



利用SARA结合高分一号数据反演气溶胶光学厚度

沈维青^{1,2} 张 丰^{1,2} 刘仁义^{1,2} 杜震洪^{1,2}

1 浙江大学地球科学学院,浙江 杭州,310027

2 浙江大学浙江省资源与环境信息系统重点实验室,浙江 杭州,310028

摘 要:简化的气溶胶反演算法(simplified aerosol retrieval algorithm, SARA)摆脱了传统气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)反演算法对查找表的依赖,在暗地表区域和亮地表区域均有较好的反演效果。由于中分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)数据得到的AOD空间分辨率不足,因此在SARA的基础上结合更高空间分辨率的高分一号(GF-1)宽视场(wide field of view, WFV)数据开展了AOD反演研究。精度验证结果表明,反演结果与地基观测值具有较高的一致性,相关系数为0.962,均方根误差为0.073,平均绝对误差为0.051,预期误差为88.6%;反演结果与同期的MODIS气溶胶产品相比,空间上分布较为一致,且具有较高的空间覆盖度、分辨率和精度。针对高分数据的算法适用性研究表明,GF-1 WFV相机的观测几何和辐射定标误差引起的反演误差较小,绝对误差均在0.04以内,相对误差均在10%以内。

关键词:简化的气溶胶反演算法;高分一号;遥感反演;气溶胶光学厚度

中图分类号:P407;TP79

文献标志码:A

大气气溶胶是指悬浮在空气中的液态或固态的颗粒^[1],对空气质量、人类健康、安全出行等有重要影响,高效监测气溶胶已逐渐成为研究热点。

传统的气溶胶监测方法是建立地面观测站,如全球气溶胶监测网项目(aerosol robotic network, AERONET),在全球范围内布设了超过500个观测站点,但观测站点分布比较离散且不均匀,因此无法有效反映气溶胶空间分布的整体状况^[2]。

卫星遥感能够长期、连续地进行对地观测,为大范围的气溶胶观测和研究提供了条件^[3-4]。目前已有多种气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)的遥感反演方法,如暗像元法^[5]、结构函数法^[6]与深蓝算法^[7]等。暗像元法利用浓密植被及暗色土壤区的红、蓝波段的地表反射率与短波红外存在线性相关的特点,在确定了红光和蓝光波段的地表反射率后,通过选择合适的气溶胶模型,建立查找表进行气溶胶反演。该方法对

暗地表的反演效果比较理想,但不适用于亮地表。针对干旱地区或城市等亮地表区域的气溶胶反演,文献[6]提出了结构函数法,该方法假设在一段时间内同一地区的地表反射率可视为固定不变,在此基础上,以清洁日大气作为参考,来反演污染日的AOD。但由于大气污染的影响,清洁日影像的获取日益困难,限制了该方法的应用。文献[7]提出了深蓝算法,该算法需要借助深蓝波段的地表反射率库,目前已经成功运用于干旱和半干旱区域,但深蓝波段的地表反射率库的建立是一个难点。上述传统的AOD反演方法均需要构建查找表,具有较大的复杂性和不确定性。文献[8]提出了一种不需要借助查找表的简化的气溶胶反演算法(simplified aerosol retrieval algorithm, SARA),并采用中分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)数据分别在中国香港^[8]和北京^[9]地区做了验证。验证结果表明,SARA在城市、郊区、农村等区域均

收稿日期:2019-08-02

项目资助:国家自然科学基金(41471313, 41671391);国家重点研发计划(2018YFB0505000, 2016YFC0803105);国家公益性行业科研专项(201505003);高分辨率对地观测重大专项(E20150036)。

第一作者:沈维青,硕士,主要研究方向为气溶胶光学厚度反演、地表温度反演。shenwq@zju.edu.cn

通讯作者:张丰,博士,副教授。Zfcarnation@zju.edu.cn

能达到较好的反演效果,适用于反演地表反射率差异较大区域的 AOD,但是利用 MODIS 数据反演得到的 500 m 分辨率的 AOD 产品仍然无法满足气溶胶监测的精细化需求。

高分一号 (GF-1) 卫星上搭载的宽视场 (wide field of view, WFOV) 相机的空间分辨率为 16 m, 通过 4 台相机 (WFOV1、WFOV2、WFOV3、WFOV4) 的组合可实现 800 km 幅宽的大视场观测, 在时间分辨率上可实现 4 天覆盖中国全境^[10]。目前, 针对 GF-1 遥感数据的气溶胶反演研究已经全面展开。文献[11]研究了暗像元法在 GF-1 WFOV 数据中的应用, 该方法在植被区域的反演误差在 10% 以内, 但对于城市型气溶胶, 该方法的反演误差较大。文献[12]应用深蓝算法进行 GF-1 WFOV 数据反演陆地气溶胶, 并利用 MODIS 地表反射率产品获取深蓝波段反射率, 反演结果总体上稍高于地面观测值。文献[13-14]集成了暗目标法和深蓝算法, 实现了暗地表和亮地表区域的气溶胶反演, 该方法在保证精度的同时, 提高了反演结果的空间覆盖度, 但反演流程较为复杂。

本文基于 SARA, 以北京市和河北省廊坊市为研究区, 开展 GF-1 卫星 WFOV 数据的气溶胶光学厚度反演, 利用 AERONET 地基观测结果进行验证, 与 MODIS 气溶胶产品进行对比, 并针对 GF-1 WFOV 数据特点进行了算法适用性研究。

1 SARA 基本原理

传统的气溶胶反演算法利用辐射传输模型 (radiative transfer model, RTM) 构建查找表, 通过查找表匹配卫星观测值确定气溶胶光学厚度。查找表的建立需要大气模式、气溶胶类型等参数作为输入信息, 这些参数需要根据早期观测确定或根据实测数据自定义, 具有较大的难度和不确定性。

SARA 没有构建查找表, 而是直接利用 RTM 计算 AOD。SARA 反演 AOD 的原理基于 3 个假设: (1) 地表为朗伯源; (2) 只考虑单次散射; (3) 单次散射反射率与非对称因子在反演区域不会随着位置的改变而改变。其中, 前两条是算法成立的必要前提, 第 3 条是为了确保研究区域的反演结果均具有较高精度^[15]。

依据大气辐射传输模型, 卫星接收到的表观反射率计算如下^[16]:

$$\rho_T(\lambda, \theta_s, \theta_v, \phi) = \rho_A(\lambda, \theta_s, \theta_v, \phi) + \rho_R(\lambda, \theta_s, \theta_v, \phi) + \frac{T(\theta_s)T(\theta_v)\rho_s(\lambda, \theta_s, \theta_v, \phi)}{1 - \rho_s(\lambda, \theta_s, \theta_v, \phi)S(\lambda)} \quad (1)$$

式中, θ_s 、 θ_v 分别为太阳天顶角和观测天顶角; λ 、 ϕ 分别为波长、相对方位角; $\rho_T(\lambda, \theta_s, \theta_v, \phi)$ 为表观反射率; $\rho_A(\lambda, \theta_s, \theta_v, \phi)$ 为气溶胶反射率; $\rho_R(\lambda, \theta_s, \theta_v, \phi)$ 为气溶胶分子引起的瑞利反射率; $T(\theta_s)$ 、 $T(\theta_v)$ 分别为太阳到地表的大气下行透过率和地表到传感器路径上的上行透过率; $\rho_s(\lambda, \theta_s, \theta_v, \phi)$ 为地表反射率; $S(\lambda)$ 为大气后向散射比。

在单次散射的假设下, 气溶胶光学厚度 $\tau_{a,\lambda}$ 与气溶胶反射率 $\rho_A(\lambda, \theta_s, \theta_v, \phi)$ 的关系可以近似表示为^[17]:

$$\tau_{a,\lambda} = \frac{4\mu_s\mu_v\rho_A(\lambda, \theta_s, \theta_v, \phi)}{\omega_0 P_a(\theta_s, \theta_v, \phi)} \quad (2)$$

式中, ω_0 为单次散射反照率, 表示散射系数和消光系数的比值; μ_s 、 μ_v 分别为太阳天顶角 θ_s 和观测天顶角 θ_v 的余弦值; $P_a(\theta_s, \theta_v, \phi)$ 为气溶胶散射相函数, 计算公式如下:

$$P_a(\theta_s, \theta_v, \phi) = \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g\cos(\pi - \Theta))^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

式中, Θ 为散射相位角; g 为不对称因子, 用于描述前向散射和后向散射的相对优势, 在大多数气溶胶模型中, 不对称因子保持不变。则 AOD 的计算公式为:

$$\tau_{a,\lambda} = \frac{4\mu_s\mu_v}{\omega_0 P_a(\theta_s, \theta_v, \phi)} \left[\rho_T(\lambda, \theta_s, \theta_v, \phi) - \rho_R(\lambda, \theta_s, \theta_v, \phi) - \frac{T(\theta_s)T(\theta_v)\rho_s(\lambda, \theta_s, \theta_v, \phi)}{1 - \rho_s(\lambda, \theta_s, \theta_v, \phi)S(\lambda)} \right] \quad (4)$$

式(4)只存在 ω_0 、 g 和 $\tau_{a,\lambda}$ 3 个变量, 因此只要确定了 ω_0 和 g , 就可以用定点迭代法求解 AOD 值^[7]。根据文献[18-19], 本文将单次散射反照率 ω_0 和不对称因子 g 的范围限定在 0.5~1.0, 步长为 0.05, 通过两层循环, 测试每一种组合, 找到使 $\tau_{a,\lambda}$ 与 AERONET 地基观测 AOD 值最接近的 ω_0 和 g , 并且假定一天内同一时刻研究区的 ω_0 和 g 保持不变, 进而计算得到整个研究区的 AOD。

2 实验数据与处理

本文所用数据包括北京及河北省廊坊地区的 GF-1 卫星的 WFOV 数据、MODIS 数据、AERONET 地基观测数据、全球数字高程模型 (global digital elevation model, GDEM) 30 m 分

分辨率的高程数据和气压数据。

2.1 GF-1数据

在中国资源卫星应用中心数据平台(<http://www.cresda.com/>)获取云量较少的GF-1 WFV数据进行反演,共计17景。

对GF-1 WFV数据的预处理包括几何校正、表观反射率计算和云剔除^[13]等。为了提高运算速度和信噪比,将WFV数据重采样至100 m分辨率,并在此基础上利用研究区的矢量边界对遥感影像进行裁切。

2.2 MODIS数据

在美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)官方网址(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)下载与GF-1卫星WFV数据具有相同区域、过境时间最接近的气溶胶产品数据(MOD04)和三级地表反射率数据(MOD09A1),其中MOD04用于对比本文反演结果,MOD09A1用于获取地表反射率。

1)MODIS气溶胶产品融合

MODIS气溶胶产品有两种,一种是利用暗目标法反演得到的3 km空间分辨率的气溶胶产品MOD04_3K;另一种是利用深蓝算法反演得到的10 km空间分辨率的气溶胶产品MOD04_L2。

暗像元法气溶胶产品相比于深蓝算法产品拥有更高的精度^[20],但是有效覆盖面积较少。本文将MOD04_3K和MOD04_L2进行融合,作为对比验证数据。融合的原则是以MOD04_3K气溶胶产品为主,MOD04_3K缺失的地区则采用MOD04_L2进行补全。

2)地表反射率获取

本文选用GF-1 WFV数据的绿波段(第2波段)进行气溶胶反演,地表反射率可从MODIS地表反射率产品MOD09A1中获得^[13-14]。

GF-1 WFV的第2波段和MODIS的第4波段虽然都是绿波段,但是二者的波段响应存在显著的差异。因此,在将MODIS的地表反射率作为真实的地表反射率进行气溶胶反演前,必须比较典型地物在两者绿波段上的地表反射率的差异。

本文利用高级星载热发射和反射辐射仪(advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer, ASTER)波谱库中的典型地物光谱数据以及WFV和MODIS在绿波段的响应函数进行卷积运算,获得不同地物在绿波段的地表反射

率^[21],计算如下:

$$R = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) R(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) d\lambda} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} S(\lambda_i) R(\lambda_i) \Delta\lambda}{\sum_{i=0}^{N-1} S(\lambda_i) \Delta\lambda} \quad (5)$$

式中, $S(\lambda_i)$ 表示波长为 λ_i 时传感器的响应函数; $R(\lambda_i)$ 为相应波段的反射率; N 为波长离散化后的个数。

图1为典型地物在GF-1 WFV1和MODIS绿波段的地表反射率散点图。

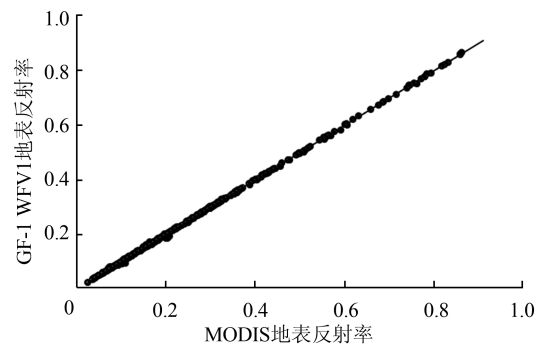


图1 GF-1 WFV1与MODIS的绿波段地表反射率散点图

Fig.1 Scatter Plot of Surface Reflectance in Green Band of GF-1 WFV1 and MODIS

从图1中可以看出,GF-1 WFV1和MODIS在绿波段的地表反射率具有很强的相关性,差异较小。对二者进行线性回归分析,以此来校正不同传感器之间的波段响应差异,结果如表1所示。计算如下:

$$r_{GF-1_WFV} = a + b \cdot r_{MODIS} \quad (6)$$

式中, a 、 b 为线性拟合系数; r_{GF-1_WFV} 和 r_{MODIS} 分别是GF-1各WFV相机和MODIS的地表反射率。

表1 WFV相机和MODIS地表反射率线性分析结果

Tab.1 Linear Analysis Results of the Surface Reflectivity of WFV Cameras and MODIS

相机类型	a	b	相关系数	修正前偏差	修正后偏差
WFV1	0.996	0	1.000	0.002	0.002
WFV2	0.999	0.001	1.000	0.002	0.002
WFV3	1.001	0.003	0.999	0.004	0.004
WFV4	0.998	0.001	1.000	0.003	0.001

从表1中可以看出,修正前后的反射率偏差不大。因此,本文直接利用MODIS的第4波段的地表反射率代替了GF-1 WFV的第2波段的地表反射率,没有进行波段修正。

2.3 AERONET地基观测数据

在全球气溶胶自动观测网站(<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>)获得与卫星过境前、后(± 0.5 h)相

对应的 AOD 地基观测数据,将其作为验证数据。

AERONET 在北京地区有 4 个地基观测站,分别为北京站、北京_PKU 站、北京_CAMS 站、北京_RADI 站。由于北京地区的测站都属于城市站点,且分布较为集中,为了提高验证的可信度,本文还利用了位于河北省廊坊市的乡村站点香河站进行精度验证。站点的空间分布如图 2 所示,其中,北京_CAMS 站用于计算非对称因子和单次散射反照率,其他测站用于精度验证。

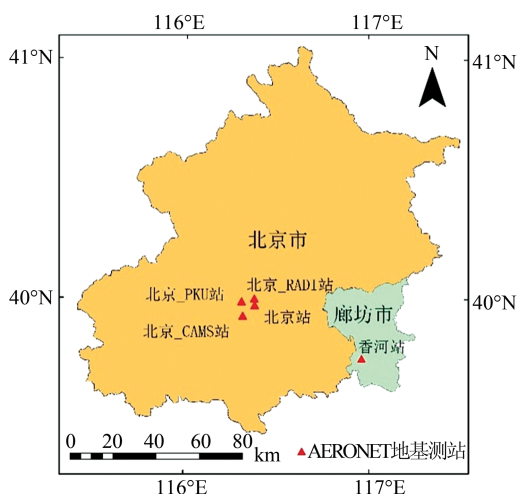


图 2 研究区 AERONET 地基站点分布

Fig.2 Distribution of Five AERONET Sites in Study Area

AERONET 发布的 AOD 产品分为 3 个等级,其中 Level 1.0 为未删选的原始数据;Level 1.5 是经过云删选的数据;Level 2.0 则是在 Level 1.5 的基础上进行了质量控制的数据。本文选用 Level 1.5 和 Level 2.0 产品作为地基验证数据。AERONET 所提供的 AOD 观测数据共有 7 个波段,但没有与反演结果对应的 550 nm 波长的 AOD,因此需要进行波段插值。本文选取最接近 550 nm 的 3 个通道利用二次多项式方法^[22]进行波段插值。计算如下:

$$\ln \tau_{\lambda} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln \lambda + \alpha_2 (\ln \lambda)^2 \quad (7)$$

式中, τ_{λ} 为 λ 波长处的 AOD 值; α_0 、 α_1 、 α_2 为待求的未知系数。

3 反演结果与精度验证

3.1 反演结果

根据§2 中的算法和数据处理方法,对 17 景 GF-1 WFV 影像进行 AOD 反演,获得 100 m 分辨率的 AOD 反演结果,图 3 为部分反演结果。从图 3 中可以看出,本文算法获得的气溶胶有效

覆盖面积较高,不仅在植被等低反射率地表的区域上空有较好结果,而且在城市等高反射率地表的区域也可获取大气气溶胶分布情况。但是,由于 GF-1 WFV 相机的单幅幅宽有限,大多数的影像不能完全覆盖研究区域,需要通过相邻影像的拼接来进一步提高覆盖率。

3.2 精度验证

为了验证本文算法的反演精度,利用 AERONET 数据对反演结果进行对比分析。选取的统计指标有相关系数 R 、均方根误差 (root mean square error, RMSE)、平均绝对误差 (mean absolute error, MAE) 和预期误差区间 (expected error, EE),各指标的计算如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (9)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - y_i| \quad (10)$$

$$\text{EE} = \pm(0.05 + 0.15x_i) \quad (11)$$

式中, x_i 为地基观测 AOD; y_i 为本文算法得到的反演值; \bar{x} 、 \bar{y} 分别为 x_i 、 y_i 的平均值; N 为数据对比点个数。

为了减少气溶胶在空间上的误差,选择地面站点 3 km×3 km 范围内的有效反演结果进行平均。同时,地面观测值选择卫星过境前后 30 min 内最接近的值。

图 4 为各站点 WFV 数据 AOD 反演结果和 AERONET 地基实测值的对比结果。从图 4 中可以看出,两者具有良好的相关性,各站点的相关系数均达到 0.9,平均绝对误差均在 0.1 以下。其中,香河站相比于其他 3 个站精度较低,这可能与该站点距离北京_CAMS 站点较远(58.6 km),且地表类型不同有关。由此可得出结论:基于 SARA 利用 GF-1 WFV 数据反演气溶胶光学厚度,反演精度符合要求,结果具有较高的可信度。

3.3 与 MODIS AOD 产品比较

1) 目视效果

图 5 为 WFV 气溶胶反演结果与 MODIS 气溶胶产品对比,图 5(a)为 2017-05-28 的气溶胶反演结果,同一天的 MODIS 气溶胶产品如图 5(b)所示。从图 5 中可以看出,两者的 AOD 在空间分布上较为一致,均呈现东南高、西北低的格局,高

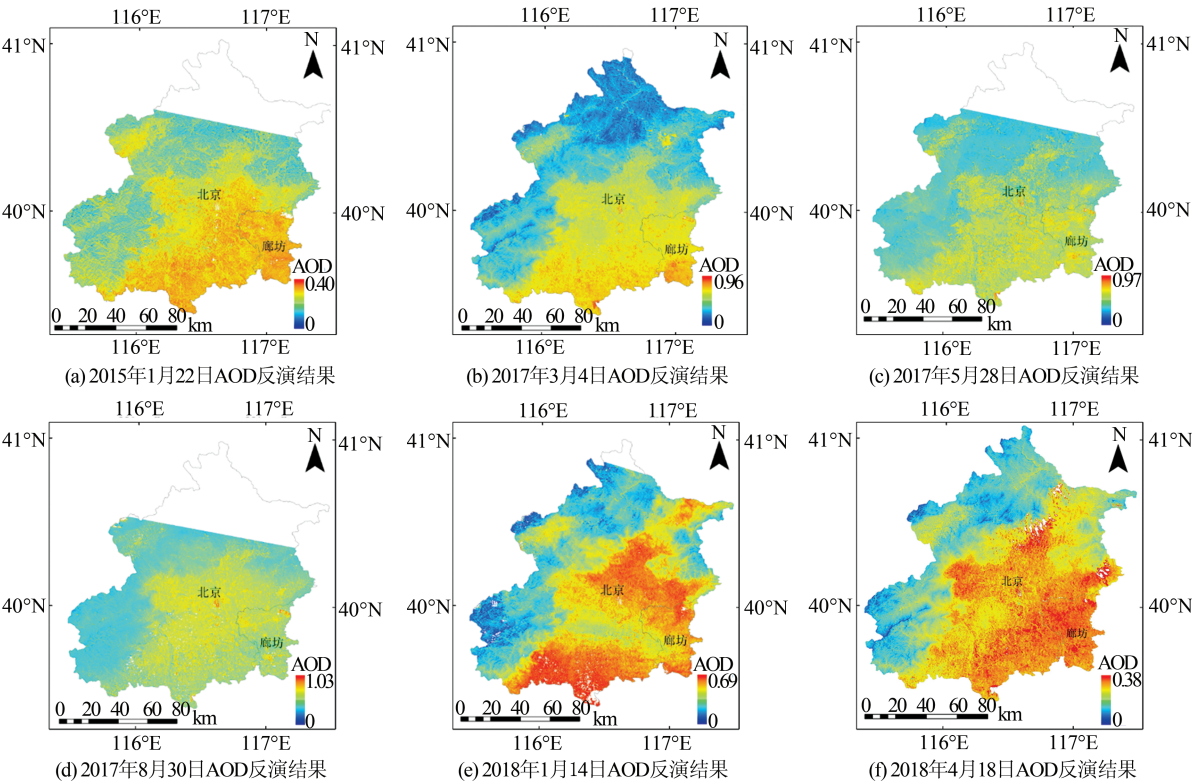


图3 GF-1 WFV数据的AOD反演结果
Fig.3 Retrieved AOD from GF-1 WFV Data

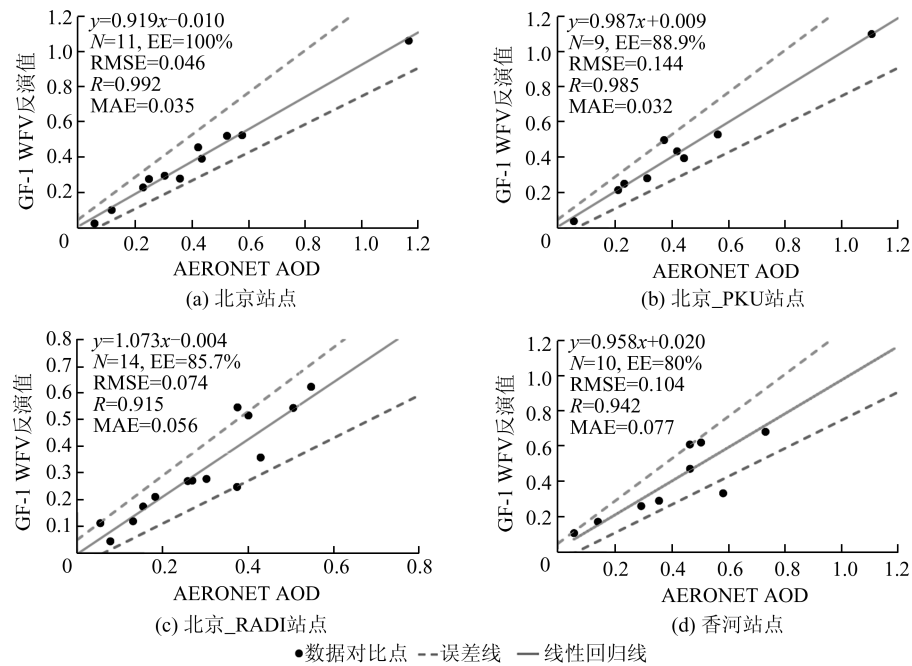


图4 本文算法反演结果与AERONET AOD观测值对比

Fig.4 Comparison Between Retrieved AOD Using Our Proposed Algorithm and AOD Measured by AERONET Stations

值主要集中在北京中部、东南部城区以及廊坊市,低值主要集中在北京西北山地区域。从它们的局部放大图中可以发现,GF-1的反演结果比MODIS气溶胶产品在空间分辨率上有明显的优势,可表现出更多的气溶胶变化细节。

2)精度比较

分别将反演结果以及MODIS暗目标/深蓝算法融合的气溶胶产品与AERONET地基观测结果进行对比验证,比较两者的精度。最终获得GF-1/AERONET有效对比个数44个,MO-

DIS/AERONET 有效对比个数 29 个,采用相关系数 R 、RMSE、MAE 以及 EE 统计指标进行分析,结果如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,两种算法反演结果与地基观测值均具有较强的相关性。本文算法结果的统计指标分别为 $R=0.962$, $RMSE=0.073$, $MAE=0.051$,有 88.6% 的观测值落在误差区间内,均优于 MOD04 的结果 ($R=0.806$, $RMSE=0.197$, $MAE=0.163$, $EE=58.6\%$)。可见本文算法的精度高于 MODIS AOD 产品的精度。

4 算法适用性分析

SARA 对于 MODIS 数据具有一定适用性^[8-9],但是针对 SARA 是否能够应用于 GF-1 WFV 数据尚缺少相关研究。本文从观测几何和

定标精度两方面针对 GF-1 数据特点进行算法适用性研究。

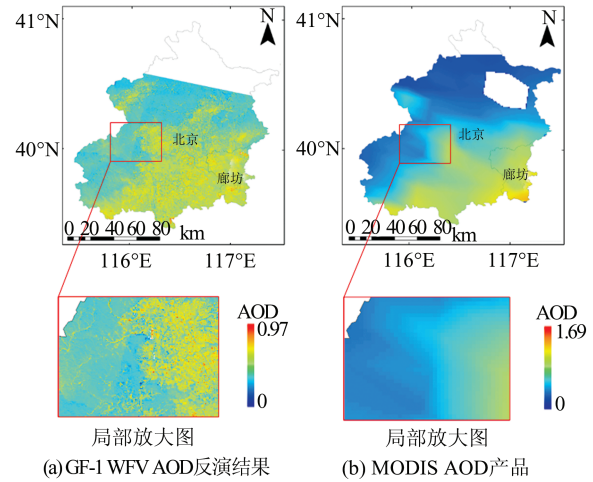


图 5 WFV 气溶胶反演结果与 MODIS 气溶胶产品对比
Fig.5 Comparison Between AOD Retrieved from WFV Data and MODIS AOD Product

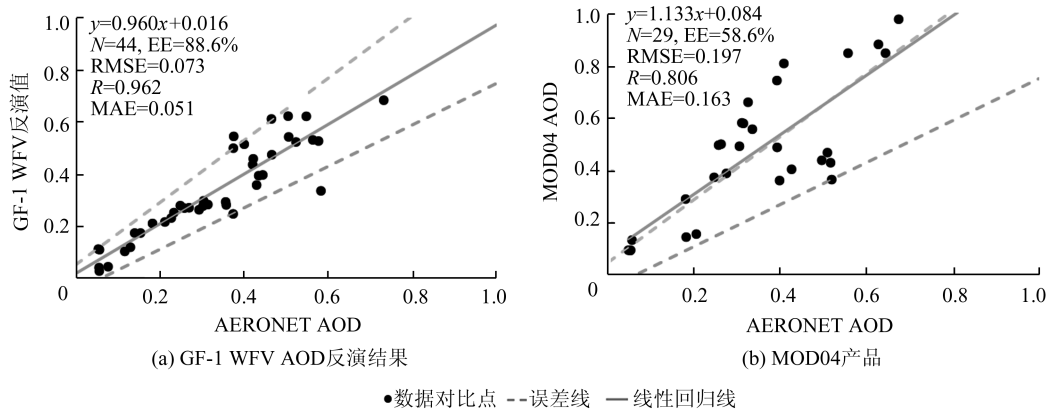


图 6 GF-1 WFV AOD 反演结果、MOD04 产品与 AERONET 地基观测值的对比

Fig.6 Comparison Between AOD Retrieved from GF-1 WFV Images, MOD04 Product and AERONET Measurements

4.1 观测几何

GF-1 卫星 WFV 相机通过元数据文件提供星下点的太阳天顶角、太阳方位角、观测天顶角和观测方位角等观测几何数据。一台 WFV 相机的幅宽达 200 km,视场角约为 16° ,在中纬度地区,星下点和图像边缘的太阳天顶角最大相差约为 1° ,观测天顶角相差约为 8° ,相对方位角相差约为 10° ^[11]。

本文根据 GF-1 WFV 相机太阳天顶角、观测天顶角和相对方位角的误差范围进行了模拟反演,分析其对反演的影响。图 7 为模拟计算得到的观测几何对反演结果带来的误差,可以看出,随着气溶胶光学厚度的增大,观测几何引起的绝对误差基本呈现增大趋势,相对误差则呈现先减小、后稳定的趋势。总的来说,GF-1 WFV 相机的观测几何引起的绝对误差在 0.04 以内,相对误

差在 10% 以内。

4.2 辐射定标精度

电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)相机的辐射定标误差一般为 7%^[11],为了分析定标误差对反演的影响,本文将表观反射率加入 1%~10% 的随机误差,进行模拟反演。图 8 为模拟计算得到的定标精度对反演结果带来的误差,可以看出,反演误差与辐射定标误差相关性不明显,且绝对误差在 0.03 以内,相对误差在 9% 以内。对比不同气溶胶光学厚度,可以看出,当气溶胶光学厚度较大时,辐射定标误差引起的相对误差较小。

5 结 语

SARA 摆脱了查找表的约束,成为遥感反演 AOD 的新途径。本文基于 SARA,利用高空间分

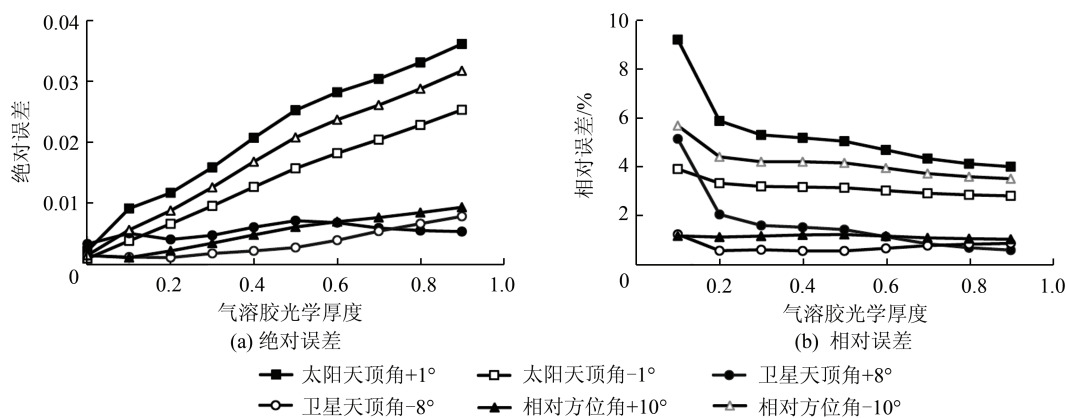


图7 观测几何误差对反演的影响

Fig.7 Retrieval Errors from Observation Geometry

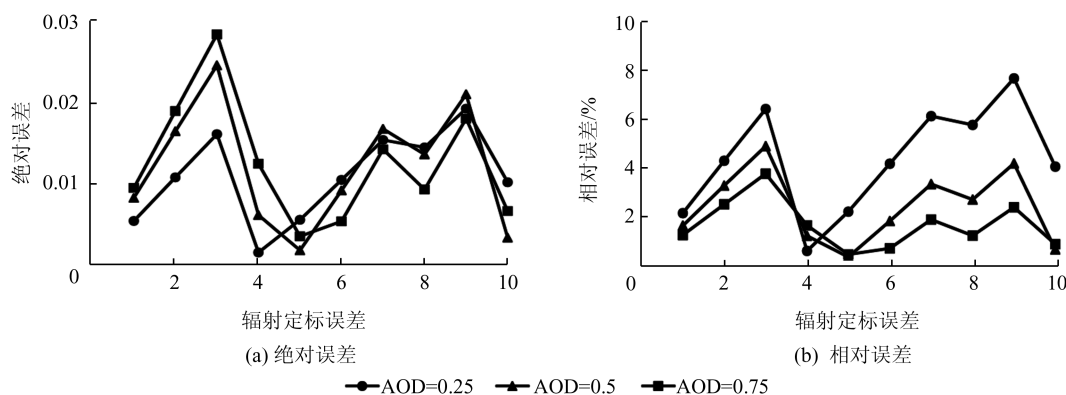


图8 辐射定标误差对反演的影响

Fig.8 Retrieval Errors from Radiometric Calibration

分辨率的 GF-1 数据, 获得了 100 m 空间分辨率的气溶胶空间分布情况, 并得到如下结论: (1) 利用 MODIS 相机和 WFV 相机在绿波段的波段响应函数, 对典型地物光谱数据进行拟合得到了地表反射率。结果表明, 两者反射率差异较小, 波段修正的意义不明显。 (2) 利用 AERONET 地基观测值及 MODIS 气溶胶产品对反演结果进行验证对比, 结果表明, SARA 可以实现暗像元和亮地表类型的气溶胶反演, 与同期的 MODIS 气溶胶产品相比在空间分布上较为一致, 且表现出更多的气溶胶变化细节, 反演结果与地面观测值有较高的相关性, 平均误差在 0.1 以下, 各项统计指标均优于 MODIS 气溶胶产品。 (3) 针对 GF-1 数据特点的算法适用性研究表明, GF-1 WFV 相机的观测几何和辐射定标误差引起的反演较小, 绝对误差均在 0.04 以内, 相对误差均在 10% 以内, 说明 SARA 对 GF-1 WFV 数据具有较好的适用性。

本文算法虽然简单灵活、精度高, 但依赖于 AERONET AOD 观测数据, 在缺乏 AERONET 地面测站的区域, 此算法使用受限。下一步的研究可考虑利用气溶胶与云光学特性软件模拟 ω_0

和 g 来替代 AERONET^[23]。

致谢: 本文使用了中国资源卫星应用中心数据平台提供的 GF-1 WFV 数据、美国国家宇航局发布的 MODIS 地表反射率产品和气溶胶产品、AERONET 发布的大气气溶胶地基观测数据, 在此表示感谢!

参 考 文 献

- [1] Kaufman Y J, Tanré D, Gordon H R, et al. Passive Remote Sensing of Tropospheric Aerosol and Atmospheric Correction for the Aerosol Effect [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D14): 16 815-16 830
- [2] Cao Yongxing, Xue Zhihang. Review of the Urban Aerosol Retrieval Research Based on High-Resolution Images [J]. *Remote Sensing for Land and Resource*, 2016, 28(3): 1-6 (曹永兴, 薛志航. 基于高分辨率影像的城市地区气溶胶反演研究述评 [J]. *国土资源遥感*, 2016, 28(3): 1-6)
- [3] Guo Yangjie, Hong Song, Zhuang Yanhua, et al. Temporal Variation and Spatial Distribution of Atmospheric Aerosols over Hubei Province [J]. *Geo-*

- tics and Information Science of Wuhan University, 2010, 35(11): 1 381-1 385(郭阳洁,洪松,庄艳华,等. 湖北省气溶胶光学厚度时空分布特征研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(11): 1 381-1 385)
- [4] Wang Hua, Guo Yangjie, Hong Song, et al. Spatial Pattern Characteristics of Aerosol Optical Depth in a Region Based on Spatial Autocorrelation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(7): 869-874(王华,郭阳洁,洪松,等. 区域气溶胶光学厚度空间格局特征研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(7): 869-874)
- [5] Kaufman Y J, Sendra C. Algorithm for Automatic Atmospheric Corrections to Visible and Near-Infrared Satellite Imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1988, 9(8): 1 357-1 381
- [6] Tanre E D, Deschamps P Y, Devaux C, et al. Estimation of Saharan Aerosol Optical-Thickness from Blurring Effects in Thematic Mapper Data[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1988, 93(D12): 15 955-15 964
- [7] Hsu N C, Tsay S C, King M D, et al. Aerosol Properties over Bright-Reflecting Source Regions [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(3): 557-569
- [8] Bilal M, Nichol J E, Bleiweiss M P, et al. A Simplified High Resolution MODIS Aerosol Retrieval Algorithm (SARA) for Use over Mixed Surfaces [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 136: 135-145
- [9] Bilal M, Nichol J E. Evaluation of MODIS Aerosol Retrieval Algorithms over the Beijing-Tianjin-Hebei Region During Low to Very High Pollution Events [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2015, 120(15): 7 941-7 957
- [10] Bai Zhaoguang. Technical Characteristics of the GF1 [J]. *Aerospace China*, 2013(8): 5-9(白照广. 高分一号卫星的技术特点[J]. 中国航天, 2013(8): 5-9)
- [11] Wang Zhongting, Xin Jinyuan, Jia Songlin, et al. Retrieval of AOD from GF-1 16 m Camera Via DDV Algorithm[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(3): 530-538(王中挺, 辛金元, 贾松林, 等. 利用暗目标法从高分一号卫星 16 m 相机数据反演气溶胶光学厚度[J]. 遥感学报, 2015, 19(3): 530-538)
- [12] Zhang Shengmin, Zhou Meiling, Si Yidan, et al. The Retrieval of Aerosol over Land Surface from GF-1 16 m Camera with Deep Blue Algorithm[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2016, 31(4): 709-713(张胜敏, 周美玲, 司一丹, 等. 深蓝算法应用于 GF-1 16 m 相机反演陆地气溶胶[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(4): 709-713)
- [13] Jia Liangliang, Wang Xiaoqin, Su Hua, et al. Validation of Retrieving Aerosol over Taiwan Island Using GF-1 Satellite WFM Data[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(3): 1 117-1 127(贾亮亮, 汪小钦, 苏华, 等. 台湾岛高分一号卫星 WFM 数据气溶胶反演与验证[J]. 环境科学学报, 2018, 38(3): 1 117-1 127)
- [14] Xu Yan, Zhang Wei, Si Yidan, et al. Retrieval and Validation of Aerosol Optical Depth by Using GF-1 Remote Sensing Data[J]. *Remote Sensing Information*, 2016, 31(5): 60-65(许研, 张炜, 司一丹, 等. 高分一号数据的气溶胶光学厚度反演和验证[J]. 遥感信息, 2016, 31(5): 60-65)
- [15] Wang Jingjie, Li Qi, Feng Xiao, et al. Aerosol Remote Sensing Inversion of Pollution Process in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2015, 40(2): 78-83(王晶杰, 李琦, 冯逍, 等. 京津冀地区污染过程的气溶胶遥感反演[J]. 测绘科学, 2015, 40(2): 78-83)
- [16] Vermote E F, Tanre D, Deuze 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
- [17] Gordon H R, Wang M H. Retrieval of Water-Leaving Radiance and Aerosol Optical-Thickness Over the Oceans with SeaWiFS — A Preliminary Algorithm [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(3): 443-452
- [18] Tian Xinpeng, Sun Lin, Liu Qiang, et al. Retrieval of High-Resolution Aerosol Optical Depth Using Landsat 8 OLI Data over Beijing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(1): 51-63(田信鹏, 孙林, 刘强, 等. 北京地区 Landsat 8 OLI 高空间分辨率气溶胶光学厚度反演[J]. 遥感学报, 2018, 22(1): 51-63)
- [19] Wei J, Huang B, Sun L, et al. A Simple and Universal Aerosol Retrieval Algorithm for Landsat Series Images over Complex Surfaces[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(24): 13 313-13 355
- [20] Misra A, Jayaraman A, Ganguly D. Validation of Version 5.1 MODIS Aerosol Optical Depth (Deep Blue Algorithm and Dark Target Approach) over a Semi-Arid Location in Western India [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2015, 15(1): 252-262
- [21] Wang Zhongting, Li Qing, Wang Qiao, et al. HJ-1 Terrestrial Aerosol Data Retrieval Using Deep Blue Algorithm[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 19

- (3): 596-610(王中挺, 厉青, 王桥, 等. 利用深蓝算法从HJ-1数据反演陆地气溶胶[J]. 遥感学报, 2012, 19(3): 596-610)
- [22] Eck T F, Holben B N, Reid J S, et al. Wavelength Dependence of the Optical Depth of Biomass Burning, Urban, and Desert Dust Aerosols[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1999, 104 (D24): 31 333-31 349
- [23] Li Xin. MODIS AOD Retrieval and Analysis and Monitoring for Spatio-Temporal Variation of PM_{2.5}—A Case Study in Hong Kong[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2017(李昕. 基于MODIS的AOD反演与PM_{2.5}时空变化分析与监测—以香港地区为例[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017)

Inversion of Aerosol Optical Depth from GF-1 Data Using SARA

SHEN Weiqing^{1,2} ZHANG Feng^{1,2} LIU Renyi^{1,2} DU Zhenhong^{1,2}

¹ School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

² Zhejiang Provincial Key Lab of GIS, Zhejiang University, Hangzhou 310028, China

Abstract: The simplified aerosol retrieval algorithm (SARA) gets rid of the dependence of traditional aerosol optical depth (AOD) inversion algorithm on the lookup table, and it can get great inversion effect in both dark surface area and bright surface area. Due to the spatial resolution of AOD obtained from the data of moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) is insufficient, the AOD inversion is carried out with GF-1 wide field of view (WFV) data based on SARA. The retrieved AODs show a high consistency with ground-based AOD measurements, with average correlation coefficient 0.962, root mean square error 0.073, mean absolute error 0.051 and expected error 88.6%. Compared with the MODIS aerosol products in the same period, the inversion results are more consistent in space and have higher spatial coverage, resolution and accuracy. Algorithm suitability study shows that the inversion error caused by the observation geometry and radiometric calibration error of GF-1 WFV camera is small, the absolute error is within 0.04, and the relative error is within 10%.

Key words: simplified aerosol retrieval algorithm; GF-1; remote sensing inversion; aerosol optical depth

First author: SHEN Weiqing, master, majors in aerosol optical thickness inversion and surface temperature inversion. Email: shenwq@zju.edu.cn

Corresponding author: ZHANG Feng, PhD, associate professor. E-mail: Zfcarnation@zju.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (41471313, 41671391); the National Key Research and Development Program of China (2018YFB0505000, 2016YFC0803105); the Public Science and Technology Research Fund (201505003); the High-Resolution Earth Observation Major Special Project (E20150036).

引文格式: SHEN Weiqing, ZHANG Feng, LIU Renyi, et al. Inversion of Aerosol Optical Depth from GF-1 Data Using SARA[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(6): 914-922. DOI: 10.13203/j.whugis.20190034 (沈维青, 张丰, 刘仁义, 等. 利用SARA结合高分一号数据反演气溶胶光学厚度[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2020, 45(6): 914-922. DOI: 10.13203/j.whugis.20190034)