

Jason-2 有效波高产品在中国海域的准确性评估*

王娟娟¹ 高志一¹ 王久珂¹ 李本霞¹ 宋金宝²

(1. 国家海洋环境预报中心 北京 100081; 2. 浙江大学海洋学院 杭州 310058)

摘要 Jason-2 卫星高度计的有效波高(H_s)产品在海洋学领域得到了广泛应用。为了综合评估 Jason-2 有效波高产品在中国多个海域和不同海况下的准确性,为其在中国海域的应用研究提供参考,本文基于国家海洋局 20 个水文气象浮标从 2008 年至 2014 年的长期观测数据,对 Jason-2 有效波高产品在中国三个海区(渤海、东海、南海)和不同海况(观测有效波高 H_s 最大为 6.2m)下的准确性进行综合分析,并研究其准确性与离岸距离的关系。结果表明 Jason-2 有效波高产品: (1)在中国海域具有较好的准确性,均方根误差 RMSE=0.445m; (2)在南海的准确性最高,而在渤黄海的准确性较差; (3)在 $2\text{m} \leq H_s \leq 5\text{m}$ 的海况条件下准确性较好; (4)在越远离陆地的海域准确性越高。

关键词 中国海域; Jason-2; 浮标; 有效波高

中图分类号 P731 **doi:** 10.11693/hyhz20150700180

20 世纪 70 年代以来,遥感观测技术和数据反演算法不断发展进步。在卫星高度计方面,自 1985 年美国海军的 Geosat 卫星(Geodetic satellite)成功发射,已经有多个卫星高度计任务顺利实施,例如: ERS-1/2 (European Remote Sensing-1/2)、TOPEX/Poseidon、Jason-1/2、Envisat(Environmental Satellite)、Cryosat-2 和 HY-2 等(Queffeulou *et al.*, 2007; Durrant *et al.*, 2009; Zieger *et al.*, 2009; Abdalla *et al.*, 2011; Jiang *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2015)。目前,卫星高度计对全球海面高度的测量精度已经达到了厘米级(Ablain *et al.*, 2010; Desai *et al.*, 2010; Ray *et al.*, 2012)。除了海面高度以外,卫星高度计还可以获取海面的风速、有效波高和潮位等信息。与传统的海洋站、浮标和船舶观测相比,卫星高度计观测克服了时间和空间上的局限性,具有全天候、高分辨率和高空间覆盖率等特点。

随着 ERS-1/2、TOPEX/Poseidon 和 Jason-1/2 等卫星数据产品的大量应用(程永存等, 2008; 于振涛等, 2006; 范陈清等, 2014),卫星高度计已经逐渐成为物理海洋学和海洋测绘学领域的重要研究手段。特别是 Jason-2 卫星高度计的数据产品,发展较为成熟,在大量研究中得到应用,是高度计研究及应用技术的

典范。

关于 Jason-2 卫星高度计产品的有效性和准确性,已经有大量研究通过与浮标观测数据(例如: 美国数据浮标中心的 NDBC 浮标数据)的对比分析得以证明。Abdalla 等(2010)利用与浮标观测匹配的 24908 组数据,对 Jason-2 的风速和有效波高产品进行评估验证,其有效波高的覆盖范围达 11m,评估得到平均偏差 Bias=0.0290m,标准偏差 STD=0.4119m。此外,他们还认为在 H_s (有效波高)>6m 时,Jason-2 有效波高产品存在偏大现象。Queffeulou 等(2011)利用与浮标匹配的 3919 组数据对 Jason-2 有效波高产品进行验证,得到 Bias=-0.0569m, STD=0.2169m。叶小敏等(2014)利用 NDBC 浮标数据对 2011 年的 Jason-2 海面风速和有效波高产品进行了检验,匹配数据 1635 组,评估得到相关系数 $R=0.97$,均方根误差 RMSE=0.28m, STD=0.28m, Bias=-0.02m。Zhang 等(2015)比较了 27 个月的 NDBC 浮标和 Jason-2 有效波高产品,得到 RMSE=0.292m, Bias=0.016m。此外,Shanas 等(2014)使用印度海域四个浮标的观测数据,评价 Jason-1、Jason-2、Envisat 和 ERS-2 四个卫星高度计的有效波高产品,分析认为它们都高估了有效波高,且在

*中国科学院海洋环境与波动重点实验室开放基金项目, KLOCAW1409 号; 国家科技支撑计划项目, 2013BAB04B003 号。王娟娟, 博士, E-mail: wangjj@nmefc.gov.cn

收稿日期: 2015-07-08, 收修改稿日期: 2015-12-01

$H_s < 0.5\text{m}$ 的情况下相关性极差, 其中 Jason-2 产品与浮标观测的相关性最好。

Jason-2 有效波高产品在中国海域的评估验证相对较少。Chen 等(2013)用南海现场观测和 NDBC 浮标的数据, 评估 Jason-1/2 和 HY-2 的有效波高产品, 获得 Jason-2 有效波高产品的 RMSE=0.36m。但是在南海的匹配数据仅有 10 组, 且均为有效波高小于 3m 的低海况数据。Park 等(2013)使用韩国气象局的海洋气象浮标数据, 验证 Topex/Poseidon, Jason-1, Envisat

和 Jason-2 的有效波高产品, 浮标观测有效波高的上限为 4m, 其位于中国黄海的浮标(34.78°N, 125.77°E)观测与 Jason-2 有效波高产品的相关性很差, 对比组 114 个, RMSE=1.1310m。而另一位于中国黄海的浮标(36.25°N, 125.75°E), 相对远离大陆和岛屿, 与 Jason-2 匹配的对比组为 88 个, 评估得到 RMS=0.3304m, Bias=0.1413m, $R=0.9161$, 准确性较好。

综合上述对 Jason-2 有效波高产品的评估研究, 将其主要结论汇总在表 1 中。

表 1 对 Jason-2 有效波高产品的研究及其主要结论⁽¹⁾
Tab.1 Comparison of validation on Jason-2 significant wave height product⁽¹⁾

参考文献	RMSE	Bias	STD	R	N	H_s 上限及结论
Abdalla 等(2010)	0.4119	0.0290			24908	$H_s < 11\text{m}$; $H_s > 6\text{m}$ 时, 偏大
Queffelec 等(2011)		-0.0569	0.2169		3919	$H_s < 10\text{m}$
叶小敏等(2014)	0.2800	-0.0200	0.2800	0.9700	1635	NDBC, $H_s < 10\text{m}$
Zhang 等(2015)	0.2920	0.0160				NDBC, $H_s < 10\text{m}$
Chen 等(2013)	0.3600					NDBC, $H_s < 7\text{m}$ 南海, $H_s < 3\text{m}$
Park 等(2013)	0.3304	0.1413		0.9161	88	黄海, $H_s < 4\text{m}$
	1.1310				114	黄海, $H_s < 4\text{m}$

(1) RMSE 为均方根误差, Bias 为平均偏差, STD 为标准偏差, R 为相关系数, N 为匹配数据量

RMSE: root mean square error; Bias: the mean bias; STD: standard deviation; R : correlation coefficient; N : data amount

从表 1 中可以看出, 在中国海域以外的 Jason-2 有效波高产品验证, 匹配数据量较多, 有效波高覆盖范围较广, 评估得到的 RMSE 在 0.28m 至 0.4119 之间, 准确性良好。但是, 在中国海域的评估研究却非常少, 只有少数几个浮标短时间观测的评估, 可用的匹配数据量严重不足, 且有效波高普遍在 4m 以下, 覆盖范围较窄。此外, 不同浮标获得的评估参数也存在较大差异。

为了进一步了解 Jason-2 有效波高产品在中国海域的准确性, 我们认为可以参考 TOPEX 和 Jason-1 卫星在中国海域的评估结果。Jason-2 是 TOPEX 和 Jason-1 的后续卫星, 它们在多数方面基本一致(Quartly, 2010), 关于它们在中国海域的准确性评估也有一些研究。Ebuchi 等(1994)利用 JMA(Japan Meteorological Agency)在中国东海(浮标位置: 28°10'N, 126°20'E。)的浮标数据, 比较了 TOPEX 的有效波高产品, 评估参数 Bias=0.31m(Ku-band)和 0.32m(C-band), RMSE=0.50m(Ku-band)和 0.54m(C-band)。刘花等(2013)利用南海北部近岸海域 3 个浮标的观测数据(观测有效波高低于 3m), 评估分析了 Jason-1 的有效波高产品, 评估得到的 RMSE 小于 0.35m, 相关系数大于 0.95, 并认为 Jason-1 的有效波高产品整体偏大, 且与浮标波高的差异随着波高的

增大而逐渐增加。

TOPEX 在东海的评估 RMSE 在 0.5m 左右, Jason-2 在南海的评估 RMSE 小于 0.35m, 相比于 Jason-2 略偏大。但是, 它们所使用的匹配数据量不足, 有效波高的范围较窄, 整体的参考意义有限。

由于缺乏大范围、长时间和多海况覆盖的海浪观测, 导致在中国海域缺乏 Jason-2 有效波高产品的综合评估, 这使得很多研究在中国海域使用 Jason-2 有效波高产品时, 无法详细了解其准确程度和适用范围。

作者对国家海洋局在中国海域布放的 28 个水文气象浮标的历史数据进行了多渠道的收集和整理, 完成了繁琐的解码和质量控制工作, 获得了从 2002 年至 2014 年之间的中国海域水文气象观测数据。本文采用的是从 2008 年至 2014 年之间较为完整的海浪浮标观测数据, 对渤海、东海和南海三个分海区, 以及对不同海况下的 Jason-2 有效波高产品准确性进行评估。本文的结果可以为 Jason-2 有效波高产品在中国不同海域和多种海况下的应用研究提供参考。

1 数据

1.1 Jason-2 卫星高度计有效波高产品

作为 OSTM(Ocean Surface Topography Mission)

任务 TOPEX/Poseidon 和 Jason-1 的后继卫星, Jason-2 卫星于 2008 年 6 月 20 日在美国加利福尼亚州的范登堡空军基地成功发射。它是由 CNES(Centre National d'Etudes Spatiales)、NASA、EUMETSAT(the European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites)和 NOAA 合作完成, 其上搭载了双频高度计、三频微波辐射计和高精度定位系统。海面测高精度为 2.5—3.4cm, 有效波高精度为 0.4m 或 10%。该卫星的轨道高度为 1336km, 轨道倾角 66.039° , 重复周期约为 10 天, 与 TOPEX/Poseidon 和 Jason-1 卫星基本相同。

本文选用 Jason-2 经过完全校正的 GDR (Geographical Data Record)数据, 其轨道精度高, 并且进行了波形重定等校正, 数据准确度较高。Jason-2 有效波高产品有 Ku 波段和 C 波段观测两种, 由于 2011 年 OSTM/Jason-2 产品说明书中认为 Ku 波段观测优于 C 波段, 因此, 本文采用 Ku 波段数据, 其数据精度为 0.001m。

使用该数据之前, 还需要对其进行筛选和质量控制, 例如: 剔除陆地、冰面、降雨条件下以及数据可信度标志为假的数据。本文采用 2011 年 OSTM/Jason-2 产品说明书中推荐的判据进行质量控制。

1.2 国家海洋局水文气象浮标

为了满足业务化海洋预报和海洋灾害预警的需要, 国家海洋局在渤海、东海和南海总计布放了 28 个常年运行的浮标, 用于观测海面上的气象和水文要素。最早的浮标观测数据始于 2002 年, 但完整性较差。从 2008 年以后, 所有浮标的观测数据才趋于完整和连续。

浮标观测的数据格式有 FUB 报文和可扩展标记语言 Xml 两种。渤海数据主要为 FUB 格式, 东海和南海早期也为 FUB 格式, 从 2011 年之后陆续更改为 Xml 格式。FUB 报文按照国际统一的报文编码规范, 有效波高的数据精度为 0.5m, 风速精度 1m/s, 有效波周期精度 1s, 浮标位置精度 0.1° , 风向精度 10° , 气温和水温精度 0.1°C 。观测要素包括: 风速、风向、气温、大气压、水温、有效波高、有效波周期、最大波高, 最大波周期等。

Xml 格式数据精度高于 FUB 报文。其有效波高的精度为 0.1m, 风速精度 0.1m/s, 有效波周期精度 0.1s, 浮标位置精度 $0.01'$, 风向精度 1° , 气温精度 0.1°C , 水温精度 0.01°C 。观测要素除 FUB 格式包含的所有要素外, 还包括: 相对湿度、平均波高、平均波

周期、平均波向、十分之一波高、十分之一波周期等。

为了保证浮标业务化运行, 国家海洋局会定期进行维修和养护, 可能会拖动或移动浮标, 此外, 还由于风吹和海流的动力拖曳作用, 浮标位置从长期来看有小幅变化。

2 评估分析

2.1 数据匹配

Jason-2 有效波高产品和浮标数据的匹配方法为: 浮标在 t 时刻的位置经纬度(x, y), 筛选 Jason-2 产品中同时满足下列两个条件的数据: (a)落在以浮标位置(x, y)为圆心, 以匹配距离 d_s 为半径的圆形范围内, (b)与 t 时刻的绝对时间差不超过 dt (小时)。根据上述的距离和时间窗口, 匹配出对应浮标 t 时刻的所有卫星数据点, 并对存在多个卫星数据点的情况下剔除超过 3 倍标准差的异常点。

Jason-2 卫星沿着固定轨道运行, 并有一定的重复周期。而浮标位置长期来看是略有变化的, 其观测频率一般为 1 小时 1 次。在实际的对比分析中不可能得到与浮标观测随时同步且位置绝对重合的 Jason-2 数据。所以, 时间和距离窗口的选择不可避免成为两者差异的原因之一。在以往类似的评估研究中, 一般采用距离 50km 和时间 30min 的窗口。

相比于 Jason-2 数据, 本文使用的浮标数据在时间上较为连续, 观测间隔为 1 小时, 因此采用 30min 作为时间匹配窗口比较合适。在距离窗口的选取方面, 本文对不同匹配距离下的误差和数据量情况进行了综合比较, 见图 1, 据此来分析不同匹配距离对评估结果的影响, 以得到合适的距离窗口。

从图 1 中可以看出, 在匹配距离为 20、30 和 40km 时, 四个误差统计参数(RMSE、Bias、AE、STD)随匹配距离的变化都非常小, 而数据量则逐渐增加。在匹配距离为 50km 时, RMSE 增大非常明显, 而且大误差区域内的数据量明显增多。研究中为了保证尽量多的数据, 又为了兼顾匹配距离的合理性和较小的误差, 选用了 40km 作为匹配距离, 比传统的 50km 略小。

按照上述窗口和匹配方法, 对 2008 年至 2014 年期间的浮标数据和 Jason-2 产品进行匹配。由于 Jason-2 的轨道位置固定, 而浮标位置的变化不大, 得到 20 个可用的浮标, 包括: 渤海 10 个、东海 6 个、南海 4 个。最终获得 Jason-2 和浮标的有效波高匹配数据 26060 组, 其中在渤海、东海和南海分别为 11976 组、8678 组和 5406 组。

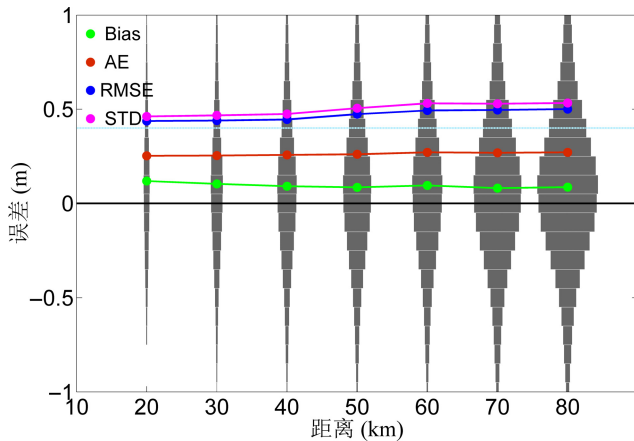


图 1 误差参数和匹配数据量随匹配距离的变化

Fig.1 Error parameters and data sizes vary with the matching distances

Bias: 平均偏差; AE: 平均绝对误差; RMSE: 均方根误差; STD: 标准差。7 个子直方图表示 7 个不同匹配距离下的数据量分布, 矩形的宽度表示该区域的数据量

此外, 本文用于验证 Jason-2 有效波高产品准确性的评估参数包括: 假设 Jason-2 产品为 $X_{\text{Jason-2}}$, 浮标观测为 X_{buoy} , Jason-2 的测量偏差 $x = X_{\text{Jason-2}} - X_{\text{buoy}}$, 则

平均偏差 $\text{Bias} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, 平均绝对误差 $\text{AE} =$

$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i|$, 平均相对误差 $\text{RE} =$

$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[|x_i| / \{X_{\text{buoy}}\}_i \right] \times 100$, 均方根误差 $\text{RMSE} =$

$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i)^2}$, 标准差 $\text{STD} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ 。

2.2 不同海区的评估

基于上述匹配数据, 计算 Jason-2 有效波高产品在各个浮标位置上的评估参数。为了能够清晰查看各项评估参数的空间分布特性, 图 2 中展示了各个浮标位置上的四项评估参数及数据量。由于渤海的浮标布放非常密集, 将其放大后在左侧子图中进行展示。

从图 2 可以看出, RMSE 普遍不超过 0.7m, 但是在东海浮标位置上的 RMSE 相对较大, 特别是台湾海峡北端。在渤黄海的 RMSE 则相对较小, 南海次之, 都在 0.3m 至 0.5m 之间。从相对误差 RE 的空间分布上来看, 渤黄海和台湾海峡北端浮标的 RE 普遍在 30% 左右, 相对较大。相关系数 R 方面, 渤黄海浮标的相关系数 R 在 0.4 至 0.7 左右, 明显小于南海和东海。综合来看, 南海相比于渤黄海和东海, 其 RMSE、相对误差 RE 和绝对误差 AE 均相对较小, 相关系数 R 较大, 这说明 Jason-2 有效波高产品在南海比较准确。

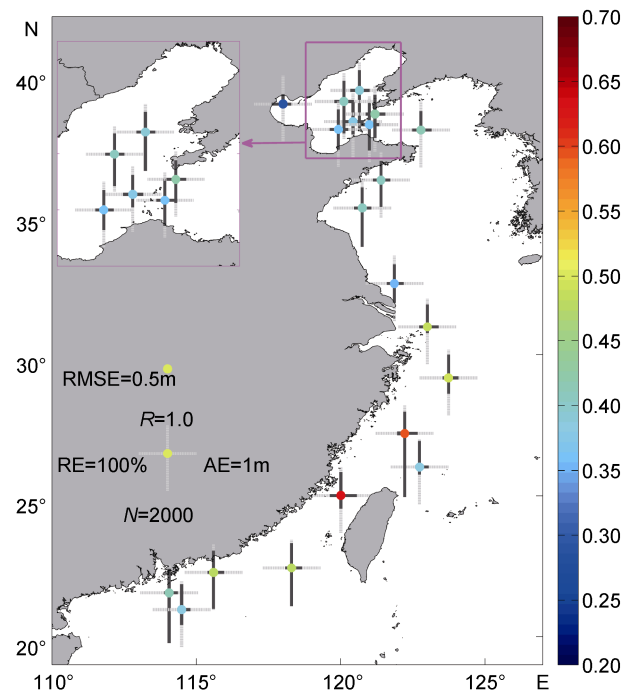


图 2 中国海域各个浮标位置上的 Jason-2 评估参数和数据量 N

Fig.2 Parameters for validation of Jason-2 products and the data size N on each buoy position in Chinese marine territories R 为相关系数

Jason-2 在渤黄海浮标位置上的 RMSE 相对较小, 并不能说明在渤黄海的准确性好, 因为其相对误差 RE 和相关系数 R 都表现不佳。RMSE 较小可能是由于该海域的匹配数据集中在较小的有效波高范围内。为此, 本文在图 3 中展示了三个海区 and 整个中国海的 Jason-2、浮标有效波高匹配数据对比。从图 3 中可以发现, 渤黄海的浮标观测最大有效波高仅为 3.5m, 且大部分都集中 2.5m 以下。这与渤黄海特殊的地理和海洋环境有关: 水深较浅, 没有强盛的大风过程影响, 大浪一般是由冷空气和温带气旋引起, 这导致该海域的极值浪高普遍不大, 而且全年出现大浪过程的次数相比东海和南海较少。

浮标观测有效波高在 4m 以上的数据量较少, 且主要集中在东海和南海, 有效波高大于 6m 的数据仅有在南海的 13 组。东海和南海每年都会受到强台风过程的影响, 因此浮标能够捕捉到较大的浪高。但是, 由于浮标数据需要与 Jason-2 数据进行匹配, 所以有效波高 4m 以上的匹配数据量较少。

上述对 Jason-2 有效波高产品在三个海区的准确性给出了常规定性分析, 下面将通过评估参数值的大小进行定量分析。表 2 中列出了三个海区和整个中国海的 5 个评估参数和匹配数据量的值, 矩形的长度

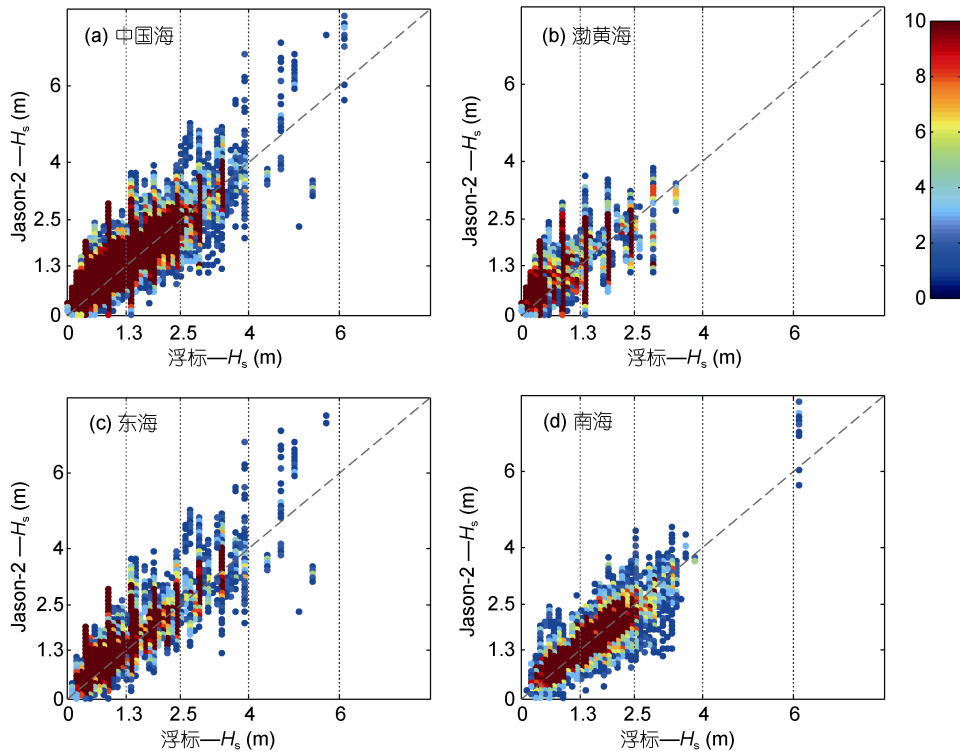


图 3 Jason-2 有效波高产品和浮标有效波高(H_s)的对比
Fig.3 The significant wave height (H_s) comparison between buoy data and Jason-2 product
散点的颜色代表数据量

代表数值的大小,更易于比较。

从偏差 Bias 上来看,三个海区均为正值,说明 Jason-2 的有效波高产品偏大。东海的偏差最大,渤海次之,南海接近于 0,这说明 Jason-2 有效波高在东海的偏大程度最高,在南海则基本上无偏。从图 3 中 Jason-2 与东海浮标的对比数据来看,Jason-2 与浮标差别较大的数据主要分布在有效波高大于 4m 的情况。而且,由于浪高较大,此区域的偏差值对整体偏差的影响也较为明显。

从绝对误差 AE 和 RMSE 上来看,东海比渤海和南海都要大,初步猜测也是由于有效波高 4m 以上的数据所引起。为了进一步分析三个海区的准确性差异,我们参考相对误差 RE 和相关系数 R 。可以发现,东海的相对误差和相关系数均要优于渤海。这说明东海由于有效波高 4m 以上的大值点较多,导致 Jason-2 与浮标之间的绝对型误差参数 AE、RMSE、Bias 较大,但是由于相对误差和相关系数的值均较优,其准确性要高于渤海。

三个海区中,南海的 5 项评估参数均为最优,充分说明 Jason-2 有效波高在南海的准确性最高。只是南海的数据量相比于渤海要少得多,且 4m 以上有

效波高的数量也少于东海。

表 2 中国海区的评估参数和数据量
Tab.2 Validation parameters and data sizes in marine areas of China

	Bias (m)	AE (m)	RMSE (m)	RE (%)	R	N
渤海	0.066	0.339	0.392	30.58	0.714	11976
东海	0.183	0.402	0.526	24.92	0.831	8678
南海	0.002	0.327	0.435	18.40	0.841	5406
中国海	0.091	0.358	0.445	25.21	0.826	26060

注:矩形的长度代表数值的大小

综上,在整个中国海域,Jason-2 有效波高产品与浮标观测的综合评估情况如下:平均偏差 Bias 为正值 0.091m,绝对偏差 AE 为 0.358m, RMSE 为 0.445m,相对误差 RE 为 25.21%,相关系数 R 为 0.826。参考表 1 中 Jason-2 评估研究的误差参数值, RMSE 在 0.28m 至 1.131m 之间, Bias 在 -0.0569m 至 0.1413m 之间, R 在 0.9161 至 0.97 之间。因此,本文研究认为 Jason-2 有效波高产品在中国海域的准确性较好,具有良好的代表性;在南海的准确性最好,在渤海的准确性相对较差。

2.3 不同海况下的评估

上述 3.2 节对 Jason-2 有效波高产品在三个海区

的准确性进行了评估,但是由于各个海区的有效波高最大值存在明显差异,导致评估结果存在一定的局限性。为了评价 Jason-2 有效波高产品在各种海况下的准确性,本文在图 4 中展示了三个评估参数随有

效波高的变化情况,并区分了各个浪级。轻浪: $0\text{m} < H_s < 1.3\text{m}$, 中浪: $1.3\text{m} \leq H_s < 2.5\text{m}$, 大浪: $2.5\text{m} \leq H_s < 4\text{m}$, 巨浪: $4\text{m} \leq H_s < 6\text{m}$, 狂浪: $6\text{m} \leq H_s < 9\text{m}$ 。其中,观测有效波高最大为 6.2m 。

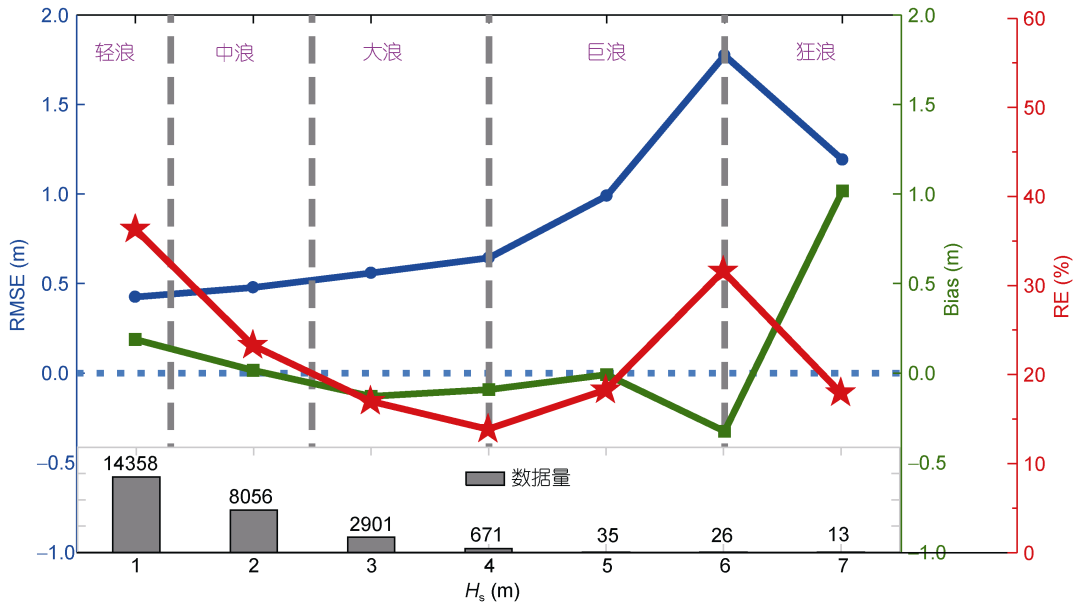


图 4 评估参数和数据量随有效波高的变化

Fig.4 The validation parameters and data sizes vary with significant wave height

从图 4 中可以看出, RMSE 随着有效波高增大而增加,在 $H_s > 5\text{m}$ 时开始迅速增大,说明 Jason-2 与浮标之间的偏差程度随波高而不断增大。偏差 Bias 的绝对值在 $H_s \leq 5\text{m}$ 时均小于 0.2m ,十分接近于 0,证明 Jason-2 与浮标观测有效波高之间是基本无偏的。而在 $H_s > 5\text{m}$ 时 Bias 的数值开始增大,当 $H_s > 6\text{m}$ 时 Bias 已经超过 1.0m 且为正值,说明在 $H_s > 6\text{m}$ 的情况下 Jason-2 有效波高产品明显偏大。这与 Abdalla 等 (2010)研究的结论类似,他们将 Jason-2 有效波高产品与浮标数据对比后,认为 Jason-2 在 $H_s > 6\text{m}$ 时明显偏大。相对误差 RE 在 $2\text{m} \leq H_s \leq 5\text{m}$ 时普遍低于 25%,而在 $H_s = 1\text{m}$ 和 6m 时均大于 30%。

因此,综合来看,在 $2\text{m} \leq H_s \leq 5\text{m}$ 的情况下, RMSE、偏差 Bias 和相对误差 RE 均较小,说明 Jason-2 有效波高产品在此范围内准确性最好。在 $H_s = 1\text{m}$ 时,相对误差 RE 略偏大, RMSE 和 Bias 较小, Jason-2 的准确度一般。在 $H_s > 5\text{m}$,特别是 $H_s \geq 6\text{m}$ 时, RMSE 和 Bias 都较大, Jason-2 的准确度略差。

此外,表 3 展示了从轻浪到狂浪级别下的偏差 Bias、平均绝对误差 AE、RMSE、相对误差 RE、相

关系系数 R 以及该浪级下的数据量 N 。与上述结论基本类似。

表 3 不同浪级下的评估参数和数据量
Tab.3 Validation parameters and data amount under different wave states

	Bias (m)	AE (m)	RMSE (m)	RE (%)	R	N
轻浪	0.182	0.326	0.422	33.80	0.637	15480
中浪	-0.012	0.372	0.487	22.03	0.688	8133
大浪	-0.144	0.476	0.598	16.72	0.773	2309
巨浪	-0.133	1.005	1.217	22.00	0.553	125
狂浪	1.017	1.113	1.192	17.95	0.260	13

注:矩形的长度代表数值的大小

在轻浪条件下, RMSE、Bias 和绝对误差 AE 虽然较小,但是相对误差 RE 却比其余浪级明显偏大。在中浪和大浪条件下,各项误差统计参数均较小, RMSE 在 0.4m 至 0.6m 之间,相对误差 RE 在 16%至 23%之间,相关系数大于 0.68,数据量超过 2000 组,评估参数整体表现都较优。巨浪下的各项评估参数比中浪和大浪略差,相关系数仅为 0.553,数据量也仅有 125 组。狂浪下的各项评估参数表现最差,特别是相关系数,但是由于数据量仅为 13 组,统计学上的

代表意义不足。因此,我们认为 Jason-2 有效波高产品在中浪和大浪下的准确性最好,在轻浪和巨浪下表现略差。

3 讨论

3.1 渤海湾准确性较差的原因分析

对 Jason-2 有效波高产品在三个分海区的评估分析,认为其在渤海湾的准确性较差,究其原因,我们认为主要有以下 4 个方面:

(1) 浮标观测有效波高的数据精度

渤海湾浮标数据格式 70%以上为 FUB 报文,其有效波高的精度仅为 0.5m,这会导致与 Jason-2 有效波高的相关性变差。

(2) 浮标多数靠近近岸

渤海湾的浮标距离岸线普遍较近,而卫星高度计的信号越靠近陆地,越容易受到各种杂波信号的干扰。虽然我们对 Jason-2 数据进行了质量控制,剔除了陆地上和异常的轨道点,但是仍然不能完全排除陆地对卫星高度计数据的影响。

(3) 水深较浅

渤海湾的水深较浅,特别是渤海湾水深仅有十几米,这导致波浪破碎、白冠、浪-流相互作用等非线性动力效应较强。这可能会导致海面反射回卫星高度计的回波信号发生异常,从而影响有效波高产品的准确度。

(4) 有效波高以轻浪为主

Jason-2 有效波高在不同海况下的评估分析表明其在轻浪条件下准确性稍差。而渤海湾浮标的观测有效波高 50%以上都为轻浪,这也会导致其整体的准确性变差。

3.2 离岸距离对 Jason-2 准确性的影响

为了研究远离陆地的距离和水深对 Jason-2 有效波高产品准确性的影响,我们利用与 Jason-2 匹配的浮标所在的离岸距离和水深,分析 Jason-2 的准确性随离岸距离和水深的变化情况。考虑到各个浮标的有效波高分布范围差异较大,采用绝对型的评估参数 RMSE、Bias 和 AE 等可能会对分析结果带来错误的判断,因此选择了相对型的评估参数:相关系数和相对误差。评估参数随离岸距离的变化情况见图 5。

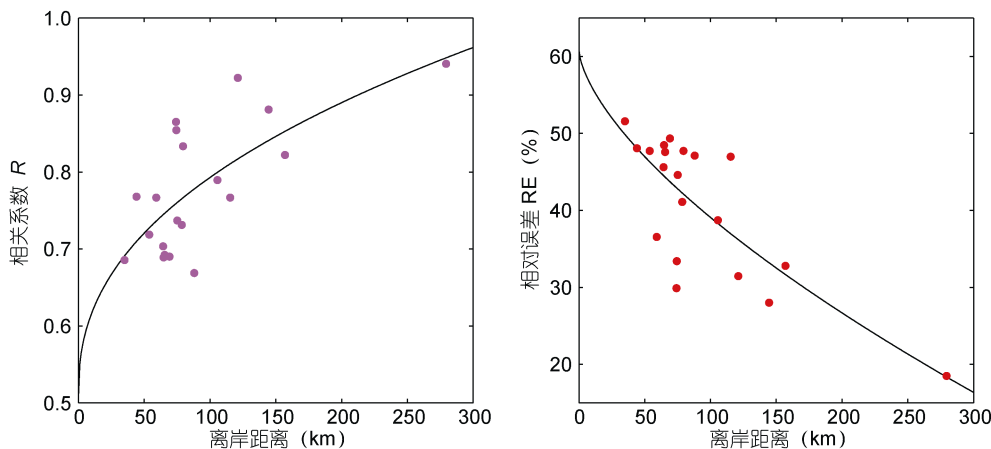


图 5 Jason-2 评估参数随离岸距离的变化

Fig.5 The validation parameters of Jason-2 vary with distances away from land

图中黑色曲线为最小二乘法拟合曲线

Black line is the curve of least-square fitting.

从图 5 中可以看出,相关系数 R 随着离岸距离而逐渐增大,在最远的离岸距离 279km 位置上,相关系数达到了 0.94,而在离岸距离低于 100km 时,相关系数可以低至 0.66。相对误差随着离岸距离的增大而逐渐减小,在最远的离岸距离位置上,相对误差为 17.8%,在离岸距离低于 100km 时,相对误差可以高达 51.5%。因此,我们认为 Jason-2 有效波高产品的准确性随着离岸距离增加会显著提高。而且,从卫星高

度计测高的原理上来说,陆地对卫星信号的污染效应是十分明显的,远离陆地的海域卫星高度计信号的可信度会更高。

Jason-2 评估参数随水深的变化曲线与图 5 大致类似,但是数据点较为分散,规律性不强,准确性随水深增加的特征不是很明显,因此本文没有进行展示和详细分析。

此外,在对 Jason-2 的评估分析中,匹配数据中

巨浪和狂浪条件下的数据量分别为 125 组和 13 组,且有效波高的分布无法覆盖狂浪的全部范围,考虑到样本数太少带来的偶然误差影响,在一定程度上会降低巨浪和狂浪条件下的分析结果可靠性。

4 结论

基于上述分析,总结得到 Jason-2 有效波高产品在中国海域的准确性评估结论如下:

(1) Jason-2 有效波高产品在中国海域具有较好的准确性。偏差 Bias=0.091m, 绝对误差 AE=0.358m, 均方根误差 RMSE=0.445m, 相对误差 RE=25.21%, 相关系数 $R=0.826$ 。

(2) Jason-2 有效波高产品在南海的准确性最好,而在渤黄海的准确性较差,主要原因可能是数据精度较低、靠近近岸和水深较浅等。

(3) 在不同海况下, Jason-2 有效波高产品在 $2\text{m} \leq H_s \leq 5\text{m}$ 的情况下准确性较好,在 $H_s > 5\text{m}$ 时准确性略差。

(4) Jason-2 有效波高产品的准确性随着离岸距离的增加会显著提高。

此外需要注意,所有的匹配数据组中,有效波高观测值绝大多数都在 4m 以下,虽然符合近海的一般海况条件,但是缺乏高海况下的对比数据。因此,本文的评估分析结果有一定的适用局限性。

参 考 文 献

- 于振涛,陈锐,2006. JASON-1 与 TOPEX/POSEIDON 卫星高度计数据在中国海和西北太平洋的一致性分析及印证. 中国海洋大学学报, 36(S1): 189—196
- 叶小敏,林明森,宋庆君,2014. 基于现场观测数据的卫星雷达高度计海面风速和有效波高真实性检验方法研究. 遥感技术与应用, 29(1): 26—32
- 刘花,王静,齐义泉等,2013. 南海北部近岸海域 Jason-1 卫星高度计与浮标观测结果的对比分析. 热带海洋学报, 32(5): 15—22
- 范陈清,张杰,孟俊敏等,2014. HY-2A 卫星高度计有效波高信息提取业务化算法. 海洋学报, 36(3): 121—126
- 程永存,徐青,刘玉光等,2008. T/P, Jason-1 测量风速及有效波高的验证与比较. 大地测量与地球动力学, 28(6): 117—122
- Abdalla S, Janssen P A E M, Bidlot J R, 2010. Jason-2 OGDR wind and wave products: monitoring, validation and assimilation. Marine Geodesy, 33(S1): 239—255

- Abdalla S, Janssen P A E M, Bidlot J-R, 2011. Altimeter near real time wind and wave products: random error estimation. Marine Geodesy, 34(3—4): 393—406
- Ablain M, Philipps S, Picot N *et al*, 2010. Jason-2 global statistical assessment and cross-calibration with Jason-1. Marine Geodesy, 33(S1): 162—185
- Chen C T, Zhu J H, Lin M S *et al*, 2013. The validation of the significant wave height product of HY-2 altimeter-primary results. Acta Oceanologica Sinica, 32(11): 82—86
- Desai S D, Haines B J, 2010. Precise near-real-time sea surface height measurements from the Jason-1 and Jason-2/OSTM missions. Marine Geodesy, 33(S1): 419—434
- Durrant T H, Greenslade D J, Simmonds I, 2009. Validation of Jason-1 and Envisat remotely sensed wave heights. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 26(1): 123—134
- Ebuchi N, Kawamura H, 1994. Validation of wind speeds and significant wave heights observed by the TOPEX altimeter around Japan. Journal of Oceanography, 50(4): 479—487
- Jiang X W, Lin M S, Liu J Q *et al*, 2012. The HY-2 satellite and its preliminary assessment. International Journal of Digital Earth, 5(3): 266—281
- Park K A, Woo H J, Lee E Y *et al*, 2013. Validation of significant wave height from satellite altimeter in the seas around Korea and error characteristics. Korean Journal of Remote Sensing, 29(6): 631—644
- Quartly G D, 2010. Jason-1/Jason-2 metocean comparisons and monitoring. Marine Geodesy, 33(S1): 256—271
- Queffelec P, Bentamy A, 2007. Analysis of wave height variability using altimeter measurements: application to the Mediterranean Sea. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 24(12): 2078—2092
- Queffelec P, Arduin F, Lefèvre J M, 2011. Wave height measurements from altimeters: validation status & applications. In: Ocean Surface Topography Science Team Meeting, San Diego, California, 2011
- Ray R D, Beckley B D, 2012. Calibration of ocean wave measurements by the TOPEX, Jason-1, and Jason-2 satellites. Marine Geodesy, 35(S1): 238—257
- Shanas P R, Sanil Kumar V, Hithin N K, 2014. Comparison of gridded multi-mission and along-track mono-mission satellite altimetry wave heights with in situ near-shore buoy data. Ocean Engineering, 83: 24—35
- Zhang H F, Wu Q, Chen G, 2015. Validation of HY-2A remotely sensed wave heights against buoy data and Jason-2 altimeter measurements. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 32(6): 1270—1280
- Zieger S, Vinoth J, Young I R, 2009. Joint calibration of multiplatform altimeter measurements of wind speed and wave height over the past 20 years. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 26(12): 2549—2564

VALIDATION ON JASON-2 SIGNIFICANT WAVE HEIGHT PRODUCT FOR CHINA SEAS

WANG Juan-Juan¹, GAO Zhi-Yi¹, WANG Jiu-Ke¹, LI Ben-Xia¹, SONG Jin-Bao²

(1. *National Marine Environment Forecasting Center, Beijing 100081, China;*

2. *Ocean College, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China*)

Abstract The significant wave height (H_s) product of Jason-2 satellite altimeter has been applied in many fields of oceanography. However, due to lack of long-period and wide-coverage wave observation for China seas, the accuracy of Jason-2 significant wave height product remains in poor validation. To validate Jason-2 significant wave height product under different wave states in China seas, and provide a reference for the application of the product, we employed 20 hydro-meteorological buoy data in 2008—2014 from the State Oceanic Administration (SOA) of China to evaluate the product in three sea areas (Bohai Sea and Yellow Sea, East China Sea, and the South China Sea) at different wave states (the maximum H_s is 6.2m). Results show that Jason-2 significant wave height product is good for the application for China seas (the root mean square error is only 0.445m, and best applied in the South China Sea). In addition, it is ideal when $2\text{m} \leq H_s \leq 5\text{m}$; and the accuracy becomes higher with distance away from land.

Key words China seas; Jason-2; buoy; significant wave height