

文章编号:1001-9014(2005)04-0286-05

基于订正 ALPHA 差值谱的热红外 温度与发射率分离算法

唐世浩^{1,2}, 朱启疆², 苏理宏³

(1. 国家气象局卫星气象中心研究所, 北京 100081;

2. 北京师范大学遥感与GIS研究中心, 资源与环境科学系 & 环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875;

3. Department of Earth and Environmental Studies, Montclair State University, Montclair, NJ07012, USA)

摘要:与可见光遥感不同,热红外传感器测得的辐射亮度值是温度和发射率的函数,因此,对于热红外遥感,温度和发射率的分离是一个关键问题?本研究从普朗克方程的维恩近似出发,定义并推导出与温度无关的 ALPHA 差值谱,并进一步提出消除维恩近似影响的修正项.以此为基础,在不考虑大气下行辐射影响的条件下,借鉴 ALPHA 导出发射率法和 ASTER TES 算法的优点,提出一个新的发射率温度分离算法.与现有发射率温度分离算法相比,该算法的优点是原理清楚,流程简单,求解速度快,结果精度高,并且适用的温度和下垫面范围宽.

关键词:热红外;遥感;温度与发射率分离算法;发射率;温度

中图分类号:TP701 **文献标识码:**A

THERMAL INFRARED TES ALGORITHM BASED ON CORRECTED ALPHA DIFFERENCE SPECTRUM

TANG Shi-Hao^{1,2}, ZHU Qi-Jiang², SU Li-Hong²

(1. National Satellite Meteorological Center, CMA, Beijing 100081, China;

2. Research Center for Remote Sensing and GIS, Dept. Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Department of Earth and Environmental Studies, Montclair State University, Montclair, NJ07012, USA)

Abstract: Different from visible spectral remote sensing, thermal infrared radiances vary with both temperature and emissivity. Hence, for thermal infrared remote sensing, the separation of temperature and emissivity is a key problem. In this study, by starting from WIEN's approximation, ALPHA difference spectrum was defined and derived which is independent of temperature. Then, a correction item to remove the influence of WIEN's approximation on ALPHA difference spectrum was developed. On these bases, a new temperature and emissivity separation algorithm was developed under the condition of neglecting the effect of atmosphere downwelling radiation, which combines attractive features of ALPHA derived emissivity method and ASTER TES algorithm. Compared with current TES algorithm, the new algorithm is fast, simple and precise. It can be used for wide temperature and surface type ranges.

Key words: thermal infrared; remote sensing; TES algorithm; emissivity; temperature

引言

在热红外波段,辐射亮度是物体温度和发射率的函数.热红外与可见光/近红外遥感的最主要区别在于:均匀朗伯体地表假设下,可见光/近红外波段与遥感有关的地表参数只是反射光谱一方面,但热红外波段需要发射率光谱和温度两方面参数才能描

述地表的状态,这样对于 N 个观测值始终存在 $N+1$ 个未知量,属于数学上的欠定问题.对于热红外遥感,温度和发射率的分离是一个关键问题.目前有很多关于发射率与温度分离的文章^[1],这些相关的研究从原理上分析,可以概括为在某种假设的前提下,组成第 $N+1$ 个方程,从而可以解方程获得温度和发射率.由于假设条件随测量条件和应用领域的不同

收稿日期:2004-08-19,修回日期:2005-02-28

Received date: 2004-08-19, revised date: 2005-02-28

基金项目:国家自然科学基金项目(40301034, 40271081)、国家卫星气象中心业务开发课题、973项目(G2000077900)和863项目(2002AA130010)资助项目

作者简介:唐世浩(1971-),男,辽宁大连人,国家卫星气象中心副研究员,博士后,从事定量遥感反演理论与应用研究.

同其合理性和适应性也不尽相同,而且这些研究主要是针对热红外多波段数据,受到通道数以及波段设置的限制,因此各种方法都有一定的局限性。

除参考通道法(referenc channel method)、发射率标准化法(Normalized emissivity method)等基本方法外,目前比较实用的温度发射率分离算法主要有基于维恩近似的 ALPHA 导出发射率法(ALPHA derived emissivity method)、ASTER TES(Temperature/Emissivity Separation)算法以及白天-夜晚 LST(Land Surface Temperature)算法。MODIS 白天夜晚 LST 算法有精度高、算法中考虑大气影响等优点,但该算法对数据量和数据处理要求均较高,如需白天夜晚的观测资料,需中红外波段数据配合,对图像配准精度要求较高等,露水等因素也会对 MODIS 白天夜晚 LST 算法的效果产生影响^[2]。对于除 MODIS 以外的传感器来说,该算法不一定适合。ASTER TES 算法吸收了 NEM(Normalized emissivity method)、MMD(Mean-MMD method)和 RAT(Ratio algorithm)^[3] 三种算法的优点并针对其不足作出了相应改进。该算法首先采用 NEM 算法估计温度 T , 然后估计发射率,再将波段发射率与所有波段平均值相除得到 β 谱, β 谱保持了实际发射率谱的形状。通过最大最小相对发射率差值(MMD)与最小发射率的经验关系可确定最小发射率(ε_{\min}),进而获得发射率谱。ASTER TES 算法继承了 NEM 算法的基本思想,虽然有所改进,但与 NEM 算法一样,同样受到最大发射率的影响,当发射率变化较大或最大发射率没出现在所选波段时会带来较大的误差和不确定性。ALPHA 导出发射率法在维恩近似的基础上,定义 ALPHA 谱为^[1]

$$\alpha_j = \lambda_j \ln \varepsilon_j - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \lambda_j \ln \varepsilon_j, \quad j = 1, N \quad (1)$$

其中, λ 为波长, ε 为发射率, N 为波段数。

在热红外 8 ~ 14 μm 范围内,发射率 0.7 ~ 1.0 之间时, α_j 与发射率谱形基本一致^[1]。通过引入 ALPHA 谱均值与方差的经验关系,可以确定发射率。ALPHA 导出发射率法适用的发射率范围较宽,但维恩近似会带来很大的发射率误差,在精度要求较高的场合也不适用^[4]。

本文在综合 ALPHA 导出发射率法和 ASTER TES 算法优点的基础上,提出基于修正 ALPHA 差值谱的 TES 算法。该算法的最大优点是物理意义清楚,计算流程简单,精度高,适用的发射率和温度范围宽,算法精度与温度、最大发射率等无关。

1 算法的基本原理

根据普朗克辐射法则,任何物体的波谱辐亮度都可以写作

$$L_\lambda = \varepsilon_\lambda B_\lambda(T). \quad (2)$$

其中, λ 为波长, L_λ 为波谱辐射亮度, ε_λ 为波谱发射率, T 为物体温度, B_λ 为黑体的波谱辐射亮度。对于热红外通道观测来说,由普朗克函数可知

$$L_j = \varepsilon_j \frac{C_1}{\lambda_j^5 \pi (e^{C_2/\lambda_j T} - 1)}. \quad (3)$$

其中 j 为波段号, $c_1 = 2\pi hc^2$ 为第一辐射常数, $c_2 = hc/k$ 为第二辐射常数。 h 为普朗克常数 ($6.63 \times 10^{-34} \text{ws}^2$), c 为光速 ($2.99 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$), k 为波尔兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{wsK}^{-1}$)。 C_1 、 C_2 一般分别取 $3.74 \times 10^{-16} \text{wm}^2$ 和 0.0144mK 。

普朗克函数的维恩近似可以表示为

$$L_j = \varepsilon_j \frac{C_1}{\lambda_j^5 \pi (e^{C_2/\lambda_j T})}. \quad (4)$$

对两边取对数并把含 ε 的项移到等式左侧得

$$\lambda_j \ln \varepsilon_j = \lambda_j \ln L_j - \lambda_j \ln C_1 + 5\lambda_j \ln \lambda_j \ln \pi + c_2/T. \quad (5)$$

$\lambda_j \ln \varepsilon_j$ 谱的波段差值为

$$\begin{aligned} \lambda_{j+1} \ln \varepsilon_{j+1} - \lambda_j \ln \varepsilon_j &= \lambda_{j+1} \ln L_{j+1} - \lambda_{j+1} \ln C_1 \\ &\quad + 5\lambda_{j+1} \ln \lambda_{j+1} + \lambda_{j+1} \ln \pi \\ &\quad - (\lambda_j \ln L_j - \lambda_j \ln C_1 \\ &\quad + 5\lambda_j \ln \lambda_j + \lambda_j \ln \pi). \end{aligned} \quad (6)$$

可见在维恩近似下, $\lambda_j \ln \varepsilon_j$ 谱的波段差值与温度无关。实际上等式左端与 ALPHA 谱的差值一致,不妨称其为 ALPHA 差值谱($d\alpha$)。

对于 N 个波段可以得到 $N-1$ 个这样方程,该方程中隐含了发射率的谱形信息,即波段发射率的相对位置关系信息。

1.1 ALPHA 差值谱的订正

ALPHA 差值谱在普朗克方程的维恩近似条件下获得,与实际值相比存在误差。根据普朗克方程,实际的 ALPHA 差值谱 $d\alpha'$ 为

$$\begin{aligned} d\alpha' &= \lambda_{j+1} \ln \varepsilon_{j+1} - \lambda_j \ln \varepsilon_j \\ &= \lambda_{j+1} \ln L_{j+1} - \lambda_{j+1} \ln C_1 + 5\lambda_{j+1} \ln \lambda_{j+1} \\ &\quad + \lambda_{j+1} \ln \pi + \lambda_{j+1} \ln (e^{C_2/\lambda_{j+1} T} - 1) \\ &\quad - (\lambda_j \ln L_j - \lambda_j \ln C_1 + 5\lambda_j \ln \lambda_j + \lambda_j \ln \pi \\ &\quad + \lambda_j \ln (e^{C_2/\lambda_j T} - 1)). \end{aligned} \quad (7)$$

由于维恩近似引起的 ALPHA 差值谱的误差为

$$\begin{aligned} \Delta d\alpha &= d\alpha - d\alpha' \\ &= \lambda_j \ln (e^{C_2/\lambda_j T} - 1) - \lambda_{j+1} \ln (e^{C_2/\lambda_{j+1} T} - 1). \end{aligned} \quad (8)$$

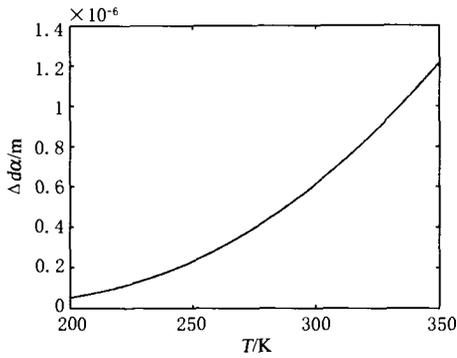


图 1 一定波长下由维恩近似引起的 ALPHA 差值的误差随温度的变化情况
Fig.1 Variation of ALPHA difference error with temperature caused by WIEN's approximation

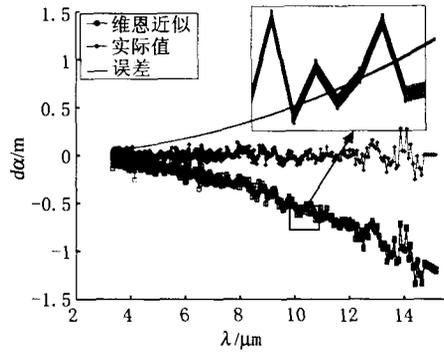


图 2 订正前 ALPHA 差值随温度和波长变化情况
Fig.2 Variation of ALPHA difference with temperature and wavelength before correction

该误差与温度和波长有关,在波长已知的情况下,仅与温度有关.当波长取 ASTER 热红外前两个波段中心波长(8.3701 μm 和 8.6304 μm),温度在 200~350K 变化时, $\Delta d\alpha$ 随温度 T 的变化如图 1 所示.从图 1 可以看出,虽然由维恩近似导致的 ALPHA 差值谱的误差随温度的升高而增大,但在所取温度范围内变化幅度并不大.研究表明,在上式中,由温度引起的最大误差一般不超过实际 ALPHA 差值的 10%.可见,在一定波长下,由维恩近似导致的 ALPHA 差值谱的误差对温度并不敏感.

图 2 模拟了 2~16 μm 波长区间、240~350K 范围内不同温度下土壤实际 ALPHA 差值谱、维恩近似下 ALPHA 差值谱及两者之差.图 2 方框中的小图为图中曲线的放大显示,表示在某一波长范围温度从 240K 变化到 350K 时,维恩近似下 ALPHA 差值谱的变化情况.从图可以看出,实际 ALPHA 差值谱与维恩近似下 ALPHA 差值谱的误差受波长影响较大,受温度影响很小.因此可以用相近温度下的误差项对维恩近似条件下 ALPHA 差值谱进行修正.即:

$$\Delta d\alpha = d\alpha_{\text{wien}} + \Delta d\alpha(T_0). \quad (9)$$

其中, $d\alpha$ 为实际 ALPHA 差值谱, $d\alpha_{\text{wien}}$ 为维恩近似条件下 ALPHA 差值谱, $d\alpha(T_0)$ 为温度 T_0 下的订正项. T_0 取最大概率温度订正效果最好,由于 $\Delta d\alpha$ 对温度很不敏感, T_0 可以直接取亮度温度.图 3 为采用亮度温度订正后的 $d\alpha$ 谱.订正后 $d\alpha$ 谱与实际 $d\alpha$ 谱在 240~350K 温度范围,2~14 μm 波长范围内,误差趋近于零.且波长越短,误差越小.

1.2 求解发射率谱形

在普朗克方程的基础上引入谱形知识,可得到如下方程组

$$\begin{cases} L_j = \varepsilon_j \frac{C_1}{\lambda_j^5 \pi (e^{C_2/\lambda_j T} - 1)}, & j = 1, N \\ \lambda_{j+1} \ln \varepsilon_{j+1} - \lambda_j \ln \varepsilon_j = d\alpha + \Delta d\alpha(T_0). & j = 1, N-1 \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$d\alpha = \lambda_{j+1} \ln L_{j+1} - \lambda_{j+1} \ln C_1 + 5\lambda_{j+1} \ln \lambda_{j+1} + \lambda_{j+1} \ln \pi - (\lambda_j \ln L_j - \lambda_j \ln C_1 + 5\lambda_j \ln \lambda_j + \lambda_j \ln \pi), \quad (11)$$

$$\Delta d\alpha(T_0) = \lambda_{j+1} \ln(e^{C_2/\lambda_{j+1} T_0} - 1) - \lambda_j \ln(e^{C_2/\lambda_j T_0} - 1). \quad (12)$$

T_0 取最大概率温度,一般可取亮度温度. N 为波段数.

据此,得到 $2N-1$ 个方程,含 $N+1$ 个未知数.在上述方程组的所有解中,发射率谱形均与真实发射率保持一致.可通过高斯-牛顿等方法在温度 200~350K,发射率 0.5~1.0 之间求一最优解.该最优解保持了实际发射率的谱形特征,但大小与实际发射率可能存在差异,相当于实际发射率的空间平移.

1.3 实际发射率的确定

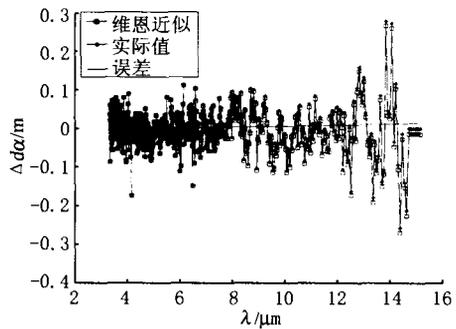


图 3 订正后 ALPHA 差值随温度和波长变化情况
Fig.3 Variation of ALPHA difference with temperature and wavelength after correction

Alan Gillespie^[4]等人的研究表明,可以通过最大、最小相对发射率差值(MMD)与最小发射率之间的关系进一步确定真实发射率谱。

相对发射率的计算公式为

$$\beta_j = N\varepsilon_j \left(\sum_{i=1}^N \varepsilon_i \right)^{-1}, \quad j=1, N \quad (13)$$

其中 N 为波段数。

对于 ASTER 热红外波段最大、最小相对发射率的差值 MMD 为

$$\text{MMD} = \max(\beta_j) - \min(\beta_j). \quad (14)$$

最小发射率 ε_{\min} 与 MMD 的关系为^[4]

$$\varepsilon_{\min} = 0.994 - 0.687 \times \text{MMD}^{0.737} \quad (15)$$

其它波段的发射率通过下式计算

$$\varepsilon_j = \beta_j \left(\frac{\varepsilon_{\min}}{\min(\beta_j)} \right), \quad j=1, N \quad (16)$$

N 为波段数。

根据热红外辐射传输方程,最大发射率波段的辐射值受大气影响最小,因此从最大发射率波段得到的温度值也最可靠。

$$T = \frac{c_2}{\lambda_b} \left[\ln \left(\frac{c_1 \varepsilon_b}{\pi L_b \lambda_b^5} + 1 \right) \right]^{-1}. \quad (17)$$

b 为最大发射率所在波段。

令 $T_0 = T$ 进行迭代,以进一步修正谱形。当温度没有明显变化时停止迭代,一般迭代 3~5 次即可。

Alan Gillespie 等人之所以采用最大最小相对发射率而不是实际发射率的差值与最小发射率建立经验关系,主要是考虑经过比值处理后可以进一步降低误差的影响,结果更稳定^[4,5]。但计算相对发射率会对最大最小发射率的差值产生一定影响,当然这种影响很小。由于本文介绍的方法可以较为精确获得实际发射率的差值信息,因此可以不经相对发射率变换,直接采用最大、最小实际发射率的差值计算最小发射率。作者对这两种方法都进行了比较,发现在大多数情况下两者差别不大,可以通用,但对发射率谱变化较大的物体,如土壤,采用最大最小实际发射率差值与最小发射率的经验关系反演效果更好。

1.4 灰体的处理

对于灰体来说,通过 MMD 与最小发射率的经验关系确定发射率会带来较大误差^[4]。在实际观测中,灰体的最大最小发射率差值主要来源于测量误差, ε_{\min} 与 MMD 的关系显然不适用。Gillespie 等提出 MMD 的修正项,该修正项虽然对灰体的处理效果提高,但却牺牲了算法精度。当 MMD 小于 0.03 时,牺牲的精度无法接受,此时无法通过 MMD 计算

ε_{\min} , 他们采用给 ε_{\min} 赋值的方法进一步处理。令 $\varepsilon_{\min} = 0.983$, 即相当于水体或植被的发射率,这样处理有时候显然会带来较大误差。

基于订正 ALPHA 差值谱的 TES 算法采用与 ASTER TES 算法不同的处理方法。在该算法中,当 MMD 小于某一临界值 $V1$ 时,物体近似灰体,这时可假定各波段发射率相等,代入普朗克方程,解出温度和发射率。以该温度为基础,对 ALPHA 差值谱进行修正,解方程组(10),重新计算 MMD,当循环次数大于设定值 $V2$ 或温度变化小于设定值 $V3$ 时停止迭代。

2 算法流程

首先输入辐亮度和任意发射率、温度初值,发射率和温度初值只与算法速度有关,对最终结果没有影响,因此可在发射率和温度有效取值范围内任意设定。由方程组(10)解出发射率谱,其中 ALPHA 差值采用最大亮度温度进行误差订正。计算相对发射率谱(β 谱)和 MMD。如果 MMD 大于临界值 $V1$,则根据 MMD 与最小发射率的关系求出最小发射率,再由最小发射率确定其它波段发射率。然后,找出最大发射率及其所在波段,根据普朗克方程解出最大发射率所在波段的温度作为像元温度。以解出的发射率和温度作为初值和 ALPHA 差值谱的订正温度,重新解方程组(10)。重复迭代下去,当温度变化小于临界值 $V3$ 或迭代次数超过设定值 $V2$,则停止迭代。如果 $\text{MMD} < V1$,假定其为灰体,即设各波段发射率相等,直接求解普朗克方程组,将解出的发射率和温度作为初值和误差订正温度代入方程组(10)求解,以对发射率谱形进行订正,重新计算 MMD,再循环下去。

3 数值模拟结果

从美国加利福尼亚大学万正明等在网上公布的典型地物的热红外发射率资料中(<http://www.ic-ess.ucsb.edu/modis/EMIS/html/em.html>),任意选取一组地物的发射率资料。考虑代表性,本研究任选水体、干草、土壤、任一低发射率灰体(0.85)的发射率资料各一组。再任意设定一个温度,本研究中取 300K,根据普朗克方程产生模拟辐亮度数据。然后利用 ASTER 的波段响应函数进行卷积,产生对应 ASTER 热红外波段的辐亮度模拟值。利用基于订正 ALPHA 差值谱的 TES 算法对辐亮度模拟值进行反演,算法的迭代过程见图 4。算法收敛速度很快,一

表 1 反演结果及误差
Table 1 Inverse result and error

	发 射 率					温 度	
土壤	实际值	0.878 2	0.907 0	0.877 6	0.954 2	0.966 4	300
	反演值	0.878 8	0.907 6	0.878 1	0.954 7	0.966 9	300.0
	误差	-0.000 6	-0.000 6	-0.000 5	-0.000 5	-0.000 5	0
水体	实际值	0.985 0	0.985 8	0.987 2	0.992 7	0.992 0	300
	反演值	0.994 1	0.994 6	0.995 6	1	0.998 8	299.5
	误差	-0.009 1	-0.008 8	-0.008 4	-0.007 3	-0.006 8	0.5
干草	实际值	0.986 0	0.982 6	0.981 1	0.979 7	0.980 4	300
	反演值	0.967 2	0.964 4	0.963 7	0.964 9	0.966 4	300.7
	误差	0.018 8	0.018 2	0.017 4	0.014 8	0.014 0	0.7
灰体	实际值	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	300
	反演值	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	300
	误差	0	0	0	0	0	0

般经 3~5 次迭代,即可获得稳定的解.表 1 列出反演误差.可以看出,该算法对于几种地物都可以达到较高反演精度.

本算法反演精度受温度影响很小,模拟研究表明,假设地面温度从 240K 变化到 350K,反演出的温度精度在 0~1K 之间,平均发射率精度在 0~0.015 之间.

4 结语

本研究通过引入 ALPHA 差值谱和 ALPHA 差值谱的修正项,将 ALPHA 导出发射率法和 ASTER TES 算法的优势结合在一起,提出基于订正 ALPHA 差值谱的 TES 算法,实现发射率和温度的同时反演.该算法主要具有以下优势和特色:计算流程简单明了,无需过多参数设置和人工干预;与最大发射率、地表温度等无关;解决了灰体的发射率和温度反演问题;适用于任何下垫面类型;继承了 ALPHA 导出发射率法与 ASTER TES 算法的主要优点;算法结果稳定、可靠.

由于本文介绍的方法中没有考虑大气下行辐射的影响(考虑大气下行辐射校正的算法将另文论

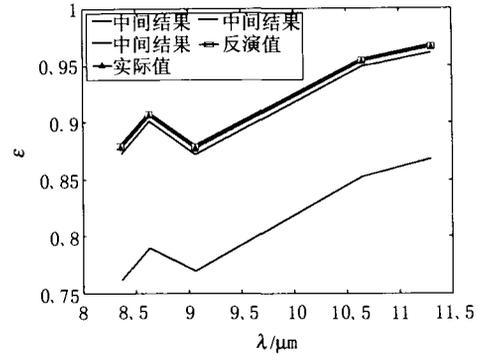


图 4 算法的收敛过程
Fig. 4 Convergence procedure of algorithm

述),因此本算法主要适用地表反射的大气下行辐射可以忽略的场合.由于最大发射率波段受大气的影 响相对较小,也可以考虑直接将本算法求出的最大发射率作为 ASTER TES 算法的输入,然后通过迭代的方法消除大气下行辐射的影响,这样做的最大好处是可以避免 NEM 算法的缺陷.

REFERENCES

- [1] Hook S J, Gabell A R, Green A A, et al. A Comparison of techniques for extracting emissivity information from thermal infrared data for geologic studies [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1992, **42**(2):123—135.
- [2] LIU Yu-Jie, YANG Zhong-Dong. *Principle and Algorithm of Remote Sensing Information Processing for MODIS* [M]. Beijing: Sciences Press(刘玉洁,杨忠东. **MODIS 遥感信息处理原理与算法**. 北京:科学出版社), 2001. 232—233.
- [3] Watson K. Spectral ratio method for measuring emissivity [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1992, **42**(2):113—116.
- [4] Gillespie A R, Matsunaga T, Rokugawa S, et al. Temperature and emissivity separation from advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) Images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, **36**(4):1113—1126.
- [5] ZHANG Xia, ZHANG Bing, ZHENG Lan-Fen, et al. Study on the retrieval of emissivity spectra from airborne thermal infrared data[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张霞,张兵,郑兰芬,等.航空热红外多光谱数据的地物发射率谱信息提取模型及其应用研究. **红外与毫米波学报**), 2000, **19**(5): 361—365.