

基于 6S 模型 NPP VIIRS 数据快速大气校正及精度评估

吉长东^{1**}, 孙道中^{1*}, 马传宁²

¹ 辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新 123000;

² 国家测绘地理信息局第二大地测量队(黑龙江第一测绘工程院), 黑龙江 哈尔滨 150000

摘要 运用一种快速大气校正方法以消除大气气溶胶粒子散射对电磁波传输的影响。基于大气辐射传输模型构建了气溶胶反演及大气校正查找表,采用暗像元算法实现了气溶胶光学厚度(AOD)反演,基于逐像元计算了大气校正参数。实验利用新一代的极轨运行环境卫星上的可见光红外成像辐射仪(VIIRS)数据,分析了大气校正前后植被与水体的反射率差异以及大气校正前后归一化植被指数的变化;利用实测光谱数据与中等分辨率成像光谱仪(MODIS)地表反射率数据对大气校正结果进行验证。结果表明,经过大气校正后的地物光谱曲线更接近实测光谱曲线,与 MODIS 地表反射率产品相比,快速大气校正结果具有较高的精度和较小误差(± 0.04 以内),扩大了遥感数据定量化的应用范围。

关键词 大气光学; 大气校正; 辐射传输模型; 可见光红外成像辐射仪; 地表反射率

中图分类号 P407

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.080101

NPP VIIRS Data Fast Atmospheric Correction and Accuracy Evaluation Based on 6S Model

Ji Changdong^{1**}, Sun Daozhong^{1*}, Ma Chuanning²

¹ Institute of Surveying and Geographical Sciences, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China;

² The Second Earth Metering of National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation (Heilongjiang Province First Academy of Engineering of Surveying and Mapping), Harbin, Heilongjiang 150000, China)

Abstract A fast atmospheric correction method is used to eliminate the effects of the atmosphere on electromagnetic wave transmission. Aerosol retrieval and atmospheric correction look-up tables are constructed based on the atmospheric radiation transmission model. Aerosol optical depth (AOD) is derived by the dark target algorithm. The atmospheric correction parameters are calculated by the pixels. Using the visible infrared imaging radiometer suite (VIIRS) data on a new polar-orbiting operational environmental satellite, we analyze the difference of vegetation reflectance and water reflectance, and the change of normalized difference vegetation index before and after atmospheric correction. In addition, the results of the fast atmospheric correction are also verified by the measured spectral data and moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) surface albedo data. The verified results show that the spectral curve of ground object after the atmospheric correction is closer to the measured spectral curve. Compared with MODIS surface reflectance products, the fast atmospheric correction is of high accuracy, and the error is less than ± 0.04 , so it has more quantitative applications of remote sensing data.

Key words atmospheric optics; atmospheric correction; radiation transmission model; visible infrared imaging radiometer suite; land surface reflectance

OCIS codes 010.1290; 010.5620; 280.4788

收稿日期: 2017-12-11; 修回日期: 2018-01-28; 录用日期: 2018-01-31

* E-mail: sundz_rs@126.com; ** E-mail: 1247895086@qq.com

1 引言

大气校正是消除大气以及气溶胶分子引起的辐射误差的过程,是遥感技术定量化应用的前提与基础^[1]。因此,大气校正已经成为遥感定量化研究的重点内容之一。随着定量遥感技术的迅速发展,遥感图像大气校正方法的研究也越来越受到重视。常用的大气校正方法主要有基于辐射传输方法和基于图像统计特征方法^[2]。

基于辐射传输模型的大气校正方法精度较高,利用电磁波在大气中的传输原理建立模型,对遥感图像进行大气校正。该方法考虑了多种气体以及气溶胶的消光作用、大气分子的多次散射作用等。目前常用的大气辐射传输模型有 MODTRAN (moderate resolution transmission)、6S(second simulation of the satellite signal in the solar spectrum)以及 ATCOR (atmospheric and topographic correction)等。郝建亭等^[3]利用 FLAASH (fast line-of-sight atmospheric analysis of spectral hypercubes)中辐射传输模型对 ASTER (advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer)多光谱数据进行大气校正,对比大气校正前后假彩色合成图、直方图以及植被覆盖度,结果表明 FLAASH 大气校正能够准确获取地表反射率信息。郑盛等^[4]利用 MODTRAN 模型对卫星遥感电磁波传输过程进行模拟,实现了 1 号环境与灾害监测预报卫星(HJ-1)电荷耦合元件(CCD)数据的大气校正,大气校正后的数据与中等分辨率成像光谱仪(MODIS)地表反射率产品一致性较好。孙长奎等^[5]利用 6S 模型构建了不同大气条件下的大气校正系数查找表(LUT),实现了 HJ-1 卫星 CCD 数据的大气校正的同时,也对大气校正的不确定性进行了分析。周莉等^[6]利用 6S 大气辐射传输模型结合近红外(NIR)波段离水反射率模型实现了 MERIS(medium-resolution imaging spectrometer)影像二类水体的大气校正,其结果与实测数据以及 Beam 软件大气校正结果相比具有较高的精度和稳定性。朱长明等^[7]利用美国陆地卫星 Landsat5 辅助中巴地球资源卫星(CBERS)数据进行辐射定标,修改 ERDAS 中 ATCOR2 模型大气校正相关参数,实现了 CBERS 数据的大气校正。王永锋等^[8]分别利用 FLAASH 模型和 ATCOR2 模型对 ETM+(Enhanced Thematic Mapper)数据进行大气校正,通过对比发现二者均可以对获取有效的大气校正,但 FLAASH 模型精度略优于 ATCOR2 模型。此外,其他辐射传输模型例如

LOWTRAN(low resolution atmospheric transmittance and radiance code)、UVRAD (ultraviolet and visible radiation)等也被广泛应用到大气校正中。基于图像统计特征的大气校正只是仅通过对图像像元值进行统计分析去除大气影响的方法,主要包括不变目标法、直方图匹配法、暗像元法等^[9-11]。除以上两种主要方法之外,还可以利用偏振信息对遥感图像进行大气校正^[12-14]。

利用辐射传输方法进行大气校正的方法虽然精度较高,但该方法需要卫星过境的实时大气廓线数据,计算量较大,实施起来较为困难,因此极大地限制了辐射传输模型方法的使用范围。由于从遥感影像中可获取大气的各种信息,再结合大气辐射传输模型,就可以获得真实的地表反射率,运用这种快速大气校正方法将成为研究重点之一。

本文运用一种快速大气校正方法以消除大气对电磁波传输的影响。利用 6S 辐射传输模型构建了新一代极轨运行环境卫星系统中可见光红外成像辐射仪(VIIRS)实测气溶胶反演以及大气校正系数查找表,利用目前应用较多以及精度较高的暗像元(DT)算法,获取了影像的气溶胶光学厚度(AOD),作为已知大气输入参数实现了 VIIRS 数据可见光以及近红外波段的大气校正。在大气校正后,利用精度较高的光谱分析仪(ASD)实测光谱数据对大气校正前后水体与植被反射率进行精度验证,利用精度较高的 MODIS 地表反射率产品对本次实验的大气校正结果进行精度评估,最后用大气校正前后归一化植被指数(NDVI)的变化来分析校正效果。

2 资料与方法

2.1 数据源

实验用到的数据主要来源于 Suomi NPP 卫星数据。Suomi NPP 是美国新一代极轨运行环境卫星系统,其携带的包括 VIIRS 在内的 5 个对地观测仪器,是甚高分辨率辐射计(AVHRR)和中分辨率成像光谱仪系列的改进和拓展。Suomi NPP 也是美国下一代对地观测卫星,用来接替服役超期的 Terra、Aqua 等卫星;其观测数据在 0.4~12 μm 的光谱范围内共有 22 个波段^[15-16],其中,在可见光近红外波段 0.4~0.9 μm 有 9 个波段,在短波红外和中波红外 1~4 μm 有 8 个波段,热红外 8~12 μm 有 4 个波段,还有 1 个低照度条件下的可见光波段;其空间分辨率在星下点优于 400 m,在扫描系统边缘优于 800 m。NPP VIIRS 数据具有广阔的应用前景,可用于陆地、海洋、大气参数全球性观测等^[17-18]。

2.2 大气校正原理

图1为太阳辐射与大气综合作用的示意图^[19],表明了太阳下行辐射和大气、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太阳辐射主要由大气程辐射、目标反射以及邻近效应3个部分组成。

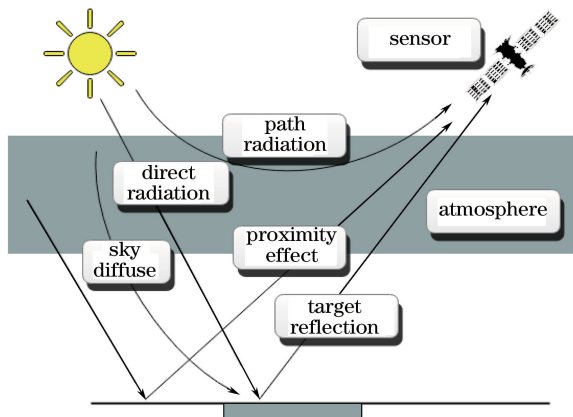


图1 太阳辐射与大气的相互作用

Fig. 1 Interaction between solar radiation and atmosphere
在假设地表为均一的朗伯体的情况下,基于大

气辐射传输原理,卫星传感器记录的表观反射率 R^* 可以表示为^[20]

$$R^*(\tau_a, \mu_s, \mu_v, \varphi) = \rho_0(\tau_a, \mu_s, \mu_v, \varphi) + \frac{T(\tau_a, \mu_s)T(\tau_a, \mu_v)\rho_s}{1 - S(\tau_a)\rho_s}, \quad (1)$$

式中: τ_a, μ_s, μ_v 和 φ 分别为气溶胶光学厚度、太阳天顶角余弦、卫星天顶角余弦和相对方位角; ρ_0 为大气路径辐射等效反射率; $T(\tau_a, \mu_s)$ 和 $T(\tau_a, \mu_v)$ 分别为大气上行和下行透过率; $S(\tau_a)$ 为大气下界半球反射率; ρ_s 为地表反射率即大气校正待求参数。

根据辐射传输方程可知,要计算地表反射率 ρ_s , 必须首先求解 $S(\tau_a), \rho_0, T(\tau_a, \mu_s), T(\tau_a, \mu_v)$, 操作起来较为困难。但利用6S辐射传输可以通过(2)、(3)式计算地表反射率^[21]:

$$\rho_s = y / (1 + x_c \cdot y), \quad (2)$$

$$y = x_a \cdot L - x_b, \quad (3)$$

式中: L 为辐射亮度; x_a, x_b 和 x_c 分别为某一波段的大气校正系数,这些系数可以通过把成像几何参数以及大气参数输入到6S模型中模拟得到。大气校正的具体流程如图2所示。

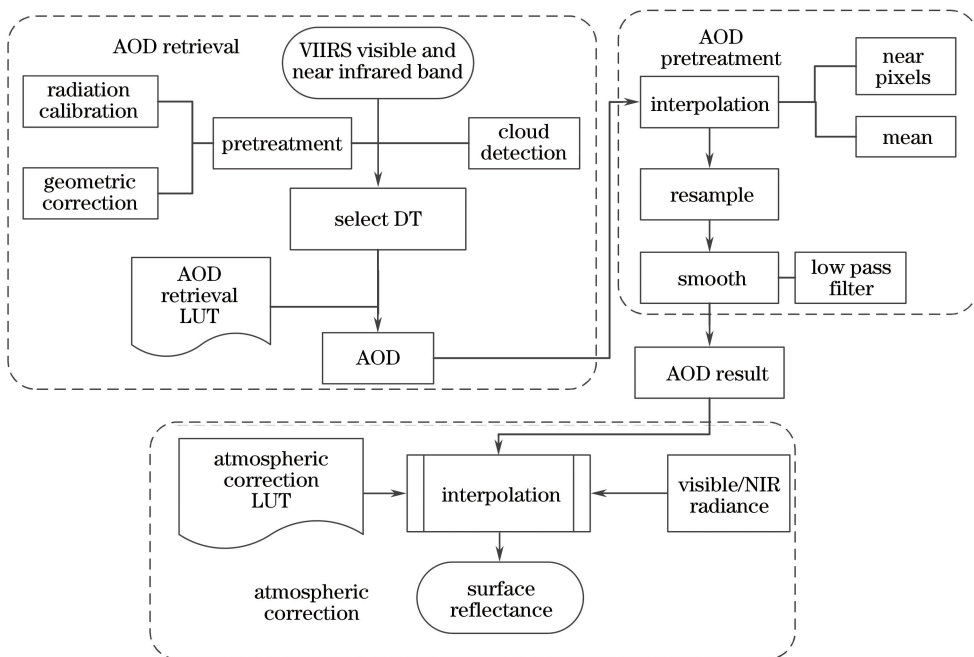


图2 大气校正流程图

Fig. 2 Flow chart of atmospheric correction

3 大气校正与结果验证

3.1 大气校正

3.1.1 6S模型及大气校正查找表构建

6S模型为目前常用的辐射传输模型,该模型可

根据用户输入参数的不同分为两种过程:一种是用用户给定地物反射率以及大气模式,计算得到晴空条件下传感器接收到的信号,大气气溶胶光学厚度的反演研究即为该过程;第2种过程为用户给定传感器接收的表观反射率或者辐射亮度值以及大气参

数,最终确定地物反射率,亦即大气校正的过程^[22]。

本次大气校正实验基于 6S 辐射传输模型,构建一类气溶胶光学厚度反演和大气校正查找表,从而提高了大气校正的计算效率。本实验在利用 6S 模型构建查找表时,气溶胶光学厚度反演查找表的输入参数包括太阳、卫星的几何参数和地表反射率参数,并且设立了 15 个光学厚度参数值,气溶胶模式为中度吸收型气溶胶^[23];大气校正查找表的输入参数包括太阳、卫星的几何参数以及光学厚度参数。两个查找表中各参数的具体设置(参数范围与间隔大小)如表 1、表 2 所示。

表 1 气溶胶光学厚度反演查找表参数设置

Table 1 Parameter setting of look-up table for aerosol optical depth inversion

Parameter name	Parameter setting
Observation zenith angle / (°)	0, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60, 66, 72, 78
Solar zenith angle / (°)	0, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60, 66, 72, 78
Relative azimuth / (°)	0, 10, 20, 30, 40, 50, ..., 140, 150, 160, 170, 180
AOD	0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 0.0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.10, 0.11, 0.12, 0.13, 0.14, 0.15
Surface reflectance	0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.10, 0.11, 0.12, 0.13, 0.14, 0.15

表 2 大气校正参数设置

Table 2 Atmospheric correction parameter setting

Parameter name	Parameter setting
Observation zenith angle / (°)	0, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60, 66, 72, 78
Solar zenith angle / (°)	0, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60, 66, 72, 78
Relative azimuth / (°)	0, 10, 20, 30, 40, 50, ..., 140, 150, 160, 170, 180
AOD	0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0

3.1.2 气溶胶光学厚度反演及大气校正

除水汽吸收外,电磁波在地气系统中主要受气溶胶的影响。气溶胶光学厚度的精确计算是大气校正精度的保证。气溶胶光学厚度的反演算法有暗像元算法、深蓝算法等。另外还可以利用激光雷达数据对气溶胶光学厚度进行反演^[24]。本文利用目前应用比较广泛、精度较高的暗像元算法对气溶胶光学厚度进行反演。

Kaufman 等^[25]的研究表明,在暗像元区域,近

红外波段的地表反射率与可见光红、蓝波段地表反射率之间存在着固定的线性关系,即: $\rho_{0.47}^s = \rho_{2.12}^s / 4$, $\rho_{0.66}^s = \rho_{2.12}^s / 2$;同时,在近红外波段传感器接收到的辐射能量基本不受大气的影响,近红外波段的表观反射率可近似为地表反射率。Levy 等^[26]研究发现在暗像元区域,红蓝波段地表反射率不仅与散射角有关,而且还是植被指数的函数,其中散射角为

$$\Phi = \arccos(-\cos \theta_0 \cos \theta + \sin \theta_0 \sin \theta \cos \varphi), \quad (4)$$

式中: θ_0 、 θ 和 φ 分别为太阳天顶角、卫星观测角和相对方位角。

暗像元的选择是利用暗像元算法进行陆地气暗像元反演时的关键步骤。由于可见光波段受大气气溶胶影响较大,暗像元选择时利用受大气气溶胶影响较小的近红外(1.24 μm)和中红外(2.25 μm)波段计算归一化植被指数(NDVI, R_{NDVI})。然后根据(4)式计算的散射角以及植被指数获取蓝光波段地表反射率,并参考观测几何参数和蓝光波段表观反射率,通过插值计算获得大气气溶胶光学厚度。

由于在气溶胶光学厚度反演时,仅反演了暗像元区域的气溶胶光学厚度,而非暗像元区域需要利用插值算法进行处理,采用反距离加权插值算法对气溶胶光学厚度进行插值。假定 AOD 在一定区域变化较小,利用低通滤波器对插值结果进行平滑处理。

在大气校正时,利用计算的 AOD、观测几何以及表观辐射亮度等数据作为大气校正输入参数,代入大气校正查找表,通过反距离加权插值逐像元计算大气校正转换系数,最后利用(2)式和(3)式计算获得地表反射率。

3.2 大气校正结果验证

3.2.1 大气校正结果

基于上述的方法,对 2015 年 10 月 12 日 NPP VIIRS 影像数据进行了大气校正。图 3 是大气校正前和校正后 NPP VIIRS 影像的真彩色合成图。从图 3(a)中可以看出,在大气校正前,地物边缘模糊不清;由图 3(b)可知,大气校正后消除了大气的影响,恢复了地表原貌,地物边缘变得更加清晰,图像对比度有了明显提高。

3.2.2 不同地表类型大气校正结果验证

为验证不同波段大气校正的精度,提取了典型地物(水体、植被)VIIRS 在各波段大气校正前(表观反射率)和大气校正后(地表反射率)的像元值,并进行

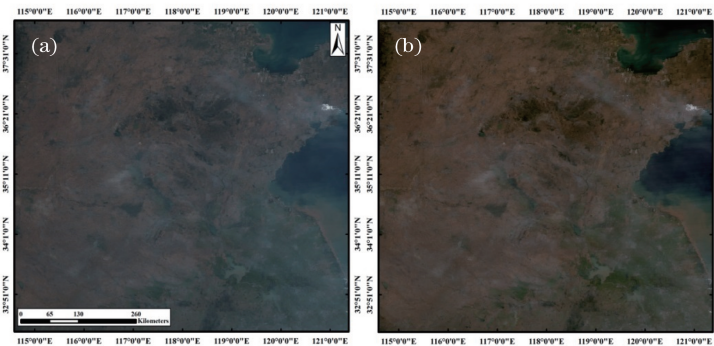


图 3 NPP VIIRS 真彩色合成图。(a)大气校正前;(b)大气校正后

Fig. 3 True color image of NPP VIIRS. (a) Before atmospheric correction; (b) after atmospheric correction

对比。同时,以 ASD 实测光谱作为参考,验证了大气校正前后水体与植被反射率与实测光谱的差异。为方便数据验证对比,仅比较了 VIIRS 对应波段中心波长处实测光谱值与大气校正前后反射率值。

图 4(a)和图 4(b)分别为大气校正前后水体与植被的反射率对比图。可以看出,大气校正后地表反射率在各波段均有不同程度的变化,特别是在可

见光波段变化较为明显,这与可见光波段受大气影响大的理论相符合;而在近红外以及短波红外波段,电磁波受大气影响较小,因此地表反射率与表观反射率变化较小。利用水体以及植被实测光谱对大气校正结果进行验证,通过对比发现,大气校正后水体和植被的光谱曲线更接近于真实地物的光谱曲线,这证实了大气校正结果的有效性。

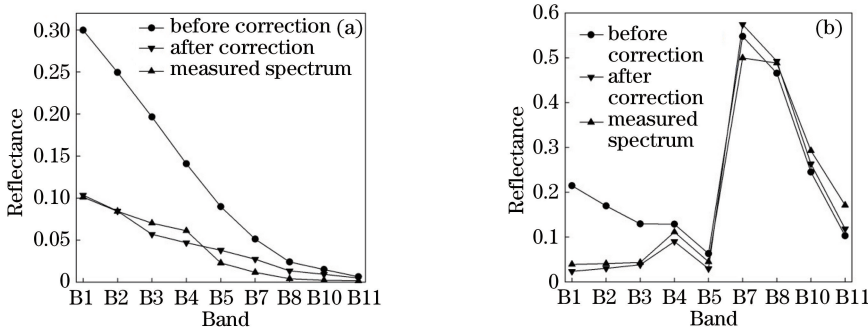


图 4 大气校正前后水体和植被反射率对比图。(a)水体反射率;(b)植被反射率

Fig. 4 Comparison of water and vegetation reflectance before and after atmospheric correction. (a) Water reflectance; (b) vegetation reflectance

3.2.3 与 MODIS 地表反射率产品进行验证

利用精度较高的 MODIS 地表反射率产品,对本方法获取的大气校正结果进行验证。MODIS 和 VIIRS 传感器波谱差异,受观测几何和成像时间、地表的非朗伯特特性以及混合像元的影响会造成地表反射率的差异。因此为了降低以上差异,选取了 MODIS Aqua 地表反射率产品,选择地表类型均一

的敦煌为验证区域,对比分析了可见光和近红外波段的地表反射率,验证波段对应关系详细信息如表 3 所示。

图 5 所示为 MODIS 地表反射率产品(MYD09 GA)与本文算法大气校正结果在地表均一的敦煌定标场差值的直方图;图(a)、(b)、(c)、(d)分别代表蓝、绿、红和近红外波段。从直方图分布来看,本文中采

表 3 MODIS 与 VIIRS 对应验证波段

Table 3 MODIS and VIIRS corresponding verification band

μm

Band	MODIS		VIIRS	
	Wavelength range	Center wavelength	Wavelength range	Center wavelength
Blue	0,459-0,479	0,469	0,478-0,498	0,488
Green	0,545-0,565	0,555	0,545-0,565	0,555
Red	0,620-0,670	0,645	0,662-0,682	0,672
NIR	0,841-0,876	0,859	0,846-0,885	0,865

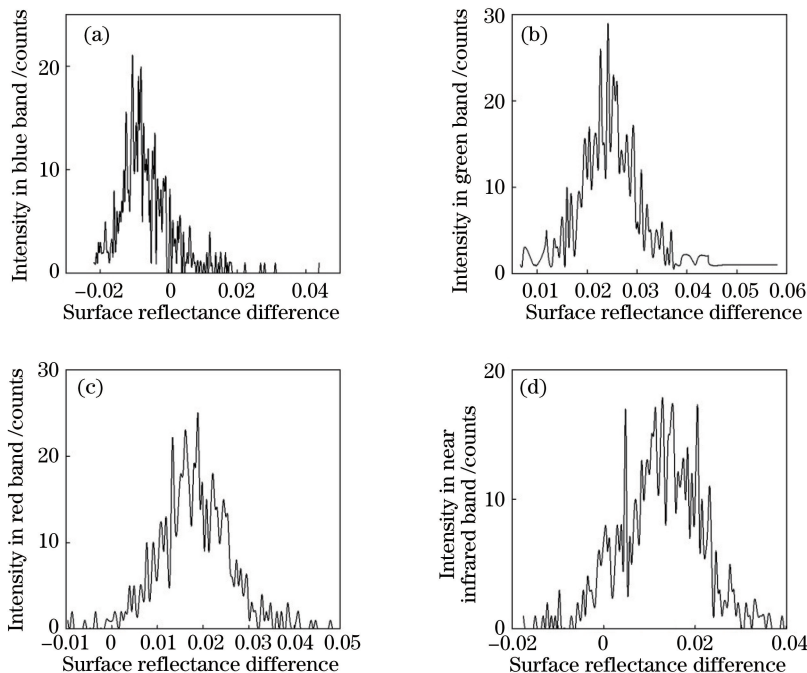


图5 MODIS 地表反射率产品与大气校正后地表反射率在可见光及近红外波段的直方图差异。

(a)可见光(蓝)波段;(b)可见光(绿)波段;(c)可见光(红)波段;(d)近红外波段

Fig. 5 Histogram difference between MODIS surface reflectance product and atmospheric correction in

visible and near infrared bands. (a) Visible band (blue); (b) visible band (green); (c) visible band (red); (d) near infrared band

用的大气校正算法与 MODIS 地表反射率具有较小的差异,在 ± 0.04 以内。分析其原因可能是气溶胶反演误差造成地表反射率的差异,这说明在高亮区域(城市,沙漠和冰雪等)气溶胶反演仍存在一定的问題。

3.2.4 大气校正对归一化植被指数的影响

归一化植被指数是目前应用较多且较成熟的植被指数之一,可用来表示植被生长状态及植被覆盖度,是近红外波段反射率与红光波段反射率之差与二者之和的比值,可表示为

$$R_{NDVI} = \frac{\rho_{nir} - \rho_r}{\rho_{nir} + \rho_r}, \quad (5)$$

式中: ρ_{nir} 、 ρ_r 分别表示近红外波段与红光波段的反射率。

电磁波在传输过程中由于大气分子及气溶胶的吸收、散射等作用,红光波段的反射率明显增加,但大气对近红外波段的反射率影响相对较小,因此利用表观反射率计算的归一化植被指数要小于大气校正后的植被指数。为了验证本次大气校正的效果,对大气校正前后的归一化植被指数的变化进行了比较,如图6所示。从图中可以看出,使用大气校正后的反射率计算的归一化植被指数相对于大气校正前的植被指数呈现明显的增加趋势,并且能够突出浓

密植、稀疏植被以及裸地的空间分布,该结果在一定程度上间接反映了本次大气校正结果的有效性。

4 结 论

为验证本方法大气校正结果的精度,分析了大气校正前后水体和植被波谱曲线的差异,并利用典型地物的实测光谱进行验证,还利用 MODIS 地表反射产品与本方法给出的大气校正结果进行对比。分析对比结果表明,该种大气校正方法在一定程度上可以快速消除大气对电磁波辐射的影响,而且具有一定的校正精度,同时避免了辐射传输校正方法使用困难的问题。将反演的气溶胶光学厚度结果作为已知大气参数进行大气校正,能够较好地去除大气及气溶胶粒子的影响,具有较高的反演精度,大气校正结果与 MODIS 地表反射率差别较小,一般在 ± 0.04 以内,能够较好地反映真实的地表信息。经过大气校正,植被的 NDVI 相对于大气校正前有了明显提高,进一步突出了植被信息,在一定程度上也反映了大气校正的有效性。大气校正后的 NPP VIIRS 数据可以进一步应用到植被覆盖度、植被指数以及地表生物量估计等研究领域,为遥感定量研究提供了便利条件。

元之间临近效应的影响,降低了相邻像元之间的反

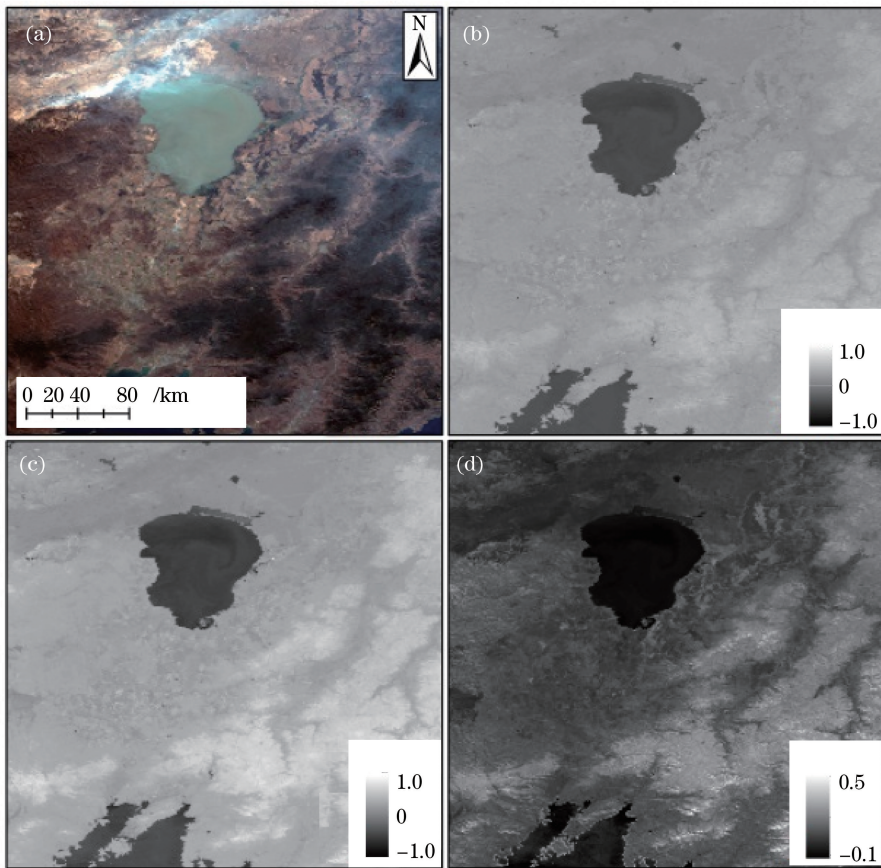


图6 NPP VIIRS 真彩色合成图与大气校正前后 NDVI 对比图。(a) NPP VIIRS 真彩色合成图;(b)大气校正前 NDVI 图;
(c)大气校正后 NDVI 图;(d)校正后与校正前的 NDVI 差值图

Fig. 6 True color image of NPP VIIRS image and comparison of NDVI before and after atmospheric correction. (a) True color image of NPP VIIRS image; (b) NDVI before atmospheric correction; (c) NDVI after atmospheric correction; (d) NDVI difference between after correction and before correction

差,另外也没有考虑地形因素的影响。虽然这些因素的影响不大,但这也是以后需要改进的地方。

致谢 感谢 NOAA CLASS 提供实验数据,感谢 Vermote E F 提供 6S 模型。

参 考 文 献

- [1] Su W, Zhang M Z, Jiang K P, *et al.* Study on atmospheric correction method of Sentinel-2 image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0128001.
苏伟, 张明政, 蒋坤萍, 等. Sentinel-2 卫星影像的大气校正方法研究 [J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0128001.
- [2] Yang H, Li X W, Gao F. An algorithm for the retrieval of albedo from space using new go kernel-driven BRDF model [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(4): 240-251.
杨华, 李小文, 高峰. 新几何光学核驱动 BRDF 模型反演地表反照率的算法 [J]. *遥感学报*, 2002, 6(4): 240-251.
- [3] Hao J T, Yang W N, Li Y X, *et al.* Atmospheric correction of multi-spectral imagery ASTER [J]. *Remote Sensing Information*, 2008, 6(1): 78-81.
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, 6(1): 78-81.
- [4] Zheng S, Zhao X, Zhang H, *et al.* Atmospheric correction on CCD data of HJ-1 satellite and analysis of its effect [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(4): 709-721.
郑盛, 赵祥, 张颖, 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.
- [5] Sun C K, Sun L, Ma S F, *et al.* Atmospheric correction method based on HJ-1 CCD data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(4): 826-836.
孙长奎, 孙林, 麻盛芳, 等. HJ-1 CCD 数据大气校

- 正方法研究[J]. 遥感学报, 2012, 16(4): 826-836.
- [6] Zhou L, Li Y M, Guo Y L, *et al.* Atmospheric correction for case-2 water using a radiative transfer optimized model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0201002.
周莉, 李云梅, 郭宇龙, 等. 基于辐射传输优化模型的二类水体大气校正[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0201002.
- [7] Zhu C M, Yang L, Chen S, *et al.* Basing on ATCOR2 model achieved CBERS02 atmospheric correction [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2008, 23(5): 565-570.
朱长明, 杨辽, 陈生, 等. 基于 ATCOR2 模型的 CBERS-02 数据大气校正 [J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(5): 565-570.
- [8] Wang Y F, Jing J L. Comparison of FLAASH and ATCOR2 atmospheric correction modules on Landsat ETM+ data[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2014, 37(9): 122-125.
王永锋, 靖娟利. 基于 FLAASH 和 ATCOR2 模型的 Landsat ETM+ 影像大气校正比较 [J]. 测绘与空间地理信息, 2014, 37(9): 122-125.
- [9] Song X Y, Wang J H, Liu L Y, *et al.* Atmospheric correction of hyper-spectral imagery: evaluation of the FLAASH algorithm with AVIRIS data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2005, 20(4): 393-398.
宋晓宇, 王纪华, 刘良云, 等. 基于高光谱遥感影像的大气纠正: 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.
- [10] He L M, Wang Q, Li X W, *et al.* Techniques and software' s analysis on atmospheric correction of optical remote sensing imagery [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2006, 8(2): 110-115.
何立明, 王桥, 李小文, 等. 光学遥感大气订正方法与软件应用分析 [J]. 地球信息科学, 2006, 8(2): 110-115.
- [11] Liu J, Wang L M, Yang L B, *et al.* GF-1 satellite image atmospheric correction based on 6S model and its effect [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(19): 159-168.
刘佳, 王利民, 杨玲波, 等. 基于 6S 模型的 GF-1 卫星影像大气校正及效果 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(19): 159-168.
- [12] Yang J, Wang J J, Wang F, *et al.* Error mechanism and calibration of infrared polarization detection in atmospheric transmission [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1001002.
杨杰, 汪杰君, 王峰, 等. 大气传输中红外偏振探测误差机理及校正 [J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1001002.
- [13] Wang J J, Yang J, Zhang W T, *et al.* Atmospheric correction of polarization remote sensing image by independent component analysis [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(1): 011001.
汪杰君, 杨杰, 张文涛, 等. 基于独立成分分析的偏振遥感图像大气校正 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(1): 011001.
- [14] Wang H B, Hu X Q, Zhang L, *et al.* Polarization correction for grating dispersive imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0812004.
王宏博, 胡秀清, 张璐, 等. 光栅色散型成像光谱仪的偏振校正方法研究 [J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0812004.
- [15] Su C L, Su L, Chen L F, *et al.* Retrieval of aerosol optical depth using NPP VIIRS data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(6): 977-982.
苏成林, 苏林, 陈良富, 等. 用 NPP VIIRS 数据反演气溶胶光学厚度 [J]. 遥感学报, 2015, 19(6): 977-982.
- [16] Xia L, Mao K B, Sun Z W, *et al.* Cloud detection application on NPP VIIRS [J]. *China Environmental Science*. 2014, 34(3): 574-580.
夏浪, 毛克彪, 孙知文, 等. 针对 NPP VIIRS 数据的云检测方法研究 [J]. 中国环境科学, 2014, 34(3): 574-580.
- [17] Hillger D, Seaman C, Liang C, *et al.* Suomi NPP VIIRS imagery evaluation [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2014, 119(11): 6440-6455.
- [18] Schueler C F, Lee T F, Miller S D. VIIRS constant spatial-resolution advantages [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(16): 5761-5777.
- [19] Yao W, Li Z J, Yao G, *et al.* Atmospheric correction model for Landsat images [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2011, 34(2): 251-256.
姚薇, 李志军, 姚珩, 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.
- [20] Tanré D, Herman M, Deschamps P Y, *et al.* Atmospheric modeling for space measurements of ground reflectance, including bidirectional properties [J]. *Applied Optics*, 1979, 18(21): 3587-3594.
- [21] Zhang Y. Investigation and application of

- atmospheric correction based on 6S radiative transfer model [D]. Changsha: Central South University, 2014.
- 张勇. 基于 6S 辐射传输模型的大气校正研究与应用 [D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [22] Vermote E F, Tanré D, Deuzé J L, *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(3): 675-686.
- [23] Zhou C Y, Liu Q H, Tang Y, *et al.* Comparison between MODIS aerosol product C004 and C005 and evaluation of their applicability in the north of China [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(5): 854-872.
- 周春艳, 柳钦火, 唐勇, 等. MODIS 气溶胶 C004、C005 产品的对比分析及其在中国北方地区的适用性评价 [J]. *遥感学报*, 2009, 13(5): 854-872.
- [24] Song Y H, Shi L L, Wang Y F, *et al.* Retrieve of lidar ratio of aerosols by iteration [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(1): 0113001.
- 宋跃辉, 时丽丽, 王玉峰, 等. 气溶胶激光雷达比的迭代反演 [J]. *中国激光*, 2016, 43(1): 0113001.
- [25] Kaufman Y J, Tanré D, Remer L, *et al.* Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1997, 102(27): 51-17.
- [26] Levy R C, Remer L A, Mattoo S, *et al.* Second-generation operational algorithm: retrieval of aerosol properties over land from inversion of moderate resolution imaging spectroradiometer spectral reflectance [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112: D13211.