

# 反演陆面温度的分裂窗口算法与应用分析

张霞 朱启疆 闵祥军

(北京师范大学资源与环境科学系, 北京 100875)

**摘要** 分裂窗口算法是目前由热红外遥感图象数据获取陆面温度最主要的方法。文中对1997年8月22日内蒙古巴丹吉林沙漠地区的两幅NOAA/AVHRR热红外图象,利用辐射传输模型LOWTRAN7计算大气参数进行大气校正,在采用Li & Becker算法(1993)反演具有一定可信度的地表发射率基础上,选取常见的5种分裂窗口算法分别获取了该地区的地表辐射温度,并以Sobrino1991算法结果为标准,进行了算法间比较,结果表明各算法具有可比性。

**关键词** 辐射传输模型 分裂窗口方法 陆面温度反演 地表发射率

## 0 引言

地表温度是描述地-气系统相互作用结果的关键参量。分裂窗口算法是目前反演地表温度最主要的研究方法,它利用传感器在大气窗口的两个相邻热红外通道对大气水汽的差异吸收实现大气纠正。在陆面温度反演方面,自1984年Price<sup>[1]</sup>第一次将分裂窗口方法应用于农田区域温度反演至今,科学家们从不同角度对分裂窗口方法进行改进,并有诸多算法提出来。但是地面验证数据即陆面温度实地测量具有本身固有的困难:①地表的非均一性导致地表温度的空间变率很大,而遥感反演的地表温度为混合象元的等效辐射;②地表辐射温度的实地测量仍不可避免地受到大气下行辐射的影响;③地表辐射温度的测量也存在发射率未知的问题。正是这一系列的因素使得目前尚不能对各分裂窗口算法进行直接评判,因此,必须采取其它途径。

本文选取内蒙古巴丹吉林沙漠地区两幅AVHRR图象(白天和晚上),利用Li & Becker(1993)算法<sup>[2]</sup>反演地表发射率,在分析结果具有一定可信度的基础上,利用常见的5种分裂窗口算法分别获取地表辐射温度,设定一种算法为标准,进行算法间的对比分析,以期获得间接评判结果。

## 1 图象预处理

实验区为位于东经97°—103.5°、北纬36°—41°的内蒙古巴丹吉林沙漠地区,图象大小为240×200象元。在发射率求取之前进行了如下预处理:

(1) 几何纠正。为实现白天和晚上图象的精确匹配,文中采用吴秉方的方法<sup>[9]</sup>进行象元畸变的纠正,然后选择精确的控制点,进行多项式变换纠正。

(2) 图象定标。通过定标将AVHRR的计数值换算为物理量。红外和可见光采用类似的定标公式:

$$E_i = A_i I_i + B_i \quad (i=1,2,3,4,5) \quad (1)$$

其中, $A_i$ 和 $B_i$ 为定标系数, $I_i$ 为AVHRR探测值, $E_i$ 为经标定后的物理量值。

(3) 太阳天顶角订正。对可见光和近红外波段的数据进行太阳天顶角订正:

$$E_c = E(z)/\cos(z) \quad (2)$$

其中, $E(z)$ 为定标后的反射率, $z$ 为探测点的太阳天顶角。

(4) 亮温计算。对于AVHRR3、4和5通道,将标定后所得光谱辐射率经普朗克公式求逆得到观测表面的辐射等效亮温。

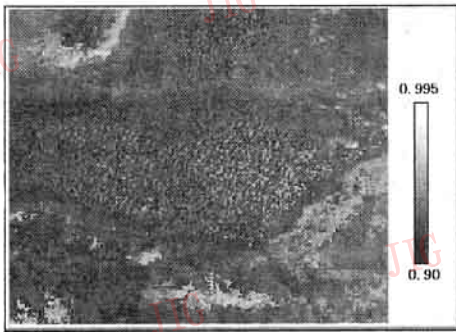
\* 本文研究受攀登项目资助

收稿日期:1998-08-17;收到修改稿日期:1999-01-08

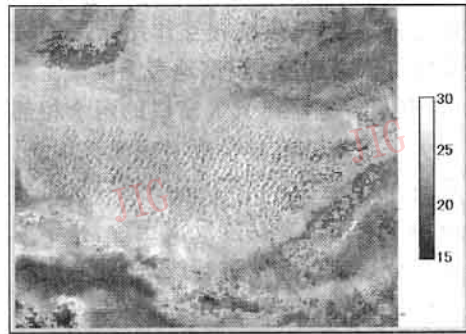
## 2 发射率的求取

采用 Li & Becker 方法<sup>[2]</sup>求取发射率,该方法的理论基础是:白天 AVHRR 通道 3 测得的辐射仅为陆面发射辐射与其反射太阳辐射之和,二者具有相同量级;晚上通道 3 测得的辐射仅为地表发射辐射。因而可以利用通道 3 在晚上的测值求算白天的陆面发射辐射。Li & Becker 引入温度无关光谱指数(TISI),不必考虑白天和晚上的陆面发射辐射差异。通道 3 的二向反射率(BDR)由白天和晚上的 TISI 特定比值确定。假定 BDR 与角度的关系已知,就可以导出特定通道 3 的光谱发射率,进而利用 TISI 确定通道 4 和通道 5 的发射率。

文中应用此方法,可对它进行进一步验证,另外,下述优点也是本文选用此方法的依据:



(a) 第 4 通道发射率图象



(b) 地表温度图象(Sob91 算法)

图 1 内蒙古巴丹吉林沙漠地区反演结果图象

对发射率反演结果按不同地物类别进行分析,作出发射率直方图(见图 2)和发射率差异直方图(见图 3),并将发射率值域、均值(峰值)和标准偏差列于表 1,分析得出结论如下:

(1) 对于绿洲和山地植被,通道 4 和通道 5 的发射率一般在 0.94—0.97 范围,而对沙漠和戈壁,通道 4 的发射率在 0.91—0.93 范围,通道 5 的发射率在 0.93—0.95 范围。

(2) 通道 4 和通道 5 的发射率的标准偏差均小于 0.01,这说明沙漠、戈壁和绿洲、山地植被的空间变化不大。这与所选实验区地面比较平坦,沙漠和

(1) 该反演方法不需要精确的大气描述,在缺少地面同步探空数据的情况下,可用气候学平均的大气廓线来代替。本文中,据此建立了民勤 8 月份平均大气模式,以进行大气参数的计算。

(2) 该算法仅需要研究区晴空天气下的两幅 AVHRR 图象(白天和晚上),不需要发射率的先验知识。

## 3 发射率反演结果分析

由 Li & Becker 方法获得了发射率图象(见图 1)。根据分析需要,对白天图象进行分类,采用 AVHRR1、2、3 和 4 通道图象及标准植被指数(NDVI)图象共 5 个波段图象进行最大似然法分类,共分为 4 大类:沙漠、戈壁、绿洲和山地植被。

绿洲内部比较均一的事实一致。

(3) 通道 4 和通道 5 的发射率差:对于绿洲,发射率差在 0.0020—0.0061 范围,峰值在 0.004—0.005,对于沙漠、戈壁,发射率差在 0.0016—0.021 范围,峰值在 0.0019 附近。将反演结果与 Salisbury 等人在实验室条件下测量结果相比较,如果将绿洲、山地植被的发射率取实验室条件下植被的平均值 0.0031,沙漠、戈壁取岩石与土壤的平均值 0.015,可以很清楚地看到反演结果与实验室条件下的测量结果非常接近。通道 4 和通道 5 的发射率差是比较稳定的常数,因此反演结果具有一定可信度。

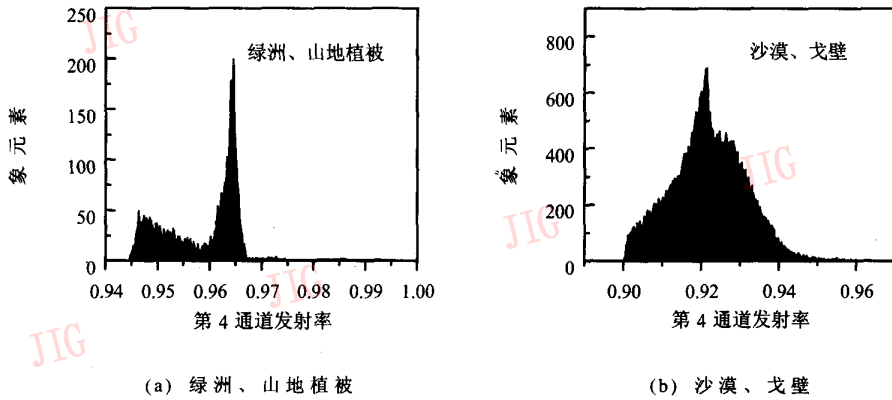


图 2 通道 4 发射率反演结果直方图

表 1 发射率反演值域及标准偏差

地 类	通道 4 的发射率			通道 5 的发射率		
	值 域	平均值	标准偏差	值 域	平均值	标准偏差
绿洲	0.94—0.9979	0.9630	0.007	0.9346—0.9929	0.9586	0.0071
山地植被						
沙漠	0.92—0.9776	0.9411	0.0095	0.90—0.9705	0.9220	0.0095
戈壁						

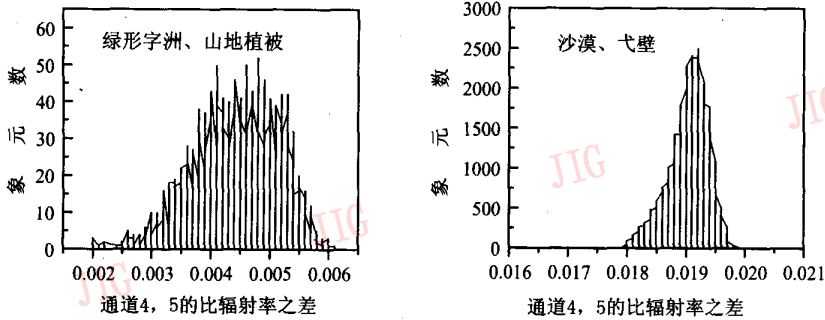


图 3 通道 4 和通道 5 发射率之差直方图

#### 4 地表温度反演结果与对比分析

基于反演所得具有一定可信度的发射率图象,利用选定的分裂窗口方法计算了巴丹吉林沙漠地区的地表温度(结果图象见图 1)。本文选取了有代表

性的 5 种分裂窗口算法: P&P<sup>[3]</sup>, Sob93<sup>[5]</sup>, Sob91<sup>[4]</sup>, Ulivieri<sup>[6]</sup> 和 UVM 算法<sup>[7,8]</sup> 进行地表温度的求算。其中,前两种算法中不含水汽项,而后 3 种算法含水汽项。这样的选择有利于对比分析。具体分析如下:

(1) 由表 2 可以看出:各算法反演温度的标准偏差在 1.4633—2.0476 范围,表明不论是在沙漠、

戈壁内部,还是在绿洲、山地植被内部,辐射温度的分布都比较均一,这与绿洲、沙漠内部的地面状况比较均一的事实是一致的,这意味着在获得比较精确

的象元尺度的发射率的条件下,所选取的5种算法都能够反演出比较稳定的地表温度。

表2 各算法反演陆温统计特征值

算法	绿洲、山地植被		沙漠、戈壁	
	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差
P&P	293.3989	1.5434	299.0610	1.7569
Sob93	293.8052	1.6032	300.5121	1.9412
UVM	294.3036	1.4633	298.4653	1.7782
ULI	293.0688	1.7015	298.3789	2.0476
Sob91	294.743	1.4752	299.3784	1.8744

表3 算法结果间差异特征值  
( $T_c - T_s, T_s$  为 Sob91 算法反演值)

算法	值域	峰值	标准偏差
UVM	-1.4910—-0.1575	-0.7410	0.1639
P&P	-1.195—0.7998	-0.2391	0.2972
ULI	-2.8061—0.7843	-0.7271	0.5448
Sob93	-1.593—3.0657	1.2110	0.4441

(2) 对比分析:由于缺少地面同步验证数据,本文采用 Sob91 算法为标准,作出其他反演结果与该标准的差异直方图(见图4),并将差异统计特征值列于表3,进行算法间的对比分析。

原因可能在于 ULI 算法中定义的  $\gamma$  项小于回归关系中隐含的  $\gamma$ ,且与其它算法中  $\gamma$  项有很大差异。

由图4和表3分析得出如下结论:

(3) 算法中不含水汽项的算法,即 Sob93 和 P&P 算法的峰值和曲线扩展域有很大差异,P&P 算法结果与 Sob91 算法非常逼近,峰值在  $-0.2397K$  附近,标准偏差也较小(0.2913K)。而 Sob93 算法结果与 Sob91 算法差异较大,一方面峰值在  $1.21K$  附近;另一方面扩展范围较大,最大偏差达  $3K$ ,标准偏差为  $0.4441$ 。其原因可能在于 P&P 算法中精确地包含了  $\gamma$  项,而 Sob93 算法给出的是统计意义上的全球大气平均值。

(1) 4种算法的结果与 Sob91 算法之差集中在  $\pm 2K$  范围,峰值在  $\pm 1K$  之间(除 Sob93 峰值在  $1.21K$ ),这表明这5种算法的反演结果具有可比性。UVM 算法和 P&P 算法结果与 Sob91 算法之差在  $\pm 1.5K$  范围内,因而这两种算法与 Sob91 算法具有很好的一致性。

### 5 结论

由本文的分析结果,可得出如下结论:

(1) 以研究区气候学平均大气模式代替地面同步探空数据,采用 Li & Becker 发射率反演算法,可以由研究区白天和晚上的 AVHRR 通道 3、4 和 5 数据本身获取具有一定可信度的发射率。

(2) 在使用共同的发射率数据条件下,由本文选取的5种分裂窗口算法获取陆面温度,分析表明:这5种算法的反演结果具有可比性。UVM 算法、P&P 算法与 Sob91 算法具有很好的一致性。

### 参考文献

- Price J C. Land surface temperature measurement from the split window channels of the NOAA7/AVHRR, J Geophys Res, 1984, 89: 7231 ~ 7237.
- Li Z-L, Becker F. Feasibility of land surface temperature and emissivity determination from AVHRR data. Remote Sens Environ, 1993, 43: 67 ~ 86.

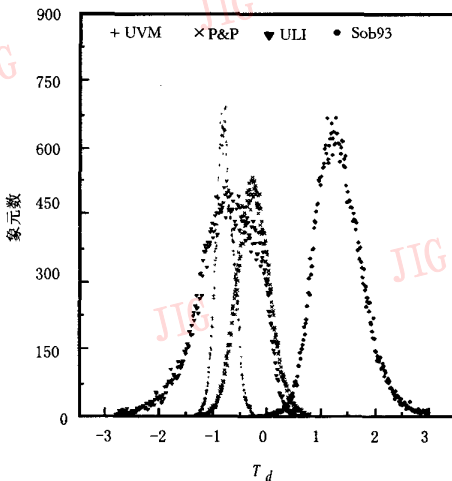


图4 4种算法与 Sob91 算法结果差异直方图

(2) 算法中包含水汽项的算法,即 ULI 算法和 UVM 算法的峰值在  $\pm 1K$  范围;但 ULI 算法的直方图扩展范围很大,最大值达  $2.81K$ ,标准偏差为  $0.5448K$ ,这与 Prata 等(1995)的分析结果相一致。其

- 3 Prata A J, Platt C M R. Land surface temperature measurements from the AVHRR. In: Proc of the 5th AVHRR Users Meetings, Tromso, Norway, June 25 ~ 28, 433 ~ 438.
- 4 Sobrino J A, Caselles V. Atmospheric correction for land surface temperature measurements obtained over a citrus orchard. ISPRAS J Photogram Remote Sens Environ, 1991, 38: 19 ~ 34.
- 5 Sobrino J A, Li Z-L, Stoll M P. Impact of atmospheric transmittance and total water vapour content in the algorithms for estimating sea surface temperatures. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1993, 31: 946 ~ 952.
- 6 Ulivieri C, Castronuovo M M. A split-window algorithm for estimating land surface temperature from satellites. Adv Space Res, 1994, 14: 59 ~ 65.
- 7 Coll C, Caselles V, Sobrino J A. On the atmospheric dependence of the split-window equation for land surface temperature, Int J Remote Sens, 1994, 15(1): 105 ~ 122.
- 8 Caselles V, Coll C, Vaalor E. Land surface temperature determination in the whole HAPEX-Sahel area from AVHRR data, Int J Remote Sens, 1997, 18(5): 1009 ~ 1027.
- 9 Wu Bingfang, Liu Haiyan. A simplified method of accurate geometric correction for NOAA AVHRR 1B data. Int J Remote Sensing, 1997, 18(8): 1795 ~ 1808.



**张 霞** 1995 年于南京气象学院应用气象系获理学学士学位, 1998 年在北京师范大学资源与环境科学系获地图学与遥感专业硕士学位。现在中科院遥感所高光谱室从事大气纠正、地表温度与发射率反演研究。发表论文 1 篇。



**朱启疆** 1960 年毕业于北京大学, 现为北京师范大学教授, 博士生导师。研究兴趣集中于自然过程与环境模拟及其可视化, 如森林火场蔓延、土壤侵蚀过程、植被冠层反射等模型研究。发表论文 50 余篇。



**闵祥军** 1968 年生, 博士, 现为北京师范大学资源与环境科学系博士后。主要研究方向为大气对辐射传输的影响, 光学传感器辐射标定和光学遥感数据定量化及应用。已发表论文多篇。

## Analysis of Split-Window Algorithms for Estimating Land-Surface Temperature from AVHRR Data

Zhang Xia, Zhu Qijiang and Min Xiangjun

(Department of Resource and Environment Science, Beijing Normal University, Beijing 100875)

**Abstract** Split-window algorithm is a major solution to retrieve land-surface temperature from thermal infrared remote sensing data. In this paper, two images (daytime and night) of NOAA/AVHRR are acquired at Badanjilin desert site on August 22 1997. After the atmospheric correction for the two images is performed by LOWTRAN 7 code, emissivity of certain confidence is estimated by using emissivity inversion algorithm of Li & Becker(1993). On the basis of the same emissivity knowledge, land-surface temperature is retrieved by using five typical split-window algorithms respectively. The temperature of each algorithm is compared with that of algorithm of Sobrino(1991), it turns out that they are comparable and reliable.

**Keywords** Split-window algorithm, Land-surface temperature, Emissivity, LOWTRAN 7