

# 基于遥感资料和观测数据的重点海域海表盐度评估分析\*

## Assessment and Analysis of Sea Surface Salinity in Key Ocean Regions Based on Remote Sensing Dataset and Observation Data

黄明海, 张彪, 陈忠彪, 何宜军

HUANG Ming-hai, ZHANG Biao, CHEN Zhong-biao, HE Yi-jun

(南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏省海洋环境探测工程技术研究中心, 江苏南京 210044)  
(Jiangsu Engineering Technology Research Center of Marine Environment Detection, School of Marine Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu, 210044, China)

**摘要:**【目的】通过验证 Aquarius 海表盐度遥感产品数据在不同大洋和波束的反演精度, 为其应用提供依据。【方法】基于自沉浮式剖面探测浮标 Argo (Array for real-time geostrophic oceanography) 盐度观测数据评估 Aquarius 卫星在重点海域(太平洋、大西洋、印度洋)和不同波束对应的海表盐度产品精度。【结果】相对于波束 2 和波束 3, 波束 1 海表盐度与 Argo 观测最为接近, 偏差和均方根差分别为 0.003 psu 和 0.397 psu。与大西洋和印度洋相比, 太平洋反演精度最高。在中纬度地区, 盐度偏差较小, 约为 0.1 psu; 在南北纬 20° 和高纬度区域, 盐度偏差较大, 约为 0.2 psu; 低海温和高风速对盐度误差也有重要贡献, 低海温对应的弱亮温信号和高风速下的不准确的海面粗糙度模型是导致盐度偏差的主要因素。此外, 利用 Argo 月平均海表盐度观测数据评估了 Aquarius 卫星海表盐度三级产品, 均方根差在 0.27~0.34 psu 之间, 平均值为 0.31 psu。在二级和三级产品中, V3.0 SSS\_bias\_adj 的均方根差相比 V3.0 SSS 均降低约 0.04 psu。【结论】与 V2.0 数据产品相比, V3.0 二级产品精度有了较大提高, 三级产品无明显改善, 升轨和降轨的偏差依然存在。海表温度校正能够提高盐度反演的精度, 使得均方根误差下降 0.04 psu。

**关键词:** Aquarius 卫星 海表面盐度 Argo 浮标 准确度评估

**中图分类号:** P714.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2015)03-0329-08

**Abstract:**【Objective】Ocean salinity plays key roles in the global hydrological cycle, ocean circulation and in regulating Earth's climate. The accuracy of sea surface salinity retrieved from different oceans and beams was analyzed in order to provide the basis for the application of Aquarius remote sensing products data.【Methods】The data of sea surface salinity products were obtained by Aquarius satellite in key ocean regions (Pacific, Atlantic and Indian Ocean) with different beams, and their quality was evaluated based on Argo observations.【Results】Compared to beam 2 and beam 3, the sea surface salinity retrieved by beam 1 measurements is most close to Argo data. The bias and root mean square error (RMSE) are 0.003 psu and 0.397 psu, respectively.

The salinity difference is small in middle latitude regions, and large in low and high latitude areas, which is about 0.1 and 0.2 psu, respectively. Low sea surface temperature and high wind speed have influence on the salinity difference. The weak brightness temperature signal associated with low sea surface temperature and inaccurate ocean surface roughness model at high wind speeds are the key factors to

收稿日期: 2015-06-08

修回日期: 2015-06-18

作者简介: 黄明海(1993-), 男, 本科, 主要从事物理海洋研究。

\* 国家自然科学基金项目(41476158)和江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目(201410300010)资助。

the salinity discrepancy. Sea surface temperature adjustment can improve the accuracy of salinity retrieval, which decreases the RMSE to 0.04 psu. In addition, Argo monthly average data was used to evaluate Aquarius Level 3 product. The RMSE ranges from 0.27 psu to 0.34 psu with mean value of 0.31 psu. **【Conclusion】** Similar with Level 2 product, sea surface temperature correction can improve the accuracy of salinity retrieval, which decreases the RMSE about 0.04 psu.

**Key words:** Aquarius satellite, sea surface salinity, Argo float, accuracy evaluation

## 0 引言

**【研究意义】**海表盐度(Sea surface salinity, SSS)是全球水循环的重要指示剂,海洋盐度直接影响海水密度并驱使热盐环流<sup>[1]</sup>。海洋温盐浮标自沉浮式剖面探测浮标 Argo(Array for real-time geostrophic oceanography),科学考察船搭载的温盐深剖面仪(Conductivity, Temperature, Depth, CTD)等是观测海洋盐度数据的主要观测设备。然而,上述仪器仅能获取小范围有限点的海洋盐度观测资料。土壤湿度、盐度卫星(Soil moisture ocean salinity, SMOS)<sup>[2]</sup>、海面风场和盐度卫星 Aquarius 相继成功发射及其业务化运行,为全天时、全天候从空间大范围监测海表盐度奠定了坚实的基础。**【前人研究进展】**Aquarius/SAC-D 是由美国宇航局(National aeronautics and space administration, NASA)和阿根廷空间局(Argentina's comision nacional de actividades espaciales, CONAE)共同开发的,主要用于观测全球海表盐度的卫星。该卫星搭载 L 波段微波辐射计(1.413 GHz)和散射计(1.26 GHz),能够发射入射角为 25.8°, 33.8°和 40.3°的 3 个固定波束,并在海面上形成 380 km 的刈幅,旨在提供时间分辨率为 30 d,空间分辨率为 150 km,准确度为 0.02 psu 的全球月平均海表盐度产品<sup>[3,4]</sup>。对 Aquarius 卫星海表盐度数据精度的验证已有较多研究。王进等<sup>[5]</sup>评估了太平洋海域 Aquarius V2.0 二级产品数据的精度,结果显示其标准偏差为 0.7 psu。Smitha Ratheesh 等<sup>[6]</sup>基于 Argo 现场观测数据验证了 2011~2012 年印度洋日平均 Aquarius level-3 SSS。Hiroto Abe 和 Naoto Ebuchi<sup>[7]</sup>基于 Argo 浮标和热带区域的锚定浮标评估了 Aquarius 多种数据的精度并分析了误差结构。Wenqing Tang 等<sup>[8]</sup>同样基于 Argo 浮标和锚定浮标评估了 Aquarius 多种数据的精度,包括标准产品, CAP(Combined active-passive)算法下有无降水修正的两种数据产品(CAP 和 CAP\_RC)。**【本研究切入点】**对不同大洋(大西洋、印度洋、太平洋)之间 Aquarius 海表盐度遥感产品数据的精度的验证前人较少涉及。此外,本研究所使用的 2014 年 6 月最新发布 V3.0 版本的时间范围也较长,为 2011 年 9 月至

2014 年 6 月。**【拟解决的关键问题】**通过分析 3 个不同大洋和不同波束 Aquarius 海表盐度遥感产品数据的精度并进行误差分析,了解不同大洋和波束反演的精度。最后通过分析升轨与降轨的差异检验 V3.0 版本升轨降轨的偏差,为应用 Aquarius 海表盐度遥感产品数据提供依据。

## 1 数据和方法

### 1.1 Aquarius 卫星海表盐度遥感数据

Aquarius 海表盐度遥感产品数据是美国宇航局 JPL 实验室物理海洋学现有分发存档中心(Physical Oceanography Distributed Active Archive Center, PODAAC)提供的二级(L2)和三级(L3)产品(<https://podaac.jpl.nasa.gov/aquarius>),均为 2014 年 6 月发布的 V3.0 版本。卫星二级和三级产品中均包括经过海表面温度偏差矫正后的数据(V3.0 SSS\_bias\_adj)。L2 级产品为卫星轨道扫描数据,包括海表盐度、海表温度、海表风速、数据的地理位置、质量标记、时间等信息。我们使用不同波束(beam 1, beam 2, beam 3)在重点海域(太平洋、大西洋、印度洋)获取的海表盐度进行精度评估和误差分析。在验证二级产品时,采用 12 个质量控制标记来移除质量较差的数据<sup>[9]</sup>。二级产品(L2)的时间范围是 2011 年 8 月 25 日至 2014 年 6 月 30 日。三级产品(L3)为全球 1°×1°的网格化数据,它包括升轨、降轨、升轨和降轨融合数据以及每天,每周,月平均,季度和年平均数据。升轨、降轨数据用于检验升轨与降轨的误差,月平均升轨降轨融合数据用于验证其精度。三级产品的时间范围是从 2011 年 9 月至 2014 年 6 月。

### 1.2 Argo 海洋盐度观测数据

Argo 是用于观测海洋 0~-2000 m 温度、盐度、深度的自沉式剖面浮标,其测量盐度的精度优于 0.01 psu<sup>[10]</sup>。目前全球已投放超过 3000 个 Argo 浮标,大部分 Argo 浮标的测量周期为 10 d,获取的观测数据可以用来定量评估 Aquarius 卫星遥感的海表盐度产品。本文使用的 Argo 剖面(0~-10 m)盐度观测数据(<http://www.argodatamgt.org>)用于验证卫星 L2 级盐度遥感产品。此外,夏威夷大学的亚洲-太平洋数据研究中心提供 Argo 全球 1°×1°的月平数

据 (<http://apdrc.soest.hawaii.edu/projects/argo/>), 用于验证卫星 L3 级盐度遥感产品。Argo 月平均网格化数据源自剖面观测并通过最优插值方法获得。Argo 剖面 and 网格化数据时间范围分别与卫星二级和三级产品时间范围相同。

### 1.3 数据匹配和验证方法

采用最近点 (closest point of approach, CPA) 方法对 Aquarius 卫星遥感海表盐度产品和 Argo 观测进行时空匹配, 时间窗口为 1 d, 空间窗口为 1° (文献 [11])。当 Argo 漂浮在海面时, 以其所在经纬度为中心, 以 1° 为半径形成一片圆形区域, 在 1 d 内若 Aquarius 卫星经过该区域, 则取与 Argo 浮标所在位置距离最短的点为一对匹配点; 若 Aquarius 卫星没有经过该区域, 则无匹配点, 该匹配方法针对卫星 L2 级产品。最近点方法的时间窗口分别为 1 d 和 1°, 但在实际匹配中我们选取不同的时空窗口 (如 2 d 和 2°) 来分析 Aquarius 二级盐度遥感产品误差随时空的变化。L3 级月平均 1°×1° 盐度遥感数据产品可直接与对应的 Argo 网格化数据进行点对点比较。在完成 Aquarius 卫星与 Argo 浮标时空匹配后, 得到卫星与浮标数据匹配数据集。此时, 主要采用 Aquarius 卫星数据验证系统 (Aquarius validation data segment, AVDS) 中的线性最小二乘回归法评估卫星产品精度, 并计算相应的偏差 (bias)、均方根差 (root mean square error, RMSE)、标准偏差 (standard deviation, STD)、相关系数 (correlation coefficient) 等统计参数来评价盐度数据产品的质量。

## 2 结果与分析

### 2.1 L2 级盐度遥感产品评估

#### 2.1.1 统计结果分析

在建立时空匹配数据集时, 时间和空间窗口分别为 2 d 和 1°, 与最近点方法相比, 2 d 可以包括更多的数据, 而 1° 不会引入空间上的误差。利用 3 个波束建立的时空匹配数据集包含的数据对分别为 96595, 92390 和 91319, 对应的海表盐度均方根误差分别为

表 1 有无海表温度校正的二级盐度遥感产品与 Argo 海表盐度观测定量比较 (不同波束、不同海域)

Table 1 Comparisons between Aquarius sea surface salinity Level 2 products with and without sea surface temperature calibration and those from Argo observations (different beams and different ocean regions)

统计参数 Statistical parameter	卫星产品 Satellite products	Beam1	Beam2	Beam3	大西洋 Atlantic Ocean	印度洋 India Ocean	太平洋 Pacific Ocean	全球 Global
均方根差 Root mean square	V3.0 SSS	0.397	0.408	0.421	0.442	0.442	0.396	0.413
	V3.0 SSS_bias_adj	0.362	0.367	0.380	0.408	0.400	0.357	0.374
平均偏差 Bias	V3.0 SSS	0.003	0.005	0.018	0.111	0.040	-0.015	0.015
	V3.0 SSS_bias_adj	0.010	0.012	0.022	0.066	0.026	0.005	0.018

0.397 psu, 0.408 psu, 0.421 psu。结果表明: 相对于波束 2 (beam 2) 和波束 3 (beam 3), 波束 1 (beam 1) 获取的海表盐度精度较高 (图 1)。此外, 用经过海表温度偏差校正后的二级海表盐度产品 (V3.0 SSS\_bias\_adj) 进行验证, 均方根误差分别为 0.362 psu, 0.367 psu, 0.380 psu (表 1)。海表温度偏差校正使

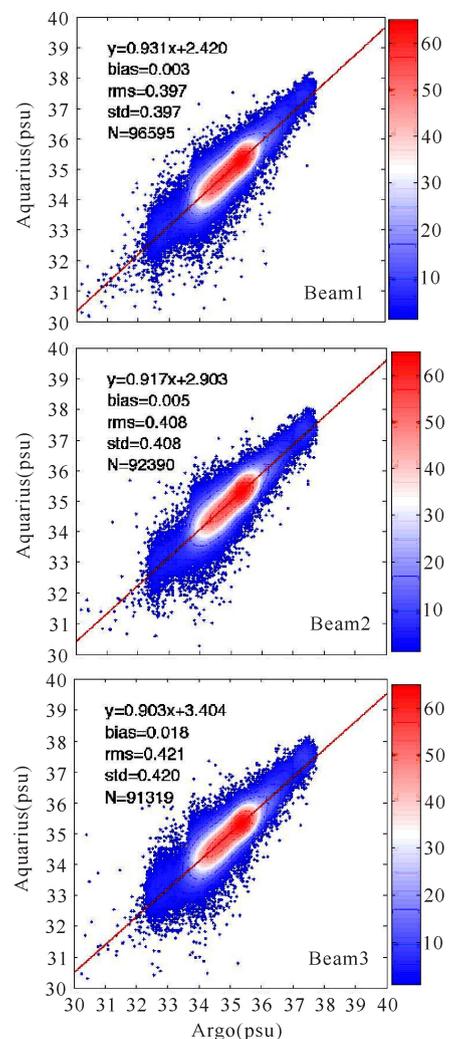


图 1 Aquarius 卫星 3 个不同波束获取的二级海表盐度产品 (V3.0 SSS) 与 Argo 海表盐度观测定量比较结果

Fig. 1 Comparisons between sea surface salinity Level 2 products (V3.0 SSS) from three different beams of Aquarius satellite and those from Argo observations

得均方根误差整体下降 0.04 psu,说明海表温度对海表盐度遥感具有一定影响。

时空匹配窗口同样为 2 d 和 1°,采用与分析 3 个波束相同的方法定量计算有无海表温度校正的海表盐度产品精度。结果如图 2 和表 1 所示,对于未经过海表温度校正的二级盐度产品,大西洋,印度洋,太平洋以及全球对应的盐度均方根差分别为 0.442 psu,0.442 psu,0.396 psu 和 0.413 psu。经过海表温度校正后,海表盐度偏差略有减小,对应的均方根误差分别为 0.408 psu,0.400 psu,0.357 psu 和 0.374 psu。可以看出太平洋质量最好,这可能与匹配对数有关,太平洋为 104196 对,而大西洋和印度洋分别为 22886 对和 35225 对。王进等<sup>[5]</sup>评估了太平洋海域 Aquarius 二级产品数据(版本 V2.0)的精度,结果显示其标准偏差为 0.7 psu,而在本文中,该区域二级产品的标准偏差为 0.4 psu。虽然本文的数据产品时间范围和匹配方法与文献<sup>[6~8]</sup>不尽相同,但根据以往验证的结果,匹配方法并不是影响统计结果的主要因素。

### 2.1.2 盐度误差分布特征

利用 Aquarius 卫星有无海表温度校正的二级盐度遥感产品(V3.0 SSS 和 V3.0 SSS\_bias\_adj)和 Argo 观测数据定量分析盐度误差随纬度、海温、风速的时空分布特征。图 3(a,b)是 V3.0 SSS 和 V3.0 SSS\_bias\_adj 盐度误差(卫星遥感盐度-浮标观测盐度)随纬度的分布,叠加在其上的是每隔 10°计算的平均偏差和标准差。对于 V3.0 SSS 标准产品,平均偏差在低纬度地区(南北纬 30°之间)为负值,而在中高纬变为正值并呈现关于赤道对称的结构。由于赤道附近存在热带辐合带,降水丰富,降水引起的海表面层化和海表面粗糙度的增加都会引起卫星反演海表面盐度的降低。而高纬度区域可能由于低温以及高风速混合作用导致误差偏大。相对于 V3.0 SSS 数据,V3.0 SSS\_bias\_adj 数据是经过海表温度偏差调整后的,因而其盐度偏差随纬度的分布变化较小。

图 3(c,d)是 V3.0 SSS 和 V3.0 SSS\_bias\_adj 盐度误差随海表温度的分布,叠加在其上的是每隔 2°C 计算的平均偏差和标准差。对于 V3.0 SSS 标准产品,在海表温度较低的情况下(5~12°C),Aquarius 盐度反演偏差大于 0.2 psu,其原因可能是辐射计观测亮温对低海表温度水域敏感度偏低。此外,低温水域覆盖的海冰也可能影响盐度遥感的精度<sup>[5]</sup>。此后,偏差随着温度的升高逐渐降低,在海表面温度较高的情况下(>27°C),偏差达到了-0.2 psu,这也印证了盐度误差在低纬度地区出现较大负偏差的情况。与

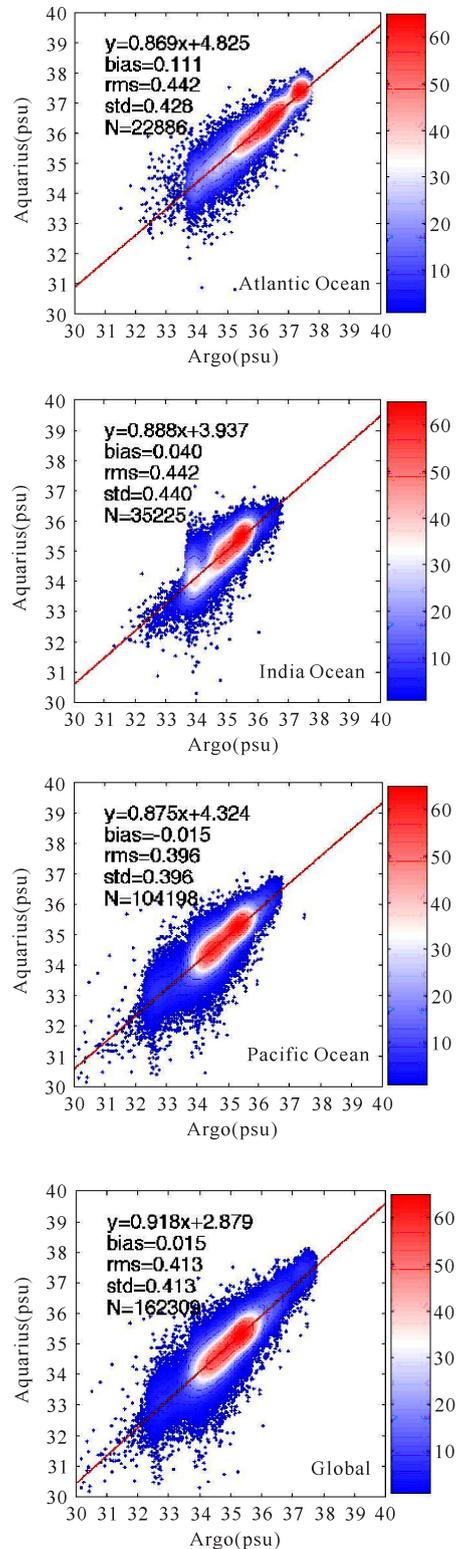


图 2 Aquarius 卫星在重点海域(太平洋、大西洋、印度洋)以及全球海域获取的海表盐度二级产品(V3.0 SSS)与 Argo 观测的海表盐度定量比较结果

Fig. 2 Comparisons between Aquarius sea surface salinity Level 2 products(V3.0 SSS) of key ocean regions(Pacific Ocean,Atlantic Ocean and India Ocean)from Aquarius satellite and those from Argo observations

V3.0 SSS 相比,V3.0 SSS\_bias\_adj 盐度遥感精度有明显提高,偏差在高温地区趋于 0,在低温区域也明显降低。

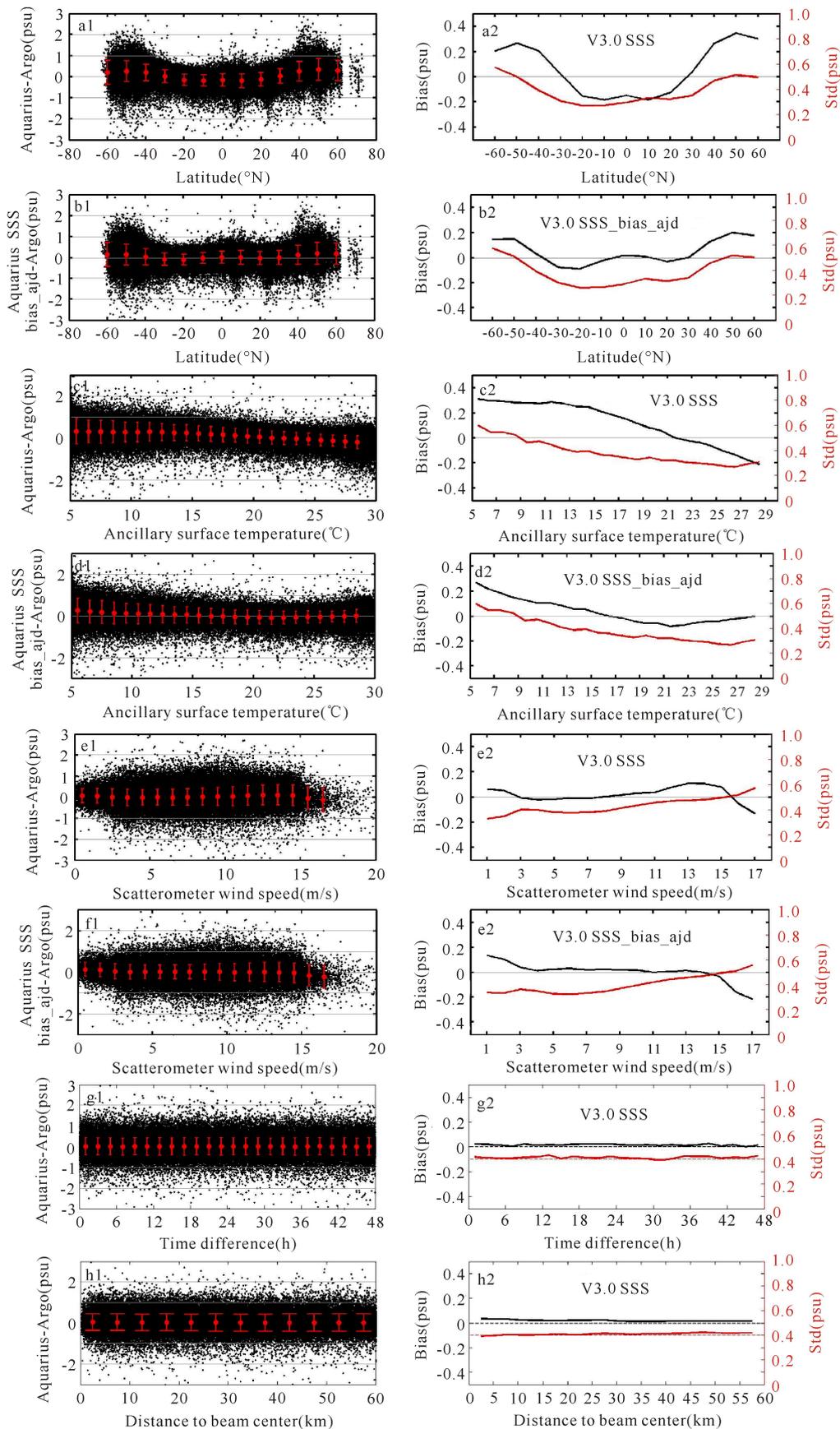


图3 Aquarius 卫星无海表温度校正盐度误差随纬度、海表温度、风速、时间和空间的分布

Fig. 3 The errors of Aquarius sea surface salinity without sea surface temperature(SST) calibration varying with the latitude, SST, wind speed and spatial and temporal distribution

图 3(e,f)是 V3.0 SSS 和 V3.0 SSS\_bias\_adj 盐度误差随海表面风速的分布,叠加在其上的是每隔 1 m/s 计算的平均偏差和标准差。对于 V3.0 SSS 标准产品,当风速小于 11 m/s 时,盐度偏差在 0.1 psu 以内。然而,随着风速的增加,偏差和标准差随着风速的增加有不断增大的趋势,这种趋势在高风速下更加明显。风引起海表面粗糙度的改变,进而影响海面发射率与辐射亮温,引起反演误差。

图 3(g,h)表示 V3.0 SSS 盐度误差随时间和空间的分布(V3.0 SSS\_bias\_adj 结果相同),叠加在其上的是每隔 2 h 和 5 km 计算的平均偏差和标准差。如图 3(a,b)所示,绝大多数数据分布在南北纬 60° 范围之间,因此本文所使用的 1° 的空间窗口可以包含 55 km 内的所有数据。图 3(g,h)表明在 2 d 和大约 55 km 范围内,盐度反演误差并不随时间和距离变化,这说明海洋上层(10 m 以内)时空变化尺度大于 55 km 和 2 d,这与前人研究结论相似<sup>[12]</sup>。

## 2.2 L3 级盐度遥感产品评估

### 2.2.1 统计结果分析

利用 Aquarius 卫星上搭载的微波辐射计沿轨道观测亮温反演的二级海表盐度,通过最优差值方法可以进一步获得时空分辨率为 1 个月和 150 km,精度为 0.2 psu 的三级海表盐度产品。本文利用 Argo 网格化数据验证 Aquarius 三级海表盐度产品(2011 年 9 月~2014 年 6 月)的精度。除了标准的 V3.0 SSS 之外,还验证了经过海表温度偏差调整后的数据(V3.0 SSS\_bias\_adj)。从图 4 中可以看出,V3.0 SSS 产品在低纬度地区存在系统性的负偏差,中高纬度地区以正偏差为主,这与二级盐度产品误差随纬度变化相类似。而 V3.0 SSS\_bias\_adj 产品盐度误差在低纬度和中高纬度区域的变化较小。除了高纬度地区、西北太平洋黑潮和大西洋湾流地区、亚马逊河东北部,V3.0 SSS\_bias\_adj 盐度均方根差在 0.2 psu 以内。中低纬度地区,Aquarius 遥感的盐度与 Argo 观测盐度具有较高的相关性,大部分地区接近 1。在高纬度地区,无论是否经过海表温度偏差校正,三级盐度产品与 Argo 观测之间的相关性较中低纬区域偏低。在赤道辐合带区域,丰富的降水导致 Aquarius 遥感的盐度与 Argo 观测盐度偏差较大。

由图 5 可知,V3.0 SSS 和 V3.0 SSS\_bias\_adj 对应的盐度均方根变化范围分别是 0.27~0.34 psu 和 0.24~0.30 psu,平均值分别为 0.31 psu 和 0.27 psu;偏差变化范围分别是 -0.12~-0.02 psu 和 -0.09~0.03 psu,平均值分别为 -0.07 psu 和 -0.03 psu。V3.0 SSS\_bias\_adj 数据产品比 V3.0

SSS 标准产品的均方根差的平均值低 0.04 psu,这一量值与二级产品评估结果相同,但偏差的平均值则提高了 0.04 psu。

### 2.2.2 升轨与降轨的差异

图 6 是通过 V3.0 标准产品计算(升轨-降轨后进行纬向平均)的 2011 年 9 月至 2014 年 6 月升轨与降轨之差的纬度-时间图。从图 6 明显可以看出南半球海表盐度存在明显的季节性振荡,在 4 月份为正相位,9 月份为负相位,振幅大约为 0.2 psu。2014 年 2 月至 3 月南北半球低纬度区域存在较大负偏差,而北半球则在北纬 50° 附近的狭窄地带偏差较大。V3.0

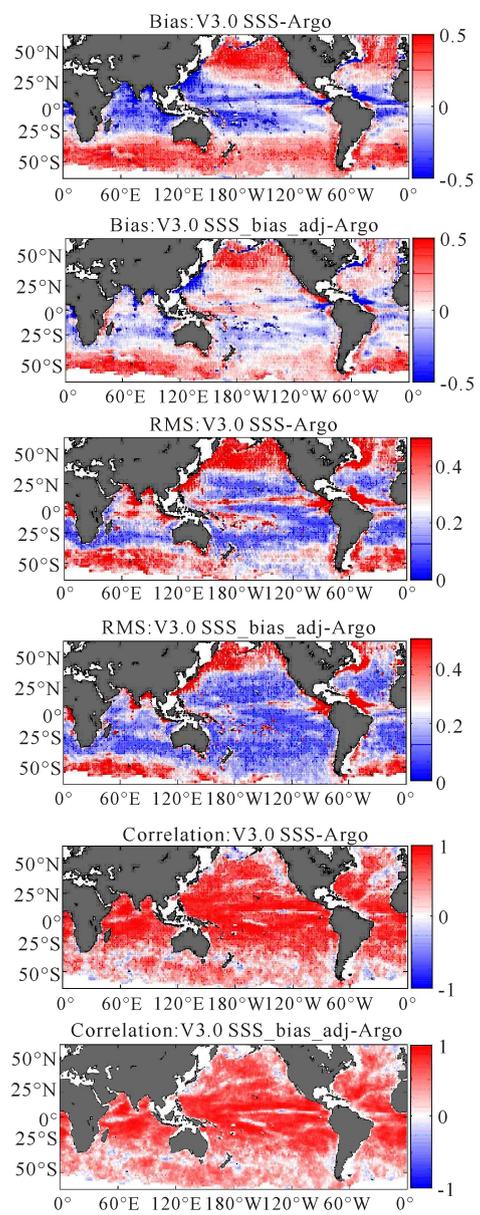


图 4 Aquarius 有无海表温度偏差校正的盐度误差(平均偏差、均方根差和相关系数)的空间分布

Fig. 4 The spatial distribution of Aquarius sea surface salinity errors (bias, root mean square and correlation coefficient) with and without sea surface temperature calibration

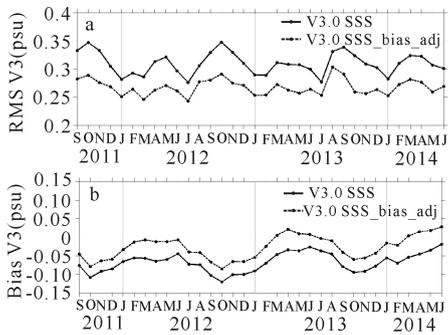


图5 Aquarius 卫星在南北纬 40 度区域内的三级盐度遥感产品 V3.0 SSS 和 V3.0 SSS\_bias\_adj 与 Argo 观测盐度之间的偏差和均方根差随时间(34 个月)的变化

Fig. 5 The bias and root mean square between Aquarius sea surface salinity Level 3 products(V3.0 SSS and V3.0 SSS\_bias\_adj) and Argo observations in south and north 40°, varying with time(34 months)

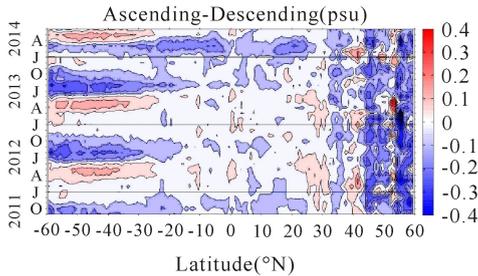


图6 Aquarius 升轨与降轨盐度差(升轨-降轨)的纬度-时间示意图

Fig. 6 The latitude-time diagram of difference between sea surface salinity from Aquarius ascending and those from descending measurements(ascending-descending)

数据版本对 V2.0 中存在的升轨与降轨偏差进行了经验矫正,虽然较 V2.0 数据产品偏差有所降低,但升轨与降轨的偏差依然存在。

### 3 结论

利用 Argo 浮标剖面数据评估了 Aquarius 卫星二级产品在重点海域(太平洋、大西洋、印度洋)和不同波束对应的海表盐度的精度。统计结果显示,相对于大西洋和印度洋,太平洋精度盐度误差最小,偏差和均方根差分别为  $-0.015$  psu 和  $0.396$  psu。相对于波束 2 和波束 3,波束 1 获取的海表盐度与 Argo 观测最为接近,偏差和均方根差分别为  $0.003$  psu 和  $0.397$  psu。经过海表温度矫正后的 V3.0 SSS\_bias\_adj 产品与 V3.0 SSS 标准产品相比,均方根差降低了约  $0.04$  psu。

同时,分析了盐度误差随纬度、海表温度和风速的变化特征。对于 V3.0 标准产品,盐度偏差沿赤道对称,在高纬度区域和赤道区域盐度偏差较大,约为

$0.2$  psu,南北纬  $30^\circ$  附近偏差最小,这种误差分布在 V3.0 SSS\_bias\_adj 产品中得到较大的改善。由于 L 波段亮温对低 SST 的敏感性较低, Aquarius 卫星在 SST 较低的区域盐度误差较大。此外,高 SST 区域 ( $28^\circ$  附近)较大的负偏差可能是由于赤道辐合带丰富的降水引起近表层盐度的层化。高风速下不准确的海面粗糙度模型也是导致盐度偏差的主要因素。值得注意的是,纬度、海表温度和风速这 3 个因素并不相互独立,高纬度地区也意味着高风速和低 SST。盐度误差在 2 d 和 55 km 范围内并不随时间和距离变化,这说明上层海洋 10 m 的时空变化尺度大于 55 km 和 2 d 的时空变化尺度。

此外,利用最优插值的 Argo 月平均海表盐度数据验证了 Aquarius 卫星三级海表盐度产品的精度,结果显示均方根差在  $0.27 \sim 0.34$  psu 之间,平均值为  $0.31$  psu。与二级产品的评估结果相似, V3.0 SSS\_bias\_adj 产品的均方根差较标准产品降低  $0.04$  psu,可见海表温度校正能够提高盐度反演的精度。同时,也评估了三级产品升轨和降轨的差异,结果发现升轨与降轨的偏差依然存在,南半球存在明显的季节性振荡,北半球较大的偏差集中在北纬  $50^\circ$  附近的狭窄地带。

### 致谢:

感谢美国国家航空航天局提供 Aquarius 卫星海表盐度遥感数据,夏威夷大学亚洲-太平洋数据研究中心以及 Argo 数据管理网站提供 Argo 月平均数据和 Argo 剖面数据。

### 参考文献:

- [1] Lagerloef G S E. Introduction to the special section: The role of surface salinity on upper ocean dynamics, air-sea interaction and climate[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2002, 107(C12): SRF 1-1-SRF 1-2.
- [2] Kerr Y H, Waldteufel P, Wigneron J P, et al. The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98, 666-687. doi:10.1109/jproc.2010.2043032.
- [3] Lagerloef G S E, Colomb F R, Le Vine D, et al. The aquarius/SAC-D mission: Designed to meet the salinity remote-sensing challenge[J]. Oceanography, 2008, 21(1), 68-81.
- [4] Le Vine D M, Lagerloef G S E, Torrusio S E. Aquarius and remote sensing of sea surface salinity from space[J]. Proc IEEE, 2010, 98(5), 688-703.
- [5] 王进, 张杰, 王晶. 基于 Argo 浮标数据的星载微波辐射计 Aquarius 数据产品质量评估[J]. 海洋学报, 2015, 37(3): 46-53. doi: 10.3969/j.issn.0253-4193.2015.03.

Wang J, Zhang J, Wang J. Quality assessment of space-borne microwave radiometer Aquarius data product based on Argo buoy data[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 37(3): 46-53. doi: 10. 3969/j. issn. 0253-4193. 2015. 03. 005.

- [6] Ratheesh S, Sharma R, Sikhakolli R, et al. Assessing sea surface salinity derived by Aquarius in the Indian Ocean [J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2014, 11(4): 719-722.
- [7] Abe H, Ebuchi N. Evaluation of sea surface salinity observed by Aquarius [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(11): 8109-8121.
- [8] Tang W, Yueh S H, Fore A G, et al. Validation of Aquarius sea surface salinity with in situ measurements from Argo floats and moored buoys[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(9): 6171-6189.
- [9] Patt F S. 2014, Aquarius level-2 data product, Aquarius project document AQ-014-PS-0018 Version 3. 0 [EB/OL]. [2015-02-10]. [ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/all-](ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/all-Data/aquarius/docs/v3/AQ-014-PS-0018_Aquarius-Level2_specification_DatasetVersion3.0.pdf)

[Data/aquarius/docs/v3/ AQ-014-PS-0018\\_Aquarius-Level2\\_specification\\_DatasetVersion3. 0. pdf.](ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/all-Data/aquarius/docs/v3/AQ-014-PS-0018_Aquarius-Level2_specification_DatasetVersion3.0.pdf)

- [10] Riser S, Ren L, Wong A. Salinity in argo: A modern view of a changing ocean [J]. *Oceanography*, 2008, 21(1), 56-67. doi:10. 5670/ oceanog. 2008. 67.
- [11] Busalacchi A, Alory G, Arkin P, et al. Satellite sea surface salinity error in the Tropics [C/OL] // 2011 American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, College Park: Earth System Science Interdisciplinary Center, 2011 [2013-06-10]. <http://essic.umd.edu/joom2/index.php/publications/posters-2>.
- [12] Drucker R, Riser S C. Validation of Aquarius sea surface salinity with Argo: Analysis of error due to depth of measurement and vertical salinity stratification [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(7): 4626-4637.

(责任编辑: 陆 雁)

(上接第 328 页 Continue from page 328)

- [10] 王得玉, 冯学智. 基于 TM 影像的钱塘江入海口水体透明度的时空变化分析[J]. *江西师范大学学报: 自然科学版*, 2005, 2: 185-189.
- Wang D Y, Feng X Z. Analysis of temporal and spatial changes of water clarity based on TM image in the estuary of Qiantang River [J]. *Journal of Jiangxi Normal University: Natural Science*, 2005, 2: 185-189.

- [11] He X, Bai Y, Pan D, et al. Using geostationary satellite ocean color data to map the diurnal dynamics of suspended particulate matter in coastal waters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 133: 225-239.

(责任编辑: 米慧芝)