

FY-3C/VIRR数据中国周边海域区域SST反演算法开发

何全军^{1,2}, 王捷纯²

(1.广州气象卫星地面站, 广东 广州 510640; 2.广东省生态气象中心, 广东 广州 510640)

摘要:已有的验证结果显示风云三号C星(Fengyun-3C, FY-3C)搭载的可见光红外辐射仪(visible and infrared radiometer, VIRR)反演的业务化海洋表面温度(sea surface temperature, SST)产品存在较大偏差。根据FY-3C/VIRR的热红外通道设置,分别选择非线性SST算法(non-linear SST, NLSST)和三通道非线性算法(triple window NLSST, TNLSST)开发适用于中国周边海域的白天和夜间区域SST反演算法。通过对卫星热红外波段的亮温和现场数据进行晴空海洋匹配样本数据构建,利用回归拟合方法获得NLSST和TNLSST的算法系数。采用独立样本数据对区域算法进行验证,白天数据的偏差和标准差分别为0.082℃和0.633℃,夜间为-0.007℃和0.557℃。以OISST(optimum interpolation SST)为参考值,将区域算法反演的SST与国家卫星气象中心的业务产品进行对比,结果显示区域算法将白天SST的偏差和标准偏差从0.047℃和0.743℃减小到0.031℃和0.641℃,夜间从0.184℃和0.708℃减小到0.034℃和0.556℃。

关键词:FY-3C/VIRR; 海表温度; 热红外遥感

中图分类号: **文献标识码:**A **文章编号:**1007-6336(\$article_year)00-0001-07

Development of regional SST algorithm for FY-3C/VIRR data in the seas around China

HE Quan-jun^{1,2}, WANG Jie-chun²

(1.Guangzhou Meteorological Satellite Ground Station, Guangzhou 510640, China; 2.Guangdong Ecological Meteorology Centre, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Previous validation results showed that there was large bias in the operational sea surface temperature (SST) products from the visible and infrared radiometer (VIRR) onboard the Fengyun-3C (FY-3C) polar-orbiting meteorological satellite released by the national satellite meteorological center (NSMC). According to the setting of thermal infrared channels of FY-3C/VIRR, the regional algorithms to estimate daytime and nighttime SST in the seas around China were developed based on the non-linear SST (NLSST) and triple window NLSST (TNLSST). The clear-sky sea matchup data was generated from the bright temperature of satellite thermal infrared channels and *in situ* data, and the coefficients of NLSST and TNLSST were acquired by the regression fitting method. The regional SST algorithm was validated using the independent matchup data, the results showed that the bias and standard deviation (SD) were 0.082 °C and 0.633 °C in daytime, -0.007 °C and 0.557 °C in nighttime. Also, taking the optimum interpolation SST as reference value, the regional SST was compared with the operational products from the NSMC, the results demonstrated the bias and SD were decreased from 0.047 °C and 0.743 °C to 0.031 °C and 0.641 °C for daytime data, and from 0.184 °C and 0.708 °C to 0.034 °C and 0.556 °C for nighttime data, respectively.

收稿日期:2019-05-07, 修订日期:2019-06-25

基金项目:国家自然科学基金项目(41801326);广东省气象局科学技术研究项目(GRMC2017M12);广州市科技计划项目(201707020031)

作者简介:何全军(1978-),男,陕西凤翔人,高级工程师,博士,主要从事卫星遥感产品开发与应用研究, E-mail: hequanjunsx@163.com

Key words: FY-3C/VIRR; sea surface temperature; infrared remote sensing

海洋表面温度(sea surface temperature, SST)是气候变化和海洋科学研究中的一个重要变量,几乎所有的海洋过程都直接或间接与温度有关,长期的 SST 产品已被广泛用于进行气候变化的研究^[1]。从上世纪 60 年代开始,科研人员已经开始利用遥感方法测量 SST^[2],目前卫星遥感已经成为探测全球 SST 的最主要方法。然而,卫星传感器接收到的热辐射受地球表面与卫星之间的大气的影响,尤其是大气中的水汽吸收影响^[3]最为严重,因此大气校正是热红外遥感应用尤其是精确反演 SST 的关键因素。由于大气中的水汽在不同的热红外通道存在吸收差异,科研人员基于这个特点提出通过多通道组合方式来移除水汽影响,从而完成大气校正处理并实现高精度的 SST 反演^[4]。在此基础上,McClain 等^[5]于 1985 年正式提出多通道 SST 反演算法(multi-channel SST, MCSST),通过两个分裂窗通道的亮温差进行水汽吸收校正。为进一步消除水汽影响,Walton^[6]在 1988 年又提出交叉产品算法(cross product SST, CPSST),Emery 等^[7]在 1994 年提出水汽校正算法(water vapor SST, WVSST)以及二次项算法(quadratic SST, QDSST)。随后,在 1998 年 Walton 等^[8]提出了非线性算法(non-linear SST, NLSST),用于高级甚高分辨率辐射计(advanced very high resolution radiometer, AVHRR)数据业务产品开发。以上算法的系数通过卫星亮温和浮标数据或模拟数据进行回归得到,这种基于回归模型的统计方法^[9-13]已经成为当前卫星遥感反演 SST 的最主要业务方法。虽然长期以来,国内外科研人员针对不同卫星传感器陆续开发了多种 SST 反演产品,SST 反演方法和精度均有了改进和提高,但是由于研究区域、数据来源以及具体建模方法不同,各种反演算法及其反演产品在具体海域的适用性仍有待改进。

风云三号(Fengyun-3, FY-3)是中国第二代极轨气象卫星,FY-3C 是该系列的第三颗卫星,实现针对地球系统的业务观测。FY-3C 搭载的可见光红外辐射计(visible infrared radiometer,

VIRR)^[9]共有 10 个通道,其中包括 3 个热红外通道,波谱范围分别是 3.55~3.93 μm , 10.3~11.3 μm 和 11.5~12.5 μm ,可以用来反演 SST。FY-3C/VIRR 的业务化 SST 产品是由国家卫星气象中心针对全球范围海域开发的产品^[13],已有的验证结果表明该产品存在较大偏差,Wang 等^[14]在 2016 年利用北极地区的浮标数据对该产品进行验证时发现其偏差和标准偏差分别为 $-0.12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.93\text{ }^{\circ}\text{C}$,Liao 等^[15]在 2017 年的研究中发现该产品在不进行质量控制时白天数据的偏差和标准偏差为 $-0.59\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1.35\text{ }^{\circ}\text{C}$,夜间为 $-0.48\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1.28\text{ }^{\circ}\text{C}$,需要 break/>进行偏差校正来提高精度。因此针对局部范围的应用开发高精度的区域 SST 算法很有必要。

在本研究中,利用覆盖中国周边海域范围的 2015 年 1 月至 2017 年 12 月共 3 a 的卫星数据和现场数据构建晴空海洋匹配数据集,采用回归模型开发了适合中国周边海域的区域 SST 反演算法,从而可以获取更高精度的 FY-3C/VIRR 的区域 SST 产品。

1 材料与方法

1.1 数据源

卫星数据主要有 FY-3C/VIRR 的 L1B 数据、云检测产品以及业务化 SST 产品数据,其中 L1B 数据和云检测产品用于区域 SST 算法的实现,业务化 SST 产品用于算法对比验证。这 3 种数据按照 5 min 分块(2048 \times 1800 像素)存贮,文件存贮格式为 HDF5(hierarchical data format version 5)。FY-3C/VIRR 卫星数据可以通过风云卫星遥感数据服务网下载(<http://data.nsmc.org.cn/portalsite/default.aspx>)。

现场数据来自 iQuam(*in situ* quality monitor)^[16]数据集,该数据由美国国家海洋与大气管理局(national oceanic and atmospheric administration, NOAA)的卫星应用与研究中心开发,数据按月存贮,文件格式为 NetCDF-4(network common data form version 4.0),可以通过网络下载(<https://www.star.nesdis.noaa.gov/sod/sst/iquam/data.html>)。

参照数据来自 NOAA 开发的基于 AVHRR 数据的最优插值 SST(optimum interpolation SST, OISST)数据^[17], 该数据为 0.25°分辨率的日产品, 由卫星、船舶以及浮标等数据融合而成, 存储格式为 NetCDF, 通过 NOAA 数据服务网站下载 (<https://www.ncdc.noaa.gov/oisst>)。

1.2 反演算法选择

由于 NLSST 通过增加第一猜测温度参数来调节两个分裂窗通道的亮温差, 能更好的实现大气校正处理而获得更高的精度, 被广泛用于 SST 产品开发, 并且已在其基础上衍生出多种形式^[12]。因此, 选择 NLSST 作为 FY-3C/VIRR 的白天数据的区域 SST 反演算法, 反演公式如下:

$$\text{NLSST} = k_0 + k_1 \times T_{11} + k_2 \times T_{sfc} \times (T_{11} - T_{12}) + k_3 \times (T_{11} - T_{12}) \times (\sec(\theta) - 1.0), \quad (1)$$

式中: T_{11} 、 T_{12} 分别代表 VIRR 的 11 μm 和 12 μm 波段的亮度温度, 单位在计算中转换为 $^{\circ}\text{C}$; $\sec(\theta)$ 为传感器天顶角 θ 的正割, θ 的单位为弧度; k_0 , k_1 , k_2 以及 k_3 是反演系数, 通过将匹配的卫星数据和实测数据代入回归模型计算得到; T_{sfc} 代表 SST 的先验估算值, 通过 OISST 产品插值获取, 单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

此外, 研究表明, 位于 3.7 μm 的中红外波段受水汽影响最小^[5, 18], 利用 3.7 μm 、11 μm 和 12 μm 的三通道组合能进一步改进大气校正而获得更高精度的 SST^[18]。但是 3.7 μm 波段在白天会受太阳辐射影响, 只能用于夜间的 SST 反演。因此, 三通道非线性算法 TNLSST(triple window NLSST)^[19] 被选择用于实现夜间数据的区域 SST 反演算法, 反演公式如下所示:

$$\text{TNLSST} = k_0 + k_1 \times T_{11} + k_2 \times T_{sfc} \times (T_{3.7} - T_{12}) + k_3 \times (\sec(\theta) - 1.0), \quad (2)$$

式中: $T_{3.7}$ 是 3.7 μm 波段的亮度温度, 其它参数与公式(1)一样。

1.3 匹配数据集构建

卫星数据与现场数据的匹配样本是开发基于回归模型的 SST 反演算法的关键, 为了得到高精度的反演算法, 需要对匹配样本的质量进行控制。

iQuam 数据已经经过质量控制处理, 质量标识数据存储在 quality_level 科学数据集中, 进行 SST 反演时选择其质量水平最高等级(quality_

level=5)的数据用于匹配数据。

卫星数据与现场数据的观测时间在 1 h 范围之内。由于 iQuam 数据中有多种类型浮标观测数据, 需要进行重复观测数据的剔除处理。对固定位置连续观测的数据仅选择与卫星观测时间最近的观测值, 对移动位置的观测数据按照观测时间优先的原则选择观测值。

为了避免卫星影像中“邻近效应”的影响, 以现场数据的地理位置为中心在卫星数据中选择 3×3 的数组并取平均值^[9, 11], 需要保证数组中心位置的坐标与观测位置的经纬度误差不超过一个像素。

准确的云检测是获取全晴空样本数据关键, 首先利用云检测产品进行云的识别, 当 3×3 数组中有一个像素为云时, 需要剔除该数据。然后利用 11 μm 波段的亮温进行空间一致性检测, 当 3×3 数组中任一个像素的亮温值与该数组的均值差超过 0.5 $^{\circ}\text{C}$ 时说明该像素可能被云污染, 该数据也要被剔除。

此外, 利用卫星数据中的海陆掩模数据进行陆地的判识, 当 3×3 数组中有一个像素为陆地时, 需要剔除该数据。

通过以上处理过程, 对 2015 至 2017 年的卫星数据和现场数据进行提取和筛选, 得到最终的有效匹配样本, 其中白天有 5835 组, 夜间有 7726 组。图 1 为匹配样本中现场数据的空间分布位置。

1.4 误差控制和校正

SST 反演算法和云检测技术都很难完全消除遥感 SST 反演的异常值, 需要利用标准温度参考数据对反演结果进行误差控制^[20], 区域算法采用逐日的 OISST 数据作为参考温度进行误差控制。由于 OISST 数据的空间分辨率远低于 VIRR 数据的空间分辨率, 需要通过二次线性插值与 VIRR 数据匹配。为了避免插值过程中在近岸地区产生无效值, 当插值点周边的 OISST 数据的有效像素少于 3 时, 从二次线性插值自动转换为距离加权插值。

此外, 由于卫星探测与浮标实测的水体深度不一致, 这种“皮肤效应”会导致两种温度之间存在 0.17 $^{\circ}\text{C}$ 左右的偏差^[21], 需要对卫星反演结果

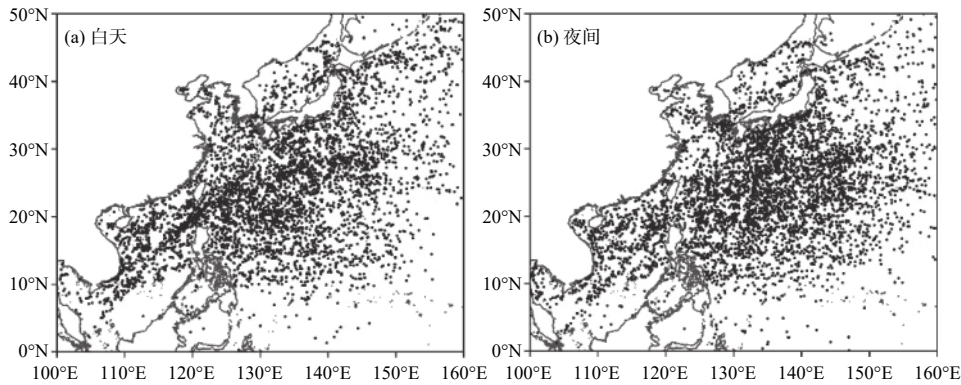


图1 现场测量数据位置

Fig. 1 Locations of the *in situ* data

进行偏差校正处理。

2 结果与讨论

2.1 SST 算法实现

选择 2015 年 1 月至 2016 年 12 月的匹配数据, 根据 NLSST 和 TNLSST 计算公式, 利用多元回归分析模型进行区域 SST 反演算法的系数拟合计算, 其中白天和夜间使用的样本分别为 4503 组和 5736 组。两种算法进行拟合的决定系

表 1 FY-3C/VIRR 数据 SST 反演算法的回归系数

Tab.1 Regression coefficients of FY-3C/VIRR SST algorithm

时段	k_0	k_1	k_2	k_3
NLSST	3.399412	0.922671	0.104528	0.904472
TNLSST	2.788561	1.000613	0.032977	2.016211

数 R^2 都超过了 0.99, 算法的系数如表 1 所示。

2.2 利用现场数据检验

通过独立于反演算法的样本对反演算法进行检验, 是评价反演算法精度的不可缺失的过程。从匹配数据集中选择 2017 年 1 月至 12 月的样本, 计算反演结果与现场数据之间的偏差、标准偏差以及绝对偏差进行反演算法的精度验证, 白天和夜间的样本分别有 1332 组和

表 2 FY-3C/VIRR 反演 SST 与现场数据之间的误差

Tab.2 Error between FY-3C/VIRR SST and *in situ* data

时段	偏差/°C	标准偏差/°C	绝对偏差/°C
NLSST	0.082	0.633	0.493
TNLSST	-0.007	0.557	0.412

1985 组。统计结果如表 2 所示。

根据误差统计结果, 区域算法在白天的偏差

和标准偏差分别为 0.082°C 和 0.633°C, 夜间为 -0.007°C 和 0.557°C, 该结果要优于 Wang 等^[14] 和 Liao 等^[15] 对业务产品的验证结果。此外, 区域算法的精度和目前被广泛使用的国外同类卫星反演及融合 SST 产品的验证结果一致, 甚至也优于某些验证结果。Qin 等^[22] 在 2014 年分别利用南海公开航次、西沙观测站以及 WOD09 (world ocean database 2009) 的现场数据对 MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer) 的 SST 产品进行验证, 偏差和标准偏差分别为 -0.26°C 和 0.64°C、-0.34°C 和 0.68°C 以及 -0.19°C 和 0.58°C。胡晓悦等^[23] 在 2015 年对南海及周边海域融合 SST 产品进行验证, 表明融合 SST 产品在外海的均方根误差介于 0.3°C ~ 1.0°C, 偏差介于 -0.1°C ~ 0.6°C。Huyhn 等^[24] 在 2016 年对 AVHRR 的 SST 产品进行重构时发现该产品与现场数据之间的偏差和均方根误差分别为 -0.25°C 和 0.71°C。Hao 等^[25] 在 2017 年对黄海沿岸水域的 MODIS 的 SST 产品进行检验, 发现 Terra 卫星的偏差、标准偏差和均方根误差分别是 0.23°C, 0.79°C 和 0.83°C, 而 Aqua 卫星则为 0.06°C, 0.85°C 和 0.85°C, 以上文献的研究结果说明区域算法可以达到业务应用需求。区域算法反演的 SST 与现场数据之间的误差分布如图 2 所示, 白天误差的中值和鲁棒标准差分别为 0.085°C 和 0.588°C, 夜间为 -0.011°C 和 0.459°C, 距离中值一个鲁棒标准差范围内的样本占总样本的 68.54% 和 66.35%, 直方图分布接近正态分布, 说明误差分布合理。

2.3 利用参考数据与业务产品对比检验

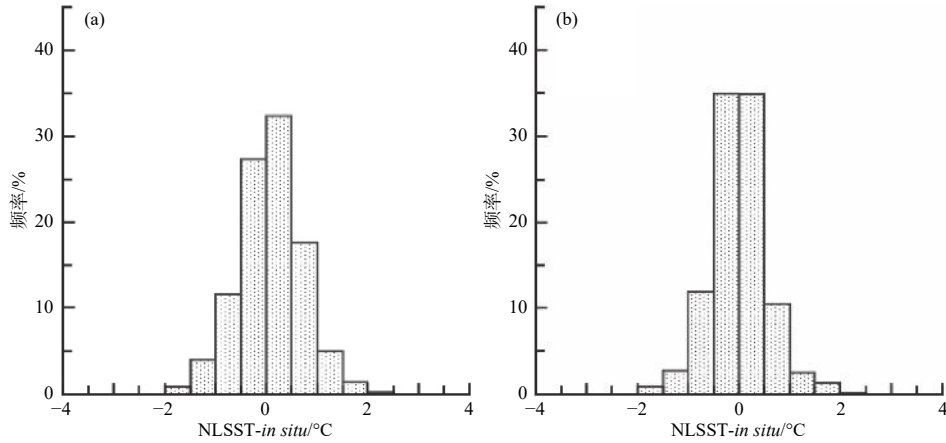


图 2 卫星反演 SST 与现场数据之间的误差统计直方图

Fig. 2 Error statistic histogram between the retrieved SST and *in situ* data

多种产品之间的交叉验证方法被广泛用于反演产品的精度检验, 由于分析场数据具有时效性好、质量均一的优点, 常被作为参照值进行 SST 精度评价^[10]。以 OISST 为参照值, 将区域算法的反演结果与业务产品进行对比, 以此来评价区域算法的可靠性。首先用区域算法对 2017 年 1 月的 FY-3C/VIRR 数据进行 SST 反演, 并从网上下载同时相的 5 min 分块业务化 SST 产品, 分别从区域算法反演的 SST 与业务化 SST 中减去 OISST 后进行误差计算(表 3), 其中白天和夜间

表 3 以 OISST 为参照值的区域算法 SST 和业务化 SST 产品的误差统计

Tab.3 Error of regional SST and operational SST with OISST as reference value

时段	偏差/°C	标准偏差/°C	绝对偏差/°C	决定系数 R^2
SST _d	0.047	0.743	0.583	0.991
NLSST	0.031	0.641	0.504	0.993
SST _n	0.184	0.728	0.559	0.990
TNLSST	0.034	0.556	0.423	0.994

的统计样本分别为 45303 组和 43039 组, SST_d 和 SST_n 分别代表国家卫星气象中心的白天和夜间 SST 产品, 可以看出区域算法反演的 SST 相对于参考值的误差小于业务产品。

区域算法反演结果和业务化 SST 产品分别与 OISST 之间的误差的分布如图 3 所示, 区域算法与 OISST 的误差在 ± 0.5 °C 之间的样本数占总样本的 57.64% 和 67.22%, 高于业务产品的 51.17% 和 51.53%。

3 结 论

(1) 利用 2015 年至 2017 年的卫星数据和现场数据构建晴空海洋匹配数据集, 基于多元回归分析模型开发了适合 FY-3C/VIRR 数据的区域 SST 反演算法。利用现场数据对区域算法进行验证, 白天的偏差和标准差分别为 0.082 °C 和 0.633 °C, 夜间为 -0.007 °C 和 0.557 °C。以 OISST 为参考值将区域算法反演的结果与业务 SST 产品进行对比, 区域算法将白天 SST 的偏差和标准

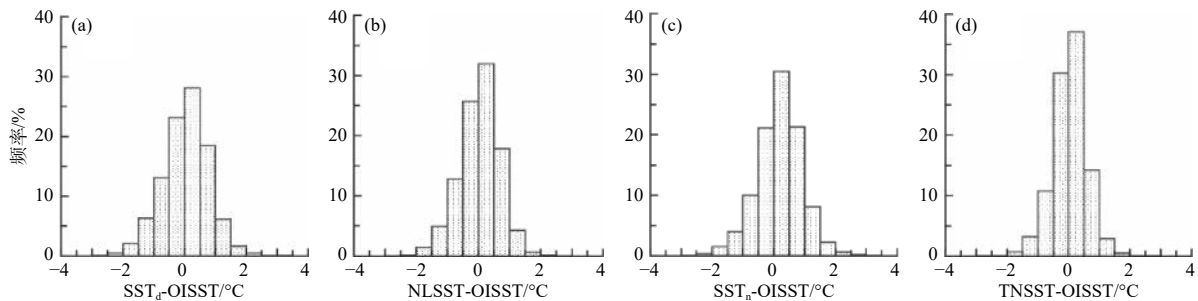


图 3 区域算法 SST、业务化 SST 产品与 OISST 之差的统计直方图

Fig. 3 Statistical histogram of the difference between regional SST, operational SST and OISST

偏差从 0.047 °C 和 0.743 °C 减小到 0.031 °C 和 0.641 °C, 而夜间的偏差和标准差从 0.184 °C 和 0.708 °C 减小到 0.034 °C 和 0.556 °C, 区域算法与 OISST 的误差在 ± 0.5 °C 之间的样本数也高于业务产品, 表明区域算法能有效提高 FY-3C/VIRR 在中国周边海域反演 SST 的精度。

(2) 区域算法实现过程中采用国家卫星气象中心发布的云检测产品进行云的判识, 该产品存在将浑浊水体标识为云的误判以及对薄云、云边缘和碎云的漏判, 会影响算法实现以及反演结果的精度。因此云检测方案的改进以及对反演结果的误差控制是未来进一步提高区域 SST 算法精度的主要研究方向。

(3) 区域算法针对中国周边海域实现, 该算法用于其它海域时需要相应区域的现场数据进行建模和回归, 从而得到适合该区域的高精度的 SST 反演产品。

参考文献:

- [1] 陈志伟, 康建成, 顾成林, 等. 近33a西北太平洋极端海表温度事件的变化特征及与ENSO的关系[J]. *海洋环境科学*, 2019, 38(2): 221-232.
- [2] SAUNDERS P M. Aerial measurement of sea surface temperature in the infrared[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1967, 72(16): 4109-4117.
- [3] ANDING D, KAUTH R. Estimation of sea surface temperature from space[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1970, 1(4): 217-220.
- [4] MCMILLIN L M. Estimation of sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, 80(36): 5113-5117.
- [5] MCCLAIN E P, PICHEL W G, WALTON C C. Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperatures[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90(C6): 11587-11601.
- [6] WALTON C C. Nonlinear multichannel algorithms for estimating sea surface temperature with AVHRR satellite data[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1988, 27(2): 115-124.
- [7] EMERY W J, YU Y Y, WICK G A, et al. Correcting infrared satellite estimates of sea surface temperature for atmospheric water vapor attenuation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C3): 5219-5236.
- [8] 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]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(C12): 27999-28012.
- [9] 何全军, 曹静, 陈翔, 等. 基于非线性算法的FY-3A/VIRR SST反演[J]. *气象*, 2013, 39(1): 74-79.
- [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[J]. *应用气象学报*, 2014, 25(6): 701-710.
- [11] 赵冬至, 王祥, 杨建洪. 基于实测数据的FY-3A海表温度业务化算法研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2014, 33(2): 200-205.
- [12] PETRENKO B, IGNATOV A, KIHAI Y, et al. Evaluation and selection of SST regression algorithms for JPSS VIIRS[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2014, 119(8): 4580-4599.
- [13] WANG S J, CUI P, ZHANG P, et al. FY-3C/VIRR SST algorithm and cal/val activities at NSMC/CMA[C]// *Proceedings of SPIE 9261, Ocean Remote Sensing and Monitoring from Space*. Beijing, China: SPIE, 2014.
- [14] WANG H Y, GUAN L, CHEN G. Evaluation of sea surface temperature from FY-3C VIRR data in the Arctic[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(2): 292-296.
- [15] LIAO Z H, DONG Q, XUE C J. A bias correction method for FY-3C VIRR SST data[J]. *Remote Sensing Letters*, 2017, 8(5): 429-437.
- [16] XU F, IGNATOV A. In situ SST quality monitor (iQuam)[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31(1): 164-180.
- [17] REYNOLDS R W, SMITH T M, LIU C Y, et al. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature[J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(22): 5473-5496.
- [18] DESCHAMPS P Y, PHULPIN T. Atmospheric correction of infrared measurements of sea surface temperature using channels at 3.7, 11 and 12 Mm[J]. *Boundary-layer Meteorology*, 1980, 18(2): 131-143.
- [19] LI X, PICHEL W, MATURI E, et al. Deriving the operational nonlinear multichannel sea surface temperature algorithm coefficients for NOAA-15 AVHRR/3[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(4): 699-704.
- [20] 毛志华, 朱乾坤, 潘德炉. 卫星遥感业务系统海表温度误差控制方法[J]. *海洋学报*, 2003, 25(5): 49-57.
- [21] DONLON C J, NIGHTINGALE T J, SHEASBY T, et al. Implications of the oceanic thermal skin temperature deviation at high wind speed[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(16): 2505-2508.
- [22] QIN H L, CHEN G X, WANG W Q, et al. Validation and application of MODIS-derived SST in the South China Sea[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(11/12): 4315-4328.
- [23] 胡晓悦, 张彩云, 商少凌. 南海及周边海域融合海表温度产品的验证与互较[J]. *遥感学报*, 2015, 19(2): 328-338.
- [24] HUYNH H N T, ALVERA-AZCÁRATE A, BARTH A, et al. Reconstruction and analysis of long-term satellite-derived sea surface temperature for the South China Sea[J]. *Journal of Oceanography*, 2016, 72(5): 707-726.
- [25] HAO Y L, CUI T W, SINGH V P, et al. Validation of MODIS sea surface temperature product in the coastal waters of the Yellow Sea[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(5): 1667-

1680.