

熊世为, 沈安云, 李卫国, 等. MODTRAN 模型在 HJ/CCD 影像大气校正中的应用[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(2): 319-324.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2016.02.013

MODTRAN 模型在 HJ/CCD 影像大气校正中的应用

熊世为¹, 沈安云¹, 李卫国², 景元书³, 胡姗姗¹, 郁凌华¹

(1.滁州市气象局, 安徽 滁州 239000; 2.江苏省农业科学院农业经济与信息研究所, 江苏 南京 210014; 3.南京信息工程大学应用气象学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 大气校正是定量遥感研究中必不可少的过程。本研究利用 MODTRAN 模型对一景 HJ/CCD 影像进行大气校正, 并从典型地物光谱特征变化、校正结果与 MODIS 地表反射率产品比较及对归一化植被指数(NDVI)的影响 3 方面评价校正效果, 结果显示: MODTRAN 模型较好地消除了可见光波段内的增加效应和近红外波段的吸收作用; 校正结果与高精度的 MODIS 地表反射率产品在植被、居民地、水体 3 类地物的反射率具有较高的一致性, 其中植被类型平均误差为 12.8%; MODTRAN 模型较好地修正了混合像元的 NDVI 值, 校正后各类地物的 NDVI 均有所提升, 其中植被 NDVI 的增幅最大, 有利于区分植被与其他地物类型。表明 MODTRAN 模型对 HJ/CCD 影像具有较好的大气校正效果。

关键词: HJ/CCD; MODTRAN 模型; 大气校正

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2016)02-0319-06

Application of MODTRAN model in atmospheric correction of HJ/CCD data

XIONG Shi-wei¹, SHEN An-yun¹, LI Wei-guo², JING Yuan-shu³, HU Shan-shan¹, YU Ling-hua¹

(1.Chuzhou Meteorological Bureau, Chuzhou 239000, China; 2.Institute of Agricultural Economy and Information, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3.Department of Applied Meteorological Science, Nanjing University of Information and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Atmospheric correction is an indispensable process in quantitative remote sensing research. In this study, MODTRAN model was used for the atmospheric correction of one HJ/CCD image, and the effectiveness of correction was evaluated based on the spectral characteristics of typical ground objects. The results showed that atmospheric correction eliminated the increase effect in visible band and the absorption in near infrared band. The reflectivities of vegetation, water and residents achieved by MODTRAN atmospheric correction were in accordance with those by MODIS surface reflectance product, with the average error being 10%–25%. The NDVI of each kind of ground objects was improved, among which, vegetation NDVI got the biggest increment, which was helpful to differentiate vegetation from other ground objects.

Key words: HJ/CCD; MODTRAN model; atmospheric correction

中国自主研发的环境与灾害监测预报小卫星星

收稿日期: 2015-06-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171336)

作者简介: 熊世为(1987-), 男, 江苏六合人, 硕士研究生, 研究方向为气象灾害遥感监测。(E-mail) allxiong1@sina.com

座 A、B 星(HJ-1A/1B 星)于 2008 年 9 月发射成功, 其兼具 Landsat/TM 数据的高空间分辨率和 MODIS 数据高时间分辨率的双重优势, 波段覆盖从可见光至热红外, 已广泛用于植被^[1]、土壤^[2]、水体^[3]以及大气^[4]等领域的监测与研究。

辐射信号在传输过程中受到大气散射和吸收作用的影响,会导致传感器接收到的结果与地表真实信息产生一定误差。大气对 TM、ETM+等常用遥感数据各波段反射率的影响达 20%~30%^[5]。因此,在定量遥感研究中,为得到更真实的地物光谱信息,对遥感数据进行大气校正处理是必要的。大气校正的方法主要可分为统计和理论模型两大类。统计类方法简单,但需要大量的同步地面实测光谱数据,这一条件较难实现。基于辐射传输理论建立的理论模型类方法物理机制明确,运用较广,但模型所需要的参数也必然很复杂。大气校正研究中常用到的理论模型有 COST 模型^[6]、MODTRAN (Moderate resolution transmission) 模型^[7]和 6S 模型 (Second simulation of satellite signal in the solar spectrum)^[8]等,其中,由美国空军地球物理实验 (Air force geophysics laboratory, AFGL) 开发的用于计算大气透过率的 MODTRAN 模型已被证明具有较高的处理精度^[9]。此外,当遥感数据中包含某些合适波段时,MODTRAN 模型还能进行气溶胶与水汽反演。该模型已经被嵌入常用的遥感数据处理软件 ENVI 的 FLAASH 模块中,操作方便,是目前应用最为广泛的方法之一。大气校正作为遥感数据预处理的重要过程之一,其处理精度直接影响后续的定量研究。本试验采用 MODTRAN 模型对一景 HJ 卫星 CCD 数据进行大气校正,并对校正结果进行评价与分析,为国产 HJ 卫星数据的大气校正处理提供参考。

1 数据与方法

1.1 数据简介与预处理

国产 HJ 卫星 CCD 数据具有四个波段,分别为蓝光波段 (0.43~0.52 μm)、绿光波段 (0.52~0.60 μm)、红光波段 (0.63~0.69 μm) 和近红外波段 (0.76~0.90 μm),空间分辨率为 30 m,这一设置与常用的 Landsat/TM 基本一致。遥感数据来源于中国资源卫星应用中心,原始数据为 DN 值图像,需通过辐射定标过程转化为表观辐射亮度图像,公式为:

$$L = DN/a + l \quad (1)$$

其中 L 为辐射亮度, a 为绝对定标系数增益, l 为偏移量,定标转换之后辐射亮度单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ 。利用 1:100 000 地图进行几何

校正,保证精度在 0.5 个像元以内,并利用行政边界矢量图进行工程区裁剪,研究区为江苏省宿迁市。

1.2 算法原理

MODTRAN 模型认为地面是一个朗伯面 (当入射角度一定时,任何角度获取的漫反射辐射能量都是一个固定值,该反射面就是朗伯面),根据辐射传输理论,若不考虑像元的邻近效应,则此时大气层外的遥感传感器接收到的辐射亮度为^[10]:

$$L_m = L_0 + (r_s \cdot T \cdot F_d) / [\pi(1-s \cdot \rho)] \quad (2)$$

式中 L_m 为大气层外的遥感传感器接收到的像元表观辐射亮度; L_0 为大气程辐射,即太阳辐射经大气散射未达到地表而直接返回被传感器接受到的辐射亮度; r_s 是像元对应的地表反射率; T 表示地表与传感器之间的大气透过率; F_d 为地表接收到的总辐射通量密度,包括太阳直射和大气散射两部分; s 为大气层的球面反照率。

MODTRAN 模型首先在给定的大气参数条件下假设 3 个地表反射率 r_s 的值 (如 $r_s = 0, 0.2, 1.0$),运行模型 3 次,就会得到 3 个给定大气参数条件下的 3 个地表反射率对应的表观辐射亮度值 L_m ,再将 3 组地表反射率 r_s 与表观辐射亮度 L_m 回代入式 (1) 中,可以建立一个关于 L_0 、 s 和 $T \cdot F_d / \pi$ 的三元一次方程组,求解方程组,得出一组与该大气参数对应的 L_0 、 s 以及 $T \cdot F_d / \pi$ 值。这样,当大气参数、地表反射率 r_s 和表观辐射亮度 L_m 这 3 个量任意给出其中 2 个时,就可以求解出第 3 个量^[11]。

1.3 模型输入参数

本试验选取一景 2012 年 6 月 12 日成像的 HJ-1B CCD2 影像,以宿迁市作为研究区域,首先对原始影像进行几何校正,根据头文件中给出的定标系数进行辐射定标,得到辐射亮度影像,再采用 ENVI 4.7 软件中的 FLAASH 模块 (基于 MODTRAN 4 模型) 进行大气校正。由于 FLAASH 模块不识别 CCD 传感器,因此需要输入相应的光谱响应函数。本研究采用的 HJ-1B/CCD2 影像光谱响应函数由中国资源卫星应用中心提供 (图 1),其他模块主要输入参数见表 1。

其中,影像中心经纬度、成像日期、时间等参数可由影像头文件获取;大气模式由成像时间、中心经纬度来确定。FLAASH 模块中有如下几种标准大气模式:亚极地冬季模式 (Sub_arctic winter, SAW)、亚极地夏季模式 (Sub_arctic summer, SAS)、中纬度冬季

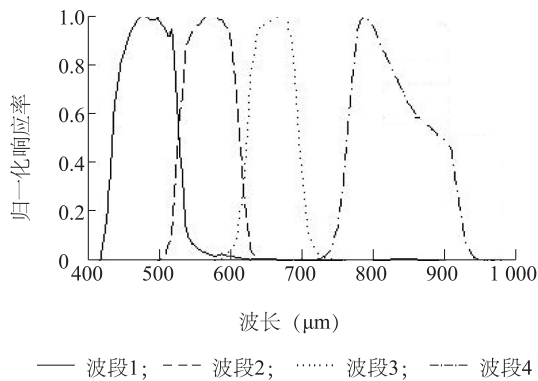


图1 HJ-1B/CCD2 传感器各波段光谱响应曲线

Fig.1 Spectral response curve of each wave band of HJ-1B/CCD2

表1 FLAASH 模块主要输入参数

Table 1 Main input parameters of FLAASH module

参 数	数 值
中心经纬度	北纬 33.026°, 东经 119.085°
传感器高度 (km)	650.00
平均海拔 (km)	0.01
像元大小 (m)	30
成像日期	2012 年 6 月 12 日
成像时间	世界时间 (UTC) 02:24:09/ 北京时间 10:24:09
大气模式	中纬度夏季模式
气溶胶模式	乡村模式
水平能见度 (km)	40.00

模式 (Mid_latitude winter, MLW)、中纬度夏季模式 (Mid_latitude summer, MLS)、热带模式 (Tropical, T), 表 2 给出了成像时间和纬度对应的大气模式。此外, FLAASH 模块还提供 4 种标准 MODTRAN 气溶胶模型: Rural (乡村)、Urban (城市)、Maritime (海洋) 和 Tropospheric (对流层), 本研究选择的大气模式为 Rural (乡村) 模式。由于不具备相关条件, 只能通过水平能见度进行气溶胶去除^[5], 本研究对应的天气状况为晴朗, 各天气状况下能见度的参考范围为: 晴朗, 40.00~100.00 km; 中等雾、阴霾, 20.00~30.00 km; 厚雾、阴霾, 小于 15.00 km, 所以确定水平能见度为 40.00 km。

表2 大气模式查找表

Table 2 Search table of air mode

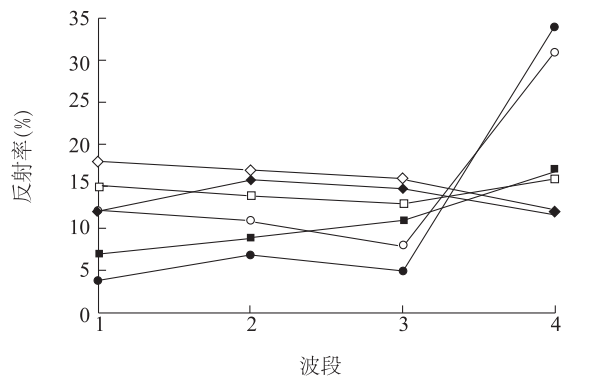
纬度 (°N)	月 份					
	1	3	5	7	9	11
80	SAW	SAW	SAW	MLW	MLW	SAW
70	SAW	SAW	MLW	MLW	MLW	SAW
60	MLW	MLW	MLW	SAS	SAS	MLW
50	MLW	MLW	SAS	SAS	SAS	SAS
40	SAS	SAS	SAS	MLS	MLS	SAS
30	MLS	MLS	MLS	T	T	MLS
20	T	T	T	T	T	T
10	T	T	T	T	T	T
0	T	T	T	T	T	T

SAW: 亚极地冬季模式; SAS: 亚极地夏季模式; MLW: 中纬度冬季模式; MLS: 中纬度夏季模式; T: 热带模式。

2 结果与分析

2.1 校正前后典型地物光谱特征变化

大气对辐射能量的影响主要体现在 2 个方面: 一是吸收作用, 大气会吸收一部分到达地物以及从地物反射至传感器的能量; 二是大气本身的反射与散射作用, 使得一部分辐射能量还未到达地表就返回被传感器所接收, 这部分能量不包含地物信息, 即所谓程辐射。为评价大气校正效果, 本试验在植被、水体和居民地 3 类地物中各随机选取 10 个点, 以 10 个点的平均值代表该类地物的光谱特征, 分析校正前后植被、水体和居民地 3 种地物光谱特征的变化 (图 2)。



—●— 植被(校正后); —○— 植被(校正前); —◆— 水体(校正后);
—◇— 水体(校正前); —■— 居民地(校正后); —□— 居民地(校正前)

图2 大气校正前后 3 种地物光谱特征

Fig.2 Spectral characteristics of three kinds of ground objects before and after atmospheric correction

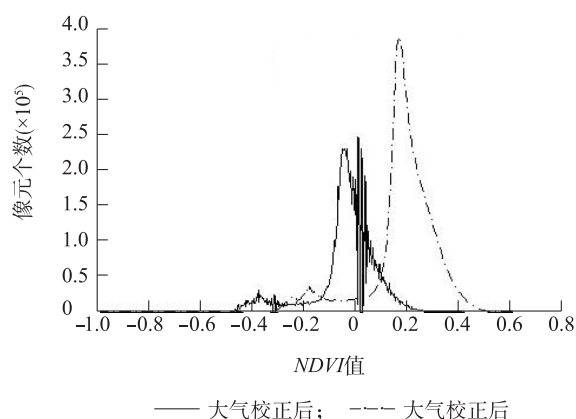


图3 大气校正前后 NDVI 变化

Fig.3 NDVI changes before and after atmospheric correction

趋势一致,说明经大气校正后各个像元的 $NDVI$ 值均有所增大。校正前 $NDVI$ 的变化范围主要为 $-0.45 \sim 0.25$, 变化跨度为 0.70, 而校正后的 $NDVI$ 主要为 $-0.35 \sim 0.55$, 跨度为 0.90。

依然对影像中植被、居民地和水体 3 类地物中各随机选取 10 个点, 获取大气校正前后各类地物的 $NDVI$ 平均值(表 4)。可以看出, 大气校正后 3 类地物的 $NDVI$ 均有一定幅度升高, 其中植被类型地物 $NDVI$ 涨幅达 0.25, 高于居民地 (0.12) 和水体 (0.08), 说明大气校正使得植被与其他地物之间 $NDVI$ 差异更大, 有利于将植被信息与其他地物类型区分开来。

表 4 3 类地物大气校正前后 $NDVI$ 变化

Table 4 NDVI changes of three kinds of ground objects before and after atmospheric correction

指标	植被	居民地	水体
校正前 $NDVI$	0.19	0.09	-0.31
校正后 $NDVI$	0.44	0.21	-0.23

3 讨论

大气校正是遥感数据预处理的重要环节, 是后续研究的基础, 本研究采用 MODTRAN 模型对一景 HJ-1B/CCD2 数据进行大气校正, 并从典型地物光谱特征变化、与 MODIS 地表反射率产品比较及对 $NDVI$ 的影响三方面评价校正效果, 主要结论如下:

①分析校正前后植被、居民地和水体 3 种典型地物光谱变化特征, 结果表明对 HJ 星 CCD 数据大

气校正可以较好地消除由瑞利散射造成的可见光波段内的增加效应和水汽在近红外波段的吸收作用。

②用高精度的 MODIS 地表反射率产品 (MOD09GA 产品) 与本研究经过大气校正的 CCD 数据进行对比, 结果表明二者在植被、居民地、水体 3 类地物的反射率上具有较高的一致性, 与植被各波段平均误差为 12.8%。

③比较校正前后 $NDVI$ 的变化特征, 发现大气校正较好地修正了光谱信息在大气传输过程中的混合效应, 使其趋于合理。各类地物的 $NDVI$ 均有所提升, 而植被 $NDVI$ 的涨幅最大, 有利于区分植被与其他地物类型。

CCD 传感器没有短波红外波段, 只能采用水平能见度来去除气溶胶的影响, 在无法获取实测水平能见度的情况下, 本研究根据各天气状况对应的能见度参考范围确定。实际上, NASA 在全世界都有测定大气光学厚度 (Atmospheric optical depth, AOD) 的站点, 通过 AOD 转化为消光系数, 再进一步计算可得到水平能见度, 但该方法过于复杂, 本研究没有予以采用。本研究的大气校正结果与 MODIS 地表反射率产品平均误差达到了 10% ~ 20% 的较高水平^[15], 但没有进行多方法对比, 且只选取一景影像进行研究, 代表性不足, 后续研究需进行多方法、多角度分析, 以获取更为科学合理的结果。

参考文献:

- [1] 李卫国, 王纪华, 李存军, 等. 冬小麦花期生理形态指标与卫星遥感光谱特征的相关性分析[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(1): 79-82.
- [2] 冯海霞, 秦其明, 蒋洪波, 等. 基于 HJ-1A/1B CCD 数据的干旱监测[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增1): 358-365.
- [3] 李卫国. 作物旱涝灾情遥感监测进展与思考[J]. 江苏农业学报, 2013, 29(6): 1503-1506.
- [4] 王中挺, 厉青, 王桥, 等. 利用深蓝算法从 HJ-1 数据反演陆地气溶胶[J]. 遥感学报, 2012, 16(3): 596-610.
- [5] 姚薇, 李志军, 姚珙, 等. Landsat 卫星遥感影像的大气校正方法研究[J]. 大气科学学报, 2011, 34(2): 251-256.
- [6] 赵少华, 秦其明, 张峰, 等. 基于环境减灾小卫星 (HJ-1B) 的地表温度单窗反演研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(6): 1152-1156.
- [7] 樊辉. 基于 Landsat TM 的城市热岛效应与地表特征参数稳健关系模型[J]. 国土资源遥感, 2008(3): 45-51.
- [8] 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[J]. 北京大学学报: 自然科学学报, 2004, 40(7): 611-618.

- [9] 杨校军,陈雨时,张 晔. FLAASH 模型输入参数对校正结果的影响[J]. 遥感应用, 2008 (6): 32-37.
- [10] LIANG S L, FALLAH H, KALLURI S, et al. An operational atmospheric correction algorithm for landsat thematic mapper imagery over the land[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102 (D14): 17173-17186.
- [11] LIANG S L, FANG H L, CHEN M Z. Atmospheric correction of Landsat ETM+ land surface 1 imagery—Part I: methods[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(11): 2490-2498.
- [12] PRIVETTE J L, MYNENI R B, KNYAZIKHIN Y, et al. Early spatial and temporal validation of MODIS LAI product in the southern Africa Kalahari[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83: 232-243.
- [13] 程 乾. 基于 MOD09 产品的水稻叶面积指数和叶绿素含量的遥感估算模型[J]. 应用生态学报, 2006, 17(8): 1453-1458.
- [14] 李民赞. 光谱分析技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [15] 郑 盛,赵 祥,张 颢,等. HJ_1 卫星 CCD 数据的大气校正及其效果分析[J]. 遥感学报, 2011, 15(4): 709-721.
- [16] 姚 薇,李志军,姚 珙,等. Landsat 卫星遥感影像的大气校正方法研究[J]. 大气科学学报, 2011, 34(2): 251-256.

(责任编辑:袁 伟)