

HJ-1B 卫星海表温度定量反演业务化算法研究 ——以中国北部海区为例

王 祥^{1,2}, 赵冬至², 杨建洪², 赵 玲²

(1. 大连海事大学 环境科学与工程学院, 辽宁 大连 116026; 2. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023)

摘要: 利用中国 2008 年 9 月发射的自主 HJ-1B 卫星热红外遥感影像数据, 基于实测数据对已有海表温度反演的单窗算法进行了改进与简化, 重新订正了大气透射率和大气平均作用温度估算方程, 建立了基于实测数据验证的 HJ-1B 卫星海表温度定量反演业务化算法。将本算法与段四波等的改进算法用于实验海区海表温度的反演, 反演结果与卫星同步实测海温数据的对比表明: 本研究算法反演结果与现场同步实测海表温度平均误差约为 0.76℃, 段四波等改进算法反演结果平均误差约为 1.09℃。本算法为 HJ-1B 卫星海表温度产品的业务化应用提供了便捷可行的方案。

关键词: HJ-1B 卫星; 海表温度; 单窗算法

中图分类号: TP722.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2012)06-0072-06

海表温度 SST(sea surface temperature)即海洋水体表层一定深度内的温度。随着沿海地区海岸带开发和经济的迅速发展, 近岸水体热污染已成为备受关注的环境问题之一。遥感作为一门对地观测的综合性技术, 以其大尺度、实时性、低成本等特点越来越受到人们的青睐。

迄今, 大量遥感数据如 AVHRR、MODIS 等已广泛应用于全球海表温度遥感反演当中^[1-9], 并产出了一系列高质量的海表温度产品, 如 MODIS 的全球 SST 产品, AVHRR 的 SST 产品等。但公里级的空间分辨率限制了其在陆地水域及沿海近岸海域研究中的应用。中国于 2008 年 9 月成功发射环境与灾害监测预报小卫星星座 A、B 星(HJ-1A/1B 星), 极大增强了中国自主环境与灾害监测预报能力。卫星热红外通道 300 m 的空间分辨率使之适于小型水域的海表温度反演。

HJ-1B 卫星上搭载的红外多光谱相机(IRS)包含一个热红外通道, 谱段设置为 10.5 ~ 12.5 μm, 星下点空间分辨率为 300 m。由于仅有一个热红外通道, 因而不能像 MODIS 等卫星一样采用分裂窗或多通道算法^[10-13]来进行温度反演, 只能采用单通道温度反演方法, 致使相关温度反演算法研究极少。单通道温度算法以覃志豪针对 Landsat TM 提出的单窗算法^[14-15]和 Jiménez-Muñoz 及 Sobrino 的普适性单通道法^[16]最优。目前, 对 HJ-1B 卫星而言, 仅有段四波

等^[17]在覃志豪的单窗算法基础上, 利用 HJ-1B 模拟图像开展了仿真温度反演算法研究。段四波延用了覃志豪的单窗算法, 并针对 HJ-1B 热红外波段与 TM6 热红外波段光谱响应特性的差异, 对覃志豪单窗算法中的经验关系进行了重新计算, 得到了适用于 HJ-1B 卫星模拟数据的温度反演算法。段四波等的改进算法(为叙述方便, 以下均简称为“段等算法”)最大的不足是采用模拟图像, 而不是真实 HJ-1B 卫星影像数据, 并缺乏实测数据的验证, 难以用于业务化使用。

针对上述问题, 本文在卫星同步实测数据的基础上对段等算法精度进行检验, 并对 HJ-1B 卫星海表温度反演的单窗算法进行修订和简化, 建立基于卫星同步实测数据的 HJ-1B 卫星海表温度定量反演业务化算法和算法流程。

1 材料与方 法

1.1 研究区域

本研究以中国北方的渤海和北黄海海域为示范海区。渤海是中国的内海, 三面环陆, 在辽宁、河北、

收稿日期: 2010-11-18; 修回日期: 2012-02-21

基金项目: 国家海洋局海洋环境业务创新计划(课题号: 908wy01); 908 专项(课题号: 908-02-03-01)

作者简介: 王祥(1984-), 男, 山东省潍坊市人, 博士研究生, 目前主要从事海洋环境遥感方向研究, 电话: 13478968936, E-mail: wx841225@163.com; 赵冬至, 通信作者, E-mail: dzzhao@nmemc.gov.cn

山东、天津三省一市之间,面积约 7.8 万 km²,平均水深 25 m,为中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℃左右,8 月达 21℃。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 万 km²,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 -2~6℃,南北温差达 8℃;8 月最高,平均气温全海区约为 25~27℃。

1.2 现场实测海温数据

现场实测海温数据采用海上定点连续观测方式获取,为海面下 1 m 以内的水体温度的整点取值。时间跨度为 2008 年 1 月 1 日到 2009 年 12 月 31 日,数据内容包含样点的经纬度、气温、风速、气压及水温等信息,与卫星过顶时间最大时间差值小于 30 min,最大限度保证了实测数据获取的同步性。表 1

表 1 同步数据时间对应表

Tab. 1 Time table of synchronized data

卫星过顶时间	实测数据时间
2008-09-13 T03:04:24	2008-09-13 T03:00:00
2008-10-25 T02:47:27	2008-10-25 T03:00:00
2008-11-02 T02:54:31	2008-11-02 T03:00:00
2008-11-10 T03:00:58	2008-11-10 T03:00:00
2008-11-25 T02:47:26	2008-11-25 T03:00:00
2008-12-02 T02:28:42	2008-12-02 T02:00:00
2009-02-07 T02:54:57	2009-02-07 T03:00:00
2009-03-06 T02:51:49	2009-03-06 T03:00:00
2009-03-17 T02:35:39	2009-03-17 T03:00:00
2009-03-25 T02:41:39	2009-03-25 T03:00:00
2009-03-26 T03:06:49	2009-03-26 T03:00:00
2009-03-29 T02:44:39	2009-03-29 T03:00:00
2009-04-10 T02:53:07	2009-04-10 T03:00:00
2009-04-14 T02:56:36	2009-04-14 T03:00:00
2009-04-17 T02:34:25	2009-04-17 T03:00:00
2009-04-22 T03:02:33	2009-04-22 T03:00:00
2009-05-06 T02:24:01	2009-05-06 T02:00:00
2009-05-18 T02:32:48	2009-05-18 T03:00:00
2009-05-27 T03:03:45	2009-05-27 T03:00:00
2009-06-03 T02:44:40	2009-06-03 T03:00:00
2009-07-04 T02:42:22	2009-07-04 T03:00:00
2009-08-12 T02:46:22	2009-08-12 T03:00:00
2009-08-16 T02:48:52	2009-08-16 T03:00:00
2009-10-21 T02:46:20	2009-10-21 T03:00:00
2009-11-06 T02:57:28	2009-11-06 T03:00:00
2009-11-22 T03:07:50	2009-11-22 T03:00:00
2009-11-29 T02:48:55	2009-11-29 T03:00:00
2009-12-19 T03:02:30	2009-12-19 T03:00:00
2009-12-23 T03:05:11	2009-12-23 T03:00:00

为 29 组匹配数据的现场实测数据采集时间与卫星过顶时间对应情况。

1.3 HJ-1B 卫星遥感影像数据

搜集覆盖实验海区 2008 年 9 月卫星发射至 2009 年 12 月的无云晴空 HJ-1B 卫星 IRS 数据共 59 景,经与现场实测数据时间、坐标位置匹配,共获匹配数据 29 对。对匹配的卫星影像数据逐景预处理,其中几何校正采用研究区地理底图,保证校正精度在 1 个像元以内;大气校正是在 envi4.7 下完成;辐射校正采用中国资源卫星应用中心网站公布的“HJ-1 AB 在轨绝对辐射定标系数-2009”中的相关系数进行计算。

1.4 研究方法

本研究在段等算法的基础上,简化反演算法并应用 HJ-1B 卫星 IRS 数据和现场同步实测数据拟合算法中的参数值。将修订后算法预测值与现场实测海温数据和段等算法的海温反演预测值进行比对以验证修订后算法的精度。处理流程见图 1。

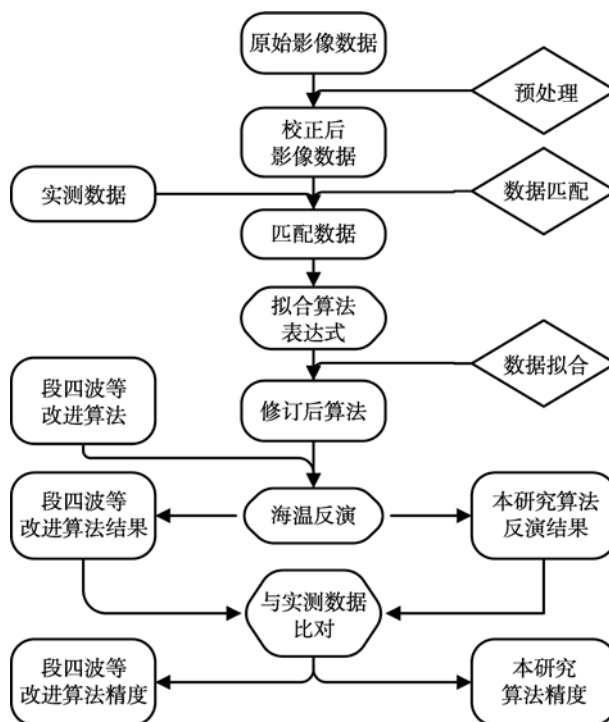


图 1 海表温度反演算法研究流程图

Fig. 1 Flow chart of SST retrieval algorithm

2 反演算法建立的基础

段四波等利用 HJ-1B 模拟图像并基于覃志豪的单窗算法提出了适用于 HJ-1B 热红外通道温度反演

的改进算法,这是本研究 HJ-1B 卫星海表温度定量反演业务化算法建立的基础。覃志豪的单窗算法是在大气辐射传输能量平衡方程(见式(1))的基础上针对 TM 只有一个热红外波段提出的温度反演算法,算法温度反演的绝对误差小于 0.4°C ^[14],算法表达式见式(2)。覃志豪在其文献[18]中给出了算法中各参数的估算方程式。

$$B(T_i) = \varepsilon\tau B(T_s) + (1-\tau)[1 + \tau(1-\varepsilon)]B(T_a) \quad (1)$$

式中, $B(T_i)$ 、 $B(T_s)$ 、 $B(T_a)$ 分别为传感器热红外通道接收的辐射强度、温度为 T_s 的黑体发射辐射强度和大气平均作用温度下的等效辐射强度; ε 、 τ 分别为热红外通道的地物辐射率和大气透射率。

$$T_s = [a_6(1-C_6-D_6) + [b_6(1-C_6-D_6) + C_6 + D_6]T_6 - D_6T_a] / C_6 \quad (2)$$

其中, $C_6 = \tau_6\varepsilon_6 \quad (3)$

$$D_6 = (1-\tau_6)[1 + \tau_6(1-\varepsilon_6)] \quad (4)$$

式中, T_s 为地表真实温度; a_6 、 b_6 为常量; ε_6 、 τ_6 为 TM 热红外波段地表辐射率和大气透射率; T_a 为大气平均作用温度; T_6 为 TM 热红外通道的星上亮温。

虽然 HJ-1B 卫星热红外波段与 TM6 谱段设置基本相同,但二者通道响应函数存在显著差别,见图 2。因而,段四波等在覃志豪单窗算法的基础上,根据 HJ-1B 卫星热红外通道光谱响应特性进行了算法的改进,包括系数 a 、 b 值的订正、大气透射率估算方程及大气平均作用温度估算方程的修订,详见文献[17]。

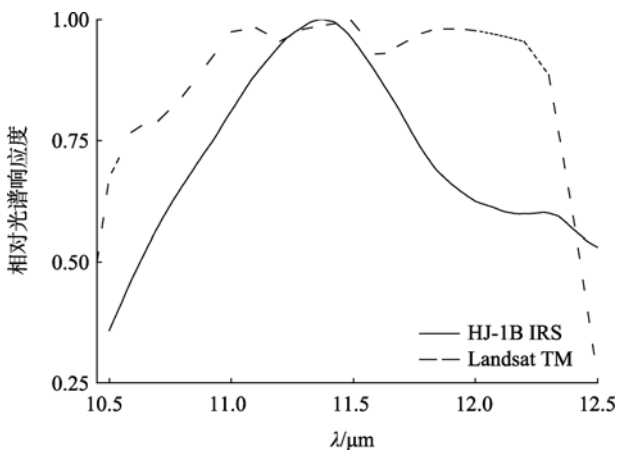


图 2 HJ-1B 与 Landsat TM 热红外通道光谱响应
Fig. 2 Spectral response function of HJ-1B and Landsat TM

3 反演模型的建立

本研究对段四波等算法的改进主要包括两部分:

对单通道温度反演算法的简化和以实测海温数据对大气透射率及大气平均作用温度估算方程的修订。

3.1 单通道温度反演算法的简化

现有单通道温度反演算法多以 Planck 方程(见式(5))实现辐射强度 $B_\lambda(T)$ 与热力学温度 T 之间的转化计算,计算过程的中间参数 h 、 c 、 λ 、 K 、 T 多达 5 个,计算过程中换算极为繁琐。毛克彪等^[9]在应用 MODIS 数据进行环渤海地区温度反演研究时利用 Planck 方程在一定温度范围内线性化特征明显的特点,对 Planck 方程进行了简化,将复杂的指数关系变为简单的 $B_\lambda(T)$ 与 T 的线性关系,从而实现了算法表达式的简化。借鉴该思路,针对 Planck 方程式建立 273~323 K 温度范围内 HJ-1B IRS 热红外通道 T 与 $B(T)$ 关系的散点图,见图 3。由于通道光谱响应函数和波宽对温度反演结果有较大的影响,公式中波长 λ 以有效波长替代中心波长进行计算,即采用 $\lambda=11.511 \mu\text{m}$ ^[19]。

$$B_\lambda(T) = \frac{hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (5)$$

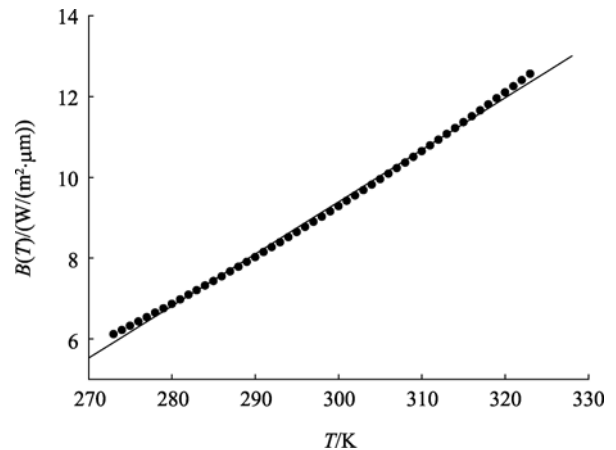


图 3 HJ-1B 热红外通道温度与辐射强度关系散点图
Fig. 3 Plot of T and corresponding $B(T)$ of HJ-1B thermal Infrared channel

由图 3 可见, T 与 $B(T)$ 线性关系明显,由 OriginPro7.5 得到二者线性拟合关系如式(6)。因而,就将原来复杂的多参数计算公式简化为线性关系显著仅包含 $B(T)$ 与 T 的线性方程式,在保证计算精度的前提下,公式得到了极大简化。

$$B(T) = 0.12889T - 29.27632 \quad (R=0.998) \quad (6)$$

将式(6)代入大气辐射传输方程式(1),经公式简化便得到单通道温度反演算法的简化形式如下:

$$T_s = \frac{B(T_8) - \varepsilon\tau b - (1-\tau)[1 + \tau(1-\varepsilon)]B(T_a)}{\varepsilon\tau a} \quad (7)$$

式中, ε , τ 分别为热红外通道海表发射率和大气透射率; $B(T_8)$ 为热红外通道的星上辐射强度; T_s 为海表温度; $B(T_a)$ 为有效大气平均作用温度对应的等效辐射强度; a , b 为 Planck 方程线性化常数, $a=0.12889$, $b=-29.27632$ 。

3.2 大气透射率及大气平均作用温度估算方程的修订

大气透射率估算方程和大气平均作用温度估算方程由覃志豪首先提出, 根据大气辐射传输软件 LOWTRAN 中提供的几种标准大气模式的详细剖面数据推导和建立了估算的线性方程式, 分别将 τ 和 T_a 表示为大气水汽含量 ω 和近地面气温 T_0 的线性函数,

$$T_s = \frac{B(T_8) - b\varepsilon(A + B\omega) - (1 - A - B\omega)[1 + (1 - \varepsilon)(A + B\omega)][a(C + DT_0) + b]}{a\varepsilon(A + B\omega)} \quad (9)$$

其次, 应用多组已知和实测数据对, 数据内容包括 T_s , ε , T_0 , ω 及系数 a 和 b , 代入上述四元方程式。其中 $\varepsilon=0.96^{[20]}$, ω 采用 MODIS 近红外水汽总量产品数据, 建立关于系数 A , B , C , D 的与 29 组实测数据对应的 29 组四元方程式。

最后, 对各组解的对应系数值分别取平均作为最后 τ 与 T_a 线性表达式的系数, 即可得到重新回归的大气透射率和大气平均作用温度的估算方程式。

3.3 HJ-1B 卫星海表温度定量反演业务化算法模型

基于以上对算法的简化和大气透射率及大气平均作用温度估算方程的重新修订, 最终得到本研究的算法模型如下:

方便了模型参数的获取。段四波等基于覃志豪的推导, 依据 TIGR(thermodynamic initial guess retrieval)数据中选取的 1 413 条大气廓线数据, 在大气辐射传输模拟软件 MODTRAN4 中重新修订了估算表达式。但上述两种方法都是基于标准大气模式下的数据, 缺乏实测数据验证。因而, 本研究基于实测数据对标准大气模式下建立的大气透射率和大气平均作用温度估算方程的系数进行重新回归。

首先, 将分别以 ω 和 T_0 表示的 τ 和 T_a 的线性表达式(式(8))及式(6)代入式(7), 建立 T_s 与 ω , T_0 的关于系数 A , B , C , D 的四元方程式, 如式(9)。

$$\begin{cases} \tau = A + B\omega \\ T_a = C + DT_0 \end{cases} \quad (8)$$

$$T_s = \frac{B(T_r) - \varepsilon\tau b - (1 - \tau)[1 + \tau(1 - \varepsilon)]B(T_a)}{\varepsilon\tau a} \quad (10)$$

其中, $B(T_i) = aT_i + b$, $(i=r, a)$ (11)

$$\begin{cases} \tau = A + B\omega \\ T_a = C + DT_0 \end{cases} \quad (12)$$

4 精度评价

将建立的 HJ-1B 卫星海表温度定量反演业务化算法模型应用于中国北部示范海区的海表温度反演。本研究算法温度反演预测值分别与同步实测海温数据及相同输入数据下的段等算法的反演结果预测值进行对比, 以验证算法精度。如下, 图 4 为两种算法预测值与现场同步实测值的对比图; 图 5 为两

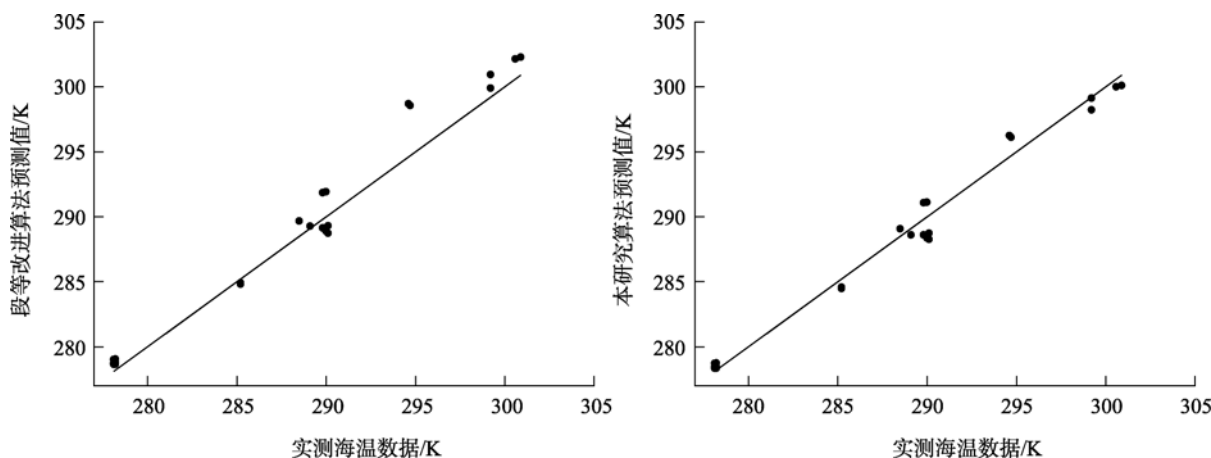


图 4 预测值与实测海温数据对比图

Fig. 4 Plot of SST retrieval and In-situ measurements

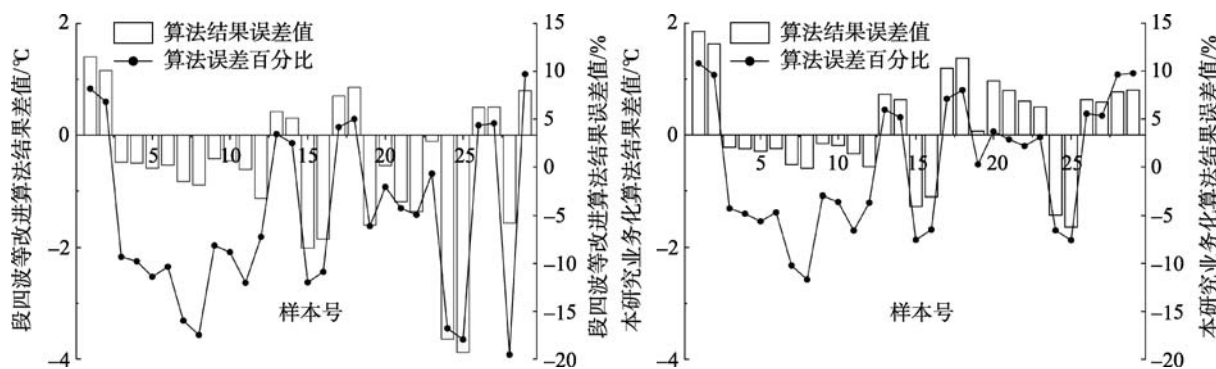


图5 预测值差值与误差百分比对比图

Fig. 5 Error plot of SST retrieval compared with In-situ measurements

种算法预测值与实测值差值及误差百分比对比图。

验证结果表明：段等算法的预测值平均误差约为 1.09°C ，本研究算法预测值平均误差约为 0.76°C 。其中，由图4分析得出，本研究算法和段等算法的预测值与实测海温数据的相关系数分别为 0.99324 和 0.98971，标准差分别为 0.936 24 和 1.243 6。不难看出，前者反演结果值域更加收敛和贴近实测海温数据。图5中，本研究算法各样点误差波动较段等算法结果值更为平缓，二者误差波动均值分别为 0.76°C 和 1.09°C ，同时将算法反演最大误差由 3.88°C 降为 1.89°C ，显示了良好的误差均衡能力。从误差百分比曲线可明显看出，本研究算法反演结果误差百分比介于 0.25% 到 11.68%，且大部分样本点误差集中在 5.8% 左右，大大低于段等算法的 0.69% 到 19.54% 的误差范围。

如上所述，预测值与实测值存在的差异是由多种因素影响造成的，主要包含以下几个方面：(1)传感器本身精度及辐射定标系数所能达到的定标精度。HJ-1B IRS 热红外波段的星上定标精度为 2 K，配准精度为 ± 0.3 个像元，本身存在一定误差。(2)大气校正问题。云污染尤其是薄云污染在很多情况下很难完全去除，不完全的云检测及云补偿则会明显的降低温度反演精度。(3)卫星测量与现场测量的差异。卫星遥感探测所得到的海面温度只代表海面表皮以下厚度小于 0.1 mm 的海水温度，而现场测量则多为海洋 0~0.5 m 深的一个点值，二者必然存在温度差值。(4)模型参数误差。模型采用 MODIS 的 8d 平均水汽产品数据作为模型参数，由于其与环境星过顶时间存在差异，参数存在一定误差。

5 结语

本文在已有 HJ-1B 热红外通道海表温度仿真算

法基础上进行改进，提出了基于现场实测数据的 HJ-1B 卫星海表温度定量反演业务化算法模型，并将其应用于实际的海表温度反演研究，与同步实测海温数据和原算法的反演结果对比显示：本业务化算法海温反演精度小于 0.76°C ，比改进前精度提高近 0.33°C ，且反演误差能够控制在 11.68% 以内。同时本算法海表温度的计算参数均可实时获取，展示了良好的可用性。

但限于 HJ-1B 卫星发射时间较短，能够匹配的实测数据相对较少，还需不断积累。加之，模型输入参数中的水汽含量及大气平均作用温度往往季节性、区域性差异较大，以标准大气模式或某一区域的模型替代，不可避免的会引入了较大的误差。因此，新的反演模型的研发或以大量实测数据为基础对较为稳定的反演模型的不断修订是今后业务化应用研究中的重点。

致谢：感谢国家海洋环境监测中心海洋遥感室陈艳艳助理研究员及文世勇博士等在论文写作过程中给予的巨大帮助。感谢编审专家给予的宝贵意见。

参考文献：

- [1] McIlain L M. Estimation of sea surface temperature from two infrared window measurements with different absorptions[J]. J Geophys Res, 1975, 20: 5113-5117.
- [2] McClain E P, Pichel W G, Wlton C C. Comparative performance of Avhrr-based multi-channel sea surface temperature[J]. J Geophys Res, 1985, 20: 11587-11601.
- [3] Franca G B, Cracknell A P. Retrieval of land and sea surface temperature using NOAA-11 AVHRR data in north-eastern Brazil[J]. Int J Remote Sensing, 1994, 15(8): 1695-1712.
- [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 satel-

- lites[J]. *J Geophys Res*, 1998, 103: 27999-28012.
- [5] 张春桂, 张星, 曾银东, 等. 台湾海峡海表面温度的遥感反演及精度检验[J]. *海洋学报*, 2008, 30(2): 153-160.
- [6] 朱利, 顾行发, 王桥, 等. 我国东海海面温度定量遥感反演研究[J]. *遥感技术与应用*, 2008, 23(5): 495-499.
- [7] 刘良明, 周军元. MODIS 数据的海洋表面温度反演[J]. *地理空间信息*, 2006, 4(2): 7-9.
- [8] Niclos R, Caselles V, Coll C, et al. Determination of sea surface temperature at large observation angles using an angular and emissivity-dependent split-window equation[J]. *Remote Sens Environ*, 2007, 111: 107-121.
- [9] 毛克彪, 覃志豪, 刘伟. 用 MODIS 影像和单窗算法反演环渤海地区的地表温度[J]. *测绘与空间地理信息*, 2004, 27(6): 23-25.
- [10] Qin Z, Giorgio D O, Arnon K. Derivation of split window algorithm AVHRR data[J]. *J Geophys Res*, 2001, 106: 22655-22670.
- [11] 毛克彪, 覃志豪, 施建成, 等. 针对 MODIS 影像的劈窗算法研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2005, 30(8): 703-708.
- [12] Barton I J, Zavody A M, Orien D M. Theoretical Algorithms for satellite-derived sea surface temperatures[J]. *J Geophys Res*, 1989, 93: 3365-3375.
- [13] Qin Z, A Karnieli, P Berliner. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region[J]. *Int J Remote Sensing*, 2001, 22(18): 3719-3746.
- [14] 覃志豪, Zhang M H, Karnieli A, et al. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法[J]. *地理学报*, 2001, 4(56): 456-466.
- [15] Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data[J]. *J Geophys Res*, 2003, 108 (doi:10.1029/2003JD003480).
- [16] 段四波, 阎广建, 钱永刚, 等. 利用 HJ-1B 模拟数据反演地表温度的两种单通道算法[J]. *自然科学进展*, 2008, 9(18): 1001-1008.
- [17] 覃志豪, Li W J, Zhang M H, et al. 单窗算法的大气参数估计方法[J]. *国土资源遥感*, 2003, 2: 37-43.
- [18] 刘三超, 柳钦火, 高懋芳, 等. 波谱响应函数和波宽对地表温度反演的影响[J]. *遥感信息*, 2007(5): 3-6.
- [19] 赵慧. 热红外遥感影像中温度信息的提取研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [20] 杜勇, 吕红民, 董申甫, 等. 青岛近海表皮温度和表层温度之差的观测及模糊数学分析[J]. *海洋与湖沼*, 1999, 30(1): 81-87.

Quantitative and operational algorithm for retrieving sea surface temperature from HJ-1B data——with Northern Sea of China as example

WANG Xiang^{1,2}, ZHAO Dong-zhi², YANG Jian-hong², ZHAO Ling²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. National Marine Environment Monitoring Center, Dalian 116023, China)

Received: Nov., 18, 2010

Key words: HJ-1B; sea surface temperature (SST); mono-window algorithm

Abstract: Satellite operational data products play an important role in applications of remote sensing. Using the thermal images acquired by HJ-1B launched in September 2008 and the near-real time measured data, we improved the Mono-window Algorithm and the equations to estimate the transmittance and atmospheric average temperature for sea surface temperature (SST) retrieval from HJ-1B images. Accordingly, a new quantitative and operational algorithm was proposed. The new algorithm was compared with Duan's algorithm in accuracy of SST retrieval in the experimental regions. The comparison indicated that the SST retrieved by the new algorithm was closer to the measured SST data in the experimental regions than that of Duan's one. For the new algorithm, average error of the retrieved SST was 0.76°C from the measured SST. As contrast, the error was 1.09°C for Duan's algorithm. Therefore it could be concluded that this research provided an applicable alternative for operationally generate the SST data products from the HJ-1B images.

(本文编辑: 刘珊珊)