

基于两天 MODIS 数据的气溶胶光学厚度反演

戴燃坡¹, 谢 勇², 马青玉¹

(1. 南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏 南京 210023)

(2. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094)

[摘要] 气溶胶光学厚度(AOD)的反演对研究大气污染和人类活动的环境影响具有重要意义. 利用连续两天的 Terra/MODIS 影像, 依据 0.47、0.55、0.66、0.86 μm 4 个通道的表观反射率与 AOD 在大气辐射传输中的关系, 构造闭合的非线性方程组, 通过求解方程组反演得到两天的 AOD 值, 并与 MODIS 业务化的 AOD 数据及 AERONET 地基太阳光度计观测值进行对比. 发现该算法的反演结果与地基观测值的相对误差在 30% 以内, 同时也对反演的气溶胶波长指数及浊度系数等和地基观测情况进行了对比与讨论, 证实反演结果与地基观测具有较好的一致性. 这种基于两天 MODIS 数据的气溶胶反演是利用多幅卫星影像来反演气溶胶光学厚度的一次有效尝试, 反演得到 AOD 值对环境污染监测有效补充.

[关键词] MODIS, 表观反射率, 气溶胶, 光学厚度

[中图分类号] X513 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2016)01-0139-06

Retrieval of Aerosol Optical Depth Using Two-Day MODIS Data

Dai Ranpo¹, Xie Yong², Ma Qingyu¹

(1. School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: Retrieval of aerosol optical depth (AOD) has great significance on the studies of air pollution and effect of human activities on the environment. Based on the relationship between apparent reflectance AOD in atmospheric radiation transmission, AOD of two consecutive days are obtained by solving the equations constructed by Terra/MODIS data, apparent reflectance of channel 0.47, 0.55, 0.66 and 0.86 μm . To validate the precision of the inversion algorithm, a preliminary comparative study is conducted between the observed AOD from AERONET station and the retrieved AOD from Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) over Taihu station. It is proved that the inversion error is less than 30%, and the aerosol exponents obtained by the proposed algorithm have nice consistency with the observations acquired by the ground sun photometers. The pilot study is an effective attempt to obtain AOD by using multiple satellite images, which can be used as a supplement for the monitoring of environmental pollution.

Key words: MODIS, apparent reflectance, aerosol, optical depth

大气气溶胶是指分散于大气中的固体微粒和液态粒子所构成的混合多相体系, 在大气辐射收支平衡和全球气候中起着举足轻重的作用^[1]. 气溶胶粒子主要来源于人类生产、生活、工业活动等人工源, 以及沙尘等自然源. 大气中的气溶胶粒子对太阳辐射有散射和吸收作用, 可以直接影响气候^[2]. 气溶胶的粒子大小、化学成分和过饱和度等特性能够通过影响云的形成及性质来间接影响气候^[3], 同时微小的气溶胶粒子可以通过人的正常呼吸进入并沉积在人体呼吸道, 其沉积位置及沉积速率会影响人体的健康^[4], 因此气溶胶污染物的监测与治理受到人们越来越多的关注. 气溶胶的生命周期一般只有几天, 且其浓度的空间变化性较大^[5], 仅利用地基观测很难获取大范围的较为精确的气溶胶数据以及其变化趋势. 卫星遥感观测具有观测范围广、实时性强等优势^[3], 使得卫星遥感观测在分析全球和区域气溶胶的性质、分布和变化中

收稿日期: 2015-08-09.

基金项目: 国家自然科学基金(11274176, 11474166).

通讯联系人: 马青玉, 博士, 教授, 研究方向: 电子技术、信息处理和声学. E-mail: maqingyu@njnu.edu.cn

显得尤为重要. 气溶胶作为大气的重要组成部分, 其光学厚度与大气浑浊程度有关^[6].

目前, 气溶胶光学厚度的反演方法可以分为两类. 一类是根据单幅遥感影像数据来反演 AOD 值, 其中 Kaufman^[7]的暗像元法和 Hsu^[8]的深蓝算法应用比较广泛, 暗像元法主要应用于暗地表的气溶胶光学厚度反演, 而深蓝算法主要用于亮地表的反演. 但是这些方法在反演之前都需要很多地表的先验知识, 如气溶胶类型、地表是否为可看作均一地表等. 另一类是通过对比同一地区在不同时相情形下的遥感影像数据, 得到给定区域不同时相的气溶胶光学厚度相对值, 这类方法的主要优点是不需要过多的依赖地表先验知识^[9]. 但是由于参考影像与反演影像间的获取时间、拍摄方向等因素的不同, 该类方法存在很多不可预测性误差. 这一类方法有 Flowerdew 等^[10]提出的双视角卫星图像反演算法, 唐家奎等^[11]结合卫星 Terra 和 Aqua 观测数据的双星协同反演算法, 卢士庆等^[12]通过建立一幅晴空下的大气辐射参数背景底图来反演气溶胶光学厚度的算法.

唐家奎等提出并验证了利用同类型不同卫星对同一地点在时间间隔较短获取的两次观测影像来反演陆地气溶胶光学厚度的算法是有效的, 且当所用卫星观测时间间隔变长后, 反演结果仍有一定的有效性. 因此当两次观测时间间隔延长到 24 h, 观测数据对于气溶胶光学厚度的反演应当具有一定的意义. 唐家奎等的思想主要有两点假设, 一是两次观测的地表反射特性不变, 二是两次观测的气溶胶性质不变^[11]. 在连续两天卫星观测都是晴空条件下, 地面一般不会出现沙尘、重污染等极端现象, 在两天的同一时刻对于给定地点的地表反射率变化较小^[7], 给利用两天卫星影像数据协同反演气溶胶光学厚度提供可能. 然而气溶胶的时空变化性较大^[5], 时隔一天两次观测的气溶胶性质必然会有一定的差异. 因此本文只假设两天观测的地表反射特性不变, 而并不假定气溶胶性质不变. 应用连续两天卫星影像对气溶胶光学厚度进行反演时, 在唐家奎等所使用的 3 个通道基础上增加 1 个通道的卫星数据, 并将反演数据与地面 AERONET 太湖监测站的观测数据进行比较, 验证气溶胶光学厚度反演数据的有效性. 对地观测卫星有许多, 但是对同一卫星连续两次观测间关系的研究却并不多. 这种利用连续两天卫星数据进行气溶胶光学厚度反演的方法是卫星对环境污染监测技术的补充, 为更好、更充分地使用卫星数据提供科学参考.

1 反演原理

对于给定的区域, 卫星观测得到的地表反射率 r 可以看作是大气光学厚度 τ_0^λ 及表观反射率数据 R 的函数. 通过求解地球-大气系统的辐射传输方程, Xue 和 Cracknell^[13]推算出地表反射率 r 与卫星遥感观测的表观反射率 R 之间存在如下关系:

$$r = \frac{(Rb - a) + a(1 - R)e^{(a-b)\varepsilon\tau_0^\lambda \sec \theta'}}{(Rb - a) + b(1 - R)e^{(a-b)\varepsilon\tau_0^\lambda \sec \theta'}}, \quad (1)$$

其中 $a = \sec \theta$, $b = 2$; θ 是卫星上传感器的天顶角, θ' 是太阳天顶角, 角度数据由卫星数据产品中提供或根据卫星数据产品中的地理数据计算得到; ε 是后向散射系数, 一般取值 0.1; τ_0^λ 是大气的厚度, 表示大气的浑浊程度. 另外大气光学厚度还受到大气分子的瑞利散射 τ_M^λ 和气溶胶粒子的散射 τ_A^λ 以及气体分子对大气光学厚度的贡献 τ_G^λ 的影响, 可以表示为:

$$\tau_0^\lambda = \tau_M^\lambda + \tau_A^\lambda + \tau_G^\lambda. \quad (2)$$

气体分子(如 O_3)对辐射传输的贡献影响 τ_G^λ , 相对大气粒子和气溶胶粒子的贡献影响较小, 可以忽略不计. 根据 Hansen 和 Travis^[14]的研究可知大气粒子的瑞利散射光学厚度可以表示成:

$$\tau_M^\lambda = 0.008\,569\lambda^{-4}(1 + 0.011\,3\lambda^{-2} + 0.000\,13\lambda^{-4})\frac{p}{1\,013.25}e^{-1.250\,17H}, \quad (3)$$

其中 p 是地面的大气气压值(单位: Pa), H 是地面的海拔高度(单位: km).

Ångström^[15]根据地面监测数据得出气溶胶光学厚度与观测通道的波长在波长较短的可见光、近红外波段满足:

$$\tau_A^\lambda = \beta\lambda^{-\alpha}, \quad (4)$$

其中 λ 是观测通道的波长, 浊度系数 β 表示大气气溶胶粒子的浓度情况, 波长指数 α 与气溶胶粒子的平均半径有关, 其取值范围为 $[0, 2]$, 且随着气溶胶粒子尺度的增大而变小^[16]. 将式(2)~式(4)代入式(1)中,

可以得到由表观反射率、Ångström 浊度系数 β 和波长指数 α 构成的地表反射率为:

$$r_{\lambda}(\alpha, \beta) = \frac{(Rb - a) + a(1 - R)e^{\frac{(a-b)e(0.008569\lambda^{-4} + 0.0113\lambda^{-2} + 0.00013\lambda^{-4}) - \frac{p}{1013.25}e^{-1.25017H} + \beta\lambda^{-\alpha}}}{(Rb - a) + b(1 - R)e^{\frac{(a-b)e(0.008569\lambda^{-4} + 0.0113\lambda^{-2} + 0.00013\lambda^{-4}) - \frac{p}{1013.25}e^{-1.25017H} + \beta\lambda^{-\alpha}}}}}{(Rb - a) + b(1 - R)e^{\frac{(a-b)e(0.008569\lambda^{-4} + 0.0113\lambda^{-2} + 0.00013\lambda^{-4}) - \frac{p}{1013.25}e^{-1.25017H} + \beta\lambda^{-\alpha}}}}}. \quad (5)$$

早在 1995 年, Flowerdew 等^[10]就提出地表反射率可以近似地表示为波长影响因子和几何影响因子两部分乘积, 对于连续两天同一卫星两次观测的地表反射率间的比例关系为:

$$K = r_{\lambda}^1 / r_{\lambda}^2, \quad (6)$$

其中 r_{λ}^1 是卫星 1 次观测到的地表反射率, r_{λ}^2 是卫星在另一个方向对同一区域观测得到的地表反射率, 比例系数 K 主要与观测方向有关, 受观测通道波长变化的影响较小^[17]. 在连续两天之间没有暴雨等极端天气且地表覆盖类型不发生变化的情况下, 假定两天中卫星在给定地点观测到的两次真实地表反射率相等, 则两天气溶胶光学厚度的改变和卫星观测到的两次地表反射率满足公式(6)的比例关系. 另外由公式(4)可知, 随着观测通道波长的增加, 气溶胶光学厚度会逐渐减小. 当观测通道波长增加到 $2.13 \mu\text{m}$ 时, 观测到的气溶胶光学厚度远小于可见光通道的观测值, 可以将 $2.13 \mu\text{m}$ 观测通道的 AOD 忽略不计^[3], 此时比例系数 K 就可以近似看作是 $2.13 \mu\text{m}$ 通道表观反射率数据的比值, 并可用于其它可见光通道的地表反射率的计算.

本研究所用的是连续两天无云天气下的 Terra/MODIS 可见光通道观测影像数据. 根据连续两天卫星观测的地表反射率间存在比例 K 的关系, 建立两天 α 和 β 的关系式为:

$$r_{\lambda}(\alpha_1, \beta_1) - K \cdot r_{\lambda}(\alpha_2, \beta_2) = 0, \quad (7)$$

式中, 第一天和第二天的地表反射率数据、Ångström 波长指数、浊度系数分别为 $r_{\lambda}(\alpha_1, \beta_1)$ 、 α_1 、 β_1 、 $r_{\lambda}(\alpha_2, \beta_2)$ 、 α_2 、 β_2 . 可见一个观测通道可以获得一个关系等式, 要构建闭合方程组, 则需要有 4 个观测通道参与, 而气溶胶光学厚度的影响会随着通道波长的增加而减小, 因此可以选取观测数据中通道波长较短的 MODIS 1~4 通道(波长分别为 $0.66, 0.86, 0.47, 0.55 \mu\text{m}$)来建立方程组进行反演. 将连续两天的 4 个通道观测得到的卫星数据, 分别代入式(5)中得到 8 个地表反射率的表达式, 然后把这 8 个地表反射率的表达式两个一组分别代入式(7), 得到关于两天浊度系数 β 和波长指数 α 的具有 4 个未知数的闭合方程组为:

$$\begin{cases} r_{0.47}(\alpha_1, \beta_1) - K \cdot r_{0.47}(\alpha_2, \beta_2) = 0 \\ r_{0.55}(\alpha_1, \beta_1) - K \cdot r_{0.55}(\alpha_2, \beta_2) = 0 \\ r_{0.66}(\alpha_1, \beta_1) - K \cdot r_{0.66}(\alpha_2, \beta_2) = 0 \\ r_{0.86}(\alpha_1, \beta_1) - K \cdot r_{0.86}(\alpha_2, \beta_2) = 0 \end{cases}, \quad (8)$$

其中, K 值为中心波长为 $2.13 \mu\text{m}$ 的 MODIS 7 通道两天表观反射率的比值. 通过最速下降法和牛顿迭代法相结合的数值分析方法, 求解非线性方程组(8), 可以得到 Ångström 指数 α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 的近似解, 代入式(4)中计算出相应的气溶胶光学厚度数据.

2 数据处理

MODIS 是 EOS(地球观测系统)卫星上的唯一供用户无偿使用的星载仪器, 而且其观测数据实时向全世界直接广播. MODIS 可以提供可见光、近红外光和红外光共 36 个通道的全球观测数据, 其数据的空间分辨率包含 250 m 、 500 m 和 1000 m 3 个尺度, 扫描宽度为 2330 km , 为陆地、海洋、大气的研究提供较高分辨率的监测数据^[3]. EOS 卫星主要有 2 颗, 都以观测地球表面为主要目的, 一颗是 Terra 卫星, 其过境时间是上午 10 点半左右, 另一颗是下午 1 点半左右过境的 Aqua 卫星.

本文所用卫星影像是从 <http://modis.gsfc.nasa.gov/> 下载的 Terra 卫星 2011 年 6 月~2012 年 3 月的 MODIS L1B 和 L2 数据, 包含 MOD02HKM 及与之对应的地理校正数据 MOD03、气溶胶光学厚度数据 MOD04L2. MOD02HKM 数据包含以 500 m 分辨率存储的 1 通道~7 通道的表观反射率数据, 其波长范围为 $0.459 \mu\text{m}$ ~ $2.135 \mu\text{m}$; MOD03 数据包含了同名像素点的经纬度、卫星和太阳的天顶角、方位角等用于地理校正的几何参数; MOD04L2 包含的是 MODIS 业务化气溶胶光学厚度数据, 其分辨率是 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$. 原始 MODIS 数据是以 HDF-EOS 格式存储的, 因此需要经过格式转换、重投影等操作, 最终转换成

WGS-1984 坐标下的数据,并进行辐射校正及云检测,以得到无云天气下的有效表观反射率数据,然后进行日期筛选,得到日期连续的两天的观测数据,用来实现反演算法。

国际 AERONET 气溶胶监测网的太湖站($31^{\circ}25'15''N$, $120^{\circ}12'55''E$)为反演结果检验提供气溶胶光学厚度的地面观测数据。AERONET(<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>)是一个地基气溶胶观测的全球性网络,主要是由美国国家宇航局(NASA)发起组织的。AERONET 的所有地基站点统一采用 CE-318 太阳光度计,由法国的 CIMEL 公司制造,可以获取 340、380、440、500、670、870、1 020 和 1 640 nm 共 8 个通道的气溶胶光学厚度数据。在 AERONET 上下载太湖监测站的气溶胶光学厚度观测数据(level 1.0)之后,根据卫星具体的过境时间,从地面气溶胶监测数据中提取出 MODIS 卫星过境时刻最近一小时的地面气溶胶光学厚度观测数据,与卫星数据反演的气溶胶光学厚度进行对比研究。

3 结果与讨论

本文以 AERONET 太湖监测站站点为中心取 $1.5\text{ km}\times 1.5\text{ km}$ 的区域作为研究区,利用 2011 年 9 月 1 日和 2 日的 Terra/MODIS 卫星数据,通过本文提出的算法求得两天的 Ångström 指数分别为 $\beta_1=0.1599$ 、 $\alpha_1=1.4910$ 、 $\beta_2=0.4149$ 、 $\alpha_2=1.3580$ 。基于浊度系数与波长指数的分布计算得到前后两天 4 个通道的气溶胶光学厚度,并与地面监测站观测数据进行对比,结果如图 1 所示,其中横坐标是观测波段的中心波长,纵坐标是气溶胶光学厚度值,图 1(a)是反演得到的第一天的 AOD,图 1(b)是得到的第二天的 AOD。结果表明,两天反演的气溶胶光学厚度随波长变化的情况与地面观测结果符合,具有较好的一致性,卫星数据反演得到的 AOD 略高于地基观测 AOD,但在卫星反演误差的可接受范围之内。

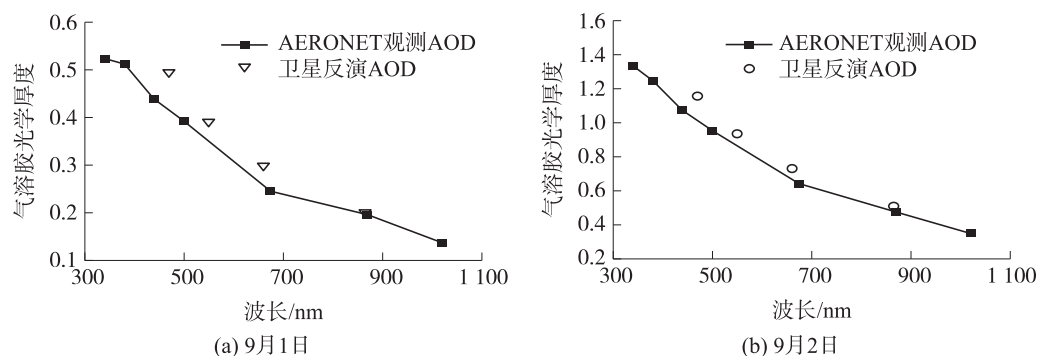


图1 太湖站卫星反演AOD与AERONET观测AOD对比

Fig.1 Comparison of the observed AOD from AERONET and the retrieved AOD from MODIS over Taihu station

当连续三天都是无云晴天时,在利用卫星资料反演 AOD 的结果里,中间的那一天分别与前一天、后一天卫星数据协同反演,得到 2 组不同的反演结果。2011 年 11 月 12 日分别与 11 日、13 日卫星资料协同反演得到的 AOD 数据,并与地基观测数据的对比结果如图 2 所示。与前一天反演得到 12 日的浊度系数为 0.174 4,波长指数为 1.601 4,与后一天反演得到的 12 日浊度系数为 0.206 1,波长指数为 1.604 2。计算得到的两个波长指数的值基本相等,浊度系数的绝对误差仅有 0.031 7,可以认为两组反演结果都是有效的。

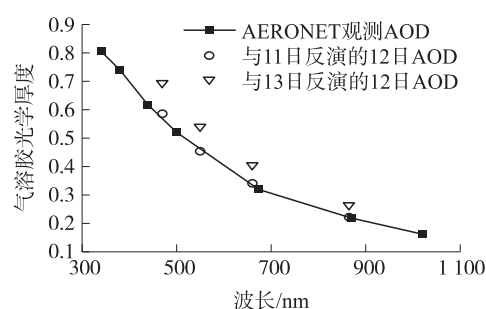


图2 太湖站同一天与前一天、后一天卫星分别反演的 AOD 与 AERONET 观测 AOD 对比(2011-11-12)

Fig.2 Comparison of the observed AOD from AERONET and the retrieved AOD from MODIS over Taihu station(2011-11-12)

将反演得出的 AOD 与地面观测结果进行比较,筛选受云层影响的数据,共得到 44 天的有效数据进行结果评价,其中同一天的两个不同反演结果都参与评价。依据浊度公式,对同一天的地面太阳光度计观测得到的多个通道数据以波长为自变量、地面气溶胶为因变量,利用模型 $\tau_{\lambda}^A = \beta \lambda^{-\alpha}$ 进行线性拟合,提取出太阳光度计观测的浊度系数 β 及波长指数 α ,并与反演获得的结果进行对比,其结果如图 3 所示。图中实线是反演结果与实测结果的拟合直线,虚线是反演结果与实测结果相等的理想直线,反演结果和地面

观测情况对比结果满足显著性为 0.01 的显著性检验. 由图 3(a)可以明显看出,大部分反演获得到的气溶胶波长指数要比地面实际观测值要高一些,同时由于波长指数与气溶胶粒子的平均半径成反比,可得卫星反演得到的气溶胶粒子平均半径要小于地面观测的结果.

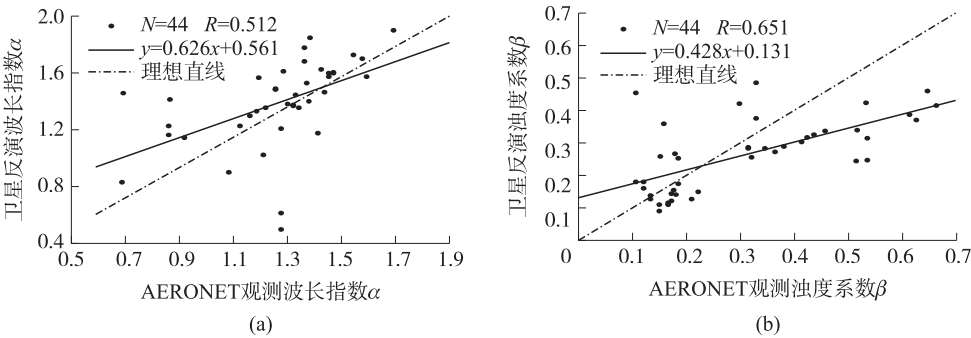


图3 太湖站卫星反演的气溶胶波长指数 α (a)、浊度系数 β (b)与 AERONET 观测数据的对比(0.55 μm)
Fig.3 Comparison between the observed exponents α (a)and β (b)from AERONET and the retrieved exponents from MODIS over Taihu station(0.55 μm)

利用卫星数据,通过浊度公式可以求出浊度系数 β 及波长指数 α ,但由于地面观测仪器没有中心波长为 0.55 μm 波段的观测通道,因此可以利用线性插值法计算出 0.55 μm 波段的地面气溶胶光学厚度,得到的结果和反演的 AOD 比较如图 4 所示.可以看出协同反演得到的 AOD 与地面观测结果具有较好的相关性,其相关系数 R 为 0.737,满足显著性为 0.005 的显著性检验.

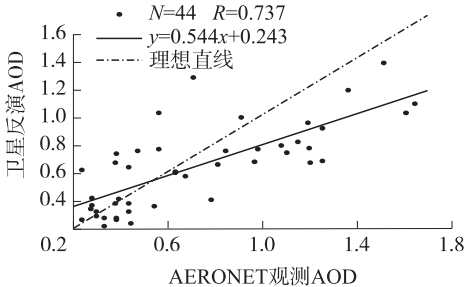


图4 地面观测与反演得到的AOD相关图(0.55 μm)

为了比较本反演算法和 MODIS 业务化气溶胶光学厚度数据 MOD04 的精度,表 1 中给出了 2011 年 10 月份 4 组 8 天的 0.55 μm 波段 AOD 反演结果、MOD04 气溶胶光学厚度和 AERONET 太湖监测站太阳光度计观测值的数据,其中,10 月 5 日两个不同卫星前一天和后一天分别反演的结果的绝对误差是 0.110 4,相对误差是 17.2%,虽然有一定的误差,但仍然分布在地面监测值的附近,可以认为有效. AERONET 太湖站的地面观测数据与 MOD04、卫星反演 AOD 都存在一定的相对差异,这可能是由气溶胶粒子较强的吸湿特性^[18]引起的,而本反演算法未考虑相对湿度对气溶胶光学厚度的影响.另外可见,大部分的卫星反演 AOD 与 AERONET 地基观测数据的相对误差在 $\pm 35\%$ 以内,只有极少数天(如 10 月 19 日)的相对误差超过 70%,它们的误差都比 MOD04 数据的误差小,说明本反演算法在太湖监测站周围的反演精度要比 MODIS 业务化的数据产品好.

表1 太湖站卫星反演与 AERONET 观测的气溶胶光学厚度的误差(0.55 μm)

Table 1 Deviation between the observed AOD from AERONET and the retrieved AOD from MODIS over Taihu station(0.55 μm)							
组号	日期	时间	气溶胶光学厚度(AOD)			相对误差	
			卫星反演	MOD04	AERONET	MOD04—AERONET	卫星反演—AERONET
1	10月4日	11:20	0.511 1	0.708 0	0.383 4	84.7%	33.3%
	10月5日	10:25	0.530 0	0.734 0	0.558 0	31.5%	-5.0%
2	10月5日	10:25	0.640 4	0.734 0	0.558 0	31.5%	14.8%
	10月6日	11:10	0.888 0	1.037 0	0.705 3	47.0%	25.9%
3	10月8日	10:00	0.637 0	0.964 0	1.252 8	-23.0%	-49.2%
	10月9日	10:05	0.579 3	0.655 0	0.922 5	-29.0%	-37.2%
4	10月18日	11:35	0.253 8	0.382 0	0.275 8	38.5%	-8.0%
	10月19日	10:40	0.195 4	0.412 0	0.684 0	-39.8%	-71.4%

4 结语

本研究选取连续两天的 Terra 卫星的遥感数据,通过构建方程组来反演气溶胶光学厚度等信息,并将本算法反演的 AOD 与 MODIS 业务化气溶胶光学厚度数据和 AERONET 太湖监测站的观测数据进行精度检验,结果表明本反演结果与太湖监测站的地基实测数据具有较好的相关性,且比 MODIS 业务化气溶胶数据的误差小。仅在连续两天间的地表情况变化不大,即基本满足两天地表反射率值相等时才适用。当两天的地表反射特性发生显著改变时,该算法便不再适用。在实际应用中,利用一天单幅卫星数据进行气溶胶反演时,通常都需要事先得到地面地表反射率数据等地面信息,而本反演算法利用两天卫星表面反射率数据构建闭合方程组来求解气溶胶光学厚度,规避了对地表反射率等信息的需求风险,因此该算法的应用范围不受地表类型的限制。同时本反演算法使用十分常见的可见光 4 个通道,还可以适用于环境 1 号等环境监测卫星的气溶胶光学厚度反演,是利用多幅卫星影像来反演气溶胶光学厚度的一次有效尝试,具有一定的应用前景。

[参考文献]

- [1] 付培健,王世红,陈长和. 探讨气候变化的新热点:大气气溶胶的气候效应[J]. 地球科学进展,1998,13(4):387-392.
- [2] CHARLSON R J, SCHWARTZ S E, HALES J M, et al. Climate forcing by anthropogenic aerosols[J]. Science, 1992, 255(5 043):423-430.
- [3] KING M D, KAUFMAN Y J, MENZEL W P, et al. Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the moderate resolution imaging spectrometer(MODIS)[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 1992, 30(1):2-27.
- [4] 李福生,徐新喜,孙栋,等. 气溶胶颗粒在人体上呼吸道模型内沉积的实验研究[J]. 医用生物力学,2013,28(2):135-141.
- [5] 周景林. 大气气溶胶研究中的一些问题[J]. 气象科技,1985,13(4):71-76.
- [6] 赵秀娟,陈长和,袁铁,等. 兰州冬季大气气溶胶光学厚度及其与能见度的关系[J]. 高原气象,2005,24(4):617-622.
- [7] KAUFMAN Y J, TANRÉ D, REMER L A, et al. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer[J]. Journal of geophysical research, 1997, 102(D14):51-67.
- [8] HSU N C, TSAY S C, KING M D, et al. Deep blue retrievals of asian aerosol properties during ACE-Asia[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2006, 44(11):3 180-3 195.
- [9] 殷守敬,吴传庆,王桥,等. 多时相遥感影像变化检测方法研究进展综述[J]. 光谱学与光谱分析,2013,12(12):3 339-3 342.
- [10] FLOWERDEW R J, HAIGH J D. Retrieval of aerosol optical thickness over land using the ATSR-2 Dual-Look Satellite Radiometer[J]. Geophysical research letters, 1996, 23(4):351-354.
- [11] 唐家奎,薛勇,虞统,等. MODIS 陆地气溶胶遥感反演——利用 TERRA 和 AQUA 双星 MODIS 数据协同反演算法[J]. 中国科学,2005,35(5):474-481.
- [12] 卢士庆,陈渭民,高庆先. 使用 6S 模型由 GMS5 卫星资料反演陆地大气气溶胶光学厚度[J]. 大气科学学报,2006,29(5):669-675.
- [13] XUE Y, CRACKNELL A P. Operational bi-angle approach to retrieve the earth surface albedo from AVHRR data in the visible band[J]. International journal of remote sensing, 1995, 16(3):417-429.
- [14] HANSEN J E, TRAVIS L D. Light scattering in planetary atmospheres[J]. Space science reviews, 1974, 16(4):527-610.
- [15] ÅNGSTRÖM A. The parameters of atmospheric turbidity[J]. Tellus, 1964, 16(1):64-75.
- [16] 冯建东,黄艇,陈长和,等. 利用 MODIS 资料遥感水体上空气溶胶粒子尺度的数值试验[J]. 高原气象,2006,25(1):110-115.
- [17] VEEFKIND J P, LEEUW G D, STAMMES P, et al. Regional distribution of aerosol over land, derived from ATSR-2 and gome[J]. Remote sensing of environment, 2000, 74(3):377-386.
- [18] MARKOWICZ K M, FLATAU P J, QUINN P K, et al. Influence of relative humidity on aerosol radiative forcing: an ace-asia experiment perspective[J]. Journal of geophysical research, 2003, 108(D23):301-312.

[责任编辑:丁 蓉]