

基于 MODIS 和 TM 数据的陆面温度反演

张兆明^{1),2)} 何国金¹⁾ 肖荣波³⁾ 王威¹⁾ 欧阳志云³⁾

¹⁾(中国科学院中国遥感卫星地面站重点实验室, 北京 100086)

²⁾(中国科学院研究生院, 北京 100039)

³⁾(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要 陆地表面温度(LST)反演一直是热红外遥感研究中的一大难题。目前,分辨率较高的 Landsat5/TM 数据是陆地表面温度(LST)反演的常用遥感信息源。然而,由于 TM 只有一个热通道,大多数情况下由 TM6 数据得到的都是星上亮度温度,与实际地表温度有较大差距。普适性单通道算法的提出为从 TM6 数据高精度地反演地表真实温度提供了可能。为寻找一条从 TM6 数据高精度反演陆地表面温度的有效途径,利用该算法对北京地区的地表温度进行了反演试验,对该算法必需的总大气水汽含量通过 MODIS 数据计算获得。同时利用卫星过境时的同步实测数据对反演精度进行了检验,并与用标准大气数据得到的结果进行了比较。其结果表明,该方法具有较高的反演精度,其 rmsd 值为 1.67℃,显示了多源数据结合的优势。

关键词 普适性单通道算法 陆地表面温度 北京 总大气水汽含量 MODIS

中图分类号: TP79 P236 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2007)02-0366-05

Land Surface Temperature Retrieval Based on MODIS and TM Data

ZHANG Zhao-ming^{1),2)}, HE Guo-jin¹⁾, XIAO Rong-bo³⁾, WANG Wei¹⁾, OUYANG Zhi-yun³⁾

¹⁾(Key Laboratory, China Remote Sensing Satellite Ground Station, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086)

²⁾(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

³⁾(Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085)

Abstract Land surface temperature(LST) retrieval has been a key issue in the thermal infrared remote sensing research area. Landsat5 TM data with a higher spatial resolution thermal infrared band of 120m was often used to retrieve land surface temperature. However, the fact that Landsat 5 possesses only one thermal infrared band is also a critical limitation for LST retrieval. In most cases, only at-satellite brightness temperature was thus obtained from TM6 data, which is far different from the land surface temperature. Hence the precision of land surface temperature retrieval was actually not so satisfied. While the proposal of the generalized single-channel algorithm in 2003 makes it possible to figure out land surface temperature from TM6 data with high precision. Based on this algorithm, a test for land surface temperature retrieval of Beijing region was carried out with Landsat 5 TM data acquired on 6 May 2005. MODIS data received on the same day was used to compute the total atmospheric water vapor content which is necessary for the algorithm. Furthermore, the retrieving result has been validated using simultaneously measured in situ data, and compared with that of using standard atmosphere data. A significantly high precision with a root mean square deviation(rmsd) of 1.67℃ has been achieved by the approach introduced in this paper, which shows the advantages of synthetically utilizing multi-satellite data.

Keywords generalized single-channel algorithm, land surface temperature, Beijing, total atmospheric water vapor content, MODIS

基金项目:国家自然科学基金项目(60272032);中国科学院知识创新工程方向性资助项目(KZCX3-SW-424)

收稿日期:2005-06-16;改回日期:2005-11-28

第一作者简介:张兆明(1980~),男,中国科学院中国遥感卫星地面站在读硕士研究生。研究方向为遥感图像与信息处理。E-mail:

zmzhang@ne.rsgs.ac.cn

1 引言

陆地表面温度(land surface temperature, LST)是一个重要的地球物理参数,它在地-气间的物质与能量交换的过程中起着重要的作用。目前,基于卫星遥感数据海洋温度(sea surface temperature, SST)信息提取的研究已较为成熟,其精度可达到 1K 左右。由于陆地表面远比海洋表面复杂,陆地表面温度(LST)反演一直是热红外遥感研究中的一大难题。Landsat5 TM 自从 1984 年 3 月 1 日发射以来,已经在资源环境等领域得到了广泛应用。TM6 为热红外波段,空间分辨率为 120m,与 NOAA/AVHRR 数据相比,空间分辨率大大提高,能够更高精度地反演陆地表面温度,然而由于 TM 只有一个热通道,要得到地表真实温度一般需要利用辐射传输方程的方法,实时资料的缺乏限制了该方法的应用。因而由 TM6 数据得到的通常都是星上亮度温度,而星上亮度温度与地表真实温度差距较大,因此,其反演的精度不高。近年来针对只有一个热通道传感器的普适性单通道算法的提出,为从 TM6 较高精度地反演地表真实温度提供了可能。该算法需要预先求算总大气水汽含量,总大气水汽含量反演通常是用标准大气进行模拟代替,因为实时的大气剖面资料非常有限,所以这种模拟的精度较低。有的研究中整个研究区域仅用一个大气水汽含量值,这种做法的精度往往也较低。

MODIS 是当前世界上新一代“图谱合一”的光学遥感仪器,有 36 个离散光谱波段,光谱范围宽,从 0.4 μm (可见光)到 14.4 μm (热红外)全光谱覆盖,分别针对陆地、海洋、大气等波段特征设计。在 36 个波段中,有 5 个近红外波段,分别是波段 2、5、17、18 和 19,其中 17、18 和 19 波段是水汽吸收波段,而波段 2、5 是大气窗口波段。这样设计的主要目的是为了利用 MODIS 反演大气中水汽含量。利用 MODIS 反演大气水汽含量能够有效提高大气水汽含量反演精度,从而提高陆地表面温度的反演精度。本文采用 2005 年 5 月 6 日过境的北京地区的 MODIS 和 TM 数据进行陆地表面温度反演试验。首先利用 MODIS 数据计算大气水汽含量,然后基于普适性单通道算法反演陆地表面温度,最后对反演结果进行了精度检验。考虑到不同时间总大气水汽含量的可能变化,试验选用与 Landsat5 TM 过境时间

接近的 EOS/TERRA MODIS 数据。

2 普适性单通道算法

普适性单通道算法^[1]是 Jiménez-Muñoz 和 Sobrino 在 2003 年提出的,与其他单通道方法相比,该方法的优点是它不需要太多实时资料。同劈窗算法相比,它的优点是其适用于不同的传感器。对 TM6 而言反演过程如下:

$$T_i = \gamma[\varepsilon^{-1}(\psi_1 L_{\text{sensor}} + \psi_2) + \psi_3] + \delta \quad (1)$$

$$\gamma = \left\{ \frac{c_2 L_{\text{sensor}}}{T_{\text{sensor}}^2} \left[\frac{\lambda^4}{c_1} L_{\text{sensor}} + \lambda^{-1} \right] \right\}^{-1} \quad (2)$$

$$\delta = -\gamma L_{\text{sensor}} + T_{\text{sensor}} \quad (3)$$

T_i 为陆地表面温度, L_{sensor} 是星上辐射值,单位为 $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$, T_{sensor} 是星上亮度温度,单位为 K, λ 是有效波长(TM6 的有效波长为 11.457 μm), ε 是地表比辐射率, $c_1 = 1.19104 \times 10^8 (\text{W}\mu\text{m}^4\text{m}^{-2}\text{sr}^{-1})$, $c_2 = 14387.7\mu\text{mK}$ 。 ψ_1, ψ_2, ψ_3 是大气函数,对 TM6 而言,可以由总大气水汽含量(w)根据下列方程计算得到:

$$\psi_1 = 0.14714w^2 - 0.15583w + 1.1234 \quad (4)$$

$$\psi_2 = -1.1836w^2 - 0.37607w - 0.52894 \quad (5)$$

$$\psi_3 = -0.04554w^2 + 1.8719w - 0.39071 \quad (6)$$

L_{sensor} 和 T_{sensor} 分别是光谱辐射亮度和亮度温度,相关计算参见文献[2]。

3 基于 MODIS 的总大气水汽含量反演

有关研究表明可以利用比值方法基于 MODIS 数据反演总大气水汽含量^[3-5]。比值方法考虑了辐射传输过程中由于水汽吸收而导致的辐射能量的衰减。水汽吸收通道的透过率可以由水汽吸收通道和大气窗口通道传感器接收到的辐射值的比值得到,然后由水汽吸收通道的透过率求算总大气水汽含量。下面对比值方法进行理论推导。

反演水汽算法是以辐射传输方程为基础进行推导的。辐射传输方程可以写成如下的简化式:

$$L_{\text{sensor}}(\lambda) = L_{\text{sun}}(\lambda)\tau(\lambda)\rho(\lambda) + L_{\text{path}}(\lambda) \quad (7)$$

式中, λ 为波长, $L_{\text{sensor}}(\lambda)$ 是传感器接收到的辐射强度, $L_{\text{sun}}(\lambda)$ 是大气顶层的太阳辐射强度, $\tau(\lambda)$ 是大气总透过率,等于从太阳到地表的大气透过率和从地表到传感器的大气透过率的乘积。 $\rho(\lambda)$ 是地

表二向反射率, $L_{\text{path}}(\lambda)$ 是大气程辐射。

将等式两端同除以 $L_{\text{sun}}(\lambda)\rho(\lambda)$ 得到:

$$\tau(\lambda) = L_{\text{sensor}}(\lambda) / (L_{\text{sun}}(\lambda)\rho(\lambda)) - L_{\text{path}}(\lambda) / (L_{\text{sun}}(\lambda)\rho(\lambda)) \quad (8)$$

在天气晴朗的情况下, 式(10)右边第 2 项相对于第 1 项非常小, 可以忽略不计。因此式(10)可以简化为

$$\tau(\lambda) \approx L_{\text{sensor}}(\lambda) / L_{\text{sun}}(\lambda)\rho(\lambda) \quad (9)$$

大气透过率主要与大气水汽有关, 其中 $\rho(\lambda)$ 对于不同的波长, 地面的反射率不同。但是在 $0.85\mu\text{m}$ 和 $1.25\mu\text{m}$ 之间, 反射率基本上满足线性关系^[6]。从而可以利用比值法计算大气透过率。

MODIS17、18 和 19 通道(中心波长分别为 $0.905\mu\text{m}$ 、 $0.936\mu\text{m}$ 和 $0.94\mu\text{m}$) 为水汽吸收通道, 2、5 通道(中心波长分别为 $0.865\mu\text{m}$ 和 $1.24\mu\text{m}$) 为大气窗口通道, 这样就可以由水汽吸收通道和大气窗口通道传感器接收到的辐射值的比值得到水汽吸收通道的透过率, 然后由水汽吸收通道的透过率求算总大气水汽含量。根据 Sobrino 等人的研究可以通过以下算法计算总大气水汽含量^[7]。

首先按下式计算大气吸收通道与大气窗口通道的比值 G_{17} 、 G_{18} 和 G_{19} :

$$G_{17} = \frac{L_{17}}{L_2} \quad (10)$$

$$G_{18} = \frac{L_{18}}{L_2} \quad (11)$$

$$G_{19} = \frac{L_{19}}{L_2} \quad (12)$$

L_{17} 、 L_{18} 和 L_{19} 分别是 17、18 和 19 通道传感器接收到的辐射强度。辐射强度(L)按下式计算:

$$L = \text{radiance_scales}(SI - \text{radiance_offsets}) \quad (13)$$

其中, radiance_scales 和 radiance_offsets 分别是各波段的辐射率缩放比和辐射率截距, SI 为 MODIS 1B 数据中的存储值。

然后, 计算各通道的水汽含量:

$$W_{17} = 26.314 - 54.434G_{17} + 28.449G_{17}^2 \quad (14)$$

$$W_{18} = 5.012 - 23.017G_{18} + 27.884G_{18}^2 \quad (15)$$

$$W_{19} = 9.446 - 26.887G_{19} + 19.914G_{19}^2 \quad (16)$$

在同样的大气情况下, 大气水汽在 3 个通道的吸收情况并不相同。为了计算平均水汽含量, 需要为各通道赋予一个权重, 这样最终总大气水汽含量(W)按下式确定:

$$W = 0.192W_{17} + 0.453W_{18} + 0.355W_{19} \quad (17)$$

以上得到结果的空间分辨率为 1000m , 为了便于和 TM 数据匹配, 将其重采样为 30m 。

4 地表比辐射率计算

利用普适性单通道算法反演陆地表面温度, 还需要先计算比辐射率。对于只有一个热通道的传感器, 一般通过以下两种方式获取比辐射率:

(1) 通过分类图像, 对每一个类别赋予相应的比辐射率值, 但是由于分类误差的存在, 有些像元并非单一地物类型, 导致计算的比辐射率存在较大的误差。

(2) 先计算 $NDVI$, 然后由 $NDVI$ 获取比辐射率。

本文将以上两种方法结合起来计算比辐射率。首先将研究区域进行监督分类, 利用最大似然法将图像分为建筑区、自然表面和水体。然后根据分类结果, 利用 $NDVI$ 计算比辐射率 ε 。

计算过程如下^[8]:

(1) 对水体类型 $\varepsilon = 0.995$

(2) 对自然表面, 地表主要由植被和裸土混合组成, 可用下式计算 ε :

$$\varepsilon = P_v r_v \varepsilon_v + (1 - P_v) r_s \varepsilon_s + d\varepsilon \quad (18)$$

式中, r_v 和 r_s 分别是植被和裸土的温度比率, P_v 是植被占混合像元的比例, ε_v 和 ε_s 分别是植被和裸土的比辐射率, 取 $\varepsilon_v = 0.986$, $\varepsilon_s = 0.97215$ 。

$$r_v = 0.9332 + 0.0585P_v \quad (19)$$

$$r_s = 0.9902 + 0.1068P_v \quad (20)$$

$d\varepsilon$ 是植被和裸土之间的热辐射相互作用对地表比辐射率的贡献, $d\varepsilon$ 由如下经验公式估计:

$$\text{当 } P_v \leq 0.5 \text{ 时, } d\varepsilon = 0.0038P_v \quad (21)$$

$$\text{当 } P_v > 0.5 \text{ 时, } d\varepsilon = 0.0038(1 - P_v) \quad (22)$$

当 $P_v = 0.5$ 时, $d\varepsilon$ 最大, $d\varepsilon = 0.0019$

P_v 可由下式计算^[9]:

$$P_v = \left[\frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right]^2 \quad (23)$$

$NDVI_{\max}$ 、 $NDVI_{\min}$ 分别是完全植被区和完全非植被区的 $NDVI$ 值, $NDVI_{\max}$ 近似取值为 0.70 , $NDVI_{\min}$ 近似取值为 0.05 。

如果 $NDVI > NDVI_{\max}$ 则取 $P_v = 1$

如果 $NDVI < NDVI_{\min}$ 则取 $P_v = 0$

(3) 对建筑区, 地表主要由各种建筑物表面和分布其中的绿化植被组成, 类似地

$$\varepsilon = P_v r_v \varepsilon_v + (1 - P_v) r_m \varepsilon_m + d\varepsilon \quad (24)$$

其中, r_m 是建筑表面的温度比率; ε_m 是建筑表面的比辐射率, ε_m 取 0.970, $d\varepsilon$ 的计算方法与上面类似。

$$r_m = 0.9886 + 0.1287P_v \quad (25)$$

为了提高 NDVI 计算的精度, 进而提高比辐射率计算的精度, 这里对 TM3 和 TM4 进行了基于图像的大气校正。校正过程如下:

地表反射率(ρ)按下式计算^[10]:

$$\rho = \frac{\pi(L_{sat} - L_p)d^2}{E_0 \cos\theta_z T_z} \quad (26)$$

L_{sat} 是星上辐射值, T_z 是太阳和地表之间的大气透过率, θ_z 是太阳天顶角, 与头文件中给出的太阳高度角互为余角, E_0 是大气顶部的太阳辐照度, d 是日地距离, E_0 可在文献[11]中查到, d 根据下式计算^[12]:

$$d = 1 + 0.0167 \sin[2\pi(D - 93.5)/365] \quad (27)$$

其中, D 为数据获取日期距 1 月 1 日的天数, d 为天文单位。 L_p 是电磁辐射与大气成分(大气分子及大

气中的悬浮物)相互作用产生的辐射量, 根据下式计算:

$$L_p = L_{min} - L_{1\%} \quad (28)$$

L_{min} 是直方图中频数累加和等于总像素个数 0.01% 的像素 DN 值所对应的辐射值。

$$L_{1\%} = \frac{0.01 \cos\theta_z T_z E_0}{\pi d^2} \quad (29)$$

T_z 由下式来估计^[13]:

$$T_z = \cos\theta_z \quad (30)$$

利用上述方法即可反演出北京地区的陆地表面温度。

5 精度检验

为了对反演结果的精度进行验证, 这里将用本文方法所得结果和用标准大气数据所得结果与 2005 年 5 月 6 日卫星过境时的实测地表温度进行了比较, 比较结果如表 1 所示。

表 1 两种反演结果的比较

Tab.1 Comparison between the two retrieval results

测点	本文方法所得结果 (°C)	利用标准大气所得结果 (°C)	实测值 (°C)	本文方法所得结果与实测值之差 (°C)	利用标准大气数据所得结果与实测值之差 (°C)
1(水体 1)	16.6	15.1	17.6	-1.0	-2.5
2(水体 2)	17.8	15.6	17.5	0.3	-1.9
3(裸地)	28.7	35.2	27.3	1.4	7.9
4(楼顶)	27.7	33.4	24.6	3.1	8.8
5(泥土地)	23.5	27.1	25.4	-1.9	1.7
6(草地 1)	24.6	29.1	23.2	1.4	5.9
7(草地 2)	20.2	21.2	19.1	1.1	2.1
			<i>bias</i>	0.63	3.14
			σ	1.67	4.52
			<i>rmsd</i>	1.67	5.23

由表 1 可以看出, 两种反演结果差异较大, *rmsd* 值分别为 1.67 和 5.23, 对于较均一的地表, 比如水体、草地, 本文方法的精度在 1°C 左右。由于用 MODIS 可以得到较精确的大气水汽含量数据, 从而使陆地表面温度反演的精度大大提高。

6 结论

普适性单通道算法的提出使得从只有一个热通道的传感器反演地表真实温度成为了可能, 可以利

用普适性单通道算法从 TM6 数据得到地表真实温度, 由此推动了 TM6 数据的广泛使用。

利用 MODIS 数据能够提高大气水汽含量反演的精度, 进而提高陆地表面温度反演的精度。

将 MODIS 数据和 TM 数据相结合, 能够充分发挥两种数据的优势, 获得较高精度的地表温度反演结果。

需要指出的是, MODIS 和 TM 的具体成像时间差异可能引起总大气水汽含量的变化误差。幸运的是, EOS/TERRA 和 EOS/AQUA 两颗卫星每天在我

国大部分地区可观测 4 次, EOS/TERRA 的过境时间为当地时间上午 10:30 和晚上 10:30, 本文所用的 MODIS 数据来自于 EOS/TERRA 上午的观测数据, 具有与 Landsat5 TM 几乎相同的过境时间。在较短的时间间隔和天气状况很好的情况下(本文中的 TM 和 MODIS 的图像质量都非常好), 可以认为 MODIS 和 TM 成像时的总大气水汽含量基本相同, 不会对反演精度产生大的影响。

参考文献 (References)

- 1 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** (D22): 4688 ~ 4695.
- 2 Markham B L, Barker J L. Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures [J]. *EOSAT Landsat Technical Notes*, 1986, (1): 3 ~ 8.
- 3 Frouin R, Deschamps P-Y, Lecomte P. Determination from space of atmospheric total water vapor amounts by differential absorption near 940nm: theory and airborne verification [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1990, **29**(6): 448 ~ 460.
- 4 Gao B C, Goetz F H, Westwater E R, *et al.* Possible near-IR channels for remote sensing precipitable water vapor from geostationary satellite platforms [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, **32**(12): 1791 ~ 1801.
- 5 Bouffies S, Breon F M, Tanre D, *et al.* Atmospheric water vapor estimate by a differential absorption technique with the POLDER instrument [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102** (D3): 3831 ~ 3841.
- 6 Kaufman Y J, Gao B C. Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, **30**(5): 871 ~ 884.
- 7 Sobrino J A, Kharraz J EL. Surface temperature and water vapor retrieval from MODIS data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, **24**(24): 5161 ~ 5182.
- 8 QIN Zhi-hao, LI Wen-juan, XU Bin, *et al.* The estimation of land surface emissivity for Landsat TM6 [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2004, (3): 28 ~ 32. [覃志豪, 李文娟, 徐斌等. 陆地卫星 TM6 波段范围内地表比辐射率的估计 [J]. *国土资源遥感*, 2004, (3): 28 ~ 32.]
- 9 Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, **62**(3): 241 ~ 252.
- 10 Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM5 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **90**(4): 434 ~ 440.
- 11 Thenkabail P S. Biophysical and yield information for precision farming from near-real-time and historical Landsat TM images [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, **24** (14): 2879 ~ 2904.
- 12 Vander Meer F. Spectral mixture modeling and spectral stratigraphy in carbonate lithofacies mapping. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1996, **51**(3): 150 ~ 162.
- 13 Chavez P S. Image-based atmospheric correction-revisited and improved [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1996, **62**(9): 1025 ~ 1036.