空间插值, 其时间间隔 N 为下述分析所得到的最佳时间间隔。

1.2 构造误差性质检验

将六组静态集合样本分别与模式误差进行对比和概率密度分布分析, 确定 N 的最佳取值, 并综合分析最佳静态集合样本与模式误差的时空相关性, 以验证最佳静态集合样本作为背景误差的可行性。

(1) 整体检验

利用全球及不同断面 (45°S, 30°N, 60°E, 180°E, 30°W) 的六组静态集合样本与模式误差, 在以静态集合样本和模式误差为横纵轴的坐标系内, 统计每个 0.04 m×0.04 m 网格内散点的个数, 将散点个数取以 10 为底的对数, 统计结果如图 1 所示。从散点分布特征来看, 随着时间间隔不断增大, 散点呈现逐渐发散的趋势, 而散点相对于对角虚线的集中程度, 则为顺次接近又依次偏离。各列的分布变化趋势类似, 但 24 h 间隔静态集合样本与模式误差的散点分布与对角线最为接近。整体检验结果表明, 24 h 间隔静态集合样本与模式误差最为相近, 可作为最佳静态集合样本。下面我们通过统计概率分析进行理论上的探讨。

理论上, 静态集合样本与模式误差服从相似的概率密度分布。根据海浪过程的随机性, 一般认为模式误差服从正态分布 (图 2):

$$f(\mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(\delta H - \mu)^2}{2\sigma^2}},$$

其中 δH 表示模拟误差量 (或下面的模拟偏差量), f 表示对应的概率密度, μ, σ^2 分别为均值和方差。利用 2006—2007 年的全球模式误差数据, 可拟合得出 $\mu = \mu_1 = 0, \sigma = \sigma_1 = 0.697$ 。基于海浪统计理论, 一般认为海浪波高服从瑞利分布。因此可认为全球各格点处 N 小时间隔的有效波高模拟偏差应当服从某个相同的概率密度分布。根据中心极限定理, 统计平均下 N 小时间隔的海浪有效波高模拟偏差渐近于正态分布, 即静态集合样本渐近于正态分布。因此静态集合样本与模式误差均近似服从正态分布。由此, 对六组静态集合样本进行正态分布参数估计, 并绘制概率密度函数曲线, 如图 2 所示。

从图中可以看出, 随着时间间隔增大, 静态集合样本概率密度函数曲线逐渐变宽, 即方差逐渐增大。24 h 间隔静态集合样本与模式误差的概率密度函数曲线吻合最好, 即两者的方差最为接近, 因此整体上是

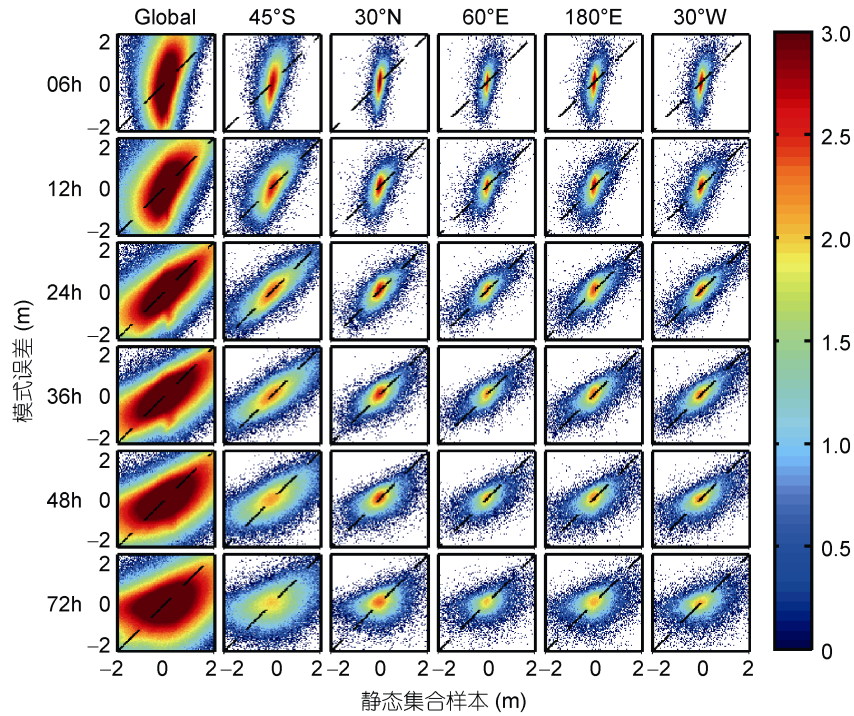


图 1 静态集合样本-模式误差散点图

Fig.1 The scatter diagram of static assemble sample vs model error

色标: 散点个数取以 10 为底的对数

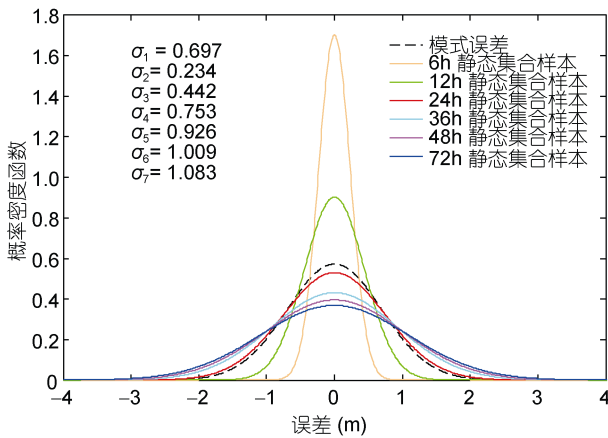


图 2 静态集合样本与模式误差概率密度分布图

Fig.2 The probability density distribution of static assemble sample vs model error

$\sigma_1 - \sigma_7$ 为模式误差与静态集合样本的标准差

最佳的, 24h 间隔静态集合样本用于近似背景误差是可行的。一般情况下, 大洋中的海浪扰动谱在 24h 达到最大值(杨永增, 2000, 2001), 随后逐渐衰减。本文采用 N 小时间隔的模拟偏差来分析模式误差的统计性质, 正是利用了海浪模式中误差的增长时间尺度, 获得海浪模式误差的主要部分。因此, 上述通过数据统计的方式, 得到了类似的时间尺度, 即最佳静态集

合样本的时间间隔为 24h。

(2) 空间相关性

空间相关性分析可分为两部分, 一为分析两组误差在某一时间点的水平空间分布, 可以从分布情况直观地看到两者的相似性; 二为利用上述的两个水平空间的误差数据计算空间相关系数, 则每一个时间点对应一个空间相关系数, 从而可以分析两组误差的整体空间相关性。

分别绘制 2007 年 3 月 1 日的模式误差和最佳静态集合样本的误差水平分布, 如图 3(a), (b)所示。从等值线的分布结构来看, 明显存在若干较为相似的区块, 在模式误差分布出现大值区和小值区的位置处, 最佳静态集合样本亦存在大值和小值, 说明两组误差在 2007 年 3 月 1 日的空间相关性较好。

对每一个时间点, 计算不同区域(全球, 南半球 10°S—60°S, 赤道区域 10°S—10°N, 北半球 10°N—60°N)的最佳静态集合样本和模式误差的空间相关系数, 得到两组误差在不同区域的空间相关系数随时间的变化曲线, 如图 3(c)所示。从图中可以看出, 全球和南半球的空间相关系数介于 0.6—0.8 之间; 北半球的空间相关系数大部分时段在 0.6 以上, 但 6、7 月份相关性下降, 需进一步探讨和研究; 赤道区域的

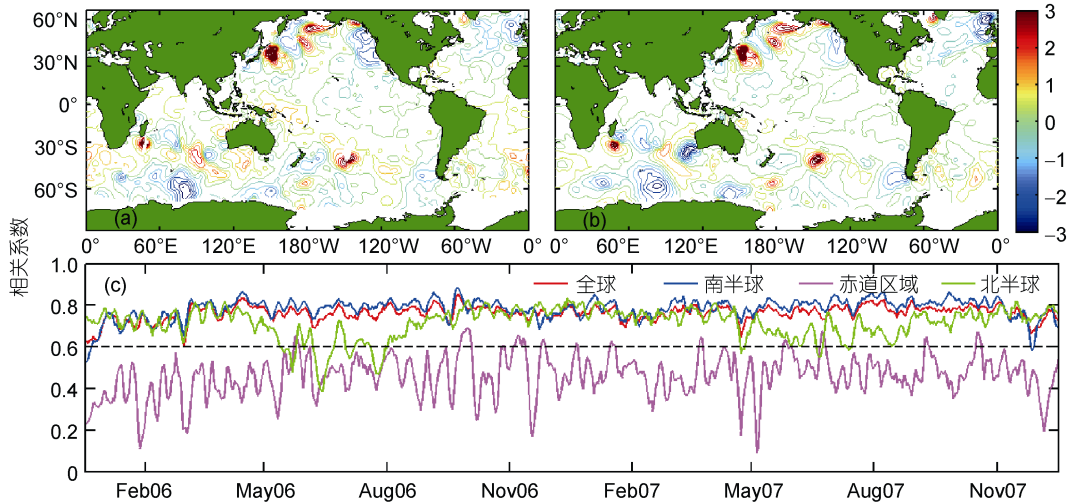


图 3 静态集合样本与模式误差空间相关性

Fig.3 Spatial correlation between static assemble sample and model error

a, b: 2007 年 3 月 1 日模式误差和 24h 间隔静态集合样本的空间分布(单位: m, 等值线间隔: 0.5m); c: 24h 间隔静态集合样本与模式误差在全球、南北半球及赤道区域的空间相关系数随时间的变化

空间相关系数在 0.4 上下大幅振荡。总体来看, 最佳静态集合样本与模式误差的空间相关性较好。

(3) 时间相关性

时间相关性分析可分为两部分, 一为两组误差在某一空间点的误差序列变化曲线, 可以从变化趋势直

观地看到两者的相似性; 二为计算上述的两个误差序列的时间相关系数, 则每一个空间点对应一个时间相关系数, 从而可以分析两组误差的整体时间相关性。

绘制最佳静态集合样本和模式误差在(120°E, 45°S)位置处误差随时间的变化曲线, 如图 4(a)和(b)

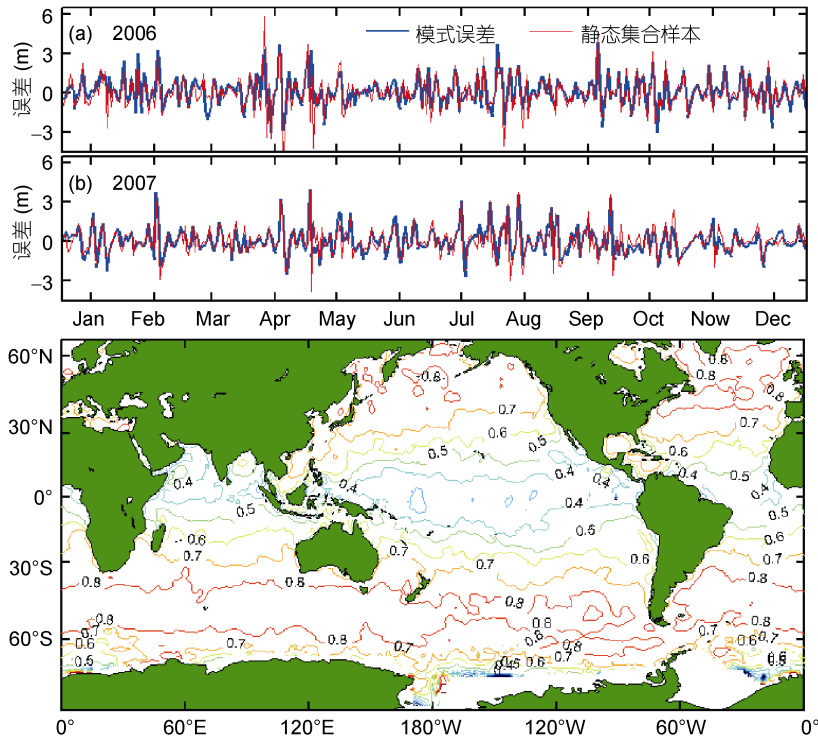


图 4 静态集合样本与模式误差时间相关性

Fig.4 Temporal correlation between static assemble sample and model error

a, b: 2006 年和 2007 年的 24h 间隔静态集合样本与模式误差在(120°E, 45°S)位置处的误差随时间的变化曲线; c: 24h 间隔静态集合样本与模式误差的时间相关系数在空间的分布(等值线间隔: 0.1m)

所示。从图中可以看出, 在模式误差曲线峰值处, 最佳静态集合样本曲线亦存在峰值, 两条误差曲线的变化趋势较为吻合, 说明两组误差在(120°E, 45°S)位置处的时间相关性较好。

对每一个空间格点位置上的两组误差序列计算时间相关系数, 其在空间上的分布如图 4(c)所示。从图中可以看出, 赤道地区相关系数为 0.4—0.5, 中纬度地区为 0.7—0.8, 南北半球西风带区域相关性程度最高。总体来看, 最佳静态集合样本与模式误差的时间相关性较好。

综上所述, 通过 6 组静态集合样本与模式误差在全球和不同断面的对比及概率密度分析, 确定基于 MASNUM 海浪模式构造静态集合样本的最佳时间间隔为 24h。对最佳静态集合样本和模式误差进行时间和空间的相关性分析, 结果证明, 两者相关性较好, 前者可用于近似背景误差, 用于下一步海浪资料同

化实验。

2 静态集合样本在全球海浪滤波同化中的应用

2.1 同化实验设计

基于前文分析得出的最佳时间间隔, 同化实验采用 MASNUM 全球海浪模式模拟的 2008 年 1 月的有效波高构造了模式误差的静态集合样本, 其采样频率为 1h。随着模式不断向前积分, 每 6h 进行一次同化。同化过程中, 首先根据同化前的海浪谱输出该同化时间点的有效波高场, 将静态集合样本叠加到同化前的有效波高场, 得到状态变量集合, 采用两步滤波同化方法(Yin *et al.*, 2012)对状态变量集合进行更新, 得到同化后的有效波高场, 然后对海浪谱进行调整, 最终得到同化后的海浪谱, 至此完成一次同化调整过程, 模式继续向前积分。同化过程流程如图 5 所示。

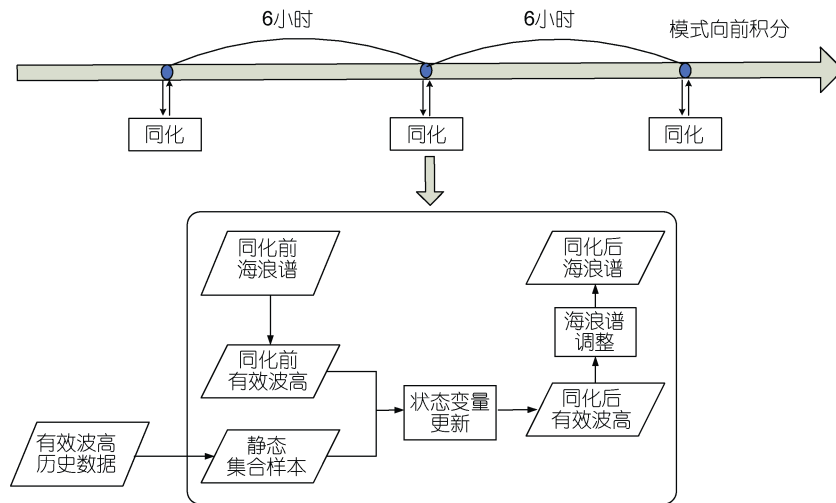


图 5 同化过程流程图

Fig.5 The flow chart of data assimilation

对 2008 年全球海域开展两组海浪数值模拟实验, 分别为未同化的控制实验与基于静态集合的同化实验。数值模拟实验时间均为: 2008 年 1 月 1 日至 2008 年 12 月 31 日。空间同化半径为 4.0°, 加入空间局地化调整, 即距离观测点 4.0°范围内的模式网格点都要根据与观测点的距离权重进行同化更新, 时间同化半径固定为 6h, 即将同化窗口前后 6h 的观测数据加入该次同化过程。同化资料采用 Jason-1 卫星高度计观测数据。

2.2 实验结果分析

实验结果检验采用 Envisat 卫星高度计观测资料, 该数据为沿卫星轨道的散点数据, 即在时间和空间

上的分布是不规则的, 而海浪模式结果为 0.5°×0.5°的网格化数据, 每间隔 1h 输出一次。因此, 进行模拟结果检验前, 利用时空插值, 将网格化模式结果插值到观测点上, 即对有效波高模拟数据进行时相和位相上的匹配处理。

(1) 绝对均差空间分布

绝对均差 $\left(MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| \right)$ 空间分布的统计方法

为, 对水平空间划分 2°×2°的网格, 根据观测点的位置确定每个网格内的观测点个数, 并统计该网格内的模拟与观测的绝对均差, 对每一个网格做上述统计, 得到绝对均差的空间分布。两组数值模拟实验的统计结果如图 6 所示。

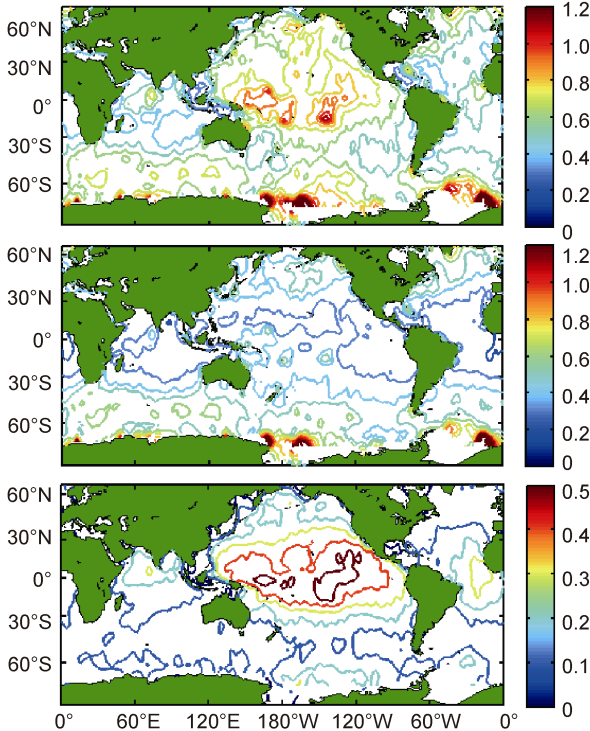


图 6 有效波高绝均差及同化修正量空间分布(单位: m)
 Fig.6 Spatial distribution of SWH mean absolute error and the correction in data assimilation (Unit: m)
 a: 未同化实验, b: 同化实验, c: 同化前后差异(等值线间隔: 0.1m)

图 6(a)为未同化实验的绝均差分布, 从图中可以看出, 大部分网格的绝均差小于 0.8m, 说明 MASN-UM 海浪模式的模拟效果较好。图 6(b)为同化实验的绝均差分布。图 6(a)中的等值线分布较为零散均匀, 而图 6(b)中的等值线分布较为规整成块, 中低纬度地区绝均差较小, 基本位于 0.4m 以下, 高纬度地区的绝均差介于 0.4—0.6m 之间, 说明同化效果显著。将同化前后的绝均差相减, 得到同化后绝均差的减小量在空间的分布, 如图 6(c)所示。中低纬度地区绝均差的减小量在 0.2—0.4m 之间, 高纬度地区均绝均差的减小量在 0.1—0.2m 之间, 说明基于静态集合样本的海浪资料同化有效地提高了数值模拟能力。

(2) 绝均差随时间变化

绝均差随时间变化的统计方法为, 对不同区域(全球, 南半球 10°S—60°S, 赤道区域 10°S—10°N, 北半球 10°N—60°N), 根据观测点的时间逐日统计绝均差, 得到两组模拟实验的绝均差随时间的变化曲线, 如图 7 所示。

从四幅曲线图均可以看出, 同化实验的绝均差曲线位于未同化实验绝均差曲线之下, 说明基于静态集合样本的同化调整有效地减小了模拟误差。对比四幅曲线图可以看出, 未同化实验的绝均差曲线在

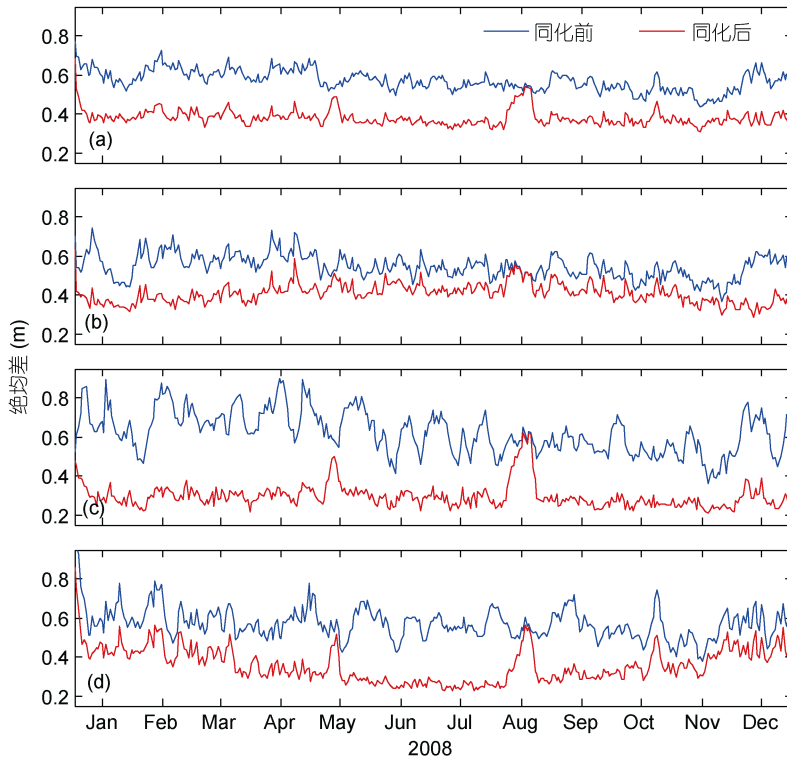


图 7 模拟与观测的绝均差随时间变化曲线(单位: m)
 Fig.7 The curves of mean absolute error between simulated SWH and observed SWH
 a: 全球范围, b: 南半球(10°S—60°S), c: 赤道区域(10°S—10°N), d: 北半球(10°N—60°N)

不同区域的取值均介于 0.4—0.8, 说明 MASNUM 海浪模式的模拟效果较好。5 月和 8 月中旬同化绝均差曲线与未同化绝均差曲线出现交叠, 原因为该时段内的 Jason-1 卫星资料缺失, 未进行同化调整。

(3) 模拟-观测散点比较

在模拟-观测坐标系内, 划分 $0.05\text{m} \times 0.05\text{m}$ 的网

格, 根据每个观测值及其对应模拟值的大小, 统计每个网格内的散点个数, 并取其以 10 为底的对数, 对两组模拟实验在全球及不同断面(45°S , 30°N , 60°E , 180°E , 30°W) $\pm 5.0^\circ$ 的区域, 分别统计 2008 年 1 月和 7 月散点分布情况, 并计算每个散点图的平均绝对误差, 统计结果如图 8 所示。

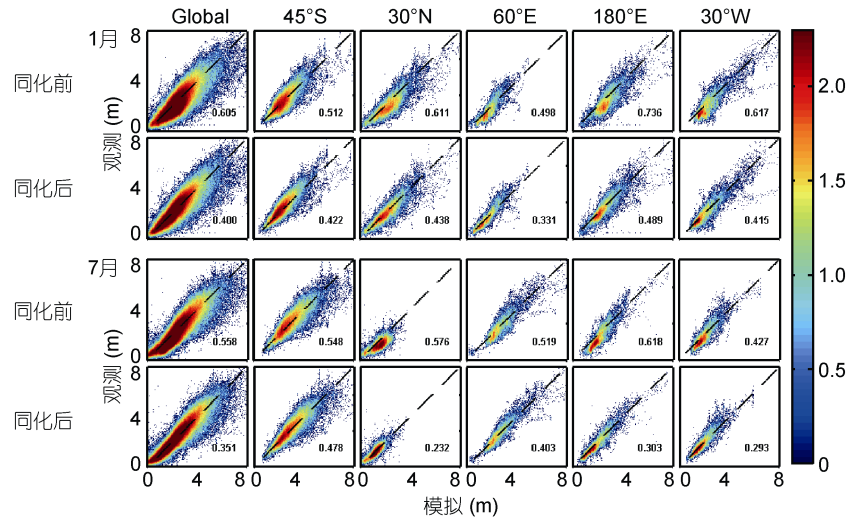


图 8 有效波高模拟-观测散点分布图

Fig.8 The scatter diagram of simulated SWH and observed SWH

右下角数字: 未同化与同化实验在 2008 年 1 月和 7 月的模拟结果与观测在全球范围及不同断面的绝对误差, 色标: 散点个数取以 10 为底的对数

从 1 月份的统计结果来看, 不同统计区域内, 同化实验的绝对误差均小于未同化实验的绝对误差, 说明基于静态集合样本的同化调整有效地减小了模拟与观测之间的差异。从散点的集中程度来看, 散点越集中于对角虚线, 说明模拟与观测越接近。在不同统计区域内, 同化后的散点更集中于对角虚线, 说明基于静态集合样本的海浪资料同化有效地改善了数值模拟的效果。7 月份的统计结果可以得到与上述类似的结论。

上述三种方式的误差统计分析表明基于静态集合样本的滤波同化调整可以有效地提高海浪模式的模拟水平。

3 结论与讨论

背景误差协方差的表达对海浪资料同化工作至关重要。本文借鉴了繁殖向量法集合预报中的观点, 并结合 NMC 方法, 提出了一种最佳静态集合样本的构造方法, 该方法可用于近似背景误差。基于 MASNUM 海浪模式, 利用间隔 N 小时的有效波高的模拟偏差($N=6, 12, 24, 36, 48, 72$)构造静态集合样本, 同时利用模拟结果与卫星高度计融合资料构造模式误

差, 对两者进行统计分析。结果表明, 24h 静态集合样本与模式误差最为接近, 时空相关性较好, 可作为最佳静态集合样本, 用于近似背景误差。基于最佳静态集合样本, 结合两步滤波同化方法, 利用 Jason-1 卫星高度计资料, 针对 2008 年全球海域开展海浪资料同化实验。实验结果表明, 同化后海浪数值模拟的效果得到了有效改善。

海浪资料同化的一个重要应用是为预报系统提供合理的初始场。海洋环境预报业务系统对海洋资料同化的时效性和准确性要求较高。因此, 实际操作中常常采用局地化技术, 用一种距离权重函数进行滤波, 将误差协方差局地化, 同时提高并行算法的效率。本文海浪资料同化实验中, 考虑了空间局地化处理方式, 但实验中所采用的空间局地化参数仅为试验值, 后续将考虑时间局地化处理, 并进一步确定时空局地化的最佳参数取值。

参 考 文 献

任启峰, 张 杰, 尹训强等, 2010. Envisat ASAR 海浪谱资料的最优插值同化试验. 热带海洋学报, 29(5): 17—23

- 任启峰, 2010. 背景误差相关结构的统计分析与 Envisat ASAR 海浪谱资料同化研究. 青岛: 中国科学院海洋研究所博士学位论文, 21—51
- 齐 鹏, 范秀梅, 2013. 高度计波高数据同化对印度洋海域海浪模式预报影响研究. 海洋预报, 30(4): 70—78
- 杨永增, 2000. 海浪初始谱误差演变初步分析. 海洋预报, 17(4): 21—27
- 杨永增, 2001. 海浪谱能量方程稳定性、敏感性分析与海浪变分同化研究. 青岛: 中国科学院海洋研究所博士学位论文, 23—46
- 杨永增, 乔方利, 赵 伟等, 2005. 球坐标系下 MASNUM 海浪数值模式的建立及其应用. 海洋学报, 27(2): 1—7
- 张志旭, 齐义泉, 施 平等, 2003. 最优化插值同化方法在预报南海台风浪中的应用. 热带海洋学报, 22(4): 34—41
- 郭衍游, 侯一筠, 杨永增等, 2006. 利用 WAVEWATCH 建立东中国海区域海浪同化系统. 高技术通讯, 16(10): 1092—1096
- Bender L, Glowacki T, 1996. The assimilation of altimeter data into the Australian wave model. Aust Meteorol Mag, 45(1): 41—48
- Breivik L, Reistad M, 1994. Assimilation of ERS-1 altimeter wave heights in an operational numerical wave model. Weather and Forecasting, 9(3): 440—451
- Breivik L, Reistad M, Schyberg H *et al*, 1998. Assimilation of ERS SAR wave spectra in an operational wave model. Journal of Geophysical Research, 103(C4): 7887—7900
- Dunlap E, Olsen R, Wilson L *et al*, 1998. The effect of assimilating ERS-1 fast delivery wave data into the North Atlantic WAM model. Journal of Geophysical Research, 103(C4): 7901—7915
- Evensen G, 1994. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. Journal of Geophysical Research, 99(C5): 10143—10162
- Greenslade D, 2001. The assimilation of ERS-2 significant wave height data in the Australian region. Journal of Marine Systems, 28(1): 141—160
- Greenslade D, Young I, 2004. Background errors in a global wave model determined from altimeter data. Journal of Geophysical Research, 109(C09007), doi: 10.1029/2004JC002324
- Greenslade D, Young I, 2005a. Forecast divergences of a global wave model. Monthly Weather Review, 133(8): 2148—2162
- Greenslade D, Young I, 2005b. The impact of altimeter sampling patterns on estimates of background errors in a global wave model. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 22(12): 1895—1917
- Hasselmann S, Lionello P, Hasselmann K, 1997. An optimal interpolation scheme for the assimilation of spectral wave data. Journal of Geophysical Research, 102(C7): 15823—15836
- Hollingsworth A, Lönnberg P, 1986. The statistical structure of short-range forecast errors as determined from radiosonde data. Part I: The wind field. Tellus A, 38(2): 111—136
- Lionello P, Günther H, Janssen P, 1992. Assimilation of altimeter data in a global third-generation wave model. Journal of Geophysical Research, 97(C9): 14453—14474
- Mastenbroek C, Makin V K, Voorrips A C *et al*, 1994. Validation of ERS-1 altimeter wave height measurements and assimilation in a North Sea wave model. Global Atmos Ocean Syst, 2: 143—161
- Parrish D, Derber J, 1992. The National Meteorological Center's spectral statistical-interpolation analysis system. Monthly Weather Review, 120(8): 1747—1763
- Toth Z, Kalnay E, 1993. Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations. Bulletin of the American Meteorological Society, 74(12): 2317—2330
- Toth Z, Kalnay E, 1996. Ensemble forecasting at NCEP. Proc Seminar on Predictability, 2: 39—61
- Toth Z, Kalnay E, 1997. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method. Monthly Weather Review, 125(12): 3297—3319
- Voorrips A C, Makin V K, Hasselmann S, 1997. Assimilation of wave spectra from pitch-and-roll buoys in a North Sea wave model. Journal of Geophysical Research, 102(C3): 5829—5849
- Yin X Q, Qiao F L, Yang Y Z *et al*, 2012. Argo data assimilation in ocean general circulation model of Northwest Pacific Ocean. Ocean Dynamics, 62(7): 1059—1071
- Young I, Glowacki T, 1996. Assimilation of altimeter wave height data into a spectral wave model using statistical interpolation. Ocean Engineering, 23(8): 667—689
- Yuan Y L, Hua F, Pan Z D *et al*, 1992. LAGFD-WAM numerical wave model-II. Characteristics inlaid scheme and its application. Acta Oceanologica Sinica, 11(1): 13—23
- Yuan Y L, Pan Z D, Hua F *et al*, 1991. LAGFD-WAM numerical wave model-I. Basic physical model. Acta Oceanologica Sinica, 10(4): 483—488
- Yuan Y L, Tung C C, Huang N E, 1986. Statistical characteristics of breaking waves. In: Phillip O M, Hasselmann K ed. Wave Dynamics and Radio Probing of the Ocean Surface. Berlin: Springer Press, 265—272

CONSTRUCTION AND APPLICATION IN GLOBAL WAVE DATA ASSIMILATION OF STATIC SAMPLE SET

SUN Meng^{1,2}, YIN Xun-Qiang^{1,2}, YANG Yong-Zeng^{1,2}

(1. *First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China;*

2. *Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling of State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*)

Abstract Static assemble sample is defined as the difference between several-hour interval forecasts in this study. Comparison between static assemble sample and the model error indicated that static assemble sample could be regarded as approximation to the background error; and the 24h bias of significant wave height is the optimal for the static assemble sample. Several experiments by employing Jason-1 satellite altimeter data on global wave data assimilation were conducted using a filter method based on the static assemble sample in 2008. The results indicate that the assimilation method based on static assemble sample can improve and enhance the capability of the wave model significantly.

Key words static assemble sample; background error; wave data assimilation