

## 基于实测数据的 FY-3A 海表温度业务化算法研究

赵冬至\*, 王 祥, 杨建洪

(国家海洋环境监测中心 海洋遥感室, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 建立适于 FY-3A 卫星的海表温度业务化反演算法并验证其精度. 采用覆盖我国渤海及北黄海的长时间序列现场观测数据及相应 FY-3A VIRR 数据, 建立了适于 FY-3A VIRR 海表温度反演的分裂窗算法. 独立样本数据验证表明, 算法平均误差为 0.78 °C, RMSE 为 0.93.

**关键词:** 风云三号 A 星; 分裂窗算法; 可见光红外扫描辐射计; 海表温度  
**中图分类号:** TP 722.5 **文献标识码:** A

### FY-3A operational SST retrieval algorithm based on in-situ measurements

ZHAO Dong-Zhi\*, WANG Xiang, YANG Jian-Hong

(Division of Ocean Remote Sensing, National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China)

**Abstract:** The SST operational retrieval algorithm has been derived and validated for FY-3A. Using long time series of in-situ measurements data and coincide/collocated FY-3A VIRR sensor data collected in the Bohai Sea and northern Yellow Sea, we proposed a split-window algorithm suitable for FY-3A VIRR SST retrieval. Validation against independent data shows the mean deviation between satellite and matchup in-situ measurements was 0.78 °C with a RMSE of 0.93.

**Key words:** FY-3A satellite, split window algorithm, VIRR, sea surface temperature

**PACS:** 42.68.Wt

### 引言

海表温度(SST)是海洋学研究中最重要参数之一,是定量探测海洋环境参数的重要辅助数据,几乎所有的海洋过程,特别是海洋动力过程都直接或间接的与温度有关.传统的走航测量或站点测量不足以准确反映海洋温度场的整体状况<sup>[1]</sup>,利用热红外遥感手段可定量反演海表温度,使问题迎刃而解<sup>[2]</sup>.目前,海表温度的业务化处理算法是基于分裂窗技术,依据大气对不同波长的红外遥感有不同的影响效应,采用不同波段测量值的线性组合来消除大气的影响,定量反演海表温度<sup>[3-5]</sup>.自1979年,NOAA便开始利用AVHRR数据业务化获取全球海表温度.早期的多通道SST反演算法(MCSST<sup>[6-7]</sup>,

如式(1))假定实际的海表温度与AVHRR卫星数据获取的等效黑体温度及两分裂窗通道亮温差存在线性关系,因而,实际海表温度可通过AVHRR两热红外通道亮温差估算出来. Walton<sup>[8]</sup>将MCSST算法进一步发展,提出了AVHRR SST反演的非线性算法(CPSST).1991年,CPSST算法的简化变形非线性算法(NLSST)在NOAA/NESDIS进入业务化应用,获取白天全球海洋表面温度数据,算法形式如式(2).为提高分裂窗算法的精度,学者们进行了各种研究,如Becker和Li<sup>[9]</sup>针对天底角达46°区域提出了局地分裂窗算法;sobrino等<sup>[10]</sup>则对原算法进行了简化;coll等<sup>[11]</sup>将Planck函数代入辐射传输方程并进行Taylor展开取一阶近似,发展了一种新的分裂窗算法;Wan和Dozier<sup>[12]</sup>针对MODIS数据提出了广

收稿日期:2013-01-14,修回日期:2013-09-03

基金项目:海洋行业公益性专项(200905012,201005030)

Foundation items: Supported by the National Marine Public Welfare Research Project of China(200905012,201005030)

作者简介(Biography): 赵冬至(1964-),男,辽宁辽阳人,博士生导师,主要研究领域为海洋水体、海岸带生态环境和海洋大气遥感与GIS技术等. E-mail: dzzhao@nmenc.gov.cn

\* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: dzzhao@nmenc.gov.cn

Received date: 2013-01-14, revised date: 2013-09-03

义分裂窗算法,算法中考虑了观测角和大气柱水汽含量变化的影响,成为 MODIS 温度产品的官方算法之一. Qin 等<sup>[13]</sup>将大气透射率作为变量引入模型,提出了自己的劈窗算法,并对多种劈窗算法进行了精度分析比较. 孙亮等<sup>[14]</sup>以 MODIS 数据为例,利用 MODTRAN 对多种劈窗算法进行了精度检验.

$$\text{MCSST} = B_1 T_{11} + B_2 (T_{11} - T_{12}) + B_3 (T_{11} - T_{12}) (\sec\theta - 1) - B_4, \quad (1)$$

$$\text{NLSST}(\text{day}) = A_1 T_{11} + A_2 T_{\text{afc}} (T_{11} - T_{12}) + A_3 (T_{11} - T_{12}) (\sec\theta - 1) + A_4, \quad (2)$$

式中,  $T_{11}$ 、 $T_{12}$  为 11  $\mu\text{m}$  与 12  $\mu\text{m}$  通道等效黑体温度;  $T_{\text{afc}}$  为初始估计温度场;  $\theta$  为卫星天顶角;  $A_i$ 、 $B_i$  ( $i=1,2,3,4$ ) 为模型参数值.

FY-3A 卫星是我国 2008 年 5 月发射的第二代极轨气象卫星,星上携带的可见光红外扫描辐射计 (VIRR) 有 10 个光谱通道,星下点空间分辨率为 1.1 km,可用于地球环境综合探测. 通道 4 (B4) 和通道 5 (B5) 是热红外通道,是地物在常温 (约 300 K) 时的辐射峰值所在的波长范围,可用于定量研究地球表面和云顶温度<sup>[2]</sup>. 至今,国内尚没有针对 FY-3A 卫星 VIRR 传感器的海表温度业务化反演算法研究的报道. 同时,可获取的海温产品数据未给出相关的精度指标. 因而,本研究拟采用 FY-3A/VIRR 卫星影像数据和长时间序列现场实测数据,采用成熟的 NLSST 算法模型和场地定标方法,将卫星数据应用于海表温度的定量反演研究并验证其精度,建立适用于 FY-3A 卫星的海表温度业务化反演算法,以发挥其在海表温度业务化应用中的潜力.

## 1 研究区概况

以我国北方的渤海和黄海北部海域为示范海区. 渤海是我国的内海,三面环陆,在辽宁、河北、山东、天津三省一市之间,面积约  $7.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,平均水深 25 m,为我国最大的超浅型内海. 渤海水温变化受北方大陆性气候影响,2 月在  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  左右,8 月达  $21 \text{ }^\circ\text{C}$ . 北黄海是山东半岛、辽东半岛和朝鲜半岛之间的半封闭海域,面积约  $8 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,平均水深 40 m. 黄海的水温年变化小于渤海,平均气温 1 月最低,为  $-2 \sim 6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,南北温差达  $8 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 8 月最高,平均气温全海区约为  $25 \sim 27 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## 2 数据源

### 2.1 卫星影像数据及预处理

采用的遥感卫星影像数据为 FY-3A 卫星搭载

的 VIRR 传感器数据,包括两个位于大气窗区波段的热红外分裂窗通道 (B4,  $10.3 \sim 11.3 \text{ } \mu\text{m}$  和 B5,  $11.5 \sim 12.5 \text{ } \mu\text{m}$ ),设计用于表面温度的定量反演研究. 共搜集覆盖示范海区自 FY-3A 卫星发射 (2008 年 5 月) 至 2009 年 12 月 31 日 VIRR 传感器 L1 级 HDF5 格式有效卫星数据 885 景.

几何校正由数据集自带的经纬度地理定位数据建立 GLT 文件进行处理,红外通道几何校正精度优于 0.8 像元;辐射定标参考国家气象卫星中心发布的“FY-3A 定标信息参数”,分别将可见光近红外及红外通道测值转化为通道反照率和等效黑体亮温. 其中,可见光近红外通道采用线性定标方式,如式(3),定标系数存放于 FY-3A 扫描幅设计 L1 数据私有文件属性“RefSB\_Cal\_Coefficients”中,共 14 个数值,分别为各通道斜率与截距;红外通道定标分为星上线性定标、辐亮度非线性订正、有效黑体温度计算和等效黑体温度计算四个步骤,见式(4)至式(7).

$$A = S * C_E + I, \quad (3)$$

式中,  $A$  为通道反照率,  $S$  为斜率,  $I$  为截距,  $C_E$  为可见光近红外通道对地观测计数值.

$$N_{\text{LIN}} = \text{Scale} * C_E + \text{Offset} \quad (4)$$

式中,  $N_{\text{LIN}}$  为线性定标辐亮度值 ( $\text{mW}/\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sr}$ ),  $\text{Scale}$  为增益,  $\text{Offset}$  为截距,  $C_E$  为红外通道对地观测计数值.  $\text{Scale}$  与  $\text{Offset}$  分别存放于数据集“Emissive\_Radiance\_Scales”与“Emissive\_Radiance\_Offsets”中,每条扫描线给定一组线性定标系数.

$$N = b_0 + (1 + b_1) N_{\text{LIN}} + b_2 N_{\text{LIN}}^2, \quad (5)$$

式中,  $N$  为订正后定标辐亮度值 ( $\text{mW}/\text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sr}$ ),  $b_0$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  为地面定标给出的订正系数,存放于文件属性“Prelaunch\_Nonlinear\_Coefficients”中,共 12 个数值,目前只用到前 9 个数值,见表 1.

表 1 红外通道辐亮度非线性订正系数

Table 1 Nonlinear coefficients of infrared radiance correction

通道	$b_0$	$b_1$	$b_2$
B3	8.267 243 E-03	-3.811 100 E-02	1.508 700 E-02
B4	1.595 651 E+00	-6.220 200 E-02	3.809 432 E-04
B5	1.954 244 E+00	-6.424 600 E-02	3.476 301 E-04

$$T_{\text{BB}}^* = \frac{c_2 v_c}{\ln \left[ 1 + \left( \frac{c_1 v_c^3}{N} \right) \right]}, \quad (6)$$

式中,  $T_{\text{BB}}^*$  为有效黑体温度,  $C_1 = 1.191\ 042\ 7 \times 10^{-5} \text{ mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-4})$ ,  $C_2 = 1.438\ 775\ 2 \text{ cm} \cdot \text{k}$ ,  $v_c$

为地面定标得到的红外通道中心波数,存放于文件属性“Emissive\_Centroid\_Wave\_Number”中,详见表 2.

表 2 红外通道中心波数

Table 2 Centroid Wave Number of infrared channels

通道	中心波数/cm <sup>-1</sup>
B3	2 699.119 000 0
B4	923.427 053 0
B5	830.241 775 0

$$T_{BB} = \frac{T_{BB}^* - A}{B}, \quad (7)$$

式中,  $T_{BB}$  为等效黑体温度,  $A$ 、 $B$  为常数, 每个红外通道有一组, 存放于文件属性“Emissive\_BT\_Coefficients”中, 详见表 3.

表 3 红外通道亮温订正系数

Table 3 Correction coefficients of infrared channel brightness temperature

通道	$A$	$B$
B3	2.058 07	0.982 317
B4	0.200 025	0.997 917
B5	0.131 499	0.998 205

由于地球曲率和 VIRR 传感器对地扫描张角的影响, 卫星影像存在“临边变暗”现象, 本研究采用 NESDIS 的全球拼图业务系统经验公式进行校正, 即

$$T = T_b + (e^{0.00012\theta^2} - 1.0) \times (0.107 2T_b - 26.81), \quad (8)$$

式中  $T$  为订正后亮温;  $T_b$  为卫星观测的亮温;  $\theta$  为卫星天顶角.

## 2.2 现场实测数据

现场实测数据采用定点浮标海上长时间序列连续观测方式获取, 主要数据获取指标见表 4.

表 4 实测数据指标

Table 4 Statistics of field measurements

指标项	指标内容
实测站位数	5 个
测量深度	海面以下 0.5 ~ 1 m
采样频率	昼夜不间断, 小时整点采样
时间跨度	2008-01-01 ~ 2009-12-31
数据内容	采样的日期时间、平均风速与风向、气温、湿度、水温、气压及地理经纬度

## 2.3 数据匹配及质量控制

卫星影像数据云检测采用 NOAA/AVHRR 成熟的 CLAVR-1 方法<sup>[15]</sup>, 该检测方法具有全球区域的普适性; 考虑到卫星影像中“邻近效应”的影响, 提取 VIRR 热红外通道影像数据中相应观测点周围

3 × 3 像元区块的均值作为该点的有效数据值, 剔除区域内亮温低于 273 K 及大于一个标准差的可能云(海冰)污染数据样点, 保证区域内探测值的均一性, 所得数据构成卫星观测数据集.

现场实测数据为现场连续观测数据, 按时间序列温度渐变, 据此采用“毛刺”剔除处理数据序列中的奇异点值, 构成现场实测数据集.

将卫星观测数据集与现场实测数据集在一定时空分辨率下进行匹配, 由于实测数据为小时整点采样, 匹配数据对的卫星过顶时间与实测数据采样时间差值均优于 30 min, 最大限度保证了匹配数据对的时空同步, 最终得到质量控制后匹配数据 347 组, 构成匹配数据集.

## 2.4 精度评价方法

匹配数据集中 2008 年 5 月至 2009 年 5 月数据用于算法建立, 剩余数据用于算法的精度评价, 这样既保证了建模数据涵盖了一整年中海洋气象状态的变化, 又剩余足够的数据用于模型精度的检验. 精度评价采用模型 SST 反演结果值与现场实测海温数据比对方式获取精度评价和误差统计, 如式(9).

$$\Delta\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^n |T_{ji} - T_{ci}|}{n}, \quad (9)$$

式中  $T_{ci}$ 、 $T_{ji}$  分别为验证数据中第  $i$  个匹配数据对的现场实测海温值和模型 SST 反演结果值; 为反演算法的平均误差.

## 3 业务化算法的建立

### 3.1 业务化算法(NMEMC\_SST<sub>FY-3A</sub>)

鉴于 FY-3A/VIRR 与 NOAA-9/AVHRR 热红外通道谱段设置基本相同, 两传感器对应的热红外波段光谱响应趋于一致, 有效波长均分别位于 10.8 μm 和 12.0 μm 左右, 因而, 可以采用式(2)模型基于大量实测数据重新拟合算法参数, 建立 FY-3A/VIRR NLSST 反演模型, 运用两个分裂窗通道亮温差进行大气校正, 剔除大气衰减的影响. 模型中初始估测温度场  $T_{sc}$  可用 MCSST 算法值替代<sup>[4]</sup>, 因而首先需基于实测数据获取 VIRR MCSST 模型系数, 将 MCSST 算法获取的温度场作为 NLSST 算法的初始估测温度, 即:

$$\begin{aligned} \text{NLSST} = & A_1 * T_{11} + A_2 * (\text{MCSST}) * (T_{11} - \\ & T_{12}) + A_3 * (T_{11} - T_{12}) * (\sec\theta - 1) \\ & + A_4 \end{aligned} \quad (10)$$

利用匹配数据集中 2008 年 5 月至 2009 年 5

月数据 192 组用于 FY-3A 海表温度反演算法的建立,因此,对于式(10),NLSST 即为现场实测数据; $T_{11}$ ,  $T_{12}$ 可由 FY-3A 卫星扫描辐射计定标参数经辐射校正计算获取.采用多元线性回归分析方法获取模型参数值,如图 1 所示,拟合残差分布如图 2 所示.

多元线性回归结果显示,线性关系明显, $R^2$  达到 0.98.

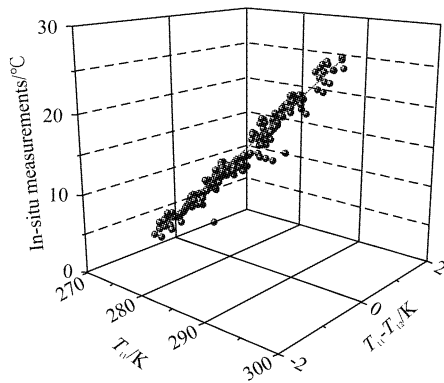


图 1 多元线性回归分析散点图  
Fig. 1 Scatter plot of multi-linear regression

### 3.2 NMEMC\_SST<sub>FY-3A</sub> 业务化算法实际应用

将新建立的算法模型应用于成像状况良好的三景 FY-3A/VIRR 影像数据,数据范围包括渤海及黄海大部分区域.卫星影像数据首先经“邻边变暗”校正处理,纠正地球曲率及扫描张角对图像边缘部分的影响;而后进行图像拼接,并以覆盖研究区域的矢量图层文件进行掩膜与裁切处理,得到研究区海域影像数据;经去云处理后应用 NMEMC\_SST<sub>FY-3A</sub> 业务化算法计算海表温度并制图输出.获取的海表温度分布见图 3.图 3(a)~(c)为 2009 年 5 月连续三天的 SST 分布,图 3(d)为三天海表温度融合的 SST 产品.

由图 3 可见,研究区域内温度整体分布连续且

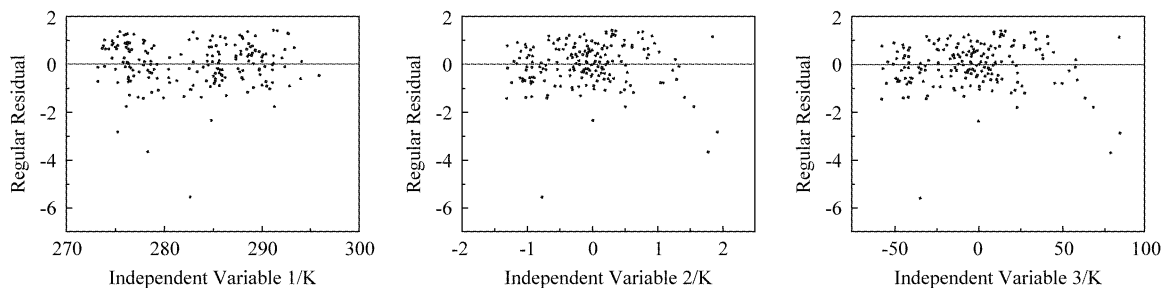
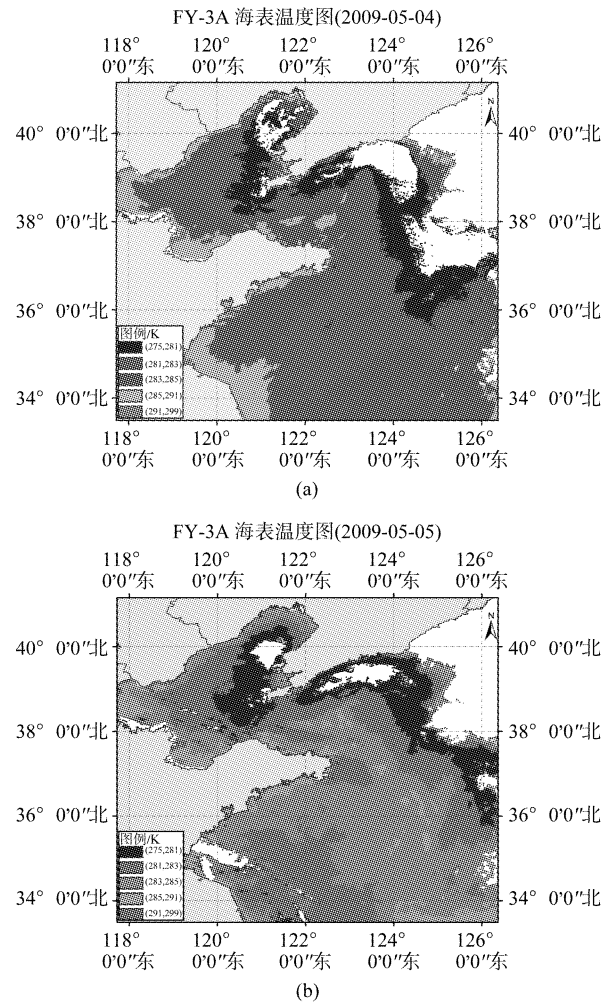


图 2 拟合残差分布图  
Fig. 2 Distribution plot of multi-linear regression regular residual



有层次,自近岸向远海温度渐低,受太阳辐射影响,温度分布大致呈现自南向北递减的态势.此时,海温分布由冬季模式逐渐转为夏季模式,暖水舌自南黄海经北黄海直指渤海海峡,其影响范围涉及黄海大部海域,表现出典型夏季模式温度特征,与黄大吉等<sup>[16]</sup>研究相符.

### 4 模型精度评价

将得到的 NMEMC\_SST<sub>FY-3A</sub> 业务化算法应用于

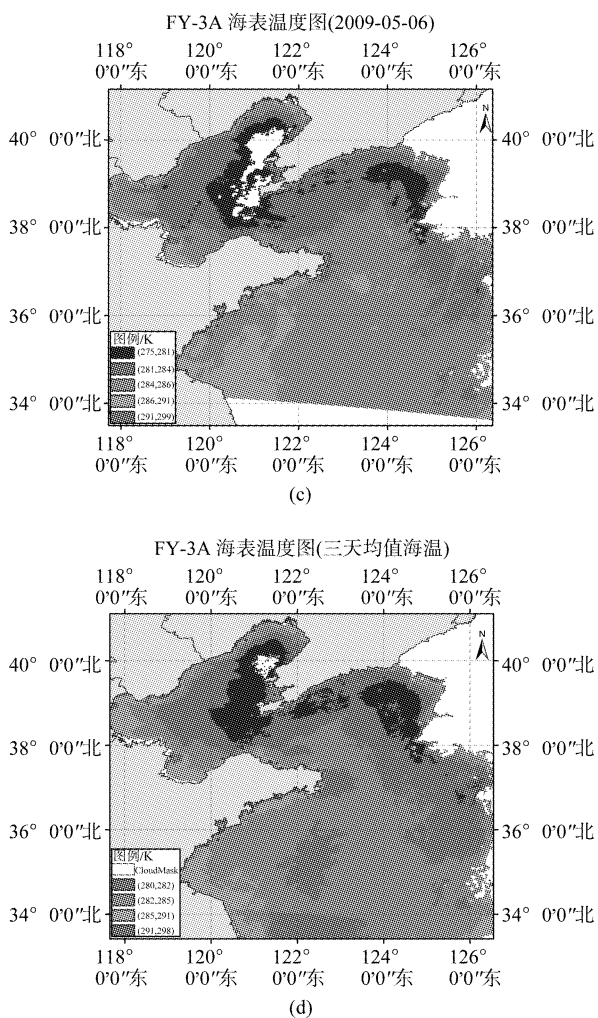


图3 FY-3A VIRR 海表温度反演结果  
Fig. 3 SST distribution retrieved from FY3A VIRR data

2009年6月至12月匹配数据(共155组)的SST反演,并以对应匹配的现场实测数据为真值进行独立样本的精度检验,对比散点图如图4所示。

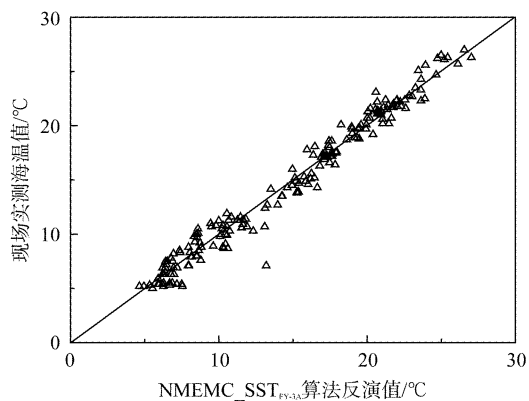


图4 算法反演值与实测值对比散点图  
Fig. 4 Scatter plot of SST retrieval and in-situ measurements

由图4可见,二者线性关系良好, $R^2$ 达到0.97,总体误差在 $\pm 2$  °C左右,极少数样点误差值较大,详见表5。绝对误差及相对误差分布情况见图5和图6。根据统计分析结果可知:绝对误差值优于1 °C的样本占73%,误差 $> 2$  °C的样本仅占4%,模型平均误差约为0.78 °C,相对误差整体介于 $\pm 8\%$ 之间。

造成上述模型反演结果出现误差的原因很多。首先,是薄云的影响,Simpson等<sup>[17]</sup>研究指出,云是海表温度反演的主要误差源,薄云的检测也是云检测中的热点与难点,不完全的云检测引起部分像元

表5 反演结果误差统计表  
Table 5 Error statistics of retrieval results

算法	误差分布		
	均值/°C	最小值/°C	标准差
NMEMC_SST <sub>FY-3A</sub>	0.78	0.015	0.676 73
业务化算法			

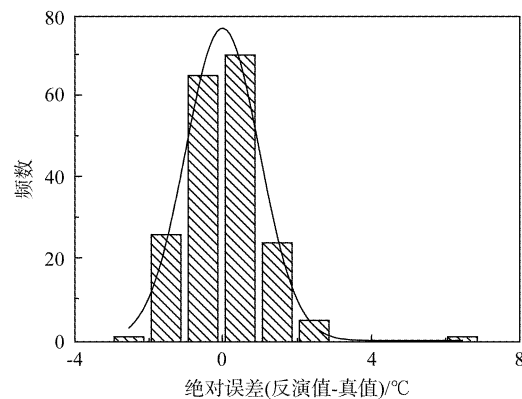


图5 绝对误差分布图  
Fig. 5 Plot of absolute error distribution

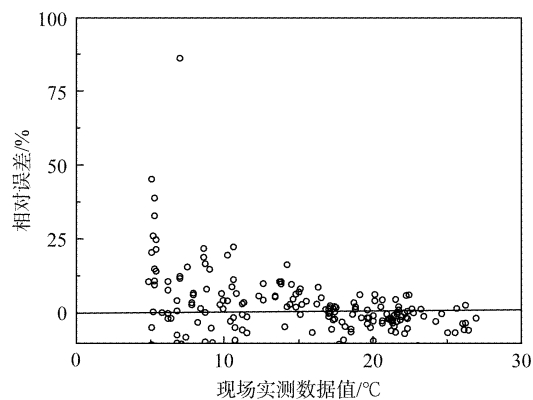


图6 相对误差分布图  
Fig. 6 Plot of relative error distribution

为薄云所覆盖,形成混合像元,导致温度反演结果不能准确反映下垫面海水的真实情况,与实测数据产生较大差值;毛志华等<sup>[18]</sup>研究也发现,在遥感

海表温度业务运行系统中,造成较大误差的主要因素是云.其次,海表温度受风速、云量、海况、昼夜等因素影响极大<sup>[19-20]</sup>.最后,面状的反演结果与点状验证数据之间的“尺度效应”无疑也影响了精度.这些都是海温研究的深入方向.

## 5 结论

基于 FY-3A/VIRR 卫星数据与现场同步长时间序列定点观测数据建立 FY-3A/VIRR 数据 SST 反演的局地业务化分裂窗算法 NMEMC\_SST<sub>FY-3A</sub>,实现了由卫星观测数据到海洋体温(Bulk Temperature)(约海表面以下 0.5~1.0 m 海水温度)的定量转换,将该算法应用于渤海与黄海海温反演的实际应用,精度检验表明,NMEMC\_SST<sub>FY-3A</sub>算法精度为 0.78 °C,符合海表温度业务化应用的精度要求.然而,算法的验证还存在一定不足,需要更加充足的现场实测数据佐证来增强算法模型的稳定性.另外,本研究仅根据渤海及黄海北部的海况建立局地的海表温度算法,应扩大研究区域,增加算法普适性.这两点在未来的研究将予以关注.

致谢:感谢国家卫星气象中心提供 FY-3A 卫星数据资料.

## REFERENCES

- [1] LIU Liang-Ming, ZHOU Jun-Yuan. Using MODIS imagery to map sea surface temperature[J]. *Geospatial Information* (刘良明,周军元. MODIS 数据的海洋表面温度反演. *地理空间信息*), 2006, **4**(2): 7-9.
- [2] YANG Jun, DONG Chao-Hua, LU Nai-Meng, et al. *Products and application of the new generation of the polar orbit meteorological FY satellite*[M]. Beijing: Science Press (杨军,董超华,卢乃锰,等. 新一代风云极轨气象卫星业务产品及应用). 科学出版社, 2010: 42.
- [3] McMillin L M. Estimation of sea surface temperature from two infrared window measurements with different absorption [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, **80**(36): 5113-5117.
- [4] Li X F, Pichel W G, Maturi E, et al. Deriving the operational nonlinear multi-channel sea surface temperature algorithm coefficients for NOAA-15 AVHRR/3[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, **22**(4): 699-704.
- [5] Li X F, Pichel W, Clemente-Colon P, et al. Validation of coastal sea and lake surface temperature measurements derived from NOAA/AVHRR data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, **22**(7): 1285-1303.
- [6] 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.
- [7] Pichel W G. Operational production of multichannel sea surface temperatures from NOAA polar satellite AVHRR data [J]. *Global and Planetary Change*, 1991, **4**(1-3): 173-177.
- [8] Walton C C, Pichel W G, Sapper J F, et al. The development and operational application of non-linear 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] Becker F, Li Z L. Toward a local split window method over land surface[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, **11**(3): 369-393.
- [10] Sobrino J A, Coll C, Caselles V. Atmospheric corrections for land surface temperature using AVHRR channel 4 and 5 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, **38**(1): 19-34.
- [11] Coll C, Caselles V, Sobrino J A, et al. On the atmospheric dependence of the split-window equation for land surface temperature[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, **15**(1): 105-122.
- [12] Wan Z M, Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space[J]. *Geoscience and Remote Sensing*, 1996, **34**(4): 892-905.
- [13] Qin Z H, Dall'oimo G, Karnieli A, et al. Derivation of split window algorithm and its sensitivity analysis for retrieving land surface temperature from NOAA-Advanced very high resolution radiometer data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**(D19): 22655-22670.
- [14] SUN Liang, SUN Rui, JIA Cheng-Gang, et al. A comparison of split-window algorithm to retrieve land surface temperature from MODIS data[J]. *Journal of Beijing University (Natural Science)* (孙亮,孙睿,贾成刚,等. MODIS 数据反演地表温度劈窗算法比较. *北京师范大学学报(自然科学版)*), 2008, **44**(4): 434-438.
- [15] Stowe L L, Davis P A, Mcclain E P. Scientific basis and initial evaluation of the CLAVR-1 global clear/cloud classification algorithm for the Advanced Very High Resolution Radiometer[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 1999, **16**(6): 656-681.
- [16] Huang D J, Su J L, Lu Z Y. Application of 3-D shelf model in the Bohai Sea II: seasonal change of temperature [J]. *Acta Oceanologica Sinica* (黄大吉,苏纪兰,陆宗镛. 三维陆架海模式在渤海中的应用 II. 温度的季节性变化. *海洋学报*), 1996, **18**(6): 8-17.
- [17] Simpson J J, Mcintire T J, Stitt J R, et al. Improved cloud detecting in AVHRR daytime and nighttime scenes over the ocean[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, **22**(13): 2585-2615.
- [18] MAO Zhi-Hua, ZHU Qian-Kun, PAN De-Lu. A temperature error control technology for an operational satellite application system [J]. *ACTA OCEANOLOGICA SINICA* (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. *海洋学报*), 2003, **25**(5): 49-57.
- [19] Brown J W, Brown O B, Evans R H. Calibration of advanced very high resolution radiometer infrared channels: a new approach to nonlinear correction[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, **98**(c10): 18257-18268.
- [20] Brown O B, Minnett P J. MODIS infrared sea surface temperature algorithm theoretical basis document [EB/OL]. [2012-06-08]. [http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/ocean\\_atbd.php](http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/ocean_atbd.php).