

Envisat ASAR 海浪谱资料的最优插值同化试验*

任启峰^{1,2}, 张杰^{3,4}, 尹训强^{3,4}, 杨永增^{3,4}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 4. 海洋环境科学与数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061)

摘要: 基于第三代海浪数值模式 LAGFD-WAM, 分别利用 4 种不同形式的各向同性背景误差相关函数进行了 Envisat 高级合成孔径雷达(ASAR)海浪谱资料的最优插值同化试验。与 4 个浮标实测数据的比较验证表明, ASAR 海浪谱资料的最优插值能够有效地改进海浪模式有效波高的模拟。4 种不同形式的各向同性背景误差相关函数的同化结果相差不大, 决定同化效果好坏的关键是对相关距离尺度的选取。针对自回归形式的背景误差相关函数的试验结果表明, 相关距离尺度的量级在 400—500km 时同化效果最好, 此时同化后的模式有效波高均方根误差比未同化时相对减小了 26%。

关键词: 海浪谱; 最优插值; 背景误差相关函数; 相关距离尺度

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2010)05-0017-07

Optimal interpolation assimilation experiments based on Envisat ASAR ocean wave spectral data

REN Qi-feng^{1,2}, ZHANG Jie^{3,4}, YIN Xun-qiang^{3,4}, YANG Yong-zeng^{3,4}

(1. Institute of Oceanology, CAS, Qingdao 266071, China; 2. Graduate University of CAS, Beijing 100039, China; 3. First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China; 4. Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling (MASNUM), SOA, Qingdao 266061, China)

Abstract: With the third generation wave model named LAGFD-WAM, optimal interpolation assimilation experiments are performed based on Envisat Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) ocean wave spectral data using four different isotropic background error correlation functions. The experiment results are compared with observation data from four different moored buoys. The results show that the optimal interpolation of ASAR wave spectral data can effectively improve the significant wave height (SWH) simulation of the wave model. The differences of assimilation effects among four experiments with different background error correlation functions are not obvious. The key to assimilation effects lies in the choice of correlation scale length. For the auto-regressive background error correlation function, the experiment results indicate that the assimilation effect is best when the correlation scale length is assumed to be from 400 to 500km, and that the root-mean-square error of model SWH data relatively decreases by 26% compared with that without assimilation.

Key words: ocean wave spectrum; optimal interpolation; background error correlation function; correlation scale length

卫星遥感技术的发展使海洋观测数据日益丰富, 这极大促进了海浪资料的同化研究。同化资料主要包括有效波高同化^[1-6]和海浪波谱同化^[7-10], 同化方法主要分为两大类: 顺序方法^[1-12]和变分方法^[13-17],

而顺序方法又包括最优插值(统计插值)法^[1-5,8-10]、连续订正法^[6-7]和 Kalman 滤波法^[11-12]等。

早期主要是同化卫星高度计波高数据, 两类同化方法都有采用。Lionello 等^[1]使用最优插值方法同

收稿日期: 2010-01-06; 修订日期: 2010-03-23。孙淑杰编辑

基金项目: 海洋公益性行业科研专项(200705027)

作者简介: 任启峰(1980—), 男, 山东省莱芜市人, 在读博士生, 主要从事海浪资料同化研究。E-mail: renqifeng@yeah.net

* Envisat ASAR 海浪谱资料在中欧 Dragon 项目支持下获得, 数据版权属欧空局, 风场数据和浮标数据分别从美国国家大气研究中心(NCAR)网站和美国国家数据浮标中心(NDBC)网站下载, 对他们表示感谢。

化 SEASAT 和 GEOSAT 有效波高数据到 WAM 模式中, 这种方法后来被许多文献所采用^[4,6]。在海浪变分同化技术方面也有很多研究工作, 但只在某些简化情形下得到了成功的应用^[13-14]。国内的海浪资料同化研究也主要是针对高度计波高资料的同化, 主要采用最优插值法^[18-20]。但杨永增等^[21-22]建立并实现了针对海浪模式 LAGFD-WAM 的共轭变分同化, 郭衍游^[23]则开展了基于集合 Kalman 滤波的海浪同化研究。

高度计波高同化只能用总能量信息来研究分析海浪谱, 缺少海浪的方向信息。随着从合成孔径雷达(SAR)图像反演二维海浪谱技术的发展和日益成熟^[24-26], 海浪谱资料的同化研究得以开展^[7-10], 而同化方法主要采用最优插值^[8-10]和连续订正法^[7]。Hasselmann 等^[8]基于波谱分割技术使用最优插值方法将 ERS-1 SAR 图像反演得到的波谱同化到 WAM 模式, 改进了波谱的某些平均波参数。Voorrips 等^[9]使用相似的方法进行了北海区域的 WAM 模式同化, 但同化所用资料是北海的纵横摇浮标观测数据, 结果表明波参数估计的主要改进是在涌浪情形下, 尤其是低频的有效波高。

目前国内开展的海浪资料同化研究工作主要是针对高度计波高资料的同化, 缺少对 SAR 海浪谱资料的同化。本文基于 Envisat 高级合成孔径雷达(ASAR)波模式二级波谱产品提供的海浪谱数据, 结合第三代海浪数值模式 LAGFD-WAM, 以 2008 年 3 月为例, 开展了多种背景误差相关函数下的最优插值试验比较。

1 数据与方法

1.1 数据

Envisat ASAR 的波模式产品能够提供连续的带有方向信息的全球海浪观测。ASAR 海浪谱的波模式主要有 3 种产品^[27]: WVI 一级产品(ASA_WVI_1P)是包含图像交叉谱的单视复图像, WVS 一级产品(ASA_WVS_1P)是图像的交叉谱, WVV 二级产品(ASA_WVV_2P)是海浪谱。本文采用的是 ASAR 的二级海浪谱产品。

ASAR 二级海浪谱产品能够提供对数极坐标系下海浪的波数方向谱 $F(k, \theta)$ 、海面风速和各种有关的波谱产品参数。ASAR 海浪谱 $F(k, \theta)$ 在二维波数方向空间离散化成 24 个波数和 36 个方向(10° 分辨率), 对应的波频率范围大致是 0.0442Hz 到 0.228Hz。从波数方向谱 $F(k, \theta)$ 可以计算得到二维的频率方向谱

$F(f, \theta)$ 、有效波高 h_s 、平均频率 f_m 和平均传播方向 θ_m 等, 计算公式如下:

$$F(f, \theta) = F(k, \theta) k \left(\frac{\partial f}{\partial k} \right)^{-1} \quad (1)$$

$$h_s = 4 \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} \int_0^{2\pi} F(f, \theta) df d\theta} \quad (2)$$

$$f_m = \frac{\int_{f_1}^{f_2} \int_0^{2\pi} F(f, \theta) df d\theta}{\int_{f_1}^{f_2} \int_0^{2\pi} F(f, \theta) f^{-1} df d\theta} \quad (3)$$

$$\theta_m = \tan^{-1} \left(\frac{\int_{f_1}^{f_2} \int_0^{2\pi} F(f, \theta) \sin \theta df d\theta}{\int_{f_1}^{f_2} \int_0^{2\pi} F(f, \theta) \cos \theta df d\theta} \right) \quad (4)$$

其中 f_1 和 f_2 分别是待计算的海浪谱频率范围的下限和上限。

同化 Envisat ASAR 海浪谱数据之前, 需要对其作质量控制, 这里采用置信区间方法进行数据筛选。具体来讲, 只有同时满足如下 3 个阈值范围的海浪谱数据才被用于同化: 风速介于 $3-16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 归一化方差介于 $1-1.6$, 信噪比介于 $3-20$ 。

本文同化试验的时间是 2008 年 3 月, 只有该时间段内的 ASAR 数据被采用。由于 ASAR 传感器的工作模式设置等原因, 整个 2008 年 3 月共有 424 个 ASAR 海浪谱数据被用于同化试验, 这些数据的空间位置分布如图 1 所示。

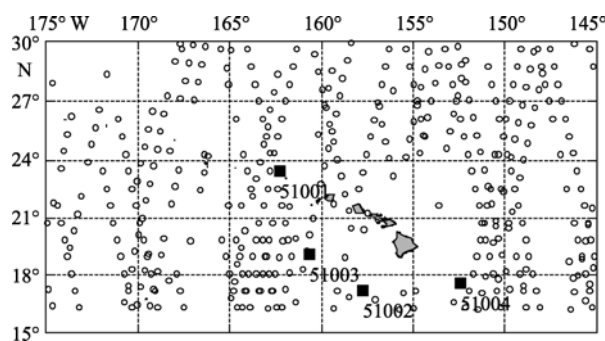


图 1 模式计算区域、ASAR 海浪谱观测(空心圆形)和 4 个验证浮标(实心方形)的位置图

Fig. 1 Model domain and locations of ASAR wave spectral data (hollow circles) and four validation buoys (solid squares)

1.2 最优插值

最优插值方法将模型状态的分析值表示为背景场和观测数据的线性组合:

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^b + \mathbf{K}(\mathbf{y}^o - \mathbf{H}\mathbf{x}^b) \quad (5)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{B}\mathbf{H}^T[\mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1} \quad (6)$$

其中 \mathbf{x}^a 和 \mathbf{x}^b 分别是区域网格点上模型状态的分析值

向量和背景场向量, y^o 是观测值向量, 线性观测算子矩阵 H 将模型状态向量映射到观测点上, K 是权重矩阵, R 和 B 分别是观测误差协方差矩阵和背景误差协方差矩阵。

观测误差协方差矩阵 R 一般取对角形矩阵, 即

$$R_{ij} = \sigma_i^o \sigma_j^o \delta_{ij} \quad (7)$$

其中 σ_i^o 和 σ_j^o 分别是模型网格点 i 和 j 处观测数据的均方根误差; δ_{ij} 是关于 i 和 j 的函数(当 $i=j$ 时取值为 1, 当 $i \neq j$ 时取值为 0)。背景误差协方差矩阵 B 则写成如下形式

$$B_{ij} = \sigma_i^b \sigma_j^b \rho_{ij} \quad (8)$$

其中 σ_i^b 和 σ_j^b 分别是模型网格点 i 和 j 处的背景均方根误差, ρ_{ij} 称为背景误差相关函数。

Greenslade 等^[28]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大多取为指数形式或者自回归形式, 主要有 4 种, 分别标记为如下的(a)^[1-3,8,19-20]、(b)^[5-6]、(c)^[9-10]和(d)^[4]:

$$(a) \quad \rho_{ij} = \exp \left[- \left(\frac{d_{ij}}{L} \right) \right] \quad (9)$$

$$(b) \quad \rho_{ij} = \exp \left[- \frac{1}{2} \left(\frac{d_{ij}}{L} \right)^2 \right] \quad (10)$$

$$(c) \quad \rho_{ij} = \exp \left[- \left(\frac{d_{ij}}{L} \right)^{1.5} \right] \quad (11)$$

$$(d) \quad \rho_{ij} = \left(1 + \frac{d_{ij}}{L} \right) \exp \left[- \left(\frac{d_{ij}}{L} \right) \right] \quad (12)$$

其中 d_{ij} 是模型区域网格点 i 和 j 之间的距离, L 是背景误差的相关距离尺度。相关距离尺度取值不惟一, 它随时间变化不明显, 但随空间变化明显, 高纬地区较小, 低纬地区较大^[28]。Breivik 等^[7]也采用了(10)式的形式, 但将相关距离尺度取为波频率的函数。

本文同化 Envisat ASAR 海浪谱数据, 选取了 3 个积分波参数进行最优插值^[8-9]: 有效波高 h_s 、平均频率 f_m 和平均传播方向 θ_m 。但由于方向具有周期性, 不便于进行插值计算, 因此实际同化试验将平均频率 f_m 和平均传播方向 θ_m 用参数 k_x 和 k_y 来取代:

$$k_x = f_m^2 \cos \theta_m \quad (13)$$

$$k_y = f_m^2 \sin \theta_m \quad (14)$$

k_x 和 k_y 正比于深水波数分量。海浪谱分析场 $F^a(f, \theta)$ 由背景场 $F^b(f, \theta)$ 经旋转、频移和缩放得到

$$F^a(f, \theta) = ABF^b(Bf, \theta - \Delta\theta) \quad (15)$$

$$A = \left(\frac{h_s^a}{h_s^b} \right)^2, \quad B = \frac{f_m^b}{f_m^a}, \quad \Delta\theta = \theta_m^a - \theta_m^b \quad (16)$$

需要注意, 本文所采用模式的模拟海浪谱频率范围大于 ASAR 观测海浪谱的频率范围, 因此最优插值策略以及对背景场海浪谱的修正都只局限于 ASAR 海浪谱资料的频率范围以内。

1.3 海浪模式

采用第三代海浪数值模式 LAGFD-WAM, 它由国家海洋局第一海洋研究所地球流体力学研究室(LAGFD)发展^[29-30]。该模式的波数谱能量平衡方程和特征线方程为:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + (C_g L_{1\alpha} + U_\alpha) \frac{\partial E}{\partial x_\alpha} = S_{in} + S_{ds} + S_{bs} + S_{nl} + S_{cu} \quad (17)$$

$$\frac{dx_\alpha}{dt} = C_g L_{1\alpha} + U_\alpha \quad \alpha = 1, 2 \quad (18)$$

$$\frac{\partial k_1}{\partial t} + (C_g L_{1\alpha} + U_\alpha) \frac{\partial k_1}{\partial x_\alpha} = - \left\{ \frac{\partial \sigma}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial x_1} + k_\alpha \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_1} \right\} \quad (19)$$

$$\frac{\partial k_2}{\partial t} + (C_g L_{1\alpha} + U_\alpha) \frac{\partial k_2}{\partial x_\alpha} = - \left\{ \frac{\partial \sigma}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial x_2} + k_\alpha \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_2} \right\} \quad (20)$$

其中 $E = E(k_1, k_2, x_1, x_2, t)$ 是波数谱, (k_1, k_2) 是波数向量, (x_1, x_2) 是空间地理位置坐标, t 是时间, (L_{11}, L_{12}) 是单位波数向量, (U_1, U_2) 是背景场流速, C_g 是波的群速度。方程(17)中等号右端分别表示风输入源函数 S_{in} 、波破碎耗散源函数 S_{ds} 、底摩擦耗散源函数 S_{bs} 、波波非线性相互作用 S_{nl} 和波流相互作用 S_{cu} 。

海浪模式 LAGFD-WAM 的波数谱被离散成 25 个波数和 12 个方向(30°分辨率), 对应的频率范围是 0.042—0.413Hz。模式的计算步长为 5min, 模式输出保存时间间隔是 1h。风场驱动采用 QSCAT/NCEP 的 10m 混合风场数据, 风场精度是 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 时间间隔为 6 小时 1 次。

2 同化试验

2.1 试验设置

Johnsen 等^[31]通过与 WAM 模式和浮标资料比较, 得出 ASAR 波模式有效波高的均方根误差分别是 0.6m 和 0.7m。笔者另文开展了 2003 年至 2008 年 ASAR 波模式海浪谱与浮标数据的比对工作, 计算 ASAR 波模式有效波高的均方根误差是 0.6m。模式误差因模式本身设置、风场精度和计算区域等不同而相差较大, 通过与 4 个浮标资料的比较, 针对

本文计算区域的 LAGFD-WAM 模式有效波高的均方根误差在 0.4—0.6m 之间。考虑到有效波高的观测均方根误差和背景均方根误差相差不大, 因此本文同化试验将两者都取为 0.6m。有效波高的观测误差协方差矩阵取(7)式对角矩阵形式。此外, 参数 k_x 和 k_y 的误差协方差矩阵与有效波高的误差协方差矩阵取值相同^[9]。

本文首先比较了(9)式至(12)式 4 种不同形式的背景误差相关函数对同化结果的影响; 其次, 针对自回归形式的背景误差相关函数(12)式, 进行了多种相关距离尺度的同化试验, 以检查相关距离尺度对同化结果的影响。

2.2 验证指标

选取模式计算区域中 4 个独立的浮标观测数据来检验同化试验结果。浮标资料是从美国国家数据浮标中心(NDBC)网站下载而来, 这 4 个浮标的编号和经纬度分别是 ID 51001 (23.445°N, 162.279°W)、ID 51002 (17.191°N, 157.781°W)、ID 51003 (19.087°N, 160.660°W) 和 ID 51004 (17.586°N, 152.461°W), 位置如图 1 所示。浮标观测数据的获取频率也是 1 小时 1 次, 但与模式输出时刻相差 10min, 比对检验时忽略该时间差的影响。选取如下 3 个指标来检验同化结果: 均值偏差(Bias)、均方根偏差(RMS)和同化率(AI), 计算公式如下:

$$\text{Bias} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_s^{m,i} - h_s^{o,i}) \quad (21)$$

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_s^{m,i} - h_s^{o,i})^2} \quad (22)$$

$$\text{AI} = \frac{\text{RMSN} - \text{RMSA}}{\text{RMSN}} \times 100(\%) \quad (23)$$

其中 $h_s^{m,i}$ 是模式有效波高, $h_s^{o,i}$ 是浮标观测有效波高, N 是观测数据的个数。RMSN 是未同化时有效波高的均方根误差, RMSA 是同化后有效波高的均方根误差, 同化率 AI 越接近 100%同化效果越好。

3 试验结果与分析

试验的计算区域是 175°—145°W、15°—30°N(图 1)。模式的空间分辨率是 0.25°×0.25°, 网格总数是 121×61。模式计算时间是 2008 年 3 月 1 日 6 时至 3 月 31 日 24 时。考虑到海浪模式从启动到运行稳定需要一定的时间, 试验结果与浮标数据间的比较从 3 月 5 日 1 时开始到 3 月 31 日 24 时结束。但由于 ID 51001 浮标数据的部分缺失, 该浮标

处的比较从 3 月 6 日 1 时开始。

首先, 比较不同的背景误差相关函数对海浪资料同化结果的影响。选取相关距离尺度为 500km, 背景误差相关函数分别取(9)—(12)式进行同化试验, 将试验对应地标记为 Assi_a、Assi_b、Assi_c 和 Assi_d, 同化结果见表 1, 其中 No_assi 表示无同化时的模式模拟结果。

表 1 不同背景误差相关函数下的同化试验结果

Tab. 1 Results of assimilation experiments with different background error correlation functions

标记	Bias/m	RMS/m	AI/%
No_assi	-0.37	0.462	—
Assi_a	-0.14	0.349	24.5
Assi_b	-0.12	0.349	24.5
Assi_c	-0.15	0.352	23.8
Assi_d	-0.10	0.342	26.0

需要注意的是, 表 1 中的结果是与 4 个浮标有效波高观测数据偏差的整体平均统计。当相关距离尺度取 500km 时, 试验 Assi_a、Assi_b、Assi_c 和 Assi_d 的同化率分别是 24.5%、24.5%、23.8%和 26.0%。试验 Assi_d 的同化效果最好, 其次是试验 Assi_a 和 Assi_b, 试验 Assi_c 相对最差; 但前 3 个试验的同化结果实际相差不大。

Greenslade 等^[28]指出相关距离尺度随纬度变化明显, 在高纬地区较小, 而在低纬地区较大, 并给出了一个可能的解释: 高纬地区风场通常较强, 在那里生成的风浪空间尺度也相对较小, 但随着海浪向低纬地区的传播和耗散, 它们逐渐演变成涌浪, 其空间尺度随之变大。

针对某一种背景误差相关函数, 当增大相关距离尺度时, 该误差相关函数给出的相关系数随之增大, 这使得背景协方差的影响范围变大, 或者说相同区域内观测信息的影响被加强。当取相同的相关距离尺度时, 以公式(11)和(12)所示的背景误差相关函数为例, 在相隔同样远的距离时公式(12)给出的误差相关系数更大一些, 这“等效”于取更大相关距离尺度时的公式(11), 因此试验 Assi_d 的同化效果好于试验 Assi_c。为更直观起见, 图 2 给出了相关距离尺度取 500km 时(9)—(12)式的函数图像。

为检查最优插值程序运行是否正确, 针对表 1 中同化试验 Assi_d, 图 3 分别给出了同化前后的模式有效波高与卫星观测有效波高比较的散点图。图 3 说明最优插值程序运行正确。

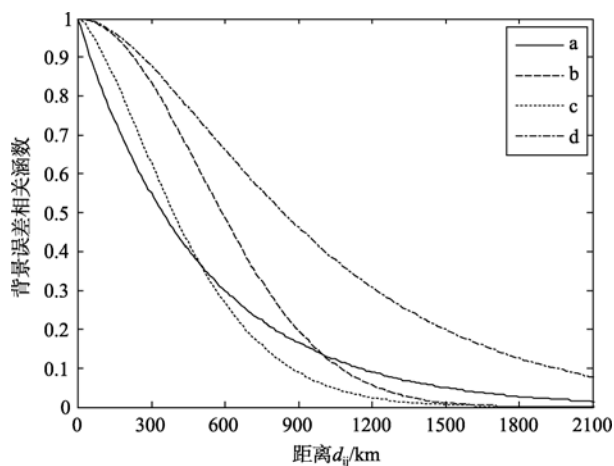


图2 公式(9)—(12)表示的背景误差相关函数图示

Fig. 2 Plot of background error correlation functions from equation (9) to equation (12), respectively

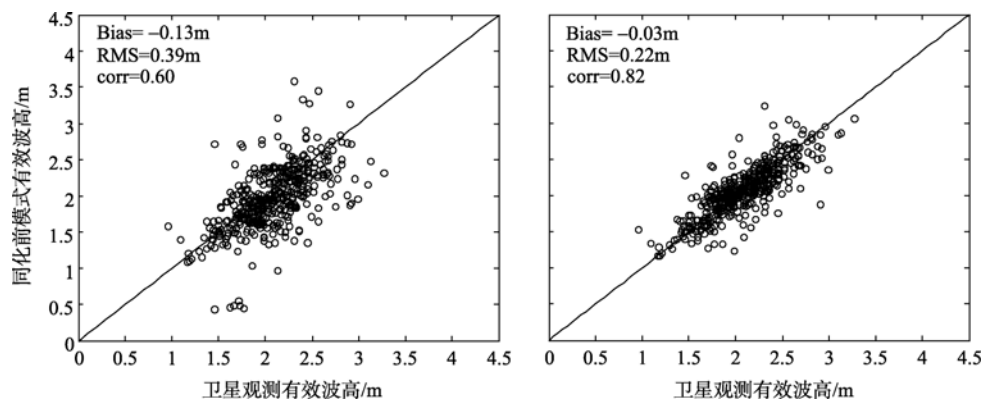


图3 同化前后模式有效波高与卫星有效波高比较的散点图

Fig. 3 Scatter plots of model significant wave heights before (left) and after (right) assimilation respectively vs. satellite significant wave heights

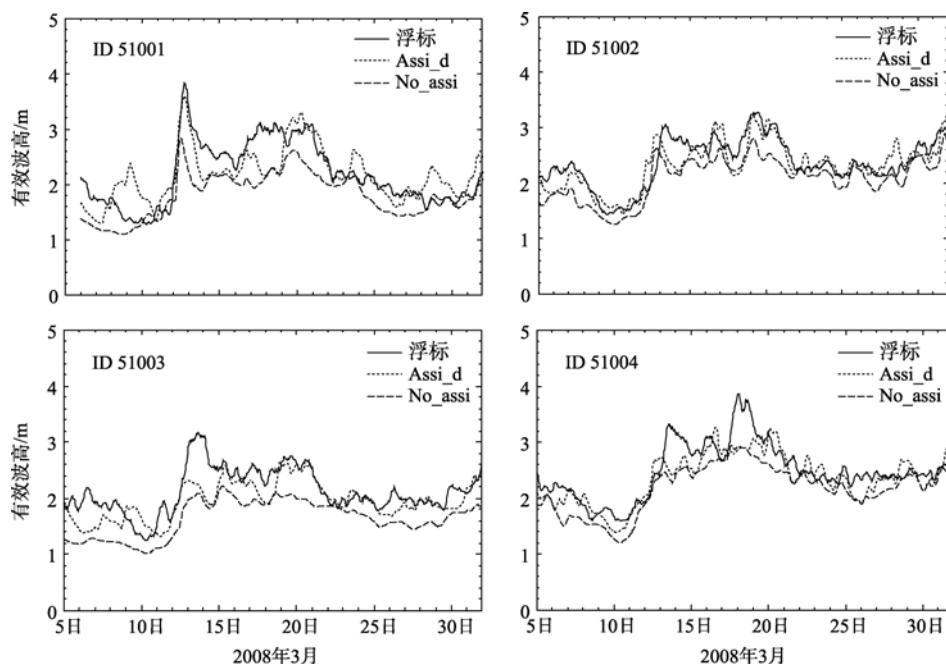


图4 有效波高浮标观测、同化值和未同化值的时间序列比较

Fig. 4 Comparisons of significant wave height series from buoy observations, experiment Assi_d and experiment No_assi

为进一步说明每个浮标位置处的同化效果, 针对同化试验 Assi_d, 图 4 分别给出了 4 个浮标位置处的有效波高浮标观测、同化值和未同化值的时间序列比较。

从图 4 可以看出, 同化试验 Assi_d 改善了模式模拟的有效波高序列, 浮标 ID 51003 处的改善尤其明显, 4 个浮标位置处同化后的有效波高均方根误差分别比未同化时减小了 21.1%、23.6%、36.7% 和 17.2%。

其次, 比较不同的背景误差相关距离尺度对海浪资料同化结果的影响。针对自回归形式的相关距离函数(12)式, 相关距离尺度分别取 200km 至 700km, 共进行了 6 组同化试验, 试验结果见表 2。

表 2 不同相关距离尺度下采用(12)式同化试验结果
Tab. 2 Results of assimilation experiments using equation (12) with different correlation length scales

L/km	Bias/m	RMS/m	AI/%
200	-0.17	0.358	22.5
300	-0.12	0.346	25.1
400	-0.10	0.344	25.5
500	-0.08	0.342	26.0
600	-0.07	0.347	24.9
700	0.02	0.474	-2.4

表 2 中的结果也是与 4 个浮标有效波高实测数据偏差的整体平均统计。可以看出,随着相关距离尺度的增大,同化率 AI 先增大后减小,说明存在某个最优的相关距离尺度,该最优相关距离尺度下的同化效果最好。对这里的同化试验来讲,自回归形式背景误差相关函数的最优相关距离尺度为 400—500km 量级。

4 结论

本文选取海浪模式 LAGFD-WAM 的区域版本,进行了 Envisat ASAR 海浪谱资料的最优插值同化试验,得到如下结论:

1) Envisat ASAR 海浪谱资料的最优插值能够有效地改进海浪模式的有效波高模拟,可以为海浪预报提供更加准确的初始场。

2) 已有文献提出的 4 种各向同性背景误差相关函数的同化结果相差不大,关键仍是对相关距离尺度的选取;相同相关距离尺度下的不同背景误差相关函数,可近似等效成不同相关距离尺度下的某一种背景误差相关函数。

3) 随着相关距离尺度的增大,同化效果一般先变好后变坏,存在某个最优的相关距离尺度。针对自回归形式的背景误差相关函数(12)式,本文同化试验结果表明相关距离尺度量级取 400—500km 时同化效果最好,此时同化后的模式有效波高均方根误差比未同化时减小了 26.0%。

参考文献

- [1] LIONELLO P, GÜNTHER H, JANSSEN P A E M. Assimilation of altimeter data in a global third-generation wave model[J]. *J Geophys Res*, 1992, 97(C9): 14453–14474.
- [2] BENDER L C, GLOWACKI T. The assimilation of altimeter data into the Australian wave model[J]. *Aust Meteorol Mag*, 1996, 45: 41–48.
- [3] GREENSLADE D J M. The assimilation of ERS-2 significant wave height data in the Australian region[J]. *J Mar Syst*, 2001, 28: 141–160.
- [4] MASTENBROEK C, MAKIN V K, VOORRIPS A C, et al. Validation of ERS-1 altimeter wave height measurements and assimilation in a North Sea wave model[J]. *Global Atmos Ocean Syst*, 1994, 2: 143–161.
- [5] YOUNG I R, GLOWACKI T J. Assimilation of altimeter wave height data into a spectral wave model using statistical interpolation[J]. *Ocean Eng*, 1996, 23(8): 667–689.
- [6] BREIVIK L A, REISTAD M. Assimilation of ERS-1 altimeter wave heights in an operational numerical wave model[J]. *Weather Forecast*, 1994, 9: 440–451.
- [7] BREIVIK L A, REISTAD M, SCHYBERG H, et al. Assimilation of ERS SAR wave spectra in an operational wave model[J]. *J Geophys Res*, 1998, 103(C4): 7 887–7 900.
- [8] HASSELMANN S, LIONELLO P, HASSELMANN K. An optimal interpolation scheme for the assimilation of spectral wave data[J]. *J Geophys Res*, 1997, 102(C7): 15823–15836.
- [9] VOORRIPS A C, MAKIN V K, HASSELMANN S. Assimilation of wave spectra from pitch-and-roll buoys in a North Sea wave model[J]. *J Geophys Res*, 1997, 102(C3): 5829–5849.
- [10] AOUF L, LEFÈVRE J M, HAUSER D. Assimilation of directional wave spectra in the wave model WAM: An impact study from synthetic observations in preparation for the SWIMSAT satellite mission[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2006, 23: 448–463.
- [11] VOORRIPS A C, HEEMINK A W, KOMEN G J. Wave data assimilation with the Kalman filter[J]. *Journal of Marine Systems*, 1999, 19: 267–291.
- [12] PINTO J P, BERNARDINO M C, PIRES SILVA A. A Kalman filter application to a spectral wave model[J]. *Nonlinear Processes Geophys*, 2005, 12: 775–782.
- [13] DE LAS HERAS M M, BURGERS G, JANSSEN P A E M. Variational wave data assimilation in a third-generation wave model[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1994, 11: 1350–1369.
- [14] DE LAS HERAS M M, BURGERS G, JANSSEN P A E M. Wave data assimilation in the WAM wave model[J]. *Journal of Marine Systems*, 1995, 6: 77–85.
- [15] BAUER E, HASSELMANN K, YOUNG I R, et al. Assimilation of wave data into the wave model WAM using an impulse response function method[J]. *J Geophys Res*, 1996, 101: 3801–3816.
- [16] HOLTHUIJSEN L H, BOOIJ N, VAN ENDT M, et al. Assimilation of buoy and satellite data in wave forecasts with

- integral control variables[J]. *Journal of Marine Systems*, 1997, 13: 21–31.
- [17] HERSBACH L. Application of the adjoint of the WAM model to inverse wave modeling[J]. *J Geophys Res*, 1998, 103: 10 469–10 488.
- [18] 王跃山, 黄润恒. 用插入观测法将高度计观测同化到海浪模式 WAM 中[J]. *海洋预报*, 1999, 16(2): 1–17.
- [19] 张志旭, 齐义泉, 施平, 等. 最优化插值同化方法在预报南海台风浪中的应用[J]. *热带海洋学报*, 2003, 22(4): 34–41.
- [20] 郭衍游, 侯一筠, 杨永增, 等. 利用 WaveWatch III 建立东中国海区域海浪同化系统[J]. *高技术通讯*, 2006, 16(10): 1092–1096.
- [21] YANG YONG-ZENG, YUAN YE-LI, ZHANG JIE, et al. Wave data assimilation using the adjoint variational method in the LAGFD-WAM wave numerical model[C]//Proceedings of the International Conference on Marine Disasters: Forecast and Reduction. Beijing: China Ocean Press, 1998: 77–82.
- [22] YANG YONG-ZENG, ZHAO WEI, TENG YONG. A temporal sliding procedure for ocean wave variational data assimilation and its application[J]. *Chin J Oceanol Limnol*, 2006, 24(1): 35–41.
- [23] 郭衍游. 东中国海区域海浪同化系统设计与研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2006.
- [24] BRÜNING C, HASSELMANN S, HASSELMANN K, et al. First evaluation of ERS-1 synthetic aperture radar wave mode data[J]. *Global Atmos Ocean Systm*, 1994, 2: 61 - 98.
- [25] ENGEN G, BARSTOW S F, JOHNSON H, et al. Directional wave spectra by inversion of ERS-1 synthetic aperture radar ocean imagery[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1994, 32(2): 340–352.
- [26] HASSELMANN S, BRÜNING C, HASSELMANN K, et al. An improved algorithm for the retrieval of ocean wave spectra from synthetic aperture radar image spectra[J]. *J Geophys Res*, 1996, 101(C7): 16615–16629.
- [27] JOHNSEN H, CHAPRON B, WALKER N, et al. The ASAR wave mode: level 1 and level 2 algorithms and products[R]. *Envisat Calibration Review*, Noordwijk: ESA-ESTEC, 2002.
- [28] GREENSLADE D J M, YOUNG I R. Background errors in a global wave model determined from altimeter data[J]. *J Geophys Res*, 2004, 109, C09007, doi: 10.1029/2004JC002324.
- [29] YUAN YE-LI, HUA FENG, PAN ZENG-DI, et al. LAGFD-WAM numerical wave model-I basic physical model[J]. *Acta Oceanol Sinica*, 1991a, 10: 483–488.
- [30] YUAN YE-LI, PAN ZENG-DI, HUA FENG, et al. LAGFD-WAM numerical wave model-II characteristics inlaid scheme and its application[J]. *Acta Oceanol Sinica*, 1991b, 11: 13–23.
- [31] JOHNSEN H, ENGEN G, COLLARD F, et al. Envisat ASAR wave mode products-quality assessment and algorithm upgrade[C]//Proc of SEASAR 2006, Frascati: ESA SP-613, 2006.