

基于葵花8号资料的风云四号A星海表温度产品交叉验证

姚蓓蓓¹, 孟翔晨^{2*}

¹曲阜师范大学马克思主义学院, 山东 日照

²曲阜师范大学地理与旅游学院, 山东 日照

收稿日期: 2023年8月15日; 录用日期: 2023年9月12日; 发布日期: 2023年9月21日

摘要

风云四号A星是我国新一代静止轨道气象卫星的试验卫星, 评估其海表温度产品的精度对海洋相关领域的研究和应用具有重要意义。以葵花8号海表温度产品为基准对2019年8月的风云四号A星海表温度产品进行了精度评价。研究表明: 风云四号A星海表温度产品与葵花8号海表温度产品的时空分布比较一致, 两者之间的平均偏差为0.23 K, 平均绝对偏差和均方根误差分别为0.68 K和0.85 K。风云四号A星海表温度产品具有较高的精度, 可以服务于气候监测和天气预报等研究领域。

关键词

风云四号A星, 海表温度, 葵花8号

Cross-Validation of FY-4A Sea Surface Temperature Products Based on Himawari-8 Data

Beibei Yao¹, Xiangchen Meng^{2*}

¹School of Marxism, Qufu Normal University, Rizhao Shandong

²School of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao Shandong

Received: Aug. 15th, 2023; accepted: Sep. 12th, 2023; published: Sep. 21st, 2023

Abstract

Fengyun-4A (FY-4A) is the first satellite of China's new generation geostationary meteorological satellites, assessing the accuracy of the FY-4A sea surface temperature (SST) product is of great

*通讯作者。

文章引用: 姚蓓蓓, 孟翔晨. 基于葵花8号资料的风云四号A星海表温度产品交叉验证[J]. 海洋科学前沿, 2023, 10(3): 225-232. DOI: 10.12677/ams.2023.103023

significance to the research and application in related fields of the ocean. In this paper, we evaluate the accuracy of the FY-4A SST product in August 2019 using the Himawari-8 SST product as a benchmark. The results show that the retrieved FY-4A SST product has a comparable accuracy with the Himawari-8 SST product, with a bias, mean absolute error and root mean squared error of 0.23 K, 0.68 K and 0.85 K, respectively. FY-4A SST product with the high accuracy can be used in the research fields of climate monitoring and weather forecasting.

Keywords

FY-4A, SST, Himawari-8

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

作为研究海面水汽和热量交换的重要物理参数之一[1][2], 海表温度在全球气候变化、海洋生物的生长繁殖与分布等方面均起到了非常重要的作用[3][4]。海表温度已被广泛地用到气候监测、海洋灾害监测和天气预报等众多的领域[5]。目前获取海表温度的方式主要有两种: 利用不同轮船和浮标等进行现场测量和利用卫星进行遥感反演[6]。虽然实测数据的精度较高, 但其空间和时间覆盖范围有限, 已无法满足相关研究和应用的需求[7]。卫星遥感具有连续观测、覆盖范围广等特点, 能够获取长时间序列、高精度、大面积的海表温度数据[8][9]。

作为我国新一代静止轨道气象卫星的科研试验卫星, 风云四号 A 星的发射时间为 2016 年 12 月 11 日, 位于东经 105 度赤道上空静止轨道位置[10]。利用风云四号 A 星搭载的先进的静止轨道辐射成像仪 (Advanced Geosynchronous Radiation Imager, AGRI) 可生产高时间分辨率的地表温度和海表温度产品, 可为天气预报、气候监测等应用提供数据支撑。崔鹏等人[11]的研究表明质量为优的风云四号 A 星海表温度产品的平均偏差为 $-0.45^{\circ}\text{C}\sim-0.42^{\circ}\text{C}$ 。

虽然利用遥感反演的海表温度产品具有高空间覆盖和时间连续性的特点, 但由于卫星数据受到自身观测误差、辐射定标和几何校正的误差及反演算法的误差等因素的影响, 导致海表温度产品存在一定的不确定性, 需要对海表温度产品的精度进行验证与分析。针对风云四号 A 星海表温度产品验证的相关研究较少, 因此对风云四号 A 星海表温度产品的精度评测是非常有必要的。目前主流的海表温度验证主要包括两个类型: 1) 基于实测数据的验证; 2) 基于成熟的海表温度产品或模式模拟的海表温度的交叉验证[12]。浮标等实测数据测量的是海面下方一定深度的海水的温度, 而卫星反演得到的温度则是海面上 10-20 微米左右的皮肤温度, 两者存在一定的差异[13]。此外, 实测数据的观测站点稀少且观测资料的时效性较差, 无法对大范围的海表温度进行实时检测分析[12], 因此本文采用交叉验证的方式对风云四号 A 星海表温度产品进行精度评测。Tu 和 Hao [14]的验证结果表明 Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) 发布的葵花 8 号海表温度产品的精度较高, 因此本文使用葵花 8 号海表温度产品对风云四号 A 星海表温度产品进行交叉验证, 评估其产品的精度和稳定性。

2. 数据介绍与处理

2.1. 风云四号 A 星海表温度产品介绍

本文中使用的风云四号 A 星海表温度产品来自风云卫星遥感数据服务网(下载地址:

<http://satellite.nsmc.org.cn/portalsite/default.aspx>), 下载了 2019 年 8 月 1036 幅圆盘图像的风云四号 A 星海表温度产品用来分析其产品精度。风云四号 A 星海表温度产品的空间分辨率为 4 千米, 时间分辨率为 15 分钟, 空间覆盖范围主要为亚太地区 and 印度洋地区。如公式(1)所示, 风云四号 A 星海表温度采用非线性分裂窗算法[12]反演得到:

$$T_s = A_0 + A_1 T_i + A_2 T_{FG} (T_i - T_j) + A_3 (T_i - T_j) (\sec \theta - 1) \quad (1)$$

其中, T_s 代表风云四号 A 星海表温度(单位为 K), T_i 和 T_j 分别为 AGRI 第 12 通道和 13 通道的亮度温度, T_{FG} 代表背景场海表温度, θ 代表卫星观测天顶角, A_0 到 A_3 为分裂窗算法系数。

2.2. 葵花 8 号海表温度产品介绍

本文中使用的葵花 8 号海表温度产品数据来自 JAXA Himawari Monitor, 下载地址为 <https://www.eorc.jaxa.jp/ptree/index.html>, 数据覆盖范围主要为东印度洋和西太平洋区域。现有的海表温度产品大都采用分裂窗算法反演得到, 而该产品使用 Kurihara 等人[15]提出的准物理算法反演得到, 该算法首先将辐射传输方程参数化, 然后结合经验统计模型计算海表温度。葵花 8 号海表温度产品数据质量标识是 Kurihara 等人[15]基于贝叶斯方法生成的云掩膜数据和辅助数据生成的, 包含六个值: 0 (无数据)、1 (不良数据)、2 (最差质量)、3 (低质量)、4 (可接受质量)和 5 (最佳质量)。在本研究中, 使用标记为可接受和最佳质量的葵花 8 号海表温度产品来评价风云四号 A 星海表温度产品的质量。

2.3. 时空匹配和质量控制

风云四号 A 星海表温度产品时间分辨率为 15 分钟, 葵花 8 号海表温度产品时间分辨率为 10 分钟, 因此两者时间匹配较为简单。由于两个产品数据的空间分辨率不一致, 首先采用最近邻采样法将葵花 8 号海表温度重新采样为 0.04 度的空间分辨率, 根据像元所在的经纬度提取风云四号 A 星和葵花 8 号的海表温度数据对; 然后根据海表温度产品自带的质量控制文件和云掩膜数据, 去除数据质量较差的海表温度; 最后采用 Duan 等人[16]提出的“ 3σ -Hampel identifier”准则剔除数据对中存在的异常值。

2.4. 精度指标

采用以下精度指标对风云四号 A 星海表温度产品进行评估, 分别为: 平均绝对偏差(Mean Absolute Error, MAE), 平均偏差(bias)和均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE), 计算公式如式(2)~(4)所示:

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |SST_{FY4A}^i - SST_{H8}^i| \quad (2)$$

$$\text{bias} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SST_{FY4A}^i - SST_{H8}^i) \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SST_{FY4A}^i - SST_{H8}^i)^2} \quad (4)$$

式中, SST_{FY4A}^i 为风云四号 A 星海表温度数据, SST_{H8}^i 为葵花 8 号海表温度数据。

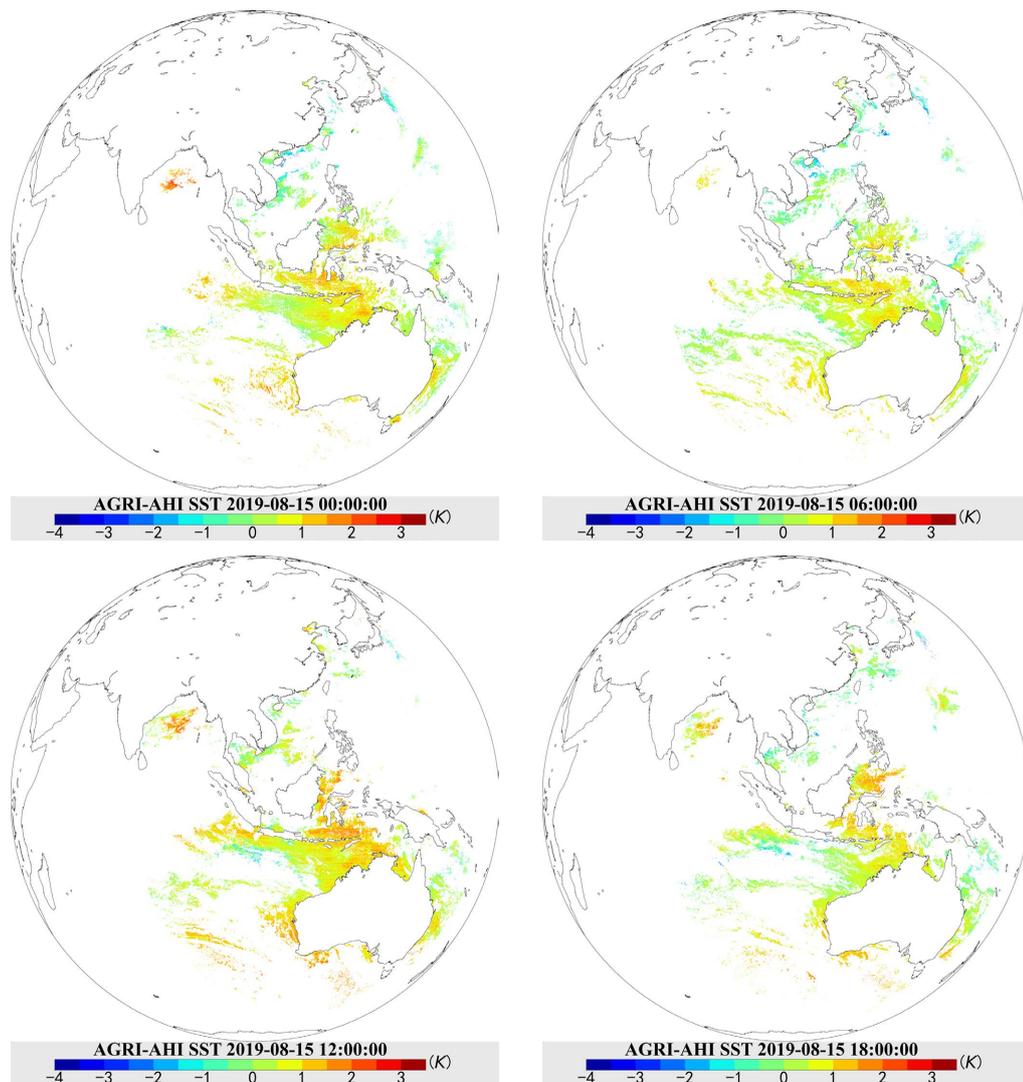
3. 结果与分析

3.1. 单景影像验证结果

表 1 展示了使用葵花 8 号海表温度数据对 2019 年 8 月 15 日 00:00, 06:00, 12:00 和 18:00 (UTC)四个时刻的风云四号 A 星海表温度的交叉验证结果。图 1 展示了对应时刻的风云四号 A 星海表温度与葵花 8 号海表温度的差值图空间分布。

Table 1. Cross-validation results of FY-4A SST at 00:00, 06:00, 12:00 and 18:00 (UTC) on August 15, 2019**表 1.** 2019 年 8 月 15 日 00:00, 06:00, 12:00 和 18:00 (UTC) 四个时刻的风云四号 A 星海表温度的交叉验证结果

时刻(UTC)	00:00	06:00	12:00	18:00
评价指标(K)				
平均偏差	0.322	0.157	0.557	0.224
平均绝对偏差	0.694	0.607	0.804	0.684
均方根误差	0.863	0.765	0.966	0.858

**Figure 1.** Diagram of difference between FY-4A and Himawari-8 SST at 00:00, 06:00, 12:00 and 18:00 (UTC) on August 15, 2019**图 1.** 2019 年 8 月 15 日 00:00, 06:00, 12:00 和 18:00 (UTC) 四个时刻的风云四号 A 星与葵花 8 号海表温度的差值图

如表 1 所示, 2019 年 8 月 15 日 00 时和 06 时的平均偏差、平均绝对偏差和均方根误差分别为 0.32 K、0.69 K 和 0.86 K, 0.16 K、0.61 K 和 0.77 K, 说明风云四号 A 星海表温度相较于葵花 8 号海表温度有些高估。根据图 1 产品分布图分析得知, 2019 年 8 月 15 日 00 时和 06 时的风云四号 A 星海表温度与葵花

8号海表温度的差值影像图在东海、南海海域呈现蓝绿色,可以得知风云四号A星海表温度在该海域略低于葵花8号海表温度;而在印度洋海域,图像颜色大部分呈现红色和黄绿色,证明风云四号A星海表温度在印度洋海域略高于葵花8号海表温度。在东南亚和澳大利亚之间的海域,差值影像呈现暖色调,说明风云四号A星海表温度在该海域要高于葵花8号海表温度。

2019年8月15日12时的平均偏差、平均绝对偏差和均方根误差分别为0.56 K、0.80 K和0.97 K,而18时的平均偏差、平均绝对偏差和均方根误差分别为0.22 K、0.68 K和0.86 K,说明风云四号A星海表温度相较于葵花8号海表温度有些高估。2019年8月15日12时的风云四号A星海表温度与葵花8号海表温度的差值影像图在东印度洋海域绝大部分呈现红色,极少部分呈现黄绿色,说明相比于葵花8号海表温度,风云四号A星海表温度在该海域存在不同程度的过高现象;在东南亚和澳大利亚之间的海域及南印度洋海域,差值影像呈现暖色调,说明风云四号A星海表温度在该海域的温度高于葵花8号海表温度。在南海和东海海域,差值影像则呈现蓝绿色,说明两个海表温度产品的差异较小。2019年8月15日18时的风云四号A星海表温度与葵花8号海表温度的差值影像图的颜色要比12时的颜色要浅,说明两个海表温度产品在18时的差异要小于12时的差异。

风云四号A星海表温度与葵花8号海表温度在东印度洋和南印度洋海域的差异比较大,主要是因为观测角度的影响。对于东印度洋海域,葵花8号卫星的观测角度较大,接近观测边缘,而在南印度洋海域,风云四号A星的卫星观测角度也比较大,卫星观测角大于50度,加之两颗卫星观测角度的差异,造成海表温度的差异比较大。此外,卫星反演的海表温度的精度受卫星观测角、海面风速、气溶胶等的影响[17][18][19][20],因此风云四号A星海表温度与葵花8号海表温度的差异在合理范围。

综上所述,无论是白天还是夜晚,风云四号A星海表温度和葵花8号海表温度的差异均较小,四个时刻的海表温度的平均偏差均小于0.6 K。

3.2. 逐小时验证结果

图2展示了2019年8月风云四号A星海表温度在每个小时的交叉验证结果,其中10:00和12:00时刻验证指标的有效个数为30;17:00时刻验证指标的有效个数为28,其余时刻验证指标的有效个数为31。从图2可以看出,在8月份时间内风云四号A星海表温度与葵花8号海表温度的整点时刻的平均偏差的平均值范围在-0.01 K和0.46 K之间,风云四号A星海表温度与葵花8号海表温度的均方根误差的平均值范围在0.80 K和0.94 K之间,风云四号A星海表温度与葵花8号海表温度的平均绝对偏差的平均值范围在0.62 K和0.77 K之间。风云四号A星海表温度在七个时刻的验证结果比较好,平均偏差的平均值小于0.20 K,均方根误差(平均绝对偏差)的平均值小于0.84 K(0.66 K)。风云四号A星海表温度在11个时刻的验证结果次之,平均偏差的平均值小于0.30 K,在其他5个时刻的验证结果比较差,平均偏差的平均值大于0.30 K,均方根误差的平均值大于0.88 K。此外,17:00时刻的平均偏差的平均值虽然比较小(-0.01),但其对应的均方根误差和平均绝对偏差均较高。

以上验证结果表明,风云四号A星海表温度和2019年8月每个时刻的葵花8号海表温度的吻合性均较高,bias平均值均小于0.50 K,能够正确反映海表温度随时间的变化特征。

3.3. 总体验证结果

经过时空匹配和质量控制,共获取739幅有效影像,利用有效的数据对计算的精度指标如图3所示。根据图3可以看到在8月份时间范围内风云四号A星海表温度与葵花8号海表温度的平均偏差波动比较小,绝大部分平均偏差在0.08 K和0.38 K之间,平均偏差最小值为-0.75 K,最大值为0.84 K,平均值为0.23 K,说明风云四号A星海表温度相较于葵花8号海表温度来说存在一定的高估。平均绝对偏差和均方根误差的统计结果表明:和葵花8号海表温度相比,风云四号A星海表温度的不确定性波动比较小,

平均绝对偏差上下四分位数分别为 0.62 K 和 0.72 K, 平均值为 0.68 K, 均方根误差最小值为 0.62 K, 最大值为 1.25 K, 平均值为 0.85 K, 只有 8 月 15 日和 8 月 16 日夜晚两个时次的均方根误差(平均绝对偏差)大于 1.2 K (1.0 K), 说明风云四号 A 星海表温度产品精度非常的稳定。经过分析其影像图和统计数据, 由于云的影响导致这两个时次的有效像元比较少, 因此交叉验证结果较差。Tu 和 Hao [14]的研究表明葵花 8 号海表温度产品的精度较高, 和实测数据相比, 葵花 8 号海表温度的偏差在 -0.11 K 和 -0.03 K 之间, 均方根误差在 0.58 K 和 0.73 K 之间。Yang 等人[17]的验证工作表明葵花 8 号海表温度产品与实测皮肤温度的观测较为一致, 平均偏差和标准差为 0.09 K 和 0.30 K。

尽管风云四号 A 星海表温度使用的反演算法是非线性分裂窗算法, 葵花 8 号海表温度使用的是准物理算法, 以上验证结果表明 2019 年 8 月份的风云四号 A 星海表温度和同时的葵花 8 号海表温度的吻合性较高, 结合已有的关于葵花 8 号海表温度产品的验证研究, 因此可推断风云四号 A 星海表温度亦具有较高的精度。

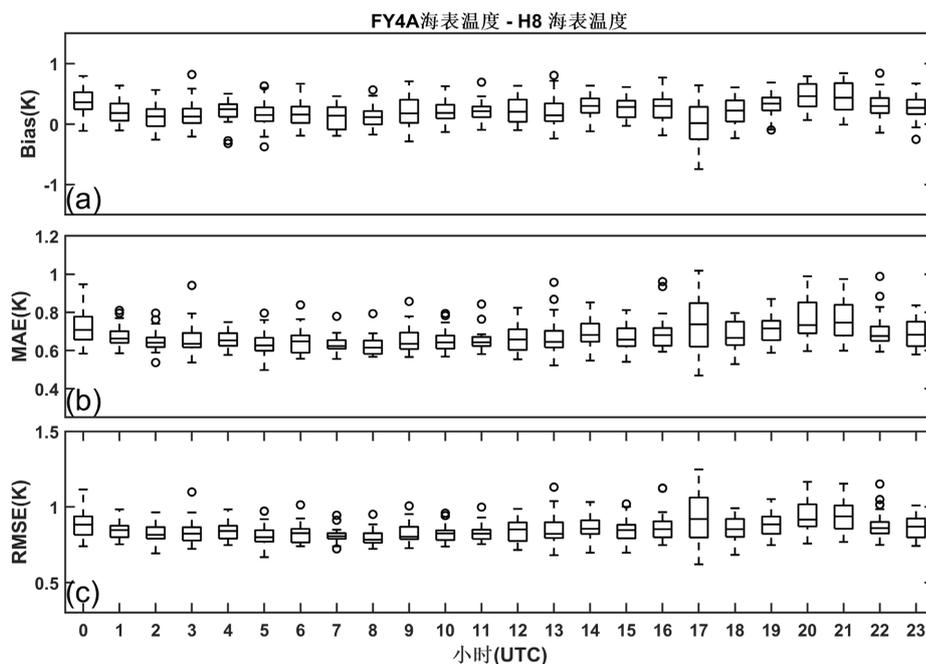


Figure 2. Box plots of bias (a), MAE (b), and RMSE (c) for the hourly cross-validation results of the FY-4A SST in August 2019

图 2. 2019 年 8 月风云四号 A 星海表温度的逐小时交叉验证结果, 从上到下依次为 bias (a), MAE (b)和 RMSE (c)的箱型图

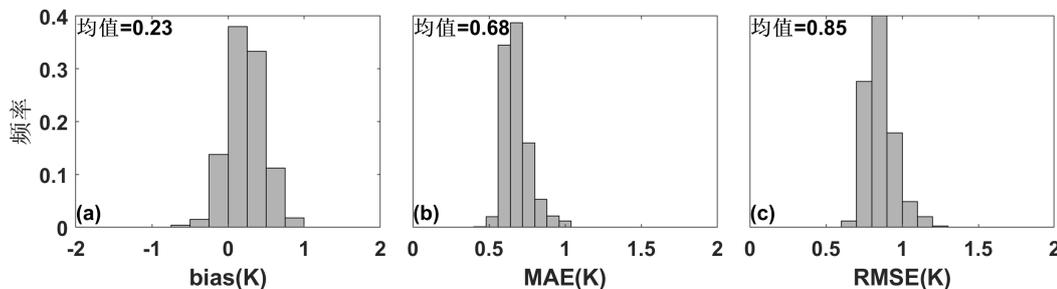


Figure 3. Frequency distribution of bias (a), MAE (b), and RMSE (c) from left to right for the cross-validation results of the FY-4 ASST in August 2019

图 3. 2019 年 8 月风云四号 A 星海表温度的交叉验证结果, 从左到右依次为 bias (a), MAE (b)和 RMSE (c)的频率分布

4. 结论

高时间分辨率的风云四号 A 星海表温度产品可以用于数据同化、洋流监测和天气预报等领域,但其产品精度还尚不可知。本文以高精度的葵花 8 号海表温度产品为基础,对风云四号 A 星海表温度产品的精度进行评价与分析。验证结果表明:2019 年 8 月的风云四号 A 星海表温度具有和葵花 8 号海表温度相似的精度,在整个圆盘区域内,风云四号 A 星海表温度均和葵花 8 号海表温度在同一数值区间,平均偏差为 0.23 K,绝对平均偏差和均方根误差均小于 0.9 K。不论白天还是夜晚,风云四号 A 星海表温度产品的各个精度指标数值都比较稳定,说明风云四号 A 星海表温度产品的精度已经达到了较高水平。本文仅使用了 2019 年 8 月的风云四号 A 星海表温度产品进行了研究,今后可以对长时间序列的风云四号 A 星海表温度产品进行评价分析。

致 谢

感谢中国气象局国家卫星气象中心提供的风云四号 A 星海表温度和 JAXA 提供的葵花 8 号海表温度数据。

基金项目

山东省自然科学基金项目(ZR2021QD055)。

参考文献

- [1] 何全军, 曹静, 陈翔, 张月维. 基于非线性算法的 FY-3A/VIRR SST 反演[J]. 气象, 2013, 39(1): 74-79.
- [2] Banzon, V., Smith, T.M., Chin, T.M., Liu, C. and Hankins, W. (2016) A Long-Term Record of Blended Satellite and *in Situ* Sea-Surface Temperature for Climate Monitoring, Modeling and Environmental Studies. *Earth System Science Data*, **8**, 165-176. <https://doi.org/10.5194/essd-8-165-2016>
- [3] 郑贵洲, 熊良超, 廖艳雯, 王红平. 利用 MODIS 数据反演南海南部海表温度及时空变化分析[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(1): 132-140.
- [4] Walton, C.C., Pichel, W.G., Sapper, J.F. and May, D.A. (1998) The Development and Operational Application of Non-linear Algorithms for the Measurement of Sea Surface Temperatures with the NOAA Polar-Orbiting Environmental Satellites. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **103**, 27999-28012. <https://doi.org/10.1029/98JC02370>
- [5] 杨航, 王素娟, 刘铭坤, 管磊. FY-3C/VIRR 西北太平洋区域海表温度精度评估[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(12): 151-159. <https://doi.org/10.16441/j.cnki.hdxh.20180419>
- [6] 奚萌. 基于最优插值算法的红外和微波遥感海表温度数据融合[D]: [硕士学位论文]. 北京: 国家海洋环境预报研究中心, 2011.
- [7] 何锡玉, 蔡夕方, 朱亚平, 张雷. 我国风云极轨气象卫星及应用进展[J]. 气象科技进展, 2021, 11(1): 34-39.
- [8] 门聪. 海洋一号 B 卫星海洋水色扫描仪(HY-1B/COCTS)海表温度反演与印证[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [9] Kilpatrick, K.A., *et al.* (2015) A Decade of Sea Surface Temperature from MODIS. *Remote Sensing of Environment*, **165**, 27-41. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.04.023>
- [10] 耿晓雯, 闵锦忠, 杨春, 王元兵, 许冬梅. FY-4A AGRI 辐射率资料偏差特征分析及订正试验[J]. 大气科学, 2020, 44(4): 679-694.
- [11] 崔鹏, 王素娟, 陆风, 肖萌. FY-4A/AGRI 海表温度产品和质量检验[J]. 应用气象学报, 2023, 34(3): 257-269.
- [12] 王素娟, 陆风, 张鹏, 张晓虎, 崔鹏, 王维和. FY2 海面温度产品质量检验方法与误差分析[J]. 气象, 2013, 39(10): 1331-1336.
- [13] 王素娟, 崔鹏, 张鹏, 冉茂农, 陆风, 王维和. FY-3B/VIRR 海表温度算法改进及精度评估[J]. 应用气象学报, 2014, 25(6): 701-710.
- [14] Tu, Q. and Hao, Z. (2020) Validation of Sea Surface Temperature Derived from Himawari-8 by JAXA. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **13**, 448-459.

- <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2963773>
- [15] Kurihara, Y., Murakami, H. and Kachi, M. (2016) Sea Surface Temperature from the New Japanese Geostationary Meteorological Himawari-8 Satellite. *Geophysical Research Letters*, **43**, 1234-1240. (In English)
<https://doi.org/10.1002/2015GL067159>
- [16] Duan, S.-B., *et al.* (2019) Validation of Collection 6 MODIS Land Surface Temperature Product Using *in Situ* Measurements. *Remote Sensing of Environment*, **225**, 16-29. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.020>
- [17] Yang, M., Guan, L., Beggs, H., Morgan, N., Kurihara, Y. and Kachi, M. (2020) Comparison of Himawari-8 AHI SST with Shipboard Skin SST Measurements in the Australian Region. *Remote Sensing*, **12**, 1237.
<https://doi.org/10.3390/rs12081237>
- [18] Luo, B., Minnett, P.J. and Nalli, N.R. (2021) Infrared Satellite-Derived Sea Surface Skin Temperature Sensitivity to Aerosol Vertical Distribution—Field Data Analysis and Model Simulations. *Remote Sensing of Environment*, **252**, Article ID: 112151. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112151>
- [19] Xi, X., Ignatov, A. and Zhou, X. (2019) Exploring MERRA-2 Global Meteorological and Aerosol Reanalyses for Improved SST Retrieval. *Remote Sensing of Environment*, **223**, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.011>
- [20] Woo, H.-J., Park, K.-A., Li, X. and Lee, E.-Y. (2018) Sea Surface Temperature Retrieval from the First Korean Geostationary Satellite COMS Data: Validation and Error Assessment. *Remote Sensing*, **10**, Article No. 1916.
<https://doi.org/10.3390/rs10121916>