

基于 FLAASH 模块的高级陆地成像仪图像的大气校正

陈建珍¹, 何 超², 岳彩荣³

(1. 西南林业大学 环境科学与工程系, 云南 昆明 650224; 2. 西南林业大学 国有资产管理处, 云南 昆明 650224; 3. 西南林业大学 资源学院, 云南 昆明 650224)

摘要: FLAASH(fast line-of-sight atmospheric analysis of spectral hypercubes)大气校正模块被越来越多地应用到遥感图像大气校正中, 但是 ENVI(the environment for visualizing images)中没有预先设定有新谱传感器的参数, 因此限制了 FLAASH 模块的使用范围。采用 FLAASH 模块对 ENVI 中没有预设的高级陆地成像仪传感器所拍摄的图像进行大气校正, 初步探讨了 FLAASH 模块对未知多光谱传感器图像的大气校正。通过比较大气校正前后典型地物的光谱曲线和归一化植被指数(NDVI, normalized difference vegetation index), 表明 FLAASH 模块能够有效地减少大气对 ALI 图像的影响。图 5 表 2 参 20

关键词: FLAASH 模块; 高级陆地成像仪图像; 大气校正

中图分类号: S771 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2011)04-0590-07

Atmospheric correction of an advance land imager (ALI) image based on the FLAASH module

CHEN Jian-zhen¹, HE Chao², YUE Cai-rong³

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China; 2. Department of State-owned Assets, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China; 3. Faculty of Resources, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: The fast line-of-sight atmospheric analysis of spectral hypercubes (FLAASH) atmospheric correction module has often been used to correct the atmospheric influence of remote sensing images, however, in the Environment for Visualizing Images (ENVI), there is no pre-defined parameter for a new sensor in ENVI, which limits the range of application for a FLAASH module. To discuss atmospheric correction for an unknown multispectral sensor using the FLAASH module, an atmospheric correction process of images from the Advanced Land Imager (ALI) sensor was introduced. According to contrast and analysis uncorrected and corrected reflectance spectrum for water, vegetation and wasteland, the corrected reflectance spectrum was restored; according to qualitative and quantitative analysis of the whole image of corrected and uncorrected normalized differential vegetation index (NDVI), vegetation region was more brightness; non-vegetation region was darker; the peak value of histogram was improved from 0.454 to 0.754; the mean value was improved from 0.417 to 0.694; the standard deviation was improved from 0.139 7 to 0.141 0. Results showed that by using the FLAASH module, the atmospheric influence of ALI image was effectively weakened. The FLAASH module can be used to correct the atmospheric influence of new sensor, which is no pre-defined in the ENVI. [Ch, 5 fig. 2 tab. 20 ref.]

收稿日期: 2010-11-16; 修回日期: 2010-12-23

基金项目: 国家林业局重点学科资助项目(XKZ200904); 国家林业局林业公益性行业科研专项(200904045); 云南省教育厅科学研究基金资助项目(2010Y300); 西南林业大学重点基金资助项目(200503Z, 200702Z)

作者简介: 陈建珍, 从事森林计测和林业遥感研究。E-mail: 31362197@qq.com。通信作者: 岳彩荣, 教授, 从事 3S 技术研究。E-mail: cryue@163.com

Key words: FLAASH module; advanced land imager; atmospheric correction

高级陆地成像仪(advanced land imager, ALI)是美国国家航空航天局(NASA)新千年计划的第 1 颗对地观测卫星 EO-1(Earth Observing-1)上搭载的传感器,于 2000 年 11 月 21 日发射升空。ALI 的技术性能与 Landsat 7 上的 ETM+(enhanced thematic mapper plus)相当,其目的是构成 Landsat 数据的连贯性,且在数据质量上有所提高。ALI 共有 10 个波段无热红外波段,其中 1 个 10 m 分辨率的全色波段,6 个 30 m 分辨率的多光谱波段与 Landsat 7 的 1~5 和 7 波段相似,比 Landsat 7 多 3 个 30 m 分辨率的多光谱波段^[1]。随着遥感技术的不断发展,对地观测的遥感定量分析逐渐成为人们的研究热点。在遥感成像过程中,传感器接收到的辐射信息是经过大气作用后的辐射信息,它包括了地物辐射信息和大气辐射信息。为提高遥感定量分析的精度,对图像进行大气校正是必须的。大气校正主要是指消除或减弱传感器接收到的大气辐射信息,使传感器所接收到的地物辐射信息尽可能的接近真实情况。遥感图像大气校正的研究始于 20 世纪 70 年代,到目前已形成了多种校正方法,这些方法大致可以分为基于图像的校正方法、基于地面定标的经验回归方法和基于辐射传输理论的校正方法。基于图像的校正方法较简单,易实现,不需要输入大气参数,但要求已知或假设图像中某些像元的反射率值,以此来建立地物反射率与卫星观测值之间的关系,并将这种关系应用于全图,其不足之处在于难于定位和提取这些假设的像元^[2-4]。基于地面定标的经验回归方法要求有实测的地物光谱数据^[5],对大范围 and 地形复杂的区域很难实现^[4]。基于辐射传输理论的校正方法建立在电磁波在大气中辐射传输的原理之上,模型意义明显,校正精度高,缺点是需要输入的大气参数难于准确获取^[2-4]。FLAASH(fast line-of-sight atmospheric analysis of spectral hypercubes)模块是目前常用的基于辐射传输理论的校正方法^[6]。FLAASH 是由美国空军实验室发起,由处于世界光学研究领先地位的光谱科学公司开发,现已集成在 ENVI(the environment for visualizing images)软件中方便使用。它是一个基本的大气校正工具,可以校正的光谱范围为可见光到近红外、短波红外的范围,最大可到 3 μm 。与其他许多大气校正程序的不同之处是它不是在预先计算好的模型数据库中插入辐射传输参数来得到校正结果,而是结合 MODTRAN 4 的辐射传输代码,针对每一景图像通过任意地选择 MODTRAN (moderate spectral resolution atmospheric transmittance algorithm and computer model)模型标准的大气和气溶胶类型,会有唯一的针对该图像的 MODTRAN 解决办法^[7]。关于 FLAASH 模型详细的介绍可参见 ENVI 软件的帮助或用户手册。很多学者利用 FLAASH 模块对 TM (thematic mapper)图像^[8]、ASTER(advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer)图像^[9-10]等多光谱图像和 AVIRIS (airborne visible/infrared imaging dpectrometer)图像^[11-12]、Hyperion 图像^[13-14]等高光谱图像进行过大气校正研究,并且都取得了较好的结果。但是利用 FLAASH 模块对未知多光谱传感器图像进行大气校正的研究较少,此处所指的未知多光谱传感器图像是指 ENVI 中预先没有定义的多光谱传感器所拍摄的图像。因此,本研究以 ALI 图像 9 个多光谱波段的 FLAASH 大气校正为例,对未知多光谱传感器图像的 FLAASH 大气校正进行探讨。

1 研究方法

1.1 数据来源

使用的图像为云南省香格里拉地区的 ALI 图像,成像时间为 2003 年 11 月 15 日,从美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)网站(<http://edcsns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer/>)下载,轨道号 132,行号 40,图像格式为 GEOTIFF,产品级别 L1Gst,图像做过系统级的辐射校正和几何校正,也做了消除视差的正射校正^[15]。

1.2 辐射定标

辐射定标是大气校正的基础步骤,目的是将标准化无量纲的 DN(digital number)值转化为传感器接收到的光谱辐射值。L1 级的图像辐射定标可按照公式(1)进行^[16]。

$$L_{\lambda} = G_{\text{rescale}} \times Q_{\text{cal}} + B_{\text{rescale}} \quad (1)$$

式(1)中: L_{λ} 是传感器接收到的光谱辐射值, G_{rescale} 是每个波段的增益值, Q_{cal} 是图像的 DN 值, B_{rescale} 是每个波段的偏移值。

Chander 等^[16]2009 研究发现 ALI 传感器运行得很好很稳定, 其光谱响应衰减很小。因此可以用图像头文件中自带的辐射定标系数对各波段进行辐射定标。各波段辐射定标系数参见表 1。在 ENVI 中利用波段计算工具, 按表 1 中的系数对 9 个波段分别进行辐射定标, 并按波段按行交叉排列(BIL)或波段按像元交叉排列(BIP)合成标准的 ENVI 文件, 再将各波段的中心波长加入图像头文件。按式(1)计算出的辐射定标结果的单位($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)是 FLAASH 模块辐射值默认单位($\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$)的 10 倍, 因此, 在运行 FLAASH 模块前须进行换算。

表 1 ALI 多光谱图像各波段的中心波长和辐射定标系数

Table 1 Center wavelength and radiometric calibrated coefficient of each band of ALI multispectral image

波段	中心波长/nm	Grescale/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$	Brescale/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1})$
波段 1	443	0.045 00	-3.40
波段 2	483	0.043 00	-4.40
波段 3	565	0.028 00	-1.90
波段 4	662	0.018 00	-1.30
波段 5	790	0.011 00	-0.85
波段 6	868	0.009 10	-0.65
波段 7	1 250	0.008 30	-1.30
波段 8	1 650	0.002 80	-0.60
波段 9	2 215	0.000 91	-0.21

1.3 光谱响应函数构建

由于 ENVI 中没有预先设有 ALI 图像的光谱响应函数, 而 FLAASH 模块校正多光谱图像时光谱响应函数是必须的, 因此需手动构建光谱响应函数。对于每一种传感器, 在设计时都会有相应的光谱响应函数且是公开的, ALI 图像的光谱响应函数可以从澳大利亚联邦科学与工业研究组织(Astronomers at Australia's Commonwealth Scientific Research Organization, CSIRO)网站下载^[17]。

根据下载的数据, 在 410~2 560 nm 范围内构建 ALI 图像的光谱响应函数。在 EXCEL 中, 从 410 nm 开始以 1 nm 间隔构建各波段的响应值, 在各波段没有涉及的光谱范围以 0 填充响应值, 并转化为 ASCII 码文件, 最后导入 ENVI 形成 ALI 图像的光谱响应函数, 具体步骤可参见美国环境系统研究所公司(Environmental Systems Research Institute, Inc, ESRI)中国社区论坛^[18]。ENVI 中是用光谱曲线来描述光谱响应函数的, 构建好的光谱响应函数如图 1 所示。

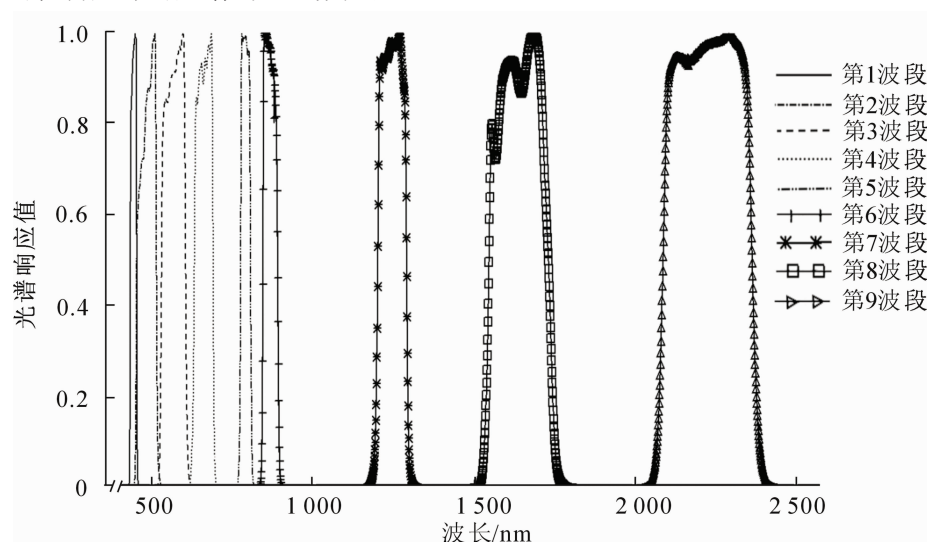


图 1 ALI 图像光谱响应函数

Figure 1 Spectral response function of ALI image

1.4 FLAASH 大气校正

FLAASH 大气校正的关键步骤是获取和设置各项校正参数，多光谱图像 FLAASH 大气校正的参数设置分为基本设置、多光谱设置和高级设置 3 个部分。根据 EO-1 卫星和 ALI 传感器的技术参数设置传感器高度、像元大小。根据图像头文件设置图像景中心坐标、飞行日期和飞行时间等设置项。根据试验区数字高程模型(digital elevation model, DEM)设置地面海拔高度。根据用户手册或软件帮助设置其他设置项，其中二氧化碳混合比例在 2001 年接近 370，为得到较好的校正结果需再加上 20；FLAASH 模块中初始能见度的计算与 550 nm 波长的消光系数有关，可按式(2)进行估算。

$$V = 3.912/\beta。$$
 (2)

式(2)中： V 是能见度， β 是消光系数，由气溶胶光学厚度(AOD)除以气溶胶有效厚度层获得，这个有效厚度层大约是 2 km^[7]。

获取图像成像时的 AOD 比较困难，试验中通过全球气溶胶自动测定网站(AERONET)获取香格里拉地区 11 月 500 nm 波长的平均气溶胶厚度大，约为 0.7。500 nm 与 550 nm 波长的气溶胶厚度相差不大^[19]，可以用于估算能见度。对于试验用的 ALI 图像，FLAASH 模块的具体输入参数见表 2。

表 2 ALI 图像 FLAASH 模块输入参数

Table 2 Input parameter of FLAASH module for ALI image

传感器类型	景中心坐标	传感器高度/km	地面海拔高度/km	像元大小/m	飞行日期	飞行时间/(h: min: s)
Unknown-MSI	27.91°N, 99.7°E	705	3.545	30	2003-11-15	03: 41: 08
大气模型	水汽反演	气溶胶类型	气溶胶反演	初始能见度/km	气溶胶反演设置	光谱响应函数
Tropical	NO	Rural	2-Band(K-T)	11	标准陆地上	1.4 节构建
第一波段指数	气溶胶标高/km	CO ₂ 比例/(mL·m ⁻³)	平方分割函数	领域校正	Modtran 分辨率/ cm ⁻¹	多散射模型
0	2	390	NO	YES	5	scaled DISORT

2 结果与分析

2.1 大气校正结果

调入准备好的辐射定标文件，按上述参数设置完毕即可执行 FLAASH 大气校正。校正结果按 ALI 图像多光谱波段 8/5/3 进行彩色合成，如图 2 所示。从图 2 中可以看出：大气校正后的图像整体亮度提高，图像更清楚，说明大气校正有效的减小了大气的影晌，提高了图像的质量。

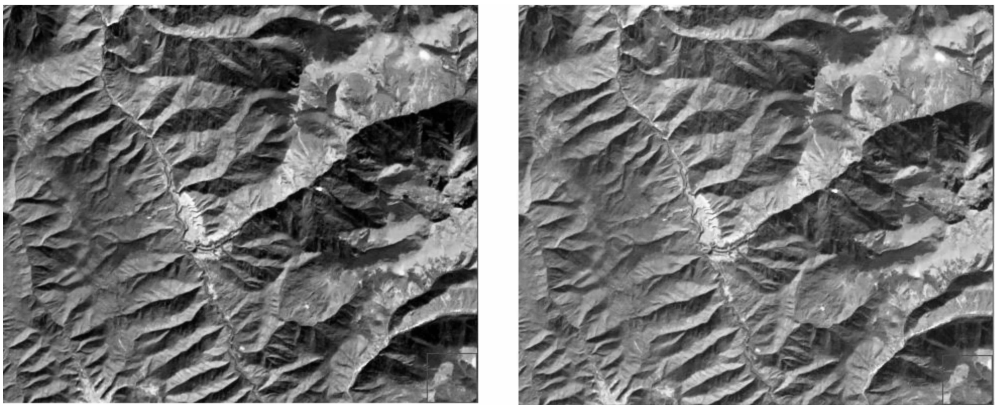


图 2 FLAASH 大气校正前(左图，辐射定标图像)后(右图)对比

Figure 2 Comparison before(left, radiance calibrated image) and after FLAASH atmospheric correction(right)

2.2 校正前后地物光谱曲线对比

从校正前后的图像中对应地提取植被、水体和裸地等 3 种典型地物的光谱曲线，如图 3 所示。从图 3 中可以看出：经过大气校正后植被、水体和裸地 3 种地物的光谱曲线都得到还原，440 nm 到 480 nm

的高反射得到了不同程度的校正。大气校正后植被光谱曲线呈现出了绿峰红谷的典型绿色植物的反射光谱曲线,在 480 nm 附近的吸收谷和 550 nm 附近的小反射峰也得到了还原。大气校正后 440 nm 到 1 500 nm 水体的反射率小于校正前,与中国典型的水体光谱曲线基本吻合^[20]。大气校正后 440 nm 到 700 nm 裸地的反射率小于校正前,700 nm 后裸地反射率大于校正前,校正后裸地的光谱曲线与植被明显的区分开。可认为 FLAASH 模块有效的减小了大气对 ALI 图像的影响。

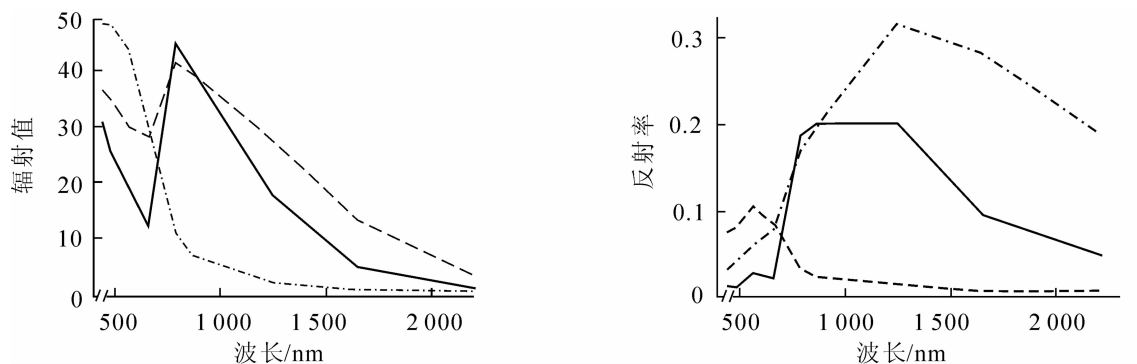


图 3 大气校正前(左图)后(右图)典型地物光谱曲线

Figure 3 Reflectance spectrum of typical landcover before (left) and after atmospheric correction (right)

2.3 大气校正对归一化植被指数的影响

大气校正能够显著的改善植被指数^[4],因此,可以通过分析大气校正前后归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)的变化情况来评价大气校正的效果。利用大气校正前后 ALI 图像的波段 4 和波段 5,求算大气校正前后的 NDVI,如图 4 所示。从图 4 中可以看出:裸地等非植被区比校正前更黑,而植被区变亮,图像对比度变大。FLAASH 大气校正后使得山体阴阳坡两侧的同类地物辐射值差异减小。另外,分析校正前后 NDVI 直方图(图 5)可以看出:大气校正后 NDVI 的最大值和最小值比校正前明显增大,直方图整体右移。大气校正前 NDVI 峰值为 0.494,平均值为 0.417;大气校正后 NDVI 峰值为 0.754,平均值为 0.694,表明植被信息得到加强,NDVI 得到改善。图像的标准差越大表明包括的信息量越多,大气校正前 NDVI 标准差为 0.139 7,大气校正后 NDVI 标准差为 0.141 0,表明大气校正虽然削弱了图像信息中的大气辐射信息,但图像包含的信息量并未减少,反而略有提高。可见经过 FLAASH 大气校正可以较好的减小了大气对 ALI 图像的影响。

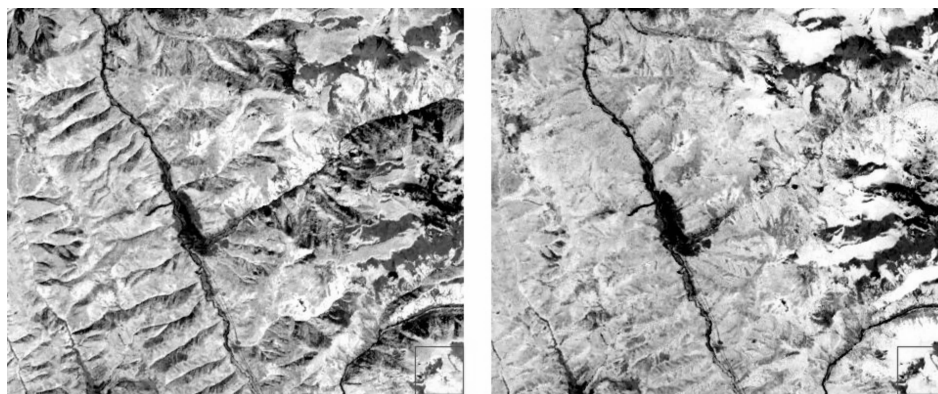


图 4 大气校正前(左图)后(右图)的 NDVI

Figure 4 NDVI before (left) and after atmospheric correction (right)

3 结论与讨论

本研究以 ALI 图像为例,对未知多光谱传感器图像的 FLAASH 大气校正进行了探讨。以标准的光谱曲线为参考,对植被、水体和裸地等 3 种典型地物大气校正前后光谱曲线的分析,表明经过 FLAASH 大气校正后裸地与植被的光谱曲线比校正前易区分,地物的光谱曲线更接近标准的光谱曲线。通过大气

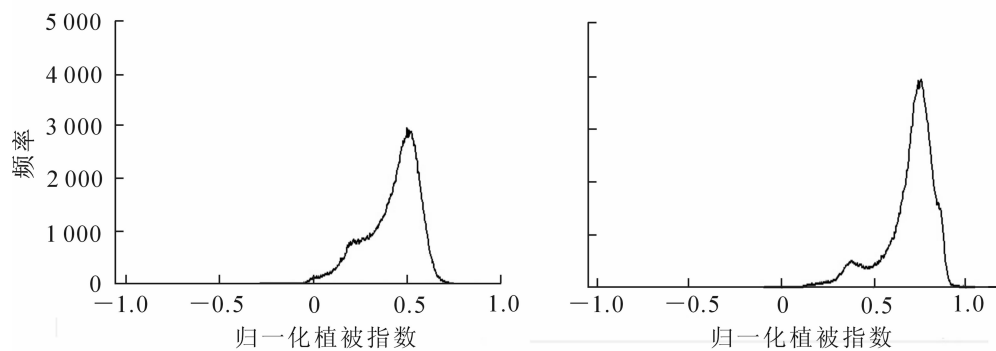


图 5 大气校正前(左图)后(右图)NDVI 直方图

Figure 5 Histogram of NDVI before (left) and after atmospheric correction (right)

校正前后 NDVI 的定性和定量评价,可以看出:FLAASH 大气校正能够有效的减小大气对 ALI 图像的影响,可以用于 ALI 图像的大气校正。通过实验还可以说明 FLAASH 大气校正模块可以用于未知多光谱传感器遥感图像的大气校正,关键在于未知多光谱传感器光谱响应函数的构建。

同时试验中也发现了一些问题,即经 FLAASH 大气校正后 ALI 图像上存在有反射率为负值的像元。据统计负反射率的像元主要出现在可见光波段图像上的山体阴影处,且蓝光波段最多,绿光波段次之,红光波段最少。出现这种现象的原因可能包括 4 个方面:①可能是由于 FLAASH 模块削弱了大气对可见光波段瑞利散射和无选择性散射形成的散射辐射对这部分像元的辐射贡献造成的,可以将其认为是 FLAASH 模块校正的误差,在精度要求不是很高的情况,可以考虑不启用领域校正。②可能是因为这部分像元受地形影响处于阴影区形成辐射强吸收区造成的,可以考虑在大气校正的同时进行地形校正。③可能是由于 FLAASH 模块运行时设置的气溶胶类型、大气参数不能完全模拟图像成像时的实际大气条件造成的;可以考虑用同时间的中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)遥感数据进行大气参数的反演提高校正精度。④可能是由于试验中使用的是每个波段的中心波长所对应的的光谱响应值造成的,可以考虑用各波段的光谱响应函数进行加权平均后再进行 FLAASH 大气校正。针对以上原因造成的像元负反射率问题,笔者所提出的解决方法还有待进一步的验证。

参考文献:

- [1] DEPARTMENT OF INTERIOR, U S. *Sensors-Advanced Land Imager (ALI)* [EB/OL]. 2010-06-16 [2010-11-2]. <http://edcsns17.cr.usgs.gov/eo1/ali.php>.
- [2] 王岩. 遥感定量反演的大气校正方法分析研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2008.
WANG Yan. *Study on The Atmospheric Correction of Remote Sensing* [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2008.
- [3] 郑伟, 曾志远. 遥感图像大气校正方法综述[J]. 遥感信息, 2004(4): 66 - 70.
ZHENG Wei, ZENG Zhiyuan. A review on methods of atmospheric correction for remote sensing images [J]. *Remote Sens Infor*, 2004(4): 66 - 70.
- [4] 范渭亮, 杜华强, 周国模, 等. 大气校正对毛竹林生物量遥感估算的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21 (1): 1 - 8.
FAN Weiliang, DU Huaqiang, ZHOU Guomo, *et al.* Effects of atmospheric calibration on remote sensing estimation of moso bamboo forest biomass [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, 21 (1): 1 - 8.
- [5] SMITH G M, MILTON E J. The use of empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance [J]. *Int J Remote Sens*, 1999, 20: 2653 - 2662.
- [6] 杨航, 张霞, 帅通, 等. OMIS-II 图像大气校正之 FLAASH 法与经验线性法的比较[J]. 测绘通报, 2010(8): 4 - 6, 10.
YANG Hang, ZHANG Xia, SHUAI Tong, *et al.* Comparison of FLAASH and Empirical Line Approach for atmospheric correction of OMIS-II Imagery [J]. *Bull Surv Mapp*, 2010(8): 4 - 6, 10.

- [7] ITT Visual Information Solutions. *Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide* [EB/OL]. 2009 [2010-11-02]. http://www.ittvis.com/portals/0/pdfs/envi/Flaash_Module.pdf.
- [8] 罗彩莲, 陈杰, 乐通潮. 基于 FLAASH 模型的 Landsat ETM+ 卫星影像大气校正[J]. 防护林科技, 2008 (5): 46 - 48, 51.
- LUO Cailian, CHEN Jie, LE Tongchao. Atmospheric correction on Landsat ETM+ satellite image based on FLAASH model [J]. *Prot For Sci Technol*, 2008(5): 46 - 48, 51.
- [9] 郝建亭, 杨武年, 李玉霞, 等. 基于 FLAASH 的多光谱影像大气校正应用研究[J]. 遥感信息, 2008(1): 78 - 81.
- HAO Jianting, YANG Wunian, LI Yuxia, *et al.* Atmospheric correction of multi-spectral imagery ASTER [J]. *Remote Sens Infor*, 2008(1): 7 - 81.
- [10] 罗慧芬, 苗放, 叶成名. 基于 FLAASH 模型的 ASTER 卫星影像大气校正[J]. 安徽农业科学, 2009, **37** (17): 8100 - 8102, 8133.
- LUO Huifen, MIAO Fang, YE Chengming. Atmospheric correction of ASTER satellite image based on FLAASH Model [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2009, **37** (17): 8101 - 8102, 8133.
- [11] MATTHEW M W, ADLER-GOLDEN S M, BERK A, *et al.* *Atmospheric Correction of Spectral Imagery: Evaluation of the FLAASH Algorithm with AVIRIS Data*[EB/OL]. 2003[2010-11-02]. <http://www.spectral.com/pdf/sr192.pdf>.
- [12] 宋晓宇, 王纪华, 刘良云. 基于高光谱影像的大气校正: 用 AVIRIS 数据评价大气纠正模块 FLAASH[J]. 遥感技术与应用, 2005, **20** (4): 393 - 398.
- SONG Xiaoyu, WANG Jihua, LIU Liangyun. Atmospheric correction of hyper-spectral imagery: evaluation of the FLAASH algorithm with AVIRIS data [J]. *Remote Sens Technol Appl*, 2005, **20** (4): 393 - 398.
- [13] 袁国金, 牛峥, 王锡平. 基于 FLAASH 的 Hyperion 高光谱影像大气校正[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, **29** (5): 1181 - 1185.
- YUAN Jinguo, NIU Zheng, WANG Xiping. Atmospheric correction of hyperion hyperspectral image based on FLAASH [J]. *Spectrosc Spectral Anal*, 2009, **29** (5): 1181 - 1185.
- [14] 吴彬, 苗放, 叶成名. 基于 FLAASH 的高光谱遥感数据大气校正应用[J]. 物探化探计算技术, 2010, **32** (4): 442 - 446.
- WU Bin, MIAO Fang, YE Chengming. Atmospheric correction of hyperspectral remote sensing image based on FLAASH [J]. *Comput Technol Geophys Geochem Explor*, 2010, **32** (4): 442 - 446.
- [15] DEPARTMENT OF INTERIOR U S, GEOLOGICAL SURVEY. *Advanced Land Imager(ALI) level 1G (L1G) Product Output Files Data Format Control Book(DFCB)*[MEB/OL]. 2010-06-16[2010-11-02]. <http://edcsns17.cr.usgs.gov/eo1/index.php/documents/ali>.
- [16] CHANDER G, MARKHAM B L, HELDER D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors [J]. *Remote Sens Environ*, 2009, **113** (5): 893 - 903.
- [17] CSIRO. *Spectral Response Functions*[EB/OL]. 2001[2010-11-02]. http://www.eoc.csiro.au/hswwww/oz_pi/specresp.htm.
- [18] DSBIN. 环境小卫星(资源卫星)的大气校正[EB/OL]. 2010-09-30[2010-11-02]. <http://bbs.esrichina-bj.cn/ESRI/thread-77857-1-1.html>.
- [19] 肖钟湧, 江洪, 余树全, 等. 杭州地区大气气溶胶光学特性高光谱研究[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(9): 1894 - 1903.
- XIAO Zhongyong, JIANG Hong, YU Shuquan, *et al.* Monitoring the atmosphere aerosol optical characteristics using hyperspectral remote sensing in Hangzhou Region [J]. *J Environ Sin*, 2008, **28** (9): 1894 - 1903.
- [20] 柴琳娜. 我国典型地物标准波谱数据库[EB/OL]. 2010-10-06[2010-11-02]. <http://wenku.baibu.com/view/7c5423d280ebb294dd88bc42.htm>.