

姚薇,李志军,姚琪,等. 2011. Landsat 卫星遥感影像的大气校正方法研究[J]. 大气科学学报, 34(2): 251-256.

Yao Wei, Li Zhi-jun, Yao Gong, et al. 2011. Atmospheric correction model for Landsat images[J]. Trans Atmos Sci, 34(2): 251-256.

Landsat 卫星遥感影像的大气校正方法研究

姚薇^{1,2}, 李志军³, 姚琪³, 吴金凤³, 江栋梁³

(1. 南京大学 大气科学学院, 江苏 南京 210093; 2. 江苏省气象台, 江苏 南京 210008; 3. 江苏省靖江市气象局, 江苏 靖江 214500)

摘要:介绍了一种对 Landsat 卫星遥感影像逐像元进行大气校正模型,该模型基于 MODTRAN 大气辐射传输模型计算建立的查找表(look up table, LUT),并结合暗元目标法(dark object method, DOM),利用遥感影像自身的信息对遥感影像进行大气校正。以 Landsat ETM+ 遥感影像为例,介绍了算法流程,同时给出了大气校正前后的对比结果。结果表明,利用该模型进行的影像逐像元的大气校正,能够有效地降低大气中的大气分子、水汽、臭氧、气溶胶粒子等对卫星遥感影像造成的影响,获得更加精确的地物真实反射率,有利于遥感信息的进一步定量提取和专题解译。

关键词:大气校正; Landsat; 大气辐射传输模型; 查找表

中图分类号: P751 文献标识码: A 文章编号: 1674-7097(2011)02-0251-06

Atmospheric correction model for Landsat images

YAO Wei^{1,2}, LI Zhi-jun³, YAO Gong³, WU Jin-feng³, JIANG Dong-liang³

(1. College of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008, China;

3. Jingjiang Meteorological Bureau, Jingjiang 214500, China)

Abstract: A new atmospheric correction algorithm based on dark object method and the look up table developed from MODTRAN model was introduced for Landsat images in the paper. The information of the satellite remote sensing images was used to support the atmospheric correction. The algorithm was applied to the Landsat ETM+ imagery and comparisons show that the influence on Landsat imagery caused by molecules, water vapor, ozone, and aerosol particles in the atmosphere was effectively reduced after the correction. The surface reflectivity was more precisely, which is beneficial for remote sensing information extraction and thematic interpretation.

Key words: atmospheric correction; Landsat; atmosphere radiation transfer model; look up table

0 引言

近年来,定量遥感技术迅速发展,特别是利用多传感器、多时相遥感数据进行监测和分析资源、环境以及气候变化等的需要,使得遥感数据的定标、大气辐射校正和地表物理量反演方法的研究越来越受到重视。在卫星遥感成像过程中,由于大气散射和吸收的影响,改变了传感器接收到的地表反射辐射能量,极大地影响着遥感信息的提取和参数反演的精

度。遥感影像的大气校正已成为定量遥感不可避免的问题。

目前,遥感影像的大气校正方法有很多,不变目标法(Michener and Houhoulis, 1997),直方图匹配法(Richter, 1996a, 1996b),暗元目标法(Kaufman et al., 2000; Liang et al., 2002),以及广泛应用的辐射传输模型法,如 LOWTRAN(Isaacs et al., 1987)、MODTRAN(Berk et al., 1998)、6S(Vermote et al., 1997)等,其共同点是根据地理位置、季节等将全球

收稿日期: 2009-01-25; 改回日期: 2009-08-10

基金项目: 江苏省气象局青年开放基金项目(Q201005); 山东省气象局科研课题计划项目(2008sdqx09)

作者简介: 姚薇(1987—), 女, 江苏靖江人, 硕士, 研究方向为应用气象, jsjxyz@163.com.

气溶胶划分为若干类型,每种类型是对大量观测数据统计分析得到的,旨在模拟传感器过境时的大气状况,在进行大气纠正时,假定大气气溶胶参数已知,通过查找表获得所需大气类型的参数。Landsat 卫星影像被广泛应用于地表覆被类型的区分(权维俊等,2007;郑有飞等,2008)、热岛效应的研究(肖荣波等,2007;郑秋萍等,2009)等方面。刘朝顺等(2008)、张杰等(2004)分别基于 6S 模式对 Landsat ETM+ 和 MODIS 的可见光到中红外波段的反射率进行大气订正,并分析了校正前后反射率的差异。

在诸多的大气校正方法中,基于大气辐射传输模型的校正精度较高。但这种方法计算量大,而且需要实时的卫星过境时刻的大气廓线参数,对已有的历史数据无能为力,因而限制了这种方法的推广使用。由于遥感影像所记录的辐射信号中包含了大气的各种信息,从影像中获取这些信息,结合大气辐射传输模型,就可以获得真实的地表反射率。因此这种基于图像自身反演大气参数必将成为研究重点之一。

本文采用目前广泛应用、且精度较高 MODTRAN 大气辐射传输模型计算建立的查找表方法,结合暗元目标法,基于遥感影像自身的信息对遥感影像进行大气校正,并以 Landsat ETM+ 遥感影像为例,介绍了算法流程,同时给出了遥感影像大气校正前后的对比结果。

1 研究方法

图 1 给出了大气综合效应的示意。图 1 中显示了太阳辐射和大气、地面相互作用后到达传感器的辐射传输过程。

在给定的大气和地表条件下,卫星传感器接收到的辐射由 3 个部分组成,如图 1 所示。

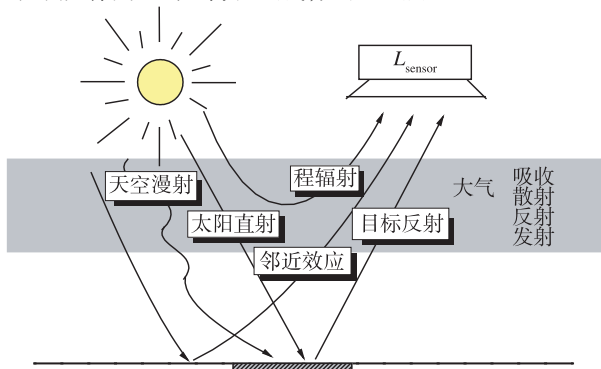


图 1 太阳辐射与大气的相互作用

Fig. 1 Interaction of solar radiation and atmosphere

$$L_{\text{sensor}} = L_{\text{path}} + L_{\text{reflected}} + L_{\text{adjacency}} \quad (1)$$

简单起见,忽略像元的邻近效应,假设天空辐照度各向同性和地面朗伯面反射,且天空晴朗无云,忽略大气的折射、湍流和偏振,则大气层顶卫星接收到的辐射可以由下式(Liang,2004)表示:

$$L_{\text{sensor}} = L_{\text{path}} + \frac{\rho E_g T}{\pi(1 - \rho S)} \quad (2)$$

式中: L_{sensor} 表示给定地表反射率卫星观测到的辐射亮度; L_{path} 是大气路径程辐射; ρ 是地表反射率; E_g 是下行的总辐射通量,包括太阳直射和天空漫射的通量; T 是地表到卫星之间总的大气透射率; S 是大气半球反照率。

$$\text{由(2)式可得: } \rho = \frac{f}{1 + Sf} \quad (3)$$

其中: $f = \pi(L_{\text{sensor}} - L_{\text{path}})/(E_g \cdot T)$;上述方程中的未知量有: E_g 、 T 、 L_{path} 、 S ,其中 E_g 与 T 相乘可以看作一个未知量 F 。在给定的大气廓线和气溶胶模式的情况下,需要对参数 L_{path} 、 F 、 S 在不同太阳天顶角、气溶胶光学厚度(能见度)、水汽柱含量的情况下建立查找表,对于一景不是太大的影像,假设每一个像元的太阳天顶角和水汽柱含量一致。由于常见的Landsat、MODIS等传感器多为星下观测,观测天顶角可以近似认为不变,因此本文没有考虑传感器观测天顶角的变化情况。对于每一个气溶胶光学厚度(能见度),分别假设3个地表反射率($\rho = 0, 0.5, 0.8$),运行MODTRAN 3次,得到3个模拟的星上辐射亮度值 L_{sensor} ,将对应的 ρ 和 L_{sensor} 值代入公式(3),可以建立一个关于变量 L_{path} 、 F 、 S 的3元一次方程组,这样,对于气溶胶光学厚度 τ_a 、地表反射率 ρ 和星上辐射亮度值 L_{sensor} 这3个量,只要知道其中的两个,就可以推出第3个量了(Liang et al., 2001)。

针对不同的气溶胶光学厚度取值($\tau_a = 0, 0.5, 1.0, 2.0$),就可建立起气溶胶光学厚度、地表反射率与星上辐射亮度值的查找表。考虑建表后内插的精度,可以增加中间值, $\rho = 0, 0.02, 0.05, 0.5, 0.8$; $\tau_a = 0, 0.1, 0.2, 0.5, 0.8, 1.5, 2.0$;建好表后再线性插值成更多值的新表。图2给出了在中纬度夏季大气模式下,太阳天顶角为 33° 、Landsat ETM+ band2的查找表示意。图2中等值线为星上辐射亮度值($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$),X轴为像元地表反射率 ρ ;Y轴为像元对应的气溶胶光学厚度值 τ_a 。从图2中可以发现随星上辐射亮度值的不同, ρ 和 τ_a 对应的关系曲线也不同。

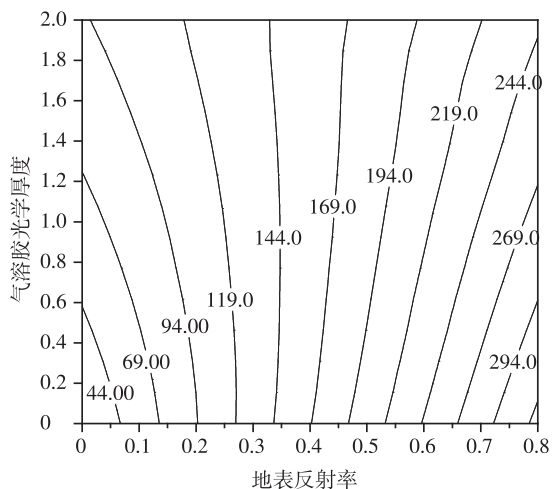


图2 Landsat ETM + band2 查找表关系图

Fig.2 The look up table of Landsat ETM + band2

对于已有的 Landsat TM/ETM + 影像,通过辐射定标后仅知道一个量:辐射亮度值 L_{sensor} ,要反演出真实的地表反射率值就还必须知道获得影像时刻的气溶胶光学厚度值。本文采用暗元目标法来反演气溶胶光学厚度。地物地表反射率越低,卫星信号所受到的来自地表反射率等的不确定因素影响就越小,受气溶胶的影响就更加明显,因此暗元目标更有利于用来探测气溶胶。在可见光和中红外波段,浓密植被由于叶绿素和液态水的吸收作用,其光谱反射率较低,可用作暗元目标像元。研究(Kaufman et al., 1997)表明 $2.1 \mu\text{m}$ 处的植被反射率与 $0.49 \mu\text{m}$ (蓝光波段)和 $0.66 \mu\text{m}$ (红光波段)处的反射率有很好的相关关系:

$$\begin{cases} \rho_{0.49} = 0.25\rho_{2.2}; \\ \rho_{0.66} = 0.5\rho_{2.2}. \end{cases} \quad (4)$$

对于 ETM + /TM 数据,其 7 波段为中红外波段

($2.08 \sim 2.35 \mu\text{m}$),如果只考虑大气的吸收而忽略大气散射影响的话,其星上反射率可以直接转换为地面反射率(Liang et al., 2001),Kaufman 以 $\rho_{2.2} < 0.1$ 作为判别植被的条件,暗目标确定后,根据公式(4)可获得其在红、蓝波段的地面反射率,并通过前文建立的查找表确定红、蓝波段的气溶胶光学厚度值。对于其他波段气溶胶的光学厚度值,可以根据公式(5)来计算:

$$\tau_i = \beta\lambda_i^{-\alpha}. \quad (5)$$

式中: τ_i 和 λ_i 分别为对应波段的气溶胶光学厚度值和中心波长; α 和 β 通常被称为 Ångstrom 系数(吴北婴等,1998)。由于气溶胶在空间分布上是渐变连续的,在获取所有暗目标的气溶胶光学厚度值之后,通过空间插值,就可以获取整景影像的气溶胶厚度值。

2 结果分析讨论

基于前述的方法,对 2002 年 5 月 31 日 Landsat7 ETM + 轨道号为 p121r035 的影像数据进行了大气校正。图 3 和图 4 分别是大气校正前后 ETM + 影像真彩色合成图和局部放大图。从图 3a 可以看出大气校正前,地物边缘模糊不清,整幅合成影像总体呈蓝色调,这是由于 1 波段的蓝光波段受大气瑞利散射影响较大的缘故。大气校正后,消除了大气的影晌,明显恢复了下垫面原貌,地物边缘变得清晰,图像对比度提高,见图 3b。从局部放大图(图 4),可以更明显地看出大气校正前后的区别。

为了进一步了解大气校正前后各波段反射率的具体变化,图 5 分别在给出了经大气校正前后的典型地物的反射率和标准波谱的比较,限于篇幅,仅给

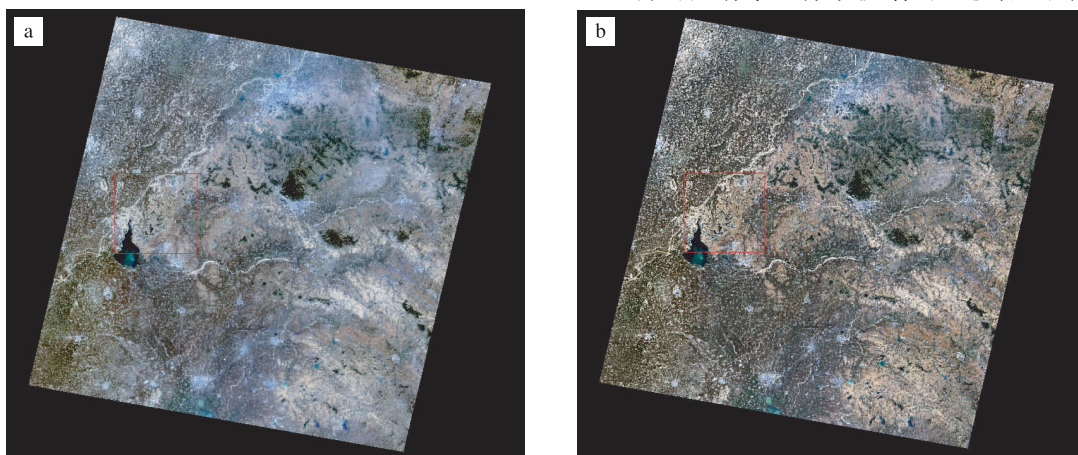


图3 大气校正前(a)、后(b)Landsat ETM + 影像的真彩色合成图(3,2,1 波段合成)

Fig.3 True color composite produced from Landsat ETM + bands 3,2 and 1:(a) before and (b) after atmospheric correction

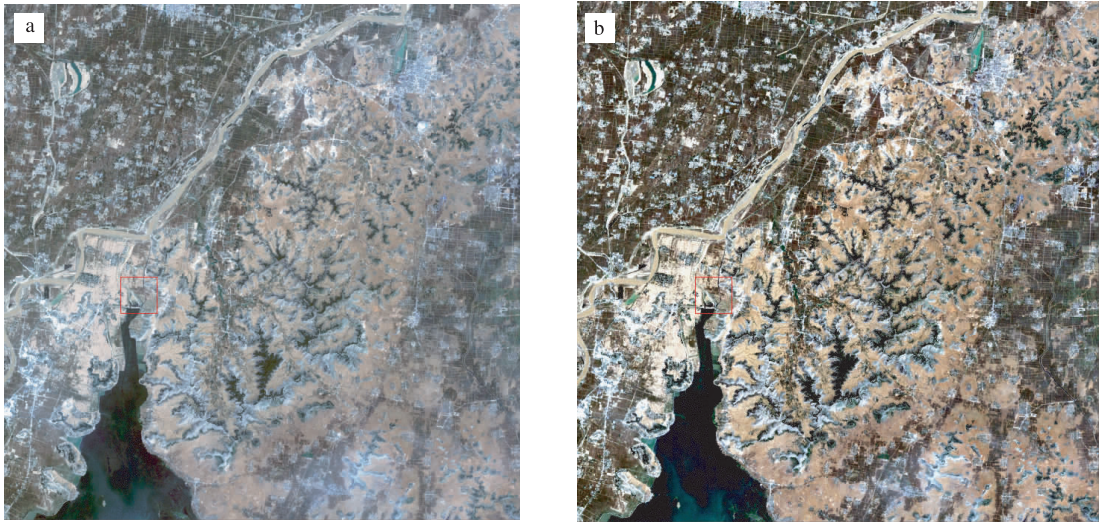


图 4 大气校正前(a)、后(b)Landsat ETM + 影像彩色合成图的局部放大图

Fig. 4 Local enlargement of Landsat ETM + imagery: (a) before and (b) after atmospheric correction

出绿色植被和水体与标准谱线的比较。验证植被校正结果的标准波谱结果采用 Jet Propulsion Laboratory 的公共波谱库 (ASTER spectral library), 水体的反射率标准谱线参考陈蕾等 (2004) 研究工作。在大气校正前后的 ETM + 影像上分别选择了典型的地物水体(水库)、植被(山区林地) 150 个, 取平均后与标准谱线比较, 见图 5。

由图 5a 中可知, 经过大气校正后的植被波谱线显示了典型绿色植被波谱特征, 在 $0.55 \mu\text{m}$ (绿) 处呈现一个小的反射峰, 两侧的 $0.46 \mu\text{m}$ (蓝) 和 $0.67 \mu\text{m}$ (红) 处则有两个吸收带。这一特征是由于绿色植被的叶绿素对蓝光和红光的吸收作用强, 而对绿光反射作用强造成的。而未经过大气校正的植被波谱曲线没有显现出这个特征, 这是大气校正前后显

著的差异。图 5 b 显示, 经大气校正后水体的波谱曲线形态与标准谱线的形态非常相似, 反射率均在第 2 波段为最高, 第 1 波段次之, 从第 2 波段往后反射率呈递减趋势, 将其减去 1% 后的谱线更接近于标准谱线。而未经过大气校正的谱线显示出较大的差异, 水体反射率值在第 1 波段为最高, 然后逐渐下降。由于采用的标准谱线测得条件不同于影像获得时刻, 例如水体对太阳辐射光谱的反射率与水体本身的浑浊度有着密切的关系, 绿色植被的种类和长势等均会影响反射率, 故反射率的具体数值并非完全一致。

图 6 给出了大气校正前后的 NDVI 分布的比较, 从图 6 中可以发现校正后 NDVI 值的动态范围增大, 分析图中剖线的对应值 (图 7), 发现 NDVI 的

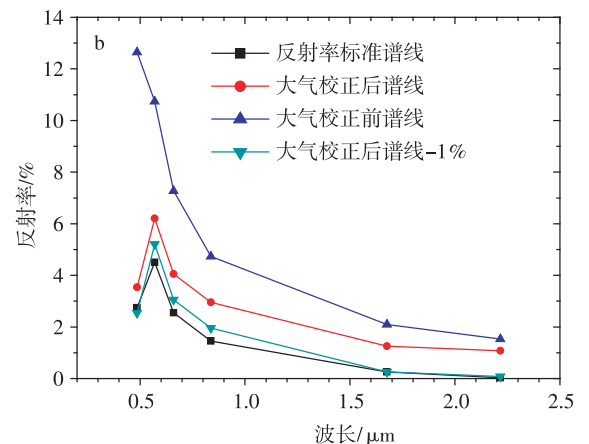
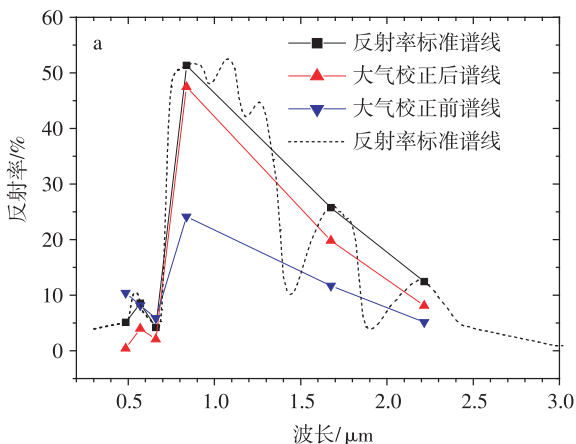


图 5 大气校正前后的反射率同标准谱线的比较 a. 植被; b. 水体

Fig. 5 Comparison between spectra of (a) vegetation and (b) water before and after atmospheric correction and standard reflectance

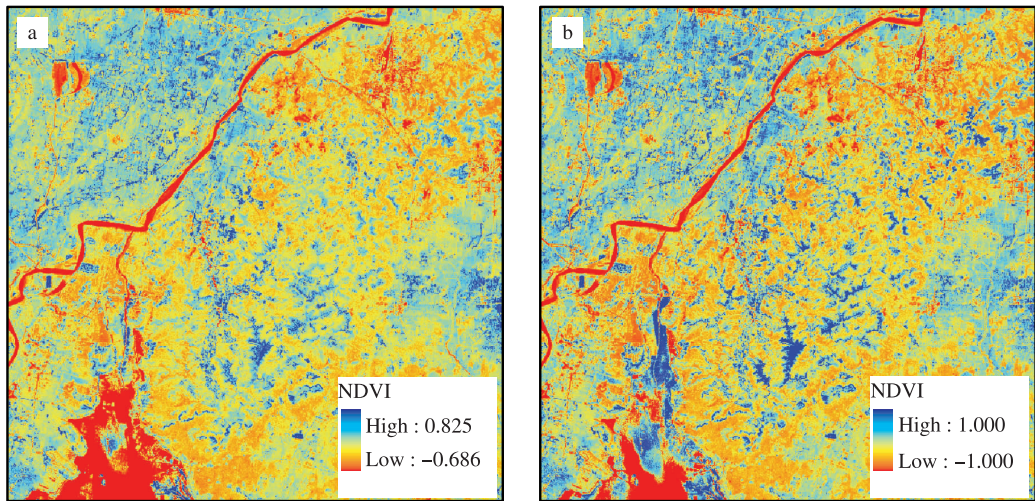


图6 大气校正前(a)、后(b)的NDVI分布的比较

Fig.6 Comparison of NDVI distribution (a) before and (b) after atmospheric correction

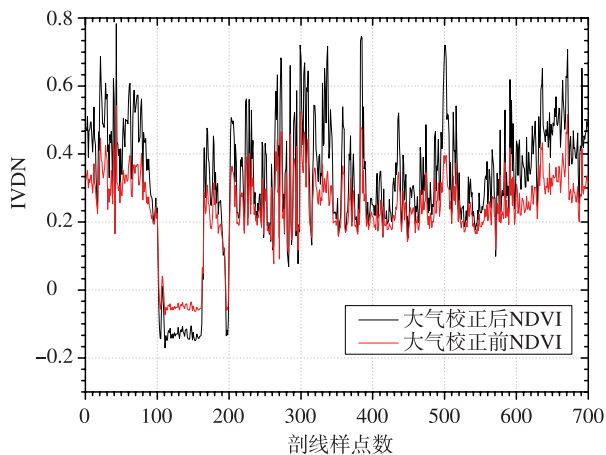


图7 大气校正前后NDVI剖线的比较

Fig.7 Comparison of NDVI horizontal profile before (solid line) and after (dash line) atmospheric correction

值校正后普遍大于校正前(水体除外),但两者的变化趋势仍基本一致。分析整幅影像的反射率发现,大气校正后的反射率的动态变化范围加宽了,而且,波段1、2、3的反射率值在大气校正后比校正前显著减小,这是因为大气的 Rayleigh 散射和气溶胶的散射作用在可见光波段比臭氧的吸收作用要强;相反,波段4、5、7的反射率值在大气校正后有所增大,因为强烈的大气水汽(吸收)效应对 TM/ETM+ 的近红外通道(波段4、5、7)的影响要比可见光通道(波段1、2、3)大,而 Rayleigh 散射和气溶胶的散射作用比较微弱。这些结果在图5和图6也均有体现。大气校正的结果与刘朝顺等(2008)、张杰等(2004)的结果基本相同,可以认为经过大气订正后,有效地降低了大气中大气分子、水汽、臭氧、气溶胶粒子等对

各波段反射率的影响。

3 结论

由于大气散射和吸收的影响而造成卫星遥感数据质量下降和遥感信息变换严重地影响了遥感数据的进一步应用和遥感的参数化反演精度,大气校正已成为遥感数据处理不可避免的步骤之一。本文基于 MODTRAN 大气辐射传输模型计算建立的查找表,并结合暗元目标法,利用遥感影像自身的信息对遥感影像进行大气校正,有效的降低了大气中大气分子、水汽、臭氧、气溶胶粒子等各波段反射率的影响,可以快速、精确地反演出地表真实反射率,为遥感信息的进一步定量提取和专题解译奠定了基础。

该方法还存在一定的不足,在进行大气校正的时候并没有考虑像元间的多次散射,降低了像元间的反差。这也是今后需要进一步展开研究的方向。

参考文献:

- 陈蕾,邓孺孺,柯锐鹏,等. 2004. 基于地面耦合的 TM 影像的大气校正—以珠江口为例[J]. 地理学与国土研究,20(2):34-37.
- 刘朝顺,高炜,高志强,等. 2008. 基于 ETM+ 遥感影像反演不同土地利用类型地表温度的研究[J]. 南京气象学院学报,31(4):503-510.
- 权维俊,郭文利,叶彩华,等. 2007. 基于 TM 卫星影像获取北京市水体密度指数与植被覆盖指数的方法[J]. 南京气象学院学报,30(5):610-616.
- 吴北婴,李卫,陈洪滨. 1998. 大气辐射传输实用算法[M]. 北京:气象出版社.
- 肖荣波,欧阳志云,李伟峰,等. 2007. 城市热岛时空特征及其影响因

- 素[J]. 气象科学, 27(2):230-236.
- 张杰, 王介民, 郭锐. 2004. 应用 6S 模式对 EOS-MODIS 可见光到中红外波段的大气订正[J]. 应用气象学报, 15(6):651-657.
- 郑秋萍, 刘红年, 陈燕. 2009. 城市化发展与气象环境影响的观测与分析研究[J]. 气象科学, 29(2):214-219.
- 郑有飞, 范旻昊, 张雪芬, 等. 2008. 基于 MODIS 遥感数据的混合像元分解技术研究和应用[J]. 南京气象学院学报, 31(2):145-150.
- Berk A, Bernstein L S, Anderson G P, et al. 1998. MODTRAN cloud and multiple scattering upgrades with Application to AVIRIS-editions of 1991 and 1992 [J]. Remote Sens Environ, 65(3):367-375.
- Isaacs R G, Wang W C, Worsham R D, et al. 1987. Multiple scattering LOWTRAN and FASCODE models [J]. Applied Optics, 26(7):1272-1281.
- Kaufman Y J, Karnieli A, Tanre D. 2000. Detection of dust over deserts using satellite data in the solar wavelengths [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 38(1):525-531.
- Kaufman Y J, Wald A E, Remer L A, et al. 1997. The MODIS 2. 1-mm channel-correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 35(5):1286-1298.
- Liang S, Fang H, Chen M. 2001. Atmospheric correction of Landsat ETM + land surface imagery: I. Methods [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 39(11):2490-2498.
- Liang S, Morisette J T, Fang H, et al. 2002. Atmospheric correction of landsat ETM + land surface imagery: II. Validation and applications [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 40(12):2736-2746.
- Liang S. 2004. Quantitative remote sensing of land surfaces [M]. New Jersey: John Wiley and Sons.
- Michener W K, Houhoulis P F. 1997. Detection of vegetation changes associated with extensive flooding in a forested ecosystem [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 63(12):1363-1374.
- Richter R. 1996a. A spatially adaptive fast atmospheric correction algorithm [J]. Int J Remote Sens, 17(6):1201-1214.
- Richter R. 1996b. Atmospheric correction of satellite data with haze removal including a haze/clear transition region [J]. Computers and Geosciences, 22(6):675-681.
- Vermote E, Tanre D, Deuze J L, et al. 1997. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum (6S) [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 35(3):675-686.

(责任编辑:张福颖)