

文章编号:1001-9014(2007)01-0022-05

# 中巴地球资源 02 星 CCD 图像交叉定标与大气校正研究

彭光雄<sup>1</sup>, 何宇华<sup>2</sup>, 李京<sup>1</sup>, 陈云浩<sup>1</sup>, 林文娟<sup>1</sup>

(1. 北京师范大学资源学院资源技术与工程研究所, 北京 100875;

2. 中国土地勘测规划院, 北京 100037)

**摘要:**利用 LANDSAT-5 的 TM 对 CBERS-2 的 CCD 1~4 波段进行交叉定标, 得到了 CCD 1~4 波段的参考辐射定标系数, 并对这组定标系数进行了验证. 利用 6S 模型和同步气象资料, 对 CBERS-2 的 CCD 数据, 进行了大气校正和反射率反演. 最后对 CCD 1~4 波段大气校正前后的反射率和归一化植被指数 (NDVI) 的变化进行了对比研究. 发现大气校正后的 CCD3 和 CCD4 波段的地面反射率明显升高, 大气校正后的 CCD 图像呈现出高植被覆盖区 NDVI 增大, 低植被覆盖区 NDVI 减小的趋势.

**关键词:**交叉定标; 大气校正; 6S 模型; CBERS-2

**中图分类号:**TP732 **文献标识码:**A

## STUDY ON CBERS-2'S CCD IMAGE CROSS CALIBRATION AND ATMOSPHERIC CORRECTION

PENG Guang-Xiong<sup>1</sup>, HE Yu-Hua<sup>2</sup>, LI Jing<sup>1</sup>, CHEN Yun-Hao<sup>1</sup>, LIN Wen-Juan<sup>1</sup>

(1. College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. China Land Survey and Planning Institute, Beijing 100037, China)

**Abstract:** A group of reference calibration coefficients for CBERS-2's CCD data were provided by cross calibration method by using LANDSAT-5 TM data. The validation for the cross calibration shows its feasibility. A method, which is based on 6S model and isochronous meteorological information on sensing time, was used in the atmospheric correction of CBERS-2's CCD four bands. Validation analysis was conducted by comparisons of corrected and uncorrected reflectance data including normalized difference vegetation index (NDVI). It finds that the corrected reflectance of CCD3 and CCD4 increases clearly and the NDVI of vegetation ascends while the NDVI of nonvegetation descends.

**Key words:** cross calibration; atmospheric correction; 6S model; CBERS-2

### 引言

2003 年 10 月 21 日中巴地球资源卫星 02 星 (CBERS-2) 成功发射, 它的成功发射具有重要的社会经济意义. 为了使 CBERS-2 作为国产遥感卫星数据源能够得到更加广泛的应用, 利用 LANDSAT-5 的 TM 对 CBERS-2 的 CCD 进行交叉定标计算, 获得 CCD 的参考定标系数. 利用 6S (Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum) 模型, 进行了大气辐射校正和反射率反演研究, 分析了大气对 CCD 数据遥感定量研究的影响, 为中国资源卫星遥感数据较为深入的定量应用做了一些基础性的工作.

### 1 交叉定标

定量遥感反演研究必须从传感器所接受到的大气—陆地混合信号中提取出陆地表面目标物体的贡献部分, 消除所观察目标非相关的信息. 定量遥感首先要解决的核心问题是辐射定标和大气校正<sup>[1,2]</sup>. 辐射定标主要指将星上观测到的遥感计数值转换成物理量绝对值的过程<sup>[3]</sup>. 由于 CBERS-2 的 CCD 定标系数未能提供使用, 本文使用 LANDSAT-5 的 TM 对其进行交叉定标研究. 交叉定标是用较高定标精度的卫星通道标定较低精度卫星通道的过程<sup>[2,3]</sup>. LANDSAT 系列的 TM 是对 CBERS-2 的 CCD 各波段

收稿日期: 2006-03-30, 修回日期: 2006-11-03

Received date: 2006-03-30, revised date: 2006-11-03

基金项目: 国产中巴卫星遥感数据应用研究 (05-1.10.1) 和国家自然科学基金“城市地表能量收支与人为热排放的遥感研究” (40671130)、“多源遥感数据像素级融合的统一理论框架” (40671122)

作者简介: 彭光雄 (1978-), 男, 湖南永州人, 博士研究生, 主要从事资源环境遥感监测等研究.

进行定标对比分析的最佳遥感仪器. TM 通过卫星发射前传感器指标的精确标定,在轨监测和数据定标等措施,可以在设计寿命期内确保它的辐射定标精度.通过对比分析 CBERS-2 的 CCD 和 LANDSAT-5 的 TM 的各光谱波段参数,发现这两个传感器的 1~4 个波段位置非常接近(见表 1),光谱响应函数比较一致,量化等级都是 8 位,空间分辨率接近,是进行对比分析和交叉定标的最佳选择<sup>[4]</sup>.

表 1 CBERS-2 的 CCD 和 Landsat-5 TM 对应波段的光谱带宽

Table 1 Bandwidth of CBERS-2's CCD and LANDSAT-5 TM ( $\mu\text{m}$ )

传感器	波段 1	波段 2	波段 3	波段 4	波段 5
CBERS-2 CCD	0.45 - 0.52	0.52 - 0.59	0.63 - 0.69	0.77 - 0.89	0.51 - 0.73
LANDSAT-5 TM	0.45 - 0.52	0.52 - 0.60	0.63 - 0.69	0.76 - 0.90	1.55 - 1.75

### 1.1 数据选取

选择 2004 年 11 月 28 日河北廊坊地区的一景 CBERS-2 的 CCD 数据和 2004 年 11 月 27 日与之空间上基本一致的 LANDSAT-5 的 TM 数据进行交叉定标研究.这两景资料时相仅仅相差一天,过境时间基本一致,因而所选取区域的地面目标应该是一致的,且天空晴朗无云,减少了由于大气状况而引起定标结果的差异,所以完全可以用于对比分析.图 1 是这两景图像前 4 波段的计数值分布直方图,其中左侧是 CCD 1~4 波段,右侧是 TM1~4 波段.从图中可以看出,波段 3 和波段 4 之间的一致性比较好,波段 1 和波段 2 的差别较大一些,总体来看各波段的大致分布趋势是一致的,这为交叉定标奠定了基础.

### 1.2 TM 与 CCD 数据计数值线性回归分析

在 LANDSAT-5 的 TM 和 CBERS-2 的 CCD 两种数据中选择相同目标区域,以 LANDSAT-5 的 TM 数

据为基准,对两幅图像进行精确配准,确保两种数据的目标基本一致.并使用最邻近插值方法,将 LANDSAT-5 的 TM 数据 30m 的空间分辨率重采样到和 CBERS-2 的 CCD 的 19.5m 一致的水平.然后分别在 LANDSAT-5 的 TM 和 CBERS-2 的 CCD 对应像元位置选择不同等级计数值的多个均匀区域(多于 50 个像元,均方根差小于 3)<sup>[4]</sup>,应用多点线性回归法,计算得到 LANDSAT-5 的 TM 和 CBERS-2 的 CCD 各对应波段计数值之间的一元线性回归方程如下:

$$DN_{TM1} = 1.7589 \times DN_{CCD1} - 25.200 \quad (1)$$

$$DN_{TM2} = 0.5028 \times DN_{CCD2} - 6.545 \quad (2)$$

$$DN_{TM3} = 1.4636 \times DN_{CCD3} - 17.505 \quad (3)$$

$$DN_{TM4} = 0.7974 \times DN_{CCD4} - 10.210 \quad (4)$$

### 1.3 交叉定标结果及精度分析

利用公式(5)可以把 TM 图像计数值转换成具有辐射意义的辐射亮度值<sup>[4,5]</sup>.

$$L = Gain \times DN + Offset \quad (5)$$

式中, $L$ 是某个波段光谱辐射亮度(单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ ); $Offset$ 和 $Gain$ 是图像头文件提供的辐射定标参数(单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ ), $DN$ 是图像计数值.

从图像头文件中可查阅得到 TM 的定标参数,如表 2 所示.将 TM 各个波段的辐射定标系数分别代入方程(1)、(2)、(3)和(4)即可得计算得到 CBERS-2 的 CCD1~4 个波段的辐射定标系数<sup>[3,4]</sup>,见表 3.

表 2 LANDSAT-5 TM 1~4 波段辐射定标系数

Table 2 Radiance calibration coefficients of LANDSAT-5 TM band 1~4

	TM1	TM2	TM3	TM4
斜率	0.762824	1.442510	1.039882	0.872588
截距	-1.52	-2.84	-1.17	-1.51

表 3 CBERS-2 CCD 1~4 波段辐射定标系数

Table 3 Radiance calibration coefficients of CBERS-2 CCD band 1~4

	CCD1	CCD2	CCD3	CCD4
斜率	1.341731	0.725294	1.521971	0.695802
截距	-20.7431	-12.2812	-19.3731	-10.4191

在 CBERS-2 的 CCD 和 LANDSAT-5 的 TM 各对应波段的水体、裸地、城市和植被 4 种典型地物中随机选取同名点,分别计算辐射亮度值,来检验交叉定标得到的 CCD 辐射定标系数的有效性,如表 4 所

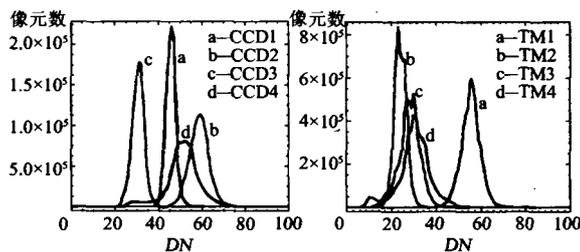


图 1 CBERS-2 CCD 与 LANDSAT-5 TM 1~4 波段计数值直方图

Fig. 1 Histogram of CBERS-2 CCD and LANDSAT-5 TM digital number

示.从表 4 辐射亮度计算结果中可以发现 CCD1,4 波段的定标结果要好于 CCD2,3 波段,CCD1,2,3,4 波段平均误差分别为 4.01%、5.21%、5.38% 和 3.94%,最大误差为 7.16%,可见这一交叉定标结果是比较理想的,具有较高的参考价值.

表 4 CBERS-2 的 CCD1~4 波段交叉定标检验结果  
Table 4 The Validation to CCD band 1~4 cross calibration

	水体	裸地	城市	植被	最大误差	最小误差	平均误差
CCD1	32.93	51.37	43.32	35.61	5.37%	1.91%	4.01%
TM1	33.57	54.1	45.78	34.33			
CCD2	22.81	51.19	35.24	26.88	7.16%	3.34%	5.21%
TM2	24.57	53.42	37.55	26.01			
CCD3	13.63	51.12	29.81	20.72	7.02%	1.79%	5.38%
TM3	13.39	54.98	32.11	19.63			
CCD4	5.58	42.68	22.59	42.07	5.97%	2.01%	3.94%
TM4	5.47	43.86	23.8	44.74			

## 2 基于 6S 模型的地面反射率计算

卫星遥感图像的大气校正,一直是遥感定量化研究的主要难点之一.科学家们试图通过大气校正方法提取目标物体的真实反射率,提出了直方图均衡化(Histogram Matching)、黑暗目标法(Dark Object Method)、固定目标法(Invariant Object)、对比减少法(Contrast Reduction)、查找表法(Look Up Table)和 6S 模型等多种方法<sup>[5]</sup>.上述方法大部分建立在某种特殊的理想条件下,其实用性受到一定限制.6S 模型建立在辐射传输理论基础之上,不受研究区特点及目标类型等的影响,模型应用范围比较广.

### 2.1 6S 模型计算

6S 大气校正模型,适用于可见光—近红外(0.25~4 $\mu\text{m}$ )的多角度遥感数据.它对不同传感器和不同地面状况下太阳光在太阳—地面目标—传感器整个传输路径中所受大气的影响进行了描述.通过输入相应的参数,就可求得地面反射率.研究区位于河北廊坊地区,为典型的暖温带半湿润大陆性季风气候.所使用的数据为 2004 年 11 月 28 日 CBERS-2 的 CCD 数据,利用交叉定标得到的定标系数对图像进行辐射定标,然后对 CBERS-2 的 CCD1~4 波段进行 6S 大气校正.

在 6S 模型中需要输入下列参数:CBERS-2 过顶日期为 2004 年 11 月 28 日;太阳天顶角和方位角分别为 62.08°和 164.79°,观测天顶角和方位角分别为 0.00°和 169.04°;中心经纬度为 E117.14°和 N39.26°;选用中纬度冬季大气模式,大陆性气溶胶类型,地表为非均匀朗伯面;根据当日气象资料,气

象条件为天空晴朗,可视距离 20km,云覆盖率为 0.00%;研究区平均海拔为 50m;CBERS-2 卫星轨道高度为 778km,CBERS-2 的 CCD 相机各个波段的光谱范围见表 1 所示.利用上述参数,进行大气校正模拟计算,得到大气校正参数  $x_a$ 、 $x_b$  和  $x_c$ ,然后利用 6S 模型提供的计算公式(6)就可计算得到校正后的地面反射率<sup>[5,6]</sup>.表 5 为 CCD1~4 波段 6S 模拟计算得到的大气校正参数.

$$\begin{cases} y = x_a \times L_i - x_b \\ \rho_s = y / (1 + x_c \times y) \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\rho_s$ 为大气校正后的地面反射率, $L_i$ 为  $i$  波段的辐射亮度, $x_a$ 、 $x_b$ 、 $x_c$ 和  $y$  为大气校正参数.

表 5 CCD1~4 波段 6S 大气校正参数  
Table 5 6S simulation of atmospheric correction coefficients for CCD 1~4 bands

	CCD1	CCD2	CCD3	CCD4
$x_a$	0.00567	0.00528	0.00615	0.00794
$x_b$	0.17608	0.10954	0.05594	0.02501
$x_c$	0.15750	0.11252	0.07511	0.0454

### 2.2 大气校正结果分析

大气校正前地物的大气顶层表观反射率( $\rho_{toa}$  (The TOA equivalent reflectance of scene))可由公式(7)计算得到<sup>[5,7]</sup>.

$$\rho_{toa} = \frac{\pi \cdot L \cdot D^2}{ESUN \cdot \cos\theta_s} \quad (7)$$

式中, $\rho_{toa}$ 为大气层顶(TOA)表观反射率(无量纲), $\pi$ 为常数(球面度  $sr$ ), $L$ 为大气层进入卫星传感器的光谱辐射亮度(单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ), $D$ 为日地距离(天文单位), $ESUN$ 为大气层顶的平均太阳光谱辐照度(单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ), $\theta_s$ 为太阳天顶角.

表观反射率与地面反射率剖面曲线如图 2 所示.由此得知,在 CCD1 蓝光波段和 CCD2 绿光波段,对于植被等低反射地物大气校正后,地物的反射率降低,而对于裸地等高反射地物大气校正后,地物的反射率反而升高.其主要原因是大气散射削弱了地面向外的辐射,并因为天空光的影响而增强了地面的辐照和大气层本身的“亮度”.大气散射使得暗物体表现得比它自身的要亮,而使得亮物体表现得比它自身的要暗.大气校正后地物反射率还原为地面真实值,从而使得暗地物变暗,亮地物变亮.CCD3 红光波段和 CCD4 近红外波段地面反射率明显升高,以 CCD4 近红外波段最为显著.CCD3 红光波段

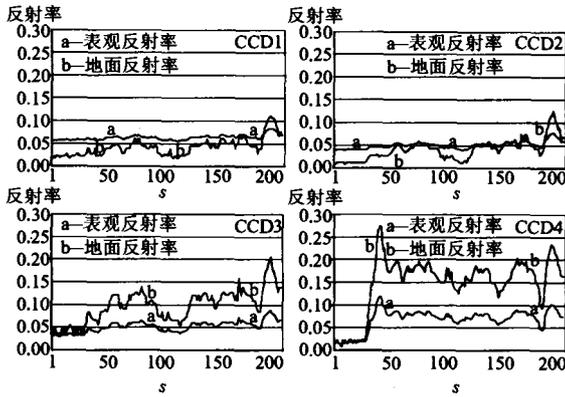


图 2 6S 大气校正前后反射率比较  
Fig. 2 Graphs of reflectivity before and after 6S atmospheric correction

由于大气散射削弱的地面辐射比天空光增强的地面辐射强度大,所以大气校正后的地面反射率得到回升.在近红外波段大气散射作用较小,而水汽吸收率大,因而大气校正后的 CCD4 近红外波段地面反射率大幅度上升.

植被指数是定量遥感中常用的变量,许多遥感模型和以遥感信息为驱动变量的生态学模型都需要植被指数的参与,其中以归一化植被指数 (NDVI) 最为常用.为进一步评价和验证 6S 模型大气校正效果,对校正前后 NDVI 的变化进行了比较.卫星的 DN 值、表观反射率  $\rho_{10a}$  和地面反射率  $\rho_s$  均可以计算 NDVI,  $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$ , NIR 和 R 分别为近红外和红光波段的光谱值.它们计算的结果见表 6.

从理论上分析, DN 值未经过任何校正,包括辐射定标校正,而且只是进入传感器中的辐射能的一种数字转换形式,不能本质地反映地物的辐射特性.大气顶层表观反射率  $\rho_{10a}$  虽然经过了辐射定标校正,但它是地面反射率和大气反射率的总和,仍然不能真实的反映地物的辐射特性.地面反射率经过大气校正后消除了大气反射率的影响,能够比较真实地反映地物的辐射特性.见表 6 所示,水体 DN 值计算出的 NDVI 为正值,与实际情况不符合.表观反射率

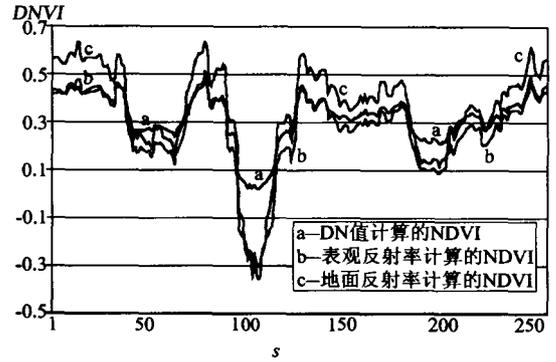


图 3 6S 大气校正前后的 NDVI 比较图  
Fig. 3 Comparison of NDVI graphs before and after 6S atmospheric correction

计算出的 NDVI 与地面反射率计算出的 NDVI 两者比较接近.大气校正前后 NDVI 的总体变化趋势是(见图 3):林地、草地等植被覆盖度高的区域大气校正后的 NDVI 值升高,而水体、裸地等植被覆盖度低的区域大气校正后的 NDVI 值反而降低.

### 3 结语

(1) 通过使用 LANDSAT-5 的 TM 数据,采用多点统计回归的方法对 CBERS-2 的 CCD 1~4 波段进行交叉定标研究,得到了 CCD 1~4 波段的辐射定标系数.结果表明,这一交叉定标结果是比较理想的,具有较高的应用价值.

(2) 利用 6S 模型,研究了 CBERS-2 的 CCD 1~4 波段遥感影像的大气校正和反射率反演方法,消除了大气和地表之间的耦合效应,获取了地物的真实反射率.认为 6S 模型可以有效的降低大气对电磁波传输过程中的影响.

(3) 对大气校正前后的反射率和 NDVI 特征进行了对比研究,发现大气校正后的 CCD3 和 CCD4 波段的地面反射率明显升高,以 CCD4 近红外波段最为突出.大气校正后的 CCD 图像呈现出高植被覆盖区 NDVI 增大,低植被覆盖区 NDVI 减小的趋势.

(下转 34 页)

表 6 不同地物在 CCD3 和 CCD4 的 DN,  $\rho_{10a}$ ,  $\rho_s$  和 NDVI 值

Table 6 Values of DN,  $\rho_{10a}$ ,  $\rho_s$  and NDVI derived from different targets in CCD3 and CCD4

	DN 值		表观反射率 $\rho_{10a}$		地面反射率 $\rho_s$		NDVI		
	CCD3	CCD4	CCD3	CCD4	CCD3	CCD4	DN	$\rho_{10a}$	$\rho_s$
水体	21	22	0.0262	0.0152	0.0244	0.0138	0.0233	-0.2638	-0.2774
裸地	39	60	0.0824	0.0977	0.1873	0.2215	0.2121	0.0849	0.0837
城市	29	40	0.0515	0.0543	0.0959	0.1021	0.1594	0.0266	0.0323
林地	28	68	0.0483	0.1151	0.0864	0.2647	0.4167	0.4085	0.5077
草地	30	62	0.0546	0.1020	0.1049	0.2323	0.3478	0.3025	0.3779

## REFERENCES

- [1] Edward J T, McDonnell. Characteristics of the indoor wireless propagation environment at microwave and millimeter frequencies [J]. *The Institution of Electrical Engineers*, 1996(11):4—5.
- [2] Turin G L, Clapp F D, Johnson T L, et al. A statistical model of urban multipath propagation [J]. *IEEE Trans. Veh. Techno.*, 1972(21):1—9.
- [3] Adel A M Saleh, Reinaldo A Valenzuela. A statistical model for indoor multipath propagation [J]. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 1987, 5(2):128—137.
- [4] Dajana Cassioli, Moe Z Win, Andreas F Molisch. The ultra-wide bandwidth indoor channel: from statistical model to simulation [J]. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 2002, 20(6):1247—1257.
- [5] Rappaport T S, Seidel S Y, Takamizawa K. Statistical channel impulse response models for factory an open plan building radio communication system design [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1991, (39):794 - 807.
- [6] Clavier L, Fryziel M, Delignon Y, et al. Wide band 60GHz indoor channel: characterization and statistical modeling [J]. *Information Theory, IEEE Transactions on, IEEE*, 2001, 44(6):2100.
- [7] Ji-Hoon Park, Yungsoo Kim, Young-Sik Hur, et al. Analysis of 60 GHz band indoor wireless channels with channel configurations [J]. *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, IEEE*, 1998, (2):619.
- [8] JIANG Tie-Zhen, WU Hu, WU Kai, et al. Threshold design method of car for millimeter-wave collision warning radar [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (蒋铁珍, 武虎, 吴凯, 等. 毫米波汽车防撞雷达恒虚警率门限设定方法. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(03):217—221.

~~~~~  
(上接 25 页)

## REFERENCES

- [1] TONG Jin-Jun, QIU Kang-Mu, LI Xiao-Wen. New method of in-flight absolute calibration for thermal infrared channels of satellite sensors [J]. *J. Infrared Millim. Waves*. (童进军, 邱康睦, 李小文. 一种卫星遥感仪器热红外通道在轨绝对辐射定标新方法, *红外与毫米波学报*), 2005, 24(4): 277—280.
- [2] RONG Zhi-Guo, ZHANG Yu-Xiang, WANG Yu-Hua, et al. Calibration method for water vapor channel of scanning-radiometer carried by FY-2B satellite. [J]. *J. Infrared Millim. Waves*. (戎志国, 张玉香, 王玉花, 等. 风云二号 B 卫星载扫描辐射计水汽通道定标方法, *红外与毫米波学报*), 2005, 24(5):357—360.
- [3] YANG Zhong-Dong, DU Song-Yan, QIU Hong, et al. Research on the algorithm of cross calibration about IRMSS aboard on CBERS-1 [J]. *J. Infrared Millim. Waves*. (杨忠东, 谷松岩, 邱红, 等. 中巴地球资源一号卫星红外多光谱扫描仪交叉定标方法研究, *红外与毫米波学报*), 2003, 22(4):281—285.
- [4] YANG Zhong - Dong , GU Song - Yan , QIU Hong , et al . CBERS-1's CCD Image quality evaluating and cross calibrating study [J]. *Journal of Remote Sensing* (杨忠东, 谷松岩, 邱红, 等. 中巴地球资源一号卫星 CCD 图像质量评价和交叉定标研究, *遥感学报*), 2004, 8(2):113—120.
- [5] GHULAM Abduwasit, QIN QIming, ZHU Lijiang. 6S model based atmospheric correction of visible and near-infrared data and sensitivity analysis [J]. *Acta Scientiation Naturalium Univeritatis Pekinensis* (阿布都瓦斯提·吾拉木, 秦其明, 朱黎江. 基于 6S 模型的可见光、近红外遥感数据的大气校正, *北京大学学报(自然科学版)*), 2004, 40(4): 611—618.
- [6] Vermote E F , Tanre D, Deuze J L, et al. The second simulation of satellite signal in the solar spectrum (6S) [M], User's Guide. France: Laboratoire d'Optique Atmospherique, 1997.
- [7] CHI Hong-Kang , ZHOU Guang-Sheng , XU Zhen-Zhu, et al. Apparent reflectance and its applications in vegetation remote sensing [J]. *Acta Phytocologica Sinica* (池宏康, 周广胜, 许振柱, 等. 表观反射率及其在植被遥感中的应用, *植物生态学报*), 2005, 29(1):74—80.