

崔鹏,王素娟,陆风,等. FY-4A/AGRI 海表温度产品和质量检验. 应用气象学报,2023,34(3):257-269.
DOI: 10.11898/1001-7313.20230301

FY-4A/AGRI 海表温度产品和质量检验

崔鹏¹⁾²⁾³⁾ 王素娟¹⁾²⁾³⁾* 陆风¹⁾²⁾³⁾ 肖萌¹⁾²⁾³⁾

¹⁾(国家卫星气象中心/国家空间天气监测预警中心,北京 100081)

²⁾(许健民气象卫星创新中心,北京 100081)

³⁾(中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室,北京 100081)

摘 要

风云四号气象卫星 A 星(FY-4A)是我国第 2 代静止气象卫星首发星,搭载的先进静止轨道辐射成像仪 AGRI 是迄今为止我国静止轨道最先进的辐射成像仪。海表温度产品是 FY-4A/AGRI 基础定量产品之一,采用非线性海表温度算法在业务系统实时反演得到。以现场实测海表温度数据为参考,选择观测时间为 30 min、观测空间距离为 4 km 的时空匹配窗口,对 FY-4A/AGRI 海表温度产品进行质量检验,评估结果表明:质量为优的像元平均偏差为 $-0.45\sim-0.42\text{ }^{\circ}\text{C}$,标准差为 $0.81\sim0.88\text{ }^{\circ}\text{C}$,相关系数在 0.985 以上。以 Himawari-8/AHI 海表温度数据为参考,按观测时间为 1 h、空间距离为 4 km 的时空匹配窗口,对 FY-4A/AGRI 海表温度进行质量检验,质量为优的像元平均偏差为 $-0.26\sim-0.07\text{ }^{\circ}\text{C}$,标准差为 $0.68\sim0.82\text{ }^{\circ}\text{C}$,两者相关系数在 0.985 以上,达到 0.001 显著性水平。

关键词: FY-4A/AGRI; 海表温度; 质量控制

引 言

海表温度(sea surface temperature, SST)是气候变化的关键指标之一,精准的海表温度空间分布和时序变化数据对气候变化检测、季节预测、天气和海洋业务预报、军事和国防、生态评估、旅游和渔业研究起重要作用^[1-4]。

目前海表温度观测系统主要由现场实测和卫星观测组成。现场实测海表温度主要由船舶和浮标(漂流浮标和锚定浮标)采集获取,数据质量好,但空间覆盖度较低;卫星观测海表温度具备高空间覆盖度的优势,根据观测平台主要分为极轨和静止系列。极轨系列卫星红外仪器可提供高空间分辨率、高精度海表温度产品,如 FY-3C 卫星搭载的 VIRR(visible and infra-red radiometer)成像仪可提供每日两次全球观测,提供星下点 1.1 km 分辨率的海表温度产品^[5],而美国国家海洋与大气管理局(National

Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)卫星搭载的 VIIRS(visible and infrared imaging radiometer suite)仪器可以提供分辨率小于 1 km 的海表温度产品^[6-7]。静止系列卫星可提供同一区域多时次海表温度观测,其主要优点是观测频次高,可获取更大空间范围的晴空海表温度^[8],如欧洲 MSG(Meteosat Second Generation)卫星搭载的 SEVIRI(spining enhanced visible and infrared imager)可每日提供 96 个全圆盘海表温度^[9]。美国 GOES-16/17(Geostationary Operational Environmental Satellite)卫星搭载的 ABI(advanced baseline imager)^[10]、日本 Himawari-8 卫星搭载的 AHI(advanced Himawari imager)可以每 10 min 提供 1 次全圆盘海表温度。

采用热红外通道反演的卫星海表温度产品在精度和空间分辨率方面均优于微波反演海表温度,但易受云的影响^[11-12]。随着卫星观测仪器性能的提升和海表温度反演技术日趋成熟,采用 MCSST(multi-

2022-12-30 收到,2023-03-13 收到再改稿。

资助项目:风云四号 A 星地面系统工程,国家重点研究发展计划(2018YFC1506601)

* 通信作者,邮箱:wangsj@cma.gov.cn

channel SST), NLSST(non-linear SST)算法处理卫星热红外通道数据、现场实测海表温度数据可得到高精度的海表温度产品。目前,此类代表性反演算法已成功应用于欧洲气象卫星组织(European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites, EUMETSAT)的 OSI SAF(Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility)海表温度产品^[13],美国国家航空航天局(NASA)的 Pathfinder 海表温度产品^[14-15]以及 NOAA/STAR(NOAA Center for Satellite Applications and Research)的 ACSPO(Advanced Clear Sky Processor for Ocean)系统生产的海表温度产品^[16-17]。

本文介绍 FY-4A/AGRI 业务海表温度产品反演算法,并通过现场实测海表温度、Himawari-8/AHI 海表温度产品两类检验源对 FY-4A 产品生成系统生产的标称全圆盘海温产品进行精度检验。

1 数据

1.1 FY-4A 数据

风云四号系列气象卫星(FY-4)作为我国第2代静止气象卫星,其首发星 FY-4A 于2016年12月11日成功发射,并于2017年5月25日定点于 104.5°E ^[18-19]。其上搭载的先进静止轨道辐射成像仪(advanced geostationary radiation imager, AGRI)是迄今为止我国静止轨道最先进的辐射成像仪,覆盖可见光、短波红外、中波红外和长波红外等波段,较 FY-2 气象卫星仪器性能提升显著,光谱通道从 FY-2 气象卫星的5个扩展到14个, FY-4 气象卫星采用三轴稳定平台,比 FY-2 气象卫星自旋稳定平台优势显著,全圆盘图像观测时间从30 min 缩短为15 min,最高空间分辨率从1.25 km 提高到0.5 km^[20]。FY-4A/AGRI 通道设置参见文献^[21],红外窗区通道 $10.7\ \mu\text{m}$ 和 $12.0\ \mu\text{m}$ 及中波红外通道 $3.75\ \mu\text{m}$ 可用于估计海表温度。FY-4A/AGRI 每日获取40幅全圆盘观测数据,空间分辨率为星下点 $4\ \text{km}$ ^[22]。

选用2021年7月—2022年6月 FY-4A/AGRI L1B、云检测和海表温度产品数据为研究对象,其中 FY-4A/AGRI L1B 来自国家卫星气象中心 FY-4(01)批地面应用系统的数据预处理系统,是经过辐

射定标以及地理坐标订正的 L1 通道数据和地理定位(geolocation, GEO)数据,以 HDF 文件格式存贮和分发,其中 L1 通道数据提供全圆盘逐像元观测计数值,通过文件内定标表转换可获得观测亮温数据;GEO 数据提供逐像元观测角度信息,如卫星方位角、卫星天顶角、太阳方位角、太阳天顶角、海陆掩码等信息。FY-4A/AGRI 云检测产品(cloud mask, CLM)来自产品生成系统,包括确信云(cloud)、可能云(probably cloud)、可能晴空(probably clear)、确信晴空(clear)4类,采用 NetCDF 格式存储^[23]。

1.2 现场实测数据

本文选用的现场实测数据来自美国 NOAA/STAR 的 iQuam (in situ SST quality monitor)^[24] V2.1,以 NetCDF 格式按月存储,包含 ICOADS(International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set)等数据,并基于 Reynolds 和 CMC(Canadian Meteorological Centre)参考海表温度进一步质量控制,主要包括漂流浮标、热带锚定浮标、海岸锚定浮标、船舶、ARGO(Array for Realtime Geostrophic Oceanography)浮标、高分辨率浮标、IMOS(Integrated Marine Observing System)船舶和 CRW(NOAA Coral Reef Watch)浮标共8类现场实测海表温度,其质量等级从0到5共6级,其中等级5质量最优,用于 FY-4A/AGRI 海表温度匹配和质量检验。

1.3 Himawari-8 数据

日本静止气象卫星向日葵8号(Himawari-8)于2014年10月7日成功发射,定点于 140.7°E ,观测范围覆盖 $60^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{S}$, $80^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{W}$ 。其搭载的先进的向日葵成像仪 AHI 包含16个光谱通道,覆盖可见光到红外波段,其中红外通道星下点空间分辨率为2 km,每10 min 获取1次全圆盘数据。日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)^[25]和美国 NOAA^[26]均对外发布 Himawari-8/AHI 海表温度产品,前者基于物理反演,是皮层海表温度,后者采用与 FY-4A/AGRI 海表温度一致的统计反演,相当于海表20 cm 深的海水温度。本文选用美国 ACSPO 的 Himawari-8/AHI 逐小时海表温度作为参考,对 FY-4A/AGRI 海表温度进行质量检验。ACSPO 的 Himawari-8/AHI 逐小时海表温度是在10 min 全圆盘海

表温度的基础上通过合成处理生成,其海表温度覆盖度优于单个 10 min 的全圆盘海表温度,空间分辨率为星下点 2 km。Kramar 等^[26]基于漂流和锚定浮标对 ACSPO 的 10 min 全圆盘海表温度产品评估表明:其偏差在 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 之间,标准偏差为 $0.4\sim 0.6^{\circ}\text{C}$ 。该海表温度产品提供逐像元质量等级,本文选取质量最优数据用于 FY-4A/AGRI 海表温度质量检验。

1.4 背景场海表温度

本文使用的背景场海表温度为 1982—2011 年 30 年平均逐日 OISST(optimum interpolation SST),来自美国国家海洋与大气管理局国家气候中心(NOAA/NCDC),分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$,以 NetCDF 格式存储,用于 FY-4A/AGRI 海表温度匹配及 NLSST 反演算法的第 1 猜测海表温度,通过双线性插值得到 FY-4A/AGRI 标称格点的 30 年平均逐日海表温度。

2 产品算法

2.1 海表温度回归算法

2.1.1 海表温度匹配数据集

以 FY-4A/AGRI L1B 数据、云检测产品和现场实测海表温度数据为输入,按空间为 5 km、时间为 30 min 的匹配窗口进行匹配,建立 2021 年 7 月—2022 年 6 月逐月海表温度匹配数据集。匹配首先构建以当前像元为中心的 3×3 数据块,按照以下条件建立匹配数据集:①现场实测海表温度范围为 $82^{\circ}\text{S}\sim 82^{\circ}\text{N}$, $15^{\circ}\text{E}\sim 170^{\circ}\text{W}$,浮标类型为漂流浮标和热带锚定浮标,浮标质量等级为最优。② 3×3 数据块中心像元的云检测类型为确信晴空海洋。③ 3×3 数据块中心像元的卫星观测时间与浮标观测时间差不大于 30 min。④ 3×3 数据块中心像元与浮标的空间距离不大于 5 km。

对满足上述条件的匹配样本根据卫星观测的经纬度信息通过双线性插值计算其对应的 30 年平均逐日 OISST。每个匹配样本包含卫星观测时间、经纬度、分裂窗通道亮温、中波红外通道亮温、太阳天顶角、卫星天顶角、 3×3 数据块中陆地像元数量、浮标海表温度、浮标观测时间、浮标经纬度、浮标类型、浮标质量等级和 30 年平均逐日 OISST。

为了提高海表温度回归精度,首先需要确保匹配样本的质量,在上述处理的基础上,对 FY-4A/AGRI 观测数据进一步质量控制,主要包括亮温阈值检验、 3×3 空间一致性检验、通道亮温差检验等剔除残存的云污染像元,从而筛选质量最优的卫星观测数据。

引入黑名单机制,用于剔除质量控制未能筛选出的异常卫星观测数据。黑名单数据主要包括卫星在轨调整阶段数据和海表温度精度异常数据,如卫星姿态、轨道控制期间的观测数据。卫星调整信息通过业务公告获取,精度异常数据通过匹配数据集进行回归、反演处理得到初始海表温度,随后立即进行精度检验,筛选出异常数据加入黑名单。剔除黑名单数据后,得到最终精选的海表温度匹配数据集。

2.1.2 海表温度回归模型

基于卫星的地球红外辐射测量是海表温度重要的信息来源。在红外波段,到达卫星探测器的辐射因为大气吸收会有部分衰减。为了计算精确的海表温度必须进行大气订正。水汽和 CO_2 , CH_4 , NO_2 以及气溶胶是造成红外辐射大气衰减的主要因子,其中水汽吸收的影响最为严重。McClain 等^[27]提出多通道海表温度回归算法(multi-channel SST, MCSST), AVHRR(advanced very high resolution radiometer)以此为第 1 代业务海表温度反演算法。Walton^[28]对 MCSST 进行改进,引入第 1 猜测海表温度,构建 NLSST 算法作为业务海表温度反演算法。NLSST 算法引入第 1 猜测海表温度作为大气湿度先验数据,相比 MCSST 算法反演精度更高,因此 FY-4A/AGRI 业务海表温度产品选用 NLSST 算法进行海表温度反演。海表温度回归模型采用

$$T_{\text{R}} = a_0 + a_1 \times T_{11} + a_2 \times T_{\text{FG}} \times (T_{11} - T_{12}) + a_3 \times (T_{11} - T_{12})(\sec\theta - 1)。 \quad (1)$$

式(1)中, T_{R} 代表反演海表温度(单位: $^{\circ}\text{C}$), T_{11} 和 T_{12} 为 $10.7\ \mu\text{m}$ 和 $12.0\ \mu\text{m}$ 通道亮温数据(单位: K), θ 为卫星天顶角。 T_{FG} 为第 1 猜测海表温度(单位: $^{\circ}\text{C}$), 本文采用 30 年平均逐日 OISST 数据。 a_i ($i=0, 1, 2, 3$) 为海表温度回归系数, 通过现场实测海表温度和卫星观测亮温的回归计算得到。

2.1.3 海表温度回归系数

在海表温度匹配数据集的基础上,按太阳天顶角区分白天和夜间,其中太阳天顶角不小于 90° 为

夜间,反之为白天。根据 NLSST 回归模型,通过最小二乘法分别进行回归,得到白天和夜间的海表温度回归系数, a_0 白天为 -252.564 ,夜间为 -251.111 ; a_1 白天为 0.933514 ,夜间为 0.928865 ; a_2 白天为 0.081391 ,夜间为 0.082602 , a_3 白天为 0.775748 ,夜间为 0.867961 。回归系数计算前需要积累 1~3 个月的匹配数据集,通常当仪器状态发生变化或产品精度恶化时进行更换。表 1 是利用 2020 年 8 月—2020 年 9 月匹配数据集计算的 FY-4A/AGRI NLSST 算法误差信息。

表 1 FY-4A/AGRI NLSST 算法误差信息

Table 1 SST deviation of FY-4A/AGRI NLSST algorithm

统计量	白天	夜间
偏差/°C	0.01	0.05
绝对偏差/°C	0.5	0.53
标准差/°C	0.61	0.66
样本量	7381	7803

2.2 海表温度反演算法

通过式(1)和 2.1.3 节的回归系数反演计算海表温度。为了提高海表温度的覆盖度,业务海表温度反演算法对云检测结果为确信晴空和可能晴空的像元均进行反演,以避免因云过判造成有效海表温度像元缺失,但会由此引入云污染,造成反演海表温度精度降低。为了兼顾海表温度反演精度和覆盖度,在反演过程中引入角度控制、空间一致性检验、气候阈值检验等质量控制方法^[5,29]:①角度控制,只对卫星天顶角不超过 70° 的像元进行反演处理。②空间一致性检验,构建 3×3 数据块,统计数据块内晴空海洋像元数量。③气候阈值检验,以背景场海表温度为参考进行气候阈值检验。当像元满足气候阈值检验且 3×3 数据块同为晴空海洋像元时,海表温度质量为优,仅满足气候阈值检验,海表温度质量为良,其他为差。

基于反演和质量控制结果,将海表温度像元质量分为优、良、差 3 个质量等级,最终获得的海表温度产品包含全圆盘海表温度、逐像元质量标识等数据集,以 NetCDF 格式存储。

由于静止卫星的观测特点,在同一全圆盘会出现白天、夜间和晨昏(白天夜间交界)数据共存的现

象,为了保证全圆盘海表温度分布的连续性,采用以下步骤分区处理:①太阳天顶角 $\beta \leq 75^\circ$ 的海洋像元,采用白天海表温度回归系数进行反演。② $\beta \geq 85^\circ$ 的海洋像元,采用夜间海表温度回归系数进行反演。③ $75^\circ < \beta < 85^\circ$ 的海洋像元,以白天和夜间海表温度回归系数分别进行反演,随后根据太阳天顶角按照式(2)和式(3)分别计算白天和夜间的权重系数 w_d 和 w_n ,按照式(4)计算加权平均后的晨昏海表温度 t ,其中 t_d 和 t_n 分别是白天和夜间的海表温度。

$$w_d = 1.0 - (\beta - 75) / (85 - 75), \quad (2)$$

$$w_n = 1.0 - w_d, \quad (3)$$

$$t = w_d \times t_d + w_n \times t_n. \quad (4)$$

3 质量检验及误差分析

3.1 质量检验方法

3.1.1 基于现场实测海表温度的质量检验方法

以 iQuam V2.1 现场实测海表温度数据为检验源,对 2021 年 7 月—2022 年 6 月的 FY-4A/AGRI 海表温度进行质量检验,匹配条件:① FY-4A/AGRI 海表温度质量等级为优、良、差。②浮标类型为漂流浮标和热带锚定浮标,质量等级为优。③ FY-4A/AGRI 海表温度像元与浮标的空间距离不大于 4 km。④ FY-4A/AGRI 海表温度像元观测时间与浮标的观测时间差不大于 30 min。

满足上述匹配条件的样本记录 FY-4A/AGRI 海表温度观测时间、经纬度、太阳天顶角、卫星天顶角、FY-4A/AGRI 海表温度、浮标海表温度、浮标观测时间、浮标经纬度、浮标类型。同一个浮标数据和同时次 FY-4A/AGRI 海表温度多个像元满足空间匹配条件时,选择距离最近的像元。建立 2021 年 7 月—2022 年 6 月的匹配数据集,在 FY-4A/AGRI 海表温度减去浮标海表温度的基础上,以月为单位按质量等级优、良、差分别统计白天、夜间和晨昏海表温度的误差。

白天、夜间和晨昏的海表温度根据匹配数据集 中的太阳天顶角 β 进行区分, $\beta \leq 75^\circ$ 为白天, $\beta \geq 85^\circ$ 为夜间, $75^\circ < \beta < 85^\circ$ 为晨昏;白天样本量为 288650,夜间样本量为 368292,晨昏样本量为 49485。

3.1.2 基于卫星海表温度的质量检验方法

选取与 FY-4A/AGRI 有相同观测区域的 Hi-

himawari-8/AHI 小时标称全圆盘海表温度为参考,对 2021 年 7 月—2022 年 6 月的 FY-4A/AGRI 标称全圆盘海表温度进行质量检验。由于 FY-4A/AGRI 标称全圆盘星下点空间分辨率为 4 km, Himawari-8/AHI 标称全圆盘的星下点空间分辨率为 2 km; FY-4A/AGRI 每小时整点、每 3 h 连续 3 次全圆盘观测, Himawari-8/AHI 小时海表温度为 1 h 内的卫星海表温度,二者的时空分辨率不同,因此采用以下步骤进行匹配建立匹配数据集:①FY-4A/AGRI 海表温度质量等级为优。②Himawari-8/AHI 海表温度质量等级为优。③FY-4A/AGRI 海表温度像元与 Himawari-8/AHI 海表温度像元在同 1 h 内。④FY-4A/AGRI 海表温度像元与 Himawari-8/AHI 海表温度像元的空间距离不大于 4 km。

满足上述匹配条件的样本记录 FY-4A/AGRI 海表温度与 Himawari-8/AHI 海表温度的观测时间、经纬度和海表温度信息。同一个 FY-4A/AGRI 海表温度像元与多个 Himawari-8/AHI 海表温度

像元满足空间匹配条件时,选择距离最近的像元。建立 Himawari-8/AHI 海表温度和 FY-4A/AGRI 海表温度匹配数据集,在 FY-4A/AGRI 海表温度减去 Himawari-8/AHI 海表温度的基础上以月为单位统计 FY-4A/AGRI 全圆盘海表温度的误差。

3.2 质量检验结果

3.2.1 基于现场实测海表温度的质量检验结果

以现场实测海表温度为参考的 2021 年 7 月—2022 年 6 月 FY-4A/AGRI 海表温度误差统计结果见表 2。质量为优的海表温度平均偏差为 $-0.45 \sim -0.42^\circ\text{C}$, 标准差为 $0.81 \sim 0.88^\circ\text{C}$; 质量为良的海表温度平均偏差为 $-1.02 \sim -0.99^\circ\text{C}$, 标准差为 $0.94 \sim 1.03^\circ\text{C}$; 质量为差的海表温度平均偏差为 $-2.94 \sim -2.25^\circ\text{C}$, 标准差为 $1.94 \sim 1.99^\circ\text{C}$ 。图 1 为 FY-4A/AGRI 海表温度和浮标海表温度偏差的直方图,两者偏差接近高斯分布。图 2 为 FY-4A/AGRI 海表温度和浮标海表温度的散点密度图,两者相关系数均超过 0.985,达到 0.001 显著性水平。

图 3 是 $5^\circ \times 5^\circ$ 经纬度方块内 FY-4A/AGRI 海

表 2 以浮标海表温度为参考的 FY-4A/AGRI 海表温度误差统计
Table 2 Error information of FY-4A/AGRI SST relative to buoy SST

时段	统计量	优	良	差
白天	平均偏差/ $^\circ\text{C}$	-0.45	-1.00	-2.25
	标准差/ $^\circ\text{C}$	0.81	0.94	1.94
	样本量	171473	81570	35607
夜间	平均偏差/ $^\circ\text{C}$	-0.42	-0.99	-2.94
	标准差/ $^\circ\text{C}$	0.88	1.03	1.99
	样本量	199364	92084	76844
晨昏	平均偏差/ $^\circ\text{C}$	-0.42	-1.02	-2.80
	标准差/ $^\circ\text{C}$	0.85	0.99	1.97
	样本量	28501	12386	8598

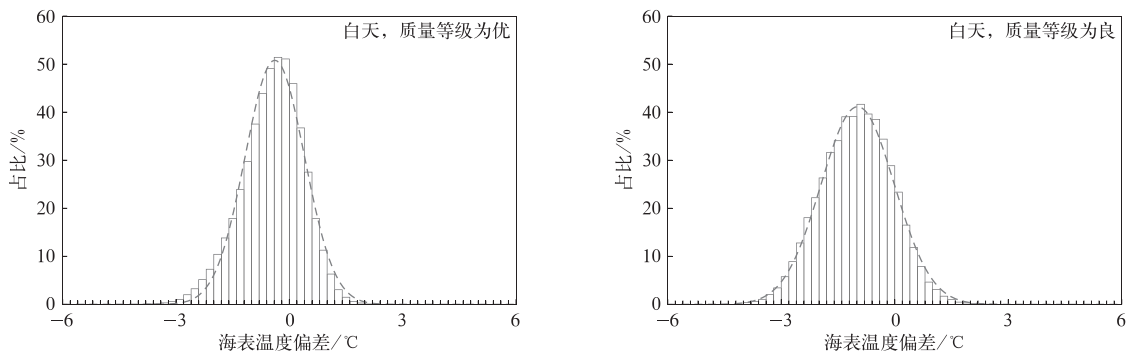
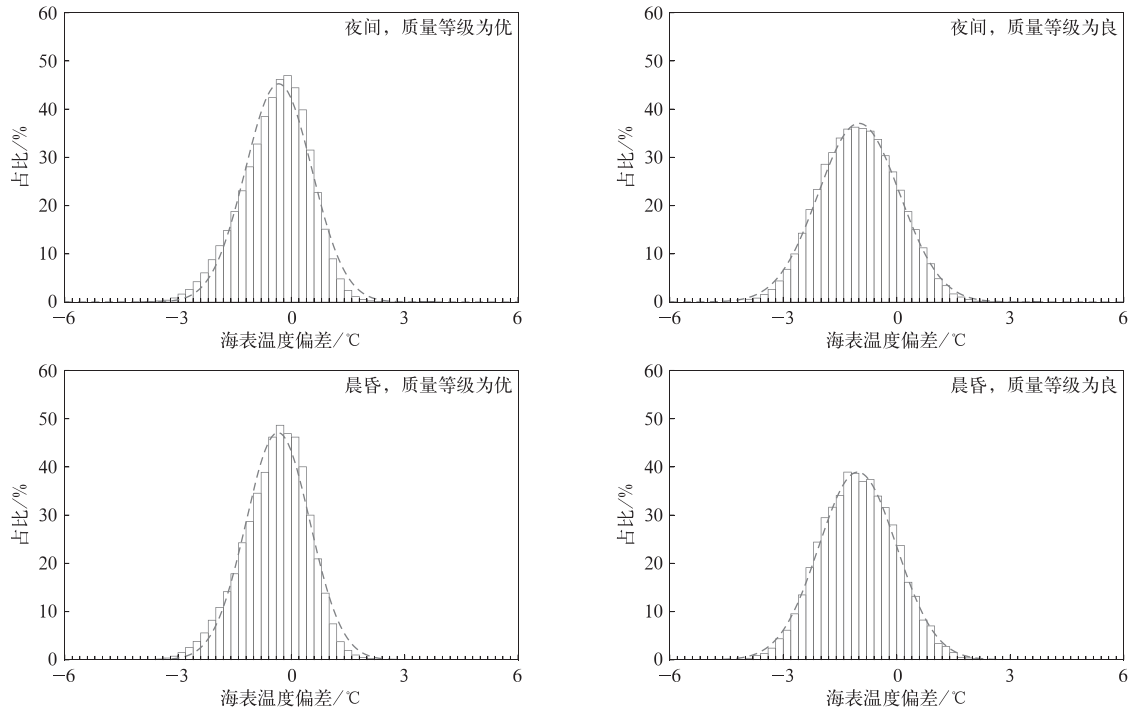


图 1 2021 年 7 月—2022 年 6 月 FY-4A/AGRI 海表温度和浮标海表温度偏差直方图

Fig. 1 Histogram of difference between FY-4A/AGRI SST and buoy SST from Jul 2021 to Jun 2022



续图 1

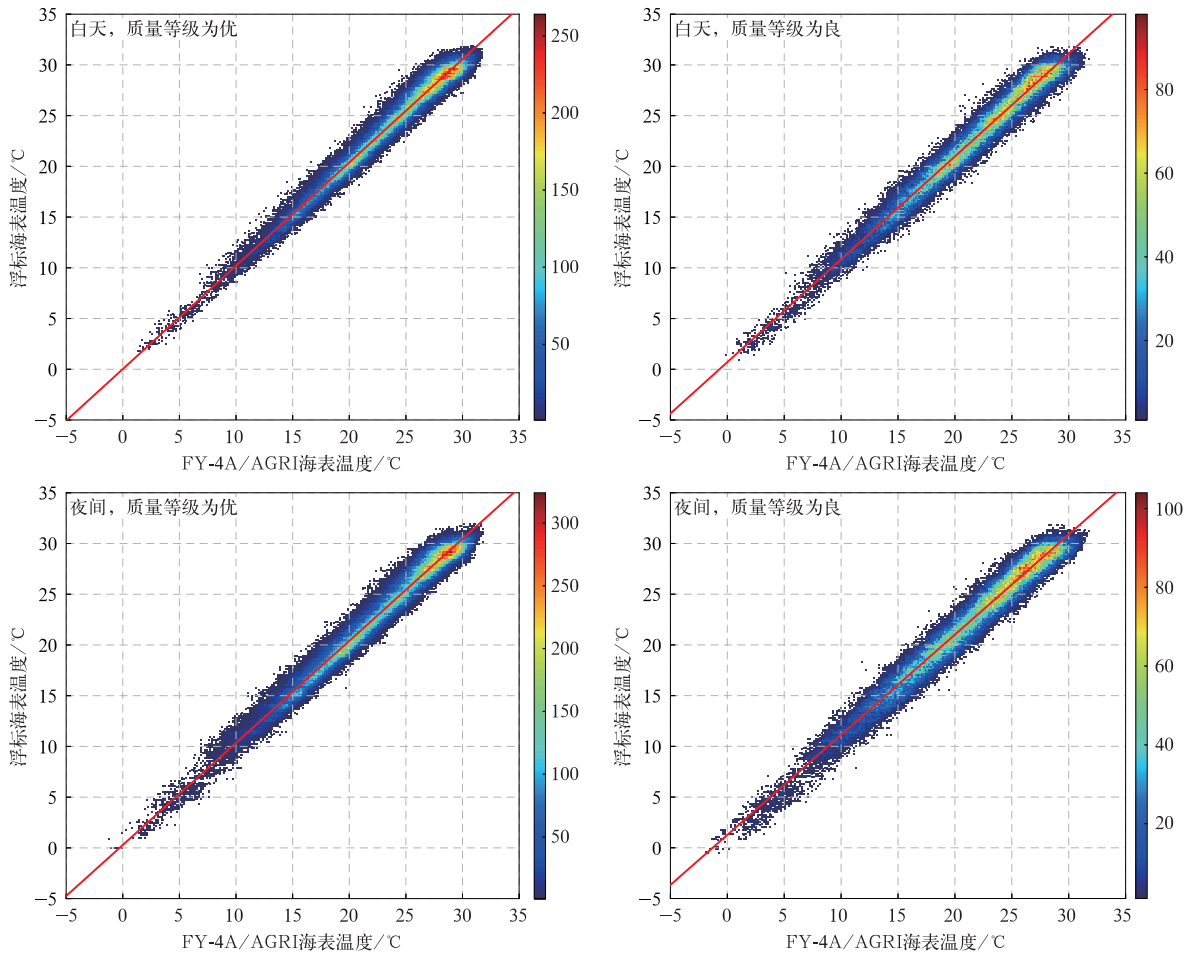
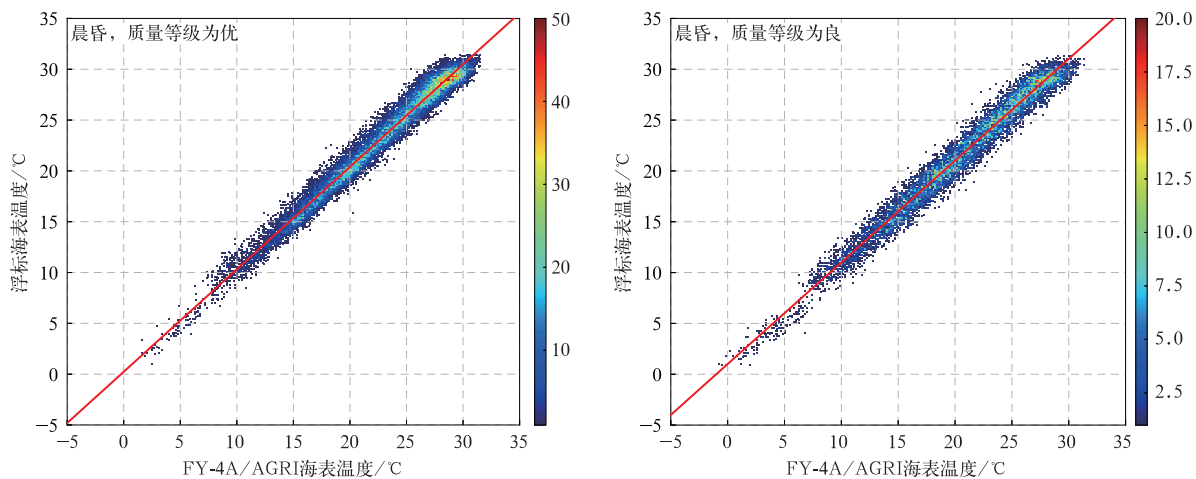


图 2 2021 年 7 月—2022 年 6 月 FY-4A/AGRI 海表温度和浮标海表温度散点密度图
Fig. 2 Scatter density map of FY-4A/AGRI SST and buoy SST from Jul 2021 to Jun 2022



续图 2

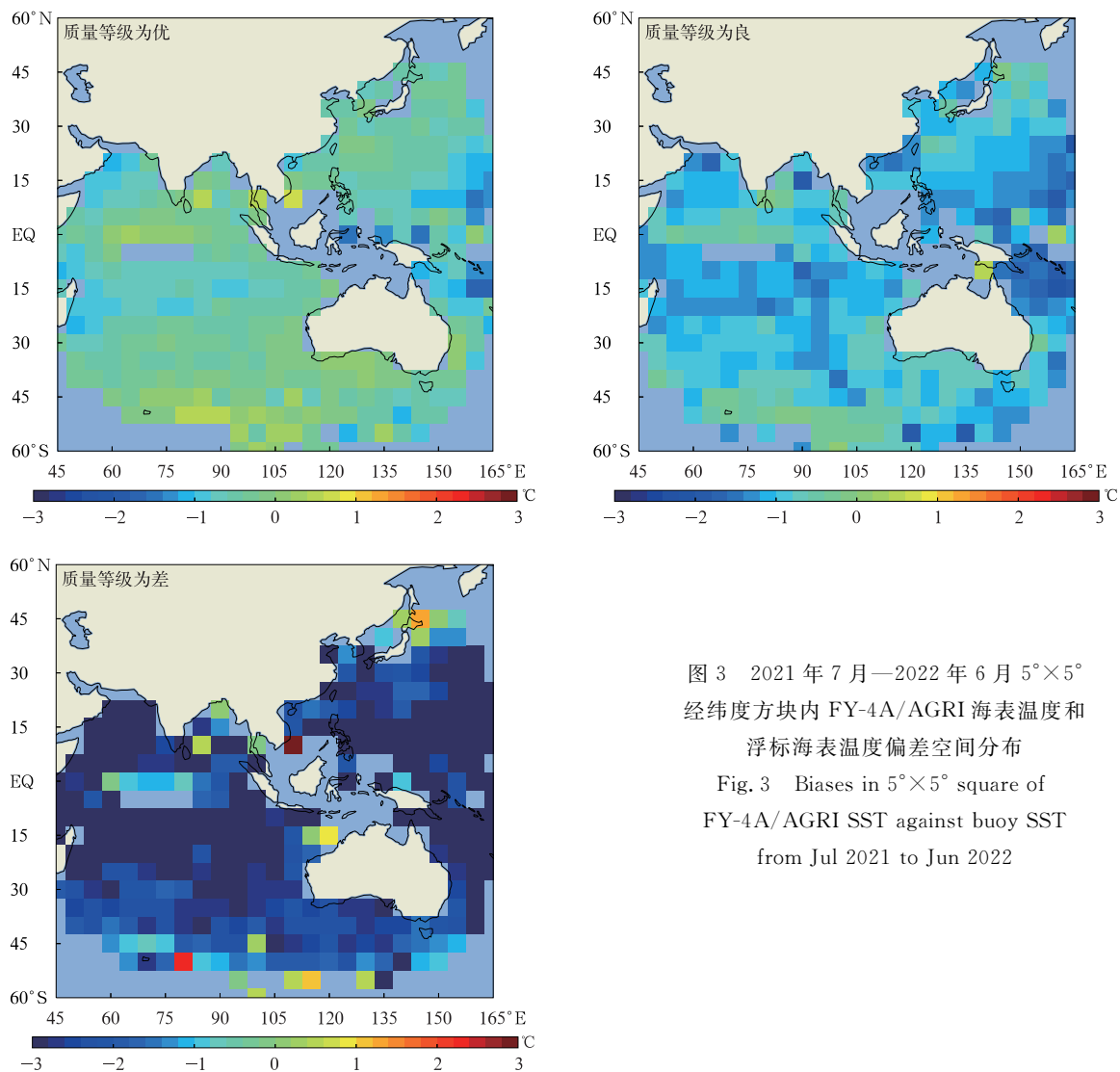


图 3 2021 年 7 月—2022 年 6 月 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 经纬度方块内 FY-4A/AGRI 海表温度和浮标海表温度偏差空间分布

Fig. 3 Biases in $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ square of FY-4A/AGRI SST against buoy SST from Jul 2021 to Jun 2022

表温度和浮标海表温度偏差的空间分布,按照质量等级展示。质量为优的海表温度负偏差主要集中在

全圆盘边缘区,尤其在圆盘右侧太平洋区域,主要是由于边缘区观测路径长受水汽等因素影响更加严重,

而采用全局海表温度回归系数的 NLSST 算法无法完全消除区域大气衰减所造成的偏差。质量为良和质量为差的海表温度整体偏低,由于采用云检测确信晴空和可能晴空的像元进行反演,残存的云污染是造成海表温度负偏差的另一个重要因素。下一步工作是改进反演算法和云检测效果,提高海表温度

产品精度。

对 2021 年 7 月—2022 年 6 月匹配数据进行逐月统计。质量为优的海表温度平均偏差为 $-0.66 \sim -0.27^{\circ}\text{C}$,标准差为 $0.76 \sim 0.91^{\circ}\text{C}$;质量为良的海表温度平均偏差为 $-1.25 \sim -0.80^{\circ}\text{C}$,标准差为 $0.87 \sim 1.10^{\circ}\text{C}$ 。图 4 为以浮标海表温度为参考的

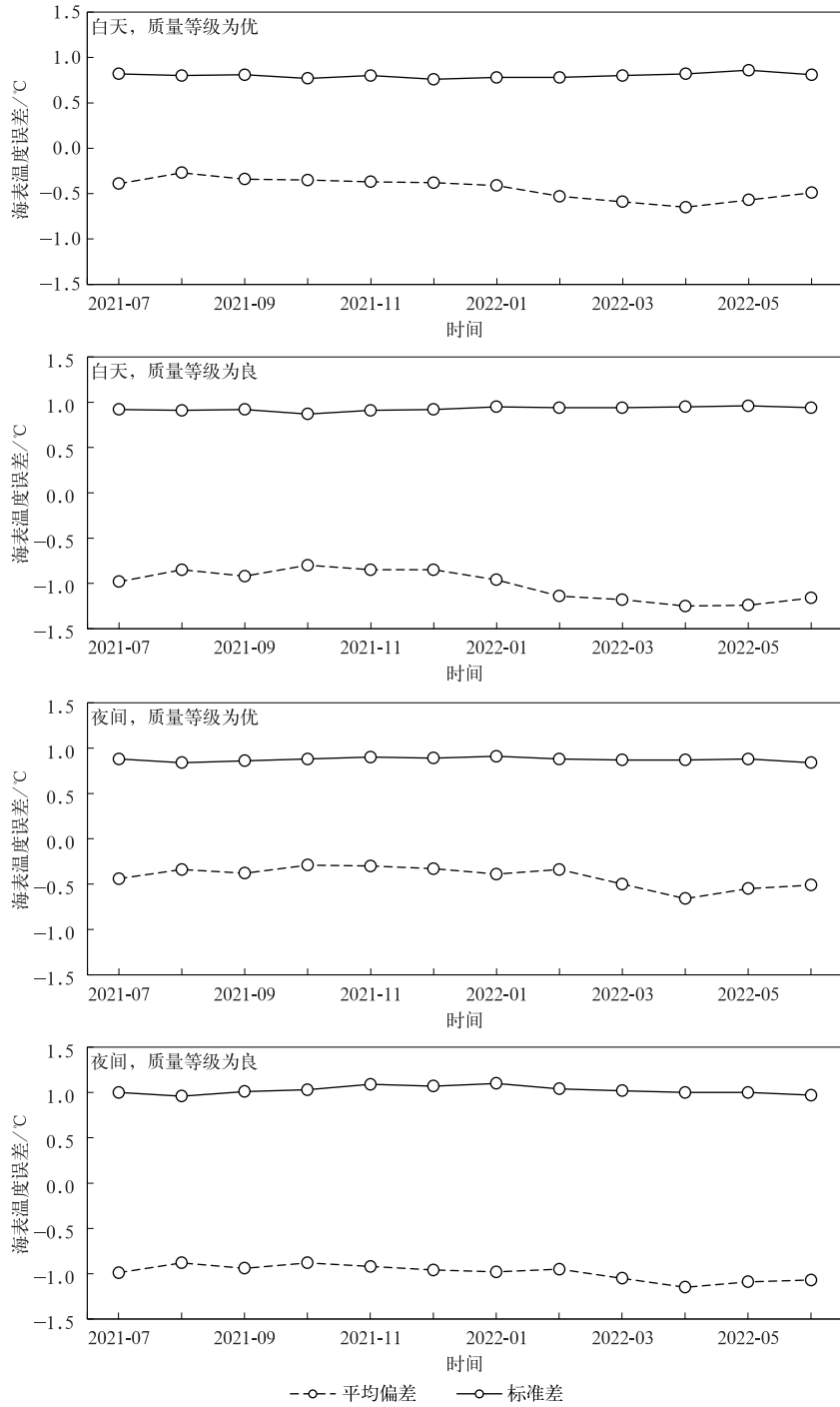
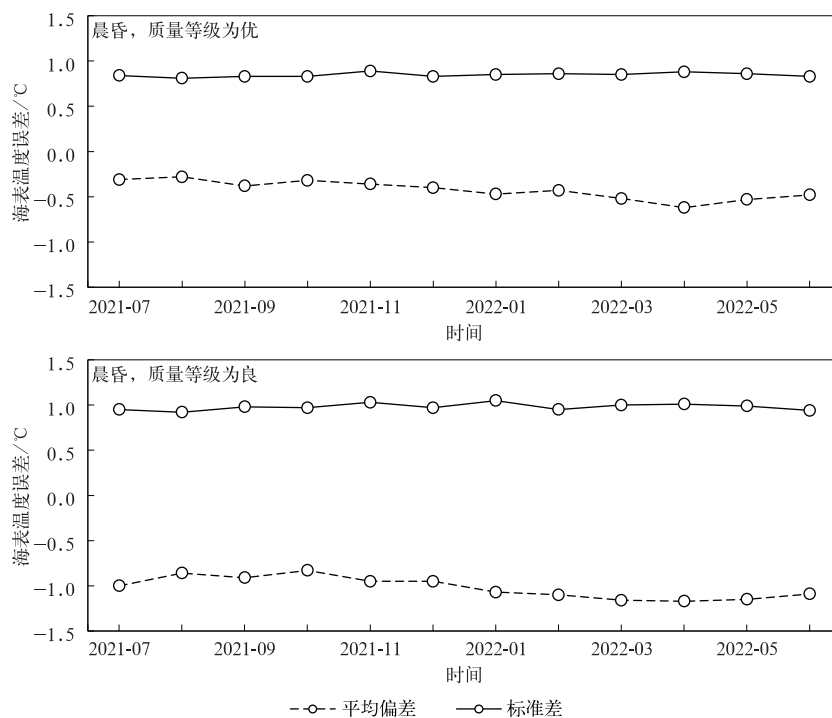


图 4 2021 年 7 月—2022 年 6 月以浮标海表温度为参考的 FY-4A/AGRI 海表温度误差时间序列
 Fig. 4 Time series of bias and standard deviation of FY-4A/AGRI SST relative to buoy SST from Jul 2021 to Jun 2022



续图 4

FY-4A/AGRI 海表温度偏差和标准差时间序列。由图 4 可见,夜间海温偏差的一致性较好,白天存在季节性波动,但白天的标准差优于夜间和晨昏,这与白天的云检测由可见光通道和红外通道联合判识,而夜间只有红外通道判识,白天的云检测准确性高于夜间有关。2 月以后海表温度负偏差逐渐加大,5 月和 6 月稍有改善,说明海表温度回归系数的长时间序列适用性不足,业务回归系数需要重新计算。采用当月加前后各 1 个月的海表温度匹配样本计算海表温度回归系数进行长时间序列海表温度反演重处理,有利于提高 FY-4A/AGRI 海表温度的精度和

长序列一致性。

3. 2. 2 基于卫星海表温度的质量检验结果

基于 ACSPO 系统生成的 Himawari-8/AHI L2C 海表温度产品,对 2021 年 7 月—2022 年 6 月海表温度进行逐月交叉比对。平均偏差为 $-0.26 \sim -0.07^{\circ}\text{C}$,标准差为 $0.68 \sim 0.82^{\circ}\text{C}$ 。以 Himawari-8/AHI 海表温度为参考的 FY-4A/AGRI 海表温度的偏差和标准差时间序列如图 5 所示。挑选连续 3 个月每月 1 日的数据进行统计,图 6 为 FY-4A/AGRI 海表温度和 Himawari-8/AHI L2C 海表温度的散点密度图,相关系数均在 0.985 以上,表明两种

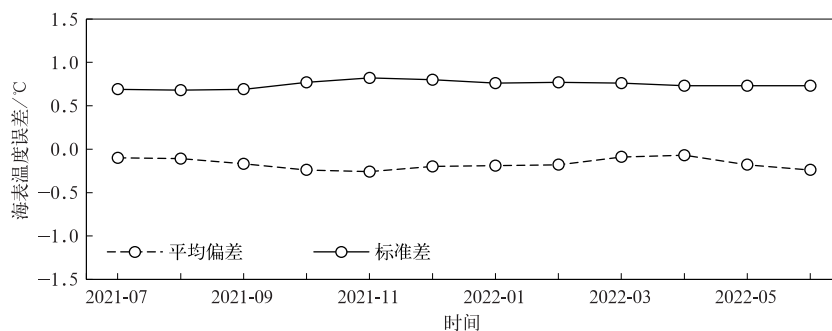


图 5 2021 年 7 月—2022 年 6 月以 Himawari-8/AHI 海表温度为参考的质量等级为优的 FY-4A/AGRI 海表温度误差时间序列

Fig. 5 Time series of bias and standard deviation of excellent quality FY-4A/AGRI SST relative to Himawari-8/AHI SST from Jul 2021 to Jun 2022

海表温度产品相关性较高。

3.3 误差分析

FY-4A/AGRI海表温度产品的精度高度依赖于前端定位^[30-32]、定标预处理^[33-35]和云检测产品^[36]精度。FY-4A/AGRI海表温度观域内下垫面复杂,尤其是星下点附近陆地像元较多,且 $20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 范围内浮标观测较少,使海温回归系数的全局代表性

不足,易造成区域偏差。由海表温度偏差空间分布(图3)可以看到,偏差主要集中在圆盘边缘区,尤其在圆盘右侧太平洋区域,一方面是由于圆盘边缘区观测路径长受水汽等因素影响严重,采用全局海表温度回归系数无法完全消除区域大气衰减造成的误差。云污染的存在也是造成海表温度负偏差的重要因素。

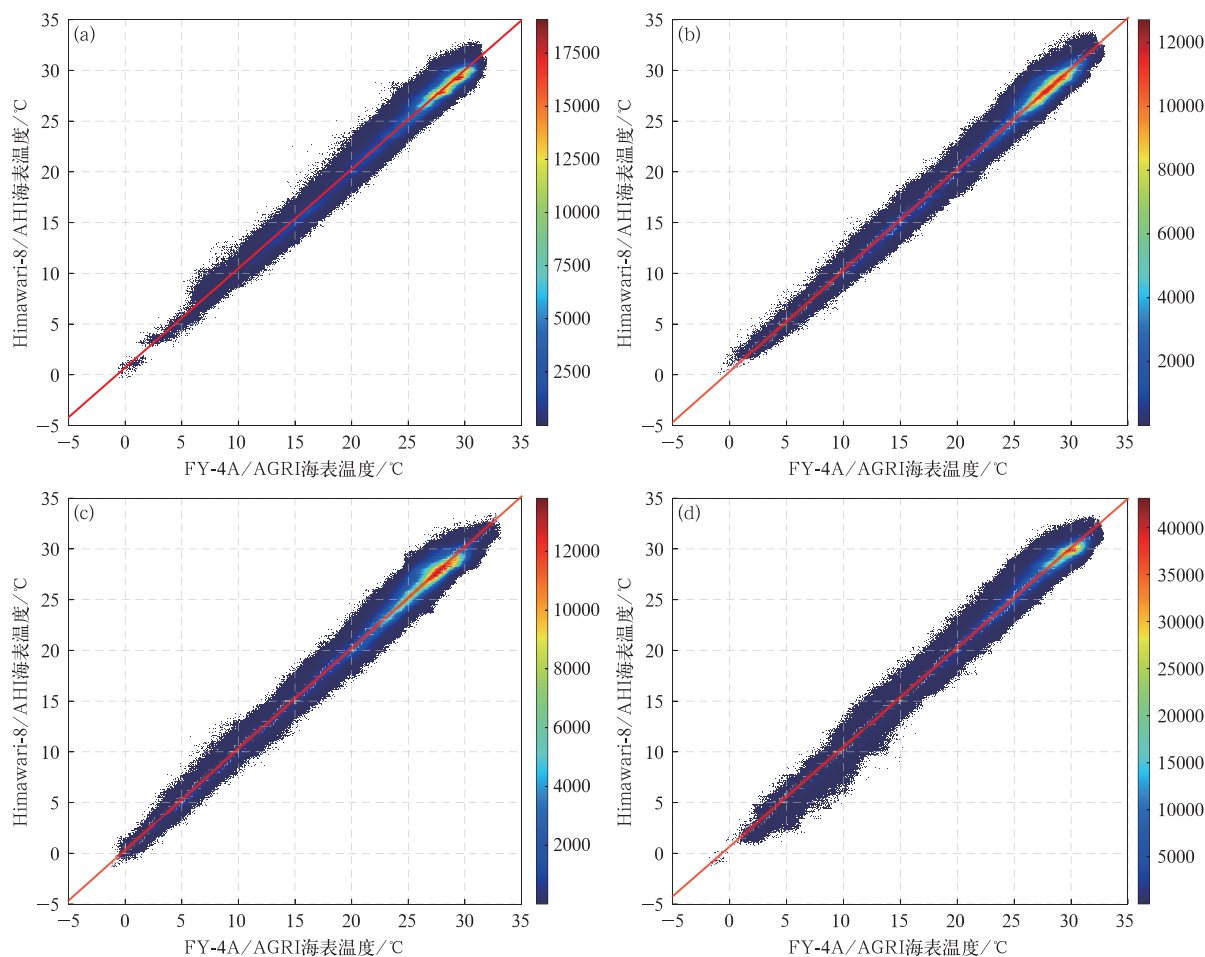


图6 FY-4A/AGRI海表温度和 Himawari-8/AHI海表温度散点图

(a)2021年7月1日、8月1日和9月1日,(b)2021年10月1日、11月1日和12月1日,
(c)2022年1月1日、2月1日和3月1日,(d)2022年4月1日、5月1日和6月1日

Fig. 6 Scatter density map of FY-4A/AGRI SST and Himawari-8/AHI SST

(a)1 Jul,1 Aug and 1 Sep in 2021,(b)1 Oct,1 Nov and 1 Dec in 2021,
(c)1 Jan,1 Feb and 1 Mar in 2022,(d)1 Apr,1 May and 1 Jun in 2022

4 结论

海表温度产品作为FY-4A/AGRI基础定量产品之一,使用红外窗区 $10.7\ \mu\text{m}$ 和 $12.0\ \mu\text{m}$ 两通道,采用NLSST算法在业务系统近实时生产,每日

生成40个全圆盘海表温度产品,空间分辨率为星下点 $4\ \text{km}$,以NetCDF格式存储。数据文件不仅提供全圆盘海表温度数据,还提供逐像元质量标识,分为优、良、差3级,得到如下结论:

1) 与现场实测海表温度相比,2021年7月—2022年6月FY-4A/AGRI海表温度产品质量等级

为优的海表温度平均偏差为 $-0.45\sim-0.42^{\circ}\text{C}$,标准差为 $0.81\sim0.88^{\circ}\text{C}$,相关系数均在0.985以上。优、良、差像元占比分别为56.5%,26.3%和17.2%。

2) 与 Himawari-8/AHI 海表温度相比,2021年7月—2022年6月 FY-4A/AGRI 海表温度产品质量等级为优的海表温度平均偏差为 $-0.26\sim-0.07^{\circ}\text{C}$,标准差为 $0.68\sim0.82^{\circ}\text{C}$,相关系数均在0.985以上,表明两种海表温度产品一致性高。

3) 用户在使用 FY-4A/AGRI 海表温度产品时,可根据应用需求选用不同质量等级的海表温度。对于从事气候研究的用户,可选用质量等级为优的海表温度;对于海表温度精度要求不太高而对海表温度覆盖度要求高的海洋环境监测用户,可选用质量等级为优和良的海表温度。

4) FY-4A/AGRI 海表温度产品的精度高度依赖于 AGRI 仪器性能、星上运行状态、定位和定标精度和上游云检测产品的准确性,下一步将重点改进海表温度的回归系数、质量控制算法和云污染检测,以提高海表温度产品的精度。

致 谢:本项工作得到国家卫星气象中心许健民院士、徐娜研究员和刘健研究员的大力支持与指导,在此表示感谢。感谢美国国家海洋与大气管理局卫星应用研究中心(NOAA/STAR)提供的现场实测海表温度和 Himawari-8/AHI 海表温度,感谢美国国家海洋与大气管理局国家气候中心(NOAA/NCDC)提供的30年平均逐日 OISST。

参 考 文 献

- [1] Ignatov A. GOES-R Advanced Baseline Imager (ABI) Algorithm Theoretical Basis Document for Sea Surface Temperature. [2022-11-29]. https://www.star.nesdis.noaa.gov/goesr/documents/ATBDs/Baseline/ATBD_GOES-R_SST-v2.0_Aug2010.pdf.
- [2] Donlon C, Martin M, Stark J, et al. The operational sea surface temperature and sea ice analysis (OSTIA) system. *Remote Sens Environ*, 2012, 116: 140-158.
- [3] 柯宗建, 华丽娟, 钟霖浩, 等. 海温异常对东亚夏季风强度先兆信号的影响. *应用气象学报*, 2015, 26(5): 536-544.
Ke Z J, Hua L J, Zhong L H, et al. The influence of sea surface temperature anomaly on the East Asian summer monsoon strength and its precursor. *J Appl Meteor Sci*, 2015, 26(5): 536-544.
- [4] Brasnett B. The impact of satellite retrievals in a global sea-surface-temperature analysis. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2008, 134(636): 1745-1760.
- [5] 王素娟, 崔鹏, 张鹏, 等. FY-3C/VIRR 海表温度产品及质量检验. *应用气象学报*, 2020, 31(6): 729-739.
Wang S J, Cui P, Zhang P, et al. FY-3C/VIRR sea surface temperature products and quality validation. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(6): 729-739.
- [6] Cayula J F P, May D A, McKenzie B D, et al. VIIRS-derived SST at the naval oceanographic office: From evaluation to operation. *Proc SPIE*, 2013, 8724: 87240S.
- [7] Brasnett B, Colan D S. Assimilating retrievals of sea surface temperature from VIIRS and AMSR2. *J Atmos Ocean Technol*, 2016, 33(2): 361-375.
- [8] Maturi E, Harris A, Mittaz J, et al. A new high-resolution sea surface temperature blended analysis. *Bull Amer Meteor Soc*, 2017, 98(5): 1015-1026.
- [9] Le Borgne P, Legendre G, Marsouin A. Operational SST Retrieval from MSG/SEVIRI Data. The 2006 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, 2006.
- [10] Schmit T J, Gunshor M M, Menzel W P, et al. Introducing the next-generation Advanced Baseline Imager on GOES-R. *Bull Amer Meteor Soc*, 2005, 86(8): 1079-1096.
- [11] Anding D, Kauth R. Estimation of sea surface temperature from space. *Remote Sens Environ*, 1970, 1(4): 217-220.
- [12] Prabhakara C, Dalu G, Kunde V G. Estimation of sea surface temperature from remote sensing in the 11- to 13- μm window region. *J Geophys Res*, 1974, 79(33): 5039-5044.
- [13] OSISAF. Geostationary Sea Surface Temperature Product User Manual. EUMETSAT, Berlin, 2011.
- [14] Kilpatrick K A, Podestá G P, Evans R. Overview of the NOAA/NASA advanced very high resolution radiometer Pathfinder algorithm for sea surface temperature and associated matchup database. *J Geophys Res*, 2001, 106(C5): 9179-9197.
- [15] Casey K S, Brandon T B, Cornillon P, et al. The Past, Present, and Future of the AVHRR Pathfinder SST Program. Springer Netherlands, 2010: 273-287.
- [16] Petrenko B, Ignatov A, Kihai Y, et al. Clear-sky mask for the advanced clear-sky processor for oceans. *J Atmos Ocean Technol*, 2010, 27(10): 1609-1623.
- [17] Saha K, Ignatov A, Liang X M, et al. Selecting a first-guess SST as input to ACSPO. *Proc SPIE*, 2012, 8372: 83720L.
- [18] 高洋, 蔡森, 曹治强, 等. “21·7”河南暴雨环境场及云的宏观特征. *应用气象学报*, 2022, 33(6): 682-695.
Gao Y, Cai M, Cao Z Q, et al. Environmental conditions and cloud macro and micro features of “21·7” extreme heavy rainfall in Henan Province. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(6): 682-695.
- [19] 任素玲, 牛宁, 覃丹宇, 等. 2021年2月北美极低温暴雪的卫星遥感监测. *应用气象学报*, 2022, 33(6): 696-710.
Ren S L, Niu N, Qin D Y, et al. Extreme cold and snowstorm event in North America in February 2021 based on satellite data. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(6): 696-710.
- [20] 张志清, 陆风, 方翔, 等. FY-4 卫星应用和发展. *上海航天*, 2017, 34(4): 8-12.
Zhang Z Q, Lu F, Fang X, et al. Application and development

- of FY-4 meteorological satellite. *Aerospace Shanghai*, 2017, 34(4): 8-12.
- [21] Yang J, Zhang Z Q, Wei C Y, et al. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites, Fengyun-4. *Bull Amer Meteor Soc*, 2017, 98(8): 1637-1658.
- [22] 陆风, 张晓虎, 陈博洋, 等. 风云四号气象卫星成像特性及其应用前景. *海洋气象学报*, 2017, 37(2): 1-12.
Lu F, Zhang X H, Chen B Y, et al. FY-4 geostationary meteorological satellite imaging characteristics and its application prospects. *J Mar Meteor*, 2017, 37(2): 1-12.
- [23] Wang X, Min M, Wang F. Intercomparisons of cloud mask products among Fengyun-4A, Himawari-8, and MODIS. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2019, 57(11): 8827-8839.
- [24] Xu F, Ignatov A. In situ SST quality monitor(iQuam). *J Atmos Ocean Technol*, 2014, 31(1): 164-180.
- [25] Kurihara Y, Murakami H, Kachi M. Sea surface temperature from the new Japanese geostationary meteorological Himawari-8 satellite. *Geophys Res Lett*, 2016, 43(3): 1234-1240.
- [26] Kramar M, Ignatov A, Petrenko B, et al. Near real time SST retrievals from Himawari-8 at NOAA using ACSPO system. *Proc SPIE*, 2016, 9827: 98270L.
- [27] McClain E P, Pichel W G, Walton C C. Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperatures. *J Geophys Res Oceans*, 1985, 90(6): 11587-11601.
- [28] Walton C C. Nonlinear multichannel algorithms for estimating sea surface temperature with AVHRR satellite data. *J Appl Meteorol*, 1988, 27(2): 115-124.
- [29] 王素娟, 崔鹏, 张鹏, 等. FY-3B/VIRR 海表温度算法改进及精度评估. *应用气象学报*, 2014, 25(6): 701-710.
Wang S J, Cui P, Zhang P, et al. The improvement of FY-3B/VIRR SST algorithm and its accuracy. *J Appl Meteor Sci*, 2014, 25(6): 701-710.
- [30] 魏彩英, 张晓虎, 赵现纲, 等. 区域扫描模式下风云二号气象卫星姿态求解方法. *应用气象学报*, 2014, 25(5): 592-599.
Wei C Y, Zhang X H, Zhao X G, et al. FY-2 meteorological satellite attitude solving method under area scan mode. *J Appl Meteor Sci*, 2014, 25(5): 592-599.
- [31] 王素娟, 郭强, 许健民. FY-4 气象卫星定位用导航星选取方法. *应用气象学报*, 2010, 21(2): 149-156.
Wang S J, Guo Q, Xu J M. Guide star sub catalog method for FY-4 meteorological satellite. *J Appl Meteor Sci*, 2010, 21(2): 149-156.
- [32] 陆风, 许健民, 张其松. 风云二号气象卫星姿态和沿步进方向失配角参数对图像影响的模拟研究. *应用气象学报*, 2001, 12(4): 393-399.
Lu F, Xu J M, Zhang Q S. Impact study of attitude and pitch misalignment parameters on FY-2 image navigation with simulation method. *J Appl Meteor Sci*, 2001, 12(4): 393-399.
- [33] 谷松岩, 邱红, 范天锡. FY-2A 与 GMS-5 红外通道遥感数据的辐射定标. *应用气象学报*, 2001, 12(1): 79-84.
Gu S Y, Qiu H, Fan T X. Inter-calibration between FY-2A IR channel and GMS-5 IRA channel. *J Appl Meteor Sci*, 2001, 12(1): 79-84.
- [34] 杨忠东, 刘健. 气象卫星可见光红外光学成像仪发展沿革. *应用气象学报*, 2016, 27(5): 592-603.
Yang Z D, Liu J. A review of visible infrared imaging radiometer on meteorological satellite. *J Appl Meteor Sci*, 2016, 27(5): 592-603.
- [35] 周雪松, 郭启云, 夏元彩, 等. 基于往返式平漂探空的 FY-3D 卫星反演温度检验. *应用气象学报*, 2023, 34(1): 52-64.
Zhou X S, Guo Q Y, Xia Y C, et al. Inspection of FY-3D satellite temperature data based on horizontal drift round-trip sounding data. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(1): 52-64.
- [36] 刘健, 崔鹏, 肖萌. FY-2G 卫星冬夏云量产品偏差分析. *应用气象学报*, 2017, 28(2): 177-188.
Liu J, Cui P, Xiao M. The bias analysis of FY-2G cloud fraction in summer and winter. *J Appl Meteor Sci*, 2017, 28(2): 177-188.

FY-4A/AGRI Sea Surface Temperature Product and Quality Validation

Cui Peng¹⁾²⁾³⁾ Wang Sujuan¹⁾²⁾³⁾ Lu Feng¹⁾²⁾³⁾ Xiao Meng¹⁾²⁾³⁾

¹⁾ (National Satellite Meteorological Center/National Center for Space Weather, Beijing 100081)

²⁾ (Innovation Center for Fengyun Meteorological Satellite, Beijing 100081)

³⁾ (Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract

Fengyun-4A (FY-4A) is the first satellite of China's second-generation geostationary orbit meteorological satellites. The advanced geostationary radiation imager (AGRI), a multiple channel radiation imager, is one of the primary payloads onboard FY-4A. As one basic quantitative remote sensing product, the operational sea surface temperature (SST) is derived with the split-window nonlinear SST (NLSST) algorithm in real time. The operational NLSST procedures and products are described in detail. The FY-4A/AGRI SST products provide full-disk SST with spatial resolution of 4 km at the nadir. The quality level information is delivered with each pixel to provide information about the conditions of the processing. Quality level for each pixel information is defined as follows: Excellent, good, bad and unprocessed (cloud, land, no satellite data etc.). The users can select the SST data with certain quality level according to their application purposes (e. g. , for climate-related studies, only the SST data with the excellent quality level in the time series are used, and for identifying and tracking specific ocean features, users may be more tolerant of lower-quality SST data). The accuracy of FY-4A/AGRI SST algorithm is assessed by determining the standard deviation and bias errors from the regression procedure of the matchup database between satellite data and quality controlled SST data from NOAA in situ SST quality monitor, from July 2021 to June 2022. The validation methods and results are described in detail. The matchup database combining FY-4A/AGRI measurements and in situ SST have been built on a routine basis. At the stage of the matchup database in association with the drifter temperatures, the matchup database is composed of pixels under clear sky conditions. The FY-4A/AGRI SST data with excellent quality level are compared with drifting and tropical moored buoy data. The matchup space-time window is 4 km and 30 min from the buoy location to the center of the SST pixel. The comparison shows a bias of -0.45 to -0.42°C and a standard deviation of $0.81-0.88^{\circ}\text{C}$ for FY-4A/AGRI SST with excellent quality. The correlation coefficients between FY-4A/AGRI SST and buoy SST are better than 0.985. The FY-4A/AGRI SST are also compared with the ACSPO SST produced at NOAA/STAR from the Himawari-8/AHI (advanced Himawari imager). The comparison shows a bias of -0.26 to -0.07°C and a standard deviation of $0.68-0.82^{\circ}\text{C}$ with excellent quality level. The correlation coefficients between FY-4A/AGRI SST and Himawari-8/AHI are better than 0.985. The correlation coefficients shows that there is a good correlation between FY-4A/AGRI SST and Himawari-8/AHI SST.

Key words: FY-4A/AGRI; sea surface temperature; quality control