

基于 AVHRR 和 VIRR 数据的改进型 Becker “分裂窗”地表温度反演算法^{*1}

权维俊^{1,2} 韩秀珍³ 陈洪滨¹

QUAN Weijun^{1,2} HAN Xiuzhen³ CHEN Hongbin¹

1. 中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测开放实验室,北京,100029
2. 北京市气候中心,北京,100089
3. 国家卫星气象中心,北京,100081

1. Key Laboratory for Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China

2. Beijing Municipal Climate Center, Beijing 100089, China

3. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China

2011-04-06 收稿,2011-08-03 改回.

Quan Weijun, Han Xiuzhen, Chen Hongbin. 2012. A modified Becker's split window approach for retrieving land surface temperature from the AVHRR and VIRR data. Acta Meteorologica Sinica, 70(6): 1356-1366

Abstract In order to successfully apply the Becker and Li's split window approach, which was proposed based on the NOAA-9 AVHRR data, to estimate the Land Surface Temperature (LST) from the different AVHRRs and VIRR data and further to provide a high-precision, long-time, and high-resolution LST dataset for climate change research, a modified Becker and Li's split window approach is developed based on the radiative transfer equation in this paper. To begin with, the MODTRAN 4.1 is used to generate the spectral radiance data under a variety of surface and atmosphere conditions. Then, the temperature dataset (T_3, T_4, T_5) is built by convolving the spectral radiance data with the spectral response functions of channels 4 and 5 of the AVHRRs and VIRR. The parameters of the Becker and Li's split window approach are subsequently recalculated based on the temperature dataset using the least squares regression method. As an example of validation, a single image of the AVHRR-17 over the Beijing area acquired at 03:12 UTC 27 April 2008 was used to retrieve the LST using the modified Becker and Li's approach, and the comparison between the retrieved LST from AVHRR-17 and that from the MODIS, which was provided by the University of Tokyo in Japan, over the same region at the same time shows that the correlation coefficient is 0.88 and the root mean square deviation (RMSD) is 2.1 K. Furthermore, the frequency histogram of the LST difference image shows that about 69.6% and 37% pixels in the image have the values falling within the scope of ± 2 K and ± 1 K, respectively.

Key words LST, Split window approach, MODTRAN, AVHRR, VIRR

摘要 为了将基于 NOAA-9/AVHRR 数据提出的 Becker 和 Li 的“分裂窗”地表温度算法成功地应用于长序列 NOAA/AVHRR 和 FY-3A/VIRR 数据的地表温度反演,为气候变化研究提供长序列、高精度、高分辨率的地表温度数据集,从辐射传输方程出发,首先利用 MODTRAN 4.1 模式模拟了多种地表和大气状态下的光谱辐亮度数据,并结合 AVHRR 和 VIRR 通道 4,5 的光谱响应函数建立了温度数据集(T_3, T_4, T_5);然后,基于该数据集采用最小二乘法重新计算了 Becker 和 Li 算法中的各参数,提出了一个适用于 NOAA/AVHRR 和 FY-3A/VIRR 数据的改进型 Becker 和 Li 分裂窗地表温度反演算法;并利用改进型算法对 2008 年 4 月 27 日 03 时 12 分(世界时)观测的一景覆盖北京地区的 NOAA-17/AVHRR 数据进行了地表温度

* 资助课题:气象关键技术集成与应用项目(CAMG2012M03)、国家科技基础条件平台工作项目(2006DAK31700)。

作者简介:权维俊,主要从事卫星遥感和大气辐射方向的研究。E-mail:quanquan78430@163.com

的反演,将反演结果与日本东京大学提供的同地区、同时相的 MODIS 地表温度产品进行了对比分析。结果表明,两种地表温度产品的相关系数为 0.88,均方根偏差(RMSD)为 2.1 K;在两种地表温度差值图像的频率直方图上有 69.6%的像元的值在 ± 2 K 之内,37%的像元的值在 ± 1 K 之内。

关键词 地表温度,分裂窗算法,MODTRAN,AVHRR,VIRR

中图法分类号 P423.7

1 引言

地表温度(Land surface temperature, LST)是一个非常重要的环境参数,在潜热和感热通量的估算中有着直接或间接的作用,而且,在地质学、水文学、植被监测、全球环流模式(GCM)等其他应用领域也依赖于对地表温度的了解。因此,在空间和时间上可靠的大范围地表温度估算产品在许多研究中都是至关重要的(Quattrochi, et al, 2000)。由于卫星能够提供地基观测难以提供的全球范围内的地表温度产品,利用卫星热红外通道观测数据进行地表温度反演研究是定量遥感中的热点问题之一。甚高分辨率辐射计(AVHRR)是搭载在由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)负责运行的极轨业务环境卫星(POES)上的扫描辐射计。搭载在 TIROS-N、NOAA-6、NOAA-8 和 NOAA-10 上的第一代 AVHRR(AVHRR/1)拥有 4 个通道,分别是可见光通道(0.58—0.68 μm)、近红外通道(0.725—1.0 μm)、中红外通道(3.55—3.93 μm)和热红外通道(10.3—11.3 μm);第 2 代 AVHRR(AVHRR/2)搭载在 NOAA-7、NOAA-9、NOAA-11、NOAA-12 和 NOAA-14 上(简记为 AVHRR-7、-9、-11、-12、-14),与第 1 代 AVHRR 相比增加了一个 11.5—12.5 μm 的“分裂窗”通道;第 3 代 AVHRR(AVHRR/3)搭载在 NOAA-15、NOAA-16、NOAA-17、NOAA-18 和 METOP 卫星上(简记为 AVHRR-15、-16、-17、-18、-M),这一代 AVHRR 又多出一个 1.58—1.64 μm 的短波红外通道(NOAA-SIS, 2011)。中国于 2008 年 5 月 27 日成功发射了第 2 代极轨气象卫星的首发星——风云三号 A 星(FY-3A),其搭载的可见光红外扫描辐射计(Visible and InfraRed Radiometer, VIRR)拥有 10 个观测通道,其中,前 6 个通道的光谱范围与 AVHRR 相应通道的光谱范围相同或接近,FY-3 是中国目前综合探测能力最强的应用卫星(杨军等,2009)。

中外科学家在利用 AVHRR 热红外通道观测数据反演地表温度方面已经做了大量的工作(Price,1984;Becker, et al, 1990)。其主要方法是所谓的“分裂窗”方法,该方法利用 AVHRR 通道 4、5 的亮温差来纠正海表温度和地表温度反演中的大气影响(Quattrochi, et al, 2000)。分裂窗算法的基本特点是地表温度可以表示成通道 4、5 亮温的线性组合(McClain, et al, 1983;Price, 1984;Prata, et al, 1991;Ulivieri, et al, 1994)。但 Sobrino 等(1993)提出的算法有所不同,因为在其算法中,地表温度是通道 4、5 亮温的一个 2 次多项式,其中,2 次项用来说明通道 4、5 亮温差中的非线性变化部分。值得注意的是,这些分裂窗算法是针对不同 AVHRR 传感器而提出的,例如 Price(1984)算法、Becker 等(1990)算法、Sobrino 等(1993)算法分别是根据 AVHRR-7、-9、-11 而提出的。不同 AVHRR 的通道 4、5 的光谱响应函数存在差异,这对热红外通道亮温的计算是有影响的(Czajkowski, et al, 1998)。因此,如果将基于 AVHRR-9 数据提出的 Becker 和 Li 的分裂窗算法应用于其他 AVHRR 数据,地表温度的反演误差可达 2.3 K(Czajkowski, et al, 1998)。杨虎等(2006)利用 MODTRAN 4(Berk, et al, 1999)在 4 种标准大气、12 种地表温度和一系列在 0.90—1.0 变化的地表比辐射率组合下的模拟结果,并结合 AVHRR-16、-17 的通道 4、5 的光谱响应函数重新计算了 Becker 和 Li 算法中的参数,提出了适合于 AVHRR-16、-17 的改进型分裂窗算法。

本文在已有研究的基础上,从辐射传输方程出发,根据 MODTRAN 模拟数据结合 AVHRR 和 VIRR 热红外通道光谱响应函数,提出一个适用于 AVHRR 和 VIRR 的具有较高精度的改进型 Becker 和 Li 分裂窗地表温度反演算法,以提高利用不同 AVHRR 和 VIRR 数据反演的地表温度的可比性,从而满足在气候变化研究中对长序列、高分辨率

地表温度数据的需求。在改进 Becker 和 Li 算法的过程中,首先利用 MODTRAN 4 模拟了 6 种标准大气、10 种 CO₂ 混合比(与 NOAA 和 FY-3A 卫星运行年份相对应)、6 种边界温度、18 种典型地物和 2 个光谱间隔组成的共 12960 种条件下,到达卫星的热红外光谱辐亮度数据;然后结合 AVHRR 和 VIRR 通道 4、5 的光谱响应函数对该光谱辐亮度数据进行加权平均运算和亮温计算,得到了温度数据集(T_s, T₄, T₅);最后根据该温度数据集采用最小二乘法重新计算 Becker 和 Li 分裂窗地表温度反演算法中的各参数,从而提出了适用于 AVHRR 和 VIRR 的改进型分裂窗地表温度反演算法。并利用改进型算法对一景 AVHRR-17 数据进行了地表温度反演,将反演结果与 MODIS 的地表温度产品进行了对比分析。

2 理论基础

2.1 辐射传输方程

处于局地热力平衡的晴空大气,热红外波段大气的散射效应可以忽略(Becker, 1987)。在这种情况下,卫星传感器接收的辐亮度(图 1)(Kahle, et al, 1980;Becker, 1987;Sobrino, et al, 2004a)为

$$L(\theta)_{\text{sensor},i} = L(\theta)_{\text{surface},i}\tau(\theta)_i + L(\theta)_{\text{atm},i}^{\uparrow} \quad (1)$$

式中, θ 为卫星观测天顶角; $\tau(\theta)_i$ 为第 i 通道总的大气透过率; $L(\theta)_{\text{atm},i}^{\uparrow}$ 为第 i 通道的大气上行辐亮度; $L(\theta)_{\text{surface},i}$ 为第 i 通道来自地表的辐亮度

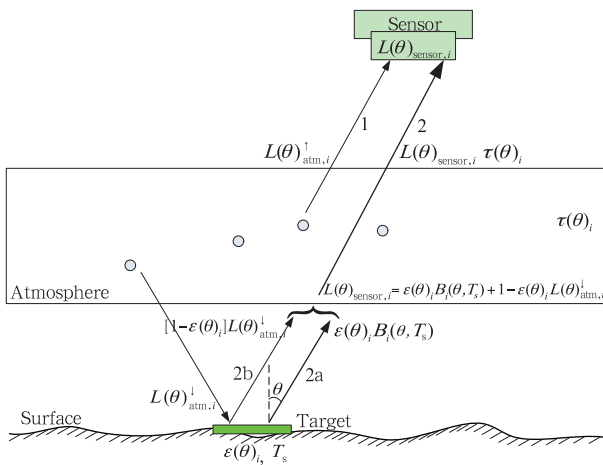


图 1 到达卫星传感器的热红外辐亮度
Fig.1 Thermal radiance reaching at the sensor on a satellite

$$L(\theta)_{\text{surface},i} = \epsilon(\theta)_i B_i(\theta, T_s) + [1 - \epsilon(\theta)_i] L(\theta)_{\text{atm},i}^{\downarrow} \quad (2)$$

式中, ϵ_i 为通道比辐射率, $L(\theta)_{\text{atm},i}^{\downarrow}$ 为第 i 通道的向下半球空间的大气辐亮度, $B_i(\theta, T_s)$ 为温度为 T_s 的黑体辐亮度

$$B_i(\theta, T_s) = \frac{C_i}{\lambda_i^5 [\exp(C_2/\lambda_i T_s) - 1]} \quad (3)$$

式中, $C_1 = 1.19104 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 / (\text{m}^2 \cdot \text{sr})$, $C_2 = 1.4388 \times 10^4 \text{ K} \cdot \mu\text{m}$, λ_i 为等效波长

$$\lambda_i = \frac{\int_{\lambda_{\min,i}}^{\lambda_{\max,i}} \lambda \cdot f_i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min,i}}^{\lambda_{\max,i}} f_i(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

式中, $f_i(\lambda)$ 为传感器第 i 通道的光谱响应函数, $\lambda_{\max,i}$ 、 $\lambda_{\min,i}$ 为第 i 通道的波长上、下限。

2.2 Becker 和 Li 的“分裂窗”地表温度反演算法

大气对地表发射的热红外辐射的衰减与两个热红外通道观测的辐亮度之差成比例(McMillin, 1975)。Becker 等(1990)经过理论推导提出,真实的地表温度可以表示为卫星两个相邻通道亮温的线性组合,其系数依赖于光谱比辐射率而不依赖于大气条件。Becker 和 Li 的“分裂窗”地表温度反演方程为

$$T_s = A_0 + P(T_4 + T_5)/2 + M(T_4 - T_5)/2 \quad (5)$$

式中, T_s 为地表温度, T_4 、 T_5 为 AVHRR 或 VIRR 热红外通道 4、5 的亮温, A_0 为常数, P 和 M 为通道 4 和 5 的平均比辐射率和比辐射率差值的函数

$$\begin{cases} P = 1 + \alpha(1 - \epsilon)/\epsilon + \beta\Delta\epsilon/\epsilon^2 \\ M = \gamma' + \alpha'(1 - \epsilon)/\epsilon + \beta'\Delta\epsilon/\epsilon^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\epsilon = (\epsilon_4 + \epsilon_5)/2$ 为通道 4 和 5 的平均比辐射率, $\Delta\epsilon = (\epsilon_4 - \epsilon_5)$ 为通道 4、5 的比辐射率的差值。

3 基于 MODTRAN 模拟数据计算 Becker 和 Li 分裂窗地表温度反演算法中的系数

3.1 利用 MODTRAN 4 模拟 AVHRR 和 VIRR 热红外观测值

为了获取式(6)中的系数 A_0 、 α 、 β 、 γ' 、 α' 和 β' ,需要一个温度数据集(T_s , T_4 , T_5)。然而,通过地表温度的星地同步观测方法来获取该数据集实际上是很困难的,利用模式计算的大气透过率、大气和地表发射的热辐射来构建该数据集是一个可行的办法(Becker, et al, 1990)。为此,利用 MODTRAN 4

模拟的 12960 种不同地表和大气条件组合下的辐亮度数据来构建温度数据集,模拟时的 MODTRAN 输入参数设置为

(1) 6 种标准大气,即副极地冬季大气、中纬度冬季大气、1976 年美国标准大气、副极地夏季大气、中纬度夏季大气和热带大气。水汽含量选用这些标准大气的缺省值,分别为 0.38、0.87、1.44、2.12、2.98 和 4.19 g/cm²,代表了从非常干燥大气到湿润大气的条件。

(2) 由于 CO₂ 的混合比以 1%—2% 的年增长率增加,且 1995 年的推荐值为 (355—360) × 10⁻⁶ (V/V) (Kneisys, et al, 1995),考虑到不同 NOAA 和 FY-3A 卫星运行年份所对应的 CO₂ 混合比会有所差异,以 1995 年的 CO₂ 混合比为基准值,采用线性插值方法得到卫星运行年份相对应的 CO₂ 混合比作为 MODTRAN 的输入参数,相应于从 NOAA-7 (1981 年) 到 NOAA-18 或 FY-3A (目前),CO₂ 混合比在 (349—373) × 10⁻⁶ (V/V)。

(3) MODTRAN 模式中的边界温度(TBOUND

项)由标准大气 0 km 高度的基准温度 T₀ 和一个温度偏移量 ΔT 组成。ΔT 的取值为 -5、0、5、10、15 和 20 K,这样对每一种标准大气,总共设置了 6 个初始边界温度,代表了从比基准温度低 5 K 到高 20 K 的一个较大的变化范围。对应的 6 种标准大气初始边界温度的值分别为 257.2、272.2、288.2、287.2、284.2 和 299.7 K。

(4) 考虑到地表状况的真实性,使用了 John Hopkins 大学(JHU)的 0.4—14 μm 光谱比辐射率数据库 (Salisbury, et al, 1991, 1992, 1994; Korb, et al, 1996)。共选用了 18 种典型地物,分别为 4 种土壤、4 种岩石、3 种植被、3 种水体和 4 种不同粒度的雪,并计算了通道 4、5 的比辐射率(表 1)。

$$\epsilon_i = \frac{\int_{\lambda_{\min,i}}^{\lambda_{\max,i}} \epsilon_{\lambda} \cdot f_i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min,i}}^{\lambda_{\max,i}} f_i(\lambda) d\lambda} \quad (7)$$

式中,ε_i 为通道 i 的加权平均比辐射率,ε_λ 为 JHU 提供的光谱比辐射率,f_i(λ) 为 AVHRR 或 VIRR 通道 i 的光谱响应函数。

表 1 AVHRR-7、-9、-11、-12、-14、-15、-16、-17、-18 和 VIRR 通道 4、5 的典型地物比辐射率
Table 1 Channel averaged emissivities for typical surface types over channel 4 or 5 of the AVHRR-7, -9, -11, -12, -14, -15, -16, -17, -18, and the VIRR

地表类型	AVHRR-7		AVHRR-9		AVHRR-11		AVHRR-12		AVHRR-14	
	通道 4	通道 5	通道 4	通道 5	通道 4	通道 5	通道 4	通道 5	通道 4	通道 5
土壤										
细沙壤土	0.9646	0.9752	0.9644	0.9748	0.9645	0.9752	0.9651	0.9756	0.9643	0.9759
粗沙壤土	0.9729	0.9743	0.9730	0.9736	0.9729	0.9742	0.9726	0.9749	0.9729	0.9754
含有机质的壤土	0.9734	0.9788	0.9733	0.9783	0.9733	0.9788	0.9736	0.9793	0.9731	0.9796
粘土	0.9780	0.9807	0.9779	0.9801	0.9779	0.9807	0.9780	0.9812	0.9780	0.9817
岩石										
玄武岩	0.9040	0.9555	0.9032	0.9532	0.9039	0.9547	0.9072	0.9572	0.9048	0.9584
花岗岩	0.9123	0.9534	0.9106	0.9529	0.9117	0.9534	0.9160	0.9538	0.9094	0.9540
石灰石	0.9677	0.9772	0.9675	0.9767	0.9677	0.9771	0.9684	0.9776	0.9675	0.9779
粉砂岩	0.9631	0.9691	0.9632	0.9681	0.9631	0.9689	0.9628	0.9700	0.9632	0.9707
植被										
草地	0.9824	0.9885	0.9822	0.9884	0.9824	0.9884	0.9830	0.9885	0.9823	0.9885
落叶树	0.9735	0.9731	0.9736	0.9730	0.9735	0.9730	0.9733	0.9732	0.9737	0.9732
针叶树	0.9889	0.9907	0.9889	0.9906	0.9889	0.9907	0.9890	0.9908	0.9890	0.9909
水体										
海水	0.9904	0.9866	0.9904	0.9872	0.9904	0.9868	0.9904	0.9862	0.9903	0.9859
海水泡沫	0.9905	0.9874	0.9905	0.9879	0.9905	0.9875	0.9905	0.9870	0.9904	0.9867
纯净水	0.9907	0.9862	0.9907	0.9867	0.9907	0.9863	0.9907	0.9857	0.9906	0.9854
雪										
霜	0.9933	0.9912	0.9932	0.9913	0.9932	0.9913	0.9933	0.9911	0.9929	0.9910
粗粒子雪	0.9864	0.9642	0.9869	0.9652	0.9865	0.9645	0.9848	0.9635	0.9864	0.9629
中等粒子雪	0.9916	0.9806	0.9918	0.9810	0.9916	0.9807	0.9907	0.9802	0.9916	0.9800
细粒子雪	0.9956	0.9898	0.9958	0.9900	0.9957	0.9899	0.9952	0.9897	0.9957	0.9895

续表 1

地表类型	AVHRR-15		AVHRR-16		AVHRR-17		AVHRR-18		VIRR	
	通道 4	通道 5	通道 4	通道 5	通道 4	通道 5	通道 4	通道 5	通道 4	通道 5
土壤										
细沙壤土	0.9647	0.9758	0.9652	0.9752	0.9645	0.9757	0.9645	0.9759	0.9645	0.9749
粗沙壤土	0.9728	0.9744	0.9724	0.9751	0.9728	0.9745	0.9729	0.9755	0.9728	0.9757
含有机质的壤土	0.9734	0.9791	0.9736	0.9793	0.9733	0.9791	0.9733	0.9798	0.9731	0.9796
粘土	0.9779	0.9808	0.9779	0.9812	0.9779	0.9808	0.9779	0.9818	0.9780	0.9820
岩石										
玄武岩	0.9051	0.9561	0.9092	0.9579	0.9045	0.9562	0.9042	0.9592	0.9067	0.9583
花岗岩	0.9130	0.9545	0.9173	0.9530	0.9118	0.9543	0.9116	0.9538	0.9105	0.9517
石灰石	0.9679	0.9775	0.9685	0.9776	0.9679	0.9775	0.9677	0.9780	0.9678	0.9774
粉砂岩	0.9630	0.9693	0.9628	0.9704	0.9630	0.9693	0.9631	0.9710	0.9632	0.9712
植被										
草地	0.9826	0.9885	0.9832	0.9886	0.9825	0.9885	0.9824	0.9886	0.9827	0.9884
落叶树	0.9735	0.9731	0.9733	0.9732	0.9735	0.9731	0.9735	0.9733	0.9736	0.9734
针叶树	0.9890	0.9908	0.9891	0.9908	0.9890	0.9908	0.9890	0.9909	0.9890	0.9909
水体										
海水	0.9904	0.9865	0.9904	0.9861	0.9904	0.9865	0.9904	0.9857	0.9903	0.9855
海水泡沫	0.9905	0.9873	0.9905	0.9869	0.9905	0.9873	0.9905	0.9866	0.9904	0.9864
纯净水	0.9907	0.9861	0.9907	0.9855	0.9907	0.9861	0.9907	0.9852	0.9905	0.9850
雪										
霜	0.9932	0.9912	0.9932	0.9910	0.9931	0.9911	0.9932	0.9910	0.9928	0.9910
粗粒子雪	0.9859	0.9639	0.9839	0.9632	0.9862	0.9639	0.9864	0.9626	0.9855	0.9629
中等粒子雪	0.9913	0.9805	0.9902	0.9801	0.9914	0.9804	0.9916	0.9799	0.9911	0.9800
细粒子雪	0.9955	0.9898	0.9949	0.9896	0.9956	0.9898	0.9956	0.9895	0.9954	0.9996

(5)从表 1 可见,同一地物在不同的 AVHRR 和 VIRR 通道 4、5 平均比辐射率有一定的差异,因此在模拟时,分别选用 10.0—12.0、11.0—13.0 μm 两个光谱区间进行。

3.2 构建温度数据集

温度数据集中的地表温度 T_s 为 MODTRAN 模拟时输入的边界温度, $T_s = T_0 + \Delta T$; 通道 4、5 的亮温 T_4 、 T_5 需要根据 MODTRAN 输出结果中的光谱辐亮度数据和光谱响应函数来计算。

在 MODTRAN 的输出文件 tape 7 中的 TOTAL RAD 项是到达卫星传感器的总的光谱辐亮度,即 $L(\lambda)$ 等于 TOTAL RAD。根据 NOAA/NESDIS 对 AVHRR 热红外通道的定标方法 (Robel, 2007, 2009), 要将 MODTRAN 模拟的光谱辐亮度转换为通道的亮温需进行以下两步操作:

(1) 计算热红外通道 4 和 5 的加权平均光谱辐亮度 $L_{E,i}$

$$L_{E,i} = \frac{\int_{\lambda_{\min,i}}^{\lambda_{\max,i}} L(\lambda) f_i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min,i}}^{\lambda_{\max,i}} f_i(\lambda) d\lambda} \quad (8)$$

式中, $L(\lambda)$ 为 MODTRAN 模拟的光谱辐亮度,

$f_i(\lambda)$ 为通道 i 的光谱响应函数。

(2) 根据逆普朗克公式将通道的加权平均光谱辐亮度转换为通道的亮温

$$T_i = \frac{C_2/\lambda_{c,i}}{\ln\left[\frac{C_1/\lambda_{c,i}^5}{L_{E,i}} + 1\right]} \quad (9)$$

其中, T_i 是通道 i 的亮温, $\lambda_{c,i}$ 是通道 i 的中心波长。

值得注意的是, AVHRR/2 的通道 4、5 的中心波长将随不同温度范围而变化(表 2)。

对 AVHRR/3 和 VIRR, 亮温的计算采用了固定中心波长结合校正系数的方法取代 AVHRR/2 采用的非固定中心波长的方法来进行定标 (Robel, 2009; 国家卫星气象中心, 2009)

$$T_i^* = \frac{C_2/\lambda_{c,i}}{\ln\left[\frac{C_1/\lambda_{c,i}^5}{L_{E,i}} + 1\right]} \quad (10)$$

$$T_i = \frac{T_i^* - A}{B} \quad (11)$$

式(10)与式(9)相同,但是在式(10)中,通道 i 的中心波长 $\lambda_{c,i}$ 是固定的。AVHRR/3 和 VIRR 的中心波长和校正系数 A 、 B 见表 3。

表 2 AVHRR-7、-9、-11、-12 和-14 的中心波长
Table 2 The central wave lengths in channel 4 or 5 of the AVHRR-7, -9, -11, -12, and -14

传感器	温度范围 (K)	中心波长 (μm)	
		通道 4	通道 5
AVHRR-7	180—225	10.797	11.903
	225—275	10.790	11.898
	275—320	10.785	11.892
AVHRR-9	180—225	10.770	11.843
	225—275	10.764	11.837
	275—320	10.759	11.832
AVHRR-11	180—225	10.790	11.885
	225—275	10.783	11.879
	275—320	10.778	11.874
AVHRR-12	270—310	10.779	11.875
	190—230	10.869	11.952
	230—270	10.863	11.947
AVHRR-14	270—310	10.857	11.942
	290—330	10.855	11.939
	190—230	10.773	11.984
AVHRR-14	230—270	10.766	11.979
	270—310	10.760	11.974
	290—330	10.757	11.971

表 3 AVHRR-15、-16、-17、-18 和 VIRR 通道 4、5 的中心波长和校正系数 A 和 B

Table 3 The central wave lengths and the conversion coefficients A and B in channel 4 or 5 of the AVHRR-15, -16, -17, -18, and the VIRR

传感器	通道	中心波长 (μm)	A	B
AVHRR-15	4	10.806	0.337810	0.998719
	5	11.906	0.304558	0.999024
AVHRR-16	4	10.902	0.332380	0.998522
	5	11.931	0.674623	0.998363
AVHRR-17	4	10.796	0.271683	0.998794
	5	11.907	0.309180	0.999012
AVHRR-18	4	10.774	0.436645	0.998607
	5	12.001	0.253179	0.999057
VIRR	4	10.829	0.200025	0.997917
	5	12.045	0.131499	0.998205

3.3 Becker 和 Li 的“分裂窗”地表温度反演算法中的系数计算

根据式(9)、(11)计算的 AVHRR 和 VIRR 通道 4、5 的亮温被用于计算平均亮温和亮温差(图 2)。通道 4、5 的亮温平均值与地表温度有较好的线

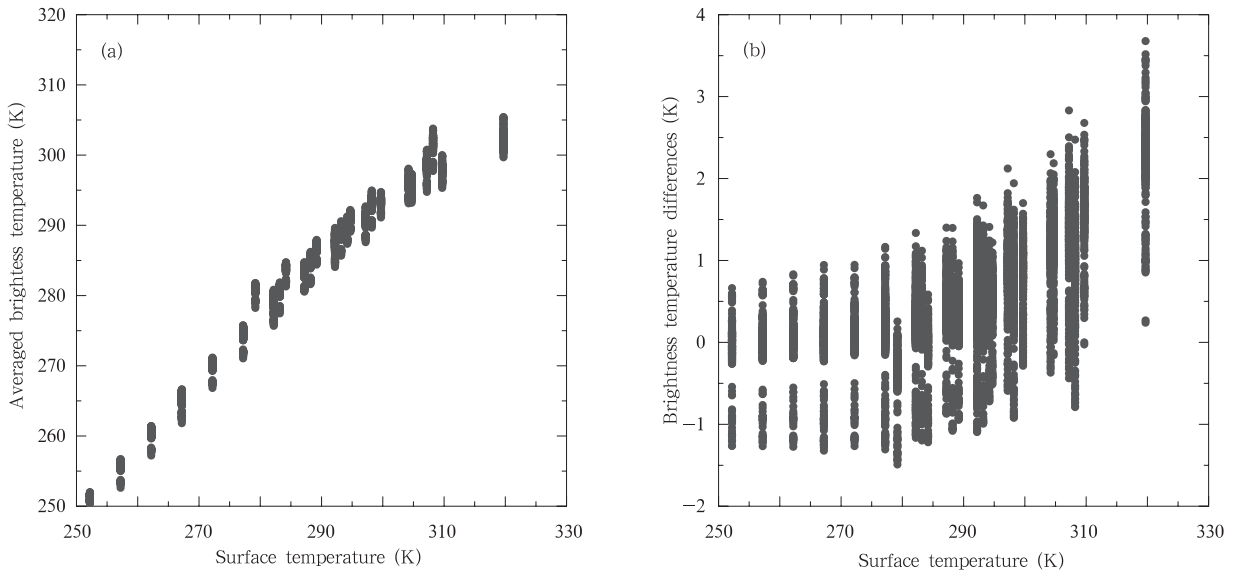


图 2 通道 4、5 的(a)平均亮温 $(T_4 + T_5)/2$ 及(b)亮温差 $(T_4 - T_5)/2$ 与地表温度的比较

Fig. 2 Comparison of the averaged brightness temperature $(T_4 + T_5)/2$

(a) and brightness temperature differences $(T_4 - T_5)/2$ (b) with the surface temperature

性关系(图 2a),亮温差也与地表温度有近似线性关系(图 2b)。由此可见,地表温度可用亮温平均值与亮温差的线性关系式来表示,本文采用了 Becker 和 Li 的线性方程式(5)。

地表比辐射率是影响亮温的一个重要地表参数(图 3),当地表温度为 284.2 K、大气为中纬度夏季

大气时,平均比辐射率对通道 4、5 的亮温平均值的影响最大可达 6 K;地表比辐射率差值 $\Delta\epsilon$ 对通道 4、5 的亮温差的影响也可达 3 K。

利用最小二乘法,根据温度数据集 (T_s, T_4, T_5) 重新计算了适用于 AVHRR 和 VIRR 的 Becker 和 Li 分裂窗地表温度反演算法中的相关参数(表 4)。

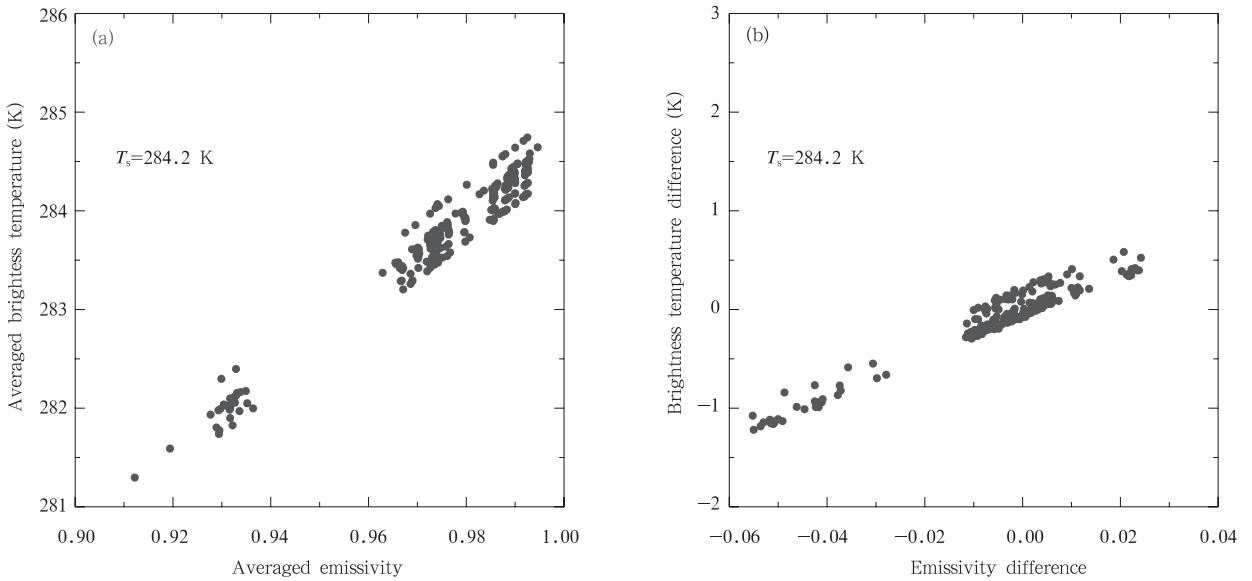


图3 (a)平均亮温 $(T_4 + T_5)/2$ 与地表比辐射率平均值及(b)亮温差 $(T_4 - T_5)/2$ 与地表比辐射率差值的关系
 Fig.3 Scatter plots of the averaged brightness temperature $(T_4 + T_5)/2$ versus average emissivities (a), and the brightness temperature difference $(T_4 - T_5)/2$ versus emissivity differences (b)

表4 适用于 AVHRR-7、-9、-11、-12、-14、-15、-16、-17、-18 和 VIRR 的改进型 Becker 和 Li 分裂窗地表温度反演算法中的参数

Table 4 The parameters of the modified Becker and Li's split window approach derived in this paper for the AVHRR-7, -9, -11, -12, -14, -15, -16, -17, -18, and the VIRR

传感器	A_0	α	β	γ'	α'	β'	R^2
AVHRR-7	-0.0261	0.1365	-0.5275	6.6165	-1.5186	7.1324	0.97
AVHRR-9	0.1605	0.1316	-0.5628	7.0883	-1.9270	8.0914	0.97
AVHRR-11	0.0601	0.1341	-0.5440	6.8484	-1.9935	7.4087	0.97
AVHRR-12	-0.0360	0.1398	-0.5287	6.5730	-0.7266	8.0381	0.97
AVHRR-14	0.0101	0.1309	-0.4817	5.8932	0.7642	7.8168	0.97
AVHRR-15	-0.0647	0.1345	-0.5352	6.6874	-1.4043	7.9145	0.97
AVHRR-16	-1.1999	0.1315	-0.5176	6.0441	3.7319	11.0475	0.96
AVHRR-17	-0.2552	0.1326	-0.5250	6.5005	-0.5190	8.3842	0.97
AVHRR-18	-0.0118	0.1377	-0.4659	5.7318	0.3840	6.7264	0.97
VIRR	-0.1400	0.1197	-0.4891	5.6538	5.6543	12.9238	0.97

4 反演结果的验证

为了验证改进型 Becker 和 Li 的分裂窗地表温度反演算法,选取了2008年4月27日03时12分(世界时,下同)的一景晴空 AVHRR-17 图像,利用本文所提出的改进型算法反演了地表温度,其中,地表比辐射率估算采用归一化植被指数方法(Van de Griend, et al, 1993; Valor, et al, 1996)。这景图像的空间范围为(38.8°—41.6°N, 114.8°—117.6°E),覆盖了北京及周边地区,研究区的主要地表类型为森林、裸地、水体、农田和城市用地等。最后将反演结果同日本东京大学的 MODIS 的地表温度产品(<http://webmodis.iis.u-tokyo.ac.jp/>)进行了对比分析。

4.1 基于归一化植被指数方法的地表比辐射率的估算

式(6)中的系数 P 和 M 依赖于 AVHRR 或 VIRR 通道 4、5 的地表比辐射率,一个可行的地表比辐射率获取方法是归一化植被指数方法。该方法通过归一化植被指数的分级来估算地表比辐射率。

(1)归一化植被指数小于 0.2

认为是裸土像元,它在 AVHRR 和 VIRR 通道 4、5 的地表比辐射率可用表 1 中的土壤和岩石的比辐射率的平均值来代替。即 AVHRR-7、-9、-11、-12、-14、-15、-16、-17、-18 和 VIRR 通道 4 的裸土的比辐射率($\epsilon_{s,4}$)分别为 0.9545、0.9541、0.9544、0.9555、0.9542、0.9547、0.9559、0.9545、0.9544 和

0.9545;通道 5 的裸土的比辐射率($\epsilon_{S,5}$)分别为: 0.9705、0.9697、0.9704、0.9712、0.9717、0.9709、0.9712、0.9709、0.9719 和 0.9714。

(2)归一化植被指数大于 0.5

认为完全由植被覆盖,这时通常假定 AVHRR 和 VIRR 通道 4,5 的地表比辐射率为一个常数,典型的值为 0.99(Sobrino, et al, 2004b)。

(3)归一化植被指数在[0.2,0.5]

像元是由裸土和植被所构成的混合像元,地表比辐射率为

$$\epsilon_i = \epsilon_V P_V + \epsilon_{S,i}(1 - P_V) + d\epsilon_i \quad (12)$$

式中, ϵ_V 为纯植被的比辐射率,即 $\epsilon_V = 0.99$, $\epsilon_{S,i}$ 为通道 i 的裸土的平均比辐射率, P_V 为植被覆盖度,用 Carlson 等(1997)计算式估计

$$P_V = \left[\frac{I_{NDV} - I_{NDV-min}}{I_{NDV-max} - I_{NDV-min}} \right]^2 \quad (13)$$

式中, $I_{NDV-max} = 0.5$, $I_{NDV-min} = 0.2$ 。

式(12)中的 $d\epsilon_i$ 项包含了自然表面的几何分布效应和内反射效应,对平坦地表可以忽略,但对粗糙表面(例如森林)其值可以达到 2%(Sobrino,1989)。该项一个很好的近似式为

$$d\epsilon_i = (1 - \epsilon_{S,i})(1 - P_V)F \cdot \epsilon_V \quad (14)$$

式中, F 为形状因子(Sobrino, et al, 1990),在不同

的几何分布下其平均值为 0.55。综合式(12)、(14),地表比辐射率可为

$$\epsilon_i = m_i P_V + n_i \quad (15)$$

$$m_i = \epsilon_V - \epsilon_{S,i} - (1 - \epsilon_{S,i})F \cdot \epsilon_V \quad (16)$$

$$n_i = \epsilon_{S,i} + (1 - \epsilon_{S,i})F \cdot \epsilon_V \quad (17)$$

计算 AVHRR 和 VIRR 的系数 m 、 n (表 5)。

表 5 AVHRR-7、-9、-11、-12、-14、-15、-16、-17、-18 和 VIRR 通道 4,5 的系数 m 、 n

Table 5 The coefficients m and n for channels 4 and 5 of the AVHRR-7, -9, -11, -12, -14, -15, -16, -17, -18, and the VIRR

传感器	m_4	n_4	m_5	n_5
AVHRR-7	0.0107	0.9793	0.0034	0.9866
AVHRR-9	0.0109	0.9791	0.0038	0.9862
AVHRR-11	0.0108	0.9792	0.0035	0.9865
AVHRR-12	0.0103	0.9797	0.0031	0.9869
AVHRR-14	0.0109	0.9791	0.0029	0.9871
AVHRR-15	0.0106	0.9794	0.0033	0.9867
AVHRR-16	0.0101	0.9799	0.0031	0.9869
AVHRR-17	0.0107	0.9793	0.0033	0.9867
AVHRR-18	0.0108	0.9792	0.0028	0.9872
VIRR	0.0107	0.9793	0.0030	0.9870

4.2 对比分析和验证

由于很难获取卫星过境时的地面同步地表温度观测值,对于卫星遥感反演的地表温度的验证是一

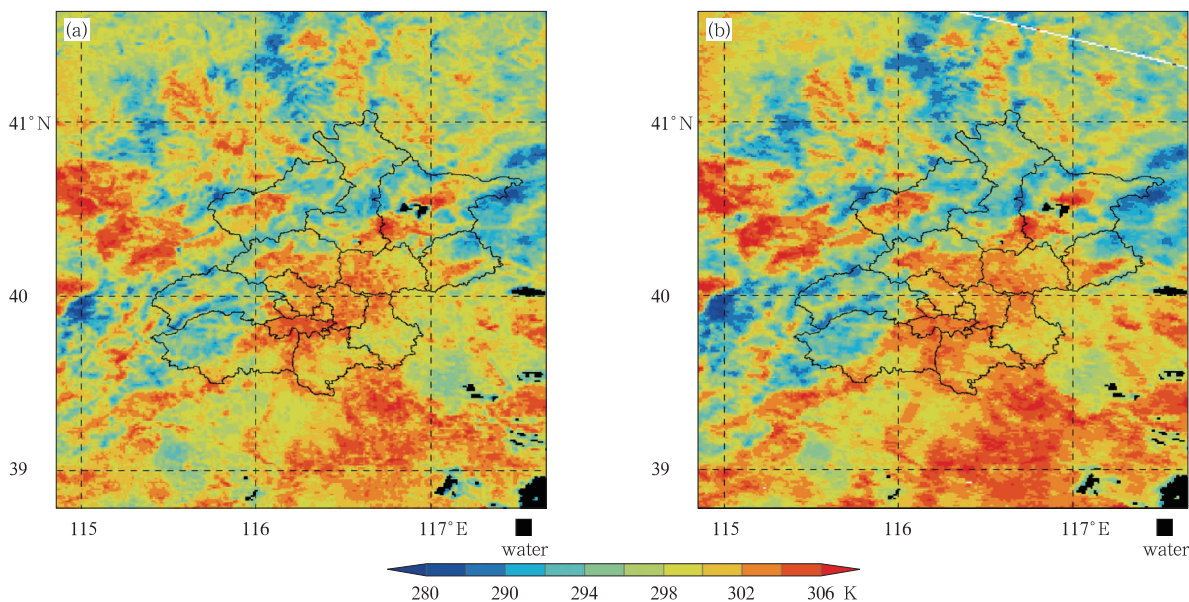


图 4 (a)日本东京大学提供的 2008 年 4 月 27 日 03 时 12 分北京及周边地区的 MODIS Level 2 地表温度产品, (b)本算法用同地区、同时相的 AVHRR-17 1B 数据反演的地表温度

Fig. 4 Comparison between the MODIS Level 2 LST products (MOD11) measured at 03:12 UTC 27 April 2008 over the Beijing area, which were provided by the University of Tokyo in Japan (a), and that retrieved from the AVHRR-17 image using the modified algorithm developed in this paper (b) over the same region at the same time

个非常困难的任务。此外,根据卫星数据反演的地表温度与地面观测的地表温度颇为不同,卫星是在一个较大的瞬时视场(IFOV)上对地物进行观测的,实际上是一个像元内的所有地物地表温度的平均值,而地面地表温度观测的范围则要小很多。本文采用了同一研究区域、同一时刻的 MODIS 的地表温度产品对其进行了对比分析(图 4,MODIS 的地表温度产品由日本东京大学提供)。

可见两种地表温度产品的分布特征总体非常相似,但使用本文方法得到的地表温度(图 4b)在植被稀疏的区域(图中的红色斑块表示的土壤、裸地和城市用地等)要比 MODIS 的地表温度高一些;而在植被浓密区域(图中蓝色斑块表示的森林等地区)则要低一些。从两种地表温度产品的散点图(图 5)可见,虽然大部分点匹配不是很完美,但其都分布在 1:1 线的附近。平均绝对偏差为 0.6 K,相关系数达到 0.88,均方根偏差为 2.1 K,说明两种地表温度产品的一致性尚好。由于是与同类型的 MODIS 地表温度产品的对比,因此,并不是说本文提出的改进型 Becker 和 Li 的分裂窗地表温度反演算法的精度就是 2.1 K。

从频率直方图(图 6a)上可见,两种地表温度产品的概率分布也较为相似;两种地表温度产品差值的频率直方图(图 6b)显示,大约有 69.6%的像元的地表温度差值在 ± 2 K 以内,37% 的像元的差值在 ± 1 K 以内。

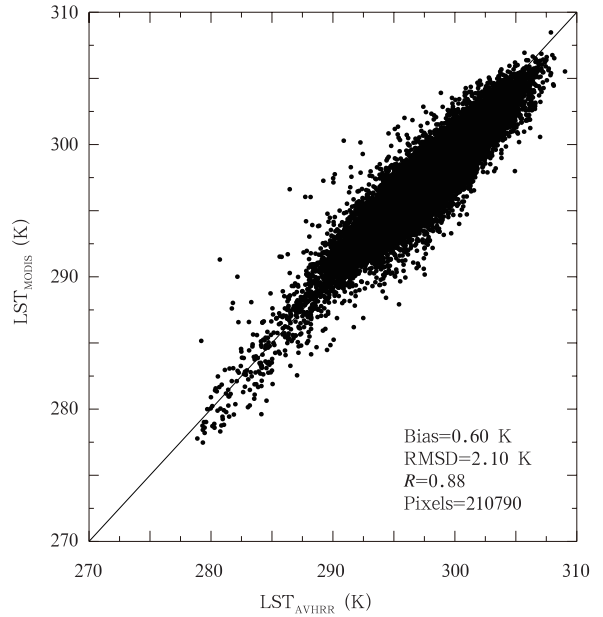


图 5 MODIS Level 2 地表温度产品与本文提出的改进型 Becker 和 Li 算法用 AVHRR-17 数据反演的地表温度产品的散点图

Fig. 5 Scatter plot of the LST from the MODIS Level 2 product vs. that derived from the AVHRR-17 using the modified Becker and Li's split window algorithm developed in this paper

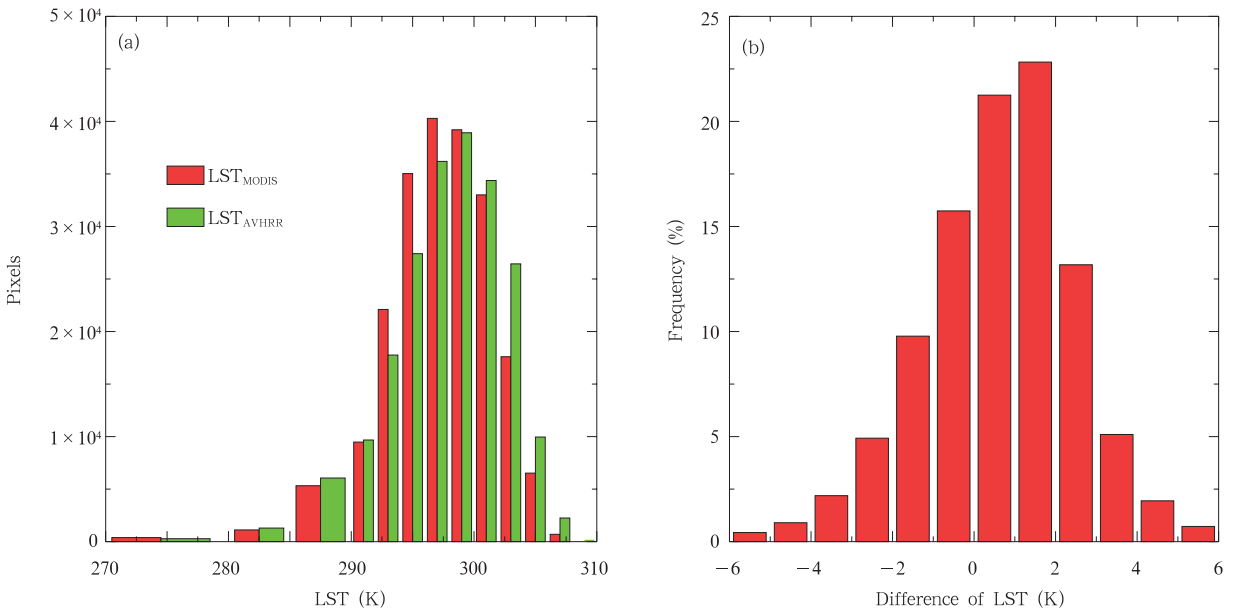


图 6 MODIS 与 AVHRR 反演的(a)地表温度、(b)地表温度差值的频率分布

Fig. 6 Histograms of the MODIS LST and those derived from the AVHRR data using the modified Becker's LST retrieval algorithm (a) and their differences (b)

5 结论与讨论

利用 MODTRAN 4 辐射传输模式模拟了不同大气和地表条件下到达卫星传感器热红外通道的光谱辐亮度;结合 AVHRR 和 VIRR 通道 4、5 的光谱响应函数计算了通道平均光谱辐亮度,进而根据逆普朗克函数计算了通道亮温并建立了温度数据集(T_s, T_4, T_5);根据建立的温度数据集,采用最小二乘法计算了适用于 AVHRR 和 VIRR 的改进型 Becker 和 Li 的分裂窗地表温度反演算法中相关参数。利用该改进型算法对一景覆盖北京及周边地区的 AVHRR-17 数据进行了地表温度反演,并将反演结果与日本东京大学的 MODIS 地表温度产品进行了对比,结果表明两者具有较好的一致性。

利用本文发展的改进型 Becker 和 Li 的分裂窗地表温度算法可以实现对从 NOAA-7 至 NOAA-18 卫星的 AVHRR 以及 FY-3A 的 VIRR 观测数据进行地表温度的反演,这将提高来自不同 AVHRR 以及 VIRR 数据反演的地表温度产品的可比性,从而提高 AVHRR 和 VIRR 的地表温度产品在气候变化研究中的应用效益。然而地表温度反演是一个非常复杂的问题,反演过程中存在诸多困难,例如地表比辐射率的准确估算、地表温度反演结果的验证等。本文虽然做了对比分析和验证,但仍然需要对该改进型算法在不同地区、不同地表和大气条件下的地表温度反演结果进行验证,这将在下一步的工作中得到解决。

参考文献

国家卫星气象中心. 2009. FY-3A 扫描辐射计(VIRR) L1 数据定标方法及相关参数//扫描辐射计相对光谱响应函数技术报告. 国家卫星气象中心, 1-2

杨虎, 杨忠东. 2006. 中国陆地区域陆表温度业务化遥感反演算法及产品运行系统. 遥感学报, 10(4): 600-607

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

Becker F. 1987. The impact of spectral emissivity on the measurement of land surface temperature from a satellite. *Int J Remote Sens*, 8(10): 1509-1522

Becker F, Li Z L. 1990. Towards a local split window method over land surfaces. *Int J Remote Sens*, 11(3): 369-393

Berk A, Anderson G P, Acharya P K, et al. 1999. MODTRAN4 user's manual, air force research laboratory space vehicles directorate air force materiel command HANSCOM AFB, MA

01731-3010: 10-35

Carson T N, Ripley D A. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sens Environ*, 62(3): 241-252

Czajkowski K P, Goward S N, Ouaidrari H. 1998. Impact of AVHRR filter function on surface temperature estimation from the split window approach. *Int J Remote Sens*, 19(10): 2007-2012

Kahle A B, Madura D P, Soha J M. 1980. Middle infrared multi-spectral aircraft scanner data: Analysis for geological applications. *Appl Opt*, 19(14): 2279-2290

Kneisys F X, Robertson D C, Abreu L W, et al. 1995. Appendix A MODTRAN 3 user instructions. The MODTRAN 2/3 and LOWTRAN 7 Model, 233-234

Korb A R, Dybwad P, Wadsworth W, et al. 1996. Portable FTIR spectroradiometer for field measurements of radiance and emissivity. *Appl Opt*, 35(10): 1679-1692

McClain E P, Pichel W G, Walton C C. 1983. Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperatures. *J Geophys Res*, 90(C6): 11587-11601

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

NOAASIS (NOAA Satellite and Information Service). 2011. Advanced Very High Resolution Radiometer-AVHRR, <http://noaa.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html>

Prata A J, Platt C M R. 1991. Land surface temperatures measurements from AVHRR // 5th AVHRR Data Users Conference. Tromso, Norway: 433-438

Price J C. 1984. Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA 7 advanced very high resolution radiometer. *J Geophys Res*, 89(D5): 7231-7237

Quattrochi D A, Luvall J C. 2000. Thermal remote sensing in land surface processes. Boca Raton: CRC Press, 13-32

Robel J. 2007. AVHRR Level 1b data base. NOAA polar orbiter data user's guide, 1-24

Robel J. 2009. Calibration of NOAA KLM instruments. NOAA KLM user's guide with NOAA-N, -N' supplement, 7: 1-11

Salisbury J W, D' Aria D M, Jarosevich E. 1991. Midinfrared (2.5—13.5 micrometers) reflectance spectra of powdered stony meteorites. *Icarus*, 92(2): 280-297

Salisbury J W, D' Aria D M. 1992. Emissivity of terrestrial materials in the 8—14 μm atmospheric window. *Remote Sens Environ*, 42(2): 83-106

Salisbury J W, Wald A, D' Aria D M. 1994. Thermal-infrared remote sensing and Kirchhoff's law 1. Laboratory measurements. *J Geophys Res*, 99(B6): 11897-11911

Sobrinho J A. 1989. Desarrollo de un modelo teórico para implementarla medida de la temperatura realizada mediante teledetección. Aplicación a un campo de naranjos. Valencia, Spain: University

- of Valencia, 169-170
- Sobrino J A, Caselles V, Becker F. 1990. Significance of the remotely sensed thermal infrared measurements obtained over a citrus orchard. *ISPRS Photogramm Engineer Remote Sens*, 44(6): 343-353
- Sobrino J A, Caselles V, Coll C. 1993. Theoretical split window algorithms for determining the actual surface temperature. II *Nuovo Cimento*, 16(3): 219-236
- Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C, El-Kharraz J, et al. 2004a. Single-channel and two-channel methods for land surface temperature retrieval from DIAS data and its application to the Barrax site. *Int J Remote Sens*, 25(1): 215-230
- Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C, Paolini L. 2004b. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remot Sens Environ*, 90(4): 434-440
- Ulivieri C, Castronuovo M M, Francioni R, et al. 1994. A split window algorithm for estimating land surface temperature from satellite. *Adv Space Res*, 14(3): 59-65
- Valor E, Caselles V. 1996. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African and South American areas. *Remote Sens Environ*, 57(3): 167-184
- Van de Griend A A, Owe M. 1993. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *Int J Remote Sens*, 14(6): 1119-1131