

文章编号: 1007-4619(2000)增-0038-07

从 MODIS 数据中反演大气廓线 和地表参数

庄家礼, 陈良富, 徐希孺

(北京大学 遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871)

摘要: MODIS 的设计目的是能够每隔 1—2 天测量一次全球范围生物的和物理的过程。我们可以从该仪器提供的数据中获得进一步的地球表面和低层大气的全球动力和过程信息。对 MODIS 数据, 利用遗传算法, 首先从大气温度探测波段中, 反演得到大气温度廓线信息; 然后从水汽波段中获得水汽廓线信息; 最后在已有的温、湿廓线基础上, 校正测量辐射亮度数据。校正了大气影响后, 利用 MODIS 29、31、32 大气窗口波段, 采用比辐射率约束方法 (Emissivity bounds method) 缩小波段比辐射率取值范围, 然后采用遗传算法实现陆面温度、波段比辐射率等地表参数的同时反演。模拟试验表明, 利用遗传算法可以从 MODIS 数据中获得较为精确的大气廓线信息和地面参数信息, 为全球温室效应和全球变化研究提供支持。

关键词: 遗传算法; MODIS 数据; 大气廓线; 地表参数

中图分类号: TP701/P423 **文献标识码:** A

1 引言

早在 1959 年, Kaplan 就指出从红外辐射测量数据中确定大气结构的可能性^[1]。经过 10 年多的理论完善和实验研究, 利用卫星遥测获得大气廓线信息已进入业务运行阶段^[2]。从那以后, 无论是仪器的技术能力还是温度廓线的反演方法都取得了长足的进步。目前, 大气温度廓线的探测精度达到 2K, 对流层中垂直分辨率为 3—5km。2000 年后将安装在极轨平台上的大气红外探测器 (AIRS) 期望能提供精度为 1K, 垂直分辨率达到 1km 的大气温度廓线, 以满足数值天气预报要求达到的精度^[3]。

即使在精确校正大气影响的情况下, 由于比辐射率随着波段而变化, 陆面温度的反演也是不确定性反演问题。即 N 个方程对应着 $N+1$ 个未知数 (N 个比辐射率和一个陆面温度)。为了使方程组完备, 出现了非常多的陆面温度反演算法, 代表性的有: 劈窗法^[4]、双温度法^[5]、温度和比辐射率分离法 (TES)^[6]等。这些方法在对比辐射率作出限定的情况

下, 把不确定性反演问题转化为确定性反演问题, 实现陆面温度的反演。

MODIS 积 AVHRR 和 TM 之大成, 包括可见光、近红外、中红外和远红外波段, 提高了对陆地、海洋和大气的观测能力。如何从 MODIS 各波段数据中, 提取出合适的参数, 满足全球变化研究的需要, 成为关注的焦点。本文首先从 MODIS 33—36 大气温度探测波段和 27—28 大气水汽探测波段数据中, 利用遗传算法获得大气廓线信息, 然后利用大气廓线信息校正 MODIS 29, 31—32 大气窗口波段大气效应的影响。最后采用比辐射率约束方法^[7]限制比辐射率的取值范围, 再利用遗传算法, 实现陆面温度和比辐射率的同时反演。

2 大气温、湿廓线的反演

由于探测波段的限制, 遥感手段探测大气廓线只能获取有限气层的大气信息, 而真实的大气廓线从地面到高空是连续的。因此, 需要对离散大气层信息进行内插和外插, 以获得整个大气层的连续廓

收稿日期: 1999-12-15; 修订日期: 2000-08-10

基金项目: 国家“九五”攀登预选项目 95-预-38。

作者简介: 庄家礼 (1969—), 男, 1997 年毕业于中国科学院水土保持研究所水土保持专业。现为北京大学遥感与地理信息系统研究所博士研究生, 主要从事遥感信息建模与反演研究。

线信息。幸运的是，由于大气温度场和水汽场都存在自相关性，因此可以对温度和水汽垂直分布做参数化表示。曾庆存^[8]给出了一种参数表示方法，并指出参数少时该方法的优越性。

2.1 大气温度廓线反演

大气温度廓线反演原理

在大气温度廓线的遥感探测问题中，下面等式成立：

$$L_\lambda = B_\lambda[T(z_0)]\tau_\lambda(z_0)\epsilon_\lambda + \int_{z_0}^z B_\lambda[T(z)]w_\lambda(z)dz + (1-\epsilon_\lambda)\tau_\lambda(z_0)\int_{z_0}^z B_\lambda[T(z)]w_\lambda(z)dz \quad (1)$$

方程(1)是在局地热动力平衡条件下，平面平行均质和非散射大气的辐射传输方程的积分形式^[9]。由于是在 CO₂ 吸收波段，大气透过率较小，而且热红外波段比辐射率较大，因此大气下行辐射的反射项可以忽略不计。方程(1)中，λ 是光谱波段，L_λ 是 z 高度处测量的辐射亮度值，ε_λ 是地物的比辐射率，τ_λ(z₀) 是地表到天空的大气透过率。B 是普朗克黑体辐射函数，由于普朗克函数对频率的依赖性远小于对温度的依赖性，因此，在给定的热红外波段，可以近似为温度的二次函数。w_λ(z) 是权重函数，定义为：

$$w_\lambda(z) = \frac{\partial \tau_\lambda(z)}{\partial z} \quad (2)$$

从图 1 所示的 MODIS 32-36 波段，中纬度夏季大气模式条件下，计算得到的权重函数可以看出，对给定的波段，(1) 式右边第二项在不同的高度层达到强的极大值。由中值定理，(1) 式可近似表示为^[10]：

$$L_\lambda = B_\lambda[T(z_0)]\tau_\lambda(z_0)\epsilon_\lambda + B_\lambda[T(z')]w_\lambda(z')\Delta_i z \quad (3)$$

式中 z' 表示权重函数极大值所在的高度层 i，而 Δ_iz 是第 i 层的高度差分，并被定义为权重函数的有效高度。如果水汽廓线保持稳定，对于 MODIS 35-36 波段，当温度廓线从 284.2K 增加到 304.2K，间隔为 2K 时，计算表明，无论是权重函数，还是权重函数极值所处的气层高度，都基本保持不变(图 2、图 3)。

在地面上，通过测量太阳辐射可以求得大气总透过率，而权重函数是可以从某一给定大气状态计算而得到的已知函数^[11]，则 MODIS 每个波段对应

的气温最佳信息层是知道的。因此，正问题就是在已知陆面温度、地物比辐射率和每个波段对应的高度层中的气温，模拟得到不同波段的辐射亮度数据。从辐射亮度数据中确定大气的温度廓线，即为反演。

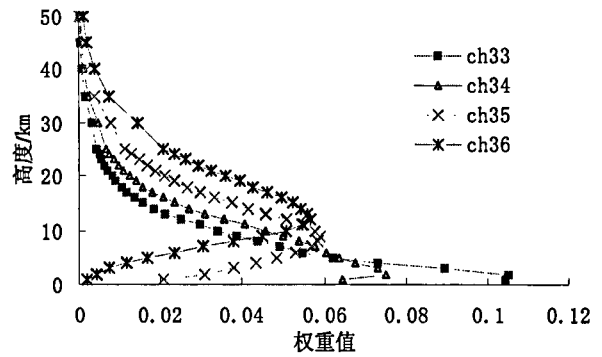


图 1 LOWTRAN7 计算得到的 MODIS 温度权重函数
Fig. 1 Temperature weighting functions of 4 MODIS bands calculated by LOWTRAN7

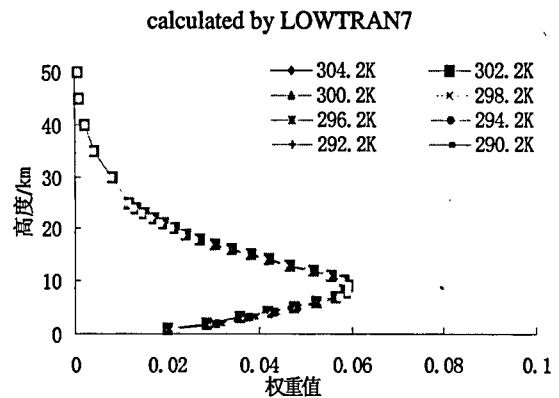


图 2 MODIS 35 波段权重值随温度变化情况
Fig. 2 Weighting values of MODIS band 35 varied with temperatures

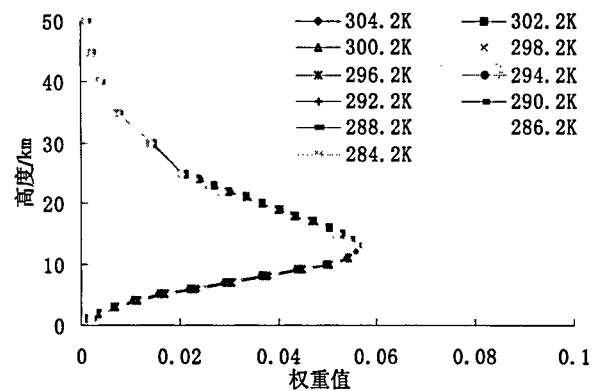


图 3 MODIS 36 波段权重值随温度变化情况
Fig. 3 Weighting values of MODIS band 36 varied with temperatures

大气温度廓线反演方法

传统的数值反演方法，如共轭方向法，Chahine

张驰法^[9]和 Smith 迭代法^[12]等需要选定模型参数的初始猜测值,因此反演结果往往受初始值的影响显著,对于非线性问题,则容易陷入局部极小而得不到整体最优解,并且也不适于多维反演问题。另外,计算量大,很费机时,业务上不实用。

遗传算法是基于自然遗传和自然选择原理的自适应搜索和优化算法,它采用简单的编码技术来表示各种复杂的结构,并通过一组编码进行简单的遗传操作和优胜劣汰的自然选择来指导学习和确定搜索的方向。典型的遗传算法必须将每个待求参数编码形成基因,基因的不同组合形成不同的染色体,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。对基因及其组合反复进行自然选择、克隆、杂交和突变等步骤,最终便可达到最佳的参数组合^[13-15]。

我们采用二进制编码方式,把待反演的各高度上的大气温度、陆面温度和地物比辐射率编码形成给定二进制长度的基因,基因的不同组合形成不同的染色体。首先随机产生一定数目的生物群体,然后采用轮盘式选择算子选择父本,对选中的父本,使它们两两进行特定概率的点式杂交,互换基因形成新个体,即子本,再对子本实施少量的变异操作,使子本发生基因突变,获得父本不具有的特性。最后对产生的子本进行适应性评价,用适应性强的个体替换父本中适应性较差的个体,使得父本群体中适应性强的个体保留到下一代群体,而适应性差的个体被淘汰。这样群体不断优化,最后就可以获得最优的大气参数和地面参数信息。在遗传算法的实施过程中,起关键作用的是适应函数(或叫目标函数)的确定。因为适应函数是用来区分群体中个体好坏的标准,是算法演化过程的驱动力,是进行自然选择的唯一依据。改变群体内部结构的遗传操作都是通过适应函数的值加以控制的^[15]。这里定义的适应函数是:

$$F = -\sum_{\lambda=1}^4 (L_{\lambda} - L'_{\lambda})^2 \quad (4)$$

其中, λ 从 1 到 4 是 MODIS 33-36 波段, L_{λ} 是利用模型计算得到的辐射亮度值, L'_{λ} 是模拟的测量值。从 (4) 式看到,当模型计算值越接近模拟测量值, F 越大,适应性越强。

与传统的优化反演算法不同,遗传算法是以随机产生的群体为单位展开搜索,并且由于杂交和突变等遗传算子的存在,所以不易陷入局部最优;而且它不要求微分等复杂的数学计算,能很好地解决

离散模型参数和参数数目很多时的优化问题^[13-15]。

模拟反演实验

虽然 MODIS 已经上天,但目前还处于调试阶段,我们采用模拟的辐射亮度值作为观测资料。遗传算法反演不需要初始猜测值,只需要给定待反演参数的取值区间。我们在模拟反演时,各参数所取的真值、给定的参数区间和反演结果见表 1。遗传算法的控制参数经调整后,我们取群体规模为 100,迭代次数为 300,杂交概率为 0.9,变异概率为 0.01。群体适应函数的统计值随迭代次数的变化情况见图 4。从图 4 可以看出,随着演化的发展,虽然群体的方差有所波动,但总体而言,在逐步减少,并最终趋近于 0,而群体的均值始终在减小。这一方面说明了此次遗传算法的反演迭代是收敛的,另一方面也提醒我们,迭代次数不能太少。确定了适当的遗传算法控制参数后,迭代是可以收敛的。从表 1 可以看出,反演结果非常理想。

表 1 反演参数的真值、设定的区间和遗传算法反演结果

Table 1 Real values, bounds and genetic algorithm

	retrieved values of parameters		
	真值	给定区间	反演结果
T_s	300	—	—
ϵ_{33}	0.94	—	—
ϵ_{34}	0.94	—	—
T_{33}	286.2	[280, 295]	286.277
T_{34}	274.2	[270, 280]	274.31
T_{35}	242.2	[235, 250]	242.761
T_{36}	223.3	[220, 230]	223.376

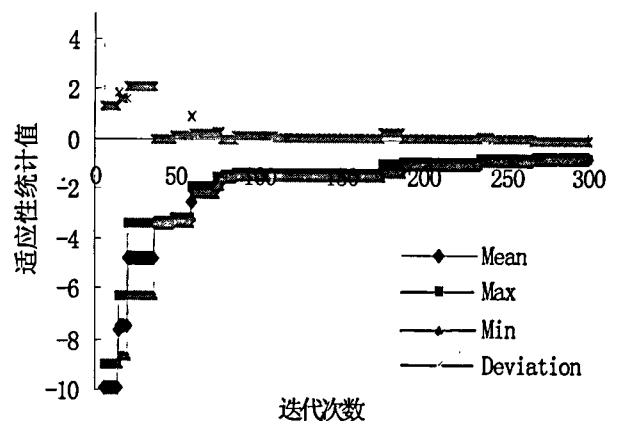


图 4 群体适应性统计值随迭代次数的变化情况

Fig. 4 Fitness statistics of objective function changed with generation numbers

2.2 大气水汽廓线反演

在获得大气温度廓线以后，可以利用与反演大气温度廓线类似的方法，从 MODIS 27-28 波段中反演出水汽廓线。由于 MODIS 27-28 波段位于水汽吸收带，在中纬度夏季大气模式下，其透过率小于 0.001，因此，可以不考虑地面辐射对传感器测量值的影响。

大气温度廓线变化时，MODIS 27-28 波段权重函数非常稳定（图 5，图 6），但水汽含量发生变化时，MODIS 27-28 波段权重函数（极值）有一定的变化（图 7，图 8）。我们对水汽从中纬度夏季模式大气水汽含量的 40%到模式大气水汽含量的 160%，间隔为 10%，进行了模拟。对模拟结果进行最小二乘法拟合。在此基础上，利用遗传算法，对水汽含量进行反演，由于地面辐射影响可忽略不计，所以反演效果较好。

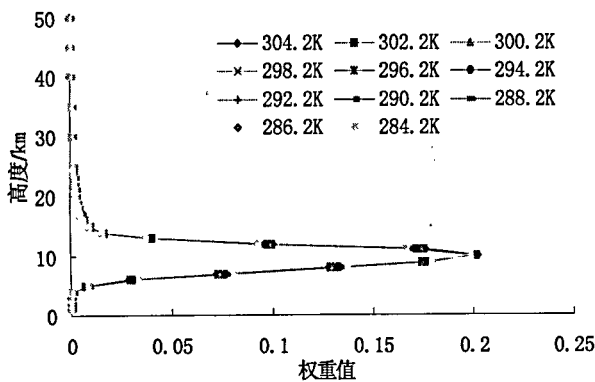


图 5 MODIS 27 波段权重值随温度变化情况
Fig. 5 Weighting values of MODIS band 27 varied with temperatures

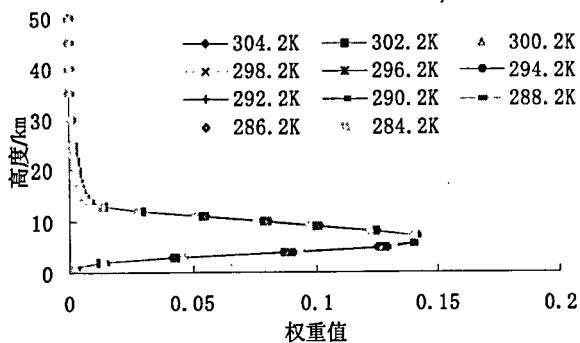


图 6 MODIS 28 波段权重值随温度变化情况
Fig. 6 Weighting values of MODIS band 28 varied with temperatures

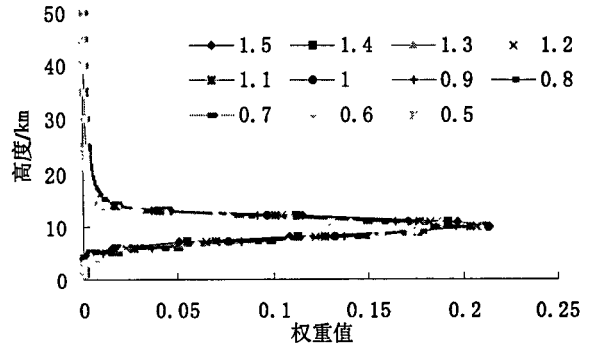


图 7 MODIS 27 波段权重值随水汽变化情况
Fig.7 Weighting values of MODIS band 27 varied with water vapors

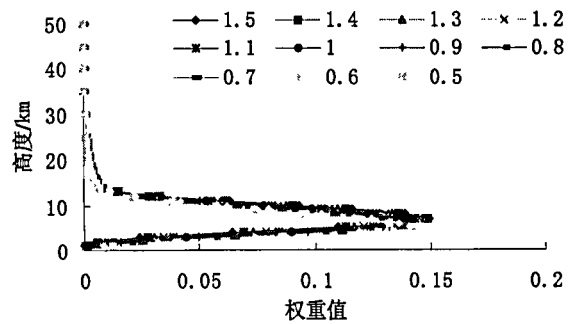


图 8 MODIS 28 波段权重值随水汽变化情况
Fig.8 Weighting values of MODIS band 28 varied with water vapors

3 陆面温度和比辐射率的同时反演

在利用反演得到的大气廓线信息进行大气校正后，我们利用 MODIS 29, 31-32 波段数据，同时反演陆面温度和 3 个波段的比辐射率。3 个方程，4 个未知数，难以得到稳定的数值解。我们利用比辐射率约束方法，缩小每个波段比辐射率的取值范围，然后利用遗传算法可以反演不确定性问题的特点，同时反演出温度和波段比辐射率的值，可以得到稳定的数值解。

3.1 比辐射率约束法

Jaggi 等人发现由于地表温度独立于波长，使得建立温度和比辐射率值的明确界限成为可能，从而提出了比辐射率约束法^[7]。对于每个像元和每个波段（分别加以考虑），存在一系列的矢量点对 (T, ϵ_i) ，它们都是可能的解。由于地表温度在每一个波段中都是相同的，因此，某些矢量点对 (T, ϵ_i) 可以剔除掉。事实上，可能的解都落在较窄的温度区间范围内。改进的某波段比辐射率可以通过该波

段矢量点对的轨迹和可能温度区间界线的交点确定。图9是在地表温度为295K时, MODIS 29波段和32波段地表温度和 ϵ_i 的解轨迹。从图中可以看到, ϵ_{29} 和 ϵ_{32} 的取值范围都有所减小。

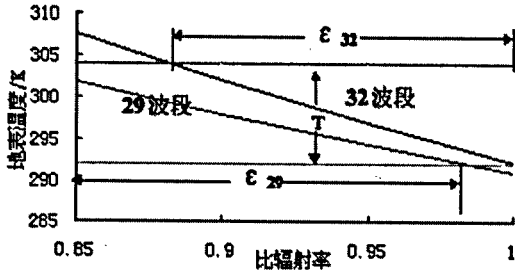


图9 MODIS 29波段和32波段地表温度和 ϵ_i 的解轨迹图
Fig. 9 Emissivity Bounds method illustrated by LST and band emissivities of MODIS band 29 and 32

如果有先验知识可以对 ϵ_i (或陆面温度)取值区间加以限制,则 ϵ_i 的改进程度会更大。对除沙漠以外的地球表面而言, ϵ_i 一般在0.85—1之间,改进后的 ϵ_i 比假定 ϵ_i 在0—1之间,将有用得多。如果可以利用MODIS的可见光,近红外波段获得分类信息,对识别出来的水体、植被等地物,

给定其 ϵ_i 取值范围在0.95—1之间,则改进后的 ϵ_i 范围将更加有用^[16]。

3.2 遗传算法反演实验

我们把待反演的地表温度(T_s)和MODIS 29, 31—32波段比辐射率(ϵ_{29} 、 ϵ_{31} 、 ϵ_{32})分别编码,形成二进制串长为16位的基因。采用与2.1节类似的遗传算法,从模拟的MODIS29, 31—32波段数据中,同时反演地表温度和3个波段的比辐射率。

我们给定真值为 $T_s^i = 300\text{K}$, $\epsilon_{29} = 0.93$, $\epsilon_{31} = 0.96$, $\epsilon_{32} = 0.97$,在中纬度夏季大气模式条件下,利用方程(1)计算得到的MODIS 29, 31—32波段的辐射亮度值即为模拟测量值。在对遗传算法控制参数大量试验的基础上,我们选取群体规模为50,迭代次数为100,杂交概率为0.9,变异概率为0.01。两种反演参数取值区间得到的反演结果见表2。

从表2可以看出,反演参数取值区间的改进,对遗传算法反演结果的影响是显著的。这说明比辐射率约束方法和遗传算法的有机结合,可以实现陆面温度和波段比辐射率不确定性问题的反演。

表2 不同参数区间对遗传算法反演结果的影响

Table 2 Parameters inverted using genetic algorithm influenced by parameters intervals

		T_s	ϵ_{29}	ϵ_{31}	ϵ_{32}
1	参数区间	[285, 310]	[0.85, 1.0]	[0.85, 1.0]	[0.85, 1.0]
	反演结果	300.867	0.9062	0.9438	0.953
2	参数区间	[290, 305]	[0.9, 1.0]	[0.9, 1.0]	[0.9, 1.0]
	反演结果	299.903	0.9311	0.9625	0.9719

4 结果和讨论

中分辨率成像波谱辐射计(MODIS)搭载在EOS平台上,已经升空,它的36个波段,遍及可见光、近红外、中红外和热红外谱区,经过全面校验后,将为全球变化研究提供地球表面和低层大气多方面的数据。从MODIS数据中,反演全球变化研究所需要的参数信息,是MODIS设计目标能否实现的关键环节。本文首先从MODIS大气探测波段数据中,反演大气温度和水汽信息,然后从校正大气影响的29, 31—32波段数据中同时反演陆面温度和波段比辐射率信息。模拟试验表明,遗传算法计算简单,依靠问题解空间的几何特性,可同时

反演得到多个参数的值,且能得到全局最优解。比辐射率约束方法和遗传算法的有机结合,可以实现陆面温度和波段比辐射率不确定性问题的反演。

在大气温度廓线反演时,由于MODIS 33、34波段主要探测低层大气温度,必然受到地面辐射的影响,不能象对MODIS 27、28和35、36波段那样,由于透过率极小而忽略地面的影响。因此,在反演大气温度廓线时,我们假定地表温度和33、34波段地物比辐射率已知。这样得到的大气参数和随后的陆面温度和比辐射率的反演会带有误差。我们把最终得到的陆面温度返回到大气温度的反演中,由于MODIS 33、34波段的大气透过率仍然较低,因而比辐射率的影响不大。这样经过数次迭代,反

演参数会趋于稳定。这样的多阶段反演, 在得到 MODIS 数据后, 可以进一步调整改进。地表参数和大气参数的一体化反演可以更加充分地利用 MODIS 提供的信息, 遗传算法和神经网络的有机结合, 使得反演获得成功成为可能。

参 考 文 献 (References)

- [1] Kaplan, L.D. Inference of atmospheric structure from remote radiation measurements [J]. *J. Opt. Soc. Am.* 49:1004—1007.
- [2] M. Halem, M. Ghil, R. Atlas. Some experiments on the effect of remote sounding temperatures upon weather forecasting, in *Remote Sensing of the Atmosphere: Inversion Methods and Applications* [C]. edited by Alain L. Fymat, and Vladimir E. Zuev. Elsevier Scientific Publishing Company, 1978, 9—33.
- [3] M. T. Chahine, et.al. AIRS—Team Unified Retrieval for Core Products, Level 2 [R]. <http://eosps0.gsfc.nasa.gov>.
- [4] Becker F., Z. L. Li. Toward a local split window method over land surface [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(3): 369—393.
- [5] Wan Z. M., Li Z. L. A physics-based based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from MODIS/EOS data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35: 980—996.
- [6] Gillespie, R. A., Matsunaga, T., Rokugawa S., Hook, S. J. Temperature and emissivity separation from Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36: 1113—1126.
- [7] Jaggi S., Quattrochi, D., Baskin R. An algorithm for the estimation of bounds on emissivity and temperatures from thermal multispectral airborne remotely sensed data (Abstract). In V.J. Realmuto edited, Summary of the Third Annual JPL Airborne Geoscience Workshop [C]. June, 22—24, Jet Propulsion Laboratory Publication, 1992, 92—114.
- [8] Zeng Qingcun. The Principal of Atmosphere Infrared Remote Sensing [M]. Beijing: Science Press, 1974. [曾庆存. 大气红外遥测原理. 北京: 科学出版社, 1974.]
- [9] Moustafa T. Chahine. Generalization of the Relaxation Method for Inverse Solution of Nonlinear and Linear Transfer Equations [C]. In *Inversion Methods in Atmospheric Remote Sounding*, edited by Adarsh Deepak, Academic Press, 1977, 67—111.
- [10] Liao Guonan. Introduction to atmospheric radiation [M]. Beijing: Meteorological Press, 1985. [廖国男著, 周诗健等译. 大气辐射导论. 北京: 气象出版社, 1985.]
- [11] Li Jun, Zeng Qingcun. Infrared remote sensing of clear atmosphere and related inversion problem: Part I: Theoretical study [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1997, 21(1): 1—9. [李俊, 曾庆存. 晴空时大气红外遥感及其反演问题研究: I. 理论研究. 大气科学, 1997, 21, 1—9.]
- [12] Smith, W.L. Iterative solution of the radiative transfer equation for the temperature and absorbing gas profile of an atmosphere [J]. *Appl. Opt.*, 1970, 9: 1993—1998.
- [13] K. Deb. Genetic Algorithms for Function Optimization [C]. In F. Herrera and J. L. Verdegay edited, Genetic algorithms and soft computing. Physica-Verlag, Springer-Verlag Company. 1996, 3—29.
- [14] G. Winter, M. Galan, P. Cuesta, D. Greiner. Genetic algorithms: A stochastic improvement technique: tools, skills, pitfalls and examples [C]. In G. Winter, J. Periaux, M. Galan, P. Cuesta, Genetic algorithms in engineering and computer science. John Wiley and Sons. 1996, 217—247.
- [15] Pan Zhengjun, Kan Lishan, Chen Yuping. Evolutionary Computation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998. (In Chinese)[潘正军, 康立山, 陈毓屏. 演化计算. 北京: 清华大学出版社, 1998.]
- [16] Gillespie, R. A., et.al. Temperature/Emissivity Separation Algorithm Theoretical Basis Document [R]. Version 2.4, <http://eosps0.gsfc.nasa.gov>.

Retrieval of Atmospheric Profiles and Land Surface Parameters from MODIS Data

ZHUANG Jia-li, CHEN Liang-fu, XU Xi-ru

(Institute of Remote Sensing and GIS of Peking University, Beijing, China, 100871)

Abstract: MODIS is an EOS facility instrument designed to measure biological and physical processes on a global basis every 1- to 2 days. The enhanced knowledge of global dynamics and processes occurring on the surface of earth and in the lower atmosphere can be derived. In this paper, an atmospheric temperature profile is retrieved from MODIS atmospheric temperature sounding bands using genetic algorithms, and then the water vapor profile is derived from MODIS water vapor sounding bands. Once the atmospheric temperature profile and water vapor profile are obtained, the atmospheric radiation could be corrected. The method of emissivity bounds is employed to restrict the range of emissivity of each band. The emissivity limits of final band can be used by genetic algorithm to synchronously retrieve land surface temperature and band emissivities. Simulation experiments show that relatively accurate atmospheric profile and land surface parameters, which play important roles in global warming effect and global change research, can be obtained from MODIS data using genetic algorithms.

Key words: genetic algorithms; MODIS data; atmospheric profiles; land surface parameters