

文章编号: 1007-4619(2006)05-0709-06

CBERS-02 卫星数据大气校正的快速算法

王中挺^{1, 2, 3}, 陈良富^{1, 2, 4}, 顾行发^{1, 2, 5}, 许 华^{1, 2}

(1. 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 国家航天局 航天遥感论证中心; 北京 100101;
3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 4. 电子科技大学 自动化工程学院, 四川 成都 610054)

摘 要: 研究中巴资源卫星 CBERS-02 卫星数据大气校正的快速算法。首先假设地表为朗伯体, 利用 MODTRAN4.0 软件模拟大气状况, 讨论了不同地表反射率对大气校正参数的影响; 然后计算出大气校正参数, 生成查找表, 根据 CBERS 卫星图像的不同情况确定不同的大气校正参数, 从而对整幅图像进行大气校正。最后, 利用核驱动模型对地表进行 BRDF 校正。

关键词: CBERS; 大气纠正; MODTRAN; BRDF; 查找表

中图分类号: P407/TP751.1 **文献标识码:** A

A Fast Atmospheric Correction Method Based on CBERS-02 Data

WANG Zhong-ting^{1, 2, 3}, CHEN Liang-fu^{1, 2, 4}, GU Xing-fa^{1, 2, 5}, XU Hua^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China;

2. Demonstration Center for Spaceborne Remote Sensing, National Space Administration, Beijing 100101, China;

3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. School of Automation Engineering, the University of Electronic Science and Technology of China, Sichuan Chengdu 610054, China)

Abstract: In the paper based on CBERS-02 data, research for atmospheric correction was conducted. First supposed land surface is a Lambert, the influence of different surface reflectivity on the atmospheric correction was discussed by simulating the atmosphere with MODTRAN4.0; then, after building the LUT (look up table) which includes the coefficients of atmospheric correction, the whole data was corrected by the proper coefficients in the LUT; at last, the land surface BRDF was corrected by Kernel-Driven Model.

Key words: CBERS; atmospheric correction; MODTRAN; BRDF; LUT

1 引 言

大气校正是指消除大气对遥感图像影响的处理, 是进行遥感定量化的重要一步。目前, 随着对大气校正研究的不断深入, 产生了许多成熟有效的大气纠正算法, 如暗目标法^[1]和参考地物法等, 以及一些成熟的相关软件, 如 6S 和 MODTRAN 等^[2]。

这些算法和软件多是以大气辐射传输方程为基础, 基于地表朗伯体和平面平行大气假设的。目前, 应用较为广泛的是暗目标法, 已成熟的应用于 MODIS 和 TM 等卫星图像上。

要想更精确地进行大气校正, 必须考虑地表的二向性反射特性, 即进行 BRDF 校正。有关描述 BRDF 与地表结构和光学特性的模型研究很多。半经验模型由于其简洁、快速, 并抓住了影响 BRDF 的

收稿日期: 2006-04-10; 修订日期: 2006-05-26

基金项目: 国家重大基金项目 (编号: 2002CB412506), 国家自然科学基金 (编号: 40471092) 资助, 中国科学院百人计划项目 (编号: KZCX0415), 国家教育部留学回国人员科研启动基金重点项目 (编号: HX040013), 国防科学技术工业委员会项目 (编号: KJSX0401)。

作者简介: 王中挺 (1980-), 男, 博士研究生, 目前主要从事大气偏振遥感方面的研究工作。

主要因子,而且有一定的物理意义,被广泛应用于批量处理数据的算法中,尤其是核驱动模型。针对地表的 BRDF 校正,利用 MODTRAN 和地物 BRDF 大气订正环进行大气校正,何立明等^[3,4]已进行了深入的研究。

中巴地球资源卫星是 1988 年中国和巴西两国政府联合议定书批准,在中国资源一号原方案基础上,由中巴两国共同投资、联合研制的卫星(代号 CBERS)。目前,中巴地球资源卫星已广泛服务于我国国民经济的各个行业,如农业、渔业、林业、环境等。同时,自 2006 年 4 月 1 日起,中巴地球资源卫星 02 星数据实行免费网上分发。

针对 CBERS 国家航天局航天遥感论证中心做了大量的工作,尤其在定标方面,并以《中国科学》专刊的形式结集出版。本文在此基础上,对大气校正的算法进行了深入研究,选用建查找表的方法实现 CBERS 数据的快速的自动的大气校正(本算法已在 RSQA-CBERS 软件中实现)。

2 大气校正原理

2.1 地表朗伯体假设大气校正算法

在地表朗伯体、大气水平一假设条件下,可以得到^[5]:

$$L(\mu_v) = L_0(\mu_v) + \frac{r}{1-rS} \mu_s F_0 T(\mu_s) \cdot T(\mu_v) \quad (1)$$

式中, $\mu_v = \cos\theta_v$, $\mu_s = \cos\theta_s$; θ_v , θ_s 分别为观测天顶角与太阳天顶角; $L(\mu_v)$ 为传感器接收到的辐射亮度, $L_0(\mu_v)$ 为观测方向的路径辐射项; r 为朗伯体地表反射率; S 为大气下界的半球反射率; T 为大气透过率; πF_0 为大气层顶与太阳光垂直方向的辐射通量密度。

利用入射太阳辐射项 $F_0 \mu_s$ 归一化上式可得:

$$\rho_{TOA}(\mu_s, \mu_v, \phi) = \rho_o(\mu_s, \mu_v, \phi) + \frac{T(\mu_s) T(\mu_v) \rho_s(\mu_s, \mu_v, \phi)}{[1 - \rho_s(\mu_s, \mu_v, \phi) S]} \quad (2)$$

式中, ρ_{TOA} 是大气顶部反射率, ρ_o 是大气的路径辐射项等效反射率, ρ_s 为地表二向反射率,当地表为朗伯体时为 r

将(2)式转化为如下形式:

$$\rho_s(\mu_s, \mu_v, \phi) = \frac{\rho_{TOA}(\mu_s, \mu_v, \phi) - \rho_o(\mu_s, \mu_v, \phi)}{T(\mu_s) T(\mu_v) + \rho_{TOA}(\mu_s, \mu_v, \phi) S - \rho_o(\mu_s, \mu_v, \phi) S} \quad (3)$$

上式即为大气校正的式子, ρ_s 为地表反射率,

即经过大气校正的反射率值; ρ_{TOA} 是大气顶部反射率,即需要进行大气校正的遥感观测值; S , ρ_o , $T(\mu_s) T(\mu_v)$ 为进行大气校正时所需要的四个参数,由于 $T(\mu_s)$ 和 $T(\mu_v)$ 在式子中总是以乘积形式出现,因此将 $T(\mu_s) T(\mu_v)$ 作为一个参数考虑。故进行大气校正可利用(3)式,输入 S , ρ_o , $T(\mu_s) T(\mu_v)$ 参数以及需要进行大气校正的 ρ_{TOA} , 经过计算可得经过大气校正的地表反射率 ρ_s 。

S , ρ_o 和 $T(\mu_s) T(\mu_v)$ 三个参数的确定是利用 MODTRAN 软件模拟大气状况,进而求得,详细步骤见下一章节。

2.2 地表非朗伯体大气校正算法

目前,进行 BRDF 校正的模型主要为核驱动模型。核驱动模型中的 Ambrel 模型是其中发展较为成熟、应用广泛的线性模型,已应用于 MODIS 数据的处理。它利用具有一定物理意义的核的线性组合来拟合地表的二向性反射特征。二向性反射可以分解为各向同性反射(常量)、体散射、几何反射三部分的权重之和,而每个部分使用不同的 BRDF 模型核,按最小误差原则组合成一个新的 BRDF 模型。核驱动模型可用下式表示^[6]:

$$R(\theta_i, \theta_v, \varphi) = f_{iso} + f_{geo} K_{geo}(\theta_i, \theta_v, \varphi) + f_{vol} K_{vol}(\theta_i, \theta_v, \varphi) \quad (4)$$

式中, R 为二向反射率; K_{geo} 为几何光学核, K_{vol} 是体散射的核,都是光线入射角 (θ_i) 和观察角 (θ_v) 的函数; φ 是视线与太阳间的相对方位角; f_{iso} , f_{geo} 和 f_{vol} 是常系数,分别表示各向均匀散射、几何光学散射、体散射在这三部分中所占的比例(权重)。

体散射核描述水平均匀植被的各向异性散射。体散射核(Ross薄核)可用下式表示^[7]:

$$K_{vol} = \frac{(\pi/2 - \zeta) \cdot \cos\zeta + \sin\zeta}{\cos\theta_i \cdot \cos\theta_v} - \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

式中, ζ 为散射相角, $\cos\zeta = \cos\theta_i \cos\theta_v + \sin\theta_i \sin\theta_v \cos\varphi$ 。

几何光学核(即面散射核)描述从观测方向上地物三维结构及其相互投射阴影等作用产生的几何光学散射。几何光学核的 Li 稀疏核可用下式表示^[6]:

$$K_{geo} = O(\theta_i, \theta_v, \varphi) - \sec\theta'_i - \sec\theta'_v + \frac{1}{2} (1 + \cos\zeta) \sec\theta'_i \sec\theta'_v \quad (6)$$

式中, O , θ'_i , θ'_v 均可由区域具体情况计算得出,具体计算可参看文献[6]及[3]。

据参考文献[8]研究,利用核驱动模型进行

BRDF 校正可采用下式:

$$R' = R + f_{geo}K_{geo}(\theta_i, \theta_v, \varphi) + f_{vol}K_{vol}(\theta_i, \theta_v, \varphi) \quad (7)$$

式中, R' 表示经过体散射和面散射 BRDF 校正后的地表反射率, R 为假设地表为朗伯体时的地表反射率。

3 算法实现

3.1 查找表的设计

对于同一幅中巴资源卫星图像来说, 大气状况基本相同, 采用相同的大气校正参数即可。而大气校正参数可以事先算好存储在查找表中, 然后根据不同图像的具体情况选择不同的大气校正参数进行大气纠正。由于参数事先已经算好, 这样就大大节约了运算时间。

中巴资源卫星共有 11 个波段, 其中 CCD 传感器的 1—5 波段, WFI 传感器的 10 和 11 波段, IRSS 传感器的 6 和 7 波段属于可见光近红外波段, 大气的散射作用明显, 同时也有部分吸收, 可以采取本方法进行大气纠正, 而 MRSS 传感器的 8 和 9 波段, 大气的散射作用不太明显, 同时吸收和发射作用极为显著, 本方法不适于对这两个波段进行大气校正。因此, 只要求取这 9 个波段的大气校正参数。

MODTRAN 4.0 中提供了 5 种标准大气模式, 分别为赤道模式、中纬度夏季模式、中纬度冬季模式、高纬度夏季模式、高纬度冬季模式。对于可见光近红外波段而言, 大气影响相对比较稳定, 所以采用标准大气模式即可达到大气校正的效果。

因此, 查找表为大气模式、波段二维, 每种情况需

要分别计算 $S, \rho_s, T(\mu_s)T(\mu_v)$ 三个参数, 一共需要计算的参数为: 大气模式数 \times 波段数 $\times 3 = 135$ 个。

3.2 查找表参数的计算

在已知大气模式和传感器波段以及相应波段的波段响应函数的情况下, 假定三种不同地表反射率 ρ_s , 利用 MODTRAN 4.0 计算出大气层顶的出射辐亮度 L 利用标准的太阳光谱积分出相应波段的太阳辐射项 $F_0\mu_s$ 代入 (8) 式, 可以得出相应的 ρ_{TOA} 。然后将 ρ_{TOA} 和 ρ_s 代入式 (2) 可得一个三元方程组, 解这个方程组即可得出三个大气校正参数 S, ρ_s 和 $T(\mu_s)T(\mu_v)$ 。

$$\rho_{TOA} = L/F_0\mu_s \quad (8)$$

但是, 在实际运算中, 比较复杂的问题是太阳辐射项 $F_0\mu_s$ 的确定。利用现有的太阳光谱积分所得的数值做为太阳辐射项 $F_0\mu_s$ 代入 (8) 式, 得出的相应的 ρ_{TOA} 值与实际情况相差很大。估计这种情况的出现可能是进行单位换算时发生了错误。为解决这一问题, 本文采取先计算大气透过率^[9], 再求太阳辐射项的方法, 具体步骤如下:

(1) 将 ρ_s 和 L 代入 (1) 式, 得出一个三元方程组, 解这个方程组得出 L_0, S, F ;

(2) 利用 MODTRAN 算出每种大气模式的透过率 T ;

(3) 利用计算所得的透过率 T , 得出 $T(\mu_s)T(\mu_v)$;

(4) 由式子 $F = F_0\mu_s T(\mu_s)T(\mu_v)$ 推出 $F_0\mu_s = F/T(\mu_s)T(\mu_v)$, 可求出 $F_0\mu_s$;

(5) 重复以上计算, 可得出 9 个波段的 $F_0\mu_s$ 值 (见表 1)。

表 1 MODTRAN 中得出的 9 个波段 $F_0\mu_s$ 值 (单位: $W \cdot SR^{-1} \cdot cm^{-2}$)

Table 1 Value of nine bands $F_0\mu_s$ acquired from MODTRAN

波 段	CCD1	CCD2	CCD3	CCD4	CCD5	WFI1	WFI2	IRSS1	IRSS2
$F_0\mu_s$	0.0067	0.0105	0.0016	0.0050	0.0105	0.0097	0.0047	0.0520	0.0012

在解决了以上问题后, 就可以开始查找表的运算了。采用以下步骤可更有效地计算出参数:

(1) 编辑 MODTRAN 输入文件, 进行连续计算;

(2) 将 9 个波段的波段响应函数按照 MODTRAN 的格式合并在一个文件中^[9];

(3) 在 Excel 或程序中事先编辑好计算公式, 输入 MODTRAN 计算结果即可得出所要参数。

4 试验与结果分析

4.1 典型地表反射率 ρ_s 选择试验与分析

理论上, 同样的大气模式, 对随机选取的三种地表反射率 ρ_s 进行计算, 所得到的大气校正参数都是相同的。但在实际运算中, 发现选用不同的地表反

射率进行计算时, 所得结果并不完全相同, 产生这种情况的原因可能是计算机的有穷计算。为测试这种不同最终对大气校正所造成的影响有多大, 以及选择哪组参数更能准确地反演大气校正参数, 本文做了如下的试验。

选取中巴资源卫星 CCD2 波段和大气模式为中纬度夏季反演大气校正参数, 在选取典型地表反射率时选取了三组值进行对比试验, 分别为第一组 (0, 0.05, 0.09), 第二组 (0, 0.10, 0.20), 第三组 (0, 0.50, 0.99)。经过计算得出的大气校正参数见表 2。

表 2 不同组地表反射率得到的不同大气校正参数

Table 2 Coefficient of atmospheric correction

	第一组	第二组	第三组
ρ_0	0.026907677	0.026907930	0.026913345
S	0.105126215	0.105253197	0.105721094
$TM_s \cdot TM_v$	0.554551842	0.554551842	0.554551842

从表 2 可以看出, 不同组所得到的大气校正参数相差不大。参数最大相差是 0.5%, 一般多为 0.1% 以下。这些细小的差别对大气校正的结果影响究竟有多大, 本文设定了一系列的 ρ_{TOA} 分别用这三组参数进行了校正。 ρ_{TOA} 的取值是从 0.1—0.6, 以 0.01 为间隔, 共 51 组值。校正结果如图 1 所示。

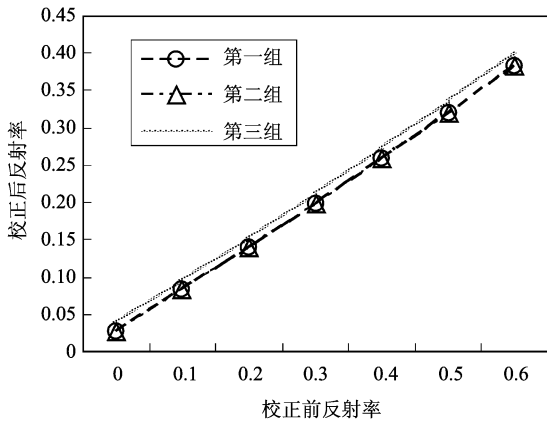


图 1 不同组校正参数进行校正后的曲线图

Fig 1 The graph of atmospheric correction

如图 1 所示, 各组校正参数所进行的校正后的数值相差不大。一般来说第三组校正所得的值要比第一组小, 第二组居于二者之间, 用第一组和第三组之差除以二者的平均, 可以得出相对差值, 如图 2 所示。

由图 2 可以看出, 随着地表反射率的增加, 开始第一组和第三组之间的差异较小且大致不变, 然后

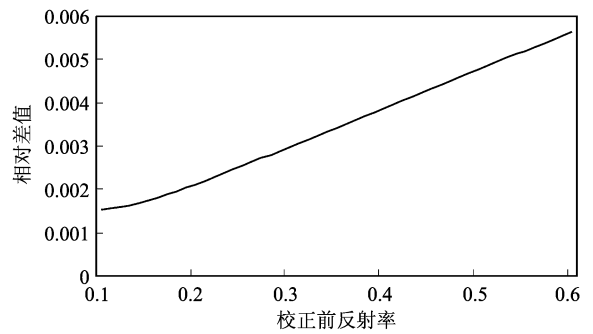


图 2 第一组和第三组参数校正后的相对差值

Fig 2 Relative difference of result

就近似线性增大。由于第三组的取值范围比第一组的值更大, 可以认为在低地表反射率的时候, 第三组的参数更能精确地进行大气纠正; 而在高地表反射率时, 二者差异较小。因此在计算大气校正参数时, 选取的典型地表反射率为 (0, 0.50, 0.99)。

4.2 卫星图像试验

采用的数据为 2004 年 6 月 18 日的怀来地区 CBERS 的 CCD 传感器图像, 像元数为 7290×6890 , 星下点的分辨率为 19.5m。此图像已经进行了仪器定标、辐射校正等预处理, 像元值为大气层顶出射反射率。

首先, 进行的是朗伯体大气校正。怀来地区属中纬度地区, 6 月已属夏季, 因此大气模式为中纬度夏季; 波段选择 CCD 传感器 2—4 波段, 即绿、红和近红外波段。利用根据本算法写成的程序进行朗伯体大气校正。每个波段的数据处理大约需时 33.937s, 处理结果如图 3 所示。可以看出经过大气校正的影像, 对比度有一定的增强, 边界更加清晰。

在 CBERS 卫星过境期间, 在地面测得敦煌地区沙地反射率的一组数据。选取卫星图像上大片沙地的一点, 读取校正前和校正后的数据, 如表 3 所列。

表 3 校正数据对比

Table 3 Comparison of result of different reflectivity

波段	校正前	校正后	实测值
CCD2	0.131853	0.165102	0.197284
CCD3	0.081094	0.076633	0.228246
CCD4	0.149830	0.226241	0.236186

由表可以看到, 经过校正过的数据, 第 2 波段和第 4 波段大大接近于地表实测数据。而第 3 波段, 可能由于本身的辐射校正出现了问题, 使未校正的反射率值偏小, 导致校正后的值有较大偏差。

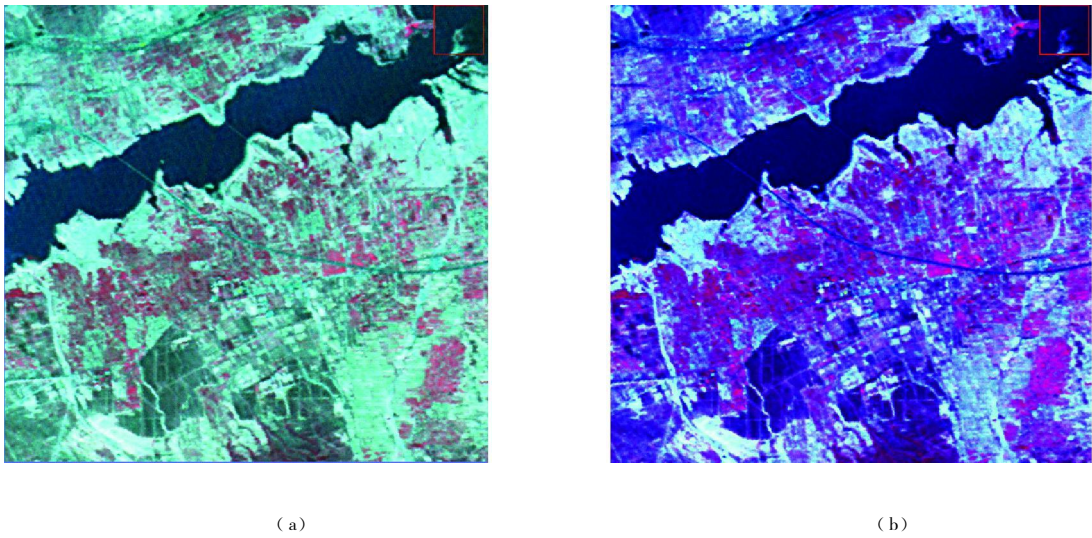


图 3 假彩色合成图

(a) 未经过朗伯体大气校正; (b) 经过朗伯体大气校正

Fig 3 Pseudo-color image

(a) Before atmospheric correction; (b) After atmospheric correction

BRDF的校正则要复杂一些。参考文献 [10] 中, 测量了大量的中纬度地区的数据后, 得出了最优的核驱动模型参数的经验值, 在红光波段 f_{o1} 和 f_{geo} 分别取值为 0.04148 和 0.04271。由于缺乏实

测数据, 同时所测地区的情况与参考文献 [10] 中的地区类似, 则核驱动模型的参数采用上值。然后根据式 (7) 对影像进行处理, 处理结果如图 4 所示。



图 4 红光波段灰度图

(a) 未经大气校正; (b) 经朗伯体大气校正; (c) 经 BRDF 校正

Fig 4 Gray image of red band

(a) Before atmospheric correction; (b) After lambert correction; (c) After BRDF correction

其次, 用测得的该地区河漫滩地段的一组反射率值进行对比。选取卫星图像上河漫滩一点进行对照, 如表 4。在表中, 可以看到朗伯体校正和非朗伯体校正都使结果更加接近实测值。

表 4 BRDF 校正结果比较

Table 4 Comparison of result of BRDF correction

波段	校正前	朗伯体大气校正后	BRDF校正后	实测值
CCD3	0.182033	0.251383	0.247829	0.2302

综上所述, 该算法能简洁快速地对 CBERS 图像进行大气校正, 而且能对地表的 BRDF 特性进行一定的校正, 反演的结果能基本还原地表真实情况。

5 结 论

本文在参考和总结当前主流的大气校正算法的基础上, 提出了基于 CBERS 的大气校正算法, 讨论了不同典型地物反射率选择对大气校正参数及最后大气校

正结果的影响,得出各个校正结果影响不大,选择(0.0, 0.5, 0.99)最优,得出了大气校正参数查找表,能简单、快速、有效的对 CBERS数据进行大气校正。

当然,本算法也存在着一些缺陷,主要是为使处理能够自动进行,并未考虑变化较大的大气气溶胶对影像的影响。其次是利用核驱动模型进行 BRDF校正时,由于没有实测数据,采用了经验参数。

致 谢 中国资源卫星应用中心提供 CBERS实验数据,以及杨磊同志在写作中给予的指导,谨致谢意。

参 考 文 献 (References)

- [1] Kaufman Y J, Remer L. Detection of Forest Using Mid-IR Reflectance: an Application for Aerosol Studies [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1994, 32: 672—684.
- [2] Qi X Y, Tian Q J. The Advances in the Study of Atmospheric Correction for Optical Remote Sensing [J]. Remote Sensing for Land & Resources 2005, 4: 1—6 [亓雪勇,田庆久. 光学遥感大气校正研究进展 [J]. 国土资源遥感, 2005, 4: 1—6]
- [3] Yang H, Li X W, Gao F, et al. An Algorithm for the Retrieval of Albedo from Space Using New GO Kernel-Driven BRDF Model [J]. Journal of Remote Sensing, 2002, 6(4): 246—251. [杨华,李小文,高峰等. 新几何光学核驱动 BRDF模型反演地表反照率的算法 [J]. 遥感学报, 2002, 6(4): 246—251]
- [4] He L M, Li X W, Yan G J, et al. Atmospheric Correction for AMTIS Based on BRDF Loop and MODTRAN4. 1 [J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(5): 389—396. [何立明,李小文,阎广建等. AMTIS大气订正算法——基于 MODTRAN4. 1与BRDF大气订正环 [J]. 遥感学报, 2004, 8(5): 389—396]
- [5] Vermote Eric, Tanre D, Deuze J L, et al. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum 6S: An overview [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1997, 35: 675—686.
- [6] Wanner W, Li X W, Stahler A. On the Derivation of Kernels and Kernel-Driven Model of Bi-directional Reflectance [J]. J Geophys Res, 1995, 100(D10): 20455—20468.
- [7] Roujean J L, Leroy M, Deschamps P Y, et al. A Bidirectional Model of the Earth's Surface for the Correction of Remote Sensing Data [J]. J Geophys Res, 1992, 97 (D18): 21077—21089.
- [8] Yan L, Wang Y, Xu Y M, et al. An Improved MODIS BRDF Radiometric Calibration Approach [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(9): 788—790. [闫利,王颖,徐亚明等. 一种改进的 MODIS影像 BRDF辐射校正方法 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2004, 29(9): 788—790]
- [9] Berk A, Anderson G P, Acharya P K, et al. MODTRAN4 USER'S MANUAL [M]. Air Force Research Laboratory, Hanscom AFB, MA, 1999.
- [10] Li X W, Wang J F, Wang J D, et al. Multi-angle and Thermal Infrared Remote Sensing [M]. Beijing: Science Press, 2001. [李小文,汪骏发,王锦地等. 多角度与热红外对地观测 [M]. 北京: 科学出版社, 2001]