研究论文 · Linn ARTICLE

中国近海海面高度异常资料再处理

陈亚飞^{1,2}, 王晓春^{1,2}, 刘屹岷³

(1. 南京信息工程大学 海洋科学学院, 江苏 南京 210044; 2. 江苏省海洋环境探测工程技术研究中心, 江苏 南京 210044; 3. 中国科学院大气物理研究所 LASG, 北京 100029)

> 摘要:卫星海面高度异常产品再处理的研究多集中在欧洲和美国近海,中国近海尚未有过。在产生 AVISO(Archiving Validation and Interpolation of Satellite Oceanographic Data)全球 0.25°多颗卫星海面高 度异常产品时,只用了 1/3~1/2 的部分沿轨资料,给区域海洋动力学研究造成了一定的限制。本研究尝 试利用多颗卫星的所有沿轨资料及25个测潮站的观测资料,通过最优插值方法产生一份新的中国近海 海面高度异常资料。新资料的空间分辨率仍为 0.25°,但使用了来自 3 颗卫星(Jason-1、Jason-2、CryoSat-2) 的所有沿轨资料及 25 个测潮站的观测资料。新资料的范围为 10°S~50°N、90°~160°E。新资料与 AVISO 资料的对比分析表明新资料更接近沿轨海面高度异常观测,同时也更接近测潮站资料。与 AVISO 资料 相比,新资料与沿轨海面高度异常观测的均方根误差降低了 10.03%,与测潮站资料的均方根误差降低 了 9.6%。

> 关键词: 海面高度异常; 中国近海; 再处理; 高度计; AVISO(Archiving Validation and Interpolation of Satellite Oceanographic Data); 测潮站

中图分类号: P72	文献标识码: A	文章编号: 1000-3096(2016)07-0000-09
doi: 10.11759/hykx20150818001		

卫星海面高度观测在一定条件下可以分辨海洋 中尺度涡旋。海面高度是反映海洋状况的重要变量 之一、其遥感观测主要是基于卫星高度计。卫星高度 计是一种主动式微波遥感器、由发射器、接收器、计 时系统和数据采集系统组成。卫星高度计的原理是 通过发射器向地球表面发射脉冲信号, 信号经过地 球表面反射后,由接收器接收,并由计时系统测量 出发射脉冲与接收脉冲的时间差。根据测量出的时 间差,便可得到卫星到海表面的距离。再由卫星到参 考椭球的距离减去卫星到海表面的距离得到海面高 度。经过多年的发展、卫星高度计对海面高度观测的 测量精度已达到厘米级别。1992年、美国国家航空 航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)和法国空间局国家空间研究中心(Centre National d'EtudesSpatiales, CNES) 联合发射了 TOPEX/POSEIDON 卫星(简称 T/P 卫星), 其上搭载 的卫星高度计测量精度达到 3 cm^[1]。2001 年和 2008 年, Jason-1、Jason-2 卫星相继发射升空, 作为 T/P 卫 星的延续, Jason-1、Jason-2 卫星轨道与 T/P 卫星完全 相同。2010年, CryoSat-2卫星发射升空, 尽管其设 计主要用于观测海冰状况,但同时可对海面高度进 行观测。2011 年 8 月, 我国成功发射了第一颗海洋

动力环境卫星海洋二号(HY-2A), 其上搭载的卫星高 度计测量精度达到厘米级别, 可对全球海洋进行全 天候高精度的观测。

卫星高度计的资料空间覆盖范围广、时空分辨 率较高,一定条件下可以较好的分辨海洋中尺度涡 旋。Chelton 等^[2-3]通过分析 AVISO(Archiving Validation and Interpolation of Satellite Oceanographic Data)提供的不同时间序列的卫星高度计融合资料, 指出了全球海洋中尺度涡旋的分布特征及变化特 点。卫星高度计观测采样有其特点,比如 T/P、Jason-1 及 Jason-2 在沿轨方向空间采样间隔为6 km,但轨道间 距离为 200~300 km,约 10 d 重复观测同一区域,而

收稿日期: 2015-08-18; 修回日期: 2016-02-17

基金项目: 国家自然科学基金委项目(41328006); 南京信息工程大学启 动经费项目(S8113046001); 2015 江苏双创团队; 江苏高校优势学科建 设工程资助项目(PAPD)

[[]Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41328006; Nanjing University of Information Science and Technology Faculty Startup Fund, No. S8113046001; Program for Innovation Research and Entrepreneurship Team in Jiangsu Province 2015; the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD)]

作者简介: 陈亚飞(1990-), 男, 河南孟州人, 硕士, 研究方向为区域 海洋数值模拟, E-mail: yafei.chen@aliyun.com; 王晓春, 通信作者, 教授, 研究方向为海气相互作用及预报, 区域海洋数值模拟及预报, E-mail: xcwang@nuist.edu.cn

CryoSat-2 观测重复周期为 369 d。由于卫星高度计观 测的采样特点并且卫星之间采样特点的不同,如何 融合不同卫星的观测产生一个可供用户方便使用的 资料产品便是一个值得研究的问题。法国的机构 AVISO 及 DUACS (Data Unification and Altimeter Combination System)在这方面做了大量的工作。

利用卫星高度计资料对海洋中尺度涡旋的研究 表明、目前所用的卫星高度计资料精度仍需提高。虽 然 AVISO 提供的多卫星海面高度异常融合资料提高 了对海洋中尺度涡旋的分辨能力,但仍存在一定的 限制^[4]。徐驰等^[5]借助卫星高度计资料对海洋中尺度 涡旋进行识别和追踪、指出目前所用的卫星高度计 资料尚不足以解析次中尺度的信号,需要更高精度 的卫星高度计资料。近年来利用卫星高度计资料对 我国近海区域中尺度涡旋也有研究^[6-8]。Wang 等^[6] 利用多卫星融合高度计资料对南海中尺度涡的时空 分布特征进行了统计分析。林宏阳等^[7]利用 AVISO 提供的卫星高度计融合数据(Map of Sea Level Anomaly, MSLA)对南海及西北太平洋的中尺度涡旋 活动进行统计分析。孙成学等^[8]利用 AVISO 提供的 融合 T/P、Jason-1 及 ERS 数据的产品揭示了冬季南 海吕宋冷涡的双涡结构,但由于卫星高度计资料无 法准确地刻画涡旋形成的过程、仍需要更加准确的 资料对吕宋冷涡开展进一步的研究。

卫星高度计资料的采样特点及误差在一定程度 上限制了海洋动力学问题的研究。由于多方面的原 因、比如干空气、湿空气订正项、潮汐订正项误差的 增加, 卫星高度计在近岸区域的误差较大, 在近岸 区域的卫星高度计资料再处理便十分必要。由欧洲 及美国研究人员主导的 Coastal Altimetry Workshop 从 2008 年开始便致力于推动这方面的工作^[9-10]。这 些工作集中在雷达波形资料的再处理[11-12]、订正项 精度的提高^[13]以及针对某一海域产生更精确的海面 高度异常资料集^[14]。但这些研究多集中在欧洲及美 国近海、在中国近海区域尚未开展系统的工作。 AVISO 在 2014 年 5 月以后发布的沿轨资料便反映了 这方面的研究成果。在新发布的沿轨资料中、使用了 新的平均海面高度(1993~2012 年平均, MSS CNES CLS2011, http://www.aviso.fren/data/products/auxiliaryproducts/mss.html), 近岸区域干空气、湿空气订正算 法, 对沿轨资料用 Lanzcos 方法进行了滤波, 并在数 据统一方面也有了许多新的改进^[15]。AVISO 除了提 供融合多颗卫星沿轨资料的全球产品外、也开始提 供区域海洋产品、比如地中海、黑海地区的网格点海

面高度异常产品。但在产生全球网格点产品时, AVISO 只使用了 1/3~1/2 的部分沿轨资料。而针对中 国近海的区域海洋产品目前还没有。本研究尝试利 用 AVISO 最新发布的多颗卫星(Jason-1、Jason-2、 CryoSat-2)所有沿轨资料及 25 个测潮站观测资料, 通过最优插值方法(Optimal Interpolation)产生一份 新的中国近海海面高度异常资料产品。并将这一产 品与 AVISO 资料、卫星高度计沿轨资料及测潮站资 料进行了对比。本研究进行资料再处理的海域为 10°S~50°N, 90°~160°E,时间为 2012 年全年。本研究 的方法可以很容易地用到其他时间段。

1 近海资料处理

1.1 卫星沿轨资料

本研究中所用的 Jason-1、Jason-2、CryoSat-2 卫 星沿轨海面高度异常资料及 AVISO 0.25°规则网格 点海面高度异常资料产品(下文中简称为 AVISO)均 来自法国空间局国家空间研究中心的 DUACS^[15]、为 第三级产品、并非原始观测数据、已经进行了不同 卫星高度计之间的轨道误差校正、使用了新的干空 气、湿空气订正算法。本文所使用卫星高度计资料 的时间范围是 2012 年 1 月 1 日~2012 年 12 月 31 日, 空间范围是 10°S~50°N, 90°~160°E。图 1 为本文所用 3 颗卫星沿轨海面高度异常资料的数量。Jason-1 卫 星从 2001 年发射以来,到 2012 年已连续工作了 12 a, 硬件设备开始老化、出现资料缺失的情形越来越多。 如图所示, 2012年2月17日~2012年2月28日和 2012年3月4日~2012年5月7日, Jason-1卫星沿轨 资料出现大范围缺失。经统计可知、在产生 2012 年 中国近海海面高度异常资料产品时、平均每天使用 Jason-1、Jason-2、CrvoSat-2 卫星沿轨海面高度异常 资料点分别约为1766,1669,1552个。

1.2 测潮站资料

本研究中尝试将测潮站资料与卫星高度计资料 进行融合,以有效地提高近海区域海面高度资料的 精度。采用的测潮站资料来自夏威夷大学海平面资 料中心(University of Hawaii Sea Level Center, http:// uhslc.soest.hawaii.edu), 在研究区域(10°S~50°N, 90°~160°E)内选取了49个站点的2012年逐日海面高 度观测资料,其中25站用于融合产生新产品,其余 24站用于评估新产品。



图 1 中国近海海域(10°S~50°N, 90°~160°E)Jason-1, Jason-2 和 CryoSat-2 卫星 2012 年逐日海面高度异常资料的数量 Fig. 1 Number of SLA observations from Jason-1, Jason-2, and CryoSat-2 in the area of 10°S~50°N and 90°~160°E in 2012

为与卫星沿轨海面高度异常资料进行融合,我 们将去掉潮汐信号的逐日海面高度观测减去2012年 平均值,得到测潮站的海面高度异常。然后利用 NCEP(National Centers for Environmental Prediction) 提供的2012年日平均海平面气压再分析资料及公式

$$H = h + \frac{p'}{\rho g} \tag{1}$$

对测潮站海面高度异常观测资料 h 进行了海平面气 压校正,其中 ρ =1025 kg/m³, g=9.806 m/s², $p' = p - \overline{p}$, p 为该站观测气压值, \overline{p} 为该站 2012 年海平面气压 的平均值,以上处理方法与 Saraceno 等^[14]对测潮站资 料处理方法类似。最后,对订正后的逐日资料采取了 11 d 滑动平均以去掉周期小于 11 d 的噪音,这样的 处理使测潮站资料和 Jason-1、Jason-2 的采样频率相 一致。

1.3 最优插值方法

最优插值方法是大气海洋学中常用的一种资料 处理方法。在卫星高度计数据融合的研究中也得到 了应用^[16]。传统的最优插值方法通常用白噪声来表 示测量误差。然而,通过分析传统的最优插值方法产 生的海面高度异常产品,发现沿着卫星轨道的长空 间尺度误差(long-wavelength)在传统方法中不易表 示,比如 T/P 卫星高度计沿轨方向长空间尺度误差 的均方根达到 3 cm^[17]。这种误差可引起垂直于卫星 轨道方向的海面高度梯度,给地转流的计算造成一 定的误差从而掩盖海洋动力学特征^[18]。在进行多卫 星高度计数据融合时,沿轨资料的轨道间距离减小, 使得海面高度梯度增大,如果沿轨的长空间尺度误 差不能被有效地去除,产生的海面高度资料产品也 将有较大的误差。Le Traon 等^[19]提出了一种改进的 最优插值方法,该方法考虑了沿轨方向的长空间尺 度误差。本研究中,我们采用了这种最优插值方法。

对于 *n* 个不规则空间、时间采样点上的海面高度异常观测

$$\phi_{\text{obs}}(i) = \phi(i) + \varepsilon(i), i = 1, \cdots, n \tag{2}$$

其中 $\phi(i)$ 为 *i* 处海面高度异常观测的真实值, $\varepsilon(i)$ 为观 测误差,利用上述 *n* 个海面高度异常观测,可以得到 统计学上最优的时间空间点 *x* 处海面高度异常的估 计值^[20]

$$\theta_{\rm est}(x) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} A_{ij}^{-1} C_{xj} \phi_{\rm obs}(i)$$
(3)

$$A_{ij} = \left\langle \phi_{\text{obs}}(i)\phi_{\text{obs}}(j) \right\rangle = \left\langle \phi(i)\phi(j) \right\rangle + \left\langle \varepsilon(i)\varepsilon(j) \right\rangle \quad (4)$$

其中 A_{ij} 为观测误差协方差矩阵。 $C_{xj} = \langle \theta(x)\phi_{obs}(i) \rangle$ 为 观测与估计值之间的协方差矩阵。 $\theta_{est}(x)$ 的空间分辨 率为 0.25°×0.25°, 时间分辨率为 1 d。

卫星海面高度异常观测之间的误差协方差用公式(4)表述,当两个观测 $\phi_{obs}(i) \gtrsim \phi_{obs}(j)$ 来自不同轨 道时

$$\left|\varepsilon(i)\varepsilon(j)\right\rangle = \delta_{ij}b^2$$
 (5)

其中当 i=j 时, $\delta_{ij} = \phi$; 当 i j 时, $\delta_{ij} = 0$ 。当两个观 测来自同一个轨道时

$$\langle \varepsilon(i)\varepsilon(j)\rangle = \delta_{ij}b^2 + E_{lw}$$
 (6)

其中 E_{lw} 为沿轨的长空间尺度误差。

观测之间的协方差及观测与估计值 θ_{est}(x) 之间 的协方差用海面高度异常的方差 ν² 与空间时间相关 系数的乘积来表达

$$C(r,t) = [1 + ar + \frac{1}{6}(ar)^2 - \frac{1}{6}(ar)^3]\exp(-ar)\exp(-t^2/T^2)$$
(7)

其中 *r* 为两个观测点之间的距离,单位为 km; *t* 为两 个观测点之间时间上的间隔,单位为 d; *a*, *T* 及 v^2 , b^2 , E_{lw} 为常数,在本方法中其值分别为 *T*=20 d, $a = \frac{3.34}{150}$ (km⁻¹), $v^2=0.017$ m², $b^2=0.05v^2$, $E_{lw}=0.1b^2$ 。

在进行最优插值时,需要选择部分资料点计算 $\theta_{est}(x)$ 。在本研究中,采用了以下的搜索方案,选择 距离被插值点 200 km 范围内的 100 个观测点进行插 值,当观测点不足 100 个时,将搜索范围扩大为 250 km。这种搜索方案保证距离被插值点最近的观 测资料得到使用,利于提高规则网格点海面高度产 品精度。

本研究在产生规则网格点海面高度异常产品时, 将卫星资料与测潮站资料进行了融合。如前文所述, 测潮站资料在融合前去掉了 2012 年全年的平均,进 行了海平面气压订正及 11 d 的滑动平均。在进行最 优插值时,我们假定测潮站资料的观测误差相互独 立,其误差方差与沿轨海面高度异常相一致,取为 0.017 m²。

2 最优插值产品

本研究利用最优插值方法及 3 颗卫星的所有沿 轨海面高度资料和 25 个测潮站的观测资料产生了 2012 年 1 月 6 日~2012 年 12 月 26 日的逐日中国近 海海面高度异常产品(简称 OI), 其空间分辨率为 0.25°×0.25°。具体计算方法为, 从 2012 年 1 月 6 日 开始, 取这一天前后 5 d 的所有沿轨资料和测潮站观 测资料, 用最优插值方法产生规则网格点上的产品。 然后依次对 1 月 7 日~12 月 26 日的所有日期进行同 样处理。为了说明测潮站资料在产生这一产品时的 作用, 我们采用同样的方法, 在只用三颗卫星所有 沿轨海面高度资料的情形下, 产生了另一份中国近 海海面高度异常产品(简称 OI-SAT)。

图 2 表示了 2012 年 1 月 6 日中国近海海面高度 异常产品的计算过程。可以注意到 CryoSat-2 与 Jason-1 及 Jason-2 有着很不相同的采样特点, 这给卫 星沿轨资料的直接使用造成了一定困难。比如在黑 潮延伸区(沿 36°N, 140°E 以东), 3 颗卫星的沿轨资料 都表明, 在这一区有中尺度涡旋的活动, 海面高度 异常有较大的空间变化, 但仅从每颗卫星的海面高 度异常很难给出涡旋活动的全貌。利用最优插值产 生的规则网格点上的海面高度异常(图 2d、图 2e)可 以给出这一区域涡旋活动的全貌,使用起来会更加 方便。另外,值得一提的是将测潮站资料与卫星资料 融合在一起(图 2e)并没有在测潮站附近产生异常值, 这说明最优插值时选取的参数在合理范围内。

2.1 沿轨资料与 AVISO、OI-SAT 及 OI 产 品比较

我们用 DUACS 提供的 CryoSat-2、Jason-1、 Jason-2 卫星沿轨海面高度异常观测资料与 AVISO、 OI-SAT 及 OI 产品进行了对比。比较前将 0.25°规则 网格点上的海面高度异常产品插值到当日的沿轨资 料点上,图 3 为海面高度异常产品与当日沿轨资料 的均方误差。2012 年全年平均,OI-SAT、OI 产品在 中国近海与沿轨资料的均方根误差均为 3.5 cm,而 AVISO 产品在中国近海与沿轨资料的均方根误差为 3.9 cm,如图 3a。因而新产生的 OI 产品更接近沿轨 资料,将误差降低了 10.3%。同时可看出,与沿轨资 料相比,OI 与 OI-SAT 产品几乎没有差别,这说明融 合测潮站与卫星资料后,测潮站资料的影响集中在 站点附近。

图 3b 为产生 OI 产品所使用 3 颗卫星沿轨资料 总量。由图可知 1 月 6 日~2 月 16 日沿轨资料总量波 动较大,资料总量在 2400~6000 之间变动。而 2 月 17 日~2 月 28 日、3 月 4 日~5 月 7 日 Jason-1 卫星沿 轨资料缺失,所以沿轨资料总量维持在 3 000 左右。 5 月 8 日~12 月 26 日沿轨资料总量维持在 5 000 左右。 总体来说, 1 月 6 日~5 月 7 日沿轨资料总量维持在 3 000 左右,而 5 月 8 日~12 月 26 日沿轨资料总量维 持在 5 000 左右。

比较图 3a 和图 3b, 可以注意到沿轨资料数量会 影响 OI 产品的质量。1月6日~5月7日, 本研究所 产生的新产品(OI-SAT、OI)与沿轨资料的平均均方根 误差为 3.81 cm, AVISO 与沿轨资料的平均均方根误 差为 3.95 cm(图 3a); 新产品将误差降低了 3.54%, 此 时段内每天所用资料点个数约为 3 840(图 3b)。而 5 月8日~12月26日, 新产品及 AVISO 与沿轨资料的 平均均方根误差分别为 3.33, 3.87 cm(图 3a); 新产品 将误差降低了 13.95%, 此时段内每天所用资料点个 数约为 4 996(图 3b)。这表明, 沿轨资料的数量对新 产品质量有一定影响, 所用资料越多新产品 OI 与沿 轨资料越接近。 研究论文・』 → ARTICLE



- 图 2 CryoSat-2 (a)、Jason-1 (b)和 Jason-2 (c)卫星 2012 年 1 月 1 日至 2012 年 1 月 11 日 11 d 的所有沿轨海面高度异常资料分布
- Fig. 2 11 days along-track sea level anomaly observations of (a) CryoSat-2; (b) Jason-1; (c) and Jason-2 from January 1, 2012 to January 11, 2012

d. 只包括卫星观测资料产生的 0.25°×0.25°网格点上海面高度异常产品(OI-SAT); e. 融合卫星观测及测潮站资料后的产品(OI)

d. 0.25 degree SLA product (OI-SAT) when only satellite observations were used; e. SLA product (OI) generated from the merging of both satellite observations and tide gauge data

2.2 24 个独立测潮站资料与 AVISO、 OI-SAT及 OI 产品比较

本研究产生的 OI 产品融合了夏威夷大学海平面 资料中心提供的 25 个测潮站的观测资料。为了更好 地说明新产品的质量,将 AVISO、OI-SAT 及 OI 产 品插值到独立的 24 个测潮站站点上,与测潮站资料 进行对比。AVISO 产品与 24 个测潮站观测资料的平 均均方根误差为 11.19 cm(图 4a), OI-SAT 产品与测 潮站观测资料平均均方根误差为 10.17 cm(图 4b), 将误 差降低了 9.12%。而 OI 产品与测潮站观测资料平均均 方根误差为 10.09 cm(图 4c), 与 AVISO 相比将误差降 低了 9.83%。所以, 新产生的 OI-SAT、OI 产品



图 3 2012 年 AVISO、OI-SAT、OI 产品与沿轨海面高度资料的逐日均方根误差(a)以及所用三颗卫星在研究区域(10°S~50°N, 90°~160°E)内所有沿轨资料的数量(b)

Fig. 3 (a) Daily root mean square error of along-track SLA with AVISO, OI-SAT, and OI and (b) number of along-track SLA observations from three satellites in the area of 10°S~50°N, 90°~160°E

更接近于测潮站观测资料,融合了测潮站资料的 OI 产品相对于 AVISO 产品更接近测潮站资料。

2012 年逐日比较也表明海面高度异常产品与 测潮站资料的接近程度有明显的不同(图 5)。 AVISO 产品与测潮站资料区别最大, 2012 年平均 均方根误差为 11.35 cm, 当融合所有卫星沿轨资 料后, OI-SAT 产品与测潮站资料的年平均均方根 误差降为 10.31 cm, 将卫星沿轨资料与测潮站资 料融合后, OI 产品与测潮站资料的年平均均方根 误差为 10.26 cm。这表明新的中国近海海面高度异 常产品 OI 更加接近于测潮站资料,减小了与测潮 站观测资料间的误差。

当把所有 49 个测潮站资料与 3 颗卫星沿轨资料 融合后,规则网格点海面高度异常产品与测潮站资 料的平均均方根误差进一步降低为 5.57 cm。

3 结论

本研究融合了 2012 年中国近海海域 3 颗卫星的

所有沿轨海面高度异常资料及 25 个测潮站的资料, 尝试产生一份新的规则网格点上的资料产品,并使 用 AVISO 产品、沿轨资料、及独立的测潮站资料对 新产品进行了系统性的评价。结论如下:

 与 AVISO 产品相比,融合 3 颗卫星所有沿轨 资料及测潮站资料的新产品 OI 更加接近沿轨资料, 将误差降低了 10.03%。是否融合测潮站资料对海面 高度资料产品与沿轨资料的比较没有显著的影响, 这应该与测潮站资料的数量在融合过程中只占很小 的比例有关。

2) 与测潮站资料相比, AVISO 产品与测潮站资料的区别最明显。融合 3 颗卫星所有沿轨资料的产品 OI-SAT 更接近测潮站观测。融合 3 颗卫星所有沿轨资料及测潮站资料的新产品 OI 最接近测潮站资料,与 AVISO 产品相比将误差降低了 9.6%。

3) 融合中使用沿轨资料的数量会对新产品 OI 质量产生一定的影响,当使用的沿轨资料越多时, 新产品 OI 越接近沿轨资料。 研究论文・』 <u>→</u> ARTICLE



图 5 2012 年 24 个测潮站海面高度资料与 AVISO、OI-SAT 及 OI 产品的逐日均方根误差

Fig. 5 Daily root mean square error of sea surface height observations from 49 tidal gauge stations with AVISO, OI-SAT, and OI products

本研究中,针对中国近海的卫星海面高度异常 资料与测潮站观测的再处理及最优融合尚属首次, 在融合过程中仍存在一定不足。在产生海面高度异 常观测资料时,测潮站资料采用 2012 年观测的平均 值作为该站的平均海平面,这与产生卫星沿轨海面 高度异常时所用平均海面高度(比如 AVISO 资料集 MSS_CNES_CLS2011)不同,但目前将 MSS_CNES_ CLS2011 插值到测潮站产生的误差将更大。目前对

于此问题仍没有统一的解决方案,我们期待未来有更好的处理方式。

致谢:毛龙江教授对本文初稿提出了有益建议。 CryoSat-2、Jason-1、Jason-2卫星沿轨数据及AVISO网格 点数据来源于法国空间局国家空间研究中心(CNES);测 潮站数据来源于夏威夷大学海平面资料中心(UHSLC); 两位审稿专家及编辑为本文修改提出了有益建议,在此 表示感谢。



参考文献:

- Fu L L, Christensen E J, YamaroneJr C A, et al. TOPEX/POSEIDON: Geophysical Evaluation[J]. J Geophys Res, 1994, 99: 24369-24381.
- [2] Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M, et al. Global observations of large oceanic eddies[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(15): 87-101.
- [3] Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M. Global observations of nonlinear mesoscaleeddies[J]. Progress in Oceanography, 2011, 91(2): 167-216.
- [4] Chavanne C P, Klein P. Can oceanic submesoscale processes be observed with satellite altimetry?[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(22): 707-716.
- [5] 徐驰,陈桂英,尚晓东,等.海洋中尺度涡旋源汇空间分布特征研究[J].热带海洋学报,2013,(2):37-46. Xu Chi, Chen Guiying, Shang Xiaodong, et al. The spatial distribution of sources and sinks of ocean mesoscaleeddies[J]. Journalof Tropical Oceanography, 2013, 2: 37-46.
- [6] Wang G, Su J, Chu P C. Mesoscale eddies in the South China Sea observed with altimeter data[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(21): 6-1.
- [7] 林宏阳,胡建宇,郑全安.南海及西北太平洋卫星高度计资料分析:海洋中尺度涡统计特征[J].台湾海峡, 2012, 31(1):105-113.
 Lin Hongyang, Hu Jianyu, Zheng Quanan. Satellite al-timeter data analysis of the South China Sea and the

northwest Pacific Ocean: statistical features of oceanic mesoscaleeddies[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2012, 31(1): 105-113.

 [8] 孙成学,刘秦玉.卫星高度计资料揭示的冬季南海吕 宋冷涡的双涡结构[J]. 热带海洋学报, 2011, 30(3): 9-15.
 Sun Chengxue, Liu Qinyu. Double eddy structure of the winter Luzon Cold Eddy based onsatellite altimeter

data[J]. Journalof Tropical Oceanography, 2011, 30(3): 9-15.

[9] Smith W H F, Strub T, Miller L. First Coastal Altimetry Workshop: Cooperative Institute for Oceanographic Satellite Studies/National Oceanic and Atmospheric Administration Coastal Altimeter Workshop; 5–7 February 2008, Silver Spring, Maryland[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 2008, 89(40): 380.

- [10] AndersenO B, ScharrooR. Range and geophysical corrections in coastal regions: and implications for mean sea surface determination[C]//Vignudelli. Coastal Altimetry. Berlin Heidelberg: Springer, 2011: 104-142.
- [11] Deng X, Featherstone W E. A coastal retracking system for satellite radar altimeter waveforms: application to ERS-2 around Australia[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2006, 111(C6): 285-293.
- [12] Yang L, Lin M, Zhang Y, et al. Evaluation of retracking algorithms over China and adjacent coastal seas[C]//Vignudelli. Coastal Altimetry. Berlin Heidelberg: Springer, 2011: 453-471.
- [13] Brown S. A novel near-land radiometer wet path-delay retrieval algorithm: Application to the Jason-2/OSTM advanced microwave radiometer[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(4): 1986-1992.
- [14] Saraceno M, Strub P T, Kosro P M. Estimates of sea surface height and near surface alongshore coastal currents from combinations of altimeters and tide gauges[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(C11): 2700-2707.
- [15] Altimetry A. SSALTO/DUACS user handbook: (M) SLA and (M) ADT near real time and delayed time products[J]. Rep CLS DOS NT, 2009, 6: 51.
- [16] De Mey P, Robinson A R. Assimilation of altimeter eddy fields in a limited-area quasi-geostrophic model[J]. Journal of Physical Oceanography, 1987, 17(12): 2280-2293.
- [17] Fu L L, Christensen E J, Yamarone C A, et al. TOPEX/POSEIDON mission overview[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012), 1994, 99(C12): 24369-24381.
- [18] Mesias J M, Ted Strub P. An inversion method to determine ocean surface currents using irregularly sampled satellite altimetry data[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1995, 12(4): 830- 849.
- [19] Le Traon P Y, Nadal F, Ducet N. An improved mapping method of multisatellite altimeter data[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1998, 15(2): 522-534.
- [20] Bretherton F P, Davis R E, Fandry C B. A technique for objective analysis and design of oceanographic experiments applied to MODE-73[J]. Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, 1976, 23(23): 559-582.



Sea level anomaly reprocessing for Chinese coastal region

CHEN Ya-fei^{1, 2}, WANG Xiao-chun^{1, 2}, LIU Yi-min³

(1. School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Engineering Technology Research Center of Marine Environment Detection, Nanjing 210044, China; 3. LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Received: Aug. 8, 2015

Key words: sea level anomaly; Chinese coastal region; reprocessing; altimetry; AVISO(Archiving Validation and Interpolation of Satellite Oceanographic Data); tide gauge station

Abstract: Research on reprocessing of satellite level anomalies have mainly focused on European and US coastal regions and to date no studies have been based on satellite sea surface height observations for the Chinese coastal region. Only 50% or 33% of along-track data were used when generating the AVISO(Archiving Validation and Interpolation of Satellite Oceanographic Data) 0.25 degree global sea level anomaly product, which caused certain restrictions in the regional application of the product. This study aims to use an optimal interpolation method with three satellite along-track observations and 25 tide gauge station observations to generate a new sea level anomaly product for the Chinese coastal region. The spatial resolution of the new data product is still 0.25 degrees, but in this study, all along-track observations from three satellites (Jason-1, Jason-2, and CryoSat-2) and 25 tide gauge stations are used. Our method is validated using data from 2012, and the domain of the new data product is 10°S~50°N and 90°E~160°E. The new data product is also validated using the AVISO product, along-track observations, and the analysis indicates that it is closer not only to along-track satellite observations but also to tide gauge station observations. In comparison with the AVISO product, the root mean square error (RMSE) between the new product and along-track satellite observations is reduced by 10.03%, and the RMSE

(本文编辑:李晓燕)