

Landsat 8 OLI 城市地区气溶胶光学厚度遥感反演

孙林¹, 田信鹏¹, 于会泳¹, 韦晶¹, 麻盛芳², 王健³, 孙长奎⁴

- (1. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590;
2. 中国科学院遥感与数字地球研究所 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;
3. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875;
4. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘要: 在地表反射率较高、结构复杂的城市地区, 传统的浓密植被气溶胶反演算法难以适用。通过分析地物波谱库中的植被和土壤波谱信息, 模拟建立归一化植被指数 (NDVI) 与红、蓝波段地表反射率之间的相关关系, 提出使用 MODIS 植被指数产品 (MOD12) 确定地表反射率的方法, 实现该类型区域气溶胶光学厚度 (AOD) 反演。以 Landsat8 OLI 数据为例, 选取北京市为研究区进行反演实验, 使用 AERONET 地基观测数据与 MODIS 气溶胶产品 (MOD04) 对反演结果进行验证。结果表明, 当反射率较高时, NDVI 与红、蓝波段地表反射率仍存在较高的相关性, 利用该指数能够准确获取高反射率地区的地表信息, 算法反演结果与实测值具有较好的一致性, 总体相关系数达 0.966, 68% 的反演结果满足误差精度要求, 当 $AOD < 0.5$ 时, 有 82.3% 的结果满足精度要求, 较 MOD04 精度有了较大改善。

关键词: 城市地区; MODIS; Landsat8 OLI; 气溶胶光学厚度; 归一化植被指数

中图分类号: P407 文献标志码: A 文章编号: 1672-3767(2015)05-0047-09

Remote Sensing Inversion of Aerosol Optical Depth from Landsat 8 OLI over the Urban Area

Sun Lin¹, Tian Xinpeng¹, Yu Huiyong¹, Wei Jing¹, Ma Shengfang², Wang Jian³, Sun Changkui⁴

- (1. College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;
2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
3. School of Geography and Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
4. China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: Traditional aerosol inversion algorithm of dense dark vegetation is not applicable in the urban areas with high reflectance and complex surface structures. Based on the spectral analysis of soil and vegetation from spectral library, the simulated correlation between the normalized difference vegetation index (NDVI) and the surface reflectance of red, blue bands was established. And MODIS NDVI product (MOD12) was selected to determine the surface reflectance in order to realize the aerosol optical depth (AOD) inversion in urban areas. Landsat 8 OLI images over Beijing area were selected to carry out the aerosol inversion experiments. At last, the AERONET ground-measured data and the MODIS aerosol product were used to verify the experiment results. Results showed that there is still a high correlation between NDVI and surface reflectance of red, blue bands through the reflectance is higher. NDVI could be used to obtain the accurate surface information from high reflectance areas. The inversion results could achieve a high consistency with AERONET data, and the overall correlation coefficient is 0.966, with 68% AODs meeting accuracy requirements. When the AOD is less than 0.5, 82.3% of AODs meet the accuracy require-

收稿日期: 2015-03-23

基金项目: 山东省杰出青年基金项目 (JQ201211)

作者简介: 孙林 (1975—), 男, 山东枣庄人, 副教授, 博士, 主要从事大气探测方面研究. E-mail: sunlin6@126.com

ments, demonstrating that its precision has been greatly improved compared with MOD04.

Key words: urban areas; MODIS; Landsat 8 OLI; aerosol optical depth; normalized difference vegetation index

随着我国城市化进程加快,城市作为人类活动聚集地,受工业生产、生物燃烧等诸多影响,大气颗粒物已经成为影响城市空气质量的首要污染物^[1-2]。通过对颗粒物污染的监测研究对维护和改善生态环境具有重要意义^[3]。目前,传统大气颗粒物污染地基观测技术已不能满足高效、迅速、实时的观测要求,利用卫星遥感进行大范围动态监测已尤为迫切。但目前卫星气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)反演算法主要适用于地表反射率较低且稳定的海洋^[4-6]和浓密植被地区^[7-8]。由于城市地区多为人工建筑物等高反射率地表类型,在可见光波段具有较高的反射率,呈现高亮地表的特征,大气气溶胶信息在卫星辐射亮度信息中的标识性较低,此外城市地区地表结构复杂,方向性反射特性明显,给地表反射率的精确确定带来困难,并且对空间分辨率较低的传感器而言难以找到符合要求的浓密植被像元,因此气溶胶遥感变得非常困难。为了解决该问题,孙林^[9]利用几何光学模型构建了城市地区的双向反射分布函数模型(bidirectional reflectance distribution function, BRDF),在此基础上采用结构函数法反演获取了北京地区的 AOD 分布。该方法虽然考虑了由地表 BRDF 特性带来的影响,以及稀疏植被地区反演困难的问题,但由于结构函数法中图像匹配精度以及清晰图像地表反射率的获取困难,对反演结果带来较大误差而难以适用。

针对城市地区气溶胶反演存在的问题,提出基于地物类型主要为植被和土壤的假设,通过典型地物波谱中大量实测植被及土壤波谱数据,分析在不同植被覆盖度下,红蓝波段地表反射率与归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)之间的相关关系。模拟分析表明,当植被覆盖度较低、地表反射率较高时,地表反射率与 NDVI 之间仍具有较强的相关性,可以通过 NDVI 获得较高精度的地表反射率信息。本研究利用 MODIS NDVI 产品通过拟合公式来获取红蓝波段地表反射率数据,基于该数据实现 Landsat8 OLI 传感器城市地区 AOD 的遥感反演。此外,由于 OLI 传感器采用垂直观测方式,地表方向反射的影响也较低。

1 气溶胶反演原理与算法

1.1 基本原理

陆地上空气溶胶光学厚度卫星遥感反演通常采用可见光波段的红、蓝通道,利用植被在红、蓝波段较低反射率,具有明显的反射谷,并且波长较短受大气散射影响较强,卫星接收到的辐射能量与 AOD 具有较强敏感性的特点实现反演监测。假设大气水平均一、地表为朗伯体,在可见光波段,卫星接收到的辐亮度值 L 可以表示为

$$L(\tau_a, \mu_s, \mu_v, \varphi) = L_0(\tau_a, \mu_s, \mu_v, \varphi) + \frac{\rho_s}{1 - \rho_s S(\tau_a)} \mu_s F_0 T(\tau_a, \mu_s) T(\tau_a, \mu_v) \quad (1)$$

其中: $\mu_s = \cos \theta_s$, $\mu_v = \cos \theta_v$, 分别为太阳天顶角和观测天顶角的余弦值; φ 为传感器和太阳间的相对方位角($^\circ$); τ_a 为气溶胶光学厚度; $L_0(\mu_v)$ 为大气路径程辐射, $W/(m^2 \cdot sr)$; ρ_s 为地表反射率; S 为大气下界半球反照率; $\mu_s F_0$ 为大气顶层垂直方向上的太阳辐照度, $W/(m^2 \cdot sr)$; $T(\tau_a, \mu_s)$, $T(\tau_a, \mu_v)$ 分别为太阳到地表的大气下行透过率和地表到传感器的大气上行透过率。辐亮度值 L 与表观反射率 ρ^* 之间存在如下关系

$$\rho^* = \frac{\pi \times L \times D^2}{\mu_s \times E_s} \quad (2)$$

其中: D 为日地距离; E_s 为传感器波段平均太阳辐照度, $W/(m^2 \cdot sr)$ 。将式(2)带入式(1)可得

$$\rho^*(\tau_a, \mu_s, \mu_v, \varphi) = \rho_0(\tau_a, \mu_s, \mu_v, \varphi) + \frac{\rho_s}{1 - \rho_s S(\tau_a)} T(\tau_a, \mu_s) T(\tau_a, \mu_v) \quad (3)$$

从式(3)可以看出,卫星气溶胶遥感本质上是利用卫星辐射信息进行地气解耦的过程。在已知地表反射率 ρ_s 和卫星表观反射率 ρ^* 的情况下,通过式(3)即可获得反映大气信息的 ρ_0 , S 和 $T(\tau_a, \mu_s) \times T(\tau_a, \mu_v)$ 。因此地表反射率的精度对气溶胶光学厚度反演有着至关重要的影响,研究表明^[10], 0.01 的地表反射率误差会

带来大约 0.1 的反演误差。在实际气溶胶反演中,由于 $T(\tau_a, \mu_s) \times T(\tau_a, \mu_v)$ 总以乘积形式出现,因此可将大气总透过率 T 作为一个参数考虑,利用大气辐射传输模型模拟构建不同气溶胶模式、大气和观测几何条件下的查找表文件,包含代表大气信息的气溶胶光学厚度 τ_a 与 ρ_s 和 ρ^* 参数之间的对应关系信息,利用查找表插值计算实现气溶胶光学厚度反演。

1.2 反演算法

浓密植被法(dense dark vegetation, DDV)气溶胶遥感反演中,红、蓝波段的地表反射率通过 $2.13 \mu\text{m}$ 的表观反射率来确定^[10]:

$$\rho_{0.47}^s = \rho_{2.13}^* / 4; \rho_{0.66}^s = \rho_{2.13}^* / 2. \quad (4)$$

其反演区域范围限制在 $0.01 \leq \rho_{2.13}^* \leq 0.25$,因此能够反演的地表反射率被控制在: $\rho_{0.47}^s \leq 0.0625, \rho_{0.66}^s \leq 0.125$ 的范围内。根据植被和土壤地物反射特性可知,一般当植被覆盖度低于 0.75 时,地物蓝光波段的反射率大于 0.067;当植被覆盖度低于 0.5 时,红光波段的反射率大于 0.12。因此,传统气溶胶算法在稀疏植被地区反演困难。

DDV 算法在城市等高反射率地区无法反演,其原因主要是当反射率较高时,短波红外与红蓝波段的倍数关系不再稳定,并且气溶胶的变化在辐射信息中的标识性也有所降低。此外,地表反射率确定的困难也限制了该类型区域高精度遥感反演。实现城市地区气溶胶高精度遥感反演的关键是提高地表反射率的确定精度。研究假设城市地表类型由植被和土壤两种地物组成,利用美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)建立的波谱库中大量植被和土壤光谱数据,发现红光和蓝光波段的地表反射率与植被指数存在一定的线性关系

$$\begin{aligned} y_{\rho_{\text{red}}}^s &= k_1 x_{\text{NDVI}} + a_1; \\ y_{\rho_{\text{blue}}}^s &= k_2 x_{\text{NDVI}} + a_2. \end{aligned} \quad (5)$$

其中: $y_{\rho_{\text{red}}}^s$ 和 $y_{\rho_{\text{blue}}}^s$ 分别为红光和蓝光波段的地表反射率, x_{NDVI} 为对应的 NDVI 值, k 为比率, a 为截距。 k_1, a_1, k_2, a_2 确定过程如下。

1) 模拟不同植被覆盖度下地表波长(每 nm 间隔)反射率

利用波谱库中植被、土壤波谱数据,采用式(6)模拟不同植被覆盖度下每 nm 波长处地表反射率。

$$\rho(\lambda) = p \times \rho_{\text{veg}}(\lambda) + (1 - p) \times \rho_{\text{soil}}(\lambda) \quad (p = 0.0, 0.05, 0.10, 0.15, \dots, 1.0). \quad (6)$$

其中: p 为植被覆盖度; $\rho_{\text{veg}}(\lambda), \rho_{\text{soil}}(\lambda)$ 分别为植被和土壤反射率; $\rho(\lambda)$ 为不同植被覆盖度下波长 λ 处混合地物反射率。

2) 计算波段地表反射率

利用模拟的不同覆盖度下各波长处反射率数据以及 OLI 传感器的波谱响应函数,采用式(7)对不同波长区间(蓝光波段: 530~590 nm; 红光波段: 640~670 nm; 近红外波段: 850~880 nm)反射率进行积分,获取各波段的地表反射率:

$$\rho^s = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) d\lambda}. \quad (7)$$

其中: $S(\lambda)$ 为传感器在波长 λ 处的响应值, ρ^s 为对应波段的地表反射率。

3) 计算 x_{NDVI}

根据 NDVI 植被指数计算公式(8),获取不同植被覆盖度下的 x_{NDVI} :

$$x_{\text{NDVI}} = \frac{\rho_{\text{nir}}^s - \rho_{\text{red}}^s}{\rho_{\text{nir}}^s + \rho_{\text{red}}^s}. \quad (8)$$

其中: ρ_{nir}^s 和 ρ_{red}^s 分别表示采用式(7)积分获取的近红外和红光波段的地表反射率。

4) 相关性分析

将第二步获取的红蓝波段地表反射率与第三步获取的 x_{NDVI} 进行相关性分析,结果表明,红蓝波段反射率与 x_{NDVI} 之间的相关系数分别达到 0.997 7, 0.996 1, 为显著性相关,结果如图 1 所示,其线性相关模型为:

$$y_{\rho_{red}}^s = -0.2403x_{NDVI} + 0.2509, R^2 = 0.9977;$$

$$y_{\rho_{blue}}^s = -0.0445x_{NDVI} + 0.0958, R^2 = 0.9961. \quad (9)$$

基于上述模型(式(9)),利用 MODIS NDVI 产品确定地表反射率,实现 OLI 数据的 AOD 遥感反演。算法流程如图 2 所示。

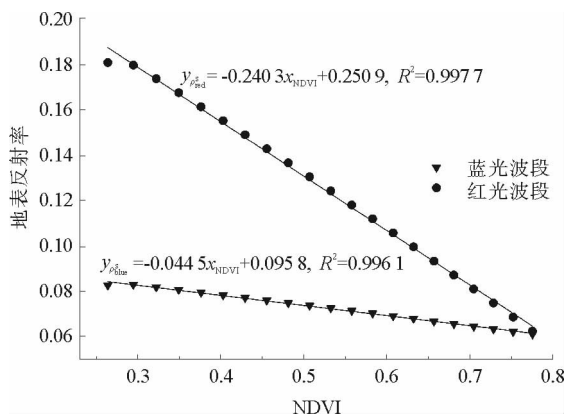


图 1 NDVI 与红、蓝光波段反射率线性回归分析

Fig. 1 The linear regression analysis of NDVI and red, blue bands of surface reflectance

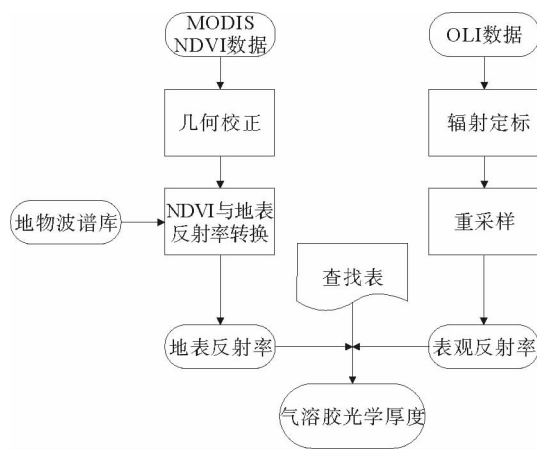


图 2 算法流程图

Fig. 2 Flowchart for aerosol optical depth inversion

2 遥感数据

2.1 Landsat 8 OLI 数据

2013 年 2 月 12 日发射的 Landsat 8 陆地卫星,是美国 NASA 和 USGS 为继续“陆地卫星数据连续性任务”(landsat data continuity mission, LDCM)的后续卫星之一^[11],卫星搭载 2 个传感器:陆地成像仪 (operational land imager, OLI)和热红外传感器 (thermal infrared sensor, TIRS),其中 OLI 是一个中等空间分辨率的多光谱相机,为保持与前期卫星数据较高的可比性和一致性,其参数设置与 Landsat 7 ETM+ 传感器基本相同^[12],表 1 给出了两卫星传感器的主要参数对比。

表 1 Landsat 7 ETM+ 与 Landsat 8 OLI 传感器主要参数对比

Tab. 1 Comparison of spectral bands between Landsat 8 OLI and Landsat 7 ETM+

Landsat 7 ETM+					Landsat 8 OLI				
波段	波段名	波长/ μm	空间分辨率/m	辐射分辨率/bit	波段	波段名	波长/ μm	空间分辨率/m	辐射分辨率/bit
					1	深蓝	0.43~0.45	30	12
1	蓝	0.45~0.52	30	8	2	蓝	0.45~0.51	30	12
2	绿	0.52~0.60	30	8	3	绿	0.53~0.59	30	12
3	红	0.63~0.69	30	8	4	红	0.64~0.67	30	12
4	近红外	0.77~0.90	30	8	5	近红外	0.85~0.88	30	12
5	短波红外	1.55~1.75	30	8	6	短波红外	1.57~1.65	30	12
7	短波红外	2.09~2.35	30	8	7	短波红外	2.11~2.29	30	12
8	全色	0.52~0.90	15	8	8	全色	0.50~0.68	15	12
6	热红外	10.40~12.50	60	8	9	卷云	1.36~1.38	30	12

2.2 MODIS NDVI 数据

MODIS 传感器是搭载在 Terra 和 Aqua 卫星平台的主要传感器之一, 每日或每两日即可获取一次覆盖全球的观测数据。目前由 MODIS 观测资料获取的描述陆地、海洋和大气特征的遥感数据产品, 广泛用于区域和全球尺度过程和趋势研究。MODIS 植被指数产品(MOD12)在已有植被指数算法基础上进行改进, 进一步减少大气、观测几何和云等外部因素, 以及叶冠背景等内在的非植被因素影响, 并增强其对植被的敏感度, 使其更适用于全球范围。该产品生成两种全球尺度的植被指数: 归一化植被指数和增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI)。其中, NDVI 是 AVHRR 全球 NDVI 产品的延续, 二者互相补充, 为业务化研究监测提供更长时间的资料序列。MODIS NDVI 产品包括 8 天和 16 天合成的无云时间序列数据, 有空间分辨率 250, 500, 1000 m 三种不同产品, 根据气溶胶空间分布特性以及 OLI 数据分辨率特点, 本文选择 500 m 分辨率产品作为研究区 NDVI 分布情况底图。

3 查找表构建

通过解算辐射传输方程(式(3)), 可以实现气溶胶光学厚度的反演。由于方程参数较多, 求解过程复杂, 为了节省运行时间, 可采用构建查找表方法计算。在给定大气模型和气溶胶模式的情况下, 使用 6S^[13] (the second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 第二代辐射传输模型)辐射传输模型模拟构建不同观测几何条件下的电磁波在大气中的传播过程。

构建查找表参数设置如下:

1) 观测几何。卫星成像过程中, 太阳、目标和卫星之间的几何关系可以用太阳天顶角、太阳方位角和观测天顶角、观测方位角四个参数表达, 其中, 太阳方位角和观测方位角可以用两者的相对方位角来描述。在使用 6S 模拟分析角度与卫星表观反射率敏感性基础上, 考虑到 OLI 传感器采用垂直观测的方式, 构建查找表时三个角度参数设置如下: ①太阳天顶角范围为 $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$, 步长间隔为 5° , 共 7 个参数; ②观测天顶角设置为 0° ; ③相对方位角为 130° 。

2) 大气模式。根据研究区的地理位置, 分别构建中纬度夏季和中纬度冬季两种大气模式下的查找表, OLI 数据成像日期在 4~9 月份之间选择夏季查找表, 其他月份选择冬季。

3) 气溶胶参数。考虑到气溶胶光学厚度一般大小范围以及反演精度, 6S 中气溶胶光学厚度参数共设置 15 个参数: 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。结合实际情况, 气溶胶模式选择大陆型气溶胶。

4) 地表反射率。在假设地表为朗伯体, 忽略地表 BRDF 影响的前提下, 依据图 3, 构建的查找表中红蓝波段地表反射率的设置区间范围分别为 $0 \sim 0.25$, $0 \sim 0.15$; 步长均为 0.01。

4 结果与验证

4.1 地表反射率确定

利用 MODIS NDVI 产品数据, 按照式(9)获取地表反射率数据。根据 OLI 数据空间覆盖范围, 得到相同区域地表反射率信息如图 3。统计结果表明, 满足浓密植被法反演要求的区域, 红光波段反射率值小于 0.125 仅有 53%, 蓝光波段反射率小于 0.0625 也仅占约 58%。

4.2 反演实验

利用 2013 和 2014 年两年间云覆盖较小的北京地区系列 OLI 数据, 基于 MODIS NDVI 产品获取的地表反射率数据, 进行反演实验。图 4 为部分反演结果图。从图中可以看出, 反演结果整体趋势合理, 变化缓慢, 分布连续。在北京市东南部的城市区域气溶胶光学厚度普遍偏大, 一般在 0.5 以上。

4.3 验证分析

为了验证算法的反演精度, 选取北京地区四个 AERONET(aerosol robotic network)地基站点: 香河站 (39.754°N , 116.962°E)、北京站 (39.977°N , 116.381°E)、CAMS 站 (39.933°N , 116.317°E) 和 RAD1 站 (40.005°N , 116.379°E) 进行验证分析。AERONET 是由美国 NASA 和法国 PHOTONS 机构建立的一个

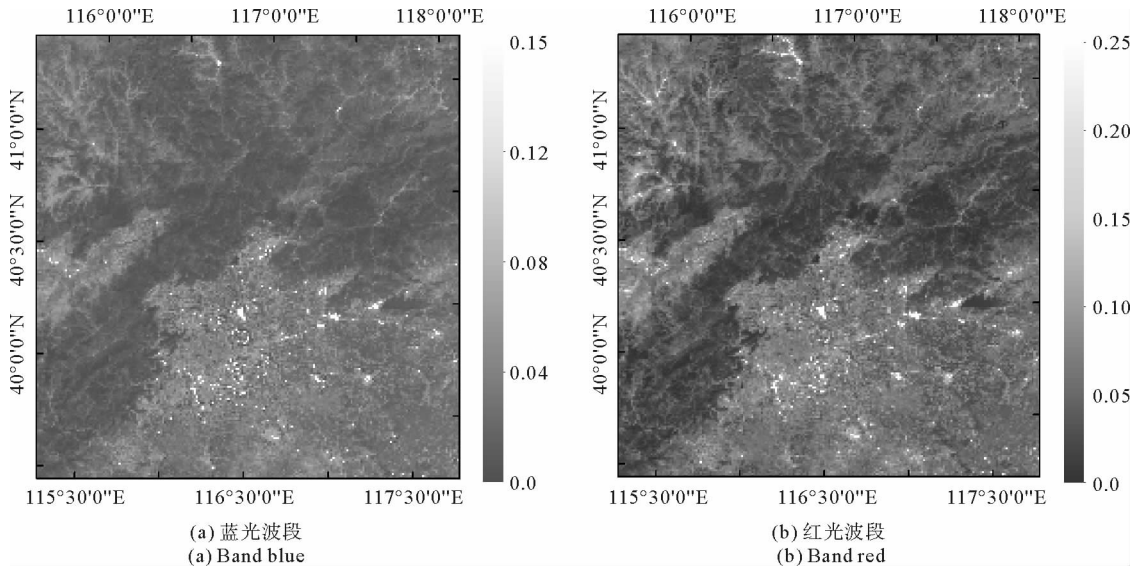


图 3 北京地区地表反射率分布图

Fig. 3 Surface reflectance distribution in Beijing

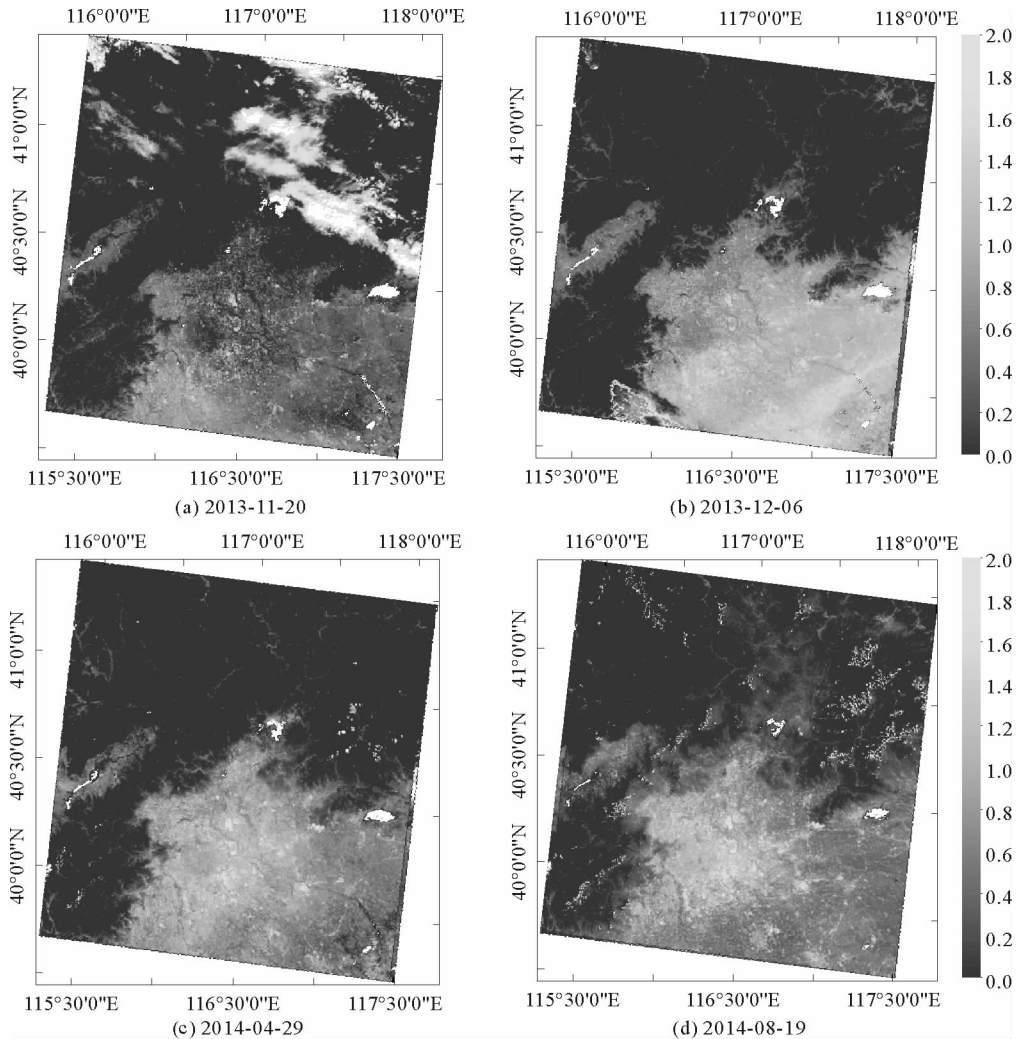


图 4 550 nm 处气溶胶光学厚度反演结果分布

Fig. 4 The distribution of aerosol optical thickness at 550 nm

全球分布的地基气溶胶观测网络,可以提供气溶胶光学厚度、散射相函数以及谱分布等参数观测结果^[14-15]。该观测网络采用法国 CIMEL 公司生产的 CE318 型太阳光度计。AERONET 根据数据质量控制程度每天发布三种等级产品:Level 1.0(未删选)、Level 1.5(云删选)和 Level 2.0(云删选和质量控制)。研究中选用 Level 1.5 数据对反演结果进行验证。AERONET 主要提供波长为 440,675,870 和 1 020 nm 的气溶胶光学厚度值。算法反演获得的是 550 nm 处的 AOD,为了将地基数据用于对反演结果的验证,采用 Ångström 计算公式(10)^[16-17],利用 440 nm 和 870 nm 通道观测值获得 550 nm 处的 AOD。

$$\tau_a(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (10)$$

其中: α 为 Ångström 指数; β 为大气浑浊度系数,与气溶胶粒子总数、粒子谱分布和折射指数有关。

由于大气中存在的薄云、残云以及云边缘等会造成像元污染,为了降低大气不稳定对反演结果的影响,选择与地基站点对应像元 10×10 邻域区间内反演平均值作为验证结果;同时,采用 Goloub^[18] 提出的将卫星过境前后 0.5 h 的地基观测值进行平均的方法作为地基观测结果。图 5 为实测值与反演结果的时间序列对比图。可以看出,两者总体趋势具有较好的一致性,反演值总体略大于实测值,大部分误差在 0.15 以内;所有观测结果的平均绝对误差为 0.14,相对误差在 30% 以内。

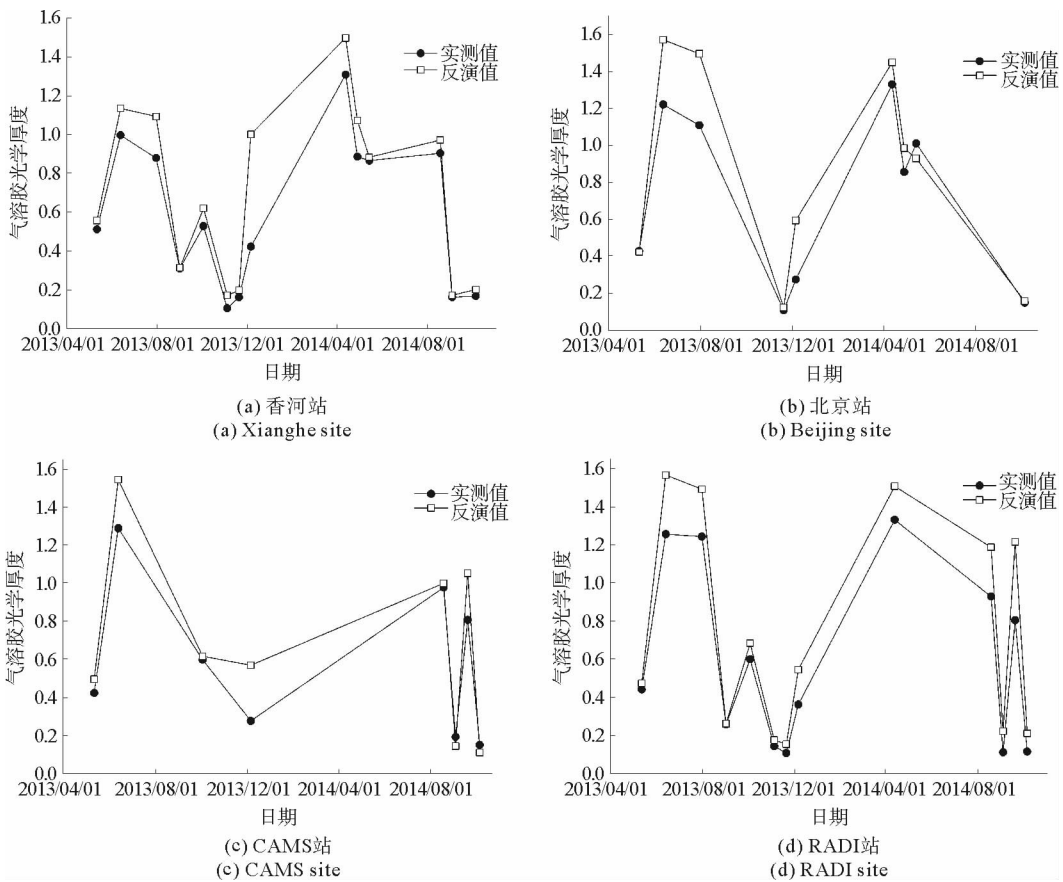


图 5 反演气溶胶光学厚度与地基观测结果变化

Fig. 5 Inversion of the AOD between the measurement results with the ground

MODIS 气溶胶光学厚度产品(MOD 04)首次给出了能覆盖全球的气溶胶资料,目前已达到一定精度,并且在气候模型计算、空气质量检测等方面得到广泛应用^[19],其产品误差标准^[20]为 $\Delta\tau_a = \pm 0.05 \pm 0.2\tau_a$ 。研究表明^[21],MODIS 气溶胶产品在中国北方荒漠地区可利用率差,占地面观测数据的 15%~55%,平均仅有 7%~39%,满足上述误差标准。本研究采用该评价标准对反演结果进行评估,分析结果如图 6 和表 2。从验证结果可以看出,本算法的反演结果与地面观测值有较强的相关性,总体相关系数达 0.966,有 68.2%

的点对在误差范围内,较 MOD 04 气溶胶产品有较大改进。

5 结论与讨论

使用 MODIS NDVI 产品,在分析大量地物光谱库数据基础上,模拟不同覆盖度下的混合地物反射率,统计建立两者间的相关模型,进而确定地表反射率信息,实现 Landsat 8 OLI 数据在城市高反射地区气溶胶光学厚度反演。通过 AERONET 地基气溶胶站点数据对反演结果进行验证,得出以下结论:

1)通过波谱库中大量植被和土壤地物反射率波谱曲线,拟合不同植被覆盖度下红、蓝波段地表反射率与 NDVI 之间的关系,发现两者具有较强的相关关系,相关系数在 0.9 以上。

2)利用 Landsat 8 OLI 序列图像,反演获得北京城市地区的气溶胶光学厚度,反演结果总体趋势与地基观测结果具有较高的一致性和相关性,总体相关系数达 0.966,相对误差在 30% 以内,68.2% 的点

对在 MOD 04 产品误差范围内,在精度上较 MOD 04 有较大改善和提高。

利用 MODIS NDVI 产品实现城市地区 Landsat 8 OLI 数据气溶胶光学厚度的反演算法,在一定程度上弥补了浓密植被法的不足。但还存在以下问题:

1)植被覆盖相对较少区域,地表方向反射特性对垂直观测的 Landsat 8 卫星信号的影响较低,未加以考虑。

2)由于在构建 NDVI 与反射率关系中,采用的是 USGS 波谱库中地物波谱曲线,与研究区内实际地物波谱有一定差异,并且假设地物类型仅为植被和土壤,会对反演结果带来一定误差。

参考文献:

[1]Huang D S,Xu J H,Zhang S Q. Valuing the health risks of particulate air pollution in the Pearl River Delta,China[J]. Environmental Science and Policy,2012,15(1):38-47.

[2]Fan X B,Liu W,Wang G H,et al. Size distributions of concentrations and chemical components in Hangzhou atmospheric particles[J]. China Environment Science,2011,31(1):13-18.

[3]韦晶,孙林,刘双双,等. 大气颗粒物污染对土地覆盖变化的响应[J]. 生态学报,2015,35(16):5495-5506.

Wei Jing,Sun Lin,Liu Shuangshuang,et al. Response analysis of particulate air pollution to Land-use and land-cover change [J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(16):5495-5506.

[4]Griggs M. Measurements of atmospheric aerosol optical thickness over water using ERTS-1 data[J]. Journal of the Air Pollution Control Association,1975,25(6):622-626.

[5]Mekler Y,Quenzel H,Ohring G,et al. Relative atmospheric aerosol content from ERTS observations[J]. Journal of Geophysical Research,Part C:Oceans,1977,82(6):967-970.

[6]Rao C R N,Stowe L L,McClain E P. Remote sensing of aerosols over the oceans using AVHRR data: Theory,practice and applications[J]. International Journal of Remote Sensing,1989,10(4/5):743-749.

[7]Kaufman Y J,Sendra C. Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery[J]. International Journal of Remote Sensing,1988,9(8):1357-1381.

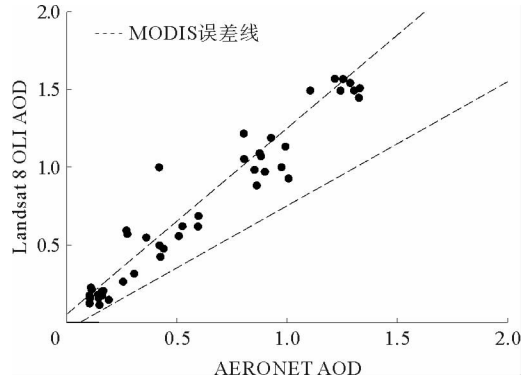


图 6 Landsat 8 OLI 气溶胶反演结果与 AERONET 对比图

Fig. 6 AOD from Landsat 8 OLI and AERONET

表 2 反演结果验证表

Tab. 2 The validation of retrieved AOD

AOD	观测数	平均绝对误差	相对误差/%	相关系数	误差线内比重/%
AOD<0.5	17	0.04	27.4	0.936	82.3
AOD>0.5	27	0.20	30.5	0.913	59.3
合计	44	0.14	29.3	0.966	68.2

- [8] Remer L A, Kaufman Y J, Tanré D, et al. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2005, 62(4): 947-973.
- [9] 孙林. 城市地区大气气溶胶遥感反演研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2006: 23-44.
- [10] Kaufman Y J, Remer L A, Vermote E F, et al. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D14): 17051-17067.
- [11] Irons J R, Loveland T R. Eighth landsat satellite becomes operational[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2013, 79(5): 398-401.
- [12] Roy D P, Qin Y, Kovalsky V, et al. Conterminous United States demonstration and characterization of MODIS-based Landsat ETM+ atmospheric correction[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 140: 433-449.
- [13] 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.
- [14] Holben B N, Slutsker I, Tanré D, et al. AERONET-A federated instrument network and data archive for aerosol characterization[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(1): 1-16.
- [15] Holben B N, Smirnov A, Eck T F, et al. An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D11): 12067-12097.
- [16] Dubovik O, King M D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from sun and sky radiance measurements[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(D16): 20673-20696.
- [17] Li Z Q, Niu F, Lee K H, et al. Validation and understanding of moderate resolution imaging spectroradiometer aerosol products (C5) using ground-based measurements from the handheld sun photometer network in China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(D22S07): 1-16.
- [18] Goloub P, Tanré D, Deuzé J L, et al. Validation of the first algorithm applied for deriving the aerosol properties over the ocean using the POLDER/ADEOS measurements[J]. *IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(3): 1586-1596.
- [19] Chu D A, Kaufman Y J, Ichoku C, et al. Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(12): 1617-1621.
- [20] Ichoku C, Kaufman Y J, Remer L A, et al. Global aerosol remote sensing from MODIS[J]. *Advances in Space Research*, 2004, 34(4): 820-827.
- [21] 王莉莉, 辛金元, 王跃思, 等. CSHNET 观测网评估 MODIS 气溶胶产品在中国区域的适用性[J]. *科学通报*, 2007, 52(4): 477-486.
- Wang Lili, Xin Jinyuan, Wang Yuesi, et al. CSHNET observation network to assess the applicability of MODIS aerosol products in China region[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(4): 477-486.

(责任编辑:高丽华)