

# 基于遗传算法综合 Terra/Aqua MODIS 热红外数据反演地表组分温度

孙珂<sup>1,2</sup>, 陈圣波<sup>1\*</sup>

(1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026;

2. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036)

**摘要:**混合像元组分温度相对来说更有应用价值,而多角度热红外遥感的发展推动了混合像元组分温度反演基础和方法的发展.根据前期数值模拟得到 Terra 和 Aqua 卫星上的 MODIS 测量可以认为是同一卫星在两个不同观测时间和观测角度上的测量,综合利用 Terra 和 Aqua 卫星上的 MODIS 数据反演混合像元内土壤和植被组分温度.根据混合像元热红外辐射模型,利用遗传算法,分别模拟 Terra 卫星 MODIS 的 32 和 33 通道,以及 Terra 和 Aqua 卫星上 MODIS 的 32 通道辐射反演了河北怀来试验区范围内植被覆盖率、土壤组分温度和比辐射率、植被组分温度和比辐射率等表面参数.通过与实测数据进行比较,综合利用上午 Terra 和下午 Aqua 卫星 32 通道数据反演的上午植被组分温度与地面同步测量温度偏差在 1℃ 内,而利用上午 Terra 卫星 32 和 33 通道数据反演的上午植被组分温度与地面同步测量值偏差在 1.4℃ 内.尽管利用双星数据反演的组分温度精度相对较高,但针对同一个像元,两个方案反演的结果有一定偏差.

**关键词:**Terra; Aqua; MODIS; 热红外; 遗传算法; 组分温度

中图分类号: TP722.5 文献标识码: A

## Genetic algorithm based surface component temperatures retrieval by integrating MODIS TIR DATA from Terra and Aqua satellites

SUN Ke<sup>1,2</sup>, CHENG Sheng-Bo<sup>1\*</sup>

(1. College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China;

2. Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China)

**Abstract:** The component temperatures are key parameters in the environment problems. The multi-angle thermal infrared data are important for the retrieval of component temperature. MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) is one of the sensors onboard EOS-Terra and EOS-Aqua, two sun-synchronous polar orbiting satellites. The sensitivity analysis shows that the same MODIS bands of Terra and Aqua satellites measures in the same behavior under the same variations of atmospheric water vapor, solar and viewing geometries. These MODIS bands may be considered to be the observations of a satellite at two viewing angles and two viewing times. In the study, the foliage and soil component temperature were retrieved by integrating these MODIS data. Based on linear thermal infrared radiation model, the bands 32 and 33 in Terra-MODIS, or the band 32 in Terra-MODIS and Aqua-MODIS, were separately used to retrieve the vegetation cover ratio, soil component emissivity and temperature, foliage component emissivity and temperature by employing genetic algorithm in Huailai area, Hebei Province. By comparing with the synchronous field measurements, the maximum error in the component temperatures is less than 1℃ for the integrated Terra/ Aqua MODIS data, 0.4℃ smaller than that by just Terra-MODIS data. However, for a pixel, its component temperatures are different by such two group data.

**Key words:** Terra; Aqua; MODIS; thermal infrared; genetic algorithm; component temperature

**PACS:** 42.68.Wt

收稿日期:2011-10-14, 修回日期:2012-07-26

Received date: 2011-10-14, revised date: 2012-07-26

基金项目:国家自然科学基金项目(40471086, 40971187)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (40471086, 40971187)

作者简介 (Biography): 孙珂 (1981-), 男, 江苏宿迁人, 助理研究员, 硕士, 主要研究领域为卫星热红外传感器定标与量化应用. E-mail: sunke22@126.com.

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: chensb@jlu.edu.cn.

## 引言

陆面温度(LST)是区域和全球尺度上陆地表面物理过程的一个关键参数.然而,陆地表面多表现为混合像元,反演得到的陆面温度也只是混合像元的平均温度.实际上,真正有实用价值的参量是像元内的组分温度.近年来,很多研究开始关注像元组分温度反演的基础研究<sup>[1]</sup>,并开发了相应的像元组分温度反演方法<sup>[2-3]</sup>,其中相对成熟的方法是矩阵法和遗传算法<sup>[4-7]</sup>.随着多角度遥感的发展,提供了多角度热红外遥感数据,包含地物几何结构和组分温度信息,有利于直接反演混合像元的组分温度<sup>[8-11]</sup>.

Terra 白天轨道和 Aqua 夜晚轨道在同一降交点模式,而 Terra 夜晚轨道和 Aqua 白天轨道在同一升交点模式.在同一大气水汽、太阳和观测几何条件下,通过模拟 Terra 和 Aqua 卫星上 MODIS 通道(20, 22-23, 29, 31-33)的敏感性,表现了类似的观测特征.因此, Terra 和 Aqua 卫星上的 MODIS 测量可以认为是同一卫星在两个不同观测时间和观测角度上的测量<sup>[12]</sup>. MODIS 新的陆表温度(LST)算法(V5)在原有白天/夜晚算法的基础上提供一个选项,是否综合利用在同一观测方位平面内几乎相等高度角的 Terra 和 Aqua 卫星上 MODIS 数据<sup>[13]</sup>.这样,通过综合利用2个角度和多个通道共4对 Terra 和 Aqua 卫星上的 MODIS 数据,成功地分离了4对陆表温度和发射率<sup>[12,14]</sup>.另外,通过综合 Terra 和 Aqua 卫星上的 MODIS 数据也成功地反演了不同陆表条件下的气溶胶光学厚度<sup>[15]</sup>.因此,该研究拟以河北怀来试验区为例,通过综合 Terra 和 Aqua 卫星上同一天两个不同观测角度的数据来反演地表土壤和植被组分温度,同时与同一卫星不同通道数据反演的结果,以及地面同步测量的组分温度进行比较.

## 1 混合像元热红外辐射模型

对于同温同质的非黑体,其热辐射的方向性规律可根据比辐射率概念来描述,则有

$$L_{\lambda}(\theta, T) = \varepsilon_{\lambda}(\theta) L_{b\lambda}(T), \quad (1)$$

其中,  $L_{\lambda}(\theta, T)$  为在  $\lambda$  波段同温同质的非黑体在  $\theta$  方向上的辐射亮度值,  $L_{b\lambda}(T)$  为同温普朗克黑体辐射亮度值,  $\varepsilon_{\lambda}(\theta)$  为该物体在  $\theta$  方向上的比辐射率.由于温度不具有方向性以及黑体辐射的各向同性性质,所以同温同质的非黑体热辐射方向性完全由它的比辐射率方向性所决定.

如果设想传感器视场内有两种温度不同的平板

型地物, A1 与 A2, 如图 1 所示, 它们在视场内所占的面积比分别为  $a_1$  与  $(1 - a_1)$ , 那么传感器在  $\theta$  方向上所接受到的辐射亮度为

$$L_{\lambda}(\theta) = a_1 L_{1D} + (1 - a_1) L_{2D} + \Delta L_1 + \Delta L_2, \quad (2)$$

其中,  $a_1 L_{1D}$  与  $(1 - a_1) L_{2D}$  分别为组分 1 与组分 2 的直接辐射对总辐射亮度的贡献. 它们可用经典的辐射公式表述为:

$$a_1 L_{1D} = a_1 \varepsilon_1(\theta) L_{b\lambda}(T_1), \\ (1 - a_1) L_{1D} = (1 - a_1) \varepsilon_2(\theta_2) L_{b\lambda}(T_2), \quad (3)$$

其中,  $\theta_2 = \theta + \theta'$ , 而  $\Delta L_1$  与  $\Delta L_2$  分别代表由于组分间的多次散射而构成的辐射亮度增量. 由于辐射亮度与比辐射率、温度间服从关系  $L_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} L_{b\lambda}(T)$ , 而多次散射并不改变目标物的温度, 所以由多次散射而增加的辐射亮度只能由比辐射率的增量而引起的. 因此, 它们分别表达为  $\Delta L_1 = \varepsilon_1 L_{b\lambda}(T_1)$ ,  $\Delta L_2 = \varepsilon_2 L_{b\lambda}(T_2)$ , 则<sup>[16]</sup>:

$$L_{\lambda}(\theta) = [a_1 \varepsilon_1(\theta) + \Delta \varepsilon_1] L_{b\lambda}(T_1) \\ + [a_2 \varepsilon_2(\theta) + \Delta \varepsilon_2] L_{b\lambda}(T_2). \quad (4)$$

定义组分有效比辐射率为

$$\varepsilon_{1,e}(\theta) = a_1 \varepsilon_1(\theta) + \Delta \varepsilon_1, \\ \varepsilon_{2,e}(\theta) = a_2 \varepsilon_2(\theta) + \Delta \varepsilon_2, \quad (5)$$

则有

$$L_{\lambda}(\theta) = \varepsilon_{1,e}(\theta) L_{b\lambda}(T_1) + \varepsilon_{2,e}(\theta) L_{b\lambda}(T_2). \quad (6)$$

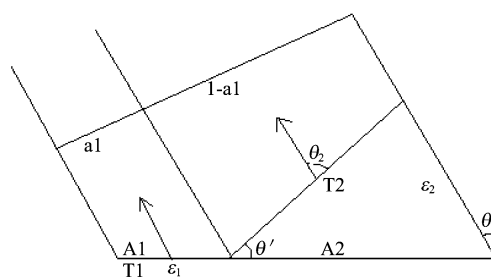


图 1 非同温地表辐射示意图

Fig. 1 The layout of directional radiance of non-isothermal mixed pixel

这样,借助了组分有效比辐射率概念表达了非同温混合像元热辐射方向性规律<sup>[16]</sup>.非同温混合像元热辐射方向性主要决定于组分有效发射率  $\varepsilon_{1,e}(\theta)$  和  $\varepsilon_{2,e}(\theta)$  的方向性.当各组分的性质和组分间的结构确定以后,则体系的热辐射方向性变化规律就已经确定,但体系热辐射亮度值  $L_{\lambda}(\theta)$  的方向性变化则由组分有效发射率和组分温度  $T_1$ 、 $T_2$  共同决定的.

## 2 Terra/Aqua MODIS 数据

## 2.1 Terra/Aqua MODIS 数据

Terra 和 Aqua 卫星分别于 1999 年和 2002 年发射,都搭载有 MODIS 传感器.由于 Terra 卫星分别在地方时上午和夜晚过境,而 Aqua 卫星分别在地方时下午和夜晚过境,而且 Terra 白天轨道和 Aqua 夜晚轨道在同一降交点模式,而 Terra 夜晚轨道和 Aqua 白天轨道在同一升交点模式.这样,两颗星上的 MODIS 数据在时间更新频率上相配合,同一地区每天得到至少 2 次白天和 2 次黑夜数据. MODIS 数据波段范围广,包括了 36 个波段( $0.4 \sim 14.3 \mu\text{m}$ ),其中 20 个可见光-近红外波段,16 个热红外波段,扫描角达到  $55^\circ$ ,扫描宽度达 2 330 km.

## 2.2 数据预处理

为了利用 MODIS 数据反演地表组分温度,MODIS 数据的预处理包括图像辐射校正和几何校正.选择试验区热红外数据的前提是保证没有云覆盖,预处理中不需经过云检测和掩膜处理.图像之间的互校正利用 RSI ENVI 4.2 软件图像对图像校正功能来完成.采用的 MODIS 数据 1B 产品已经过辐射定标,但仍然存在大气热辐射的影响.当假设地表为朗伯体,且大气各向同性,则热辐射传输方程可简化为:

$$L_\lambda = B_\lambda(T_g)\varepsilon_\lambda\tau_{0\lambda} + L_{0\lambda}^\uparrow + (1 - \varepsilon_\lambda)L_{0\lambda}^\downarrow\tau_{0\lambda}, \quad (7)$$

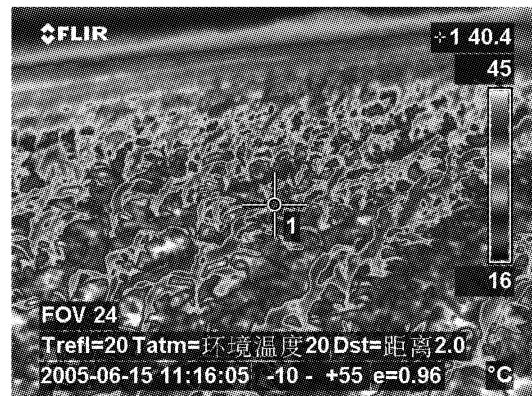
其中, $L_\lambda$  为传感器所接收的波长为  $\lambda$  的热红外辐射亮度; $B_\lambda(T_g)$  为地表物理温度为  $T_g$  (单位, K) 时的普朗克黑体辐射亮度; $\varepsilon_\lambda$  为波长为  $\lambda$  的地表比辐射率; $\tau_{0\lambda}$  为从地面到传感器的大气透过率; $L_{0\lambda}^\uparrow, L_{0\lambda}^\downarrow$  为波长  $\lambda$  的大气上行、大气下行辐射<sup>[17]</sup>. 在利用 MODIS 数据反演地表温度前,通过 MODTRAN 分别计算了 MODIS 相应热红外波段的大气上行辐射、下行辐射和大气透过率.其中,大气廓线采用美国中纬标准大气廓线模式,气溶胶模式选择大陆模式,能见度为 30 km.从而,实现 MODIS 热红外波段的大气校正,消除大气热辐射的影响,将传感器接收的辐射亮度值校正为地表辐射亮度.

## 2.3 地表温度同步测量

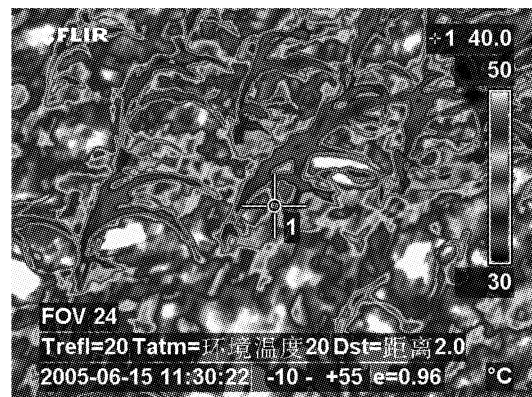
以河北省怀来县为研究区域,地理范围为北纬  $40^\circ 4' \sim 40^\circ 35'$ ,东经  $115^\circ 16' \sim 115^\circ 58'$ .该县具有良好的生态环境,森林覆盖率达到 30.4%,非常适宜作为地表组分温度反演的研究区域.用于反演地表温度的 Terra 卫星 MODIS 数据是中国当地时间 2005 年 6 月 15 日 11:12 的数据, Aqua 卫星的 MODIS 数据是中国当地时间 2005 年 6 月 15 日 12:50.

为验证地表组分温度,于 2005 年 6 月 15 日在

试验区利用热像仪(ThermaCAM S60)在地表开展了 Terra 卫星 MODIS 过境时的同步地表组分温度观测试验,仪器测量精度误差为 2% 以内.由此得到试验区中午 11:16 和 11:30 两个时间点的地表热红外图像(如图 2).



(1) 11:16



(2) 11:30

图 2 怀来地区 2005 年 6 月 15 日地表组分温度热红外成像图

Fig. 2 Thermal infrared images of surface component temperatures in Huailai area on June 15, 2005

## 3 地表组分温度反演

### 3.1 遗传算法

遗传算法(Genetic Algorithm)<sup>[18]</sup>是仿生自然界生物遗传演化而发展起来的一种通用的问题求解方法,具有自组织、自适应和自学习等智能特点.遗传算法求解问题不是直接作用在问题的解空间上,而是利用解的某种编码表示.因此,求解中必须使用某种数据结构,把每个待求参数编码形成基因.基因的不同组合形成不同染色体,一种染色体对应着一个生物个体,而生物群体则由特定数目的染色体表示.

在遗传算法中,适应函数是用来区分群体中个体好坏的标准,是进行自然选择的唯一依据.通过适

应性改变群体内部结构. 优胜劣汰的选择机制使高适应性染色体个体有较高的存活概率. 在确定了适应性度量标准后, 根据适应性高低来选择作为父本的个体. 对于选中的父本, 既可以对其进行克隆操作, 增加优秀个体在群体中的比例, 提高群体的平均适应性, 也可以使其两两杂交, 产生具有父代个体优良特性的新个体, 并维持群体规模, 还可以通过适量的突变, 引入新个体, 保证生物群体的种类多样性. 通过多次迭代, 在群体中产生一个或多个合适的染色体. 这些候选解中适应性最高的那个就是所求问题的解.

### 3.2 地表组分温度反演

为了能够充分的利用 Terra 上午数据和 Aqua 下午数据, 采用两种反演方案. 第一种方案利用 Terra 卫星上 MODIS 两个波段 32 和 33 数据同时反演土壤温度 ( $T_s$ )、植被温度 ( $T_v$ )、两个波段土壤与植被的地表发射率 ( $\varepsilon_{s32}$ ,  $\varepsilon_{s33}$ ,  $\varepsilon_{v32}$ ,  $\varepsilon_{v33}$ ) 和植被覆盖度 ( $f$ ) 共 7 个参数 (如图 3); 第二种方案利用两颗卫星 Terra 和 Aqua 上 MODIS 的 32 波段同时反演上午土壤温度 ( $T_{s1}$ )、植被温度 ( $T_{v1}$ )、下午土壤温度 ( $T_{s2}$ )、植被温度 ( $T_{v2}$ )、土壤与植被的地表发射率 ( $\varepsilon_{s32}$ ,  $\varepsilon_{s33}$ ) 和植被覆盖度 ( $f$ ) 共 7 个参数 (如图 4). 两种方案反演参数都多于独立方程数, 反演中采用遗传算法进行组分温度反演. 将待反演的参数采用二进制编码方案形成特定串长的基因, 基因首尾相接, 连成串长为各基因串长总和的染色体. 根据先验知识设定遗传算法的条件, 缩小搜索范围, 提高反演精度和反演的时间. 根据该研究区域的实际情况, 给出 7 个参数的范围:  $f \in [0, 1]$ ,  $\varepsilon_{s32} \in [0.90, 0.95]$ ,  $\varepsilon_{v32} \in [0.90, 0.99]$ ,  $\varepsilon_{s33} \in [0.90, 0.95]$ ,  $\varepsilon_{v33} \in [0.90, 0.99]$ ,  $T_s \in [270, 330]$ ,  $T_v \in [270, 330]$ . 在二进制编码条件下, 按照轮盘式选择策略, 从随机产生的父代群体中选中两个染色体, 采用点式杂交方式使两个染色体以给定的杂交概率在任意染色体基因位交叉互换, 形成新的染色体, 即子代. 根据拟合出来的不同角度土壤和植被的有效比辐射率和热红外宽波段普朗克黑体辐射公式, 计算  $T_v$ 、 $T_s$ 、 $f$ 、 $\varepsilon_{s32}$ 、 $\varepsilon_{v32}$ 、 $\varepsilon_{s33}$ 、 $\varepsilon_{v33}$  取不同值时, 相应角度辐射亮度为  $L_\lambda(\theta)$ . 把测量值记为  $L_\lambda'(\theta)$ , 则构造的适应函数为:

$$F = \sum_{\theta} (L_\lambda(\theta) - L_\lambda'(\theta))^2 \quad (8)$$

根据目标函数值  $F$  的大小, 确定反演参数组合的适应性, 目标函数值  $F$  越小, 适应性越强, 被选中的概率就高. 但是, 目标函数值不同的变换方法对不

同的选择策略影响不同. 染色体分别以给定的杂交概率和变异概率进行杂交和变异, 产生新的个体. 重复执行操作, 直到得到稳定解为止, 即每次反演得到的组分温度变化很小, 或通过设置最大遗传代数来终止迭代. 遗传算法的有效性主要依赖群体规模 (Popsiz)、迭代次数 (Maxgen)、杂交概率 (Pc) 和变异概率 (Pm). 只有通过多次试验, 选择它们的最佳组合, 才能得到最佳反演结果. 表 1 是不同群体规模和迭代次数反演结果与实测值平均误差分析对照表.

表 1 不同群体规模和迭代次数反演结果对照 (Pc = 0.9, Pm = 0.05)

Table 1 Inversion results with different population size and maximum iterative times (Pc = 0.9, Pm = 0.05)

Popsize	Maxgen = 50			Maxgen = 150			Maxgen = 300		
	$T_s$	$T_v$	Averr	$T_s$	$T_v$	Averr	$T_s$	$T_v$	Averr
25	303.95	300.01	7.40	308.57	306.76	1.72	308.82	306.01	1.97
50	305.56	300.09	6.56	310.72	305.05	1.49	312.80	305.15	1.25
100	306.62	301.25	5.45	311.27	306.01	0.74	311.04	305.95	0.89
200	304.79	300.39	6.79	310.40	307.89	1.33	310.03	306.29	1.22

表 1 中,  $T_s$  是土壤温度、 $T_v$  是植被温度、Averr 是两者与实测值的平均偏差. 从表 1 可见, 随着群体规模和迭代次数的增加其反演结果趋于稳定, 群体规模为从 100 提高到 200, 反演结果精度变化不大, 而迭代次数从 150 提高到 300 对反演结果的影响亦较小. 由于群体规模太大会增加每次迭代计算时间, 而且不能得到较高的搜索效率. 因此, 该研究群体规模选择为 100, 最大迭代次数选择为 150 时反演结果比较理想.

随杂交概率越高, 就越快地收敛到最有希望的最优解区域, 因此杂交概率应取较大值. 但是, 杂交概率太高也可能导致过早收敛. 根据前人研究经验, 杂交概率一般取 0.4 ~ 0.9 为宜. 表 2 是不同杂交概率和变异概率反演结果与实测值平均误差分析对照表. 变异概率受种群大小的影响, 种群太小会使群体产生变异的能力不够, 易出现整个群体最后都演变为一个单一种群, 无法得到全局最佳值; 如果种群太大, 虽然增加了群体多样性, 但易使群体经常存在变异, 导致收敛速度降低, 引起不稳定. 当变异概率大于 0.5 时, 遗传算法就会退化为随机搜索. 根据试验, 杂交概率取 0.9, 变异概率取 0.05 较合适 (如表 2). 这样, 综合表 2 和表 3 的模拟实验结果, 试验区所有像元辐射亮度模拟中的群体规模 (Popsiz)、迭代次数 (Maxgen)、杂交概率 (Pc) 和变异概率

(Pm) 分别确定为: Popsiz = 100, Maxgen = 150, Pc = 0.9, Pm = 0.05. 从而, 反演得到相应的参数.

表 2 不同杂交概率和变异概率反演结果对照 (Popsiz = 100, Maxgen = 150)  
Table 2 Inversion results with different crossover and mutation probability (Popsiz = 100, Maxgen = 150)

Pm	PC=0.5			PC=0.7			PC=0.9		
	$T_s$	$T_v$	Averr	$T_s$	$T_v$	Averr	$T_s$	$T_v$	Averr
0.02	308.40	304.15	3.11	310.46	304.98	1.66	310.32	305.95	1.25
0.05	310.85	307.52	0.92	310.19	305.27	1.65	311.27	306.01	0.74
0.1	312.55	305.19	1.10	310.17	306.41	1.09	310.26	305.26	1.62
0.2	311.45	307.48	0.75	309.29	305.17	2.15	310.75	305.61	1.20

### 3.3 结果分析与验证

从图 3 看出, 利用 Terra 卫星 32 和 33 通道数据反演的植被组分平均温度为 32.7°C, 土壤组分平均温度为 37.56°C, 植被平均覆盖率为 0.481, 土壤组分 32 波段的平均比辐射率为 0.908, 植被组分 32 波段的平均比辐射率为 0.968, 土壤组分 33 波段的平均比辐射率为 0.926, 植被组分 33 波段的平均比辐射率为 0.976. 从图 4 可以看出, 综合利用两颗卫星 Terra 和 Aqua 上 32 通道数据反演的上午植被组分平均温度为 33.04°C, 上午土壤组分平均温度为 37.58°C, 下午植被组分平均温度为 37.52°C, 下午土壤组分平均温度为 43.48°C, 32 通道的植被组分平均比辐射率为 0.962, 32 通道土壤组分平均比辐射率为 0.909, 植被平均覆盖率为 0.417 (如表 3).

表 3 怀来地区地表组分温度与植被覆盖率反演结果  
Table3 The retrieval result of land surface component temperature and vegetation cover ratio in huailai area

	植被组分平均温度	土壤组分平均温度	植被覆盖率
Terra 卫星	32.70°C	37.56°C	0.481
综合 Terra /Aqua 卫星	上午 33.04°C	下午 37.58°C	0.417
	下午 37.52°C	43.48°C	

为了检验反演结果的精度, 采用中国科学院遥感应用研究所提供的卫星同步热红外成像仪实测数据进行比较和验证. 根据试验区同步测量的地表热红外图像, 利用热像仪处理软件 (FLIR QuickReport) 进行处理, 通过输入测量距离、大气温度、相对湿度等参数, 能够计算得到地表温度数据. 在热红外图像上, 植被与土壤比较清晰地区分出来 (如图 2). 在处理后的温度图像上分别选取 5 个植被和 5 个土壤点, 5 个点的温度数据平均值作为实测的植被与土壤平均组分温度.

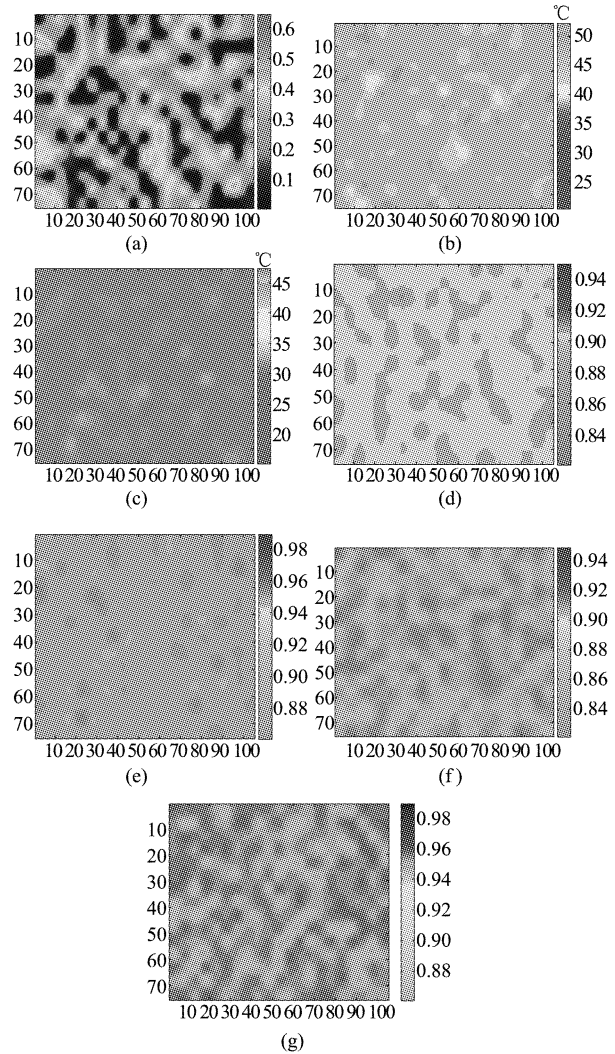


图 3 基于 2005 年 6 月 15 日 11:12 过境 Terra 卫星 MODIS 的 32 和 33 通道数据反演怀来地区植被和土壤组分表面参数 (a) 植被地表覆盖率, (b) 土壤组分地表温度, (c) 植被组分地表温度, (d) 32 通道土壤组分比辐射率, (e) 32 通道植被组分比辐射率, (f) 33 通道土壤组分比辐射率, (g) 33 通道植被组分比辐射率

Soil and vegetation component parameters retrieval by band 32 and 33 in Terra-MODIS data at 11:12 on June 15, 2005. (a) Vegetation cover ratio, (b) soil component temperature, (c) foliage component temperature, (d) soil component emissivity of band 32, (e) foliage component emissivity of band 32, (f) soil component emissivity of band 33, and (g) foliage component emissivity of band 33

在图 3 和图 4 所示的植被和土壤组分温度图上, 以试验区所在的像元为中心, 选择 9 × 9 个像元的组分温度平均值代表试验区内反演的植被和土壤组分温度. 通过与实测的植被和土壤平均组分温度比较, 得到两种不同反演方案的组分温度偏差 (如表 4). 从表 4 看出, 利用上午 Terra 卫星 32 和 33 通道数据反演的上午植被组分温度与地面同步测量值

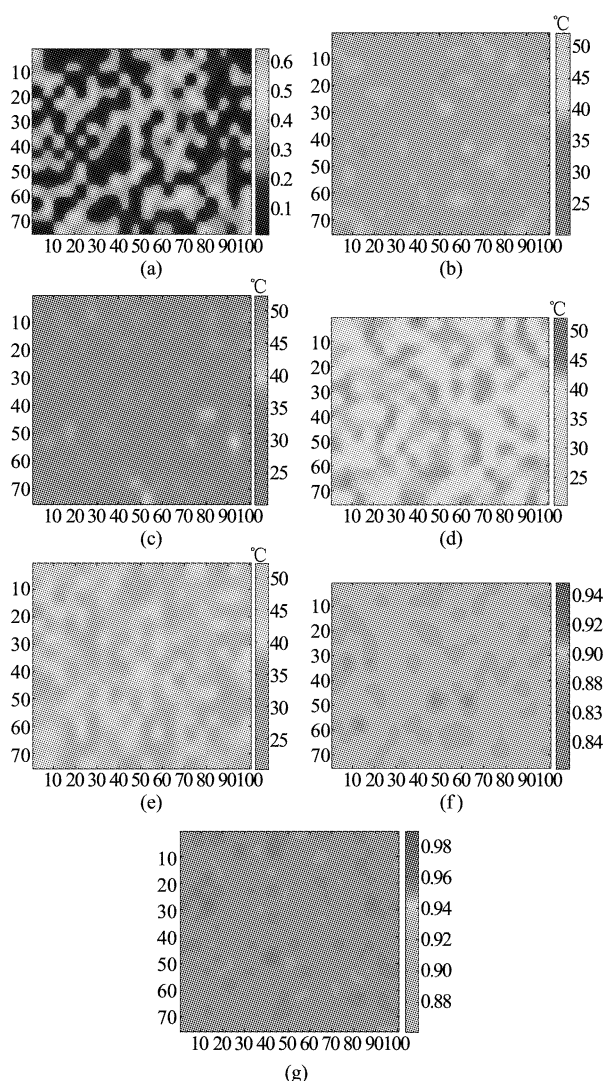


图4 综合2005年6月15日11:12过境的Terra和12:50过境的Aqua卫星上MODIS的32通道数据反演的怀来地区植被和土壤组分表面参数(a)植被覆盖率,(b)11:12土壤组分表面温度,(c)11:12植被组分表面温度,(d)12:50时土壤组分表面温度,(e)12:50时植被组分表面温度,(f)11:12时土壤组分比辐射率,(g)11:12时植被组分比辐射率

Fig. 4 Soil and vegetation component parameters retrieval by band 32 in Terra-MODIS and Aqua-MODIS at 11:12 and 12:50 on June 15, 2005. (a) Vegetation cover ratio, (b) soil component temperature at 11:12, (c) foliage component temperature at 11:12, (d) soil component temperature at 12:50, (e) foliage component temperature at 12:50, (f) soil component emissivity at 11:12, and (g) foliage component emissivity at 11:12

相差0.99℃,相对误差为2.9%;反演的上午土壤组分温度值与地面同步测量温度相差1.4℃,相对误差为3.5%。综合利用上午Terra和下午Aqua卫星32通道数据反演的上午植被组分温度与地面同步测量温度相差0.79℃,相对误差为2.3%,反演的

上午土壤组分温度与地面同步测量温度相差0.69℃,相对误差为1.7%。

表4 反演的土壤与植被组分温度与实测温度比较

Table 4 Comparison between retrieved parameters and ground truth data

	Terra/Aqua 数据		Terra 卫星数据	
	植被组分温度	土壤组分温度	植被组分温度	土壤组分温度
实测温度	33.8℃	38.96℃	33.8℃	38.96℃
反演温度	33.01℃	38.27℃	32.81℃	37.56℃
偏差	0.79℃	0.69℃	0.99℃	1.4℃
相对误差	2.3%	1.7%	2.9%	3.5%
均方根误差	1.22℃	1.51℃	1.25℃	1.55℃

根据反演的组分温度与怀来实测组分温度数据进行均方根误差分析,仅利用Terra卫星32和33通道数据反演的植被组分温度均方根误差为1.25℃,土壤组分温度均方根误差为1.55℃;综合利用Terra和Aqua两颗卫星反演的植被组分温度均方根误差为1.22℃,土壤组分温度均方根误差为1.51℃。

#### 4 结论

遗传算法通过编码进行遗传操作和优胜劣汰的自然选择,指导学习和确定搜索方向。遗传算法具有自组织性、自适应性、智能等特点。基于非同温混合像元的热红外辐射模型,利用遗传算法分别模拟了Terra卫星上MODIS的32和33通道、Terra和Aqua卫星上MODIS两个不同观测方向上32通道的热红外辐射,由此反演得到河北怀来试验区范围内植被覆盖率、土壤组分温度和比辐射率、植被组分温度和比辐射率等表面参数。结合地面同步观测,通过调节遗传算法的控制参数组合,两个不同方案反演的土壤和植被组分温度分别与地面同步实测温度比较,综合两颗卫星上MODIS的32通道数据反演的植被和土壤组分温度精度相对较高,而利用Terra卫星上32和33通道数据反演的组分温度精度相对较低,但其土壤组分温度偏差只是1.4℃。由此可见,遗传算法可以较好地处理欠定问题和波段之间的高相关性,反演精度较高。特别地,双星联合反演的精度较高。然而,针对同一个像元,两个方案反演结果有一定偏差,造成这种偏差的原因可能是:

(1) 组分面积比例随观测角度的变化而变化。由于混合像元中组分温差和发射率的差异,当不同组分的面积比例因为观测方向的改变而发生变化时,就会引起整个像元的热辐射方向性变化。

(2) 大气辐射对反演结果造成的影响。因为



Terra 和 Aqua 过境时间有时间差,大气校正过程中可能引入了误差.

(3) 双星反演模型的建立是在假设地表土壤和植被组分上午和下午比辐射率不变,但是随观测角度的变化引起有效比辐射率的改变,从而导致像元热辐射的变化.

## 致谢

像元组分温度反演的地面同步观测验证中,得到了中国科学院遥感应用研究所遥感信息科学国家重点实验室柳钦火研究团队的鼎力帮助,提供了验证数据. 没有他们的支持,不能形成此文,特致谢意. 另外,感谢美国 NASA GSFC 免费提供 MODIS 数据下载服务. 特别感谢两位论文评阅人有价值的评论,提高了论文的质量.

## REFERENCES

- [1] Sobrino J A, Jimenez-Munoz J C, Verhoef W. Canopy directional emissivity: comparison between models [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **99**(3): 304–314.
- [2] YANG Gui-jun, PU Rui-Liang, ZHAO Chun-Jiang, et al. Estimation of subpixel land surface temperature using an endmember index based technique: A case examination on ASTER and MODIS temperature products over a heterogeneous area [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**(5): 1202–1219.
- [3] Sanchez J M., Kustas W P., Caselles V., Anderson, M. C. Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(3): 1130–1143.
- [4] Francois C. The potential of directional radiometric temperatures for monitoring soil and leaf temperature and soil moisture status [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **80**(1): 122–133.
- [5] ZHUANG Jia-Li. Retrieval of component temperatures of mixed-pixel using genetic algorithms and neural networks [D]. Beijing: Peking University (庄家礼. 利用遗传算法和神经网络反演混合像元组分温度. 北京: 北京大学), 2000.
- [6] Xu Xi-Ru, Chen Liang-Fu, Zhuang Jia-Li, Genetic Inverse Algorithm for Retrieval of Component Temperature of Mixed Pixel by Multi-angle Thermal Infrared Remote Sensing Data [J]. *Science in China(D)*, 2001, **44**(4): 363–372.
- [7] Xu Xi-Ru, Fan Wen-Jie, Chen Liang-Fu. Matrix expression of thermal radiative characteristics for an open complex [J]. *Science in China (D)*, 2002, **45**(7): 654–661.
- [8] Wang Feng-Qing, Fan Wen-Jie, Qin Qi-Ming. A Method Combining Matrix Expression with Objects' Statistic Characteristic for Retrieving Component Temperature [J]. *Journal of Remote Sensing* (王奋勤, 范闻捷, 秦其明, 等. 矩阵表达与对象统计特性相结合的组分温度反演方法. 遥感学报), 2004, **8**(2): 102–106.
- [9] Kimes D S. Remote sensing of row crop structure and component temperatures using directional radiometric temperatures and inversion techniques [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1983, **13**(1): 33–55.
- [10] Li Z L, Stroll M P, Zhang R H, et al. Extract Soil and Vegetative Temperature by ATSR Data [J]. *Science in China(E)*, 2000, **30**(Supplement): 27–38.
- [11] He Li-Ming, Yan Guang-Jian, Wang Jin-Di, et al. Retrieval of Land Surface Components Temperatures Using ATSR-2 Data [J]. *Journal of Remote Sensing* (何立明, 阎广建, 王锦地, 等. 利用 ATSR-2 数据提取地表组分温度), 2002, **6**(3): 161–167.
- [12] Bao Yun-Fei, Chen Shen-Bo, Liu Qin-Huo, et al. Land surface temperature and emissivity retrieval by integrating MODIS data onboard Terra and Aqua satellites [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, **32**(5): 1449–1469.
- [13] Wan Zheng-Ming. New refinements and validation of the MODIS land-surface temperature/emissivity products [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(1): 59–74.
- [14] Chen Sheng-Bo, Song Jin-Hong. Physics-based Retrieval of Atmospheric Temperature-humidity Profile and Land Surface Temperature and Emissivity Simultaneously by Integrating MODIS Measurements onboard Terra and Aqua Satellites [J]. *Sci China Phys Mech Astron*. 2011, **54**(8): 1420–1428.
- [15] Tang Jia-Kui, Xue Yong, Yu Tong, et al. Aerosol optical thickness determination by exploiting the synergy of TERRA and AQUA MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **94**(3): 327–334.
- [16] Chen Liang-Fu. The model of radiant directionality of non-isothermal mixed-pixel [D]. Beijing: Peking University (陈良富. 非同温混合像元热辐射方向性模型. 北京: 北京大学图书馆), 1999.
- [17] Liu Qin-Huo, Xu Xi-Ru, Chen Jia-Yi. The Retrieval of Land Surface Temperature and Emissivity by Remote Sensing Data: Theory and Digital Simulation [J]. *Journal of Remote Sensing* (柳钦火, 徐希孺, 陈家宜. 遥测地表温度与比辐射率的迭代反演方法-理论推导与数值模拟, 遥感学报), 1998, **2**(1): 1–8.
- [18] Holland J H. Adaptation in natural and artificial systems [M]. University of Michigan Press, 1975.