

AMTIS 单通道多角度热红外图像的大气订正

何立明¹, 阎广建², 李小文², 王桥¹, 王文杰¹

(1. 中国环境监测总站 环境卫星中心筹备办公室, 北京 100029;

2. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

摘要:给出了在假定无大气廓线情况下, AMTIS 单通道多角度热红外图像的大气订正算法. 算法需要三个参数: 其中大气等效温度, 用“最小标准差法”从图像自身来估算; 大气透过率通过地表的绝对湿度或者太阳辐射计得到的大气水汽含量参数来估算; 像元的辐射率比由 AMTIS 得到的 NDVI 计算. 通过将大气订正后的亮度温度与地面实测点亮度温度比较, 两者相差约 1.2K, 这对于无大气廓线情况下单通道热红外图像的大气订正来说, 结果是可以接受的.

关键词:热红外; 大气订正; 单通道; 多角度

中图分类号:TP75 **文献标识码:**A

ATMOSPHERIC CORRECTION FOR AMTIS SINGLE-CHANNEL MULTI-ANGULAR THERMAL-INFRARED IMAGERY

HE Li-Ming¹, YAN Guang-Jian², LI Xiao-Wen², WANG Qiao¹, WANG Wen-Jie¹

(1. Environmental Satellite Center Preparing Office, National Environmental Monitoring Center of China, Beijing 100029, China;

2. School of Geography and Remote Sensing, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The atmospheric correction algorithm for the TIR band of AMTIS (airborne multi-angle TIR/VNIR imaging System) was presented. This algorithm is suitable for the case in which no atmospheric profile is available. Three parameters are considered in this algorithm: the atmospheric equivalent temperature is determined from the image itself by using a “minimal standard deviation” method or the local air temperature near the surface; the transmittance is calculated from the water vapor content of the column, which can be determined from the surface absolute humidity or from sunphotometer; the emissivity of the pixel is determined from NDVI. The atmospheric correction result is validated by using synchronous experiment data, and the precision of brightness temperature is less than 1.2 K, which is acceptable when the atmosphere profiles is not available.

Key words: thermal-IR; atmospheric correction; single-channel; multi-angular

引言

AMTIS (Airborne Multi-angle TIR/VNIR Imaging System) 是我国独立设计、研制的机载多角度多光谱成像系统. 它采用画幅式的成像方式, 能够连续获取地面同一目标 9 个角度和 3 个光谱波段 (可见光、近红外、热红外) 的观测^[1]. AMTIS 传感器接收到的地表热辐射要受到大气的吸收和大气自身热辐射的影响. 因此, 要从其图像定量反演地表参数, 大气订正是不可避免的. 热红外的大气订正一般需要解决三个问题: 大气的透过率、大气的热辐射和地表比辐射

率的计算^[2]; 但具体订正方法则因数据源不同而异, 其原因在于图像自身能为估算模型参数提供多少信息. AMTIS 只有一个热红外波段, 不能用分窗算法进行订正^[3], 其所需的大气参数一般由同步的大气廓线而获得, 但一般情况下获取起来比较困难; 而且由于大气参数的时空不均匀性, 获取的某个时刻和地点的大气廓线往往不能代表区域的状况. 本文将探讨 AMTIS 单通道、多角度热红外波段图像的大气订正方法, 利用其多角度观测能力, 从图像自身提供的信息反演所需的大气参数. 由于比辐射率的方向性, 以及混合像元比辐射率的复杂性^[4], 使得

反演一个像元的“等效温度”往往不如反演组分温度更具有明确的意义^[5],因此,本文的主要目的不是反演混合像元的“等效温度”,而是集中在去除大气的吸收和热辐射影响,从而得到地表的方向性热辐射,为组分温度反演做好准备^[6].

本文给出了在假定没有大气廓线情况下,AMTIS 单通道多角度热红外图像的大气订正算法,并给出了所需 3 个参数的计算方法:对于大气等效温度,可以由图像或地表空气温度来估算;通过地表的绝对湿度或者太阳辐射计来得到大气水汽含量参数,并用它来估算大气透过率;根据由 AMTIS 得到的 NDVI 计算像元的比辐射率,用于修正地表反射的大气下行热辐射的影响.最后对大气订正方法做了敏感性分析,并进行了验证.

1 数据收集与预处理

2001 年 4 月 11 日,在北京市顺义区进行了 AMTIS 的飞行实验,共获得了顺义 3 个航带的数据.飞行航高为 4.2km,地表海拔高度约为 33m;飞行时间为 10:13 到 12:25.成像航带的经纬度范围为北纬 40°~40°20',东经 116°20'~117°.数据获取后,首先对多角度观测图像数据进行了配准^[7].配准后每个像元点大约有几个到 30 个方向的观测,像元空间分辨率在可见光、近红外波段最高为 1.36m,热红外波段最高分辨率为 4m,在进行热红外波段的大气订正时,我们将可见光、近红外的空间分辨率重采样到热红外的空间分辨率.根据地面已知目标的 BRDF 观测数据和 MODTRAN4.1 对可见光、近红外的数据做了辐射标定和大气订正^[8].我们选取了 NW5 实验田(图 1)的图像进行热红外波段大气订正的验证.飞行同时,在下图矩形方框所在区域内采

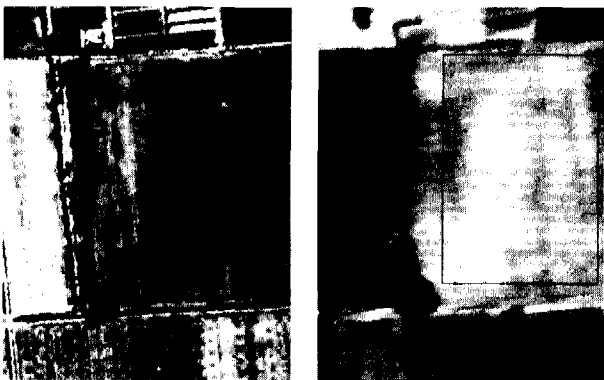


图 1 地面同步实验区域(NW5 实验田)的近红外(左)、热红外图像(右)

Fig. 1 The NIR (left) and TIR (right) imagery of experiment site (NW5)

用“美能达”红外测温仪巡回测量以获取区域内的平均亮度温度.本文采用的大气廓线数据来自北京南郊气象探空站(经纬度为:116.47E,39.80N),2 个时段的大气廓线的观测时间为当天 11:45h 和 13:29h.气象站不在 NW5 实验田内,距离较远.

2 模型与方法

假定大气水平均匀、垂直分层,水汽含量 W (g/cm^2) 在相邻的若干个像元区域内没有变化,不考虑水汽在大气柱内如何分配,则像元尺度上描述传感器 μ 方向 ($\mu = \cos\theta$ 是观测天顶角的余弦) 接收到的辐射 $L(\mu)$ 为^[9]

$$L(\mu) = \varepsilon_{\mu} \tau_{\mu} B(T_s) + R_{atm}(\mu) \uparrow + \tau_{\mu} R_{ref}(\mu) \quad (1)$$

其中, ε_{μ} 是 μ 方向地表的比辐射率, T_s 是像元尺度上的“等效温度(参考温度)”, $B(T_s)$ 是普朗克函数; τ_{μ} 是地表-传感器方向的大气透过率, $R_{atm}(\mu) \uparrow$ 是传感器接收到的 μ 方向大气的上行辐射:

$$R_{atm}(\mu) \uparrow = (1 - \tau_{\mu}) B(T_{a\uparrow}) \quad (2)$$

$T_{a\uparrow}$ 是大气向上的等效平均温度; $R_{ref}(\mu) \tau_{\mu}$ 是传感器接收到的地表反射的大气下行辐射(朗伯假定):

$$R_{ref}(\mu) = (1 - \varepsilon_{\mu})(1 - \tau_{53^\circ}) B(T_{a\downarrow}) \quad (3)$$

其中, $T_{a\downarrow}$ 是大气向下方向的等效温度, τ_{53° 是观测天顶角为 53° 时的大气透过率.对于 AMTIS, 向上的大气路径比向下的大气路径要短;数值模拟的结果表明对于 AMTIS 来说 $T_{a\downarrow}$ 比 $T_{a\uparrow}$ 要大 7.5K 左右.但因为热红外波段地表的发射率一般在 0.90 以上,加之大气透过率的作用,反射项(3)一般比公式(2)的值要小几乎一个数量级;所以在计算中本文直接用 $T_{a\uparrow}$ 来代替 $T_{a\downarrow}$. Qin 等也说明用 $T_{a\uparrow}$ 来代替 $T_{a\downarrow}$ 对于大气校正来说不会带来较大的误差.上述公式对于一个窄的波段是成立的,但对于 AMTIS 的宽波段传感器来说,需要将其中的普朗克函数替换为^[10]

$$B'(T) = a \cdot T^b + c \quad (4)$$

其中, B' 的单位为 $W \cdot Sr^{-1} \cdot m^{-2}$, T 的单位为 K, $a = 1.316e - 009$, $b = -1.639$.这里,大气订正的主要内容是得到地表亮温,或者 $\varepsilon_{\mu} B'(T_s)$.为此,需要知道大气的透过率,大气的热辐射以及对地表比辐射率 ε_{μ} 有一个尽可能准确的估计以计算反射项(3).下面说明公式中参数的计算方法.

2.1 大气等效温度的计算

当可以获取同步的大气廓线时,大气等效温度 T_a 的计算比较容易^[2].一般情况下,当没有同步的大气廓线时, Qin Z. 等用离地表大约 2m 高的空气温度 T_0 来估计大气等效温度^[2],而 T_0 从气象数据等

获得.

对于更一般的情况,本文提出“最小标准差”法用于从图像自身来估计大气的等效温度.将式(2)和式(3)代入式(1),并改写式(1)为

$$B(T_{\mu}) = \tau_{\mu}[\varepsilon_{\mu}B(T_s) - B(T_{a1})] + B(T_{a1}) + \tau_{\mu}(1 - \varepsilon_{\mu})(1 - \tau_{53^{\circ}})B(T_{a1}) \quad (5)$$

从式(5)可以看出朗伯体目标在大气顶部热辐射方向性的主要原因.假定地表的热辐射是各向同性的,当给定一种大气状况后,传感器观测到的热辐射在不同天顶角的差异主要取决于2个因素:大气的透过率 τ_{μ} 与 $\varepsilon_{\mu}B(T_s) - B(T_a)$.而当 $\varepsilon_{\mu}B(T_s) - B(T_a) \approx 0$,则无论大气的透过率怎样变化,传感器接收到的同一目标不同方向的热辐射都是各向同性的,也就是说,对于此类像元此时的多角度热红外观测,其不同观测天顶角上的热辐射的标准差是非常小的.反之,如果从多角度热红外观测中发现表观辐亮度接近各向同性,那么从式(5)也可看出 $\varepsilon_{\mu}B(T_s)$ 同 $B(T_a)$ 的值是一致的,而 $B(T_a)$ 是固定值,所以 $\varepsilon_{\mu}B(T_s)$ 也是各向同性的,这样就同我们的最初假设是一致的.基于这个事实,从AMTIS高空间分辨率的图像上,我们期望找到此类像元,则大气的等效温度可以从式(5)的第二项和第三项来估算.

当AMTIS图像经过配准后,我们可以计算其每个像元的亮度温度的标准差,然后统计整幅热红外多角度图像标准差的直方图.通过分类的途径,可以找出地表的沙地、裸土、或者水体等热辐射接近各向同性的像元.从这些像元标准差的直方图可以很容易找到极大的标准差和极小的标准差,从极小标准差的像元可以用来估计大气的等效温度.

图2给出了用MODTRAN4模拟的中纬度夏季大气模式下(缺省的水汽含量)AMTIS接收到的一

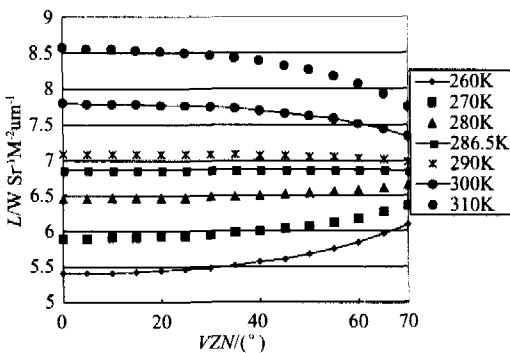


图2 中纬度夏季大气模式下不同观测天顶角热辐射的方向性
Fig.2 Simulated directional emission at AMTIS thermal band for mid-latitude summer model

个发射率各项同性像元的热辐射,其中地表的温度变化范围为260~310K,像元的比辐射率为0.95,传感器高度为4.2km,地表高度为0.033km,VZN为观测天顶角.图2表明有可能通过“最小标准差法”进行大气等效温度的估算.

表1给出了各种标准大气模式下的大气等效温度(4.2km高度).模拟说明大气等效温度的范围随下垫面的情况(地理纬度等)紧密相关,这使得从图像估计大气等效温度成为可能(模拟方法同图2,但是比辐射率设为1).

2.2 大气透过率的计算

由于大气的水汽含量在热红外波段的吸收对透过率的影响占主要作用,而其它气体的吸收相对比较稳定,水汽含量被广泛的用于估算热红外波段的大气透过率^[2].Maul等给出了不同天顶角下透过率同天顶方向大气透过率 $\tau(0^{\circ})$ 的关系^[11]

$$\ln\tau(\theta) = [\ln\tau(0^{\circ})]\sec\theta \quad (6)$$

本文用MODTRAN4模拟了不同的水汽含量(0.3~4.0g/cm²)和观测天顶角(0~60°)下AMTIS波段的大气透过率.作为示例,我们给出中纬度夏季模式下不同水汽含量和观测天顶角下大气透过率的变化规律.首先模拟大气中无水汽时分子吸收的透过率随观测天顶角的变化并作线性回归($R^2 = 0.98$):

$$\tau_g = (0.1148 \cdot \mu + 0.7273) \quad (7)$$

然后模拟天顶方向水汽透过率随水汽含量(W)的变化规律并作线性回归($R^2 = 0.9994$)

$$\tau_w = (0.944 - 0.1097 \cdot w) \quad (8)$$

认为大气总的透过率是以上两项的乘积:

$$\tau = \tau_g \cdot \exp(\ln(\tau_w)/\mu) \quad (9)$$

式(9)同模拟的AMTIS通道的透过率相差仍较大,我们加了“0.14 - 0.14 · μ”一项以减小误差:

$$\tau = \tau_g \cdot [\exp(\ln(\tau_w)/\mu) + (0.14 - 0.14 \cdot \mu)] \quad (10)$$

式(10)同MODTRAN模拟结果的最大误差为1.7%,当观测天顶角小于50°时,式(10)同MODTRAN模拟的最大误差小于1%.限于篇幅,本文未给出其他大气模式下的关系式.

当没有大气廓线时,从太阳辐射计反演的水汽

表1 不同标准大气模式下大气的等效温度

Table 1 The atmospheric equivalent temperature for different atmosphere type

大气类型	热带大气	中纬度夏季	中纬度冬季	亚极地夏季	亚极地冬季	1976美国标准大气
大气等效温度(K)	287	283.5	263.5	275.5	253	274

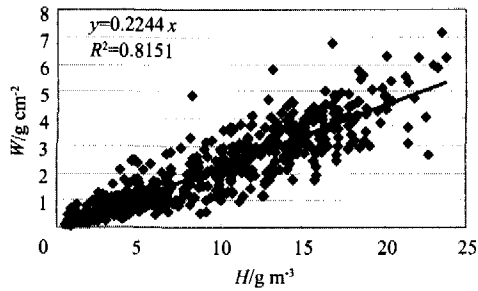


图3 地表空气绝对湿度和整层水汽含量的相关图
Fig. 3 The correlation between absolute humidity of air near ground surface and the vertical water vapor column

含量也可以用来估计大气的透过率. 如果在进行飞行试验时, 同步测量地表已知比辐射率目标的温度, 则根据式(10)可以估算大气透过率并进而估算大气的水汽含量.

另外, 大气中的水汽含量随高度的变化一般呈指数规律衰减^[2]. 因此我们可根据近地表空气的绝对水汽含量(可由空气相对湿度和空气温度得到), 近似推算整层大气的水汽含量. 而地表空气相对湿度和温度的资料可以比大气廓线更容易得到. 根据北京地区 2003 年 1~10 月份 604 条大气廓线做的统计结果如 3 所示, 二者的相关系数为 0.82

$$W = 0.2244 \cdot H, \quad (11)$$

这里, W 是整层水汽含量(g/cm^2), H 是地表空气绝对湿度(g/m^3).

2.3 地表像元比辐射率的估算

要去除地表反射的大气热辐射(即式(3)的值, 仅占非常小的比例), 需要对地表像元的比辐射率有一个尽可能准确的估计, 尤其是当地表的比辐射率较小时(最终目的是为了得到地表的半球-方向反照率值). 对于纯像元, 比如水体、沙地、裸土、水泥地等, 当观测天顶角小于 60° 时, 它们比辐射率的朗伯性比较好, 而一般 AMTIS 的观测天顶角小于 55° . 有关它们比辐射率大小在文献[12]中有详述. 对于由土壤和植被组成的混合像元, 他们比辐射率的定义比较复杂[4]. 我们这里用 NDVI 来估算比辐射率的大小, 基本思路是像元整体的比辐射率为组分比辐射率的面积加权^[13]. 由于本文仅仅考虑亮度温度, 而且这里利用 NDVI 估算比辐射率是为了去除“地表反射的大气热辐射”, 而这部分辐射仅占传感器接收的辐射的一小部分(前文已作了说明), 所以用 NDVI 来估算比辐射率, 其精度还是可以接受的.

3 大气订正结果与验证

对于大气等效温度: 根据当天 11:45h 和 13:29h 的探空数据由文献[2]中方法得到的大气等效温度(地表至 4.2km)为 276.5K 和 278.9K. 根据 Qin 文中的近似公式[2], 用放置在 NW5 实验田的自动气象站测量的空气温度(1.5m 高)计算的大气等效温度上午为 281.9K, 下午为 283.9K. 用最小标准差法从图像反演的大气等效温度(怡生园内)分别为 281K 和 286K(目标为水体, 成像时间分别为 10:50h, 11:20h). 可以看到后面两种算法的结果基本一致. 用大气廓线计算的结果同后面两种方法差异较大, 其原因可能为探空气象站与实验区空间距离太远所致.

根据公式(2), 可计算在给定大气等效温度下的程辐射, 进而可计算 AMTIS 测量此能量对应的亮温. 飞行当天(10:42h)在地面用红外测温仪测量了不同天顶角下天空亮温(表 2 第二列). 表 2 第三、四列对应于大气等效温度为 281K 时天空的程辐射和亮温. 可以看到, 对应于 AMTIS 的天空亮温要高些. 严格讲, 大气向上的热辐射和向下的会略有差异, Qin 说明在晴朗的天气下, 对应的大气等效温度的温差一般小于 5K[2]; 文中用于计算大气等效温度的像元的成像时间和地面观测时间相差近 10min, 因此, 表 2 的验证结果可作为参考.

对于透过率: 由于当天空气比较干燥, 由廓线得到的水汽含量为 $0.4\text{g}/\text{cm}^2$; 根据当天同一时候地表空气温度、相对湿度和式(11)计算得到的水汽含量为 $0.44\text{g}/\text{cm}^2$.

式(1)中 2 个大气参数(大气等效温度和透过率)的反演精度基本决定了大气订正的精度. 大气订正后, 图 1 矩形区域内的亮度温度的均值为 26.02°C , 标准差为 1.24°C . 地面同步观测的时间为

表 2 大气等效温度的地面验证

Table 2 Validation of atmospheric equivalent temperature by using ground observation

观测天顶角	测量的天空亮温	程辐射 ($\text{W sr}^{-1}\text{m}^{-2}$)	对应 AMTIS 亮温
0°	-55°C (218.16K)	1.536	216.5K
45°	$-53.8 \pm 0.9^\circ\text{C}$ (219.41K)	1.76	221.3K
60°	$-47.6 \pm 1.65^\circ\text{C}$ (225.56K)	2.015	226.4K

注: 第二列没给出观测天顶角 0° 时的天空亮温的标准差, 是因为仪器已经达到低温饱和了

9:56~10:09h 和 10:52~11:04h. NW5 实验田成像时间为 10:46 左右,恰好没有所需成像时间的地面亮温. 在 10:08~10:09h 2min 内,共有地面亮温观测 94 个,均值为 21.25℃,标准差为 4.52℃;在 10:52~10:53h 2min 内共有地面亮温观测 120 个,其均值为 28.22℃,标准差为 3.73℃. 从 10:09~10:52h 共 43min,温度从 21.25℃ 上升~28.22℃,若按照地表温度随时间按照线性关系升温(不尽准确),大约平均 6min 升温 1K,那么 10:46~10:52h 有 6min,则 10:46h 时候温度大概为 27.22℃,同 NW5 实验田图像的亮温差值为 1.2℃ 左右. 地面观测的亮温标准差比图像要大,这是因为地表湿度不太均匀,而图像的瞬时视场比红外测温计要大,在一定程度上起了更大的平均作用.

4 结语

我们给出了无大气廓线情况下对 AMTIS 进行大气订正的方法. 从上文的分析可知,采用本文给出的“最小标准差法”可以有效地获取大气等效温度. 同时还给出了通过地表空气绝对湿度来估算整层大气透过率的公式. 大气订正方法的精度主要取决于所估算的 2 个大气参数的精度. 用本文的数据,最终大气订正的误差大致为 1.2K,虽然比不上一般分窗算法的精度,但对于只有 1 个热红外波段的 AMTIS 图像来说还是可以接受的. 对于“最小标准差法”中最小标准差可能带来的误差和文中对若干地物热辐射方向性的假设可能带来的误差,尚需进一步的分析. 尽管有其局限性,但类似于可见光、近红外波段大气订正中“暗目标”方法,它可以作为分窗算法的一种补充. 本文的方法有望应用到其他星载多角度热红外传感器上.

致谢 法国国家科研中心李召良研究员协助提供了大气廓线,谨致谢意. 本文采用的图象和地面配套的数据均来自 2001 年国家 973 项目“地球表面时空多变要素的定量遥感理论及应用”在北京顺义进行的大型遥感实验.

REFERENCES

- [1] LI Xiao-Wen, WANG Jun-Fa, WANG Jin-Di, *et al.* *Multiangle and Thermal Infrared Remote Sensing* [M]. Science in China Press (李小文,汪骏发,王锦地, *多角度与热红外对地观测*. 科学出版社), 2001.
- [2] Qin Z, Karnieli A, Berliner P R. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to Israel-Egypt border region [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, **22**: 719-746.
- [3] ZHOU Ning, ZHU Xun, YIN Qiu. Analysis on influencing factors of land surface temperature retrieved by using split window algorithm with linear combination of two channels' radiance [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (周宁,朱迅,尹球. 分裂窗辐射量线性组合反演陆面温度的影响因子分析. *红外与毫米波学报*), 2005, **24** (5): 381-385.
- [4] Li X, Strahler A H, Friedl M A. A conceptual model for effective directional emissivity from nonisothermal surfaces. [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, **37** (5): 2508-2517.
- [5] HE Li-Ming, YAN Guang-Jian, WANG Jin-Di, Retrieval of land surface components temperatures using ATSR-2 data [J]. *Journal of Remote Sensing* (何立明,阎广建,王锦地. 利用 ATSR-2 数据提取地表组分温度. *遥感学报*), 2002, **6** (3): 161-167.
- [6] HE Li-Ming, YAN Guang-Jian, WANG Hua, *et al.* Atmospheric Correction for AMTIS Single-channel Multi-angular Thermal-infrared Imagery [C]. In 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse, France, 2003.
- [7] Liu Q, LIU Qinhuo, Xiao Q, *et al.* Research for the geometry correction of airborne multi-angle remote sensing image [J]. *Science in China*, 2002, **32**, 299-306.
- [8] HE Li-Ming, LI Xiao-Wen, WANG Hua, *et al.* Atmospheric Correction for AMTIS VIS/NIR Bands Imagery Based on BRDF Loop and MODTRAN4 [C]. In 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse, France, 2003.
- [9] Sobrino J A, LI Z-L, Stoll M P, *et al.* Multi-channel and multi-angle algorithms for estimating sea and land surface temperature with ATSR data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, **17**, 2089-2114.
- [10] HE Li-Ming, YAN Guang-Jian, LI Xiao-Wen, *et al.* Band response function and emissivity effect on component temperatures retrieval for wide band thermal-infrared sensor [J]. *Journal of Remote Sensing* (何立明,阎广建,王华,等. 从宽波段热红外图像反演组分温度的相关问题讨论——通道响应函数和比辐射率波段变化的影响. *遥感学报*), 2005, **9** (3): 234-241.
- [11] Maul G A. Zenith angle effects in multichannel infrared sea surface remote sensing [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1983, **13**: 439-451.
- [12] Sobrino J A, Juan Cuenca. Angular variation of thermal Infrared emissivity for some natural surfaces from experimental measurements [J]. *Applied Optics-LP*, 1999, **38**, (18): 3931-3936.
- [13] Carlson TN, DA Ripley. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, **62**, 241-252.

[1] LI Xiao-Wen, WANG Jun-Fa, WANG Jin-Di, *et al.* *Multiangle and Thermal Infrared Remote Sensing* [M]. Science