

基于图像的 AVIRIS 数据大气校正方法

田信鹏¹, 孙 林¹, 米雪婷¹, 于会泳¹, 王 健²

(1. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

摘 要:为实现机载可见光/红外成像光谱仪(AVIRIS)数据的自动化、高精度大气校正,研究基于图像的气溶胶遥感反演方法,并将反演结果用于图像大气校正。主要工作包括:①使用浓密植被法反演获得 AVIRIS 数据的气溶胶光学厚度;②利用辐射传输模型构建 AVIRIS 数据的大气校正查找表;③开展 AVIRIS 数据的大气校正实验,并通过典型地物光谱数据以及校正前后 NDVI 变化对校正结果进行验证分析。

关键词:大气校正;气溶胶光学厚度;机载成像光谱仪;辐射传输模型

中图分类号:P407.4, TP751.1

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2015)05-0069-06

Image-based Atmospheric Correction Method of AVIRIS Data

Tian Xinpeng¹, Sun Lin¹, Mi Xueting¹, Yu Huiyong¹, Wang Jian²

(1. College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

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

Abstract: In order to achieve the automatic and high-precise atmospheric correction of AVIRIS data, this paper studied the aerosol remote sensing retrieval method of AVIRIS based on the image itself, and applied the aerosol retrieval results to the atmospheric correction. Firstly, the aerosol optical thickness of AVIRIS data was retrieved by using dense dark vegetation algorithm. Secondly, the atmospheric correction look-up table of the AVIRIS data was constructed based on the radiation transfer model. Finally, the atmospheric correction experiment of the AVIRIS data was carried out and the results of atmospheric correction were verified by typical spectral data of ground objects and NDVI changes before and after correction.

Key words: atmospheric correction; aerosol optical thickness; airborne imaging spectrometer; radiation transfer model

机载可见光/红外成像光谱仪(airborne visible/infrared imaging spectrometer, AVIRIS)是第一台被用于民用的机载高光谱传感器,其光谱范围为400~2 500 nm,共224个波段,波段带宽为10 nm。该传感器分别被搭载在NASA ER-2和Twin Otter飞机上,NASA ER-2飞行于海洋区域上空20 km,获取的数据空间分辨率为20 m;Twin Otter飞行于陆地上空4 km,可获取米级空间分辨率的数据。目前,AVIRIS数据已经在北美洲、南美洲和欧洲等地开展了大量数据获取与遥感应用试验^[1]。高光谱分辨率、高空间分辨率、高信噪比的数据特点,使得AVIRIS数据在大气^[2]、地质调查^[3]和植被生态监测^[4]等应用中取得了许多成果。

在地质调查和植被生态监测等地表应用中,大气影响的去除效率和精度是影响AVIRIS数据应用的最主要因素之一。为提高AVIRIS数据地表信息探测的精度,多种大气校正方法被应用于数据的大气影响去

收稿日期:2015-05-11

基金项目:山东省杰出青年基金项目(JQ201211)

作者简介:田信鹏(1990—),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要从事大气遥感研究。E-mail:tian_xp@163.com

孙 林(1975—),男,山东枣庄人,副教授,博士,主要从事大气探测方面的研究,本文通信作者。

E-mail:sunlin6@126.com

除上。如 Elvidge^[5]采用经验线性法对 AVIRIS 数据进行大气校正,该方法的优点是模型构建简单,可以不用对数据辐射定标,但需要在数据成像时同步测量两个或两个以上的实际地表反射率;Green^[6], Gao^[7], Staenz^[8]等基于辐射传输进行大气校正,其校正精度相对较高,但需要预先知道大气参数(大气水汽、气溶胶光学特性、臭氧等)的空间分布。以上大气校正方法虽然有效提高了 AVIRIS 数据地表信息探测的精度,但都需要同步测量一些参数,从而限制了其应用^[9]。

为降低大气参数,特别是气溶胶对 AVIRIS 数据应用的限制,提出基于图像本身的大气校正方法,基本思路是:利用目前应用较广泛、精度较高的浓密植被法(dense dark vegetation, DDV),基于图像自身反演获取气溶胶光学厚度,利用反演结果实现图像的大气校正工作。

1 大气校正原理

基于辐射传输理论,假设大气水平均一、地表为朗伯体,则大气上界的表观反射率可以表示为:

$$\rho^*(\tau_a, \mu_s, \mu_v, \varphi) = \rho_0(\tau_a, \mu_s, \mu_v, \varphi) + \frac{T(\tau_a, \mu_s)T(\tau_a, \mu_v)\rho_s}{1 - S(\tau_a)\rho_s} \quad (1)$$

其中: τ_a 为大气总光学厚度,包括气体分子散射吸收以及气溶胶粒子散射的光学厚度,不同波段的气体分子散射吸收的光学厚度值可以根据经验公式直接获得^[10]; ρ^* 为大气顶层表观反射率; ρ_0 为大气路径辐射等效反射率; S 为大气下界半球反射率; ρ_s 为地表反射率; $T(\tau_a, \mu_s)$, $T(\tau_a, \mu_v)$ 分别为大气下行和上行透过率; μ_s 和 μ_v 分别为太阳天顶角和传感器天顶角的余弦值; φ 为太阳与传感器之间的相对方位角。

大气校正一般可以分为三个步骤:①获取气溶胶光学厚度参数,本研究参考 Kaufman^[11]等利用浓密植被法基于影像本身反演获得气溶胶光学厚度;②建立大气校正查找表,根据数据成像的大气参数和观测几何条件,模拟出 $S, \rho_0, T(\tau_a, \mu_s) \times T(\tau_a, \mu_v)$ 三个大气校正过程中所必须的参数;③根据第②步获得的大气校正参数带入式(1),利用表观反射率反推获得地表反射率 ρ_s 的值。

2 查找表构建及数据预处理

2.1 查找表的构建

大气辐射传输模型用于模拟电磁波在大气与地表之间的传播过程。为了满足不同的应用需求,国内外学者对大气辐射传输理论进行了深入研究,发展了多种辐射传输模型,其中广泛应用的有中等分辨率大气辐射传输模型^[12](moderate resolution atmospheric transmission, MODTRAN)、低分辨率大气辐射传输模型^[13](low resolution atmospheric transmission, LOWTRAN)、快速大气信息程序^[14](fast atmospheric signature code, FASCODE)和 6S 第二代太阳光谱卫星信号模拟辐射传输模型^[15](the second simulation of the satellite signal in the solar spectrum)。由于 6S 具有较高的计算效率和精度,本研究利用该模型进行了所有的辐射传输模拟。

大气校正系数查找表的构建精度直接影响到大气校正结果的精度^[16]。针对 AVIRIS 数据的特点,本文构建查找表时的各参数设置如表 1 所示,据此构建不同大气及观测条件下的查找表文件。

表 1 查找表参数设置

Tab. 1 Parameter settings in look-up table

参数名称	参数设置
传感器天顶角/(°)	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35
太阳天顶角/(°)	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60
相对方位角/(°)	0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 175
气溶胶光学厚度	0.000 1, 0.01, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0

2.2 水汽影响波段去除

由于光谱范围在 1 363~1 440 nm, 1 810~1 957 nm 和大于 2 395 nm 的电磁波受大气水汽的影响较大, 在这些波长的电磁波中, 极少包含地面信息, 需将它们剔除。AVIRIS 高光谱遥感数据中, 相对应受水汽影响较大的波段为: 107~116, 152~170 和 214~224, 共 40 个波段。剔除受水汽影响的波段后, 剩下 184 个波段。

2.3 表观反射率的计算

AVIRIS 数据的存储方式为将传感器表观辐亮度 L 乘以一比例系数转换为整型数据, 在除以该系数计算出真实辐亮度的基础上, 采用式(2)可获得表观反射率:

$$\rho^* = \frac{\pi \times L \times D^2}{E_s \times \cos \theta_s} \quad (2)$$

其中: D 为日地平均距离; θ_s 为太阳天顶角; E_s 为传感器波段平均太阳辐照度, $W/(m^2 \cdot sr)$, 可根据光谱响应函数与太阳光谱辐照度数据积分得到:

$$E_s = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

其中: $E(\lambda)$ 为大气顶层太阳光谱辐照度, $W/(m^2 \cdot sr)$; $S(\lambda)$ 为 AVIRIS 光谱响应函数。针对高光谱数据的特点, 其光谱响应函数通常可以使用高斯函数进行模拟:

$$f(\lambda_i, \delta) = \exp(-(\lambda_i - \lambda_c)^2 / (2\delta^2)) \quad (4)$$

其中: $\delta = \frac{W_{FWHM}}{2\sqrt{2\ln 2}}$; λ_i 为波长, λ_c 为该波段的中心波长, W_{FWHM} 为半幅波宽, 单位均为 nm。

3 气溶胶光学厚度反演

大气校正效果强烈依赖于输入大气参数的精度, 其中影响最大的是大气气溶胶。因此, 大气校正需要精确估算气溶胶光学厚度分布。由于遥感数据的特点, 不可能实时同步获取每景影像气溶胶参数值, 鉴于此, 本研究实现基于影像本身反演气溶胶光学厚度用于大气校正。

当前气溶胶光学厚度遥感反演算法有很多, 其中最常用也是精度相对较高的为浓密植被法。该算法利用浓密植被在红、蓝波段低反射率(0.01~0.02)的特点, 可以较精确地从传感器获得的信息中将地表和大气贡献区分开。基本思路是: 利用 2.1 μm 波段受气溶胶影响很小, 其表观反射率近似等于地表反射率, 利用红、蓝光波段与 2.1 μm 波段之间的线性关系估算出地表反射率^[17]; 然后利用 6S 模拟出不同气溶胶模式和观测条件下, 地表反射率、气溶胶光学厚度和表观反射率之间的关系, 建立气溶胶光学厚度查找表; 最后通过查找表获取气溶胶光学厚度。由于在局部区域内, 气溶胶光学厚度的分布相对稳定^[18]。因此, 非浓密植被区域气溶胶光学厚度可采取反距离差值方法计算获得。本文从已经获取的 AVIRIS 图像中, 抽取了晴空条件下两个区域的 AVIRIS 数据, 开展了气溶胶光学厚度反演实验(分别标记为区域 A 和区域 B)。图 1 为利用该算法基于图像本身反演获得的气溶胶光学厚度(无量纲数据), 通常分布在 0.05~2 之间, 晴空条件下, 通常低于 0.4, 从图中可以看出, 两个区域反演的气溶胶光学厚度数值范围合理, 空间分布相对平滑、连续, 另外, 在局部小范围区域有薄云的影响。

4 基于查找表的大气校正及验证

4.1 基于查找表的大气校正

对经过预处理得到的 AVIRIS 表观反射率数据, 依据影像的成像几何条件、大气模式及反演获得的气溶胶光学厚度信息, 从查找表中查找相应参数, 利用式(1), 对影像进行逐像元大气校正。图 2 为校正前后标准假彩色合成对比图。

从大气校正前和校正后的图像对比可以看出, 大气校正后图像的明暗对比更加明显, 纹理信息更加突

出,图像中的细节内容被更清晰地表达出来。区域 A 左侧中部植被覆盖密集区域,植被信息有效增强;区域 B 中部上方团簇状的植被分布也被更清晰地显现出来。

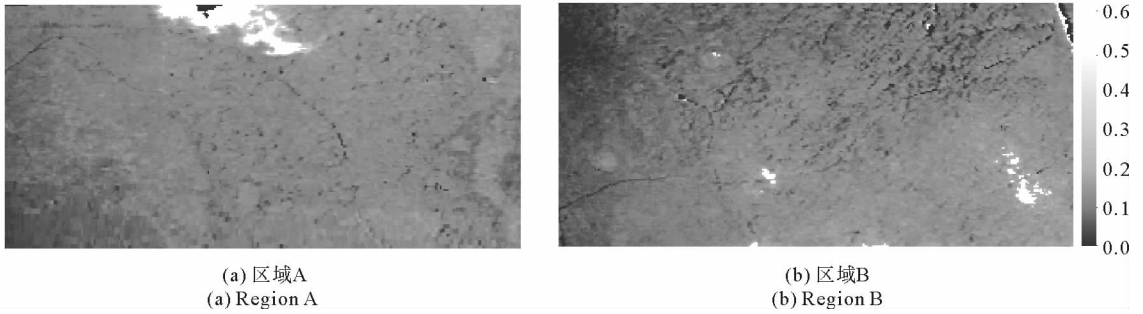


图 1 550 nm 处气溶胶光学厚度反演结果

Fig. 1 The distribution of aerosol optical thickness at 550 nm

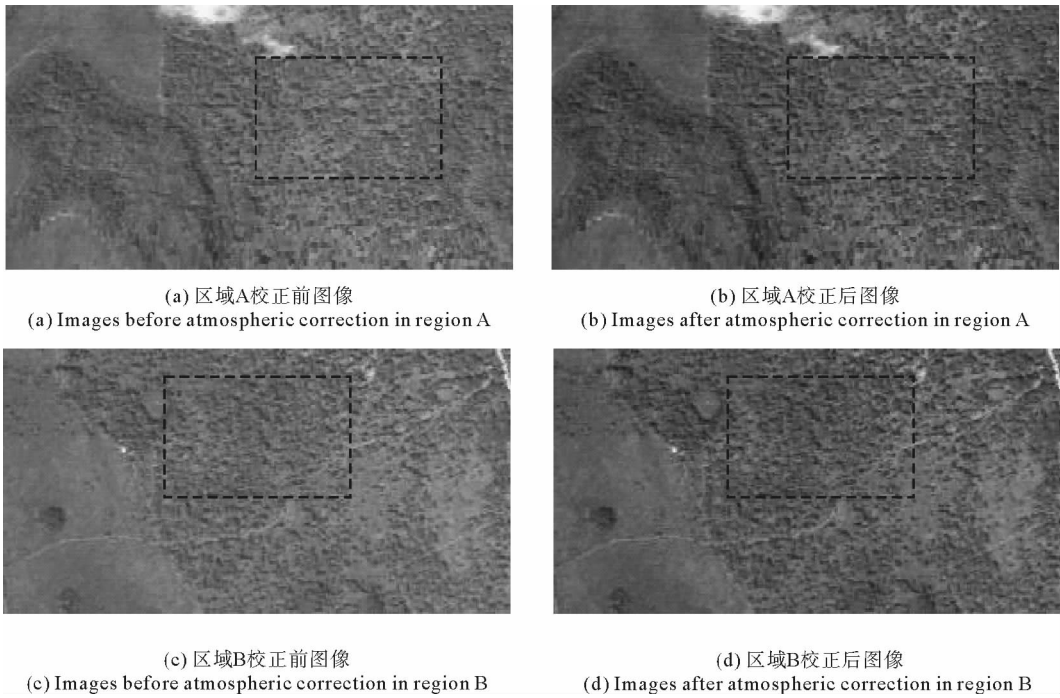


图 2 大气校正前后标准假彩色合成对比图

Fig. 2 Atmospheric correction results and original images

4.2 校正结果验证

为验证大气校正结果,利用美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)建立的波谱库中典型植被光谱数据进行验证,并对校正前后图像植被指数变化进行对比分析。

1) 植被光谱曲线对比

图 3 为大气校正前后与波谱库中植被光谱曲线对比图,可以看出,大气校正后植被光谱曲线(b)与原始图像(a)相比,在蓝光波段反射率有所降低,红光和近红外波段的反射率明显提高,水汽吸收通道也更加明显,并且与波谱库中反射曲线(c)相对一致,客观地说明了本研究采用大气校正方法的正确性。

2) 归一化植被指数

植被指数能够很好地反映地表植被覆盖特征,归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)为应用较多且较成熟的指数之一。NDVI 的计算方法为近红外波段与红光波段反射率之差与二者之

和的比值,由于大气对电磁波吸收散射等作用,会明显增加红光波段的反射率,而对近红外波段的反射率影响相对较小,所以用经过大气校正后的地表反射率计算的植被指数通常高于直接利用表观反射率计算的植被指数。图 4 为分别由原始表观反射率数据和经过大气校正获得的地表反射率数据计算的 NDVI 分布,可以看出,无论对区域 A 还是区域 B,使用大气校正后的反射率计算的植被指数相对于大气校正前的植被指数呈现明显增加的趋势,该结果在一定程度上间接验证了本文大气校正结果的有效性。

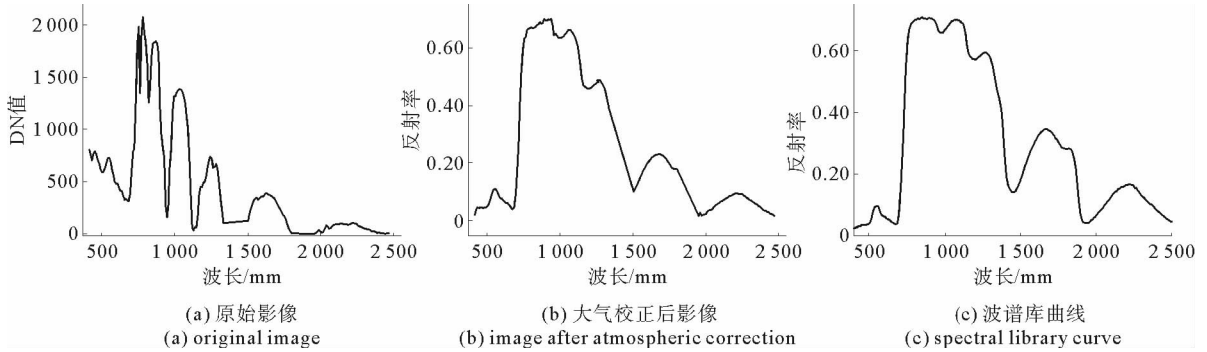


图 3 植被波谱曲线对比图

Fig. 3 Vegetation spectral curve comparison chart

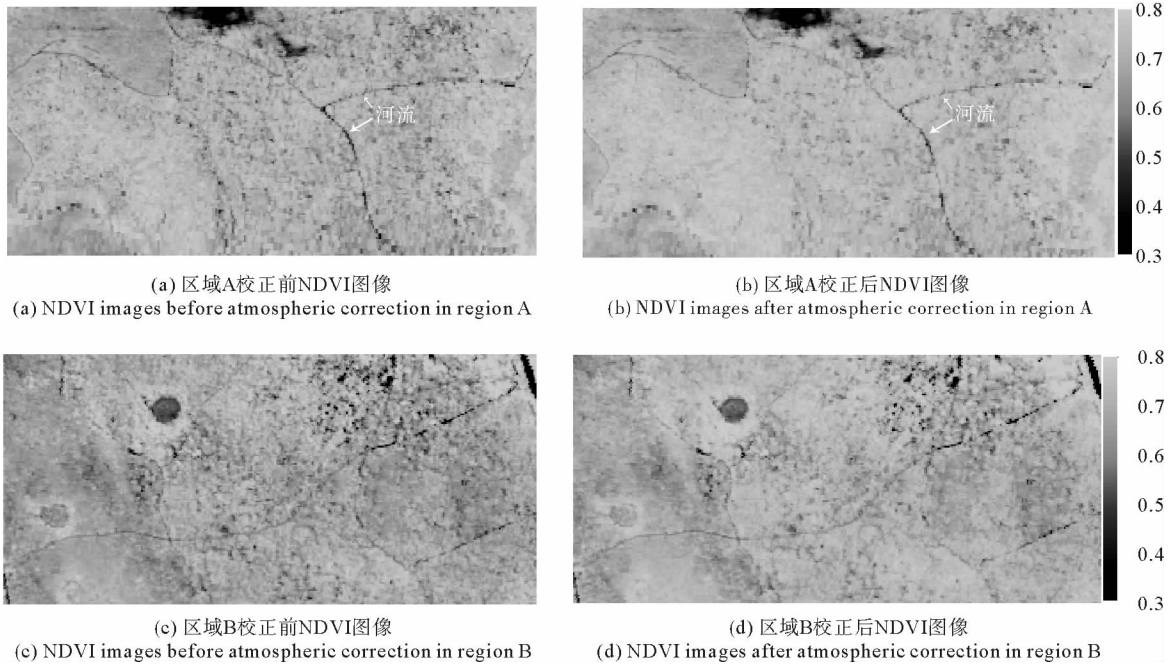


图 4 大气校正前后 NDVI 对比图

Fig. 4 Atmospheric correction before and after comparison chart NDVI

5 结束语

传感器获取的遥感影像既有地表信息,同时也包含大气信息,为了从图像中获得真实地表信息,必须进行大气校正,而大气参数的获取直接影响大气校正的精度。鉴于此,利用浓密植被法实现了航空高光谱 AVIRIS 数据本身气溶胶光学厚度的反演,并将此参数用于大气校正,得到真实的地表反射率。通过校正后植被光谱曲线与波谱库中植被光谱曲线比较,校正前后的 NDVI 变化情况,对校正结果进行验证分析。结果表明,该方法实现的大气校正具有较高的精度,能够有效改善图像的质量。该项工作为植被指数等多种地

表参数提取提供了高质量的数据准备。

参考文献:

- [1]Green R O, Eastwood M L, Sarture C M, et al. Imaging spectroscopy and the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS)[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 65(3): 227-248.
- [2]Schläpfer D, Borel C, Keller J, et al. Atmospheric precorrected differential absorption technique to retrieve columnar water vapor[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 65(3): 353-366.
- [3]Baugh W M, Kruse F A, Atkinson W W. Quantitative geochemical mapping of ammonium minerals in the southern Cedar Mountains, Nevada, using the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer(AVIRIS)[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 65(3): 292-308.
- [4]Martin M E, Aber J D, Congalton R G, et al. Determining forest species composition using high spectral resolution remote sensing data[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 65(3): 249-254.
- [5]Elvidge C D. Examination of the spectral features of vegetation in 1987 AVIRIS data[C]//The Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Performance Evaluation Workshop. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 1988: 59-62.
- [6]Green R O. Retrieval of reflectance from calibrated radiance imagery measured by the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) for lithological mapping of the Clark Mountains, California[C]//Second Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 1990: 167-175.
- [7]Gao B C, Kaufman Y J. Correction of thin cirrus effects in AVIRIS images using sensitive 1.375 μm cirrus detecting channel [C]//Summaries of Fifth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 1995: 59-62.
- [8]Staenz K, Williams D J, Walker B. Surface reflectance retrieval from AVIRIS data using a six dimensional look up table[C]//Summaries of the Sixth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 1996: 223-230.
- [9]Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A, Mattar C, et al. Atmospheric correction of optical imagery from MODIS and reanalysis atmospheric products[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(10): 2195-2210.
- [10]Hansen J E, Travis L D. Light scattering in planetary atmospheres[J]. Space Science Review, 1974, 16(4): 527-610.
- [11]Kaufman Y J, Sendra C. Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 1988, 9(8): 1357-1381.
- [12]吴北婴. 大气辐射传输实用算法[M]. 北京: 气象出版社, 1998: 33-36.
- [13]Isaacs R G, Vogelmann A M. Multispectral sensor data simulation modeling based on the multiple scattering LOWTRAN code[J]. Remote sensing of Environment, 1988, 26(1): 75-99.
- [14]Clough S A, Kneizys F X, Shettle E P, et al. Atmospheric radiance and transmittance; FASCOD2[C]//Sixth Conference on Atmospheric Radiation. Williamsburg, 1986: 34-59.
- [15]Vermote E F, Tanré D, Deuzé J L, et al. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(3): 675-686.
- [16]Sun C K, Sun L. Atmospheric correction method based on HJ-1 CCD data[J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(4): 826-836.
- [17]Kaufman Y J, Wald A E, Remer L A, et al. The MODIS 2.1 μm channel-correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(5): 1286-1298.
- [18]Liang S L, Fang H L, Chen M Z. Atmospheric correction of Landsat ETM+ land surface imagery, Part I: Methods[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(11): 2490-2498.

(责任编辑:高丽华)