

NOAA/AVHRR 卫星海表温度在西北太平洋的印证及分析

范海燕¹, 滕 军¹, 管 磊², 曲利芹², 杜 坤³

(1.中国人民解放军61741部队,北京 100081; 2.中国海洋大学,青岛 266003; 3.总参气象水文局,北京 100081)

摘 要:本文详细分析了 TeraScan 系统反演 NOAA/AVHRR 卫星海表温度的过程,解决了反演过程中的海陆匹配问题和云检测过程中的误检、漏检问题,处理得到 2002 年($5^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$)、($105^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$)区域内的卫星海表温度数据。利用东北亚地区海洋观测系统 NEAR-GOOS 提供的现场海表温度数据做比较,印证 NOAA/AVHRR 海表温度在西北太平洋海域的精度,并分析其误差产生的来源。

关键词:卫星海表温度; AVHRR; NEAR-GOOS; MCSST

中图分类号:P715 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-0239(2009)02-0007-08

1 引言

美国 SeaSpace 公司的 TeraScan 系统是目前比较流行的一种卫星数据接收与处理系统,主要接收和处理的卫星包括美国海洋大气局(NOAA)极轨系列卫星和美国国家航空航天局(NASA)的海洋水色卫星 SeaStar。其中 NOAA 卫星上携带的主要传感器—先进的甚高分辨率辐射计(AVHRR),具有可见光至远红外 5 个通道,每个通道有不同的波长并记录了当卫星扫描地球表面时相应波长的辐射量。其中通道 1、2 为反照率,通道 3、4、5 为亮温。NOAA 系列极轨卫星运行在 850km 高空的近极地太阳同步轨道上,每个卫星每天大约提供 2 次全球覆盖,AVHRR 的星下点分辨率为 1.1km。

TeraScan 系统捕获的 HRPT(高分辨率图像传输)数据流是包括多个不同传感器的混合数据,TeraScan 从原始数据流中分离出辐射量和地球物理量,然后根据特定的数据类型和需求,经过一系列数据处理步骤,得到图像和二进制格式的海表温度数据。

本文利用 TeraScan 系统从 NOAA/AVHRR 反演卫星海表温度数据,制作出 $0.01^{\circ}\times 0.01^{\circ}$ 网格的二进制卫星海表温度文件。然后与 NEAR-GOOS 延时数据库提供的现场数据做比较,印证 NOAA/AVHRR 海表温度在西北太平洋海域的精度,并分析其误差产生的来源。

2 数据处理

2.1 NOAA/AVHRR 卫星海表温度反演

AVHRR 数据首先通过 hrptin 函数从 TeraScan 系统捕获的 HRPT 数据流中被分离出。

收稿日期: 2008-08-06

作者简介: 范海燕(1980-),女,工程师,主要从事海洋环境数值预报工作。

hrptin 函数将输出转化为辐射温度，可见光通道的结果为反照率百分数，红外通道的结果为 Celsius/Kelvin 温度。有时 HRPT 数据流可能丢失几行数据，hrptin 通过复制临近行数据来修复丢失的数据。飞行器时钟和水平追踪器的小误差可能会导致卫星方位上的小误差 (1~10km)，在许多应用中这些误差可以忽略不计，但在本研究中，要求地球表面海洋与陆地的位置针对海岸线进行精确的定位，这就需要用 navbox 函数对数据进行校准。读入的 AVHRR 数据集通过函数 navbox2 和 nav2 被校准，navbox2 选择包含不规则陆地或水域边界的 boxes，nav2 将图像数据与这些边界进行关联。在数据处理过程中，发现部分数据的图像中陆地与海岸线不匹配，在对系统参数做过大量分析研究后，调整最大行列偏移量，重新处理，使海岸线与陆地得到了较好的匹配。

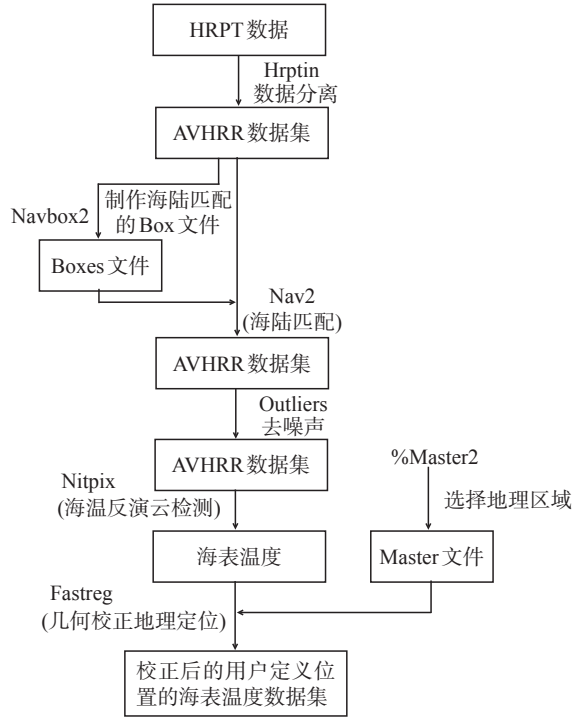


图1 AVHRR 数据生成海温图像流程图

函数 outliers 可以检测并修复噪声数据，若数据超过设定的阈值，则将其视为噪声数据，用周围像素的平均值代替其取值。用 nitpix 函数可以进行云检测并计算海表温度 SST，海表温度反演算法，选择 MCSST 算法，其反演系数是 NOAA 根据全球范围同步的卫星与现场数据回归得到的，公式如下^[1]：

$$SST = a + bT_4 + cT_5 + d(T_4 - T_5)(\sec \theta - 1) \quad (1)$$

T_4 、 T_5 分别为 AVHRR 第 4、第 5 通道亮温， θ 为卫星天顶角，经验系数 a 、 b 、 c 、 d 是利用现场测量数据资料进行回归分析得到的。为了尽量减少云的影响，减少误检和漏检的云像元，对 nitpix 参数做适当调整 (见表 1)：

表1 nitpix 参数修正

参数	默认设置	修正设置
cos_sat_zen	0.4	0.6
ch4_delta	0.3	2.5
ch2_delta	0.25	0.6
min_ch4_temp	0	-3
ch2_max	3	6
ch3_minus_ch4	0	-0.8
min_sun_reflect	0	5

参数修正后云检测的效果得到了明显的改善，见图2：

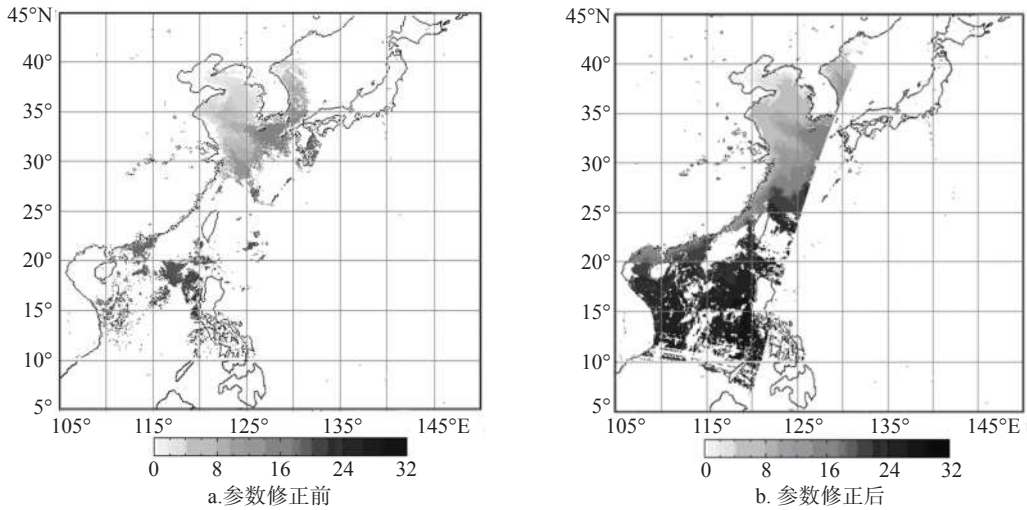


图2 修正参数前后海温图像对比

最后将反演的 SST 数据进行等角度投影，定位到 $5^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ ， $105^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$ 的范围内，经度方向选择 4 500 个采样点，纬度方向选择 4 000 个采样点，从而得到 $0.01^{\circ}\times 0.01^{\circ}$ 网格的卫星海表温度数据。

2.1 现场数据的质量控制

东北亚地区海洋观测系统 North-East Asian Regional Global Ocean Observing System (以下简称 NEAR-GOOS) 是全球海洋观测系统 (GOOS) 的一个区域性试点项目，由中国、日本、韩国和俄罗斯合作发起，收集、管理并发布亚洲东北部地区海洋气象、水文资料，其来源主要有固定浮标、浮动浮标、沿岸站、海洋科学考察船和自动观测船。本文采用 NEAR-GOOS 延时数据库中的全球海表温度解码数据作印证。

考虑到现场数据观测及记录过程中可能会出现误差，在作数据印证前首先要进行必要的检验，剔除不真实或者重复的数据。规则如下：

- ① 将小于 0°C 或大于 35°C 的表面海温数据剔除；
- ② 将时间不合法的数据剔除：如小时数小于 0 或大于 24，分钟数小于 0 或大于 60；

③ 将经纬度范围不合法的数据剔除，如：纬度小于0或大于90，经度小于0或大于180；

④ 将日期不合法的数据剔除，如：2月30号，4月31号或出现未来日期；

⑤ 剔除重复数据；

⑥ 剔除数据标号非法的数据：若由少于3个，多于5个文字数字组成，或者包括重复的字母，比如：‘BBXX’，‘JJVV’等，则为非法数据。

另外，在记录这些现场数据时难免会有一些失误，比如会出现同一浮标(或观测船)、同一时间而经纬度不同的数据，同一浮标(或观测船)、同一时间、同一经纬度而温度不同的数据，剔除掉这些非法数据，选择2002年2月、5月、8月、11月， $5^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ ， $105^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$ 的范围内的有效数据。

3 印证结果及分析

将卫星数据与现场数据做时空匹配，时间窗口设为1小时，空间窗口设为0.01度，即现场数据位于AVHRR海表温度 $0.01^{\circ}\times 0.01^{\circ}$ 网格内。根据设定的时间、空间窗口，筛选匹配的卫星数据和现场数据。其中，当有多个现场数据落在同一个卫星海表温度的 $0.01^{\circ}\times 0.01^{\circ}$ 网格内时，选取时间空间最接近的数据点。考虑到卫星海表温度反演中或者现场数据测量中仍然存在少数误差较大的点，从这些匹配点中去掉AVHRR海表温度与NEAR-GOOS现场数据之差大于 3°C 的点。匹配点分布见图3：

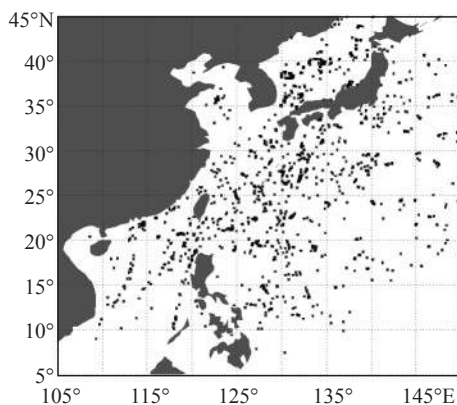


图3 2002年匹配数据分布

分别比较各月数据，得到2002年2、5、8、11月卫星产品精度，见表2：

表2 2002年NOAA/AVHRR海表温度与NEAR-GOOS现场数据初步印证结果

	匹配数据对 (个)	平均偏差 (Bias $^{\circ}\text{C}$)	标准偏差 (Std.Dev $^{\circ}\text{C}$)
二月	631	-0.35	0.98
五月	1108	-0.54	1.00
八月	694	-0.56	1.11
十一月	688	-0.68	1.07

从上表中可以看到标准偏差较大，只有二月份的低于1.0，考虑到TeraScan系统在做云检测时可能发生的部分误检的情况，针对每一个匹配点的AVHRR海表温度：以这个匹配点为中心取 5×5 格点像元，其中的无效数据个数如果大于10个，则认为这个点有可能是云，而被TeraScan系统误检，所以去掉这个点，只取无效数据个数小于10个的点；

从空间匹配角度考虑, 温度梯度变化大时, 1km 卫星海表温度与一点实测值相差较大。将每个匹配点的 5×5 格点像元内有效数据做标准偏差, 值大于 1°C 的情况说明匹配点周围的亮温数据梯度过大, 会被漏检, 所以去掉这些标准偏差大于1的数据点。

做完上述处理后, 再将卫星数据与现场数据做比较, 与先前的初步结果相比, 有较好的改善(见表3)。

表3 2002年NOAA/AVHRR海表温度与NEAR-GOOS现场数据最终印证结果

	匹配数据对 (个)	平均偏差 (Bias $^{\circ}\text{C}$)	标准偏差 (Std.Dev. $^{\circ}\text{C}$)
二月	285	-0.23	0.84
五月	497	-0.27	0.78
八月	302	-0.25	0.96
十一月	216	-0.37	0.90

比较2002年全年的现场数据和卫星数据: 可以看到2002年全年的卫星数据与现场数据的平均偏差为: -0.28°C , 标准偏差: 0.86°C (NOAA/AVHRR海表温度减去NEAR-GOOS现场数据, 见图4)。

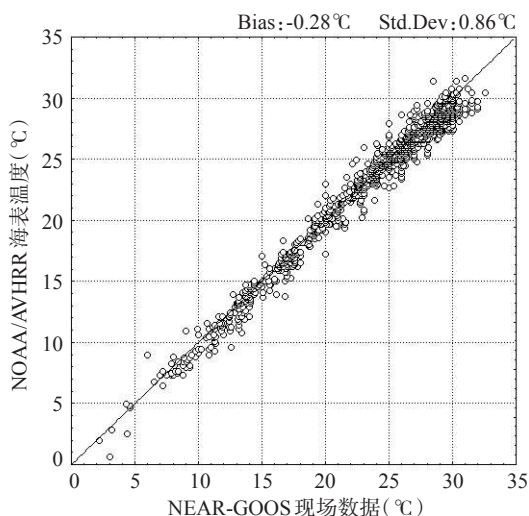


图4 2002年NOAA/AVHRR海表温度与NEAR-GOOS现场数据的比较

从表3可以看到, 平均偏差都小于0, 即利用TeraScan系统、MCSST算法得到的卫星海表温度总体上小于现场实测数据, 这是由于皮温和体温的差别引起的, 卫星辐射计测量的是海洋表面以下几微米的温度, 通常称皮温, 而现场实测的海温是海面以下 $0.5\sim 1.5\text{m}$ 的水温, 即体温。皮温与体温之差依赖于海面风、浪、太阳加热时间, 差值在正负 1°C 之间^[2]。一般情况下, 皮温比体温低, 这是因为海面发出长波辐射, 使得皮层冷却, 同时, 从海洋到大气的潜热和感热输送, 也使得皮层冷却^[3]。所以印证结果出现表3中的情况是正常的。

此外,产生误差的原因还有很多方面:

(1) Strong 和 McClain 曾指出 MCSST 反演的海表温度与船测数据的平均偏差、标准偏差均比与浮标相比时大^[4],而且船舶测量海温时的方法和深度并不固定,所以船舶报资料误差是不容忽视的。本文中使用的 NEAR-GOOS 现场数据不仅有浮标数据,也有大量的船测数据,所以一部分误差是来源于现场实测数据的误差。

(2) 由于本文选取的现场实测数据空间跨度比较大,各地的海洋、大气状况不同,所以卫星遥感反演的海表温度会受到一定程度的影响,与现场实测数据有些差异。

为了分析偏差随纬度的变化,将匹配数据集根据纬度值每5度做分析(见表4),发现在中纬度范围内卫星海表温度与现场数据的平均偏差和标准偏差较小,而在低纬和高纬范围内均有不同程度的增大。

表4 平均偏差、标准偏差随纬度的变化

纬度 (°N)	平均偏差(Bias °C)	标准偏差 (Std.dev. °C)
5~10	-1.15	0.53
10~15	-0.66	0.75
15~20	-0.36	0.88
20~25	-0.41	0.86
25~30	-0.003	0.88
30~35	-0.01	0.93
35~40	-0.31	0.78
40~45	-0.17	0.70

考虑到低纬处的水汽含量较大,所以,为了分析水汽吸收对卫星反演海表温度的影响,将卫星海表温度与同步的 SSMI(Special Sensor Microwave Imager)水汽数据做比较,发现当水汽含量较高、较低时,MCSST 算法反演的海表温度精度较差。

表5 平均偏差、标准偏差随水汽含量的变化

水汽含量(mm)	平均偏差 (Bias °C)	标准偏差(Std.dev. °C)
0~10	-0.35	1.09
10~20	-0.23	0.70
20~30	-0.13	0.85
30~40	-0.18	0.81
40~50	-0.29	0.94
>50	-0.49	0.92

随着纬度的降低,水汽越来越大,而在纬度较高的地区,水汽含量相对较低,相应的,卫星反演的海表温度精度会受到水汽的影响(见表5),在低、高纬较潮湿或较干燥的地区,卫星反演的海表温度与现场数据的平均偏差、标准偏差都较大。

(3) 云检测手段的提高。从以上各图表中可以看到卫星反演的海表温度与现场数据的偏差为负偏差。除了有皮温与体温的差别外,可能是 TeraScan 系统做云检测没有完全剔除掉所有的云,使其混入到用来做 SST 反演的晴空资料中来,从而导致反演出来的 SST

值低于实际海洋上的 SST 真实值^[5]。

AVHRR 第四通道辐射量在有云时较低，所以做云检测时，第四通道亮温的阈值若设的偏低，则一部分云会被漏检，混入晴空数据中来，所以海温较低时，会产生较大误差（见表6）。

表6 平均偏差、标准偏差随温度的变化

卫星海表温度	平均偏差 (Bias °C)	标准偏差 (Std.dev. °C)
0~5	-0.56	1.12
5~10	-0.58	0.91
10~15	-0.38	0.83
15~20	-0.31	0.70
20~25	-0.03	0.86
25~30	-0.34	0.87
>30	0.29	0.90

(4) TeraScan 系统反演的海表温度精度的日变化(见表7):

表7 白天、晚上的精度比较

	平均偏差(Bias °C)	标准偏差(Std.dev. °C)
白天	-0.22	0.84
晚上	-0.36	0.88

这是由于晚上没有可见光通道，云检测的效果没有白天好。

(5) 卫星遥感海表温度反演方法上，本文选取的 MCSST 算法，其反演系数是 NOAA 根据全球范围同步的卫星与现场数据回归得到的。区域适应性差，应用于西北太平洋海域时会出现一些偏差。

(6) 将卫星海表温度与同步的 SSMI(Special Sensor Microwave Imager)风速数据做比较:

表8 平均偏差、标准偏差随风速的变化

风速 (m/s)	平均偏差(Bias °C)	标准偏差 (Std.dev. °C)
< 5	-0.21	0.85
5~10	-0.33	0.88
10~15	-0.32	0.81
> 15	-0.18	0.52

从表中可以看出，当风速大于 15m/s 时，偏差明显减小，这是由于风速较大时，会引起海水较大的扰动，从而促进了热量传递，减小了表层海水与深层海水的温度差别，即减小了皮温与体温的差别，所以，当风速大于 15m/s 时，卫星海表温度与现场数据的偏差明显减小。

4 结论

本文用 TeraScan 系统反演了 2002 年 NOAA/AVHRR 海表温度，制作出 $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$ 网

格的二进制海表温度文件。然后利用 NEAR-GOOS 在西北太平洋的现场数据资料对卫星海表温度进行了印证, 卫星数据与 NEAR-GOOS 现场数据的平均偏差为 -0.28°C , 标准偏差: 0.86°C 。精度有待提高。

产生误差的原因是多方面的: 包括皮温与体温的差别、现场实测数据的误差、海面风场的影响、水汽吸收的影响、温度锋面的影响、云检测手段的提高等, 最重要的是反演算法的改进。

综上所述, 要想提高 SST 产品的反演精度, 需要做的工作还有许多, 特别是反演算法的改进, 是提高 SST 业务产品精度最直接、最有效的手段。

参考文献:

- [1] 管磊. 高精度卫星海表温度反演及黑潮变异卫星观测与研究[D]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1998.13-14.
- [2] Robinson. I S Satellite Oceanography[M]. Ellis Horwood, Chichester, 1985.
- [3] 管磊, 陈锐, 贺明霞. ERS-1/ATSR 海表温度在热带太平洋和西北太平洋的印证与分析[J]. 遥感学报, 2002, 6(1): 63-69.
- [4] Strong A E, McClain E P. Improved ocean surface temperatures from space -- comparisons with drifting buoys[J]. Bull. Amer Meteor Soc, 1984, 65 (2): 138-142.
- [5] May D A, Parmeter M M, Olszewski D S. Operational processing of satellite sea surface temperature retrievals at the naval oceanographic office. Bull. Amer Meteor Soc, 1998, 79 (3): 397- 407.

Validation of sea surface temperature from NOAA/AVHRR in the Northwest Pacific

FAN Hai-yan¹, TENG Jun¹, GUAN Lei², QU Li-qin², DU Kun³

(1. 61741 Troops of PLA, Beijing 100081 China; 2. Ocean University of China, Qingdao 266003 China; 3. Hydrometeorological Bureau of the General Staff, Beijing 100081 China)

Abstract: In this paper, the processing of NOAA/AVHRR sea surface temperature(SST) by TeraScan system is analyzed. The missed and false cloud pixels are found out to retrieve the SST in the region ($5^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$) in 2002. To investigate the accuracy of the NOAA/AVHRR SST product, NOAA/AVHRR SST are compared with simultaneous NORTH-EAST ASIAN REGIONAL Global Ocean Observing System Regional Delayed Mode Data Base (NEAR-GOOS RDMDB) in-situ data. Finally, the sources of error are analyzed.

Keywords: sea surface temperature; AVHRR; NEAR-GOOS; MCSST