

何全军,曹静,陈翔,等. 2013. 基于非线性算法的 FY-3A/VIRR SST 反演. 气象, 39(1):74-79.

基于非线性算法的 FY-3A/VIRR SST 反演^{*1}

何全军^{1,2,3} 曹 静² 陈 翔² 张月维²

1 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境国家重点实验室, 广州 510301

2 广州气象卫星地面站, 广州 510640

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

提 要: 利用非线性算法实现了 FY-3A/VIRR 数据的海洋表面温度 SST 产品的反演。对 2010 年的全球船舶站观测数据和 FY-3A/VIRR 数据建立匹配数据集, 选择单月的匹配数据采用多元回归模型计算得到了适用于 FY-3A/VIRR 数据的非线性海表温度反演算法 NLSST 的系数, 能够实现 FY-3A/VIRR 数据的高精度 SST 产品反演。并利用独立于反演算法的双月匹配数据采用最小绝对偏差方法通过线性模型对 SST 算法的精度进行检验, 结果显示白天和夜间的偏差分别为 0.05℃ 和 -0.05℃, 绝对偏差在 0.50℃ 以下, 标准偏差在 0.65℃ 以下。通过文中实现的算法反演了 VIRR 数据的 SST 产品, 并和 MODIS 的官方产品进行比较, 结果显示两种 SST 产品具有很高的一致性。

关键词: 遥感, 海洋表面温度, 非线性算法, FY-3A/VIRR

中图分类号: P412

文献标识码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.01.009

FY-3A/VIRR SST Retrieval Using Nonlinear Algorithm

HE Quanjun^{1,2,3} CAO Jing² CHEN Xiang² ZHANG Yuewei²

1 State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology,
Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301

2 Guangzhou Meteorological Satellite Ground Station, Guangzhou 510640

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: The sea surface temperature (SST) was retrieved by nonlinear algorithm for Visible and Infra-Red Radiometer (VIRR) onboard the Chinese Fengyun 3A (FY-3A) polar-orbiting meteorological satellite. In this paper, the matchup dataset was created by the SST measurements from global ship observation and FY-3A/VIRR data in 2010, and the coefficients for the nonlinear SST (NLSST) equation applicable to FY-3A/VIRR data were derived by using multiple linear regression, which could be used to retrieve accurate SST products for FY-3A/VIRR data. An independent matchup dataset was used to assess the accuracy of NLSST algorithm by linear model using a robust least absolute deviation method, and the result showed that the biases were 0.05℃ and -0.05℃ for daytime and nighttime, respectively. The absolute deviation was less than 0.5℃ and the standard deviation was less than 0.65℃. The VIRR SST was calculated by the SST algorithm presented in this paper to contrast with official MODIS SST products, showing that there was a good correlation between VIRR SST and MODIS SST. All these have indicated that the SST algorithm realized in this paper could provide reliable VIRR SST products to ocean and climate variability studies.

Key words: remote sensing, sea surface temperature (SST), nonlinear algorithm, FY-3A/VIRR

* 中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2011M38)和广东省气象局气象科技项目(201018)共同资助

2011 年 12 月 21 日收稿; 2012 年 7 月 18 日收修定稿

第一作者: 何全军, 主要从事卫星遥感应用和研究工作. Email: hequanjunsx@163.com

通信作者: 曹静, 主要从事卫星数据接收、应用及管理工作. Email: Caojing@grmc.gov.cn

引 言

地球表面总面积的 71% 左右被海水覆盖,海洋表面温度 SST(Sea Surface Temperature)与海气之间的热通量具有密切关系,它表征了海洋热力、动力过程和海洋与大气相互作用的结果,是研究海面水汽和热量交换的一个重要物理参数,也是海洋环流、水团、海洋锋以及上升流等海洋现象的重要依据和直观指示量。在海洋开发和海洋工程以及气候变化的研究中,SST 也是至关重要,它的分布制约着海面和大气的热量、动量和水汽交换,从而影响大气环流和气候变化(杨亚新等,2009;程炳岩等,2010;周浩等,2011)。

随着遥感技术的迅猛发展,卫星遥感已成为进行全球海洋表面温度探测的最佳手段,国内外许多光学传感器都具备精确探测海洋表面温度的能力。从 20 世纪 70 年代初已经有科研人员开始通过遥感方法进行海表温度测量的研究(Anding et al,1970;McMillin,1975),随着海表温度反演算法的日益成熟,多种海表温度监测产品被开发并在全球范围推广应用,其中高级甚高分辨率辐射计(Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR)(Bernstein,1982;Solanki et al,2003)和中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer,MODIS)(Sobrino et al,2003;何全军等,2009)数据以其高精度和长期稳定的服务能力在国际上应用最为广泛。国内也相继发射具有海洋表面温度探测能力的卫星,包括风云气象卫星(Huang,2001)、海洋卫星(王其茂,2003)等,并取得一定应用成果。通过卫星进行海表温度测量已进入业务化,在大尺度海洋现象和过程、海洋-大气热交换、全球气候变化以及渔业资源、污染监测等方面有重要应用(冯士祚等,1991)。

可见光红外扫描辐射计(Visible and Infra-Red Radiometer, VIRR)(杨军等,2009)是我国第二代极轨气象卫星风云 3 号(FY-3)搭载的光学传感器,拥有两个高灵敏度的热红外通道,可用于进行海表温度反演。本文通过对 2010 年的全球船舶站观测数据和 VIRR 数据进行匹配,基于非线性海表温度反演算法实现了 VIRR 数据的白天和夜间海表温度产品反演,并对反演算法的精度进行检验。

1 VIRR 数据简介

FY-3 是中国第二代高性能综合探测极轨气象

卫星,首颗卫星 FY-3A 于 2008 年 5 月 27 日成功发射,第二颗卫星 FY-3B 也于 2010 年 11 月 5 日成功发射。FY-3A 以三轴稳定方式对地观测,共搭载 11 个传感器,能全球、全天候、实时准确地获取陆地、海洋、大气等的参数。相对第一代极轨气象卫星 FY-1 系列(刘玉洁,2001),FY-3 的载荷和探测能力有了极大提高。

VIRR 是 FY-3 搭载的主要光学探测仪器之一(杨军等,2009),也是 FY-1C/D 上的多通道可见光红外扫描辐射计(Multi-spectral Visible/Infrared Scanning Radiometer, MVISR)(刘玉洁,2001)的继承和改进,将 MVISR 的第 10 通道的波谱范围由 $0.90\sim 0.985\ \mu\text{m}$ 修改为 $1.325\sim 1.395\ \mu\text{m}$,可以更好地进行卷云的识别。VIRR 星下点空间分辨率为 $1.1\ \text{km}$,扫描刈宽 $2800\ \text{km}$ 。VIRR 具有 10 个光谱通道,波谱范围从 $0.43\ \mu\text{m}$ 到 $12.5\ \mu\text{m}$,其中既有高灵敏度的可见光通道,又有红外大气窗区通道,对陆地环境及海洋变化监测有重要意义,可定量反演出不同种类的地球表面和大气参数。VIRR 共拥有三个红外大气窗区通道,其中一个是中红外 3 通道($3.55\sim 3.93\ \mu\text{m}$),主要用于地面热点监测。另外两个热红外通道,分别为 4 通道($10.3\sim 11.3\ \mu\text{m}$)和 5 通道($11.5\sim 12.5\ \mu\text{m}$),噪声等效温差为 $0.2\ \text{K}$ (杨军等,2009),可用于进行陆地和海洋表面温度反演。

VIRR 的 L1 级数据经过了辐射定标以及地理坐标订正,以 HDF5(Hierarchical Data Format version 5)文件格式存贮和分发。使用 VIRR L1 数据前必须进行相应的定标计算,将存贮的观测计数值转换为有意义的物理量。

2 VIRR 海表温度反演

2.1 SST 算法

卫星传感器接收的地表辐射会受大气的影响,Anding 等(1970)首先提出对热红外通道进行大气校正处理,并通过求解辐射传输方程,以两个热红外波段的不同大气透射特征为基础进行水汽吸收的校正,从而获取较准确的海表温度。Prabhakara 等(1974)以及 Mcmilln(1975)也在辐射传输方程的基础上进一步分析了两个热红外波段的大气影响差异对大气校正的影响,并初次提出利用多通道算法反演 SST。Deschamps 等(1980)通过将多个红外通道进行线性组合来剔除大气的影响,进一步简化和完善了利用热红外通道测量 SST 的大气校正算法。此外 Barton

(1983)的研究表明两个分裂窗通道的表面温度存在线性关系,基于该线性关系实现的算法可以获取精度优于 0.3 K 的 SST。直至 1985 年,McClain 等(1985)正式提出了多通道海表温度算法(Multiple-Channel Sea Surface Temperature, MCSST),并用于 AVHRR 的 SST 业务产品开发,随后 Walton 等(1998)又对 MCSST 进行进一步的发展,利用辐射传输方程实现了更精确的非线性海表温度算法(Non-linear Sea Surface Temperature, NLSST)。

目前普遍应用的 SST 业务反演算法是 MCSST 以及 NLSST,这两种算法的形式基本一样,但是 NLSST 采用一个先验的 SST 估算值对 11 和 12 μm 通道的亮温差进行调节。这个估计值可以选用最近时间的 NESDIS(National Environmental Satellite, Data, and Information Service)全球 SST 分析数据,也可以选用 SST 气候值,或者使用通过 MCSST 算法反演得到的 SST 值(Walton et al, 1998)。在多项研究中已表明 NLSST 算法相比 MCSST 算法有更高的反演精度(Walton et al, 1998; Li X et al, 2001),因此本文选择 NLSST 进行 VIRR 数据的白天和夜间海表温度反演。NLSST 的计算公式为:

$$\text{NLSST} = k_0 + k_1 T_{11} + k_2 T_{\text{sf}}(T_{11} - T_{12}) + k_3 (T_{11} - T_{12})[\sec(\theta) - 1.0] \quad (1)$$

式中, NLSST 表示非线性多通道 SST 反演算法,单位为 $^{\circ}\text{C}$; T_{11} 、 T_{12} 分别代表 VIRR 的 11 和 12 μm 波段的亮度温度,单位为 K; $\sec(\theta)$ 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_{sf} 代表 SST 的先验估算值,单位为 $^{\circ}\text{C}$,本文中选用 NESDIS 的 OISST(optimum interpolation sea surface temperature)数据(Reynolds et al, 2007),目前 NESDIS 提供从 1981 年开始的每天的全球 0.25 $^{\circ}$ 分辨率的高精度 SST 网格数据用于天气预报及气候变化检测研究。为了便于计算,本文的 SST 反演公式中所用温度单位都统一转为 $^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 船舶数据与卫星数据的匹配

收集了 2010 年的全球船舶站观测数据以及由广州气象卫星地面站接收和预处理的 FY-3A/VIRR L1 级数据,按照同时相、同地理位置进行匹配来提取有效的匹配数据集。为了确保实现的 SST 反演算法的精度,在进行数据匹配时通过 4 个步骤进行观测数据和卫星数据中的无效值的剔除,以此来控制匹配数据集的质量。

首先是船舶数据的有效性检测。在全球船舶站观测数据集中提取研究区域范围内的具有 SST 观测值的站位信息,并利用 OISST 数据对船舶观测数据进行质量控制。OISST(Barton, 1983)是卫星反演产品、浮标数据以及船舶观测数据的综合处理产品,具有较高的精度,考虑到海水表面温度在 OISST 产品的一个格点范围内的温度变化比较稳定,因此文中采用 OISST 进行船舶观测数据的质量控制。当位于 OISST 一个格点范围内,也就是在近似 25 km 范围内的船舶观测 SST 和 OISST 的绝对温度差超过 2 $^{\circ}\text{C}$ 时,即认为该船舶数据为无效。

其次是船舶数据和卫星数据的最近时间匹配。确保船舶观测时间与卫星观测时间相差不超过 1 小时范围。

第三是船舶数据与卫星数据最近位置匹配。以船舶的地理坐标为中心在卫星数据中选择 3 $\times$ 3 大小的数组,要求数组中心位置的坐标和船舶位置相差不超过 1 个像素。

最后是进行卫星数据的有效性检测。利用针对 FY-3A/VIRR 开发的云检测算法(He, 2011)进行云的判识,如果选择的 3 $\times$ 3 数组中有一个像素被判识为云时即认为该组数据被云污染而被剔除。通过云监测的数组还需要进行 11 μm 波段的亮温的均匀性检测,如果数组中任意一个像素的亮温值与该数组的均值差超过 0.5 $^{\circ}\text{C}$,该数组也被剔除。

通过以上步骤的筛选,最终得到的有效匹配数据共有 3001 组,其中白天有 1613 组,夜间有 1388 组。图 1 所示为 2010 年白天和夜间的船舶站

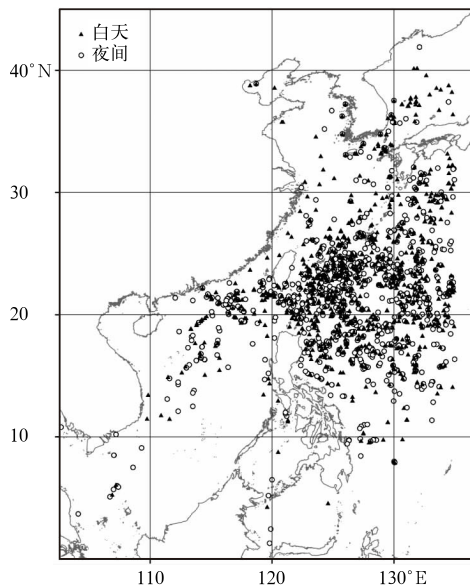


图 1 船舶站匹配数据分布

Fig. 1 The distribution of matchup data from ship observations

匹配数据位置分布。

2.3 SST 反演系数计算

为了得到高精度的 SST 反演算法并能进行有效的精度检验,从 2010 年全部匹配数据中选用了单月的数据用于反演系数的回归运算,选用双月的数据进行反演算法的精度检验,目的是用于系数回归计算的匹配数据和用于算法精度检验的匹配数据相互独立。

将 2010 年所有单月白天的 716 组匹配数据以及夜间的 674 组匹配数据分别代入 NLSST 算法进行多元线性回归计算,最终得到了 NLSST 算法的

系数。算法的系数及误差统计如表 1 所示。

2.4 SST 精度检验

利用 2010 年双月的匹配数据和反演的 SST 基于最小绝对偏差方法进行线性回归分析来验证反演的 SST 精度,其中白天的匹配数据有 897 组,夜间有 714 组。通过对卫星反演的 SST 和船舶站观测的 SST 进行统计,白天的偏差为 0.05℃,绝对偏差为 0.50℃,标准偏差为 0.65℃,相关系数为 0.99,夜间的偏差为-0.05℃,绝对偏差为 0.46℃,标准偏差为 0.63℃,相关系数为 0.99。图 2 是卫星反演的 SST 和船舶站测量的 SST 之间的散点图。

表 1 VIRR NLSST 反演算法的回归系数
Table 1 Regression coefficients and deviations of VIRR NLSST algorithm

	k_0	k_1	k_2	k_3	偏差/℃	绝对偏差/℃	标准差/℃
白天	2.722761	0.994698	0.106243	2.066820	0.00	0.50	0.65
夜间	3.057571	0.917385	0.108694	1.624213	0.00	0.43	0.61

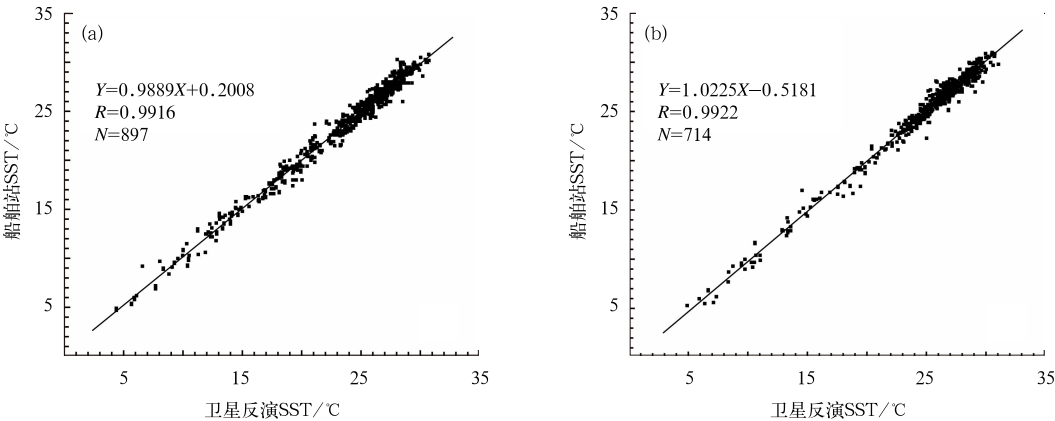


图 2 卫星反演 SST 和船舶测量 SST 的散点图(单位:℃)
(a)白天数据,(b)夜间数据
Fig. 2 The scatter plots of satellite SST and ship SST (unit:℃)
from (a) daytime data and (b) nighttime data

Bernstein(1982)认为遥感反演的 SST 精度在 0.5~1.0℃即达到气候变化研究的要求。Li 等(2001)利用 NLSST 算法实现 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)的 AVHRR 业务化 SST 反演时得到的误差为 0.14±0.5℃,Sobrino 等(2003)利用 MODIS 反演 SST 的标准偏差为 0.3 K。李娜等(2006)利用现场走航数据和站点观测数据对 AVHRR 的 SST 产品在台湾及邻近海域的精度进行分析,结果显示该产品的精度在 0.11±0.9℃。孙凤琴等(2007)利用 Argo 浮标数据对西北太平洋海域的 AVHRR、TMI(TRMM Microwave Imager)以及 MODIS 的 SST 产品进行验证,结果显示三者的均方差在 0.6~

0.9℃之间,绝对误差在 0.3~0.7℃之间。张春桂等(2008)利用 MODIS 多通道数据反演的福建近海的海表温度的平均绝对误差为 0.75℃。根据以上研究结果,本文利用 NLSST 方法对 FY-3A/VIRR 数据反演的 SST 达到国际上遥感反演 SST 的精度要求,能够满足海洋及气候变化的监测和研究应用。

3 VIRR SST 和 MODIS SST 的对比

将不同卫星反演的同种产品进行对比分析,既能校验卫星产品的精确度,又能对数据的进一步同化和融合提供可靠的依据(孙凤琴等,2007;Corlett et al,2006)。MODIS 的 SST 产品已被广泛使用,

其精度也得到了普遍的认可,因此本文选择 MODIS 的官方 SST 产品对利用 VIRR 反演的 SST 产品进行对比检验。为了提高对比结果的可靠性,选择覆盖同一地区的 VIRR 和 MODIS 的同时相观测数据。选用了 2009 年 1 月 17 日 10 时 40 分的 VIRR 数据以及 11 时 15 分的 MODIS 产品,两颗卫星的数据获取时间相差 35 分钟,数据的覆盖范围主要在我国南海区域。其中 MODIS 的 SST 产品从 NASA 的海洋产品网站下载,VIRR 的 SST 产品采用文中实现的算法计算。对两种 SST 产品按照 0.01°分辨率进行等经纬度投影,并按照 10°~27°N、105°~122°E 的范围进行裁剪。图 3 所示即为两种

SST 产品的彩色图像,其中陆地、无数据区以及云覆盖区以黑色填充。从彩色海温图可以看出两种产品的温度分布和变化一致,近岸水温较低,在南海北部沿岸的冷暖水变化明显,随着向南海南部方向水温逐渐升高。

为了对 VIRR 和 MODIS 两种 SST 产品之间的相关性进行定量分析,在剔除云覆盖、陆地以及无效数据后共选择了 500 个样本对进行线性回归分析。图 4 所示为选取样本的散点图。结果表明两种产品的相关性较高, R^2 达到了 0.9918,也证明了本文所实现的 VIRR 的 SST 的可靠性。

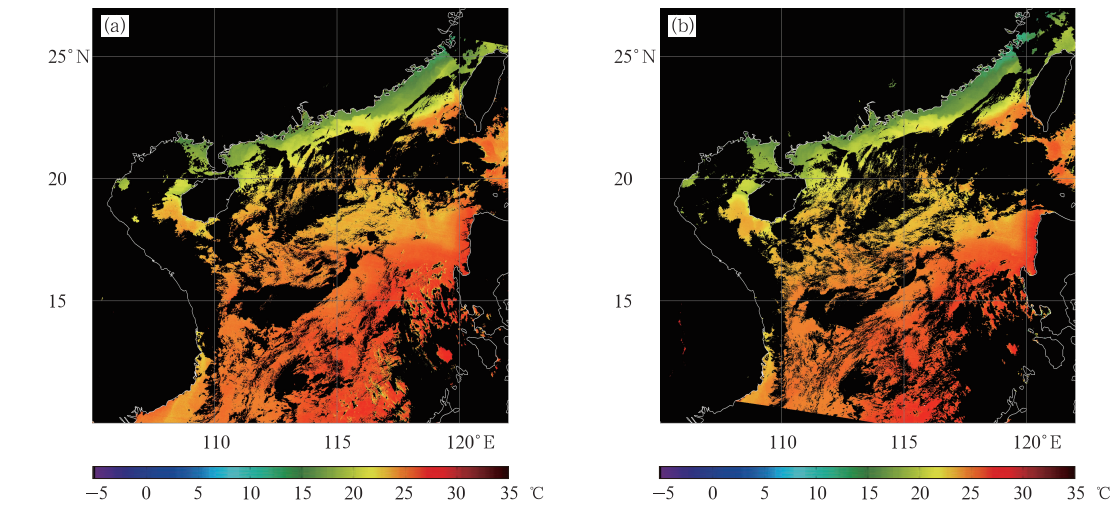


图 3 VIRR 和 MODIS 的 SST 产品图(单位:℃)
(a) VIRR SST,(b) MODIS SST
Fig. 3 The SST products of VIRR (a) and MODIS (b, unit:℃)
(a) VIRR SST, (b) MODIS SST

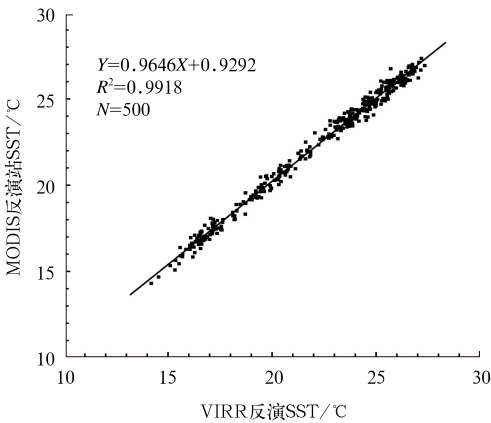


图 4 VIRR 反演 SST 和 MODIS 反演 SST 的样本散点图(单位:℃)
Fig. 4 The scatter plot of VIRR SST and MODIS SST (unit:℃)

4 总 结

海洋表面温度是重要的海洋环境参数,对海洋生态系统以及全球气候变化的研究都具有极其重要的意义(刘梅等,2011;李多等,2012)。本文中选取 2010 年全年的全球船舶站观测数据和 FY-3A/VIRR 数据建立匹配数据集,通过回归计算得到了适合 VIRR 的 NLSST 系数。采用独立于反演算法的匹配数据集对实现的 SST 反演算法的精度进行了检验,结果表明本文实现的 SST 反演算法可以达到目前卫星遥感 SST 的精度需求。另外还将 VIRR 的 SST 产品和同时相的 MODIS 官方 SST

产品进行了对比,其结果表明两种 SST 产品具有高度的一致性。

此外,通过 SST 算法的实现及精度检验结果,也说明 VIRR 数据的热红外通道性能良好,通过我们实现的算法可以反演得到高质量、高精度的 SST 产品,能为海洋环境的动态监测提供数据支持。

致谢:作者衷心感谢匿名审稿专家对本文的改进提出的修改建议。还要感谢广州气象卫星地面站的同事在卫星数据获取中提供的协助,感谢中国气象局国家气象信息中心提供全球船舶站观测数据,同时感谢 NOAA 的 NESDIS 提供 SST 分析产品下载以及 NASA 的海洋水色产品网站提供 MODIS 的 SST 产品下载。

参考文献

程炳岩,郭渠,孙卫国. 2010. 川渝地区降水变化与 Nino3 区 SST 的关系及稳定性分析. *气象*,36(3):27-33.

冯士祚,李凤岐,李少菁. 1999. 海洋科学导论. 北京:高等教育出版社,405-408.

何全军,张月维,曹静,等. 2009. 基于 IDL 的 MODIS1B 数据 SST 反演. *热带气象学报*,25(2):205-208.

李多,肖子牛,李泽椿. 2012. 中国东部地区冬季降雪的时空特征与全球异常海温的联系. *气象*,38(4):411-418.

娜娜,孙凤琴,张彩云,等. 2006. 台湾海峡及其邻近海域 AVHRR 遥感 SST 的初步验证. *厦门大学学报(自然科学版)*,45(3):383-387.

刘梅,高萍,王静萍,等. 2011. 江苏夏季逐月高温日数与西太平洋海温场相关分析及预测模型建立. *气象*,37(12):1553-1559.

刘玉洁. 2001. FY-1C 卫星的资料处理及应用研究. *上海航天*, (2):74-78.

孙凤琴,张彩云,商少平,等. 2007. 西北太平洋部分海域 AVHRR、TMI 与 MODIS 遥感海表层温度的初步验证. *厦门大学学报(自然科学版)*,46(S1):1-5.

王其茂,金振刚,孙从容. 2003. “海洋一号”(HY-1)卫星数据的海面温度反演. *海洋预报*,20(3):53-59.

杨军,董超华,卢乃锰,等. 2009. 中国新一代极轨气象卫星-风云三号. *气象学报*,67(4):501-509.

杨亚新,邱新法. 2009. 西北太平洋热带气旋源地变化特征及与局地海表温度的关系. *气象*,35(5):83-90.

张春桂,陈家金,谢怡芳,等. 2008. 利用 MODIS 多通道数据反演近海海表温度. *气象*,34(3):30-36.

周浩,程炳岩,罗擎擎. 2011. 重庆春播期间降水特征及其与北太平洋海温的关系. *气象*,37(9):1134-1139.

Anding D, Kauth R. 1970. Estimation of sea surface temperature from space. *Remote Sensing of Environment*,1(4):217-220.

Barton I J. 1983. Dual channel satellite measurements of sea surface

temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*,109(460):365-378.

Bernstein R L. 1982. Sea surface temperature estimation using the NOAA 6 satellite advanced very high resolution radiometer. *Journal of Geophysical Research*,87(C12):9455-9465.

Corlett G K, Barton I J, Donlon C J, et al. 2006. The accuracy of SST retrievals from AATSR: An initial assessment through geophysical validation against in situ radiometers, buoys and other SST data sets. *Advances in Space Research*,37(4):764-769.

Deschamps P Y, Phulpin T. 1980. Atmospheric correction of infrared measurements of sea surface temperature using channels at 3.7, 11 and 12 μm . *Boundary-Layer Meteorology*,18(2):131-143.

He Q J. 2011. A daytime cloud detection algorithm for FY-3A/VIRR data. *International Journal of Remote Sensing*,32(21):6811-6822.

Huang W. 2001. Ocean colour and SST measurements with Chinese FY-1C satellite. *International Journal of Remote Sensing*,22(17):3261-3264.

Li X, Pichel W, Maturi E, et al. 2001. Deriving the operational nonlinear multichannel sea surface temperature algorithm coefficients for NOAA-15 AVHRR/3. *International Journal of Remote Sensing*,22(4):699-704.

McClain E P, Pichel W G, Walton C C. 1985. Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research*,90(C6):11587-11601.

McMillin L M. 1975. Estimation of sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption. *Journal of Geophysical Research*,80(36):5113-5117.

Prabhakara C, Dalu G, Kunde V G. 1974. Estimation of sea surface temperature from remote sensing in the 11- to 13- μm window region. *Journal of Geophysical Research*,79(33):5039-5044.

Reynolds R W, Smith T M, Liu C, et al. 2007. Daily high-resolution blended analyses for sea surface temperature. *Journal of Climate*,20(11):5473-5496.

Sobrino J A, Kharraz J E, Li Z L. 2003. Surface temperature and water vapour retrieval from MODIS data. *International Journal of Remote Sensing*,24(24):5161-5182.

Solanki H U, Dwivedi R M, Nayak S R, et al. 2003. Fishery forecast using OCM chlorophyll concentration and AVHRR SST: validation results off Gujarat coast, India. *International Journal of Remote Sensing*,24(18):3691-3699.

Walton C C, Pichel W G, Sapper J F, et al. 1998. The development and operational application of nonlinear algorithms for the measurement of sea surface temperatures with the NOAA polar-orbiting environmental satellites. *Journal of Geophysical Research*,103(C12):27999-28012.