

文章编号:1001-9014(2011)01-0061-07

用 HJ-1B 卫星数据反演地表温度的修正单通道算法

周纪^{1,2,3}, 李京^{2,3}, 赵祥², 占文凤^{2,3}, 郭建侠⁴

(1. 电子科技大学 地表空间信息技术研究所, 四川 成都 610054;

2. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

3. 北京师范大学 民政部/教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 4. 中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

摘要: 目前用于地表温度反演的单通道算法主要针对窄视场传感器建立. HJ-1B 卫星红外相机为宽视场传感器, 其热红外通道(IRS4)观测天顶角可达 $\pm 33^\circ$ 以上, 在地表温度反演时必须剔除传感器观测角度的影响. 以大气辐射传输模拟为基础, 建立了基于传感器观测天顶角-大气函数系数的修正单通道算法. 针对 HJ-1B 卫星与 Terra 卫星过境时间接近的特点, 提出将 MODIS 大气水汽含量产品作为单通道算法的输入参数, 并建立了观测天顶角-垂直与斜程大气水汽含量转换系数查找表. 基于对光谱数据的模拟, 给出了适用于 IRS4 通道的地表发射率确定方法. 验证结果表明, 修正单通道算法平均反演误差在 1.1K 以内, 比不考虑传感器观测角度的单通道算法精度提高 0.1~0.7K, 反演误差对于传感器观测天顶角依赖性减弱. 对实际 HJ-1B 卫星影像的应用结果表明, 修正单通道算法反演的地表温度与 MODIS 地表温度产品具有较好的一致性.

关键词: 地表温度; 单通道算法; 大气辐射传输模型; HJ-1B 卫星

中图分类号: TP732.2 **文献标识码:** A

A modified single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from HJ-1B satellite data

ZHOU Ji^{1,2,3}, LI Jing^{2,3}, ZHAO Xiang², ZHAN Wen-Feng^{2,3}, GUO Jian-Xia⁴

(1. Institute of Geo-Spatial Information Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;

2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs/Ministry of Education of China, Beijing 100875, China;

4. Meteorological Observation Center of China Meteorological Administration Beijing 100081, China State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The currently used single-channel algorithms for land surface temperature (LST) retrieval are mainly proposed for sensors with limited scopes. The coverage of the infrared camera (IRS) onboard HJ-1B satellite is broad, and the view zenith angle of IRS channel 4 can reach $\pm 33^\circ$. Therefore, the effects of view angle should be eliminated when retrieving LST with IRS4. Based on atmospheric radiative transfer simulation, this research explored a look-up table for view zenith angle (VZA)-coefficients of atmospheric functions and then proposed an improved single-channel algorithm for estimating LST from IRS4 images. According to the fact that the overpass time of HJ-1B and Terra are very close, the research investigated the possibility to integrate the water vapor provided by MODIS into the improved single-channel algorithm. In addition, this research proposed a practical routine to calculate the land surface emissivity of IRS4. Validation shows that the average absolute error of the improved algorithm is below 1.1K, which is about 0.1~0.7K lower than the algorithm without considering the view zenith angle. Application to the HJ-1B satellite imagery indicated that land surface temperatures retrieved with the improved algorithm are consistent with those provided by MODIS product.

Key words: land surface temperature; single-channel algorithm; atmospheric radiative transfer model; HJ-1B satellite

PACS: 95.75.Rs

收稿日期:2010-01-21, 修回日期:2010-12-18

Received date: 2010-01-21, revised date: 2010-12-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB714402); 国家高技术研究发展计划(2007AA120205, 2007AA120306); 遥感科学国家重点实验室开放基金(OFSLRSS201003); 中央高校基本科研业务费专项资金资助.

作者简介: 周纪(1983-), 男, 四川南充人, 主要研究领域为热红外遥感应用, E-mail: jzhou233@uestc.edu.cn.

引言

我国于 2008 年 9 月成功发射的“环境与灾害监测预报小卫星星座”的 B 星 (HJ-1B) 搭载了一台红外相机 (IRS), 其第 4 通道光谱范围为 10.5 ~ 12.5 μm, 星下点空间分辨率为 300m, 幅宽为 720km, 能在 96h 对全球覆盖一次, 在地表热辐射监测等领域具有较大的应用潜力. 在理论上, 可将目前针对 Landsat TM6 通道的单通道算法^[1-3]用于 IRS4 通道的地表温度 (Land surface temperature, LST) 反演, 如段四波等对用于 TM6 数据的单通道算法系数进行订正, 给出了针对 IRS4 数据的两个单通道算法^[4]. 但 IRS 为宽视场传感器, IRS4 通道最大观测天顶角 (View zenith angle, VZA) 可达到 ±33° 以上; TM 为窄视场传感器, TM6 通道最大观测天顶角仅 ±6°. 随着传感器观测天顶角增大, 地表热辐射传输的大气路径增加. 研究表明, 传感器观测角度是利用宽视场热红外影像反演 LST 不可忽略的因素^[5]. 因此, 在建立针对 IRS4 数据的单通道算法时, 必须考虑传感器观测角度的影响.

本文的主要目标在于给出针对 IRS4 数据的修正单通道算法, 以适应各种观测角度下的 LST 反演. 同时, 给出确定算法所需的大气水汽含量及地表发射率的具体方法. 这对于提高我国自主研发的环境小卫星的实际应用水平, 具有积极意义.

1 方法

1.1 单通道算法

卫星对地观测时, 热红外传感器获取的热辐射可用辐射传输方程描述^[6]:

$$L_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \tau_{\lambda} B(\lambda, T_s) + (1 - \varepsilon_{\lambda}) \tau_{\lambda} L_{\lambda}^{\downarrow} + L_{\lambda}^{\uparrow}, \quad (1)$$

式中, λ 为波长; L_{λ} 为星上辐亮度; ε_{λ} 为地表发射率; $B(\lambda, T_s)$ 为地表温度为 T_s 时地表黑体辐亮度; L_{λ}^{\downarrow} 、 L_{λ}^{\uparrow} 分别为大气下行辐射与上行辐射; τ_{λ} 为传感器观测路径上的大气透过率. 式(1)中除 LST 外, 其余参数均为波长的函数. 对于特定的热红外通道, 可用其光谱响应函数将各参数转化为通道积分值.

Jiménez-Muñoz 与 Sobrino^[2]提出的针对 TM6 数据的单通道算法, 在计算 LST 时, 仅需地表发射率、大气水汽含量 2 个参数, 在实际应用中相对简单. 因此, 本文主要基于 Jiménez-Muñoz 与 Sobrino 的单通道算法 (简称 JM&S 算法), 给出用于 IRS4 数据的修正算法. 在 JM&S 算法中, LST 的解析式为:

$$T_s = \gamma(\lambda, T_b) \{ \varepsilon_{\lambda}^{-1} [\psi_1(\lambda, w) L_{\lambda} + \psi_2(\lambda, w)] + \psi_3(\lambda, w) \} + \delta(\lambda, T_b), \quad (2)$$

式中, w 为大气水汽含量; γ 与 δ 通过将 Planck 函数进行泰勒展开得到; T_b 为亮温; ψ_1 、 ψ_2 、 ψ_3 为大气函数:

$$\psi_1(\lambda, w) = 1/\tau \quad , \quad (3)$$

$$\psi_2(\lambda, w) = -L_{\lambda}^{\downarrow} - L_{\lambda}^{\uparrow}/\tau \quad , \quad (4)$$

$$\psi_3(\lambda, w) = L_{\lambda}^{\uparrow} \quad . \quad (5)$$

1.2 基于查找表的单通道算法修正

ψ_1 、 ψ_2 与 ψ_3 可根据经验关系用大气水汽含量进行显式表达^[2-3]. 除特殊说明外, 下文中的大气水汽含量指垂直气柱大气水汽含量. 随着 VZA 增加, 观测路径上大气水汽含量增多. 因此, 利用大气水汽含量计算大气函数的表达式依赖于 VZA. 我们提出建立传感器观测天顶角-大气函数系数的查找表, 以修正单通道算法.

分析大气函数-大气水汽含量的经验关系需要以大规模的辐射传输模拟为基础. 选用 TIGR (Thermodynamic Initial Guess Retrieval) 大气廓线库 TIGR2000_v1.1^[7-8], 该版探空资料共有 2311 条廓线. 还选取了 MODTRAN4 提供的 6 条标准大气廓线, 包括亚北极夏季大气、亚北极冬季大气、中纬度夏季大气、中纬度冬季大气、热带大气及美国 1976 年标准大气. 将上述大气廓线输入 MODTRAN4 中, 模拟 IRS4 通道的星上辐亮度与各大气参数, 传感器观测天顶角设置为 0° ~ 35°, 变化步长为 5°.

对模拟结果分析表明, 大气函数可表示为大气水汽含量的二次函数:

$$\begin{bmatrix} \psi_1(\theta_v) \\ \psi_2(\theta_v) \\ \psi_3(\theta_v) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11}(\theta_v) & c_{12}(\theta_v) & c_{13}(\theta_v) \\ c_{21}(\theta_v) & c_{22}(\theta_v) & c_{23}(\theta_v) \\ c_{31}(\theta_v) & c_{32}(\theta_v) & c_{33}(\theta_v) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_0^2 \\ w_0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中, θ_v 为传感器观测天顶角; w_0 为大气水汽含量; c_{ij} 为系数, 见表 1.

1.3 大气水汽含量

获取大气水汽含量需要探空资料, 但在许多情况下与卫星同步的探空资料是缺乏的. 美国 Terra 卫星与 HJ-1B 卫星在白天的过境时间接近 (地方时 10:30 左右). Terra 卫星所搭载的中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 提供了白天的近红外大气水汽含量产品 MOD05_L2. 由于 MODIS 的幅宽达 2330km, 对于大多数地区而言, 将 MODIS 提供的大气水汽含量数据用于 IRS4 的 LST 反演中是可行的.

表 1 修正单通道算法的 VZA-大气函数系数查找表

Table 1 Look-up table of VZA-coefficients of atmospheric functions for the improved single-channel algorithm

VZA	c_{ij}	$i=1$	$i=2$	$i=3$
0°	$j=1$	0.0890	-0.6334	-0.0665
	$j=2$	-0.0571	-1.1559	1.6569
	$j=3$	1.0923	-0.2915	-0.1656
5°	$j=1$	0.0897	-0.6393	-0.0664
	$j=2$	-0.0587	-1.1438	1.6568
	$j=3$	1.0932	-0.2971	-0.1656
10°	$j=1$	0.0921	-0.6574	-0.0664
	$j=2$	-0.0636	-1.1068	1.6564
	$j=3$	1.0958	-0.3142	-0.1656
15°	$j=1$	0.0964	-0.6894	-0.0663
	$j=2$	-0.0724	-1.0402	1.6559
	$j=3$	1.1006	-0.3448	-0.1657
20°	$j=1$	0.1028	-0.7377	-0.0662
	$j=2$	-0.0860	-0.9381	1.6551
	$j=3$	1.1079	-0.3913	-0.1657
25°	$j=1$	0.1121	-0.8073	-0.0660
	$j=2$	-0.1062	-0.7862	1.6540
	$j=3$	1.1185	-0.4598	-0.1658
30°	$j=1$	0.1252	-0.9055	-0.0658
	$j=2$	-0.1359	-0.5653	1.6526
	$j=3$	1.1336	-0.5584	-0.1659
35°	$j=1$	0.1439	-1.0448	-0.0656
	$j=2$	-0.1799	-0.2387	1.6508
	$j=3$	1.1556	-0.7026	-0.1660

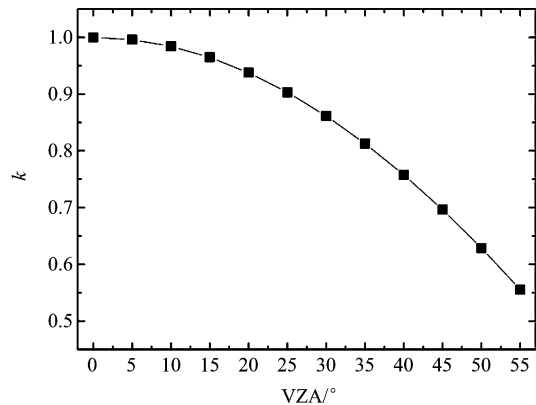


图 2 VZA-k 查找表图形表达

Fig. 2 Sketch map of the look-up table for VZA-k

模拟结果,发现斜程与垂直路径的大气水汽含量为严格的倍数关系:

$$w_0 = k_\theta w_\theta \quad (7)$$

式中, w_θ 为斜程大气水汽含量; θ 为传感器观测天顶角; k 为转换系数, 图 2 为 VZA-k 查找表的图形化表达.

1.4 地表发射率

地表发射率是反演 LST 所需的关键参数. 由于 HJ-1B 卫星搭载的两台多光谱相机 (CCD) 提供了地表反射信息, 可将广泛应用的 NDVI 阈值法^[12,13] 用于确定 IRS4 通道的地表发射率. 在 300m 尺度上, 将自然陆地地表分为植被、裸土及二者的混合像元是合理的. 在影像上抽样确定植被与裸土混合像元的 NDVI 上界 $NDVI_{max}$ 及下界 $NDVI_{min}$.

(1) 当 $NDVI > NDVI_{max}$ 时, 像元为植被像元, 将其发射率设定为植被发射率 ϵ_v .

(2) 当 $NDVI_{min} \leq NDVI \leq NDVI_{max}$ 时, 像元为植被与裸土的混合像元, 其发射率根据植被覆盖度计算:

$$\epsilon = \epsilon_v P_v + \epsilon_s (1 - P_v) + d\epsilon \quad (8)$$

式中, ϵ_v 、 ϵ_s 分别为茂密植被、裸土的发射率; P_v 为植被覆盖度; $d\epsilon$ 用于描述混合像元的几何结构与内部散射效应.

(3) 当 $NDVI < NDVI_{min}$ 时, 像元为裸土像元, 其发射率根据红光通道的反射率确定^[13]:

$$\epsilon = a\rho_R + b \quad (9)$$

式中, ρ_R 为 CCD 红光通道的地表反射率; a 与 b 为回归系数.

利用 Johns Hopkins University (JHU) 光谱库^[14] 提供的 25 条裸土光谱数据, 结合 HJ-1B 卫星 CCD1 与 CCD2 相关通道的光谱响应函数计算得到裸土的

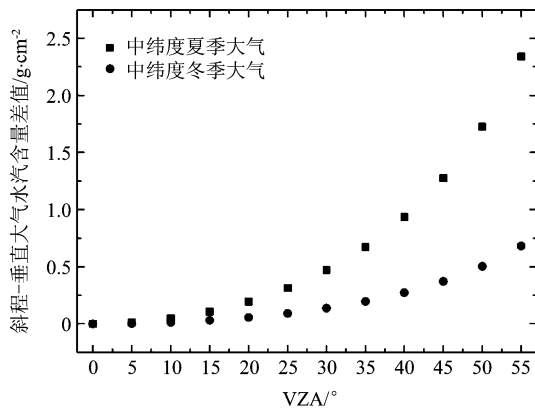


图 1 斜程与垂直路径大气水汽含量差值

Fig. 1 Differences between the water vapor contents under slant and nadir observations

MODIS 近红外大气水汽含量数据根据近红外通道的表观反射率计算得到, 其误差为 0.17 ~ 0.25 gcm^{-2} ^[9-11]. MODIS 观测天顶角可达到 $\pm 55^\circ$ 以上, 要将 MOD05_L2 产品用于 IRS4 通道的 LST 反演, 必须将斜程大气水汽含量转换为垂直气柱大气水汽含量, 否则将导致较大的误差 (图 1). 在假定大气水汽含量均匀分布的前提下, 基于 TIGR 廓线的

发射率和红光反射率,发现二者的在 0.02 水平上显著相关,相关系数分别为 0.482、0.484. 对于 CCD1 与 CCD2, a 分别取 -0.0274、-0.0273, b 分别取 0.9779、0.9779. 发射率的预报误差在 -0.006 ~ 0.006. 在 IRS4 通道,典型地物的地表发射率分别为:土壤 0.972,植被 0.983,水体 0.988.

2 算法验证与敏感性分析

2.1 算法验证

大气辐射传输模型产生的模拟数据能够有效验证 LST 反演算法的精度^[1]. 选用 6 种标准大气廓线,设定 3 种地表温度条件 (293.2K、303.2K、313.2K)、4 种地表发射率条件 (0.950、0.960、0.970、0.980)、8 种观测角度 (0° ~ 35°,步长为 5°),模拟 IRS4 通道的星上辐亮度. 上述标准大气的水汽含量分别为:亚北极夏季大气 2.081gcm⁻²,亚北极冬季大气 0.416gcm⁻²,中纬度夏季大气 2.922gcm⁻²,中纬度冬季大气 0.852gcm⁻²,美国 1976 年标准大气 1.461gcm⁻²,热带大气 4.115gcm⁻². 将星上辐亮度的模拟值等输入单通道算法中求解 LST,并将其与 LST 的输入值比较. 为便于对比,还按照段四波等提出的单通道算法 (简称原算法) 计算了 LST.

结果表明,当其他条件相同时,两种算法的精度均不依赖于发射率的数值. 表 2、表 3 分别为在不同观测天顶角情况下修正算法与原算法的平均绝对误差 (MAE) 与均方根误差 (RMSE). 在亚北极冬季和中纬度夏季大气条件下,修正算法在所有观测角度下的 MAE 与 RMSE 均在 0.5K 以内;在中纬度冬季大气条件下,修正算法在所有观测角度下的误差均在 1.0K 以内. 原算法在亚北极夏季与美国 1976 年标准大气条件下精度较高,但反演误差对于观测天顶角较为敏感. 在热带大气条件下,两种算法的反演精度无法接受,其原因在于大气水汽含量较高^[3]. 对于除热带大气的其余 5 种标准大气,当 VZA = 0° 时,修正算法的平均绝对误差为 0.8K,原算法为 0.9K;当 VZA = 35° 时,二者的平均绝对误差分别为 1.2K、2.0K. 对于 IRS4 的最大倾角,两种算法的平均绝对误差分别为 1.1K、1.8K.

为进一步分析两种算法的误差与 LST、VZA 的关系,模拟了 LST 为 273.2 ~ 313.2K、VZA 为 -35° ~ 35° 时两种算法的误差,图 3 给出了两种算法在中纬度夏季与冬季大气条件下的绝对误差. 显然,对于原算法,LST 反演误差对于 VZA 非常敏感,

表 2 6 种标准大气条件下修正算法的平均绝对误差与均方根误差 (* 为均方根误差)

Table 2 The mean absolute error and root-mean square error of the improved algorithm under 6 standard atmospheric conditions (* denotes the RMSE)

LST 反演的平均绝对误差与均方根误差 (K)						
VZA	亚北极 夏季	亚北极 冬季	中纬度 夏季	中纬度 冬季	美国 1976 年	热带
0°	1.9	0.3	0.5	0.6	0.6	3.6
	1.9*	0.3*	0.5*	0.6*	0.6*	3.6*
5°	1.9	0.3	0.5	0.6	0.6	3.5
	1.9*	0.3*	0.5*	0.6*	0.6*	3.5*
10°	2.0	0.3	0.5	0.7	0.6	3.5
	2.0*	0.3*	0.5*	0.7*	0.6*	3.6*
15°	2.0	0.3	0.5	0.7	0.6	3.7
	2.0*	0.4*	0.5*	0.7*	0.7*	3.7*
20°	2.1	0.3	0.5	0.7	0.7	3.9
	2.1*	0.4*	0.5*	0.7*	0.7*	3.9*
25°	2.3	0.4	0.5	0.8	0.8	4.2
	2.3*	0.4*	0.5*	0.8*	0.8*	4.2*
30°	2.5	0.4	0.5	0.9	0.9	4.4
	2.5*	0.5*	0.5*	0.9*	1.0*	4.4*
35°	2.7	0.5	0.5	1.0	1.1	4.9
	2.8*	0.5*	0.5*	1.0*	1.2*	4.9*

表 3 6 种标准大气条件下原算法的平均误差与均方根误差 (* 为均方根误差)

Table 3 The mean absolute error and root-mean square error of the original algorithm proposed by Duan et al. (2008) under 6 standard atmospheric conditions (* denotes the RMSE)

LST 反演的平均绝对误差与均方根误差 (K)						
VZA	亚北极 夏季	亚北极 冬季	中纬度 夏季	中纬度 冬季	美国 1976 年	热带
0°	1.3	1.4	0.8	0.9	0.2	4.0
	1.3*	1.4*	0.8*	0.9*	0.2*	4.0*
5°	1.3	1.4	0.8	0.9	0.2	4.0
	1.3*	1.4*	0.9*	0.9*	0.2*	4.1*
10°	1.4	1.4	0.9	0.9	0.1	4.2
	1.4*	1.4*	1.0*	0.9*	0.2*	4.2*
15°	1.5	1.5	1.1	1.0	0.1	4.4
	1.5*	1.5*	1.2*	1.0*	0.2*	4.5*
20°	1.7	1.5	1.3	1.1	0.2	4.7
	1.7*	1.6*	1.4*	1.1*	0.2*	4.8*
25°	2.0	1.6	1.6	1.2	0.3	5.1
	2.0*	1.6*	1.7*	1.3*	0.4*	5.3*
30°	2.4	1.8	2.0	1.4	0.5	5.7
	2.4*	1.8*	2.2*	1.4*	0.6*	5.9*
35°	2.8	1.9	2.5	1.7	0.8	6.4
	2.9*	1.9*	2.7*	1.7*	0.9*	6.7*

而修正算法误差对 VZA 的依赖性减弱. 此外,LST 反演精度还与地表热力状况有关,但修正算法较原算法对于 LST 的敏感性弱.

2.2 敏感性分析

LST 对参数误差的敏感性为^[1]:

$$\delta T_s = [T_s(x + \delta x) - T_s(x)] \quad (10)$$

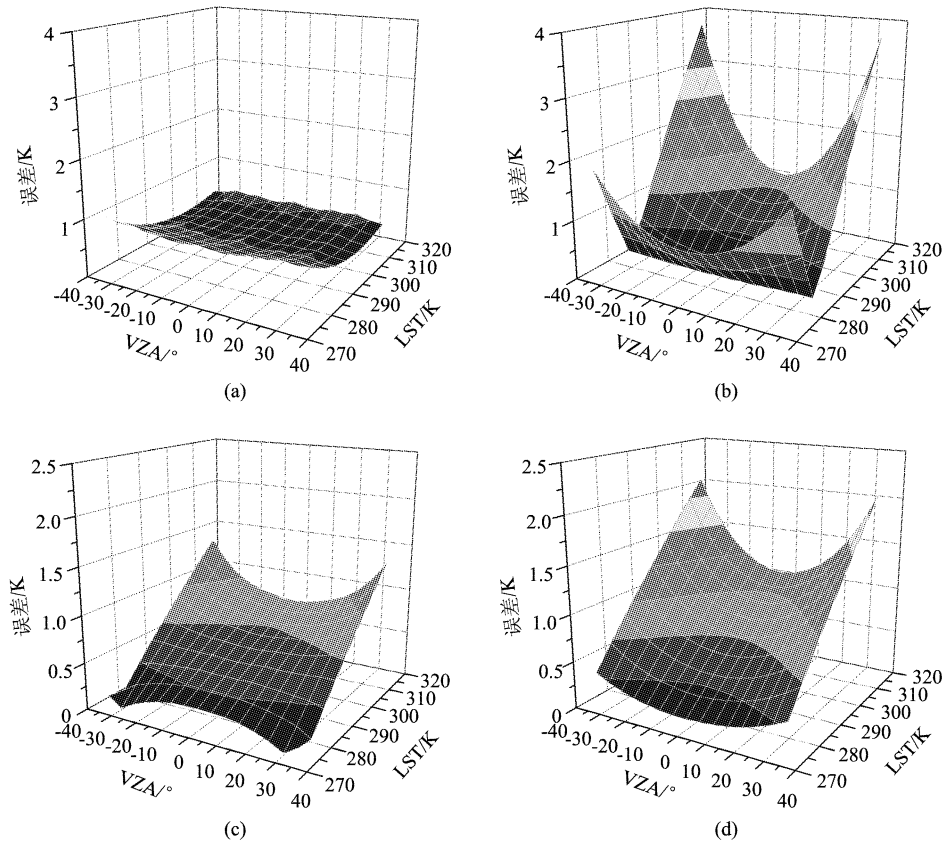


图 3 不同 LST 与 VZA 条件下两种算法的绝对误差 (a)修正算法-中纬度夏季大气 (b)原算法-中纬度夏季大气 (c)修正算法-中纬度冬季大气 (d)原算法-中纬度冬季大气

Fig. 3 Absolute errors of the algorithms with different LST and VZA (a)the improved algorithm under mid-latitude summer atmosphere (b)the original algorithm under mid-latitude summer atmosphere (c)the improved algorithm under mid-latitude winter atmosphere (d)the original algorithm under mid-latitude winter atmosphere

式中, δT_s 为 LST 误差; x 、 δx 分别为参数及其误差; $T_s(x + \delta x)$ 、 $T_s(x)$ 为对应参数的 LST 反演值。

在 $VZA = 0^\circ, 33^\circ$ 时, 分析了 LST 反演误差对于大气水汽含量、地表发射率及传感器噪声等效温差 $NE\Delta T$ 的敏感性。大气廓线选取中纬度夏季廓线, LST 设为 $300.0K$, 发射率设为 0.970 , 大气水汽含量设为 $2.0gcm^{-2}$ 。结果表明, 大气水汽含量对 LST 反演结果影响较大(图 4)。在 $VZA = 0^\circ, 33^\circ$ 时, 当大气水汽含量误差分别达到 $0.470g \cdot cm^{-2}$ 与 $0.390g \cdot cm^{-2}$ 时, LST 的绝对误差超过 $1.0K$ 。传感器倾斜观测时 LST 误差对于大气水汽含量误差更敏感。发射率误差对 LST 的影响则独立于 VZA。发射率误差为 0.01 时, LST 误差为 $0.5K$; 当发射率误差增加至 0.02 时, LST 误差为 $1.1K$ 。与原算法相比, 修正算法中 LST 误差对于发射率误差的敏感性略微降低。此外, 发射率误差导致的 LST 误差对于发射率的绝对数值并无依赖性。 $NE\Delta T$ 对于 LST 反演精度的影响

不依赖于传感器观测角度。LST 反演误差与 $NE\Delta T$ 在数值上基本相等, 当 $NE\Delta T$ 达到 $1.0K$ 时, LST 误差为 $1.0K$ 。

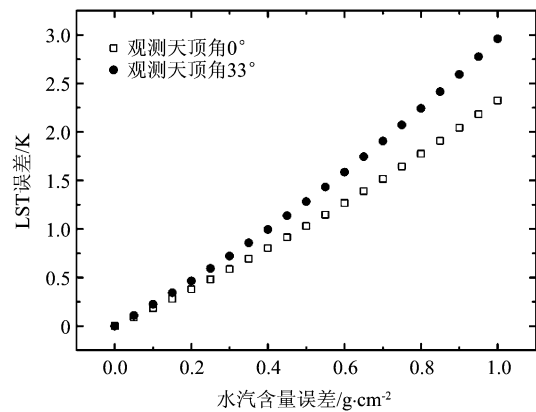


图 4 大气水汽含量误差导致的 LST 反演误差
Fig. 4 Error on LST due to the errors on the water vapor content

3 算法应用

为分析修正单通道算法的实用性,选取 2009 年 5 月 22 日 12:12(北京时间)覆盖我国西北地区的 HJ-1B 卫星 CCD 及 IRS4 影像进行地表温度反演. 当天同一地区的 MODIS 影像成像于 12:20,我们搜集了对应的近红外大气水汽含量产品 MOD05_L2、逐日地表温度/发射率产品 MOD11A1,这两种产品的空间分辨率均为 1000m. 为便于对比,将 HJ-1B 卫星数据与 MODIS 数据配准,然后重采样至 1000m 分辨率. 计算 IRS4 通道星上辐亮度采用我们获取的交叉定标系数;大气水汽含量来源于 MOD05_L2 产品,按照 1.3 节中的方法处理;地表发射率根据 1.4 节中的方法计算. MOD11A1 产品提供的 LST 误差在 1.0K 以内^[15,16]. 由于当天 HJ-1B 卫星与 Terra 卫星过境时间仅相差 8 分钟,因此,可以采用 MOD11A1 产品验证根据 IRS4 数据反演所得的 LST.

图 5 给出了 MOD11A1 产品提供的 LST,以及修正算法与原算法的反演结果,图中白色像元为云. 由图可知,修正算法与原算法反演所得的地表温度空间分布格局与 MOD11A1 产品提供的 LST 一致. 两种算法反演结果的误差直方图揭示,修正算法误差直方图峰值集中在 -0.9K ,而原算法则集中在 -3.1K ,表明修正算法的反演结果与 MOD11A1 产品的 LST 具有较好的一致性,如图 6(a). 为分析两种算法误差与传感器观测天顶角的关系,采用剖面线法对其进行分析. 图 5 中的剖面线对应的观测天顶角为 $-33^\circ \sim 33^\circ$,沿着该剖面的两种算法误差分布见图 6(b). 显然,当观测天顶角为 0° 时,两种算法反演结果最接近;随着观测天顶角增大,原算法的误差逐渐增大,而修正算法精度较为稳定.

IRS4 数据的反演结果相对于 MOD11A1 产品的误差源包括:(1) HJ-1B 数据与 MODIS 数据的配准误差;(2) 云掩模精度的影响,使得一些像元反演绝对误差达 10.0K 以上;(3) IRS4 与 MODIS 影像成像时间存在差异,而卫星过境时刻地表正处于升温期,因此基于 IRS4 数据的反演结果较 MOD11A1 产品提供的 LST 产品偏低;(4) MODIS 与 IRS 观测方向的差异及地表热辐射的非朗伯体性质;(5) MOD11A1 产品及单通道算法自身的误差.

4 结语

由于 HJ-1B 卫星红外相机为宽视场传感器,将单通道算法用于 IRS4 影像反演地表温度时,必须考虑

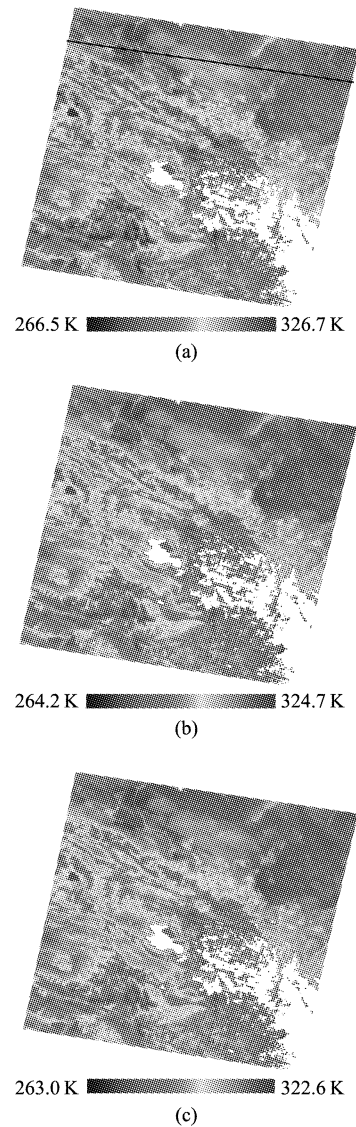


图 5 2009 年 5 月 22 日我国西北地区地表温度(黑线为剖面线) (a)MOD11A1 产品提供的 LST(12:20) (b)修正算法反演结果(12:12) (c)原算法反演结果(12:12)

Fig. 5 LST of Northwestern China on May 22, 2009 (the back line denotes the selected transect) (a)LST of MOD11A1 product (12:20) (b) LST retrieved with the improved algorithm (12:12) (c) LST retrieved with the original algorithm (12:12)

传感器观测角度的影响. 本文建立了基于传感器观测天顶角-大气函数系数查找表的修正单通道算法,以适用于 IRS4 影像反演地表温度. 针对 HJ-1B 卫星与 Terra 卫星过境时间非常接近的特点,给出利用 MODIS 的近红外大气水汽产品作为单通道算法的输入参数,建立了传感器观测天顶角-垂直与斜程大气水汽含量转换系数查找表. 此外,基于对光谱数据的模拟,给出了确定 IRS4 通道的地表发射率的方法.

验证结果表明,修正单通道算法的精度较原算法高,且对于传感器观测角的依赖性减弱. 总体而

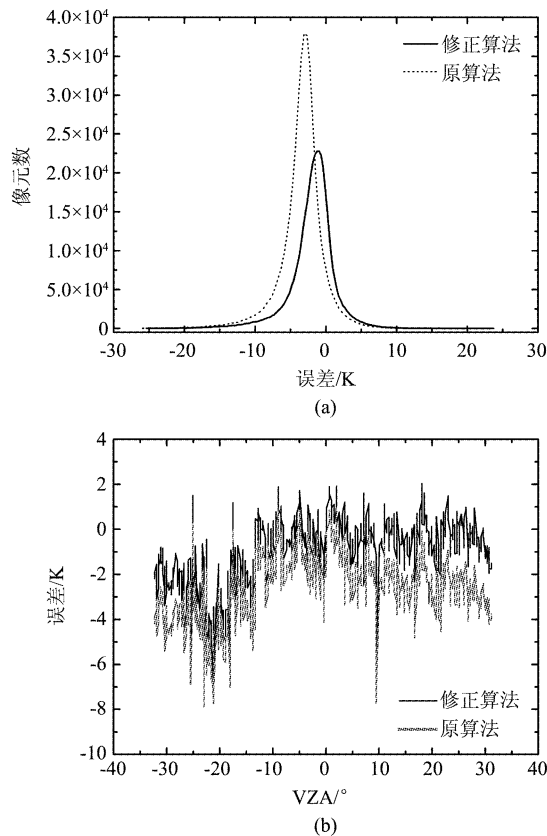


图 6 修正算法与原算法反演所得地表温度相对于 MOD11A1 产品的 (a) 误差直方图与 (b) 误差剖面分布
Fig. 6 Biases of LST retrieved with the improved algorithm and the original algorithm from MOD11A1 product (a) histograms of the biases (b) biases along the selected transect

言,修正单通道算法平均反演误差在 1.1K 以内,比不考虑传感器观测角度的单通道算法精度提高 0.1K ~ 0.7K. 对实际卫星影像的应用结果表明,修正单通道算法反演结果与 MODIS 地表温度产品具有较好的一致性。

致谢 感谢中国资源卫星应用中心提供 HJ-1B 数据、美国宇航局 (NASA) 提供 MODIS 产品。

REFERENCES

- [1] QIN Z H, KARNIELI A, BERLINER P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, **22** (18): 3719—3746.
- [2] JIMÉNEZ-MUÑOZ J C, SOBRINO J A. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**, doi: 10. 1029/2003JD003480.
- [3] JIMÉNEZ-MUÑOZ J C, CRISTOBAL J, SOBRINO J A, et al. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, **47** (1): 339—349.
- [4] DUAN Si-Bo, YAN Guang-Jian, QIAN Yong-Gang, et al. Two single-channel algorithms for retrieving land surface temperature from the simulated HJ-1B data[J]. *Progress in Natural Science* (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. *自然科学进展*), 2008, **18** (9): 1001—1001.
- [5] WAN Z M, DOZIER J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, **34** (4): 892—905.
- [6] OTTLÉ C, STOLL M. Effect of atmospheric absorption and surface emissivity on the determination of land surface temperature from infrared satellite data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, **14**: 2025—2037.
- [7] CHEDIN A, SCOTT N A, WAHICHE C, et al. The improved initialization inversion method: a high resolution physical method for temperature retrievals from the TIROS-N series[J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1985, **24**: 124—143.
- [8] CHEVALLIER F, CHERUY F, SCOTT N A, et al. A neural network approach for a fast and accurate computation of a longwave radiative budget[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1998, **37**: 1385—1397.
- [9] GAO B C, KAUFMAN Y J. Water vapor retrievals using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) near-infrared channels [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**, doi: 10. 1029/2002JD003023.
- [10] ALBERT P, BENNARTZ R, PREUSKER R, et al. Remote sensing of atmospheric water vapor using the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2005, **22**: 309—314.
- [11] KERN A, BARTHOLY J, BORBÁS É E, et al. Estimation of vertically integrated water vapor in Hungary using MODIS imagery[J]. *Advances in Space Research*, 2008, **41**: 1933—1945.
- [12] SOBRINO J A, RAISSOUNI N, Li Z L. A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, **75**: 256—266.
- [13] SOBRINO J A, JIMÉNEZ-MUÑOZ J C, PAOLINI L. Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **90**: 434—440.
- [14] SALISBURY J W, D'ARIA D M. Emissivity of terrestrial materials in the 8 ~ 14 μm atmospheric window [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, **42**: 83—106.
- [15] WAN Z M, Zhang Y L, Zhang Q C, et al. Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **83**: 163—180.
- [16] WAN Z M. New refinements and validation of the MODIS Land-Surface Temperature/Emissivity products [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**: 59—74.