

引用格式: 陈辉, 厉青, 王中挺, 等. 一种基于FY3D/MERSI2的AOD遥感反演方法[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(9): 1887-1896. [Chen H, Li Q, Wang Z T, et al. Retrieval of aerosol optical depth using FY3D MERSI2 data[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(9): 1887-1896. ] DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.190206

# 一种基于FY3D/MERSI2的AOD遥感反演方法

陈辉, 厉青, 王中挺, 马鹏飞, 李莹\*, 赵爱梅

生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094

## Retrieval of Aerosol Optical Depth Using FY3D MERSI2 Data

CHEN Hui, LI Qing, WANG Zhongting, MA Pengfei, LI Ying\*, ZHAO Aimei  
Satellite Environment Center, Ministry of Ecology and Environmental, Beijing 100094, China

**Abstract:** Until now, relatively few researches of aerosols retrieval have been conducted using domestic satellite remote sensing. To promote domestic satellite remote sensing applications, a set of rapid inversion technology of Aerosol Optical Depth (AOD) using remote sensing was developed in this study based on FY-3D/MERSI2 data, which combined the advantages of Dark Target (DT) and SARA algorithm. Firstly, the empirical relationship of surface reflectance in traditional Dark Target algorithm was introduced to get the red and blue band surface reflectance. Then, the relationships between aerosol optical thickness, asymmetry factor, and single scattering albedo in red and blue bands were established using long time-series ground observation data from AERONET. Finally, MOD04 and AERONET AOD products were used to validate and evaluate the inversion results. Results show that the AOD retrieved from MERSI2 in this study not only kept the spatial consistency with the MODIS aerosol product, but also presented a reasonable distribution of high AOD values, which improved the AOD inversion in cloud and bright target areas where values were missing in MOD04 aerosol product. Meanwhile, compared with ground-based observations, the proposed algorithm also demonstrated a higher accuracy with an average correlation coefficient greater than 0.85 at the 470nm band. These two methods showed a strong linear correlation at blue band. Finally, the spatial and temporal distribution of aerosols during a heavy pollution in Beijing, Tianjin, Hebei, and surrounding areas from March 9 to March 14 in 2018 was completely captured using MERSI2, which indicated that FY3D satellite was able to monitor aerosols and could provide a reference for haze monitoring and early warning in China. This study provides important reference significance for the development and application of domestic satellites in atmospheric remote sensing business.

**Key words:** high-resolution remote sensing FY3D/MERSI; aerosol optical depth; Simplified Aerosol Retrieval Algorithm; Dark Target (DT); remote sensing inversion; AERONET; surface reflectance; comparison validation

\*Corresponding author: LI Ying, E-mail: trunks02029@163.com

收稿日期: 2019-05-05; 修回日期: 2020-01-06.

基金项目: 国家环境保护标准制修订项目(2017-27); 国家总理基金项目(DQGG0205). [ **Foundation items:** National Environmental Protection Standard Preparation and Revision Project, No.2017-27; Causes of Heavy Air Pollution and Tackling Key Problems, No.DQGG0205. ]

作者简介: 陈辉(1986—), 男, 湖北黄冈人, 工程师, 研究方向为大气环境遥感. E-mail: matheking@163.com

\*通讯作者: 李莹(1985—), 男, 北京人, 高级工程师, 研究方向为环境遥感. E-mail: trunks02029@163.com

**摘要:**针对目前国产卫星对气溶胶遥感监测应用较少的情况,本研究综合暗象元和SARA算法优势,基于FY-3D MERSI2数据构建了一套气溶胶光学厚度(Aerial Optical Depth, AOD)快速遥感反演方法。首先,引入了传统暗象元算法中的地表反射率经验关系,然后利用AERONET长时间序列的地基观测数据,构建了红波段和蓝波段气溶胶光学厚度、不对称因子和单次散射率之间的关系,最后利用MOD04和AERONET的AOD产品对研究反演结果进行了验证和评估分析。结果发现:①本研究反演的AOD不仅保持了与MODIS的气溶胶产品空间分布的一致性,而且合理地呈现了AOD的高值分布,改进了MOD04气溶胶产品在云和亮目标方面反演缺失问题;②利用AERONET地基观测结果对本研究获取的MERSI2的AOD反演结果进行了对比分析,发现二者具有较高的线性相关性,蓝波段AOD线性相关系数超过0.85;③利用MERSI2数据完整地捕捉到了2018年3月9—14日京津冀及周边区域的一次重污染过程中气溶胶时空分布变化情况,这也说明了FY3D卫星具备良好的气溶胶遥感监测能力,为我国灰霾监测和预警提供参考依据。本研究对大力发展国产卫星在大气环境遥感的应用有重要参考意义。**关键词:**高分辨率遥感FY3D/MERSI;气溶胶光学厚度;简化的气溶胶遥感反演算法;暗象元;遥感反演;AERONET;地表反射率;对比验证

## 1 引言

大气气溶胶是悬浮在大气中的固态和液态颗粒,通过其直接和间接的辐射强迫作用对区域和全球气候变化起着重要作用,其浓度的变化广泛影响着地球的气候和生态环境系统及人体健康等方面<sup>[1-3]</sup>。由于卫星遥感具有立体监测、覆盖范围广、动态连续且客观获取数据等优势,目前全球多个发达国家大力发展卫星遥感技术,作为大范围大气环境监测的一种高效技术手段。20世纪70年代以来,欧美等发达国家陆续研发了改进的甚高分辨率辐射计(AVHRR)、臭氧总量气象探测器(TOMS)、中分辨率成像光谱仪(MODIS)、多角度成像光谱仪(MISR)、多角度偏振探测器(POLDER)、可见光红外成像辐射计(VIIRS)、先进葵花成像仪(AHI)等卫星传感器,大量学者也同时发展了暗像元<sup>[4]</sup>、深蓝<sup>[5]</sup>、多角度<sup>[6]</sup>等气溶胶遥感反演算法模型,以从不同卫星传感器的探测数据中获取区域范围大气气溶胶参数信息。

20世纪80年代以来我国的卫星传感器也得到了迅速发展,其中风云系列气象卫星经历了40年的发展历程,已成为全球综合地球观测系统的重要成员。随着中国第二代极轨气象卫星风云三号(FY3)气象卫星的研制和开发,大大增强了中国大气环境质量遥感监测的能力,为大范围开展我国气溶胶及颗粒物遥感监测提供新的遥感数据源<sup>[7]</sup>。目前,大部分学者在气溶胶领域的研究大都集中在MODIS数据的应用上。而国内的卫星遥感数据较少应用于大气气溶胶研究,尤其在利用风云三号气象卫星进行气溶胶遥感监测的相关研究较少,仅有极少部分学者对FY3A和FY3C的MERSI数据采用传统暗象元算法进行反演试验研究,或者对国家卫星气象

中心发布的FY3A卫星气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)产品进行验证分析<sup>[8-9]</sup>,这不利于我国卫星遥感及应用技术的发展。

为充分挖掘国产FY-3卫星数据在气溶胶遥感监测方面的应用潜力,本研究利用风云三号卫星最新成员FY3D的探测数据,结合目前高效主流的气溶胶遥感反演算法,研究构建了一套简单高效的气溶胶遥感反演技术,并利用气溶胶自动观测网(AERONET)观测数据对结果进行了验证分析,最后在京津冀及周边地区气溶胶污染过程中开展了应用分析,为中国自主新型遥感数据的应用和环境保护管理部门提供决策信息支持。这一方面有助于提升国产卫星遥感自主应用能力,另一方面可在环境遥感领域中减少对国外遥感数据的依赖<sup>[10]</sup>,确保大气环境遥感监测的及时性和准确性。

## 2 研究方法与数据来源

### 2.1 基于SARA的AOD遥感反演方法

目前,国内外主要采用暗象元、深蓝等方法进行AOD遥感反演,这2种算法主要基于辐射传输模型对不同几何观测条件、不同大气和气溶胶模式等参数情况下的进行模拟计算,最后结合卫星实际观测的表观反射率情况进行气溶胶遥感反演,NASA针对这2种算法原理设计了严密的数据处理流程,实现了气溶胶的业务化遥感反演。但是这2种算法也存在一定的缺陷,数据处理流程较为复杂并且要准备庞大的查找表,为了进一步简化AOD遥感反演处理工程,研究学者<sup>[11]</sup>发展了一种简化的气溶胶遥感反演算法(Simplified Aerosol Retrieval Algorithm, SARA),并利用MODIS数据进行算法实验和结果评估分析,证明该算法较暗象元算法产品具有

更高的精度,可靠性高,能适用于更广泛的地表类型,且该算法不需要构建查找表,直接利用辐射传输模型计算AOD,数据处理流程大大简化。

SARA算法在设定地表为朗伯体、近似单次散射和气溶胶单次散射率(Single Scattering Albedo, SSA)及不对称因子(Asymmetry Factor, AF)不存在空间变化前提条件下,引入大气后向散射率、气溶胶散射相函数的近似表达函数,结合大气辐射传输方程,推导出AOD计算公式如下:

$$\tau_{a,\lambda} = \frac{4\mu_s\mu_v}{wP_a(\theta_s, \theta_v, \phi)} [\rho_{TOA}(\lambda, \theta_s, \theta_v, \phi) - \rho_{Ray}(\lambda, \theta_s, \theta_v, \phi) - \frac{e^{-(\tau_{r,\lambda} + \tau_{a,\lambda})/\mu_s} e^{-(\tau_{r,\lambda} + \tau_{a,\lambda})\mu_v} \rho_s(\lambda, \theta_s, \theta_v, \phi)}{1 - \rho_{TOA}(\lambda, \theta_s, \theta_v, \phi)(0.92\tau_{r,\lambda} + (1-g)\tau_{a,\lambda})e^{-(\tau_{r,\lambda} + \tau_{a,\lambda})}}] \quad (1)$$

式中:  $\tau_{a,\lambda}$  为气溶胶光学厚度;  $\tau_{r,\lambda}$  为瑞利光学厚度;  $\rho_{TOA}$  为表观反射率;  $\rho_{Ray}$  为瑞利反射率,  $\rho_s$  为地表反射率;  $\mu_s$  和  $\mu_v$  分别为太阳天顶角和卫星天顶角的余弦;  $w$  为气溶胶单次散照率;  $g$  为几何不对称因子;  $P_a$  为气溶胶散射相函数;  $\theta_s$  和  $\theta_v$  分别为太阳天顶角和观测天顶角,  $\phi$  为相对方位角; SARA算法原理和参数计算方法参考Bial<sup>[3]</sup>等文献。

在SARA算法进行AOD遥感反演过程中,除利用卫星遥感资料获取观测几何信息和不同波段的表观反射率外,还需要获取地表反射率数据和气溶胶单次散射率、不对称因子等资料才能计算获取AOD,具体数据处理流程如图1所示。

### 2.1.1 地表反射率函数获取

研究学者Kaufman等<sup>[4]</sup>通过大量实验表明,对于植被密集等具有较低反照率的地物,近红外波段(2130 nm)与蓝波段(470 nm)反射率具有很好的线性相关性,并且大气气溶胶对近红外波段的影响比蓝波段小15~30倍,可被忽略不计,综合考虑这两点,可以由近红外波段的表观反射率根据下式获取蓝波段的地表反射率:

$$\rho_s^{0.47} = 0.25\rho_{TOA}^{2.13} \quad (2)$$

$$\rho_s^{0.65} = 0.5\rho_{TOA}^{2.13} \quad (3)$$

式(2)~(3)在早期版本(C4)MODIS气溶胶产品获取地表反射率方面得到较为广泛的应用,在MODIS最新版本(C5、C6)的气溶胶产品中,Levy等<sup>[12]</sup>考虑引入1240 nm和2120 nm构建红外波段植被指数(NDVI<sub>swir</sub>),将蓝波段(470 nm)、红波段(650 nm)和近红外波段(2130 nm)之间的关系进

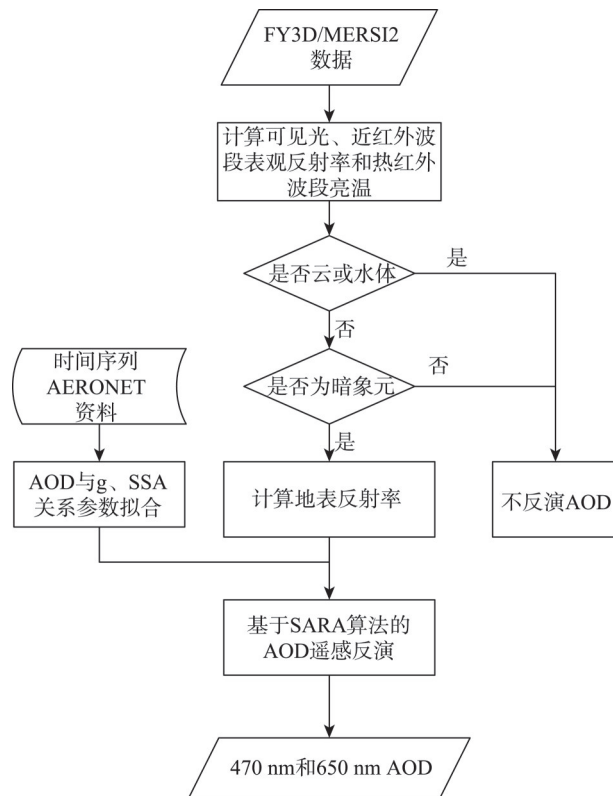


图1 AOD遥感反演流程

Fig. 1 AOD Retrieve flow chart

一步参数化为NDVI<sub>swir</sub>和散射角的函数,改进了地表发射率的计算精度。由于MERSI2缺少1240 nm波段,本研究对于暗象元仍采用式(2)、(3)获取红波段和蓝波段的地表反射率。

### 2.1.2 单次散射率和不对称因子确定

目前,单次散照率和不对称因子这两个气溶胶属性重要参数主要从AERONET观测资料中获取,且不考虑其空间差异。实际上,AERONET资料一般难以实时获取,并且考虑到大气气溶胶时空分布较为复杂、FY3D卫星的成像幅宽较大(超过2000 km)等特性,本研究利用2013—2017年的AERONET观测资料,探索分析气溶胶SSA、AF和AOD的相互关系,以获取具有时空差异分布的气溶胶SSA、AF。

## 2.2 数据来源及预处理

本研究采用数据包括FY3D卫星遥感数据和地面AERONET观测资料。

### 2.2.1 FY3D卫星数据及预处理

随着中国卫星遥感技术的不断发展,中国自主研发的第二代极轨卫星FY-3A、FY-3B、FY-3C和FY-3D分别于2008、2010、2013和2017年成功发射。作为第二代极轨气象卫星系列的最新成员,

FY-3D是我国光谱测量通道最多的气象卫星,搭载了10台遥感探测仪器,载荷配置和性能指标均达到了国际先进水平,其中核心仪器中分辨率光谱成像仪II型(MERSI2)整合了原有风云三号卫星2台成像仪器(中分辨率光谱成像仪(MERSI)和可见光红外扫描辐射计(VIRR))的功能,光谱通道从原有的20个通道扩展了25个,其中6个可见光波段、10个可见光-红外波段、3个短波红外波段和6个中长波红外波段,光谱覆盖范围为470~12 000 nm,空间分辨率为250 m和1 km,是世界上首台能够获取全球250 m分辨率红外分裂窗区资料的成像仪器,可以每日无缝隙获取全球250 m分辨率真彩色图像,实现云、气溶胶、水汽、陆地表面特性、海洋水色等大气、陆地、海洋参量的高精度定量反演,为我国生态治理与恢复、环境监测与保护提供科学支持,为全球生态环境、灾害监测和气候评估提供中国观测方案<sup>[13-15]</sup>。

本研究获取的FY3D/MERSI2数据来自国家卫星气象中心的风云卫星遥感数据服务网(<http://satellite.nsmc.org.cn/portalsite/default.aspx>),所用数据包括中分辨率光谱成像仪L1(1000M\_MS)和几何定位信息(GEO1K\_MS)数据,数据采用HDF5格式存储。在AOD遥感反演之前,利用交互式数据语言(Interactive Data Language, IDL)设计程序读取气溶胶反演波段数据(表1)和观测定位几何信息,进行必要的辐射定标、几何校正和云识别3项预处理工作。

### (1) 辐射定标

FY3D/MERSI2辐射定标包括可见光和红外通道2种数据的标定,全部通道数据定标前都要进行通道的DN调整恢复,即:

$$DN^* = slope \times (DN - intercept) \quad (4)$$

式中:DN是L1数据中的EV科学数据集计数值,它是预处理时对原始DN经过多探元归一化处理后的计数值,式(1)中的slope和intercept是对应EV科学数据集的内部属性值。在DN\*基础之上可进行可

见光波段表观反射率和红外波段亮温计算处理,其中可见光波段采用二次项式定标(3个定标系数),表观反射率的计算是在DN\*基础之上进行处理,计算公式为:

$$\rho_\lambda = \frac{k_0 + k_1 \times DN^* + k_2 \times (DN^*)^2}{\cos \theta_s} \quad (5)$$

式中: $k_0$ 、 $k_1$ 、 $k_2$ 为L1B数据中的数据集VIS\_Cal\_Coeff中对应通道的3个系数; $\theta_s$ 为太阳天顶角,从几何定位信息(GEO1K\_MS)数据中的数据集中获取。

红外波段计算公式如下:

$$T_{BB} = AT_{BB}^* + B \quad (6)$$

式中: $A=1.0103$ , $B=-1.8521$ ;  $T_{BB}$ 为亮温;  $T_{BB}^*$ 为有效黑体亮温,采用简化后的Plank公式进行计算:

$$T_{BB}^* = \frac{c_2 v_c}{\ln[1 + c_1 v_c^3 / DN^*]} \quad (7)$$

式中: $T_{BB}^*$ 为有效黑体温度/K;  $c_1=1.1910427 \times 10^{-5} \text{ mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-4})$ ;  $c_2=1.4387752 \text{ cm} \cdot \text{K}$ ;  $v_c$ 为红外通道中心波数/ $\text{cm}^{-1}$ 。

### (2) 几何校正

FY3D/MERSI2的L1数据提供了每个象元所对应的经纬度,故可等间隔选取 $100 \times 100$ 个控制点采用局部三角网模型对L1影像进行几何校正,选用双线性方法进行重采样。

### (3) 云像元识别

云像元的识别也是气溶胶遥感观测中的最为重要的科学问题之一<sup>[16]</sup>。考虑到与下垫面相比,云一般具有较高的反射同时温度相对较低的特征,利用蓝光波段的表观反射率和热红外通道的亮度温度通过阈值方法可以很好地把云检测出来<sup>[17]</sup>,即云像元的识别方法为:

$$\rho_{TOA}^{0.47} > T_1 \text{ 或者 } (\rho_{TOA}^{0.47} > T_2 \text{ 且 } T_{BB}^{12} < T_3) \quad (8)$$

式中: $\rho_{TOA}^{0.47}$ 为蓝光波段(0.47  $\mu\text{m}$ )表观反射率;  $T_{BB}^{12}$ 为热红外25通道(12.0  $\mu\text{m}$ )的亮温;  $T_i(i=1, 2, 3)$ 分别为相应的云像元识别阈值。同时,为消除云边缘的影

表1 MERSI2气溶胶反演主要波段光谱参数

Tab. 1 MERSI2 channels used in AOD retrieval

波段序号	中心波长/nm	光谱带宽/nm	空间分辨率/m	主要用途
1	470	50	250	获取蓝波段大气辐射传输方程,云像元识别
3	650	50	250	获取红波段大气辐射传输方程
7	2130	50	1000	根据经验公式计算红、蓝波段地表反射率,水体和暗像元识别
25	12 000	1000	250	云像元识别

响,将识别出的云像元扩展到周围 $5 \times 5$ 个像元。

### 2.2.2 地面观测资料

为对FY3D/MERSI2反演的AOD产品进行验证分析,本研究从AERONET网站(<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>)下载了2018年3月的北京(Beijing)、国家气象局(Beijing-CAMS)、中科院大气物理研究所(Beijing\_RADI)、北京大学(Beijing\_PKU)、香河(Xianghe)和中国矿业大学(XuZhou-CUMT)6个CE318观测站点的lev1.5级产品,从中读取870、675、500、440、380 nm等波长处的AOD,并根据AOD与波长的变化关系式(式(9))插值计算470 nm和650 nm波长处的AOD结果,与卫星遥感观测结果进行对比验证。

$$\tau(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha} \quad (9)$$

同时为减少数据误差噪声和空间差异的影响,以地面站点地理位置为中心,从MERSI和MODIS的遥感AOD产品中取站点周围25个像元( $5 \times 5$ )有效值的平均结果,与同期地面CE318观测结果进行相关分析,并计算相关统计参数以评估MERSI2的AOD卫星遥感反演产品精度。

## 3 结果及分析

### 3.1 气溶胶参数分析

本研究利用AERONET发布的北京、香河2个站点2013—2017年的气溶胶光学参数产品确定获取气溶胶光学物理参数,包括SSA、AF及AOD。AERONET发布的参数产品为440、675、870及1020 nm处值,利用这4个波段处的参数值线性插值获取FY3D卫星MERSI2传感器蓝波段(470 nm)和红波段(650 nm)气溶胶参数信息,并对不同站点不同季节不同波段处的AOD、SSA和AF进行对比分析,结果见图2。

从图2中可以看出,香河站和北京站470 nm和650 nm的3个气溶胶参数中,AOD的变化幅度较大,而气溶胶AF和SSA变化幅度相对较小,并且3个参数大体上呈现出同步的变化特征,即当AOD升高或者降低时,AF和SSA也会相应的升高和下降。因此,考虑气溶胶3个参数的变化差异和相关性,先根据AOD的变化将3个参数进行排序,然后分成10个样本子集,为减少子集之间样本数量差异引起的统计误差,应保证每个样本子集的数量相同,最后分别统计每个子集3个气溶胶参数的平均

值,构建AOD和AF、SSA之间的变化关系,结果见图3和图4。

从图3和图4中可以看出,在 $AOD < 1$ 时,香河站和北京站的气溶胶在470 nm和650 nm处的不对称因子和单次散照率差异均相对较小; $1 < AOD < 2$ 时,香河站和北京站的气溶胶参数差异变大;当 $AOD > 2$ 时,2个站点的气溶胶参数又有所减小。根据气溶胶不对称因子和单次散照率与AOD之间的变化关系,分别采用指数模型和对数模型不对称因子、单次散照率与AOD进行回归分析。从回归分析结果来看,回归分析的决定系数( $R^2$ )均在0.9以上,这说明本研究构建的气溶胶参数模型能代表气溶胶不对称因子、单次散照率与AOD之间的相互关系。

在确定了气溶胶参数关系之后,结合式(2)、(3)确定的地表反射率,根据式(1)即可从FY3D/MERSI2数据中反演获取470 nm和650 nm处的气溶胶光学厚度。

### 3.2 反演AOD产品对比验证

#### 3.2.1 MOD04产品对比分析

根据上述AOD遥感反演流程,在京津冀及周边地区( $110^\circ \text{E}—125^\circ \text{E}$ ,  $30^\circ \text{N}—45^\circ \text{N}$ )2018年3月8日进行反演实验,为与目前较为成熟的MOD04产品进行对比分析,从MERSI2数据反演获取470 nm和650 nm处的AOD之后,根据式(6)插值获取550 nm处的AOD,最后进行制图。

NASA官方发布的MODIS AOD(550 nm)产品分辨率为10 km,本研究反演的AOD产品为1 km分辨率,从图3中可以看出,本研究反演的AOD与MODIS的AOD产品空间分布趋势基本一致,均表明京津冀南部沿太行山一带气溶胶污染较重,而河北北部和山西北部地区气溶胶污染相对较轻,这与FY3D/MERSI2真彩图显示结果非常一致。整体上,本研究反演的AOD值略高于MODIS的AOD产品。

值得注意的是,结合真彩图可视化分析结果,在京津冀南部、河南北部和山东西南部一带气溶胶污染相对较重的地区(如图5中红色椭圆框所示),MOD04产品仅有极少数的有效AOD值,缺失了很多污染相对较重的像元,而本研究获取的AOD在该区域表现较好,反演出了合理的AOD高值分布。这主要是因为MOD04产品中会将稍重程度的霾误判为薄云、雾或者亮目标进行掩膜处理<sup>[18]</sup>,而本研究的算法

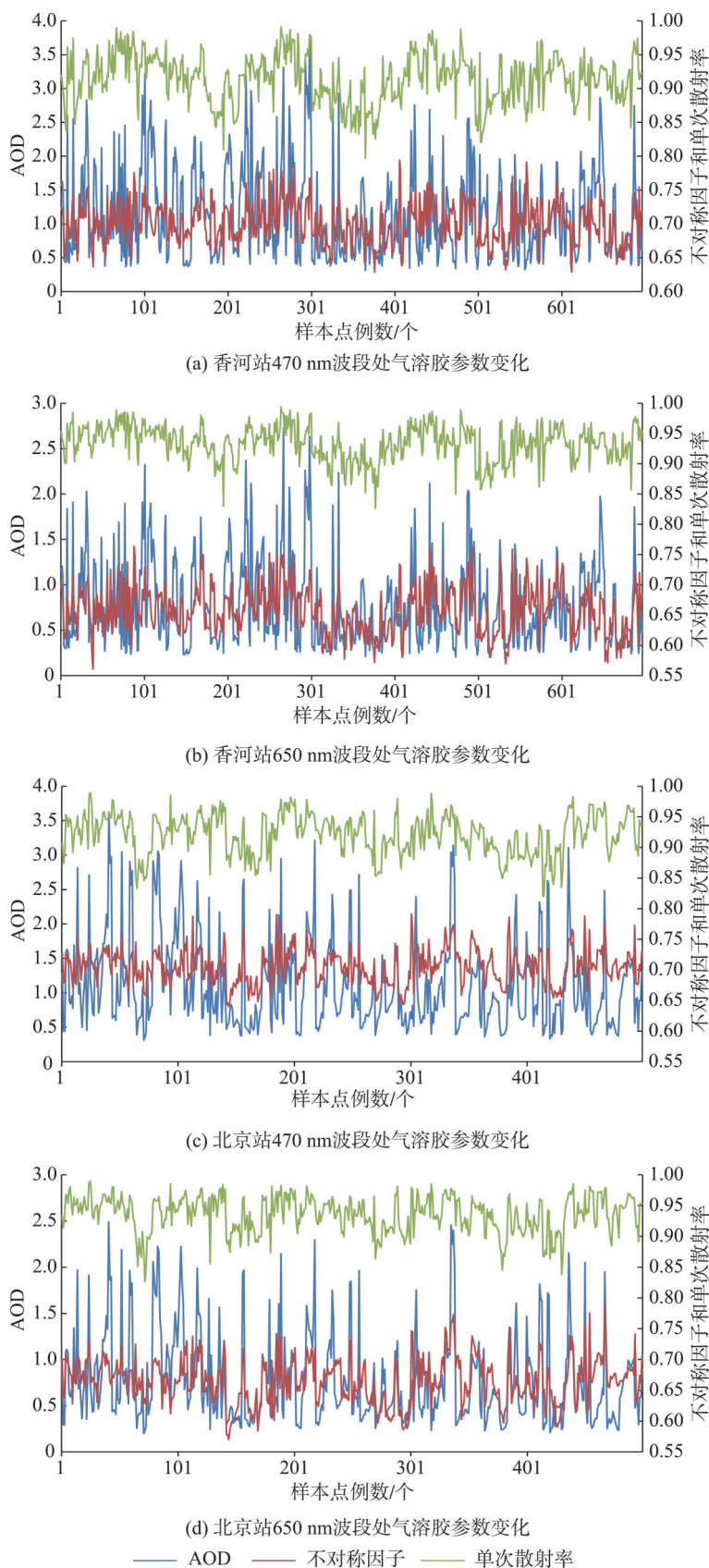


图2 香河站和北京站气溶胶参数在470 nm和650 nm波段处的变化分布

Fig. 2 The variation distribution of aerosol parameters (AOD, asymmetric factor and single scattering rate) at 470 nm and 650 nm in Xianghe station and Beijing station

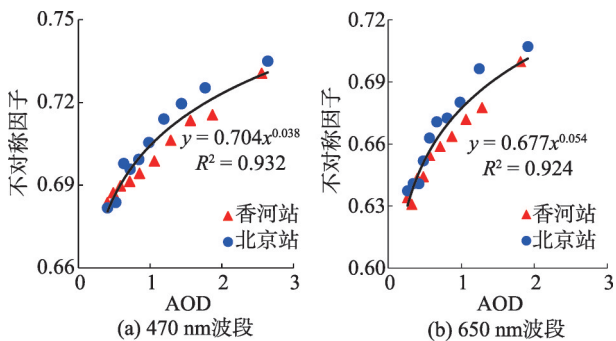


图3 不同波段气溶胶不对称因子与AOD回归分析结果  
Fig. 3 The regression analysis of aerosol Asymmetry Factor and AOD at different bands

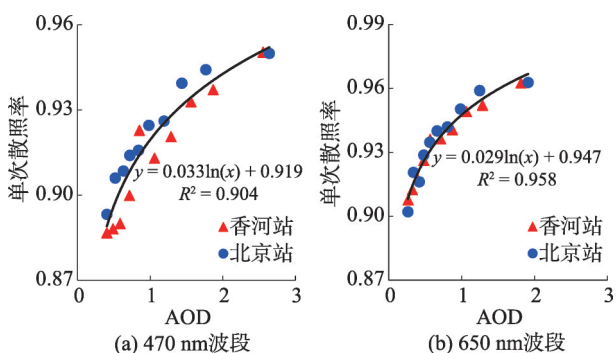


图4 不同波段气溶胶单次散射率与AOD回归分析  
Fig. 4 The regression analysis of Single Scattering Albedo and AOD at different bands

在云和亮目标的识别效果显然好于MOD04产品。

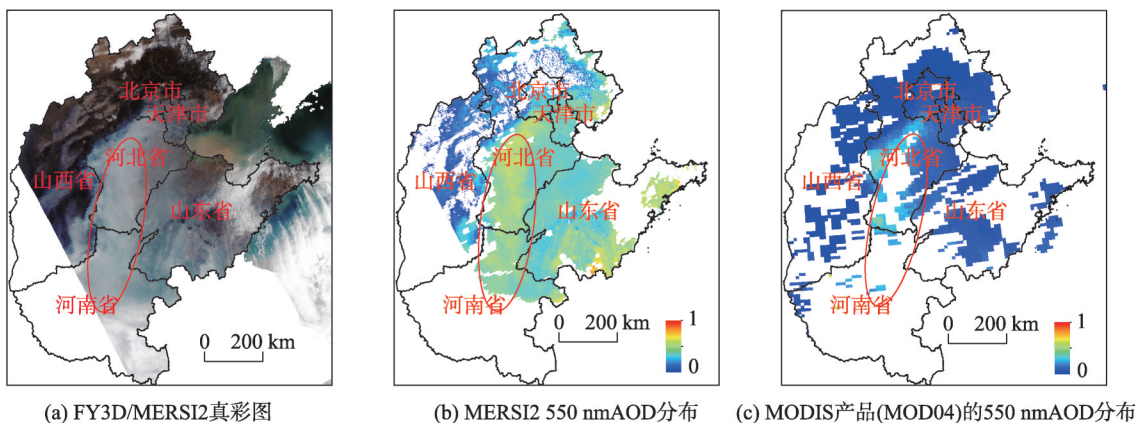
### 3.2.2 AERONET 站点对比验证

为对本研究反演的AOD进一步进行定量化对比分析,利用2018年3月AERONET观测结果数据

对本研究结果进行了对比验证分析。首先,为减少数据误差噪声和空间差异的影响,以地面站点地理位置为中心,从本研究基于MERSI2反演的470 nm AOD和650 nm产品中取站点周围25个像元(5×5)有效值的平均结果,然后与同期AERONET测量结果进行相关分析,并计算相关统计参数以评估MERSI2基于本研究的获取AOD反演结果精度。

最终共获取27对有效数据对,与地面观测对比结果表明,本研究反演的AOD与AERONET观测结果具有较好的一致性,二者之间存在显著的线性相关关系(图6)。其中气溶胶在470 nm波段处的AOD与地面观测结果的相关系数( $R=0.86$ )略高于650 nm波段处( $R=0.77$ ),这主要是因为蓝波段处的地表反射率较低,且MERSI2在蓝波段探测信号对大气气溶胶浓度变化更敏感,所以本研究近似获取地表反射率的误差对470 nm波段的AOD反演误差影响略小,对650 nm波段的AOD误差影响较大。

需要指出的是,本研究构建的气溶胶遥感反演算法是对SARA和暗像元算法的继承和创新,综合了2种算法的优势,实现了基于FY3D/MERSI2数据的AOD快速有效遥感反演。一方面继承了SARA算法的优势,避免了辐射传输模型模拟、构建海量查找表等复杂的计算工作,大大简化了气溶胶反演流程,提高了AOD遥感反演效率;另一方面,引用了暗像元算法的部分假设条件,结合AERONET数据分析获取气溶胶3个参数之间关系,不需要其他任何辅助数据。并且,从决定系数看,本研究反演结果精度达到了与国内外MERSI遥感反演AOD产品精度相当的水平。



注:红色圈表示气溶胶污染相对较重的地区。

图5 2018年3月8日FY3D/MERSI2真彩图、本研究反演的AOD和MODIS产品AOD分布  
Fig. 5 True color images, MERSI2 AOD and MODIS AOD on 8 March, 2018

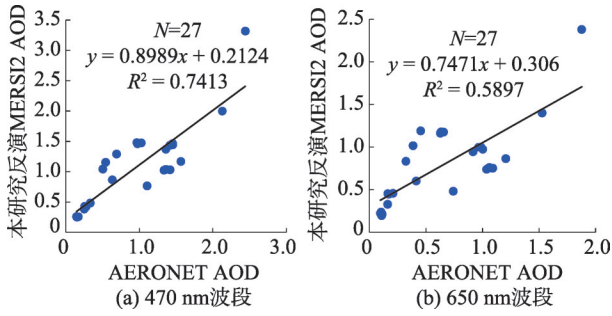


图6 本研究反演的不同波段AOD与AERONET测量结果对比散点图

Fig. 6 AOD at different bands comparison between FY3D/MERSI2 and AERONET

### 3.3 AOD应用分析示例

根据上述反演算法处理流程,对京津冀及周边地区2018年3月9—14日FY3D/MERSI2数据进行470 nm波段处AOD反演,以分析该地区的气溶胶污染时空分布变化(图7)。

从卫星遥感监测结果可以看出,2018年3月9—14日京津冀及周边地区经历了一次复杂的气溶胶污染过程,3月9日,河南北部的局部地区的AOD稍高;3月10日,河北、河南和山东三省交界处的AOD急剧升高;3月11日,AOD高值区向北移动,主要分布在河北南部和山东北部等地,AOD值较前一日有所下降;3月12日,河北东部和南部、山东北部等地呈现大范围的高AOD区域;3月13日,AOD高值区较前一日范围有所减小,主要分布在河北东部和中部等地;3月14日,AOD大幅下降,仅河北南部呈现小范围的AOD高值。整体来看,本研究从FY3D/MERSI2反演的AOD,完整地展示了京津冀及周边地区的一次气溶胶从开始到再到大范围污染然后逐渐消散的变化过程,这也说明了FY3D卫星具备良好的气溶胶遥感监测能力,可以为重污染天气监测和预警提供支撑。

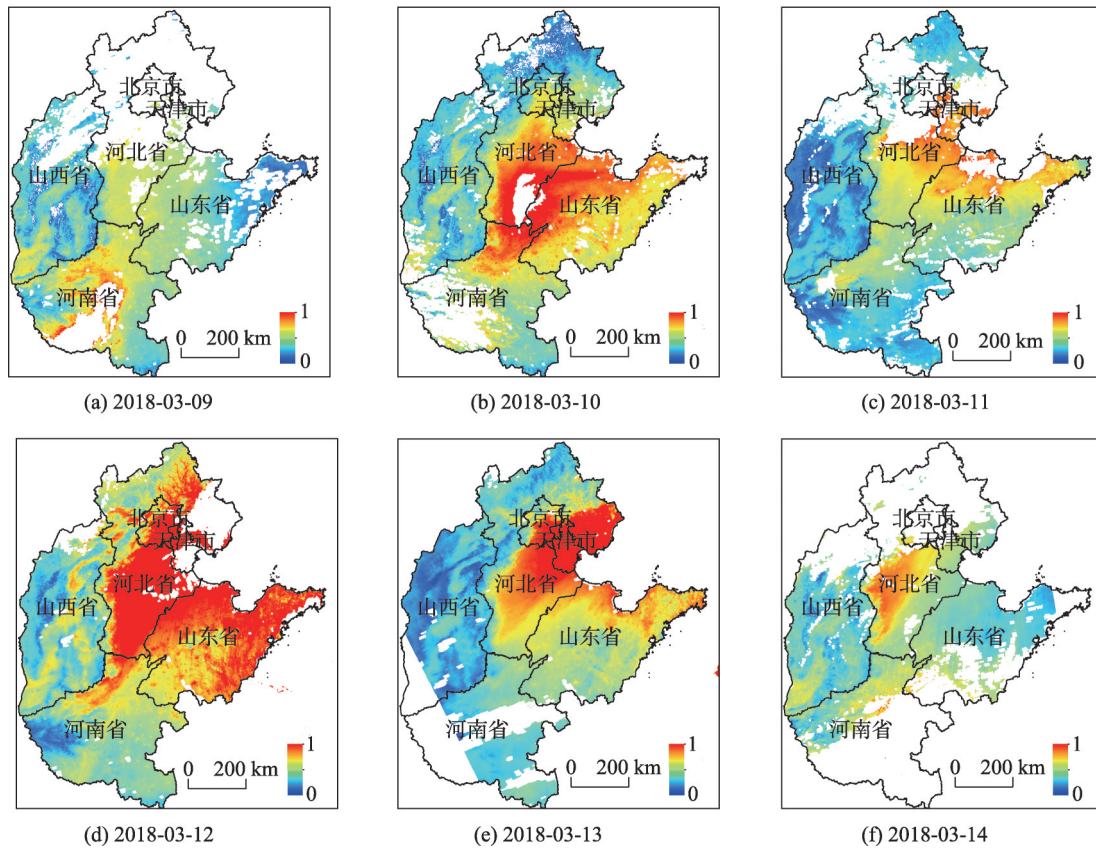


图7 基于FY3D/MERSI2的2018年3月9—14日京津冀及周边地区气溶胶污染过程监测分布  
Fig. 7 The distribution of Aerosol Pollution Process in Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Areas from 9 to 14 March 2018 using FY3D/MERSI2 data



## 4 结论

为发展国产气象卫星在大气气溶胶遥感监测及应用方面的能力,本研究综合暗象元和SARA算法优势,基于FY-3DMERSI2数据构建了一套1 km分辨率AOD快速遥感反演技术方法。该方法首先引入了传统暗象元算法中的地表反射率经验关系,然后利用AERONET长时间序列的地基观测数据,构建了气溶胶光学厚度与不对称因子和单次散射率之间的关系模型,解决了传统气溶胶遥感反演算法中对气溶胶模式辅助数据或者经验假设的要求。主要结论如下:

(1)在京津冀及周边区域的气溶胶光学厚度进行了遥感反演实验,与MOD04的AOD产品进行了对比分析,结果表明本研究反演的AOD不仅保持了与MODIS的AOD产品空间分布趋势一致性,而且在云和亮目标的识别效果方面有所改善,合理地呈现了AOD的高值分布;同时,利用AERONET地基观测结果对本研究获取的MERSI2的AOD反演结果进行了对比分析,发现二者具有较高的线性相关性,相关系数达0.77以上,并且二者的相关性在蓝波段(相关系数为0.86)略高于红波段(相关系数为0.77)。

(2)利用MERSI2数据对2018年3月京津冀及周边区域的一次重污染过程中气溶胶时空分布变化情况进行了初步应用分析,发现本研究获取的AOD结果完整地捕捉到了京津冀及周边地区一次重污染天气过程中气溶胶时空变化情况,这也说明了FY3D卫星具备良好的气溶胶遥感监测能力,可以为重污染天气监测和预警提供支撑。

考虑到FY3D/MERSI2的波段设置,本研究仅采用暗象元算法中早期的地表反射率经验关系,由于地表结构复杂,本文算法还需进一步研究MERSI2不同波段地表反射率之间的相互关系,减少AOD遥感反演中地表反射率误差所带来的影响。同时,发展多种地表的气溶胶遥感反演方法,提高国产卫星气溶胶遥感应用水平。

**致谢:**国家风云卫星遥感数据服务网为本研究提供了FY3D/MERSI2数据,AERONET和NASA提供了为本研究提供了CE318观测资料和MOD04数据下载服务,在此一并致谢。

## 参考文献(References):

- [1] 苏城林,苏林,陈良富,等. NPP VIIRS数据反演气溶胶光学厚度[J]. 遥感学报,2015,19(6):977-989. [ 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):977-989. ]
- [2] 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. [ Tian X P, Sun L, Liu Q, 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. ]
- [3] Muhammad B, Janet E N, Max P B, 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.
- [4] 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, 1997,102:16815-16830.
- [5] Hsu C N, 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.
- [6] Diner D J, Martonchika J V, Kahna R A, et al. Using angular and spectral shape similarity constraints to improve MISR aerosol and surface retrievals over land[J]. Remote Sensing of Environment, 2005,94:155-171.
- [7] 陈辉,厉青,王中挺,等. MERSI和MODIS卫星监测京津冀及周边地区PM<sub>2.5</sub>浓度[J]. 遥感学报,2018,22(5):822-832. [ Chen H, L Q, Wang Z T, et al. Utilization of MERSI and MODIS data to monitor PM<sub>2.5</sub> concentration in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas[J]. Journal of Remote Sensing, 2018,22(5):822-832. ]
- [8] 张婕. 卫星气溶胶产品评估与融合改进及其在区域PM<sub>2.5</sub>浓度估算中的应用[D]. 兰州:兰州大学,2016. [ Zhang J. Assessment, mergence of satellite aerosol products, and their applications in estimating regional PM<sub>2.5</sub> concentrations[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016. ]
- [9] 唐维尧,鲍艳松,张兴赢,等. FY-3A/MERSI、MODIS C5.1和C6气溶胶光学厚度产品在中国区域与地面观测站点的对比分析[J]. 气象学报,2018,76(3):449-460. [ Tang W Y, Bao Y S, Zhang X Y, et al. Comparison of FY-3A/MERSI, MODIS C5.1, C6 and AERONET aerosol optical depth in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2018,76(3): 449-460. ]
- [10] 杨何群,尹球,周红妹,等.利用MATLAB实现FY-3/MER-

- SI地表温度反演及专题制图[J].国土资源遥感,2012,24(4):62-70. [ Yang H Q, Yin Q, Zhou H M, et al. Utilization of MATLAB to realize LST retrieval and thematic mapping from FY-3/MERSI Data[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2012,24(4):62-70. ]
- [11] Muhammad B, Janet E N, Pak W C. Validation and accuracy assessment of a Simplified Aerosol Retrieval Algorithm (SARA) over Beijing under low and high aerosol loadings and dust storms[J]. Remote Sensing of Environment, 2014,153:50-60.
- [12] Levy R, Remer L, Tanré D, Kaufman Y J. Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol over dark targets from MODIS: Collections 005 and 051: Revision 2, February 2009, MODIS Algorithm Theoretical Basis Document[J]. 2009. DOI:http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<2229:RSOTAF>2.0.CO.
- [13] 朱爱军,胡秀清,林曼筠,等.风云三号D气象卫星全球数据获取方法及数据分发[J].海洋气象学报,2018,38(3):1-10. [ Zhu A J, Hu X Q, Lin M J, et al. Global data acquisition methods and data distribution for FY-3D meteorological satellite[J]. Journal of Marine Meteorology, 2018,38(3):1-10. ]
- [14] 金诚. FY-3D卫星光谱成像仪陆上云检测算法研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2018. [ Jin C. A Study on cloud detection algorithm of FY-3D spectral imager over land [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2018. ]
- [15] 张帅,师春香,梁晓,等.风云三号积雪覆盖产品评估[J].遥感技术与应用,2018,33(1):35-46. [ Zhang S, Shi C X, Liang X, et al. Assessment of FY-3 snow cover product[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018,33(1):35-46. ]
- [16] 汪洋,陈良富,李莘莘,等.基于VIIRS数据的中国东部气溶胶光学厚度反演算法改进[J].地球物理学报,2019,62(1):49-62. [ Wang Y, Chen L F, Li S S, et al. VIIRS aerosol optical depth (AOD) retrieval algorithm improvement in eastern China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019,62(1):49-62. ]
- [17] 刘方伟,苏庆华,孙林,等.基于Himwari-8卫星的沙尘监测[J].山东科技大学学报(自然科学版),2018,37(3):11-19. [ Liu F W, Su Q H, Sun L, et al. Dust monitoring with the himawari-8 satellite[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2018,37(3):11-19. ]
- [18] 高大伟,马浩,郁珍艳,等.基于连续MODIS真彩图的霾监测预警新方法——以浙江省一次严重霾污染过程为例[J].中国环境科学,2015,35(10):2939-2949. [ Gao D W, Ma H, Yu Z Y, et al. Monitoring haze events from the MODIS True-Color composite image series: A case study of severe haze pollution event in Zhejiang Province[J]. China Environmental Science, 2015,35(10):2939-2949. ]