

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.

DOI: 10.11898/1001-7313.20200608

## FY-3C/VIRR 海表温度产品及质量检验

王素娟<sup>1)\*</sup> 崔鹏<sup>1)</sup> 张鹏<sup>1)</sup> 杨忠东<sup>1)</sup> 胡秀清<sup>1)</sup> 冉茂农<sup>2)</sup>  
刘健<sup>1)</sup> 林曼筠<sup>1)</sup> 邱红<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(国家卫星气象中心, 北京 100081) <sup>2)</sup>(北京华云星地通科技有限公司, 北京 100081)

### 摘 要

国家卫星气象中心 FY-3C/VIRR(visible and infrared radiometer, 可见光红外扫描辐射计)海表温度产品在云检测产品的基础上, 采用多通道 MCSST(multichannel SST)算法进行晴空区海温反演。该文详细介绍了海表温度产品算法、产品设计、质量控制及质量检验方法。FY-3C/VIRR 海表温度产品包括 5 min 段原始投影海温和 5 km 全球等经纬度投影海温。设计逐像元的海温质量标识, 将海温像元分为优、良、差 3 个等级, 用户可根据应用目标选择海温的质量等级。与日最优插值海温 OISST(optimum interpolation SST)相比, FY-3C/VIRR 2015 年 1 月—2019 年 12 月的 5 min 段海温质量检验结果表明: 质量等级为优的海温, 白天和夜间的偏差分别为  $-0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-0.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 均方根误差分别为  $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 白天海温均方根误差有季节性波动, 夏季有的月份均方根误差大于  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (如 2015 年 7 月、2016 年 7 月和 2019 年 7 月); 在海温回归系数不变的条件下, 夜间海温偏差的季节性波动与星上黑体温度相关显著。从一级数据质量、定位、业务运行状况等方面讨论引起海表温度产品异常的原因, 为 FY-3C/VIRR 历史数据定位、定标和产品重处理及用户应用提供重要的参考信息。

关键词: FY-3C; 海表温度; 回归算法; 质量控制; 质量检验

### 引 言

风云三号(FY-3)系列是中国第 2 代太阳同步气象卫星, FY-3A 和 FY-3B 是 FY-3(01)批的两颗试验星, 分别发射于 2008 年 5 月 27 日和 2010 年 11 月 5 日<sup>[1]</sup>。FY-3C 于 2013 年 9 月 23 日发射, 是 FY-3(02)批的首颗业务星。经过在轨测试后, 于 2014 年 5 月正式投入业务运行。FY-3C 可见光红外扫描辐射计(visible and infrared radiometer, VIRR)光谱范围为  $0.43\sim 12.5\text{ }\mu\text{m}$ , 有 10 个通道, 星下点水平分辨率为  $1.1\text{ km}$ , 扫描范围为  $\pm 55.4^{\circ}$ <sup>[2]</sup>, 其分裂窗通道( $10.3\sim 11.3\text{ }\mu\text{m}$ ,  $11.5\sim 12.5\text{ }\mu\text{m}$ )和中红外通道( $3.55\sim 3.93\text{ }\mu\text{m}$ )可用于估计海表温度(sea surface temperature, SST, 以下简

称海温)。

美国国家海洋与大气管理局(NOAA)首个业务 AVHRR(advanced very high resolution radiometer)海温算法采用多通道海温算法(multichannel SST, MCSST)<sup>[3]</sup>, 之后白天采用分裂窗非线性海温算法(nonlinear SST, NLSST)<sup>[4]</sup>, 夜间采用分裂窗和中红外通道的三通道 NLSST 算法<sup>[5]</sup>。GEOS (geostationary operational environmental satellite)-8/9 海温采用添加了分裂窗亮温差二次项的 MCSST 算法<sup>[6]</sup>。随着仪器通道性能的提高, 水汽窗区通道也与分裂窗、中红外通道一起用于红外海温的反演<sup>[7]</sup>。

FY-3C/VIRR 海温产品算法<sup>[8]</sup>是在 FY-3A 和 FY-3B 的 VIRR 海温算法的基础上发展而来, FY-3A/VIRR 海温产品采用分纬度带的白天多通道海

2020-05-14 收到, 2020-08-05 收到再改稿。

资助项目: 国家重点研发发展计划(2018YFC1506601, 2018YFB0504900), 国家气象科技创新工程——“气象资料质量控制及多源数据融合与再分析”攻关任务

\* 邮箱: wangsj@cma.gov.cn

温 MCSST 反演算法<sup>[9]</sup>,分纬度带的回归系数易造成纬度带相邻处反演海温分布的不连续。FY-3B/VIRR 开展多海温算法回归建模<sup>[10]</sup>,采用与欧美海温产品一致的、全球统一的、区分白天和夜间的回归系数<sup>[5,7,11]</sup>,首次开展夜间海温的反演。从 FY-3C/VIRR 海温产品开始,设计逐像元的海温质量标识。存档海温产品由 FY-3(01)批(包括 FY-3A 和 FY-3B)全球 1 km 等经纬度  $10^{\circ} \times 10^{\circ}$  分块改为原始投影 5 min 段海温产品和全球 5 km 等经纬度投影的日、旬、月产品<sup>[12]</sup>。FY-3/VIRR 海温产品的精度高度依赖于 VIRR 仪器性能、星上运行状态及其定位和定标精度,且由于卫星辐射测量误差、反演算法误差、地气系统辐射相互影响的存在,导致反演产品总是存在误差<sup>[13]</sup>。本文通过海温算法精度评估和海温质量检验比对分析海温产品的精度,并从一级数据质量、定位、业务运行状况等方面讨论引起海温产品异常的原因,为 FY-3C/VIRR 历史数据重处理及海温产品用户应用提供参考信息。

## 1 数据来源

### 1.1 遥感数据

选用 2015—2019 年 FY-3C/VIRR L1B、云检测和海温产品数据为研究对象,其中 L1B 来自国家卫星气象中心 FY-3(02)批地面应用系统的数据预处理系统(Data PreProcessing System, DPPS),按 5 min 段存放,每个 5 min 段 L1B 数据包含 1000 M 和 GEO 两个数据文件;云检测和海温产品来自产品生成系统(Product Generation System, PGS),原始投影海温以 5 min 段 HDF5 格式存储,星下点空间分辨率为 1.1 km(在生成 5 min 段海温产品时,根据 PGS 系统统一规定,不含经纬度信息,用户在使用时需从 L1B GEO 数据文件中获取经纬度信息);日合成海温产品为全球等经纬度投影,空间分辨率为 5 km, HDF5 格式存储。

### 1.2 观测海温

观测海温数据选用 2015—2019 年的 iQUAM<sup>[14]</sup>,来自 NOAA 卫星应用研究中心(NOAA/STAR),以月为单位,netCDF 格式存储,内含漂流浮标、锚定浮标、船舶海温及其经纬度、质量标识等信息,用于 FY-3C/VIRR 海温匹配数据集(matchup database, MDB)的建立。其中高精度漂流浮标和锚定浮标用于海温回归系数的计算和反演海温的质量检验。

## 1.3 分析海温

2015—2019 年的日最优插值海温 OISST<sup>[15]</sup>(optimum interpolation SST,也称作 Reynolds SST)用于 FY-3C/VIRR 海温产品质量检验。该海温数据来自 NOAA 国家气候中心(NOAA/NCDC),是利用船舶、浮标海温和经过大尺度偏差订正的 AVHRR 卫星反演海温,采用最优插值处理得到的分析海温产品,分辨率为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ,netCDF 格式存储,是水体海温(bulk SST)。

1982—2011 年(30 年)月平均海温来自 NOAA 地球系统研究实验室(NOAA/ESRL),分辨率为  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ,用于 FY-3C/VIRR 海温质量控制。

## 2 产品算法

### 2.1 海温回归算法

回归系数的计算有两种方法。一种是利用辐射传输模式和大气垂直廓线模拟亮温,采用模拟的亮温和辐射计测得的大气层底部温度进行回归计算。该方法对卫星仪器光谱特性要求高,且假定辐射计观测准确代表大气状态,然而辐射计只能测大气温度和水汽,其他因子无法测得<sup>[16]</sup>。另一种是从匹配数据集中的卫星观测亮温与观测海温回归计算得到,如美国航空航天局(NASA)的 PFSST(pathfinder SST)<sup>[16]</sup>和 NOAA 的 ACSPO(advanced clear sky processor for ocean)<sup>[17]</sup>。风云卫星海温采用第 2 种方法。

#### 2.1.1 海温回归模型

FY-3C/VIRR 海温所用的回归模型共 5 个公式,其中式(1)~式(3)白天夜间均适用,式(4)~式(5)因涉及  $3.7 \mu\text{m}$  通道,而该通道白天受太阳反射和散射的影响,所以仅适用于夜间海温反演。

海温算法公式如下:

$$T_s = a_0 + a_1 T_{11} + a_2 (T_{11} - T_{12}) + a_3 (T_{11} - T_{12})(\sec\theta - 1), \quad (1)$$

$$T_s = a_0 + a_1 T_{11} + a_2 (T_{11} - T_{12}) + a_3 (T_{11} - T_{12})^2 + a_4 (\sec\theta - 1), \quad (2)$$

$$T_s = a_0 + a_1 T_{11} + a_2 T_{FG}(T_{11} - T_{12}) + a_3 (T_{11} - T_{12})(\sec\theta - 1), \quad (3)$$

$$T_s = a_0 + a_1 T_{11} + a_1 T_4 + a_3 T_{12} + a_4 (T_4 - T_{12})(\sec\theta - 1) + a_5 (\sec\theta - 1), \quad (4)$$

$$T_s = a_0 + a_1 T_{11} + a_2 T_{FG}(T_4 - T_{11}) + a_3 (\sec\theta - 1). \quad (5)$$

其中,  $T_s$  表示反演海温,  $T_4, T_{11}, T_{12}$  分别表示  $3.7 \mu\text{m}, 10.8 \mu\text{m}, 12 \mu\text{m}$  通道亮温,  $a_0 \sim a_5$  表示回归系数,  $\theta$  表示卫星天顶角,  $T_{FG}$  表示第一猜测海温。式(1)为 MCSST<sup>[3]</sup>, 式(3)为 NLSST<sup>[4]</sup>。

为了便于后续分析, 为式(2)、(4)和(5)自定义对应名称。其中, 式(2)为 QDSST (split-window quadratic term multichannel SST), 式(4)为 TCSST (triple-window multichannel SST), 式(5)为 DNSST (dual-window nonlinear SST)。在下文的引用中, 海温算法的前两个字母为算法缩写, 算法缩写后面 N 表示夜间算法, D 表示白天算法。

### 2.1.2 海温匹配数据集及回归系数

以 5 min 段 FY-3C/VIRR LIB 数据、云检测产品和观测海温数据为输入, 按空间 3 km、时间 1 h 的窗口进行匹配, 满足晴空海洋及匹配条件的像元为一个匹配样本, 记录卫星观测时间、经纬度、分裂窗亮温、太阳天顶角、卫星天顶角以及浮标观测时间、经纬度、浮标类型等信息, 建立 2015—2019 全球逐月 FY-3C/VIRR 海温匹配数据集。为了从 GTS (Global Telecommunication System) 搜集更多的观测海温, FY-3C PGS 系统滞后 20 d 进行海温匹配。

在海温匹配数据集的基础上进一步挑选用于回归计算的样本, 空间窗口为 1.1 km, 时间窗口为 1 h。因为赤道附近可用漂流浮标极少, 为了提高匹

配样本的覆盖范围, 还选择了  $20^\circ\text{S} \sim 20^\circ\text{N}$  的锚定浮标匹配样本, 其他区域只选择漂流浮标的匹配样本。根据太阳天顶角区分白天和夜间, 对回归模型进行最小二乘回归, 得到第一猜测回归系数。剔除误差大于二倍标准差的样本后, 再次进行最小二乘回归, 得到海温回归系数。

### 2.1.3 海温算法精度评估

图 1 为基于逐月匹配数据集的 FY-3C/VIRR 海温多算法精度评估曲线, 其中图 1a 为白天 3 种算法反演海温与浮标海温的均方根误差曲线, 图 1b 为夜间 5 种算法反演海温与浮标海温的均方根误差曲线, 图 1c 为白天反演海温与浮标海温决定系数(相关系数的平方), 图 1d 为夜间反演海温与浮标海温决定系数。由图 1a 和图 1c 可以看到, 白天 NL\_D 算法最优。由图 1b 和图 1d 可以看到,  $3.7 \mu\text{m}$  通道参与的 TC\_N 与 DN\_N 算法季节性波动明显, 夏季误差很大, 尤其是 DN\_N 算法, 系  $3.7 \mu\text{m}$  通道夜间在太阳天顶角  $85^\circ \sim 118^\circ$  之间存在太阳污染<sup>[18]</sup>所致, 2016 年 11 月业务系统进行太阳污染修正, 由图 1b 和图 1d 也可以看到, 2017 年夏季 DN\_N 算法精度明显改善, 但 2018 年夏季出现明显的反弹。夜间的最优算法为 NL\_N。因此, FY-3C/VIRR 海温反演重处理算法采用白天 NL\_D, 夜间 NL\_N。

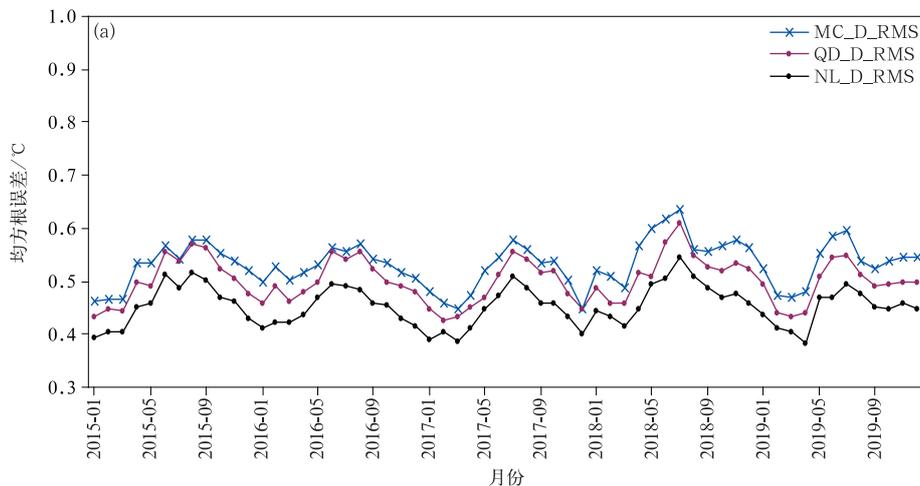
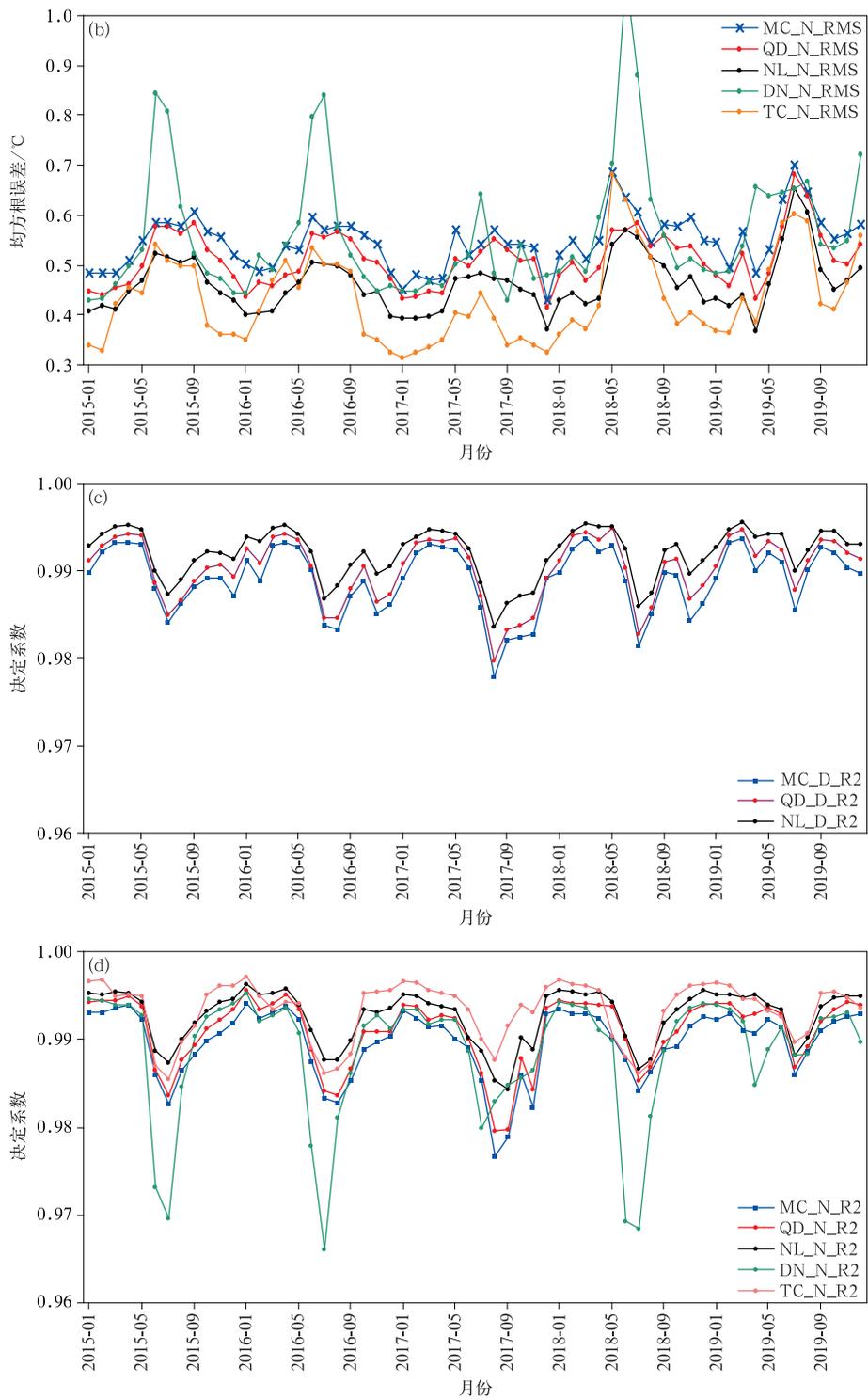


图 1 2015—2019 年 FY-3C/VIRR SST 算法反演海温与观测海温的均方根误差和决定系数  
(a)白天海温与浮标海温的均方根误差, (b)夜间海温与浮标海温的均方根误差,  
(c)白天海温与浮标海温决定系数, (d)夜间海温与浮标海温决定系数

Fig. 1 Root mean square error and determination coefficient of FY-3C/VIRR SST Algorithms with respect to in-situ SST in 2015–2019

(a)root mean square error in day-time, (b)root mean square error in night-time,  
(c)determination coefficient in day-time, (d)determination coefficient in night-time



续图 1

### 2.2 海温反演算法

FY-3C/VIRR 海温产品以 5 min 段 FY-3C/VIRR LIB 数据、云检测产品和 30 年月平均海温数据为输入,采用 MCSST 算法,每日生成约 288 个

5 min 段海温产品文件。由于云检测产品存在云漏判现象,尤其是夜间,会带来较大的负偏差。因此开展如下 4 类检验进行质量控制,并为每个像元赋予一个质量标识:①卫星天顶角阈值检验。卫星天顶

角  $50^\circ$  以内的像元为优, 其他为良。②空间一致性检验。构建  $3 \times 3$  数据块, 分别统计数据块内晴空像元的分裂窗亮温的标准差, 大于 1 个标准差的像元视为云像元。分别统计  $3 \times 3$  数据块内晴空像元的分裂窗通道的亮温差, 当  $11 \mu\text{m}$  和  $12 \mu\text{m}$  亮温最大与最小值之差不大于  $1^\circ\text{C}$  时, 质量等级为优; 当  $11 \mu\text{m}$  和  $12 \mu\text{m}$  亮温最大与最小值之差不大于  $2^\circ\text{C}$  时, 质量等级为良; 其他为差。③气候阈值检验。以 30 年月平均海温作为参考海温, 进行气候阈值检验, 超过气候阈值的像元视为缺省值(为了应对云漏判和定位异常, 该阈值设为  $5^\circ\text{C}$ , 这会造成对极端气候变化不敏感, 如极区海温异常增温有时超过  $5^\circ\text{C}$ )。当反演海温和气候海温的绝对温差在  $T_1$  以内时质量为优, 绝对温差在  $T_2$  以内为良, 其他为差。其中,  $T_1, T_2$  为经验阈值(如  $T_1$  为  $2^\circ\text{C}$ ,  $T_2$  为  $3^\circ\text{C}$ )。④反演海温有效值域检验。当反演海温与  $11 \mu\text{m}$  通道亮温的绝对温差大于  $10^\circ\text{C}$  时, 视为云像元或无效值; 当反演海温小于  $-2^\circ\text{C}$  时, 视为云像元。

### 2.3 海温日合成算法

在每日约 288 个 5 min 段海温产品的基础上, 根据白天、夜间标识, 分别将星下点  $1.1 \text{ km}$  的原始海温产品投影转换为白天和夜间全球  $1 \text{ km}$  等经纬度投影中间数据。在  $1 \text{ km}$  分辨率的全球投影中间数据中, 构建  $5 \times 5$  的数据块, 采用质量优先的原则, 将  $1 \text{ km}$  分辨率的等经纬度投影降分辨率至全球  $5 \text{ km}$  的等经纬度投影, 分白天、夜间存放, 并进行逐像元的质量控制。质量优先的原则: 在  $5 \times 5$  的数据块中, 有质量为优的像元, 则优的像元求平均, 赋予优的质量等级; 没有优的像元, 则质量为良的像元求平均, 赋予良的质量等级; 没有良的像元, 则差的像元求平均, 赋予差的质量等级; 没有差的像元, 则赋为缺省值(云或丢线等), 并在此基础上进行如下 3 类检验质量控制, 为每个像元赋予一个质量标识: ①海温有效值域检验。海温有效值设为  $-2^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ , 如果 SST 小于  $-2^\circ\text{C}$ , 则赋为缺省值; 如果 SST 大于  $35^\circ\text{C}$ , 则赋值为  $35^\circ\text{C}$ 。②卫星天顶角阈值检验。卫星天顶角不大于  $50^\circ$  的像元, 设为最优; 其他像元设为良。③气候阈值检验。反演海温与 30 年月平均海温绝对温差  $T_1$  以内为优, 绝对温差  $T_2$  以内为良, 绝对温差  $5^\circ\text{C}$  以内为差, 否则赋缺省值。其中  $T_1, T_2$  为经验阈值(如  $T_1$  为  $2^\circ\text{C}$ ,  $T_2$  为  $3^\circ\text{C}$ )。

## 3 质量检验

### 3.1 质量检验方法

由于海温分析场具有时效性好、全球覆盖的优点, 常用来作为卫星反演海温的检验源数据<sup>[19-20]</sup>。美国 NOAA/STAR 的基于 Web 的准实时海温监测系统 SQUAM(SST quality monitor)<sup>[21]</sup>(<http://www.star.nesdis.noaa.gov/sod/sst/squam/>)实现了基于多种海温分析场的多级海温产品的准实时质量监测。EUMETSAT 的 METIS(monitring & evaluation of thematic information from space, <http://metis.eumetsat.int/sst/index.html>)实现了基于 OSTIA (operational sea surface temperature and sea ice analysis)<sup>[22]</sup> 的欧洲海温产品的准实时质量监测。基于日最优插值 OISST (下称 OISST) 的 FY-3C/VIRR 海温质量检验方法如下。

#### 3.1.1 FY-3C/VIRR 5 min 段海温产品质量检验方法

选取 OISST 作为 FY-3C/VIRR 5 min 段海温的检验源数据, 通过时空匹配, 进行海温质量检验, 检验步骤如下: ①选择 FY-3C/VIRR 5 min 段海温作为被检验数据, 称为 FY3\_SEC; ②选择同日的 OISST 作为检验源数据, 并将其通过双线性插值, 插值到 VIRR 仪器像元(星下点  $1.1 \text{ km}$ ), 得到 VIRR 仪器原始分辨率的 FY3\_OISST; ③用 FY3\_SEC 减去 FY3\_OISST, 得到 VIRR 仪器原始分辨率的 FY3\_DIFF。

在 FY3\_DIFF 的基础上进行误差统计, 根据 FY-3C/VIRR 5 min 段海温质量标识中的优、良、差 3 个质量等级(8 位字节中的低 2 位为质量等级), 分别统计误差, 再以日为单位分别统计白天和夜间各质量等级的 5 min 段海温的误差。

#### 3.1.2 FY-3C/VIRR 全球日合成海温产品质量检验方法

选取 OISST 作为 FY-3C/VIRR 全球日合成海温产品的检验源数据, 通过时间空间匹配, 进行海温质量检验, 检验步骤如下: ①选择 FY-3C/VIRR 全球  $5 \text{ km}$  日合成海温作为被检验数据, 称为 FY3\_5KM; ②选择同日的 OISST 作为检验源数据, 并将其通过双线性插值, 插值到  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  的格点上, 得到与 FY-3C/VIRR 全球  $5 \text{ km}$  日合成海温同样分

分辨率的 OISST, 称作 OISST\_5KM; ③用 FY3C\_5KM 减去 OISST\_5KM, 得到 5 km 分辨率的 DIFF\_5KM。

在 DIFF\_5KM 的基础上进行误差统计, 根据 FY-3C/VIRR 日合成海温质量标识中的优、良、差 3 个质量等级, 区分白天和夜间, 分别统计各质量等级的日合成海温的误差。

### 3.2 质量检验结果

#### 3.2.1 FY-3C/VIRR 5 min 段海温产品质量检验结果

与 OISST 相比, 2015 年 1 月—2019 年 12 月 FY-3C/VIRR 5 min 段海温产品白天优、良、差各质量等级的误差分别为  $-0.18 \pm 0.85^{\circ}\text{C}$ ,  $-0.27 \pm 1.47^{\circ}\text{C}$ ,  $-2.79 \pm 3.09^{\circ}\text{C}$ , 占比分别为 51%, 43%, 6%, 白天 5 min 段海温产品全样本的误差为  $-0.33 \pm 1.42^{\circ}\text{C}$ ; 夜间 5 min 段海温产品优、良、差各质量

等级的误差分别为:  $-0.06 \pm 0.80^{\circ}\text{C}$ ,  $-0.23 \pm 1.38^{\circ}\text{C}$ ,  $-2.84 \pm 3.02^{\circ}\text{C}$ , 占比分别为 51%, 44%, 5%, 夜间 5 min 段海温产品全样本的误差为  $-0.25 \pm 1.34^{\circ}\text{C}$ 。

图 2 为 2015—2019 年 FY-3C/VIRR 5 min 段海温质量为优的样本的逐日误差统计曲线。由图 2 可以看到, 白天 5 min 段海温的均方根误差有季节波动, 夏季误差较大, 其主要原因是卫星红外遥感到的是水下  $10 \mu\text{m}$  以上的海表温度, 即皮层温度 (skin SST), 而作为质量检验参考海温是水体温度 (bulk SST), 在白天微风日照强烈的条件下, 二者差异可达  $1^{\circ}\text{C}$  以上<sup>[18]</sup>。夜间海温产品的均方根误差变化较小, 但自 2016 年 1 月 19 日之后, 在回归系数 (SST\_COEF\_V3) 不变的情况下, 海温夜间偏差有季节性波动, 经分析, 与星上黑体温度的季节性波动高度相关。定标组确认分裂窗通道定标存在季节性变化,

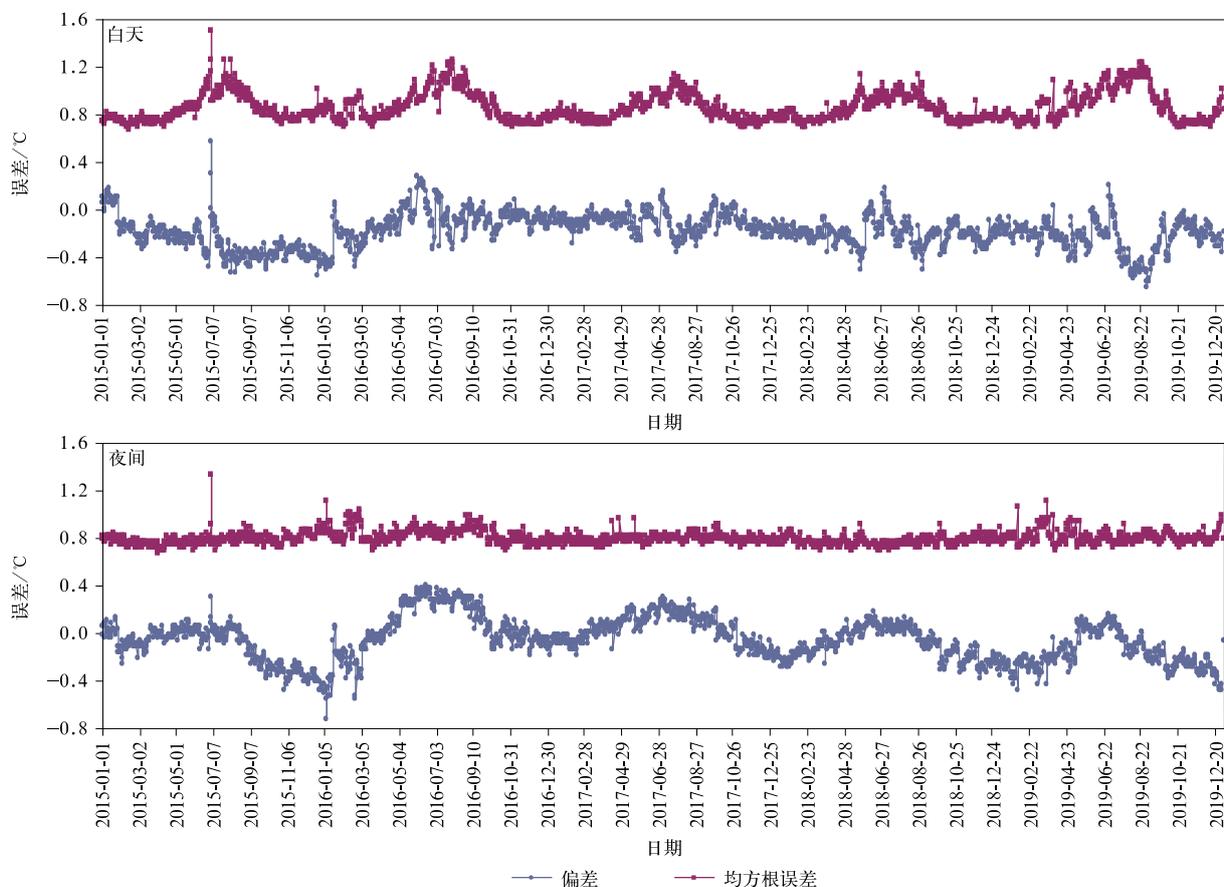


图 2 2015—2019 年 FY-3C/VIRR 5 min 段质量为优的 SST 产品逐日误差统计曲线

Fig. 2 Time series of validation bias and root mean square error for FY-3C/VIRR operational granule SST at excellent quality level with respect to daily OISST in 2015–2019

这也是正在进行的定标重处理着力解决的问题之一。图 2 中均方根误差曲线上可见 2015 年 7 月有明显异常跳变,系 2015 年 7 月 2 日定位异常所致。

由图 2 海温偏差曲线可以看到,2015 年 1 月 19 日和 2016 年 1 月 19 日两次回归系数更新引起的跳变,同时也能看出 2015 年 1 月 1—19 日期间,由于定标更新而回归系数滞后生成及更新引起的海温偏差的跳变。正在进行的 FY-3C/VIRR 海温产品重

处理,反演算法采用 NLSST,回归系数采用当月回归系数,可以提高海温产品的精度和一致性(图 3)。海温误差曲线上的跳变,由星上遥感仪器工况发生变化(如:黑体温度跳变、单粒子翻转)、定位异常、业务运行异常引起(详见第 3.3 节)。

表 1 是 2016 年 1 月业务和重处理 5 min 段海温与 OISST 相比各质量等级的误差情况,业务海温白天优、良、差各质量等级的误差分别为  $-0.31 \pm$

表 1 2016 年 1 月 FY-3C/VIRR 业务和重处理 5 min 段海温误差统计结果(参考海温为日 OISST)

Table 1 Monthly validation statistics for FY-3C/VIRR granule SST in Jan 2016 (with respect to daily OISST)

类型	质量等级	MCSST(业务)		NLSST(重处理)	
		偏差/°C	均方根误差/°C	偏差/°C	均方根误差/°C
白天	优	-0.31	0.81	-0.02	0.66
	良	-0.44	1.35	-0.56	1.14
	差	-2.81	2.97	-2.82	2.97
	全样本	-0.48	1.31	-0.40	1.08
夜间	优	-0.32	0.84	-0.08	0.72
	良	-0.50	1.42	-0.59	1.24
	差	-3.05	3.23	-2.89	2.98
	全样本	-0.51	1.37	-0.50	1.24

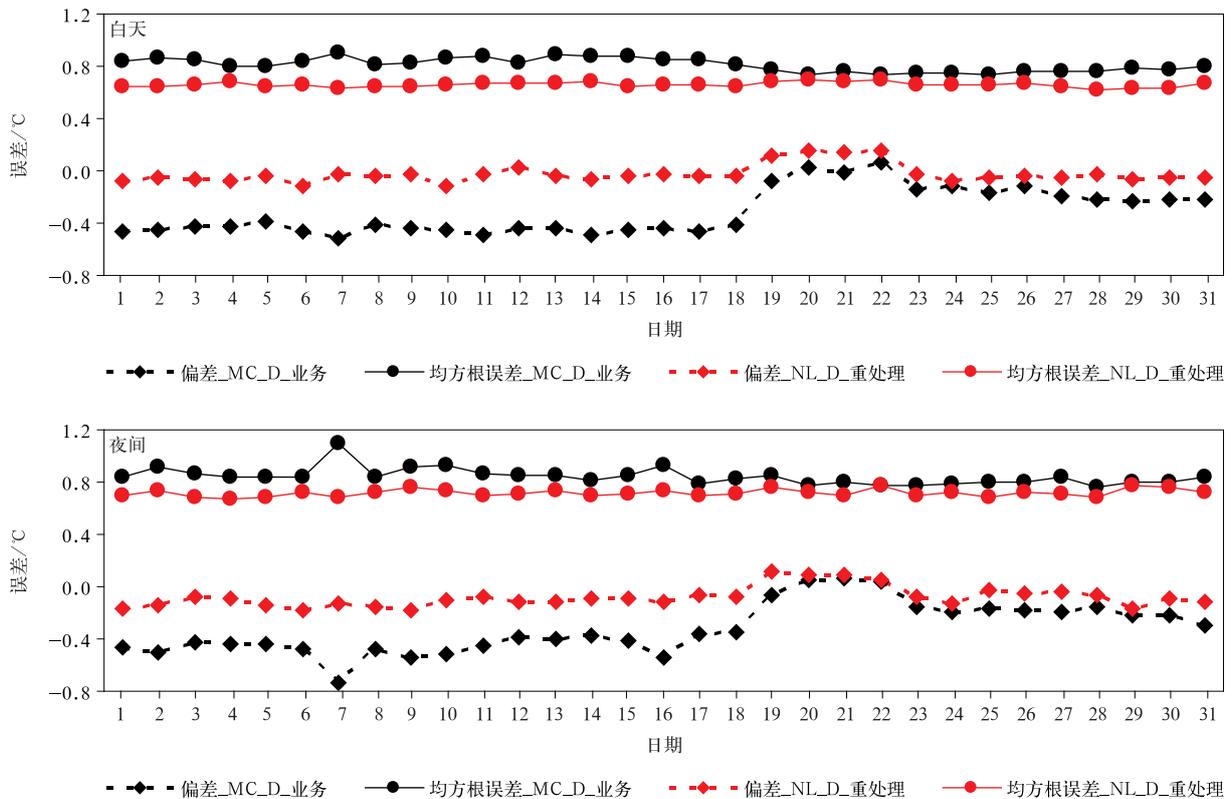


图 3 2016 年 1 月 FY-3C/VIRR 5 min 段质量为优的 SST 产品逐日误差统计曲线

Fig. 3 Time series of validation bias and root mean square error for FY-3C/VIRR granule SST at excellent quality level with respect to daily OISST in Jan 2016

0.81℃,  $-0.44 \pm 1.35^\circ\text{C}$ ,  $-2.81 \pm 2.97^\circ\text{C}$ , 占比分别为 52%, 42%, 6%; 夜间优、良、差各质量等级的误差分别为  $-0.32 \pm 0.84^\circ\text{C}$ ,  $-0.5 \pm 1.42^\circ\text{C}$ ,  $-3.05 \pm 3.23^\circ\text{C}$ , 占比分别为 51%, 44%, 5%。重处理海温白天优、良、差各质量等级的误差分别为  $-0.02 \pm 0.66^\circ\text{C}$ ,  $-0.56 \pm 1.14^\circ\text{C}$ ,  $-2.82 \pm 2.97^\circ\text{C}$ , 占比分别为 59%, 37%, 4%; 夜间优、良、差各质量等级的误差分别为  $-0.08 \pm 0.72^\circ\text{C}$ ,  $-0.59 \pm 1.24^\circ\text{C}$ ,  $-2.89 \pm 2.98^\circ\text{C}$ , 占比分别为 56%, 38%, 6%。重处理海温与业务海温相比, 精度提高, 最优样本数增加。

由图 3 的误差曲线可以看到, 重处理海温的精度和一致性均比业务海温有所提高。但同时也注意到, 业务和重处理海温偏差均在 2016 年 19—22 日发生跳变, 系星上黑体温度发生跳变所致。2016 年 1 月 19 日业务系统更新了海温回归系数, 由图 3 可以看到, 自 2016 年 1 月 20 日起, 业务海温偏差较之

前负偏差有所改善, 与重处理海温偏差较为接近。由夜间误差曲线可见, 2016 年 1 月 7 日业务海温偏差和均方根误差均发生跳变, 系蓝色条带异常所致 (详见第 3.3 节)。

### 3.2.2 FY-3C/VIRR 5 km 全球日合成海温产品质量检验结果

与 OISST 相比, 2015—2019 年 FY-3C/VIRR 5 km 全球日合成海温产品白天优、良、差各质量等级的误差分别为  $-0.18 \pm 0.82^\circ\text{C}$ ,  $-0.46 \pm 1.41^\circ\text{C}$ ,  $-1.47 \pm 3.15^\circ\text{C}$ , 占比分别为 45%, 49%, 6%, 白天 5 km 全球日合成海温全样本的误差为  $-0.38 \pm 1.4^\circ\text{C}$ ; 夜间 5 km 全球日合成海温产品优、良、差各质量等级的误差分别为  $-0.1 \pm 0.78^\circ\text{C}$ ,  $-0.4 \pm 1.38^\circ\text{C}$ ,  $-1.47 \pm 3.08^\circ\text{C}$ , 占比分别为 45%, 49%, 6%, 夜间 5 km 全球日合成海温全样本的误差为  $-0.31 \pm 1.35^\circ\text{C}$ 。

图 4 为 2015—2019 年 FY-3C/VIRR 5 km 全球

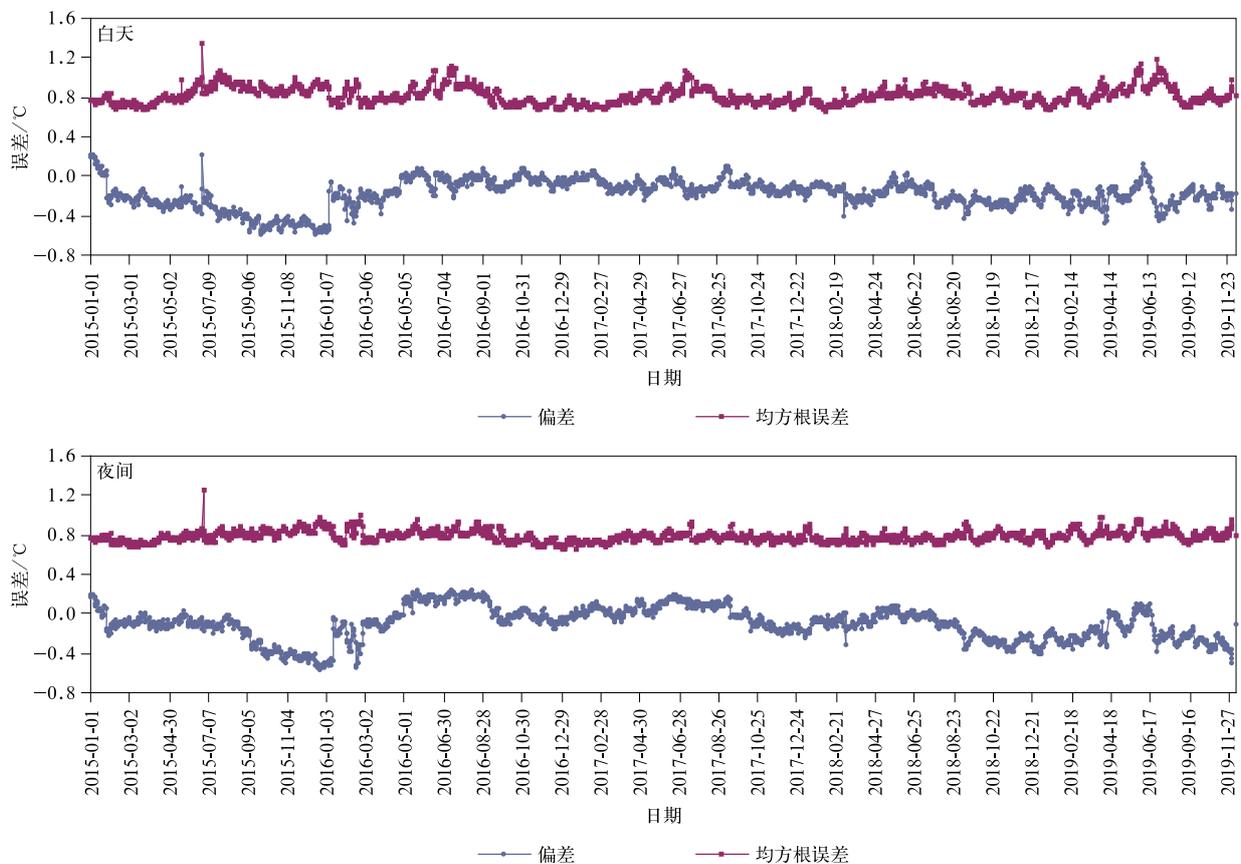


图 4 2015—2019 年 FY-3C/VIRR 5 km 全球日合成质量为优的 SST 产品逐日误差统计曲线

Fig. 4 Time series of validation bias and root mean square error for FY-3C/VIRR 5 km daily SST at excellent quality level with respect to daily OISST in 2015–2019

日合成海温质量为优的样本的逐日误差统计曲线,与图2原始投影(星下点 1.1 km)的日平均海温误差趋势一致,误差曲线更平滑。由图4可见,白天海温的均方根误差存在季节波动,夏季误差较大;夜间海温产品的均方根误差变化较小,但自2016年1月19日后,在回归系数(SST\_COEF\_V3)不变的情况下,海温夜间偏差有明显的季节性波动,与星上黑体温度的季节性波动高度相关。误差曲线上的跳变及其原因同3.2.1节。

### 3.3 误差分析

海温产品是天气预报、气候监测以及气候数值模拟研究的重要输入参数<sup>[23-25]</sup>。除海温算法本身的精度外,海温产品的精度还取决于遥感仪器的性能<sup>[10]</sup>、卫星资料的定位<sup>[26-28]</sup>、定标<sup>[29-30]</sup>、云检测<sup>[31]</sup>算法精度和业务运行情况。根据FY-3C/VIRR 5 min段海温产品质量检验结果,引起FY-3C/VIRR海温产品异常的典型原因分析如下:当海温产品异常表现为有效像元减少、误差增大时,考虑为星上红外仪器单粒子翻转(single event upset, SEU)所致,此时红外遥感数据异常;当L1B可见光图像上的地标与L1B数据中的海陆模板冲突时,考虑为定位异常所致,此类异常海温反演程序难以识别,虽属偶发,但会引起该5 min段海温参与的日、旬、月海温产品的异常;当全球日合成海温图像上出现蓝色条带时,考虑为业务运行异常所致,该异常重处理时不复现,虽属偶发,但会引起该5 min段海温参与的日合成海温产品的异常。

## 4 小 结

1) 与日分析场 OISST 相比,2015—2019年FY-3C/VIRR 5 min段海温产品质量等级为优的海温误差分别为 $-0.18 \pm 0.85^{\circ}\text{C}$ (白天), $-0.06 \pm 0.8^{\circ}\text{C}$ (夜间)。2015—2019年FY-3C/VIRR 5 km全球日合成海温产品质量等级为优的海温误差分别为 $-0.18 \pm 0.82^{\circ}\text{C}$ (白天), $-0.1 \pm 0.78^{\circ}\text{C}$ (夜间)。建立准实时的海温产品质量检验系统有利于异常的及时发现及处理。

2) 用户在使用FY-3C/VIRR海温产品时,可根据自己的需求,选用不同质量等级的海温。如对于从事气候研究的用户,可选用质量等级为优的海温;对于对海温精度要求不太高而对海温覆盖度要求高的洋面锋研究及海洋渔业等用户,可选用质量

等级为优和良的海温;质量等级为差的海温中,蕴含着一级数据异常、定位异常、定标异常等信息,对产品生产者分析误差原因及改进产品质量有益。同时,质量等级为差的像元也可能包含极端天气和气候的信息,如台风抽吸作用造成的海温异常偏低,或极区极端增温使反演海温超出气候海温阈值等。

3) FY-3C/VIRR海温产品的精度高度依赖于VIRR仪器性能、星上运行状态及定位和定标精度,历史海温重处理可以通过使用当月的回归系数和更高精度的第一猜测海温提高海温产品的精度。长序列海温产品的一致性研究是下一步的工作重点。定位定标改进、星上工况改变等对海温产品精度的影响分析及对前端的反馈,是目前正着手开展的工作。**致 谢:**本项工作得到国家卫星气象中心许健民院士的大力支持与指导,卢乃锰研究员、张甲坤研究员、陆风研究员、唐世浩研究员的大力支持,在此表示感谢。同时感谢GHRSSST(the Group for High Resolution Sea Surface Temperature)海温科学组的管磊教授、Alexander Ignatov博士和Peter Minnett教授的有益讨论与解惑;感谢美国国家海洋与大气管理局卫星应用研究中心(NOAA/STAR)提供的观测海温;感谢美国国家海洋与大气管理局国家气候中心(NOAA/NC-DC)提供的雷诺兹最优插值海温OISST;感谢美国国家海洋与大气管理局地球系统研究实验室(NOAA/ESRL)提供的30年月平均海温。

## 参 考 文 献

- [1] Yang J, Zhang P, Lu N, et al. Improvements on global meteorological observations from the current Fengyun 3 satellites and beyond. *International Journal of Digital Earth*, 2012, 5(3): 251-265.
- [2] 杨军,董超华. 新一代风云极轨气象卫星业务新产品及应用. 北京:科学出版社,2010.
- [3] McClain E P, Pichel W G, Walton C C. Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperatures. *J Geophys Res*, 1985, 90(11): 11587-11601.
- [4] Walton C C, Pichel W G, Sapper J F, et al. The development and operational application of nonlinear algorithms for the measurement of sea surface temperatures with the NOAA polar-orbiting environmental satellites. *J Geophys Res*, 1998, 103(C12): 27999-28012.
- [5] Li X, Pichel W, Maturi E, et al. Deriving the operational nonlinear multichannel sea surface temperature algorithm coefficients for NOAA-15 AVHRR/3. *Int J Remote Sens*, 2001, 22(4): 699-704.
- [6] Wu X, Menzel W P, Wade G S. Estimation of sea surface temperatures using GOES-8/9 radiance measurements. *Bull Amer Meteor Soc*, 1999, 80: 1127-1138.

- [7] Petrenko B, Ignatov A, Kihai Y, et al. Evaluation and selection of SST regression algorithms for JPSS VIIRS. *J Geophys Res Atmos*, 2014, 119: 4580-4599.
- [8] Wang S, Cui P, Zhang P, et al. FY-3C/VIRR SST algorithm and cal/val activities at NSMC/CMA. *Proceedings of SPIE*, 2014, 1926: 1-15.
- [9] 王素娟, 崔鹏, 冉茂农, 等. FY3A/VIRR 业务海面温度产品算法改进与质量检验. *气象科技*, 2014, 42(5): 748-752.
- [10] 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.
- [11] OSI SAF Project Team. Algorithms Theoretical Basis Document for the Low Earth Orbiter Sea Surface Temperature Processing. [2019-12-11]. [http://www.osi-saf.org/lml/doc/osisaf\\_cdop2\\_ss1\\_atbd\\_leo\\_sst.pdf](http://www.osi-saf.org/lml/doc/osisaf_cdop2_ss1_atbd_leo_sst.pdf).
- [12] 王素娟, 崔鹏, 张鹏, 等. FY-3 卫星 VIRR 海表温度产品进展. *上海航天*, 2017, 34(4): 79-84.
- [13] 李俊, 方宗义. 卫星气象的发展——机遇与挑战. *气象*, 2012, 38(2): 129-146.
- [14] Xu F, Ignatov A. In situ SST quality monitor (iQuam). *J Atmos Oceanic Technol*, 2014, 31: 164-180.
- [15] Reynolds R, Smith T, Liu C, et al. Daily high-resolution-blended analyses for SST. *J Climate*, 2007, 20: 5473-5496.
- [16] Kilpatrick K A, Podesta 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.
- [17] Petrenko B, Ignatov A, Kihai Y, et al. Clear-sky mask for the advanced clear-sky processor for oceans. *J Atmos Oceanic Technol*, 2010, 27: 1609-1623.
- [18] Zhang P, Lu Q, Hu X, et al. Latest progress of the Chinese meteorological satellite program and core data processing technologies. *Adv Atmos Sci*, 2019, 36(9): 1027-1045.
- [19] Ignatov A. GOES-R Advanced Baseline Imager Algorithm Theoretical Basis Document for Sea Surface Temperature. [2017-05-16]. <http://www.goes-r.gov/products/ATBDs/baseline/baseline-SST-v2.0.pdf>.
- [20] 王素娟, 陆风, 张鹏, 等. FY2 海面温度产品质量检验方法与误差分析. *气象*, 2013, 33(4): 10-14.
- [21] Dash P, Ignatov A, Kihai Y, et al. The SST Quality Monitor (SQUAM). *J Atmos Oceanic Technol*, 2010, 27: 1899-1917.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 李春晖, 刘燕, 李霞, 等. 热带西北太平洋 10~30 d 振荡对南海夏季风影响. *应用气象学报*, 2016, 27(3): 293-302.
- [25] 陈丽娟, 袁媛, 杨明珠, 等. 海温异常对东亚夏季风影响机理的研究进展. *应用气象学报*, 2013, 24(5): 521-532.
- [26] 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.
- [27] 关敏, 吴荣华. FY-3A 中分辨率光谱成像仪图像地理定位方法. *应用气象学报*, 2012, 23(5): 534-542.
- [28] 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.
- [29] 徐寒烈, 胡秀清, 徐娜, 等. FY-3C/可见光红外扫描辐射计中红外通道太阳污染的识别和修正. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 1874-1879.
- [30] 谷松岩, 吴荣华, 游然. FY-3A/MWHS 冷空测值受月球影响分析及修正. *应用气象学报*, 2015, 26(4): 442-450.
- [31] 刘健, 张里阳. 气象卫星高空间分辨率数据的云量计算与检验. *应用气象学报*, 2011, 22(1): 35-45.

## FY-3C/VIRR Sea Surface Temperature Products and Quality Validation

Wang Sujuan<sup>1)</sup> Cui Peng<sup>1)</sup> Zhang Peng<sup>1)</sup> Yang Zhongdong<sup>1)</sup> Hu Xiuqing<sup>1)</sup>  
Ran Maonong<sup>2)</sup> Liu Jian<sup>1)</sup> Lin Manyun<sup>1)</sup> Qiu Hong<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

<sup>2)</sup> (Beijing Huayun Shinetek Science and Technology Company Limited, Beijing 100081)

### Abstract

Sea surface temperature (SST) products are generated at National Satellite Meteorological Center (NSMC) of China Meteorological Administration (CMA) from the visible and infrared radiometer (VIRR) on board FY-3C polar orbiting satellite. The production chain is based on FY-3C/VIRR cloud mask products and a classical multichannel SST (MCSST) algorithm is applied to derive SST in cloud-free zones. Operational MCSST procedures and products are described in detail. FY-3C/VIRR SST products are generated in satellite projection at full resolution in 5-minute granule, and in synthetic fields remapped onto a regular world grid at 0.05 degree resolution (5 km). The quality index (QI) information is delivered with each pixel to provide information about the conditions of the processing. They include in particular a quality level in the last two bits of QI (saved in a 8-bit CHAR) for each pixel defined as follows: Excellent, good, bad and unprocessed (cloud, land, no satellite data etc.). 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 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 matchup database (MDB) combining FY-3C/VIRR measurements and buoy measurements is built on a routine basis. Validation methods and results are described in detail. The performance of SST retrievals is characterized with bias and root mean square error (RMSE) with respect to Reynolds L4 daily analysis (OISST). The validation bias and RMSE for FY-3C/VIRR operational granule SST with excellent quality level between January 2015 and December 2019 is found to be  $-0.18^{\circ}\text{C}$  and  $0.85^{\circ}\text{C}$  in day-time,  $-0.06^{\circ}\text{C}$  and  $0.8^{\circ}\text{C}$  in night-time, respectively. For day-time, the RMSE fluctuates seasonally. Some monthly RMSE is greater than  $1^{\circ}\text{C}$  in summer. The bias at night is found fluctuating seasonally highly correlated to the black body temperature on board FY-3C since January 2016, and the SST regression coefficient (SST\_COEF\_V3) is used ever since then. Causes of FY-3C/VIRR SST products anomaly is analyzed, such as L1 data abnormal (e.g., single event upset), navigation error and operational running environmental error. Above all, some important reference information are provided to users for using FY-3C/VIRR SST products and FY-3C/VIRR data re-geolocation, re-calibration and products reprocessing.

**Key words:** FY-3C satellite; sea surface temperature; regression algorithm; quality control; quality validation