

文章编号: 1007-6301 (2003) 05-0507-08

# 利用 A S T E R 遥感数据反演陆面温度 的算法及应用研究

刘志武, 党安荣, 雷志栋, 黄聿刚

(清华大学, 北京 10084)

**摘 要:** 陆面温度是地气交换过程的一个重要参数, 在生态环境研究中应用很广。传统方法只能进行点上的观测和计算, 遥感的出现则使得计算区域陆面温度成为可能。A S T E R 遥感数据具有较高的空间分辨率和光谱分辨率, 能够提供比 N O A A / A V H R R 和 L a n d s a t 等遥感数据更丰富的陆面信息, 有助于提高反演陆面温度的精度。本文以新疆自治区阿瓦提县典型研究区域为例, 根据 A S T E R 遥感数据的特点, 基于温度/比辐射率分离算法的思想, 运用 A D E (A l p h a D e r i v e d E m i s s i v i t y)、比值法和 M M D (M a x i m u m M i n i m u m D i f f e r e n c e) 三个模块计算陆面温度, 并简要分析了模型的主要误差来源。分析结果表明本文所采用的算法是可行的, A S T E R 遥感数据用于反演陆面温度可以取得比较理想的结果, 具有良好的应用前景。

**关 键 词:** A S T E R 遥感数据; 陆面温度

**中图分类号:** T P 7 9

目前陆面温度反演的研究大多是以劈窗法为基础, 利用热红外遥感数据获取。N O A A / A V H R R 含有两个热红外通道, 可利用的数据丰富而且容易获得, 所以在温度反演中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。另外 M O D I S、G M S 5 / V I S S R 和 L a n d s a t T M 等遥感数据也常被应用于反演陆面温度<sup>[2, 3]</sup>。上述遥感数据或者是空间分辨率低, 或者是热红外波段较少, 对地表特征复杂的陆面而言, 计算误差较大。而 A S T E R 遥感数据具有较高的空间分辨率和较多的热红外波段 (参数见表 1), 能够提供比较丰富的陆面信息, 有助于提高反演陆面温度的精度。

## 1 A S T E R 遥感数据特征

1999 年 12 月美国发射了地球观测系统 E O S (E a r t h O b s e r v i n g S y s t e m) 的第一颗卫星 T e r r a, A S T E R (A d v a n c e d S p a c e b o r n e T h e r m a l E m i s s i o n a n d R e f l e c t i o n R a d i o m e t e r) 是其上搭载的 5 种探测仪器之一。A S T E R 有 3 个光学系统, 即可见光和近红外辐射仪 V N I R (V i s i b l e a n d N e a r - I n f r a r e d)、短波红外辐射仪 S W I R (S h o r t W a v e I n f r a r e d) 和热红外辐射仪 T I R (T h e r m a l I n f r a r e d), 分别在 14 个波段成像, 具有较高的空间分辨率和光谱分辨率。

收稿日期: 2003-04; 修订日期: 2003-05

基金项目: 国家 973 重点基础项目 (G199904350602)

作者简介: 刘志武 (1977-), 男, 博士研究生。E-mail: lzw99@mails.tsinghua.edu.cn

另外装备一个后视近红外波段 (3B), 可以进行立体观测。ASTER 数据基本性能参数见表 1。

## 2 陆面温度计算方法

陆面温度和比辐射率的计算一直是被关注的问题, 有关研究人员提出了许多算法。目前, ASTER 官方采用的是温度/比辐射率分离算法 TES (Temperature/Em issivity Separation)<sup>[5]</sup>。TES 包含了 NEM (Nomalized Em issivity Method)、比值法 (RATD Algorithm) 和 MMD (M aximum M inimum D ifference) 三个模块。然而, NEM 计算过程较复杂, 为此, 本文在 TES 的基础上, 用 ADE (Alpha Derived Em issivity) 算法替代 NEM 计算温度和比辐射率的初值, 再利用比值法和 MMD 法进行迭代计算, 得到最终结果。

### 2.1 ADE 算法<sup>[5, 6]</sup>

ADE 算法 (Kealy and Gabell, 1990 年) 和 NEM 算法的精度相当, 但 ADE 适用范围较广, 可应用于不同地表特征的陆面, 如植被和火成岩等。

表 1 ASTER 遥感数据基本性能参数<sup>[4]</sup>  
Tab. 1 Characteristics of the ASTER Sensor Systems<sup>[4]</sup>

子系统	波 段	波谱范围 (μm)	地面分辨率 (m)
VN IR	1	0. 52~ 0. 60	15
	2	0. 63~ 0. 69	
	3N	0. 78~ 0. 86	
	3B	0. 78~ 0. 86	
	4	1. 60~ 1. 70	
SW IR	5	2. 145~ 2. 185	30
	6	2. 185~ 2. 225	
	7	2. 235~ 2. 285	
	8	2. 295~ 2. 365	
	9	2. 36~ 2. 43	
	10	8. 125~ 8. 475	
T IR	11	8. 475~ 8. 825	90
	12	8. 925~ 9. 275	
	13	10. 25~ 10. 95	
	14	10. 95~ 11. 65	

ADE 算法的基本原理是 Kirchhoff 定律和 Planck 公式。

Kirchhoff (1860 年) 指出物体的波谱吸收率等于其发射率, 它反映了实际物体的光谱辐射率  $R$  与同一温度、同一波长绝对黑体光谱辐射率  $B$  的关系:

$$\epsilon = \frac{R}{B}$$

(1)

式中,  $\epsilon$  是比辐射率。

绝对黑体的辐射能力遵循 Planck 公式:

$$B = \frac{c_1}{\pi \lambda^5 (\exp (c_2 / \lambda T) - 1)}$$

(2)

式中,  $B$  黑体光谱辐射率 ( $\text{W} \cdot \mu\text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ );  $\lambda$  波长 ( $\mu\text{m}$ );  $c_1 = 3.741 \times 10^{-4} \text{W} \cdot \mu\text{m}^2$ ;  $c_2 = 1.44 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ ;  $T$  黑体绝对温度 (K)。

根据式 (1) 和 (2), 得到实际物体的辐射规律:

$$R = \frac{\epsilon c_1}{\pi \lambda^5 (\exp(c_2/\lambda T) - 1)} \quad (3)$$

式中,  $R$  实际物体光谱辐射率 ( $\text{W} \cdot \mu\text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ); 其他参数意义同前。

地表温度一般在 300K 左右, 当  $T = 300\text{K}$  时, 对于 ASTER 的任一热红外波段  $i$  应用式, 因为  $\exp(c_2/\lambda T) \gg 1$ , 所以忽略式分母中的  $-1$  项, 两边取对数并线性化, 得:

$$\frac{c_2}{T} = \lambda \ln(\epsilon) - \lambda \ln(R_i) + \lambda \ln(c_1) - 5\lambda \ln(\lambda) - \lambda \ln(\pi) \quad (4)$$

对各热红外波段分别应用上式, 并相加得:

$$\begin{aligned} \frac{c_2}{T} = & \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \lambda_j \ln(\epsilon_j) - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \lambda_j \ln(R_j) - \\ & \frac{5}{n} \sum_{j=1}^n \lambda_j \ln(\lambda_j) + \frac{\ln(c_1) - \ln(\pi)}{n} \sum_{j=1}^n \lambda_j \end{aligned} \quad (5)$$

式 (5) - (4) 并整理得:

$$\lambda \ln(\epsilon) - u = \lambda \ln(R_i) - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \lambda_j \ln(R_j) + S_i \quad (6)$$

$$S_i = 5\lambda \ln(\lambda) - \frac{5}{n} \sum_{j=1}^n \lambda_j \ln(\lambda_j) - (\ln(c_1) - \ln(\pi)) (\lambda - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \lambda_j) \quad (7)$$

$$u = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \lambda_j \ln(\epsilon_j) \quad (8)$$

式中,  $n$  为波段数, 对于 ASTER,  $n = 5$ 。

式中的  $S_i$  与  $R_i$  无关, 可视作常数, 取 ASTER 各波段的中心波长分别为 8.3, 8.65, 9.1, 10.6, 11.3 (单位:  $\mu\text{m}$ ), 则相应的  $S_i$  分别为 -32.580, -23.928, -12.699, 25.503, 43.704 (单位:  $\mu\text{m}$ )。

式中共有 6 个未知数, 即比辐射率  $\epsilon$  ( $i = 1, 5$ ) 和陆面温度  $T$ , 但只有 5 个方程, 因此需要增加 1 个方程。令  $\alpha = \lambda \ln(\epsilon) - u$ , 则由式右侧可计算出各  $\alpha_i$ 。  $u$  与  $\alpha$  的方差  $\sigma_\alpha^2$  具有指数关系<sup>[6]</sup>:

$$u = -1.544 (\sigma_\alpha^2)^{1/4} \quad (9)$$

这样就可以得到各波段的比辐射率:

$$\epsilon = \exp\left(\frac{\alpha + u}{\lambda}\right) \quad (10)$$

代入式得到陆面温度  $T$ 。将得到的温度和比辐射率作为初值, 利用比值法和 MMD 算法进行迭代计算。

## 2.2 比值法<sup>[5]</sup>

计算相对比辐射率  $\beta_i$ :

$$\beta_i = \frac{\epsilon_i}{\epsilon_i/5}$$

(11)

2.3 MMD 算法<sup>[5]</sup>

$$MMD = \max(\beta_i) - \min(\beta_i)$$

(12)

$$\epsilon_{\min} = 0.994 - 0.687 \times MMD^{0.737}$$

(13)

$$\epsilon_i = \beta_i(\epsilon_{\min}/\min(\beta_i))$$

(14)

式中,  $\epsilon_{\min}$  是  $\epsilon$  的最小值, 其他参数意义同前。

选择最大  $\epsilon$  所在波段, 根据式计算陆面温度  $T$ :

$$T = \frac{c_2}{\lambda_i} / \ln \left( \frac{\epsilon_i c_1}{\pi \lambda_i^5 R_m} + 1 \right)$$

(15)

式中,  $\epsilon_i$  是  $\epsilon$  的最大值,  $\lambda_i$  和  $R_m$  分别是  $\epsilon_i$  所在波段的中心波长和光谱辐射率。

根据式得到的  $T$  计算其他波段的比辐射率:

$$\epsilon_i = \pi R_i \lambda_i^5 (\exp(c_2/\lambda_i T) - 1) / c_1$$

(16)

重复式 (11) 至 (16) 的计算步骤, 直至相邻两次计算的陆面温度差值达到精度要求。

3 典型区域应用与分析

本文选取新疆维吾尔自治区阿瓦提县的一个典型区域为研究对象 (图版IV, 图 1), 应用 2001 年 6 月 28 日的 ASTER 遥感数据和温度/比辐射率分离算法 TES 计算陆面温度, 并以阿瓦提气象站提供的当日气象资料 (如平均、最高和最低气温) 和地表 0cm 平均温度等进行计算结果评价。

研究区域位于阿瓦提县的西南, 北纬 40°20′~40°38′, 东经 80°12′~80°20′, 海拔高程 1041~1054m。气候属于暖温带大陆性荒漠气候, 日照长, 温差大, 气候干燥, 降雨量稀少。区域内主要农作物是棉花, 野生植被主要是胡杨、红柳和芦苇等。

将 ASTER 遥感数据 VNIR 子系统的 3 个波段按 321 的顺序组合 (图版IV, 图 1), 运用 ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) 算法<sup>[7]</sup>进行非监督分类。研究区域分为水体、植被 (包括农田和野生植被) 及荒地三类, 分类结果见图版IV, 图 2, 各分类面积见表 2。

表 2 土地利用分类面积表 (单位:  $\text{km}^2$ )  
Tab. 2 Area of different landuse types (unit:  $\text{km}^2$ )

分 类	水 体	荒 地	植 被	总 计
面 积	1760.2	40905.6	37355.8	80021.6

利用 ASTER 的热红外波段 10~14, 按照上述算法, 计算地表温度, 其空间分布图见

图版IV, 图 3, 直方统计图见图 4。由图版IV, 图 3 和表 3 可以看出, 水体和植被温度较低, 一般在 300~ 310K 之间, 平均温度约 308K; 荒地组成较复杂, 受地下水位、土壤物质组成等因素影响, 温度变化幅度较大, 主要分布在 310~ 330K 之间, 平均温度约 317K。图 4 表明区域陆面温度有两个明显的峰值, 一个约为 307K, 对应于植被和水体; 另一个约 322K, 对应于荒地。

表 3 陆面温度分类统计 (单位: K)  
Tab. 3 Statistics of land surface temperature (unit: K)

分 类	水 体	荒 地	植 被	总 计
均 值	307. 8	317. 2	308. 1	312. 7
众 数	307. 4	322. 6	306. 6	307. 8

当日的平均、最高和最低气温分别为 299K、307. 3K 和 289K, 地表 0cm 平均温度为 311K。

由于气象资料无法反映区域温度分布特征, 而且又缺少陆面温度的实测数据, 因此对模型计算结果的精度难以验证。然而, 由遥感数据可以直接计算得到各波段的亮度温度, 从理论上讲, 陆面温度应该比所有波段的亮度温度高, 所以亮度温度最大值可以用来定性的评价计算结果。

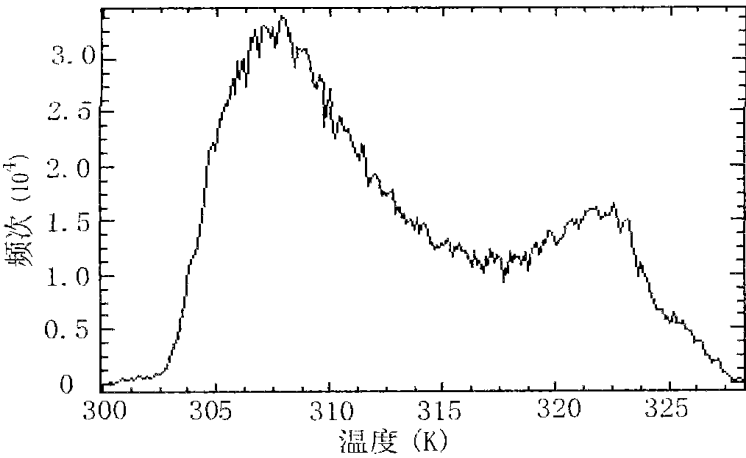


图 4 陆面温度直方图统计  
Fig. 4 Histogram of land surface temperature

利用 Planck 公式计算亮度温度  $T_{bi}$ :

$$T_{bi} = \frac{c_2}{\lambda \ln \left( \frac{c_1}{TB_i \lambda^5} + 1 \right)}$$

(17)

5 个波段亮度温度的最大值空间分布见图 5, 分类统计见表 4。

陆面温度比最大亮度温度高 3K 左右，区域平均陆面温度也与气象站实测地表 0cm 平均地温接近，可以认为结果是比较合理的。

表 4 最大亮度温度分类统计 (单位: K)  
Tab. 4 Statistics of maximum brightness temperature (unit: K)

分 类	水 体	荒 地	植 被	总 计
均 值	304.9	314.1	305.2	309.7
众 数	305.8	318.9	304.1	304.9

4 计算理论误差分析

陆面温度是反映地表特征的一个重要参数，具有很大的空间变异性和区域性，目前反演陆面温度的遥感模型均作了一定的简化，必然会产生误差。验证模型需要卫星过境时的地面实时观测资料，但这是极为困难的。因为卫星过境时间很短，几乎无法获取与卫星像元面积相匹配的地面温度数据集。下面从理论上对模型的主要误差来源作一些简要分析。

(1) 模型是基于物体表面为均匀同温的假设，而陆面是既不均匀又不同温，且所用遥感数据的空间分辨率一般也比较低(从几米到几公里)，这样得到的陆面温度其实是像元的平均温度，而不是真实地表温度。非同温混合像元的存在使得陆面温度的反演变得非常复杂，一些学者开始研究利用多角度热红外遥感数据来反演陆面温度<sup>[8,9]</sup>。

(2) 大气对地面的长波辐射有吸收、发射和散射作用，而模型中未考虑大气影响，这也是误差的一个重要来源。一般可以通过探空仪或卫星数据获取大气剖面资料<sup>[10]</sup>，再由大气模拟软件如LOW TRAN、MODTRAN 和 6S 等进行大气模拟，以估计遥感分析所需的大气参数。如缺乏实时大气剖面数据，可以用上述软件提供的标准大气剖面资料进行近似模拟。

(3) 比辐射率对于模型结果也有很大影响。地物在不同波段的比辐射率均不相同，因此反演陆面温度时，N 个波段有N + 1 个未知数，无法直接求解，必须利用先验知识进行迭代计算，如文中的公式和。这些公式是经验性的，当用于其他地区时，可能就会产生一定的误差。要使反演陆面温度的误差小于 1.0<sup>°</sup>，则比辐射率的误差量级必须小于 0.005<sup>[11]</sup>。

(4) 遥感仪器本身的性能也会对反演精度产生影响。

基于上述分析，利用遥感数据反演陆面温度的误差是无法避免的，但它仍然是目前获取大面积区域陆面温度的最有效、最简便的方法。我们可以从下面三个方面着手尽力减小反演误差：其一是尽量应用高空间分辨率、高光谱分辨率的遥感数据；其二是加强地面以及大气观察，获取与积累较多的地面温度真值和大气校正参数；其三是发展现有的遥感理论，建立更为合理的模型。

5 结论

通过对典型区域陆面温度与气象资料、亮度温度的比较，可以得出如下结论：

(1) ASTER 遥感数据的空间、光谱和辐射分辨率较高, 在反演区域陆面温度方面具有良好的应用前景。

(2) 基于温度和比辐射率分离算法的思想, 运用 ADE、比值法和 MMD 三个模块计算陆面温度, 计算过程简单, 可以快速获取陆面温度的空间分布特征。

(3) 本模型的计算基本上只依赖于遥感信息, 具有较好的通用性, 特别是为缺乏资料的地区提供了一种行之有效的陆面温度计算方法。

## 参考文献

- [1] 江东, 王乃斌等. 植被指数-地面温度特征空间的生态学内涵及其应用. 地理科学进展, 2001, 20(2): 146~ 152.
- [2] 俞宏, 石汉青. 利用分裂窗算法反演陆地表面温度的研究进展. 气象科学, 2002, 22(4): 494~ 500.
- [3] 覃志豪, Zhang Minghua 等. 用陆地卫星 TM 6 数据演算地表温度的单窗算法. 地理学报, 2001, 56(4): 456~ 466.
- [4] Abrams M., Hook S. ASTER User Handbook, Version 2[M/OL]. Jet Propulsion Laboratory. <http://asterweb.jpl.nasa.gov/>.
- [5] Gillespie A. R., Rokugawa S. Temperature/Emissivity Separation Algorithm Theoretical Basis Document, Version 2.4[M/OL]. Prepared under NASA Contract NAS5~ 31372, 1999. [http://eospo.gsfc.nasa.gov/eos\\_homepage/scientists/atbd/docs/ASTER](http://eospo.gsfc.nasa.gov/eos_homepage/scientists/atbd/docs/ASTER).
- [6] Kealy P. S., Hook S. J. Separating Temperature and Emissivity in Thermal Infrared Multispectral Scanner Data: Implications for Recovering Land Surface Temperatures. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 1993, 31(6): 1155~ 1164.
- [7] 党安荣, 王晓东等. ERDAS Imagine 遥感图像处理方法. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [8] 陈良富, 范闻捷, 柳钦火. 地表热辐射方向性研究进展. 地理科学进展, 2001, 20(3): 262~ 267.
- [9] 王锦地, 李小文. 用热辐射方向性模型反演非同温像元组分温度. 中国科学, E 辑, 2000, 30(增刊): 54~ 60.
- [10] 王寅虎, 孙龙祥. 应用 ATOV S 资料反演大气温湿廓线. 气象科学, 2001, 21(3): 348~ 354.
- [11] 杨文. 光谱比辐射率对卫星遥感地表温度影响的研究. 高原气象, 1997, 16(1): 36~ 44.

## A Retrieval Model of Land Surface Temperature With ASTER Data and Its Application Study

LIU Zhiwu, DANG Anrong, LEI Zhidong, HUANG Yugang

(Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** Being used widely in eco-environment study, Land Surface Temperature (LST) is an important parameter for land-air exchange process. Traditional observations and calculations are based on a point, while remote sensing makes it possible to calculate the region LST. At present, most of LST retrieval algorithms are found on Split-Window method with thermal infrared remote sensing data, such as NOAA/AVHRR, MODIS,

Landsat TM, and so on. ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) is a comparatively new source of remote sensing data and it is launched in 1999. ASTER has higher spatial and spectral resolution, and provides more detailed information than NOAA /AVHRR, Landsat TM, etc, which helps to improve the precision of LST retrieval. Taking an ASTER remote sensing data of the typical study region at Awati, Xinjiang Province as the data source, based on the methodology of Temperature/Emissivity Separation algorithm, LST is retrieved by using three modules of ADE (Alpha Derived Emissivity), Ratio Method and MMD (Maximum Minimum Difference). And then, the main error sources of this model are briefly analyzed, which are from theory hypothesis of model, atmosphere effect, emissivity and characteristics of the sensor systems. According to the calculation and analysis, the conclusion is that the advanced Temperature/Emissivity Separation algorithm is effective, and using ASTER data to retrieve LST can obtain more precise results and will have a perspective future.

**Key words:** ASTER remote sensing data; land surface temperature



图版IV  
刘志武等：利用 ASTER 遥感数据反演陆面温度的算法及应用研究



图1 ASTER 数据 (Band321)  
Fig. 1 ASTER image of study region(Band321)

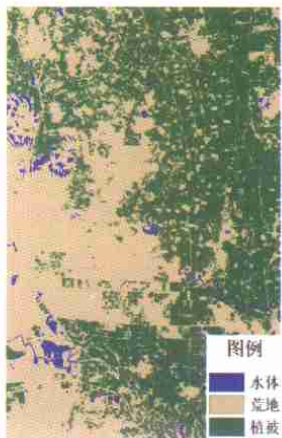


图2 ASTER 数据分类结果  
Fig.2 Result of classification

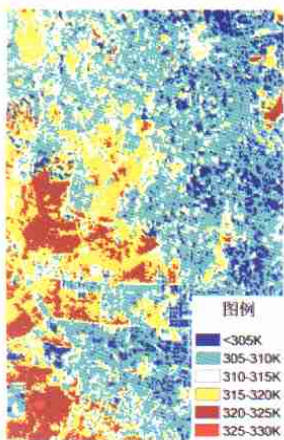


图3 陆面温度分布  
Fig. 3 Distribution of land surface temperature

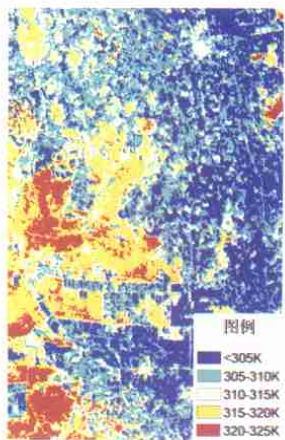


图5 最大亮度温度分布  
Fig. 5 Distribution of maximum brightness temperature