

基于 6S 模型的遥感数据大气校正应用研究

买买提依明·买买提^{1,2}, 塔西甫拉提·特依拜^{1,2}, 买买提沙吾提^{1,2}, 建丽^{1,2}

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

摘要: 基于辐射传输理论的大气校正模型, 具有明确的物理意义, 易于操作, 应用广泛。该文首先对 Landsat 5 TM 图像大气校正参数的确定进行了详尽分析并采用 6S 模型对图像进行了大气校正, 然后从光谱响应曲线、归一化植被指数(NDVI)等方面, 探讨了大气校正对 TM 图像地物光谱响应特征的影响。研究表明, TM 图像经大气校正后, 地物在可见光、近红外和短波红外波段反射率明显减小; 大气校正后的 NDVI 增幅明显; 采用的参数确定方法可为类似研究提供参考与借鉴。

关键词: 6S 模型; 大气校正; 光谱响应特征; 归一化植被指数(NDVI)

中图分类号: T P79; P 422

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)03-0015-04

Study on Atmospheric Correction of Remote Sensing Data Application Based on 6S Model

Muhammaddin · Muhammad^{1,2}, Tashpolat · Tiyip^{1,2}, Mamatsawut^{1,2}, DING Jiarli^{1,2}

(1. College of Resources and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Key Laboratory of Oasis Ecology Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: Based on the radiative transfer model, atmospheric correction model has specific physical meaning, and it can be applied widely and easily. In this study, firstly the parameter determination on Landsat-5 TM image is analyzed carefully, and the atmospheric correction of the image is carried out with 6S model. Then, influence of atmospheric correction on typical object spectral response characteristics of TM image is discussed on the spectral response curves, the normalized difference vegetation index (NDVI) and visibility, respectively. The results show that: surface reflectance of typical objects decreases evidently after atmospheric correction in visible band, but in near infrared band and shortwave infrared band surface reflectance increases. NDVI of typical objects increases after atmospheric correction. Finally, methods of the parameter determination here can be used as the reference in similar studies.

Key words: 6S model; atmospheric correction; spectral response characteristics; normalized difference vegetation index (NDVI)

遥感信息定量化研究也大大推动了大气影响纠正方法的发展^[1]。在此背景下, 许多学者致力于这方面的研究^[2-5], 提出了不少大气校正模型, 大致可以归纳为: 基于图像特征模型、地面线性回归经验模型、大气辐射传输理论模型 3 种^[6]。目前, 基于辐射传输理论的大气校正模型有很多, 常用的有 6S (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum) 即太阳光谱卫星信号的二次模拟、LOWTRAN (低谱

分辨率大气透过率计算程序)、MODTRAN (中谱分辨率大气透过率计算程序) 等。其中, 6S 模型适用于可见光-近红外(250~4 000 nm)的多角度数据, 能够模拟遥感数据在太阳-目标-传感器的传输过程中所受到的不同情况下的大气影响^[7-8]。近年来, 6S 大气校正模型的应用非常广泛, 如海洋水色遥感中瑞利反射率查找表的建立^[9], 森林植被指数的估算^[10], SPOT 数据的定标和地物的光谱反射率反演^[11]等。

收稿日期: 2010-11-13

修回日期: 2010-12-20

资助项目: 国家自然科学基金“干旱区土壤盐渍化微波遥感监测方法与验证”(40961025); 国家自然科学基金“干旱区土壤盐渍化多源遥感监测与预警网络传输系统研究”(40901163)

作者简介: 买买提依明·买买提(1985-), 男(维吾尔族), 新疆人, 硕士, 研究方向为干旱区资源环境及遥感应用研究。E-mail: mamatemenrs@sina.com

通信作者: 塔西甫拉提·特依拜(1958-), 男(维吾尔族), 新疆人, 教授, 博士, 主要研究方向为干旱区资源遥感与 3S 技术应用。E-mail: tash@xju.edu.cn

但是,这一模型是建立在标准大气、气溶胶模式和一系列参数假设基础上的,地面情况是复杂多变的,不可能用少数几种标准模式来解释具体研究区的大气状况。因此,在大气校正处理过程中,特别是缺乏实测大气资料或大气参数难以直接获取时,有必要对大气、能见度等参数进行合理估计,以提取地物真实光谱信息。本文对这些参数的确定进行详细分析,并从光谱响应曲线、归一化植被指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 等方面,分析大气校正处理对 Landsat-5 TM 图像典型地物光谱响应特征的影响。

1 大气顶部反射率计算

6S 模型建立在辐射传输理论基础之上,模型应用范围广,不受研究区特点及目标类型等的影响。实现辐射订正后,采用公式(1)把图像灰度值转换成具有辐射意义的亮度值^[12]。

$$L_{\lambda} = \text{gain} \times \text{DN} + \text{offset} = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{\text{DN}_{\max} - \text{DN}_{\min}} \times (\text{DN} - \text{DN}_{\min}) + L_{\min} \quad (1)$$

式中: L_{λ} ——某个波段光谱辐射亮度 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})]$; offset, gain——图像头文件提供的偏差参数 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})]$; DN——经辐射订正的图像灰度值; DN_{\max} , DN_{\min} ——传感器最大和最小灰度值, DN_{\max} 为像元可以取的最大值为 255, 对于 Landsat-5 卫星影像, $\text{DN}_{\min} = 0$; L_{\max} , L_{\min} ——最大和最小灰度值所相应的辐射亮度 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})]$ 。因此,上式可以简化为

$$L_{\lambda} = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{255} \times \text{DN} + L_{\min} \quad (2)$$

利用公式(3)可以计算地物在大气外的顶部光谱反射率:

$$\rho_{\text{toa}} = \frac{\pi \cdot L \cdot D^2}{E_{\lambda} \cdot \cos(\theta_s)} \quad (3)$$

式中: D ——日地天文单位距离; E_{λ} ——波段 λ 处的平均大气外太阳辐照度; θ_s ——太阳天顶角,即太阳高度角的余角。

2 6S 模型基本原理

6S 大气校正模型对于不同情况下(不同的传感器,不同的地面状况)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描述。它将大气分子散射与气溶胶散射及其相互作用一并予以考虑,采用连续散射方法(Successive Orders of Scattering 即 SOS 是用来求解辐射传输方程众多方法中最常用的一种)求解辐射传输方程;在处理不均

一目标时,考虑了 r 半径之内的目标物反射和该范围之外的背景反射。同时,还考虑了地表双向反射分布函数(BRDF)与大气辐射的耦合作用。假定反射率是 ρ 的目标物为均一朗伯面,传感器所接收到的大气顶部反射率为^[7,12]:

$$\rho_{\text{toa}}(\theta_s, \theta_v, \varphi_v) = \rho_a(\theta_s, \theta_v, \varphi_v) + \frac{\rho}{1 - \rho_S} T(\theta_s) T(\theta_v) \quad (4)$$

式中: $\rho_a(\theta_s, \theta_v, \varphi_v)$ ——瑞利散射和气溶胶散射引起的程辐射; S ——大气底层向下的球面反射率; $\theta_s, \theta_v, \varphi_v$ ——分别为太阳天顶角、观测天顶角和方位角; $T(\theta_s) = e^{-\tau_{\text{u}_s}} + t_d(\theta_s)$ ——下行辐射总透射率; $T(\theta_v) = e^{-\tau_{\text{u}_v}} + t_d(\theta_v)$ ——上行辐射总透射率; $t_d(\theta)$ ——下行散射辐射(也称交叉辐射)透射率因子; $t_d(\theta_v)$ ——代表上行交叉辐射透射率因子; $e^{-\tau_{\text{u}_u}}$ 、 $e^{-\tau_{\text{u}_s}}$ ——下行直射辐射和直接透射到传感器上行辐射; $\mu_s = \cos(\theta_s)$, $\mu_v = \cos(\theta_v)$ ——太阳和卫星天顶角的余弦值; τ ——大气光学厚度。

但是大多数情况下,地面不是均一的朗伯面。因此,6S 模型通过对目标与背景间临近效应的校正,考虑了环境反射问题。对于反射率为 ρ 的非均一目标,传感器所接收到的大气顶部反射率为:

$$\rho_{\text{toa}}(\theta_s, \theta_v, \varphi_v) = t_g(\theta_s, \theta_v) \{ \rho_a(\theta_s, \theta_v, \varphi_v) + \frac{T(\theta_s)}{1 - \langle \rho \rangle_S} [\rho e^{-\tau_{\text{u}_v}} + \langle \rho \rangle t_d(\theta_v)] \} \quad (5)$$

式中: $t_g(\theta_s, \theta_v)$ ——大气中 O_3 、 H_2O 等气体对可见光、近红外波段的吸收率; $\langle \rho \rangle$ ——平均环境反射率,可由大气点扩散函数求得; $\rho_a(\theta_s, \theta_v, \varphi_v)$ 、 $t_d(\theta_s)$ 、 $t_d(\theta_v)$ 、 $e^{-\tau_{\text{u}_u}}$ 、 $e^{-\tau_{\text{u}_s}}$ 、 S 和 $t_g(\theta_s, \theta_v)$ 这几个参数与具体的每个像元无关,只与大气条件有关。可由 6S 模型通过一系列的条件假设,计算出以上参数。

3 地表反射率的反演

研究区为渭干河-库车河三角洲绿洲(简称渭-库绿洲)位于天山南麓,塔里木盆地的北部,范围包括库车县、新和县、沙雅县三个县,是一个典型而完整的扇形平原绿洲。所使用的遥感数据为 2009 年 5 月 27 日的 Landsat-5 TM 图像 1-5、7 波段,轨道号为 145/31。数据质量好,无云覆盖。出于实际研究的需要,在对图像作了辐射校正和几何精校正之后,从中确定并截取覆盖实验区的子影像并进行地表反射率的反演。

经过辐射校正后,像元灰度值转换为了反射率,现在利用 6S 模型对 TM 图像的 6 个波段分别进行地表反射率的反演,进行大气校正。在 6S 模型中需

要以下具体参数, 传感器类型: Landsat-5; 传感器角度参数: 太阳天顶角 62.50° , 太阳方位角 131.35° , 观测天顶角 0° , 观测方位角 0° ; 气候参数: 可视距离 25 000 m, 天气状况晴朗; 经纬度: E82.91°N41.40°; 目标海拔高度 1 125 m; 图像成像年月: 2009 年 5 月 27 日。

研究区为中纬度夏天, 大陆性气溶胶类型, 地表为非均匀朗伯面。以上参数包括成像日期、目标物半径和目标反射率等输入到 6S 模型, 对 TM 图像 5 波

段进行大气校正, 6S 模型输出的是经过大气校正的反射辐射亮度值(L_{λ})。校正时, 首先模拟计算大气校正参数 x_a , x_b 和 x_c 大气光学厚度和其他辐射条件选择标准默认值, 然后用公式 (6) 计算校正后的反射率。

$$\rho = y / (1 + x_c \cdot y)$$
$$y = x_a \cdot L_i - x_b \tag{6}$$

式中: ρ ——校正后反射率; L_i ——第 i 波段辐射率, 具体结果见表 1。

表 1 基于 6S 模型的大气校正结果

波段	大气校正参数			程辐射/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$)	总透射 散射	总反射率
	x_a	x_b	x_c			
B1	0.00250	0.09661	0.15888	38.132	0.85805	0.07163
B2	0.00260	0.05624	0.11396	20.217	0.92262	0.04298
B3	0.00285	0.03375	0.08584	11.188	0.95681	0.02759
B4	0.00408	0.01688	0.05491	3.976	0.98186	0.01429
B5	0.01927	0.00352	0.01677	0.170	0.99879	0.00306
B7	0.05140	0.00152	0.00893	0.027	0.99961	0.00133

说明: 条件为中纬度大陆性气候, 可见度 25 km, 假设研究区新疆维吾尔自治区渭-库绿洲地表为非均匀朗伯面。

4 结果分析

4.1 大气校正对地物光谱响应特征的影响

本次依据研究区土地利用图, 分别对农田、盐渍地、裸土、水体等地物进行采样, 绘制出原始图像、大气顶部反射率图像和地表真实反射率图像的地物光谱响应曲线。由图 1 可知, 仅从地物光谱响应曲线的形态上看, 原始图像中各地物在蓝光波段(B1)的光谱响应值都比较高。与大气顶部反射率图像比较, 地表反射率图像中地物在可见光波段(B1、B2、B3)反射率减小, 其中蓝光波(B1)段最为明显, 绿光(B2)次之, 主

要原因是由于大气散射和吸收引起的大气衰减造成的。对可见光波段而言, 在大气窗口内的辐射失真主要是瑞利散射和气溶胶散射引起, 随着波长的增大, 逐渐减弱。其中对蓝光波段的瑞利散射最强。这些散射常使可见光波段的亮度值增加, 受大气分子吸收的影响较小, 其吸收的能量仅占衰减能量的 3%; 但对更长的波段(B4、B5、B7), 大气的主要影响是吸收, 因此大气吸收是降低近红外和中红外波段(B4、B5、B7)像元亮度值的主要影响因素。因此, 可见光波段经过辐射校正后, 可见光波段反射辐射下降, 并且蓝光波段反射率减少最为明显。

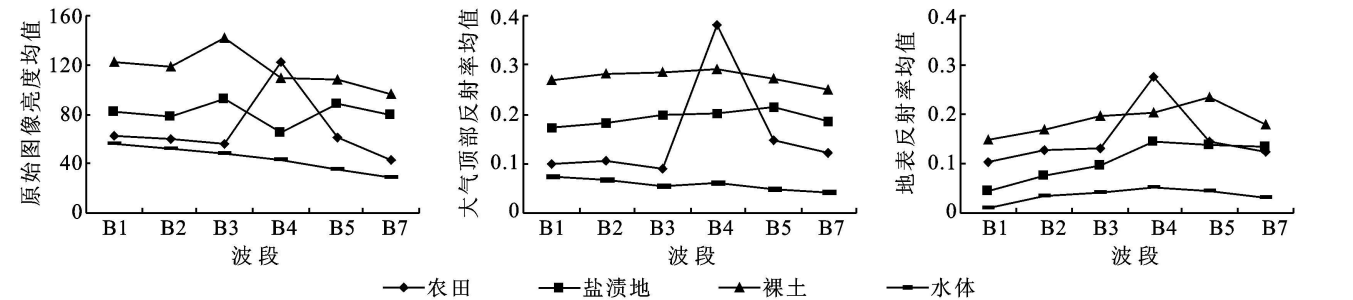


图 1 不同图像地物光谱响应曲线

在近红外(B4)波段大气散射作用较小, 大气的程辐射主要是水汽和 O_3 吸收作用产生^[7], 理论上经过辐射校正后 TM 在近红外和短波红外(B4、B5、B7)波段反射率应该上升, 但是实际校正的结果与期望的校正结果恰恰相反。原因是 Landsat TM 近红外和短波红外波段设置已经使大气吸收的影响最小化; 因此, 对单时相 Landsat TM 数据进行大气校正, 其效果仅是对每个波段分别简单地调整偏差, 使每个波段的最

小值和最大值减小, 由单时相影像提取的各个训练类型的均值会变化, 但训练类的方差-协方差矩阵保持不变。由于实验区属于暖温带荒漠气候区, 是典型的大陆性气候, 降水量极少, 多年平均降水量 51.6 mm, 多年平均蒸发量 2 123.7 mm, 蒸降比 40:1。针对实验区大气状况, 认为水汽对辐射传输的干扰远远小于灰尘和分子散射。因而校正后的近红外和短波红外(B4、B5、B7)辐射衰减。

4.2 大气校正对 NDVI 的影响

在植被遥感中, NDVI 的应用最为广泛^[6, 13]。因此利用遥感数据进行定量分析时, 在植被指数的提取、应用研究中, 需要考虑大气效应对 NDVI 的影响。为说明大气校正对 TM 图像的影响, 对校正前后各类地物的 NDVI 进行比较。

TM 图像大气校正及其对地物光谱响应特征的影响分析从图 2 中可以看出, 由大气顶部反射率图像计算出的 NDVI 比原始图像 NDVI 大, 但增加的幅度并不是很明显; 大气校正后, 地表反射率图像计算出的 NDVI 增大明显。农田是所有地物中 NDVI 增幅最大的, 表明大气效应对农地 NDVI 的影响强烈。因此, 消除大气影响后的 NDVI, 在植被遥感的定量研究、植被覆盖区域的提取及林地光谱响应特征分析等方面具有优势。

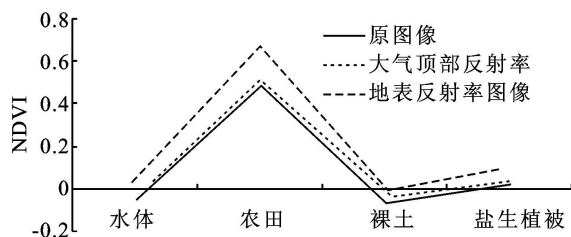


图 2 辐射校正对 NDVI 的影响

5 结论

本研究在对基于 6S 模型的 TM 图像大气校正参数的确定进行了详尽分析的基础上, 对 TM 图像做大气校正处理; 然后从光谱响应曲线、NDVI 等方面, 探讨了大气校正 TM 图像地物光谱响应特征的影响。通过上述分析, 可以得出, 与大气顶层反射率图像相比, 经大气校正后, 地物在可见光、近红外和短波红外波段的地表反射率明显减小。消除大气效应, 有助于地物真实光谱信息的提取及地物识别研究。大气校正后, NDVI 增幅明显。在植被指数的提取、应用研究中, 需要考虑大气效应对 NDVI 的影响。本文的需要改进之处在于: 没有地面同步实测光谱数据, 无法对 TM 图像反射率反演误差进行定量估计, 可以在以后的工作中进行进一步完善。

参考文献:

- [1] 顾行发, 田国良, 李小文, 等. 遥感信息的定量化[J]. 中国科学: E 辑, 2005, 35(增刊 1): 1-10.
- [2] Kaufman Y, Sendra C. Algorithm for automatic atmospheric correction to visible and near infrared satellite imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 1988, 30: 231-248.
- [3] Liang S, Fang H, Chen M. Atmospheric correction of Landsat ETM+ land surface imagery: part I. methods[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(11): 2490-2498.
- [4] Cairns B, Carlson B, Ying R, et al. Atmospheric correction and its application to an analysis of hyperion data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(6): 1232-1245.
- [5] Chen X, Vierling L, Deering D. A simple and effective radiometric correction method to improve landscape change detection across sensor and across time[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 98: 63-79.
- [6] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 20-30.
- [7] Vermote E F, Tanre D, Deuze J L, et al. The Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S) User's Guide[C]. France: Laboratoire d'Optique Atmospherique, 1997.
- [8] 徐希孺. 遥感物理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005: 316-318.
- [9] 孙凌, 张杰, 郭茂华. 针对 HY-1A CCD 数据处理的瑞利查找表[J]. 遥感学报, 2006, 10(3): 306-311.
- [10] 陈新芳, 陈镜明, 安树青, 等. 不同大气校正方法对森林叶面积指数遥感估算影响的比较[J]. 生态学杂志, 2006, 25(7): 769-773.
- [11] 田庆久, 郑兰芬, 董庆禧. SPOT 地面场定标与星上定标结果的比较分析[J]. 遥感学报, 1998, 2(1): 13-18.
- [12] NASA. Landsat 7 Science Data Users Handbook[C]. Landsat Project Science Office, 2008, 10(21) <http://ltpwww.gsfc.nasa.gov>, 2010-04-22.
- [13] 骆知萌, 田庆久, 惠凤鸣. 用遥感技术计算森林叶面积指数: 以江西兴国县为例[J]. 南京大学学报: 自然科学, 2005, 41(3): 253-258.