

文章编号:1001-1595(2008)04-0469-07

中图分类号:P237

文献标识码:A

一种基于阴影像元的光学遥感大气校正方法

程 伟¹, 王黎明¹, 田庆久^{1,2}

1. 中国科学院 对地观测与数字地球科学中心, 北京 100086; 2. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093

A Method of Atmospheric Correction Based on Shadow-pixel for Optical Satellite Data

CHENG Wei¹, WANG Li-ming¹, TIAN Qing-jiu^{1,2}

1. Center for Earth Observation and Digital Earth, CAS, Beijing 100086, China; 2. International Institute for Earth System Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: A new method of atmospheric correction for optical remote sensing imagery is presented. The method is applicable to optical remote sensing imagery with shadow pixels, such as high spatial resolution imagery. Aerosol Optical Thickness (AOT) is a very important parameter of atmospheric correction. The new method estimates aerosol optical thickness from the signal differences of shadow pixel and non-shadow pixel. IKONOS imagery of Miyun County, Beijing is used to validate the new method. The result of AOT estimation is basically the same as the MODIS AOT products, which proves the reliability of the new method to a certain extent. In addition, because the method avoids the surface reflectance assumption, it overcomes the uncertainty of the Dark Objective Method (DOS) and the stability of AOT estimation result has been greatly increased. Finally, the results of atmospheric correction and reflectance revival show that compared to apparent reflectance curve, atmospheric corrected reflectance curve is closer to measured typical objects reflectance curve. Besides, the difference of NDVI between high vegetation coverage and low vegetation coverage area after atmosphere correction is more obvious, so it can be said that atmosphere correction can make the vegetation information more prominent on the remote sensing imagery.

Key words: atmospheric correction; remote sensing; shadow; 6S; IKONOS

摘 要: 提出一种基于 6S 模型+阴影像元的大气校正方法,适用于有阴影像元存在的高空间分辨率光学遥感影像。该方法从阴影像元与非阴影像元的信号差异估算气溶胶光学厚度,与暗目标方法相比,此方法避免地表反射率的假定难题。以北京市密云县的 IKONOS 影像对方法进行验证。在气溶胶光学厚度的估算上,该方法的估算结果与 MODIS 气溶胶产品基本一致,而且其结果的稳定性明显好于暗目标法。在大气校正的结果方面,针对各类地物,比较大气校正前后的光谱与同类典型实测地物光谱,结果说明大气校正能够大大恢复各类地物光谱的典型特征,这将有利于地物的识别。最后通过比较大气校正前后的 NDVI 发现,大气校正能够明显增大高植被覆盖区与低植被覆盖区 NDVI 的差别,使植被信息更加突出。

关键词: 大气校正; 遥感; 阴影; 6S 模型; IKONOS

1 引 言

在光学遥感领域,大气辐射传输模型(6S、MODTRAN 等)法已经成为当前主流的遥感影像大气校正方法之一,这种方法有一个重要前提,即大气参数的获取。大气参数的获取主要有 2 种途径:一种是通过实际的测量,这种方法需要较大研究成本,且不太适合于偏远地区及历史数据的

大气校正。另一种是通过影像自身估算,这种方法不需要野外场地测量等辅助数据,所以是未来大气校正研究的重要方向。

大气对光学遥感的影响主要体现在气溶胶、水汽、臭氧及氧气等大气成分对太阳辐射的吸收和散射作用。其中臭氧、氧气等在时空上很稳定,气溶胶和水汽的变化则非常活跃,因此,气溶胶光学厚度和水汽含量是大气校正最为关键的参数。

收稿日期:2008-01-18; 修回日期:2008-07-09

基金项目:国家自然科学基金项目(40701107); 知识创新工程青年人才领域前沿项目

作者简介:程 伟(1983-),男,江苏南京人,研究生,主要从事高光谱遥感、遥感影像的大气校正及地形校正研究。

E-mail: simbla@sina.com

水汽吸收主要影响近红外及短波红外信号,对于很多多光谱遥感数据,如 SPOT、IKONOS 等,由于没有足够的信息,很难从影像上估算水汽含量^[1],Liang 推荐使用其他卫星数据或者相关气象资料获取水汽含量信息。气溶胶对可见光波段的辐射有强烈的散射和吸收,气溶胶光学厚度的估算一直是大气校正中最困难、研究最多的问题之一。目前从影像估计气溶胶光学厚度的方法中应用最广泛的是暗目标法^[2],由此形成一种暗目标与大气辐射传输模型相结合的大气校正方法,美国 MODIS 陆地影像大气校正算法就是基于这一原理。所谓暗目标是指在可见光波段信号很低的像元,这些像元的信号主要来自大气散射造成的程辐射,其地表反射信号很小,因此可以利用它们获取气溶胶信息。然而,暗目标反射率的确定一直是此类方法的主要难点,如果假设不准,会对气溶胶估算及后续的大气校正及反射率反演(尤其对于低反射率的地物)造成较大的误差。初期一般直接假设暗目标反射率为 0.0~0.03^[2~5],但是这种假设随意性比较大,后来 Kaufman 研究发现浓密植被 2.1 μm 附近的表观反射率与可见光波段的反射率有良好的比例关系^[6],依据此关系便可以确定植被暗目标在可见光波段的反射率。该方法已经被应用到 MODIS 陆地气溶胶反演算法及 TM 数据的大气校正中^[7]。遗憾的是,很多传感器如 IKONOS、SPOT 等都没有相关波段,而且对于没有浓密植被覆盖的研究区,该方法也无法应用。

本文从阴影产生的机理出发,提出了一种基于 6S 模型^[8]+阴影像元的大气校正方法,适用于阴影明显的高空间分辨率遥感影像。此方法从阴影目标与非阴影目标的信号差异估算气溶胶光学厚度,与暗目标方法相比,该方法避免了地表反射率的假定难题,从而大大降低了暗目标法的不确定性。最后以 IKONOS 影像为例,对方法进行验证。

2 6S 模型+阴影像元的大气校正方法

2.1 气溶胶光学厚度估算

除了气溶胶,水汽也是大气中另一活跃成分,因此在估算气溶胶时,还应考虑水汽的影响。图 1 是 6S 模型模拟的 IKONOS 4 个波段的水汽吸收总透过率随水汽含量的变化图。模拟条件为:太阳天顶角 65°、观测天顶角 30°。

由图可知,蓝、绿波段受水汽的影响很小,水

汽吸收总透过率几乎都在 98% 以上;红波段、近红外波段受水汽吸收的影响相对较大,尤其是近红外波段,水汽吸收总透过率最低已降到 90% 以下。因此,在用蓝、绿波段估算气溶胶时可以不考虑水汽的影响。

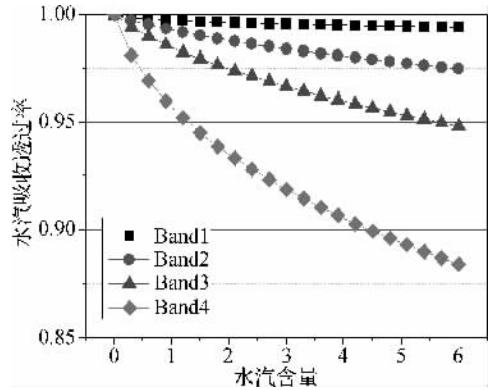


图 1 水汽吸收透过率随水汽含量变化
Fig. 1 Simulation of water absorption

暗目标法是目前使用最广泛的气溶胶光学厚度估算方法。限于篇幅,这里仅将暗目标方法的基本思路列出:

1. 确定暗像元,记录其可见光波段的表观辐亮度 L_d 。
2. 确定暗像元反射率 ρ_d ,将其作为大气辐射传输模型正向模拟的输入参数。
3. 确定太阳、观测几何条件等基本输入参数,选择正确的大气模式、气溶胶模式。
4. 以不同的气溶胶光学厚度 τ (550 nm 处)作为输入参数,用大气辐射传输模型进行正向模拟,得到对应的表观辐亮度 L_r 。
5. 将 L_r 与 L_d 进行匹配,取 L_r 等于 L_d 时所对应的气溶胶光学厚度作为最终结果。

然而,暗目标反射率的确定一直是困扰该方法的主要难点,如果假设不准,会对后续的反射率反演造成较大的误差。本文试图利用遥感影像的阴影像元,提出一种新的气溶胶光学厚度确定方法,以避免对地表反射率假设的问题。

遥感影像尤其是高空间分辨率影像的阴影效应十分明显,阴影是由较高物体遮挡太阳直射光而形成。在非阴影区,地物同时有太阳直射光、天空漫射光及环境光照射,而在阴影区,地物只有天空漫射光和环境光照射,没有太阳直射光照射。由于环境光所占的比例非常小且难以估算,所以通常忽略其影响。这里假设有两个反射率相同的

像元分别位于某一阴影边缘的两侧(即一个位于非阴影区,另一个位于阴影区),由于它们相隔很近,大气状况可以认为相同。同时假设地表为朗伯体且忽略大气邻近效应,则非阴影区像元的表观辐射亮度分别可表示为

$$L_i = L_p + (E_d + E_f)T(\mu) \frac{\rho}{\pi(1 - S\rho)} \quad (1)$$

其中, L_i 为非阴影区像元表观辐射亮度, L_p 为大气程辐射, ρ 为像元反射率, E_d 为水平地表的直射光辐照度, E_f 为水平地表的天空漫射光辐照度, $T(\mu)$ 为地表到大气层顶部的总透过率, S 为大气半球反照率^[8]。如上所述,由于阴影区像元没有太阳直射光照射,通过去掉 E_d 项可得阴影区像元的表观辐射亮度

$$L_s = L_p + E_f T(\mu) \frac{\rho}{\pi(1 - S\rho)} \quad (2)$$

其中, L_s 为阴影区像元表观辐射亮度。将两式中的 L_p 移到等号左边,再取两式之比可得

$$\frac{L_i - L_p}{L_s - L_p} = \frac{E_d + E_f}{E_f} \quad (3)$$

式(3)的意义在于:在相同大气条件下,有 2 个反射率相同的像元分别位于阴影区和非阴影区,则 2 个像元的上行辐射之比等于两者的入射辐照度之比。式(3)还可变换为

$$d = \frac{L_i - L_p}{L_s - L_p} - \frac{E_d + E_f}{E_f} = 0 \quad (4)$$

其中, d 为两个比例之差。式(4)中 L_s, L_i 为表观辐射亮度,即图像信号值,其他所有参数仅与大气条件有关,而与地表状况无关。所以,如果能在图像中的某一阴影边缘两侧找到两个具有相同反射率的像元,其中一个位于阴影区,另一个位于非阴影区,便可以将式(4)作为一个约束条件确定气溶胶光学厚度。基本思想是:取不同的气溶胶光学厚度 τ 作为输入参数,利用大气辐射传输模型模拟

出对应的 L_p, E_d, E_f , 将这些参数带入式(4)计算出对应的 d , 最后取最接近 0 的 d 所对应的气溶胶光学厚度作为最终结果。与暗目标法相比,这种确定气溶胶光学厚度的方法无需假设地表反射率,减少了暗目标法的不确定性。

在高分辨率遥感影像上,通常能在某些阴影边缘两侧找到类型均一的区域(如城市的水泥地、道路,乡村的大坝、裸地等),可以认为区域内的像元反射率非常接近,这就为上述方法提供了可行的条件。图 2 为研究区 IKONOS 影像上的一块阴影边缘区。由图 2 可判断,圈内的像元都为同一类地物,其反射率应非常接近,但是由于光照条件的不同,使得阴影像元与非阴影像元的信号有明显差别。本文在该阴影边缘两侧随机选取 40 个像元,图 3 为这些像元在蓝、绿波段的表观辐射亮度分布图。其中横坐标表示点号,其中前 20 号的为非阴影区像元,后 20 号为阴影区像元,纵坐标表示表观辐射亮度 ($\mu W cm^{-2} nm^{-1} sr^{-1}$)。由图 3 可知,阴影区或非阴影区内部的像元值很一致,如果再剔除某些异常点,其一致性将更好,而阴影区与非阴影区之间的像元值则呈现明显的梯度,造成这种梯度的原因在于阴影区没有直射光照射。

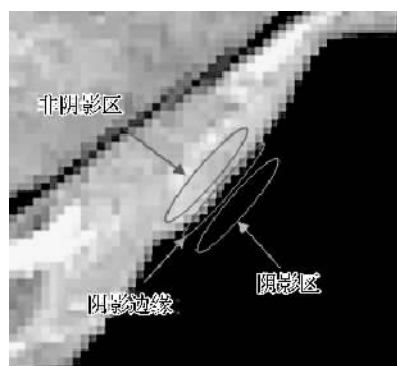


图 2 遥感影像的阴影边缘区

Fig. 2 Edge region of shadow on image

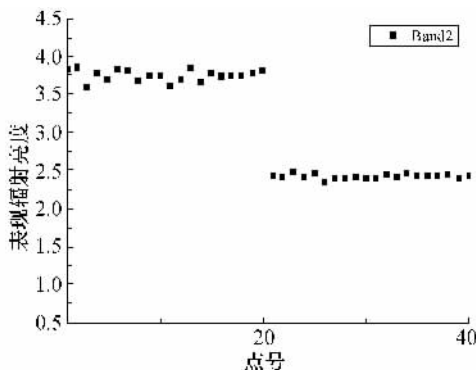
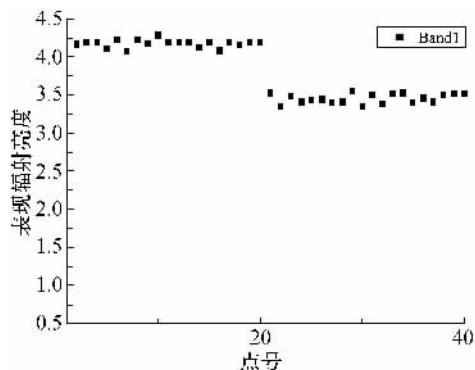


图 3 阴影边缘两侧像元辐射亮度比较

Fig. 3 Comparison of apparent radiance between shadow pixels and non-shadow pixels

由前面的模拟结果可知,蓝、绿波段受水汽含量影响最小,因此采用这两个波段来估算气溶胶光学厚度。为了减少计算,本文将该方法与暗目标方法配合使用,方法主要步骤如下:

1. 用暗目标法初步确定气溶胶光学厚度的最大可能值。具体作法是:以某一阴影像元作为暗目标,假设其反射率为 0,用 6S 模型确定气溶胶光学厚度的最大可能值 τ_{\max} 。

2. 查找符合要求的阴影边缘区。样区的选择非常重要,根据方法的原理,要求样区水平且地表类型均一,保证阴影边缘两侧的像元反射率非常接近。同时,由于本文方法假设地表为朗伯体,所以尽量不要选择反射率方向性比较强的植被区,否则可能会对估算结果造成较大的误差。

3. 在阴影边缘两侧选取样本,剔除异常点后求均值,得到阴影像元和非阴影像元的表观辐亮度 L_s, L_i 。

4. 确定太阳、观测几何条件等基本输入参数,并选择正确的大气模式、气溶胶模式。

5. 以 τ_{\max} 为上限,以不同的气溶胶光学厚度 τ 作为输入参数,用 6S 模型模拟出对应的 L_p, E_d, E_f , 将这些参数以及 L_s, L_i 带入式(4)计算出对应的 d_r 。

6. 取 d_r 等于 0 时对应的气溶胶光学厚度作为最终结果。

另外,这里需说明,由于实际情况与本文方法假设前提会有不符,如阴影两侧像元的真实反射率并非完全相同、地表并非完全朗伯体等。因此,步骤 6 中使 d_r 严格等于 0 只适用于完全理想的情况,在此前提下,在实际中一般只需使 d_r 非常接近 0 即可,这样还可以减少一些计算量。本文在步骤(5)中让 τ 以一定的步长变化,模拟对应的 d_r , 得到 d_r 值由正转负时对应的两个临界点(一正一负),取更接近 0 的点作为最终结果。显然,步长越短,临界点对应的 d 值越接近 0,即越逼近理想状况,但是计算量也相应增大。

2.2 大气校正及反射率反演

在估算出气溶胶光学厚度后,便可以利用 6S 模型进行大气校正及反射率反演。本次实验的研究区范围较小,气溶胶状况的空间变化应该很小,所以取几个样区在蓝、绿波段估算的平均值作为整幅影像大气校正的输入参数。关于运用 6S 模型进行大气校正及反射率反演的原理与方法这里不再详述,可以参考 6S 帮助文档或相关文献。

3 实验与结果分析

3.1 数据选取与实验说明

本文选取北京市密云县 2005-12-26 的 IKONOS 多光谱影像。影像空间分辨率为 4 m,包括 3 个可见光波段和一个近红外波段。实验区影像为 1 000 行×1 000 列,区内主要以山地、农田、村庄为主。由于影像获取时正值冬季,太阳高度角比较低,因此影像中有很多山体遮挡形成的阴影,这为本文方法的使用提供了必要条件。

遥感影像的原始数据一般是经过量化处理的 DN 值,本身没有物理意义,所以在大气校正之前必须对影像进行辐射定标,即将 DN 值转换为入瞳辐射亮度值。有关 IKONOS 数据的辐射定标可参考文献[9,10]。本文使用 6S 模型进行气溶胶光学厚度估算及反射率反演。除了气溶胶光学厚度之外,其他重要大气参数设置为:大气模式选取中纬度冬季大气,气溶胶模式选取大陆型气溶胶。对于传感器波段设置,由于 6S 模型没有提供 IKONOS 影像的波段响应函数,因此需要自行设置,关于 IKONOS 影像的波段信息可以参考文献[9]。实验的编程实现使用了 ENVI+IDL 工具。

3.2 气溶胶光学厚度估算结果及验证

本文在研究区的不同位置选取了 3 块阴影边缘区作为气溶胶估算的样区,图 4 是样区 1 的气溶胶估算示意图。其中横坐标表示气溶胶光学厚度,纵坐标表示式(4)中的 d ,两条曲线分别代表了蓝、绿波段的 d 随气溶胶光学厚度的变化趋势。由图可知,随着气溶胶光学厚度的增加, d 有明显增大的趋势,其中 d 等于 0 所对应的气溶胶光学厚度便是估算结果。表 1 是 3 个样区在 2 个波段的估算结果。由表可知:同一样区在不同波段的估算结果基本一致,没有出现自相矛盾的结果;不同样区的估算结果也很一致,这也符合实际,因为研究区的空间范围比较小(4 km×4 km),而且环境比较单一(以丘陵、农田为主),气溶胶状态的空间变化应该很小。

由于影像的获取时间为 2005 年,因此无法通过同步测量来直接验证气溶胶的估算结果。这里将本文方法的结果与同时段、同地区的 MODIS 气溶胶产品进行对比分析,以间接验证方法的可靠性,同时也将本文方法与暗目标方法的结果进行了对比分析。

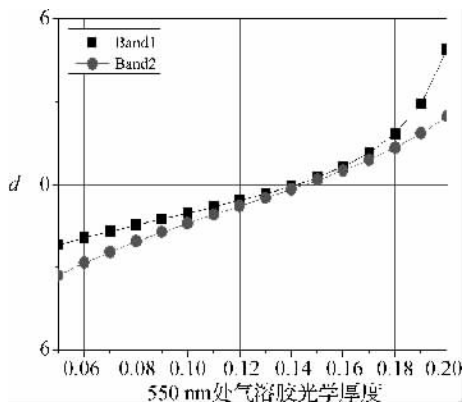


图 4 d 与气溶胶光学厚度关系图

Fig. 4 Relation of d and AOT

美国 NASA 已能够用 MODIS 卫星数据提供全球大部分地区的气溶光学厚度产品。经过实测验证^[11],它可以在一定精度上反映实际的气溶胶分布状况。图 5 是依据 MODIS 标准气溶胶产品(Level 2B)生成的中国东部地区气溶胶分布图(由于 MODIS 气溶胶算法基于浓密植被,图中黑色区域表示没有浓密植被覆盖,因而没有反演结果),其时间与影像获取时间仅差半小时。由于 MODIS 产品的空间分辨率为 10 km,与实验影像相差很大,因此很难进行精确验证。但是由于大气气溶胶的空间分布具有明显的连续性,在一定范围内变化很小,所以用 MODIS 数据对方法进行初步验证应当是可行的。在 MODIS 反演图上,涵盖研究区及周围区域的 4 个像元的气溶胶光学厚度在 0.06~0.16 之间,平均值为 0.13,而本文方法的估算结果正在这一范围之内,且与平均值非常接近,这在一定程度上证明了方法的可靠性。

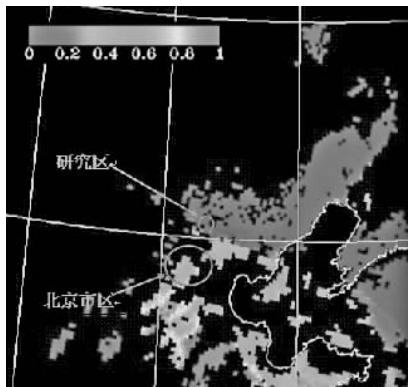


图 5 MODIS 气溶胶光学厚度产品图

Fig. 5 MODIS aerosol optical thickness products

表 2 是暗目标法在同一研究区的估算结果(暗目标选取样区 1 中某一阴影像元)。由于暗目

标法需要假定目标反射率,具有很大的不确定性,这里以 0.01 为间隔,分别假设暗目标反射率为 0.0~0.04,其结果分别对应表中 D1~D5。通过比较可知:当暗目标反射率的假定有 0.01 的变化时,估算结果约有 0.02 至 0.04 的差别;本文方法的估算结果在不同波段、不同样区的差别都小于 0.01。这充分说明由于本文方法避免了对地表反射率的假定,从而克服了暗目标方法的不确定性,使估算结果的稳定性显著提高。

表 1 阴影像元法估算气溶胶光学厚度结果

Tab. 1 AOT estimation result of shadow pixel based method

	样区 1	样区 2	样区 3
Band1	0.142	0.138	0.142
Band2	0.139	0.145	0.142

表 2 暗目标法估算气溶胶光学厚度结果

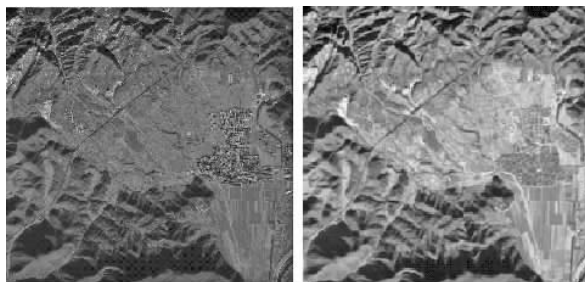
Tab. 2 AOT estimation result of DOS method

D1	D2	D3	D4	D5
0.223	0.201	0.168	0.131	0.100

3.2 大气校正结果分析

3.2.1 视觉比较

图 6 是研究区表现反射率的图像(标准假彩色)与大气校正后的反射率图像的对比。通过比较可知,大气校正前图像整体偏暗,对比度不高;大气校正后图像对比度明显增加,地物显得更加清晰可辨。出现这种差别的原因是:一方面,大气的吸收、散射作用削弱了地表反射能量,对图像信号有削减作用;另一方面,大气程辐射对图像信号有增加作用。以上两种作用的综合结果是:对于反射率很低的暗目标,大气的第二种作用占主导,因此在图像上暗目标显得比实际亮,而对于高反射率的亮目标,第一种作用更明显,因而显得比实际目标暗一些。总之,大气的存在削减了地物的明暗差别,降低了图像的对比度。



表现反射率图

大气校正反射率图

图 6 大气校正前后图像视觉对比

Fig. 6 Visual analysis of atmospheric correction

3.2.2 反射率光谱比较

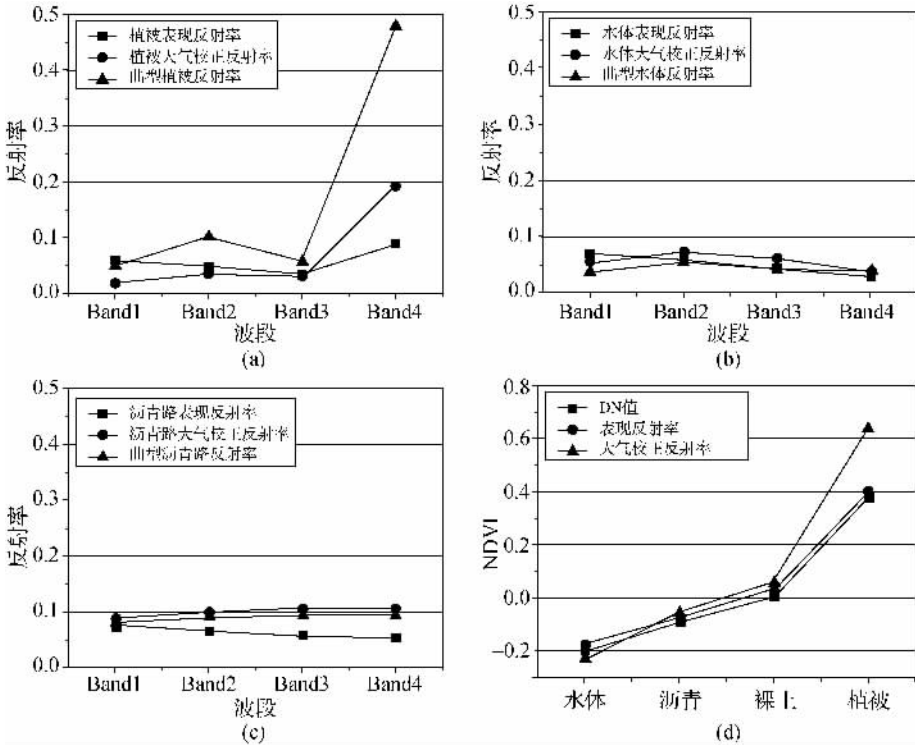
反射率光谱特征是遥感影像地物识别的重要手段,本文在研究区图像上选取植被(松树冠层)、水体(池水)、沥青路等不同地表类型的像元,将它们的表现反射率及大气校正后的反射率与实测的典型同类地物反射率相比较(如图 7 (a) ~ (c))。其中这几种典型地物的实测反射率数据由南京大学国际地球系统科学研究所利用 ASD 光谱测量仪测得,本文利用 ENVI 提供的光谱重采样功能将 ASD 所测数据进行重采样,从而得到基于 IKONOS 影像波段的反射率光谱。

绿色植被的在可见光—近红外波段有两大光谱特征,一是在绿波段有一个微小反射峰,一是近红外波段的反射率大大高于可见光波段。由图 7 可知,大气校正前,植被蓝波段的反射率高于绿波段,且近红外波段的反射率与可见光波段相差不大;大气校正后,绿色植被的两大光谱特征基本得到恢复。另外,大气校正后的植被光谱与典型植被光谱虽然在形态上相似,但是绝对值差别很大,

而大气校正不可能使反射率产生如此大的变化。这可能是由于本文选取的典型植被光谱是松叶光谱,与像元代表的冠层光谱存在差异,也可能是由于植被光谱随地域、季节变化造成的差异。

对于纯净的水体,其可见光波段的反射率一般随着波长的增加而逐渐降低,即在蓝波段具有最高的反射率。但是由于自然界中的水体通常含有一些杂质,如藻类植物及泥沙等,导致水体反射率的峰值向绿波段乃至红波段转移。由图 7 可知,大气校正前池水的反射率在蓝波段最高,这不符合自然界池水的反射光谱特征,而大气校正后水体反射率的波峰已经偏向绿波段,与实测的典型池塘水光谱特征相似。

沥青路等人工目标的反射率光谱特征为在可见光波段缓慢上升,之后趋于平坦。由图 7 可知,大气校正前沥青路的光谱曲线呈缓慢下降的趋势,与实测光谱恰好相反,而大气校正后光谱曲线与实测光谱曲线基本相一致。



(a), (b), (c) 反射率光谱比较; (d) NDVI 比较
 (a), (b), (c) reflectance comparison; (d) NDVI comparison

图 7 大气校正结果分析

Fig. 7 Analysis of atmospheric correction result

3.2.3 NDVI 比较

在遥感应用领域,植被指数是用来评价植被

长势、估算生物量的重要工具^[12]。植被指数设计的基础是植被及背景的光谱特性,所以严格来说,

植被指数的计算都应是基于真实反射率的。为了评价大气校正对植被指数计算的影响,这里以NDVI为例,比较了由原始DN值、表观反射率及大气校正反射率计算的3种NDVI值。如图7(d)所示,对于各类地物,表观反射率计算的NDVI都比原始DN值计算的略高,但两者差别不大;对于NDVI为负的水体,大气校正后的NDVI比另外两种都要低;对于NDVI接近0的裸土、沥青路,大气校正后的NDVI略高于其他两种,但差别不大;对于NDVI最高的植被,大气校正后的NDVI明显高于其他两种NDVI。由此可见,经大气校正后,水体的NDVI有所降低,低植被覆盖区的NDVI略有提高,而高植被覆盖区的NDVI有非常明显的增大。因此,大气校正能够明显增大高植被覆盖区与低植被覆盖区NDVI的差别,使植被信息更加突出。

4 结论与讨论

1. 本文提出一种基于6S模型+阴影像元的大气校正方法,适用于有阴影存在的高空间分辨率遥感影像。该方法从阴影像元与非阴影像元的信号差异估算气溶胶光学厚度。以IKONOS影像对方法进行验证,结果表明该方法估算的气溶胶光学厚度与MODIS气溶胶产品基本一致,在一定程度上说明了方法的可靠性。同时,本方法避免了对地表反射率的假设,从而克服了暗目标法的不确定性,使气溶胶估算结果的稳定性大大提高。

2. 通过分析大气校正的结果可知:大气校正后,在视觉上恢复了地物的明暗差别,增强了图像的对比度;大气校正能够还原地物本来的光谱特性,更有利于影像的判读与分析;大气校正使高植被覆盖区的NDVI显著提高,因此增大了高植被覆盖区与低植被覆盖区NDVI的区别,从而使植被信息更加突出。

3. 本文仅使用MODIS气溶胶产品对所提出的气溶胶光学厚度估算方法进行了间接验证,因此方法的精度还需更加严格的验证。为了简化讨论,本文没有考虑地表反射的方向性及大气邻近效应的影响,这些简化可能会对气溶胶光学厚度估算及反射率反演造成较大的误差。所以如果要获得更高的精度,必须将两者考虑在内。

参考文献:

[1] LIANG Shun-lin, FANG Hong-liang, CHEN Ming-zhen.

- Atmospheric Correction of Landsat ETM+ Land Surface Imagery—Part I: Methods [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2001, 39(11): 2 490-2 498.
- [2] KAUFMAN Y J, SENDRA C. Algorithm for Automatic Atmospheric Correction to Visible and Near-ir Satellite Imagery [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1988, 9(6): 1 357-1 381.
- [3] CHAVEZ P S. Image-based Atmospheric Corrections-Revisited and Improved [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1996, 62(9): 1 025-1 036.
- [4] WU Jin-dong, WANG Dong, MARVIN E B. Image-based Atmospheric Correction of QuickBird Imagery of Minnesota Cropland [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 99: 315-325.
- [5] TIAN Qing-jiu, ZHENG Lan-fen, TONG Qing-xi. Image Based Atmospheric Radiation Correction and Reflectance Retrieval Methods [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 1998, 9 (4): 456-461. (田庆久, 郑兰芬, 童庆禧. 基于遥感影像的大气辐射校正和反射率反演方法[J]. *应用气象学报*, 1998, 9 (4): 456-461.)
- [6] KAUFMAN Y J, *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, 1 286-1 298.
- [7] ZHAO Chun-jiang, SONG Xiao-yu, WANG Ji-hua, *et al.* An Algorithm Based on 6S Model for Removing Atmospheric Effects from Satellite Imagery Pixel by Pixel [J]. *Optical Technique*, 2007, 33(1): 11-15. (赵春江, 宋晓宇, 王纪华, 等. 基于6S模型的遥感影像逐像元大气纠正算法[J]. *光学技术*, 2007, 33(1): 11-15.)
- [8] VERMOTE E, *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: 675-686.
- [9] IKONOS Relative Spectral Response and Radiometric Calibration Coefficients [EB/OL]. <http://www.geoeye.com/products/imagery/ikonos/spectral.htm>, 2007.
- [10] TAYLOR M. IKONOS Planetary Reflectance and Mean Solar Exoatmospheric Irradiance [EB/OL]. http://www.geoeye.com/whitepapers_pdfs/Esun1.pdf, 2005.
- [11] MAO Jie-tai, LI Cheng-cai, ZHANG Jun-hua, *et al.* The Comparison of Remote Sensing Aerosol Optical Depth from MODIS Data and Ground Sun-photometer Observations [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2002, 13(2): 127-135. (毛节泰, 李成才, 张军华, 等. MODIS卫星遥感北京地区气溶胶光学厚度及与地面光度计遥感的对比[J]. *应用气象学报*, 2002, 13(2): 127-135.)
- [12] ZHANG Jia-hua, FU Cong-bin. A Study of Relationships between Remote Sensing Information and Plant Photosynthetic Parameters in Estimating Biomass Model [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1999, 28(2), 128-132. (张佳华, 符淙斌, 生物量估测模型中遥感信息与植被光合参数的关系研究[J]. *测绘学报*, 1999, 28(2), 128-132.)

(责任编辑:丛树平)