

文章编号: 1007 4619(2006)04 0600 08

# 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

杨 虎, 杨忠东

(中国气象局 中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 国家卫星气象中心, 北京 100081)

**摘 要:** 地表温度反演的裂窗算法已成功应用于 NOAA 系列卫星热红外遥感数据。目前, 裂窗算法中应用较为广泛的一种是 Becker 等人于 1990 年提出的局地裂窗算法<sup>[1]</sup>, 主要是通过辐射传输模型模拟不同地表条件和大气状况下, 地表温度和发射率对红外辐射亮温的影响, 从而发展出一个利用 AVHRR 4/5 通道亮温数据反演地表温度的线性模型。在晴空无云和地表比辐射率能精确估算的情况下, Becker 算法反演地表温度的精度在 1K 以内。Becker 算法用 Low tran 程序模拟计算地表辐射量, 且模型中参数主要针对 NOAA-9 传感器特性得到。本文在 Becker 算法的基础上, 针对 NOAA-16/17 传感器热红外通道光谱响应函数特性, 利用最新的、计算光谱分辨率更高的 MODTRAN 程序模拟不同大气状况下, 不同地表温度和发射率对 NOAA AVHRR 4/5 通道辐射亮温响应特性的影响, 改进 Becker 算法中模型参数, 使之能适用于 NOAA-16/17 热红外数据。同时, 本文利用植被指数 NDVI 在中国陆地区域 1km 分辨率最新地表分类数据的基础上, 得到模型中需要地表比辐射率参数, 将改进的模型应用于 1km 分辨率 NOAA 17 数据, 得到了旬合成中国陆地区域范围地表温度。通过地面气象台站实测数据对比验证, 取得了较好的结果。

**关键词:** 陆表温度反演算法; NOAA 16/17; 产品运行系统

**中图分类号:** TP79 **文献标识码:** A

## A Modified Land Surface Temperature Split Window Retrieval Algorithm and Its Applications Over China

YANG Hu, YANG Zhong-dong

(Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration (LRCVES, CMA);  
National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

**Abstract** Due to the difficulties in correcting the influences of the atmosphere absorbability and the Earth surface emissivity diversification, the retrieval of LST (land surface temperature) from satellite data is a challenging task. In this paper, a modified Becker's split window LST inversion algorithm is developed for retrieving LST from the NOAA-16/17 AVHRR data. A new set of parameters for Becker's LST algorithm is proposed. The algorithm is developed from a surface brightness temperature dataset generated from the MODTRAN program, which uses a range of surface parameters and atmospheric quantities as inputs. The 10-day composites of the Channel 4 and 5 brightness temperature data of NOAA-17 AVHRR (1 km resolution) are used to generate the clear sky LST. As a validation of the algorithm, the retrieved LST is compared with MODIS LST of the same period and area. The two LST products are found to be consistent with the absolute difference being about 2.5K for most areas. The NOAA retrieved LST is also compared with in-situ ground surface 0 m measurements taken from 257 meteorological stations which cover overall China area for the three periods of satellite observations. The comparison shows that the correlation between the retrieved LST and in-situ measurements is over 0.90 and the RMSE (Root Mean Square Error) is about 3.4K.

**Key words** remote sensing; land surface temperature; inversion algorithm

收稿日期: 2005 08 15; 修订日期: 2005 10 25

基金项目: 国家 973 项目“空间陆海表和大气数据验证”(编号: 2001CB309402); 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候—环境重点实验室开放课题资助。

作者简介: 杨 虎 (1976—), 男, 博士, 副研究员。主要研究方向为主被动微波遥感和热红外遥感。E-mail: yanghu@nsmc.cma.gov.cn  
(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 引 言

陆表温度是环境监测中的一个重要参数,同时也是气候、水文、农业应用模型中的重要输入参数。NOAA系列环境气象卫星热红外通道数据为获取长时间序列、连续稳定的陆表温度数据提供了宝贵的数据源。目前,针对陆表温度反演已经提出了很多不同算法<sup>[1-6]</sup>,但由于陆地表面组成物质的不均一性和复杂性,以及大气的影响,遥感反演陆表温度始终是一个重要而复杂的研究课题,特别是满足一定精度要求的业务化算法问题,并没有得到完全解决。

陆表温度反演需要对地表热红外辐射的深入理解和定量模拟计算。在晴空无云大气状况下,传感器接收某一通道的地表辐射量值可由下式表示:

$$R_i(\theta, \varphi) = \int f(\lambda) \epsilon_{\lambda}(\theta, \varphi) B_{\lambda}(T_s) \tau_{\lambda}(\theta, \varphi) d\lambda +$$
$$\int f(\lambda) B_{\lambda}(T_p) \frac{\alpha_{\lambda}(\theta, \varphi, p)}{\rho} \phi d\lambda +$$
$$\int f(\lambda) \int \int (\theta', \varphi') L_{\lambda}(\theta') \tau_{\lambda}(\theta, \varphi) \cos\theta' \sin\theta' d\theta' d\varphi' d\lambda$$

(1)

式中,  $L_{\lambda} = B_{\lambda}(T_p) \frac{\alpha_{\lambda}(\theta, p)}{\rho} \phi$  为大气下行辐射量。

(1)式中, 左边为传感器以某一观测方向  $(\theta, \varphi)$

在通道  $i$  接收的地表总辐射量; 右边第一项为地表辐射量, 第二项为大气上行辐射量, 第三项为大气下行辐射量被地表反射部分;  $f_i(\lambda)$  为传感器通道响应函数, 与具体传感器特性有关。

不同研究人员根据对地表辐射特性不同的理解, 依据上式提出了不同的地表温度单通道、多通道反演算法。其中, Becker等人通过利用辐射传输方程 Low tran程序对 (1)式进行地表辐射亮温计算时, 结合地表实测数据, 分析了不同大气状况下, 地表发射率、温度对 NOAA-9 4 5通道辐射亮温的影响, 最后提出了一个局地裂窗算法<sup>[2]</sup>:

$$T_s = A_0 + p * (T4 + T5) / 2 + M * (T4 - T5) / 2$$

(2)

式中,  $A_0$  为一定常数,  $P, M$  皆为地表发射率的函数。其中

$$P = 1 + \alpha * (1 - \epsilon) / \epsilon + \beta * \Delta \epsilon / \epsilon^2$$
$$M = \gamma' + \alpha' * (1 - \epsilon) / \epsilon + \beta' * \Delta \epsilon / \epsilon^2$$

通过模拟数据对上述方程进行回归, 得到各未知参数。

Becker算法是通过理论模型模拟分析得到的一个半经验局地裂窗算法, 由于模型在分析过程中考虑了大多数大气和地表状况, 模型适用范围广, 且简单易行, 在地表辐射率精确得到的情况下, 反演地表温度的精度可以控制在 1K 以内。Becker算法是针对 NOAA-9 传感器设计的, 对于 NOAA-16 /17 来说, 由于传感器通道响应函数不尽相同 (图 1), Becker算法不能适用, 必须对模型中参数进行改进。

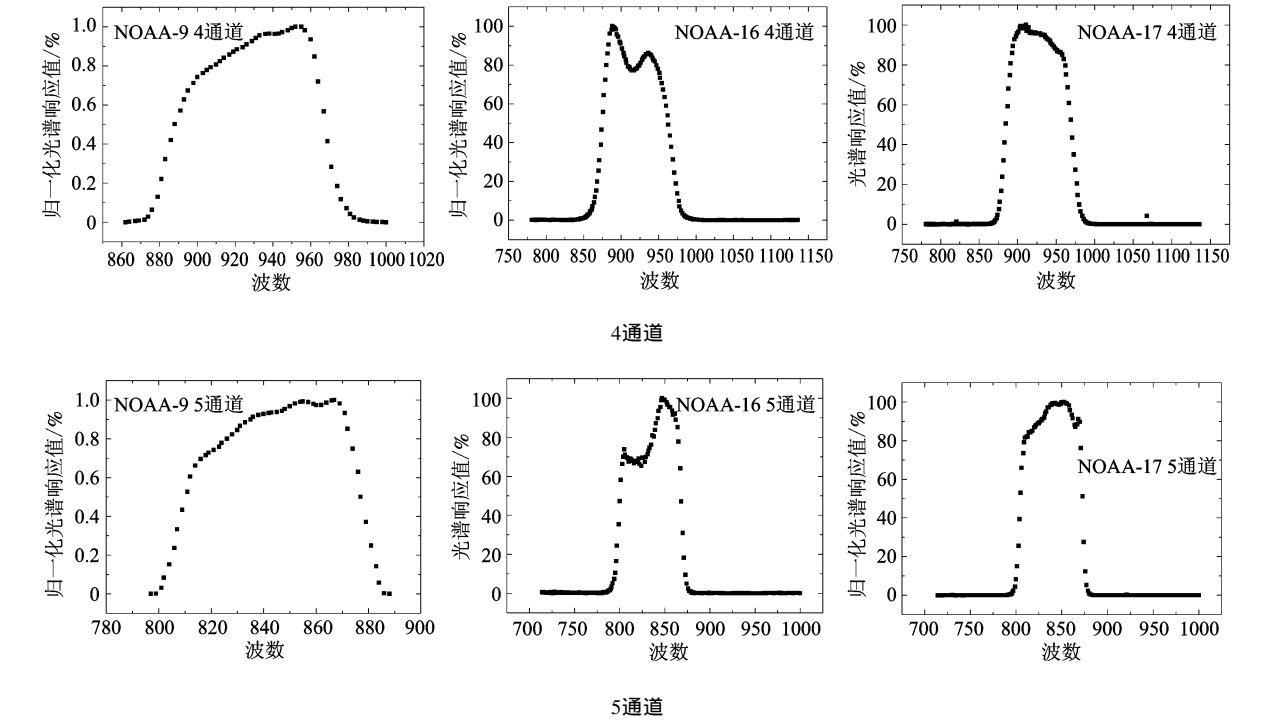


图 1 NOAA-9 16 17四、五通道光谱响应函数对比

Fig 1 NOAA-9 AVHRR 4 and 5 channelSRF comparison

本文在 Becker算法的基础上, 针对 NOAA 16 17 热红外通道光谱响应函数特性, 用最新的 MODTRAN 程序, 在一个较宽的大气状况、地表温度和发射率范围内, 对地表热红外辐射特性进行了模拟计算分析, 用模型模拟得到的数据库重新得到了 Becker算法中的模型参数, 最后, 将模型应用于 NOAA- 17 数据, 得到了中国陆表范围旬合成陆表温度, 并将结果用地面气象台站实测数据进行了验证。

2 地表热辐射特性模拟及 Becker算法的改进

本文中, 选择 4 种大气模式、12 个地表温度 (每种大气包含三个地表温度输入)、地表发射率从 0. 90—1 的输入参数条件下, 用 MODTRAN 程序对地表热红外发射特性进行了模拟计算。模型具体输入参数见表 1。

表 1 MODTRAN 模型输入大气和地表参数

Table 1 MODTRAN Input Parameters

输入大气廓线	输入地表温度 K	地表发射率范围
中纬度夏季大气	294. 2—5— 294. 2+5	0. 90—1
中纬度冬季大气	272. 2—5— 272. 2+5	0. 90—1
亚极地夏季大气	287. 2—5— 287. 2+5	0. 90—1
1972 美国标准大气	288. 2—5— 288. 2+5	0. 90—1

影响热红外传感器接收亮温值的主要因素是地表温度。在地表发射率为 1 的情况下, 一定波长地表辐射亮温与地表温度的关系由普朗克方程描述。但由于大多数自然地表并非黑体, 不同地物发射率不尽相同, 且同一地物在不同红外通道其发射率也不相同。为考察地表温度对亮温的影响, 本文在表 1 给定的大气和地表参数范围内, 模拟了 NOAA 17 AVHRR 4 5 通道红外亮温均值与亮温差随地表温度的变化特性, 如图 2 所示。图 2 (a) 是亮温均值随地表温度的变化。可以看出, 在所模拟的地表发射率范围内, 亮温均值和亮温差与地表温度的关系可用线性模型表示, 在同一地表温度下, 亮温均值和差值的变化主要是由地表发射率的变化引起的。由以上分析可知, 地表温度可以表示为亮温均值和差值的线性模型, 在这里, 采用 BECKER 等人提出的线性模型, 式 (2)。

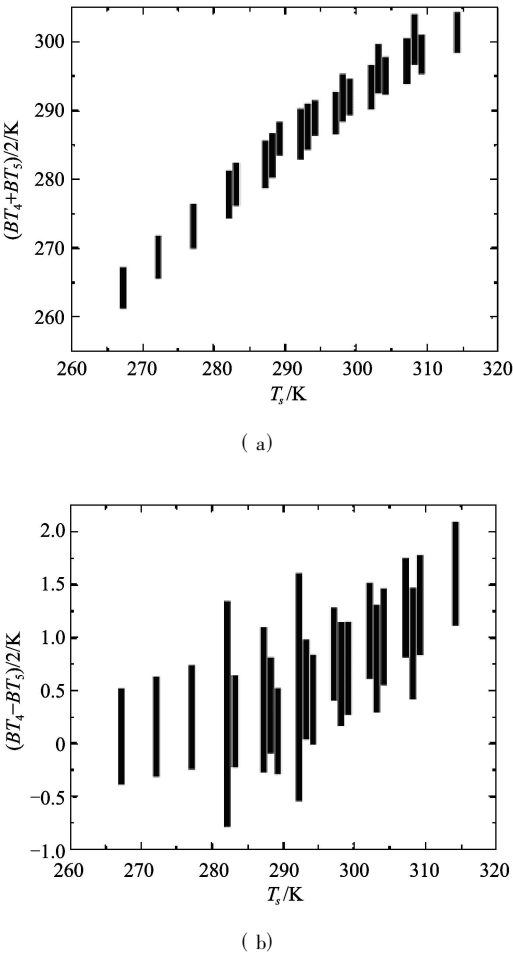


图 2 地表发射率在 0. 90—1 范围时地表温度对 NOAA 17 4 5 红外通道亮温均值 ( a) 和亮温差的影响  
Fig 2 Effects of emissivity to BT average and difference

地表发射率是影响辐射亮温的另一个重要地表参数。定义平均地表发射率  $\epsilon$  为  $(\epsilon_4 + \epsilon_5) / 2$  地表发射率差  $\Delta\epsilon$  为  $(\epsilon_4 - \epsilon_5)$ , 如图 3 所示, 在固定地表温度为 289.2K 的情况下, 平均发射率对 AVHRR 4 5 通道亮温均值的影响最大可达 4K, 发射率差对亮温的影响也能达到 2K。由此可见, 在地表温度反演算法中, 地表发射率计算结果对反演精度影响很大。

由以上分析, 在表 1 所示的地表和大气参数范围内, 针对 NOAA- 16 /17 传感器特性, 由 MODTRAN 程序生成了 105000 个 AVHRR 4 5 通道地表亮温模拟数据, 在此基础上重新得到了 Becker 算法中的模型参数 (表 2)。

研究中, 对地表比辐射率的计算采用植被覆盖度方法 (Caselles et al 1997), 即每一个像元范围内, 某一通道的地表有效比辐射率由植被辐射率和非植被覆盖区地表比辐射率通过一个线性模型得到:

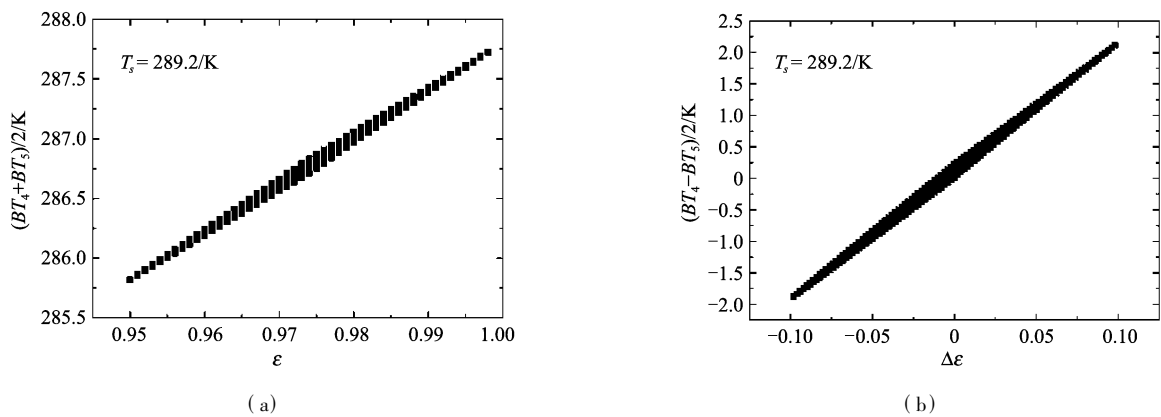


图 3 地表发射率均值与差值对平均亮温 (a)和亮温差 (b)的影响

Fig 3 Scatter plot of average emissivity  $\epsilon = (\epsilon_4 + \epsilon_5) / 2$  and the average brightness temperature of NOAA-17 AVHRR Channels 4 and 5  $(BT_4 + BT_5) / 2$  (a); Emissivity difference of Channels 4 and 5  $\Delta\epsilon = (\epsilon_4 - \epsilon_5)$  and the brightness temperature difference  $(BT_4 - BT_5) / 2$  (b)

表 2 本文得到的适用于 NOAA16/17 的  
Becker算法模型参数  
Table 2 Retrieved model parameters for NOAA-16/17

模型参数	
NOAA-16	$A_0=0.4938$ $\alpha=0.1590$ $\beta=-0.3816$
	$\gamma'=3.9840$ $\alpha'=9.9111$ $\beta'=0.5745$
NOAA-17	$A_0=0.89$ $\alpha=0.1549$ $\beta'=-0.3959$
	$\gamma'=4.0578$ $\alpha'=11.7207$ $\beta'=1.55941$

$$\epsilon_{i\text{ pixel}} = \epsilon_{iv}FVC + \epsilon_{ig}(1 - FVC) + d\epsilon_i \quad (3)$$

式中,  $\epsilon_{iv}$ 为某一植被覆盖类型, 纯植被覆盖像元  $i$  通道地表发射率;  $\epsilon_{ig}$ 为相应纯裸露地表像元发射率;  $FVC$ 为植被覆盖度, 可由下式计算:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_L}{NDVI_V - NDVI_L} \quad (4)$$

式中,  $NDVI_L$  为纯裸土像元典型  $NDVI$  值, 本研究中取为固定值 0.05;  $NDVI_V$  为纯植被覆盖像元某一植被类型的典型  $NDVI$  值, 本研究中, 植被覆盖类型为 GBP 地表分类结果, 对 GBP 每一种地表类型, AVHRR 4/5 通道  $\epsilon_{iv}$ ,  $\epsilon_{ig}$  及  $NDVI_V$ ,  $NDVI_L$  由发表的文献数据中得到 (Rubio et al. 1997; Xubin Zeng et al., 2000)。为参考方便, 表 3 列出了本文采用的 AVHRR 4/5 通道  $\epsilon_{iv}$ ,  $\epsilon_{ig}$  及  $NDVI_V$ ,  $NDVI_L$  值。

上述地表发射率模型中,  $d\epsilon_i$  为某一通道由植被和下垫面地表的多次反射产生的地表发射率项。本文中, 为简化计算, 假设地表平坦, 没有地表发射率的多次反射项, 即  $d\epsilon_i = 0$  则地表发射率可由式 (3) 和 (4) 计算得到。

### 3 LST反演算法在中国陆地区域旬地表温度产品生成中的应用

将上述改进的 Becker 地表温度裂窗算法和地表比辐射率算法应用于 NOAA-17 数据, 得到了旬合成晴空地表温度。数据处理流程如下: 对经过定标的 NOAA-17 1b 数据, 经过投影变换和重采样, 用最大植被指数合成 (MVC) 方法和最大亮温合成 (MTdC) 方法分别得到旬合成 (10 天) 全国陆地植被指数  $NDVI$  和 AVHRR 4/5 通道亮温数据, 将这些数据作为算法输入数据, 最终得到全国陆地范围旬合成晴空地表温度。图 4 是程序自动生成的 Lambert 等面积投影 2004 年 6 月上旬全国陆地区域植被指数和采用本文算法生成的相应旬地表参考温度产品。数字产品格式为目前最为通用和方便的 HDF 数据格式。

### 4 反演结果对比和验证

由于时空尺度因子和测量原理不同, 目前遥感信息产品的验证是一件非常困难的事情。为对反演的 LST 结果进行一些对比分析, 本文首先将反演结果与 Terra/MODIS 反演 1 km 陆表温度产品 MOD11\_L2.4 进行了对比。由于 MOD11\_L2.4 是按轨道反演的产品, 本文选取 2004 年 6 月上旬本地时间上午 9:00—12:00 的轨道, 按最大 LST 方法合成了旬地表参考温度。图 5 (a) 是合成的 2004 年 6 月上旬

表 3 17种 IGBP地表覆盖类型植被和地表发射率及典型 NDVI值<sup>[7,8]</sup>

Table 3 Em issivity and NDVI value of 17 IGBP land cover types

IGBP地表覆盖类型	植被发射率		裸露地表发射率		典型 NDVI值
	AVHRR 4通道	AVHRR 5通道	AVHRR 4通道	AVHRR 5通道	
1 Evergreen Needleleaf Forest	0.9890	0.9908	0.9696	0.9732	0.63
2 Evergreen Broadleaf Forest	0.9890	0.9908	0.9696	0.9732	0.69
3 Deciduous Needleleaf Forest	0.9736	0.9731	0.9696	0.9732	0.63
4 Deciduous Broadleaf Forest	0.9736	0.9731	0.9696	0.9732	0.70
5 Mixed Forest	0.9813	0.9819	0.9696	0.9732	0.68
6 Closed Shrublands	0.9813	0.9819	0.9679	0.9724	0.60
7 Open Shrublands	0.9813	0.9819	0.9679	0.9724	0.60
8 Woody Savannas	0.9704	0.9714	0.9679	0.9724	0.62
9 Savannas	0.9693	0.9708	0.9679	0.9724	0.58
10 Grasslands	0.9682	0.9703	0.9679	0.9724	0.49
11 Permanent Wetlands	0.9871	0.9881	0.9871	0.9881	0.56
12 Croplands	0.9823	0.9885	0.9727	0.9779	0.61
13 Urban and Builtup	0.9748	0.9761	0.9591	0.9726	0.62
14 Cropland Natural Vegetation	0.9773	0.9802	0.9727	0.9779	0.65
15 Snow and Ice	0.9895	0.9668	0.9895	0.9668	
16 Bare or Sparsely Vegetated	0.9693	0.9708	0.9576	0.9663	0.60
0 Water	0.9920	0.9877	0.9920	0.9877	

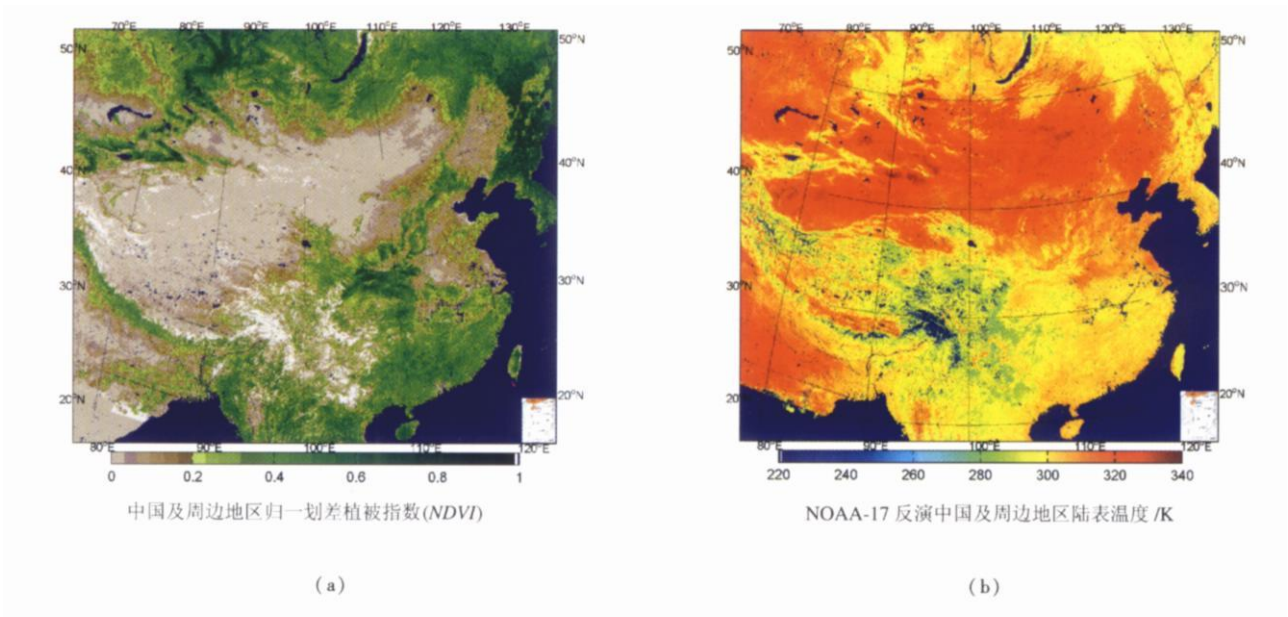


图 4 MVC 方法合成的 2004 年 6 月上旬全国陆表 NDVI 图(a)和相应的地表参考温度图(b)

Fig.4 China and around areas June 1—10, 2004 MVC composition NDVI map(a), and LST(b)

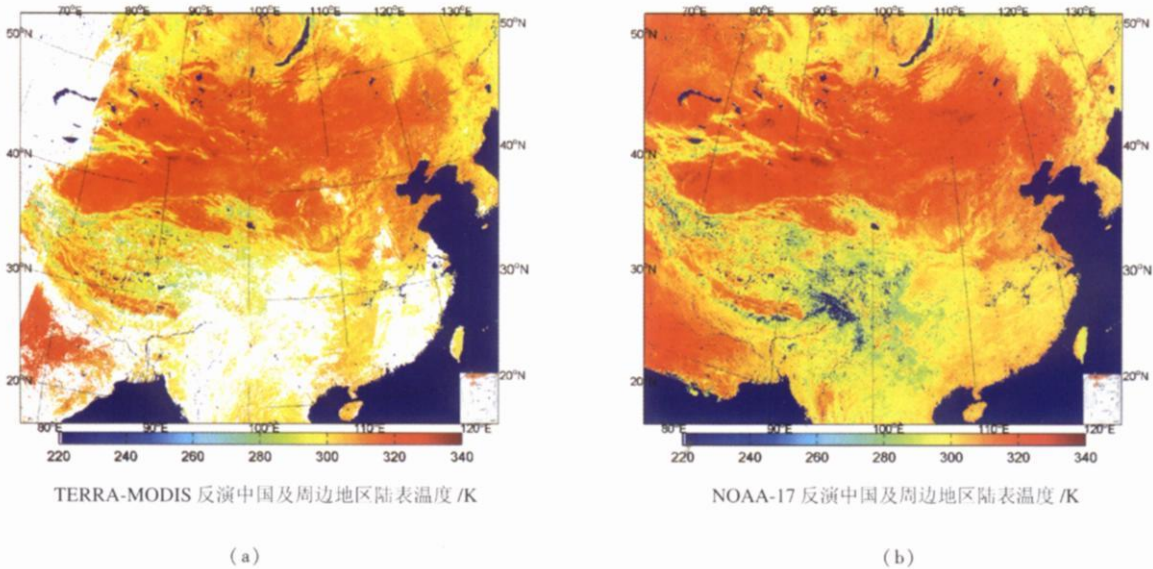


图 5 MODIS MOD11\_L2.4 LST 轨道产品数据生成的 10 日合成中国陆表区域 LST 图(a)与本文算法用 NOAA-17 1B 数据生成的 10 日合成中国陆日合成中国陆表区域 LST(b)

Fig. 5 10-day (June 1—10, 2004) composed LST product from MODIS orbital LST product (Mod11)(a), and composed LST product from NOAA-17 AVHRR at the same time(b)

MOD11\_L2.4 中国陆地区域 LST 产品, 图中白色为数据缺失和云覆盖区域。图 5(b)为本文用 NOAA-17 数据合成的相同时期 LST 产品数据。可以看出本文算法得到的中国陆地区域 LST 产品在地表温度空间分布上与 MODIS LST 产品基本一致, 对比 MOD11\_L2.4 产品, 本文得到的 LST 产品与地表 NDVI 特征分布更为一致。

为对两种 LST 产品进行统计对比, 本文在整个区域范围内对两种产品进行了散点图对比、频数分布直方图对比和误差绝对值直方图对比, 如图 6 和图 7 所示。散点图误差分析结果表明, 两种 LST 产品均方根误差为 1.83K (图 6); 直方图对比结果表明, 两种产品 LST 值的频数分布基本一致 (图 7(a)), 误差大多在 2—3K 范围内 (图 7(b))。这个结果只能说明两种反演结果具有较高的相关性, 并不是本文的 LST 反演精度是 2—3K。

为使反演结果可以与实测数据进行对比分析, 本文收集了 2003 年 1 月 1—3 旬遍布全国 257 个农业气象站点地表零厘米实测温度数据, 取旬最高温度值与相同时相卫星反演结果进行了对比, 图 8 是对比结果。三旬的对比分析结果表明, 模型反演 LST 与实测 LST 相关在 0.90 以上, 均方根误差 RMSE 在三旬分别为 3.87 3.26 和 3.46。由于农气

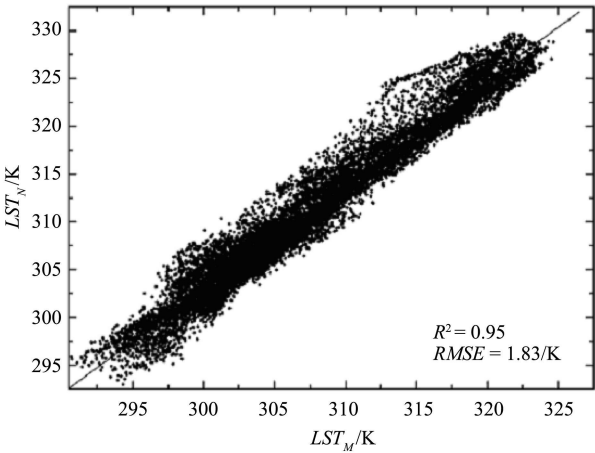


图 6 散点图分析: Terra MODIS  $LST(LST_M)$  和 NOAA-17 AVHRR  $LST(LST_N)$

Fig 6 Scatter plot of  $LST$  from Terra MODIS( $LST_M$ ) and from NOAA-17 AVHRR( $LST_N$ )

站实测数据一般是在农田里用温度计进行的直接接触式单点测量, 而遥感反演的温度是  $1\text{ km}^2$  面上的辐射温度测量, 且两者测量时间有一定差异, 所以二者之间并没有完全可比性, 只能做趋势分析。上述均方根差数据表明, 本文反演的地表温度和农气站实测温度在时空变化趋势上具有良好的一致性。



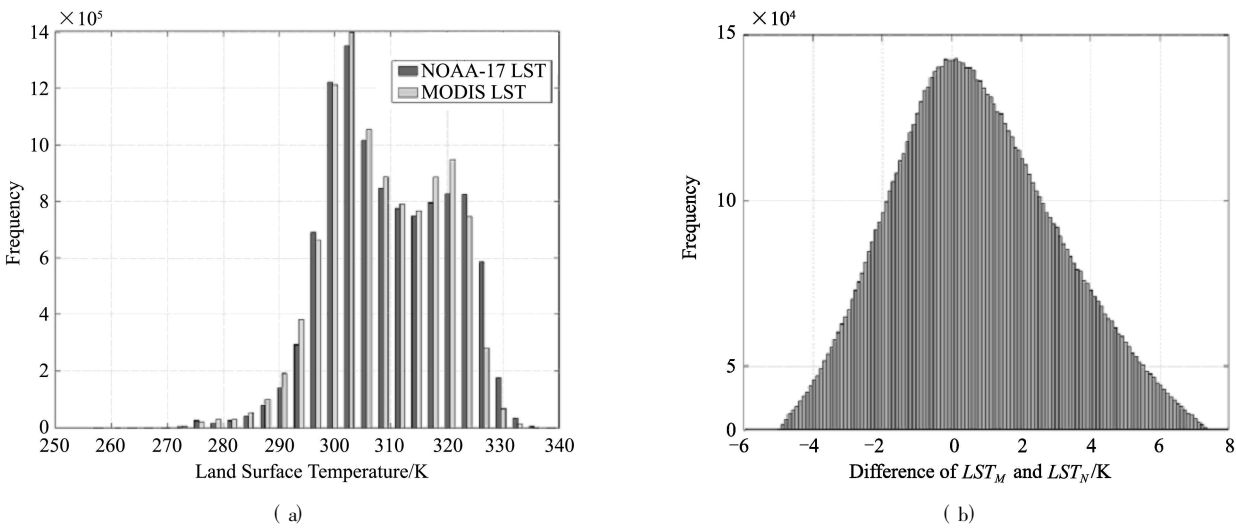


图 7 反演结果直方图对比: 两种 LST 产品频率分布直方图对比 (a); 两种 LST 产品差值频率分布直方图 (b)

Fig 7 Histogram comparison of LST products from NOAA- 17 AVHRR and TerraMODIS

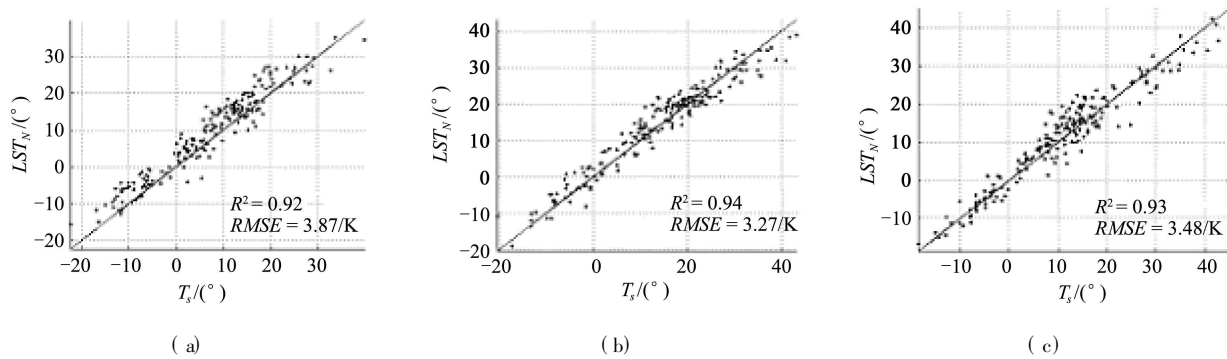


图 8 NOAA- 17 反演 LST 与地表实测结果对比。时相为 2003 年 1—3 旬 (a) — (c)

Fig 8 Comparison of NOAA- 17 LST and in situ measured LST in January 2003

(a) 1<sup>st</sup> period from Jan 01 to Jan 11, 2003; (b) 2<sup>nd</sup> period from Jan 11 to Jan 20, 2003; (c) 3<sup>rd</sup> period from Jan 21 to Jan 30, 2003

## 5 LST 产品运行系统的建立

连续稳定和一致性较好的陆表温度产品是各种研究中需要的。本研究在上述工作基础之上, 开发了中国陆地区域旬陆表温度产品业务运行系统。系统由三部分组成: 中国区域范围 1km 分辨率 LAEA 投影方式 HDF 文件的建立, MVC 和 MTdC 方法 NDVI 合成及 LST 产品生成。系统以每天 6 轨 AVHRR 1b 数据为输入, 经过去云处理和质量检验, 最后输出为陆表温度, 同时输出的还有地表发射率、质量控制码、日记数等辅助数据。数字产品格式为目前最为通用的 HDF 格式, 同时输出 TIFF 格式的 LST 图像产品。目前已经利用该系统处理了 2001—2003 年三年的 AVHRR 1b 数据, 生成了相应 LST 产

品, 系统业务运行稳定。

## 6 结 论

本文针对 NOAA 16 /17 AVHRR 4 /5 通道波谱响应函数特性, 利用 MODTRAN 3.7 程序对各种大气和地表温度、辐射率条件下地表热辐射特性进行了模拟, 生成了地表热辐射特性模拟数据库, 在此基础上, 重新得到了 Becker 地表温度裂窗算法的模型参数, 将算法应用于 NOAA 16 /17 数据, 得到了旬合成中国陆地区域范围地表温度产品, 并开发了中国陆地区域旬合成 LST 产品运行系统。本文中, 地表发射率数据, 由基于 IGBP 地表分类结果和 NDVI 的地表植被覆盖度以及地表发射率数据库得到。将本文算法得到的 LST 产品反演结果与同期 MODIS LST 产品

(MOD11\_L2.4)进行对比, 结果基本一致, 均方根误差 RMSE=2.3。与农气站实测零厘米地表温度也具有高的相关性和良好的时空变化趋势一致性。

地表温度反演是一个非常复杂的课题, 尤其地表发射率的计算精度对 LST 裂窗算法的反演精度影响很大。本文所用的地表发射率计算方法基于地表分类和发射率数据库的先验知识, 较单纯使用 NDVI 的地表发射率算法, LST 反演精度有所提高。但由于本文没有考虑植被和地表多次反射引起的地表发射率的贡献, 在植被稀疏地表, 地表发射率计算仍有较大误差。此外, 地表分类结果的精度也是影响本文 LST 反演精度的重要原因, 这些问题将在下一步的研究工作中解决。

参 考 文 献 (References)

[ 1 ] Price J C. Land Surface Temperature Measurements from the Split Window Channels on the NOAA 7 Advanced Very High Resolution Radiometer[ J]. *J. Geophys Res*, 1984 **89**: 7231— 7237.

[ 2 ] Becker F, Li Z L. Towards a Local Split Window Method over Land Surface[ J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1990 **11**: 369— 393.

[ 3 ] Ulivieri G, Castronuovo M M, Francioni R *et al*. A SW Algorithm for Estimating Land Surface Temperature from Satellites[ A]. COSPAR[ C]. Washington D. C., USA, 1992.

[ 4 ] Enric V, Caselles V. Mapping Land Surface Emissivity from NDVI Application to European, African, and South American Areas[ J]. *Remote Sens. Environ.*, 1996 **57**: 167— 184.

[ 5 ] Caselles V, Coll G, Valor E. Land Surface Temperature Determination in the Whole HAPEX-Sahel Area from AVHRR DATA[ J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1997 **18**: 1009— 1027.

[ 6 ] Sobrino J A, Raissouni N, Li Z L. A Comparative Study of Land Surface Emissivity Retrieval from NOAA Data[ J]. *Remote Sens. Environ.*, 2000 **75**: 256— 266.

[ 7 ] Rubio E, Caselles V, Badenas C. Emissivity Measurements of Several Soils and Vegetation Types in the 8— 14 $\mu$ m Wave Band: Analysis of Two Field Methods[ J]. *Remote Sens. Environ.*, 1997 **59**: 490— 521.

[ 8 ] Zeng X B, Dickinson R E. Derivation and Evaluation of Global 1km Fractional Vegetation Cover Data for Land Modeling[ J]. *J. Appl. Meteorol.*, 2000 **39**: 826— 839.