

# FY-4A AGRI 陆地气溶胶光学厚度反演

谢艳清, 李正强, 侯伟真

1. 中国科学院空天信息创新研究院 国家环境保护卫星遥感重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 风云四号 A 星 (FY-4A) 是中国第二代静止气象卫星的首颗星, 多通道扫描成像辐射计 AGRI (Advanced Geosynchronous Radiation Imager) 是搭载在 FY-4A 上的主要光学载荷之一。AGRI 具有高频率观测特点 (每天观测 205 次), 在大气气溶胶的遥感高频监测方面具有良好应用潜力, 但目前官方还未发布相应的气溶胶数据集。本文旨在针对 AGRI 数据的特点开发基于地表反射率比值库的反演算法以生产高精度的 AGRI 气溶胶数据集。本文首先基于再分析数据对去云后的 AGRI L1 级数据进行气体吸收订正; 然后利用背景气溶胶光学厚度 AOD (Aerosol Optical Depth) 对一个月内的“次暗像元”进行大气校正以获取 AGRI 0.65  $\mu\text{m}$  和 0.83  $\mu\text{m}$  通道的地表反射率, 进而获取这两个通道的地表反射率的比值, 完成每个月的地表反射率比值库的构建; 最后便可以基于已构建的地表反射率比值库实现地气解耦, 完成气溶胶的遥感反演。该算法已被应用于 2019 年 5—10 月京津冀地区的气溶胶反演, AGRI AOD 反演结果与美国国家航天局发布的 MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) AOD 数据集、日本气象厅发布的 AHI (Advanced Himawari Imager) AOD 数据集的对比结果显示它们具有基本一致的空间分布趋势。利用 AERONET (Aerosol Robotic Network) 数据验证的结果显示 AGRI AOD 数据集具有较高的精度, 且其精度要优于 AHI AOD 数据集和 MODIS AOD 数据集。AGRI AOD 数据集的平均绝对误差, 均方根误差, 与地基数据的相关系数和误差落在期望误差  $\pm(0.05 + 0.15\text{AOD}_{\text{AERONET}})$  范围内的反演结果所占的比例分别是 0.09%, 0.12%, 0.91% 和 65.86%。上述验证结果表明基于地表反射率比值库的方法反演 AGRI AOD 具有可行性, 且反演结果具有较高的精度。

**关键词:** 气溶胶光学厚度, 遥感反演, 风云四号, 多通道扫描成像辐射计, 静止卫星

**引用格式:** 谢艳清, 李正强, 侯伟真. 2022. FY-4A AGRI 陆地气溶胶光学厚度反演. 遥感学报, 26(5): 913-922

Xie Y Q, Li Z Q and Hou W Z. 2022. Aerosol optical depth retrieval over land using data from AGRI onboard FY-4A. National Remote Sensing Bulletin, 26(5): 913-922 [DOI: 10.11834/jrs.20211366]

## 1 引言

气溶胶光学厚度 AOD (Aerosol Optical Depth) 是气溶胶的消光系数从地面到大气顶部的垂直积分, 它是表征气溶胶光学特性的重要参数之一 (Liu 等, 2016)。大气气溶胶在气候变化 (Samset 等, 2018)、大气环境监测 (Li 等, 2018) 以及定量遥感 (Mishra 等, 2020) 等领域均有重要的应用。由于气溶胶排放的时空差异较大, 且气溶胶的寿命较短, 气溶胶的分布具有显著的时空差异。因此, 对气溶胶进行大范围的高频率探测是十分重要的。

目前对气溶胶的探测主要有 3 种方式, 分别是

地基观测、航空测量和卫星监测, 其中卫星监测依据卫星的轨道又可以被分为静止卫星和极轨卫星两种 (Xie 等, 2020)。总地来看, 地基观测具有最高的精度, 例如 AERONET (Aerosol Robotic Network) 提供的紫外至近红外光谱范围内的气溶胶光学厚度数据的整体不确定性在 0.02 左右 (Giles 等, 2019)。不过由于站点数量的限制, AERONET 数据通常只用于气溶胶的区域研究和遥感数据的验证, 无法实现对气溶胶的大范围有效监测。航空测量和极轨卫星虽然可以实现对气溶胶的大范围监测, 但是由于视场角和重访周期的限制, 它们无法同时实现对气溶胶的大范围和高

收稿日期: 2021-05-31; 预印本: 2021-09-18

基金项目: 国家杰出青年科学基金(编号:41925019); 国家自然科学基金(编号:41871269)

第一作者简介: 谢艳清, 研究方向为大气定量遥感。E-mail: xieyq@radi.ac.cn

通信作者简介: 侯伟真, 研究方向为气溶胶偏振遥感及最优化反演。E-mail: houwz@radi.ac.cn

频率的监测 (Burton 等, 2012; Kolmonen 等, 2016)。与上述的观测设备相比, 静止卫星由于具有极高的观测频率和非常大的观测范围, 其可以同时实现对气溶胶的大范围和高频率的监测, 因此开发基于静止卫星的 AOD 数据集意义重大 (Yang 等, 2018)。

风云四号 A 星 (FY-4A) 是中国第二代静止气象卫星的首颗卫星, 多通道扫描成像辐射计 AGRI (Advanced Geosynchronous Radiation Imager) 是搭载在 FY-4A 上的主要光学载荷之一 (Yang 等, 2017), 其具有 2 个可见光通道 (0.47, 0.65  $\mu\text{m}$ ), 1 个近红外通道 (0.83  $\mu\text{m}$ ), 3 个短波红外通道 (1.38, 1.61 和 2.23  $\mu\text{m}$ ) 和 8 个中红外通道。AGRI 每天成像 205 次, 可以为中国大气气溶胶的遥感监测提供充足的数据保障。目前研究人员针对 FY-4A AGRI 开发的气溶胶反演算法还比较少, 主要有深蓝算法 (祝善友等, 2020) 和暗目标算法 (许梦婕等, 2020) 两种气溶胶反演算法, 这两种算法也是 MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) 气溶胶产品的官方算法。其中, MODIS 暗目标算法的关键是精确的确定 MODIS 0.47  $\mu\text{m}$ 、0.64  $\mu\text{m}$  和 2.12  $\mu\text{m}$  波段的地表反射率在暗目标区域的线性关系, Levy 等 (2013) 采用的方法是使用地基数据对 MODIS 0.47  $\mu\text{m}$ 、0.64  $\mu\text{m}$  和 2.12  $\mu\text{m}$  波段的数据进行大气校正以获取这 3 个波段的地表反射率, 然后通过统计确定这 3 个波段的地表反射率在暗目标区域的线性关系。而许梦婕等 (2020) 直接将 Kaufman 等 (1997) 构建的 MODIS 0.47  $\mu\text{m}$ 、0.64  $\mu\text{m}$  和 2.12  $\mu\text{m}$  波段的地表反射率在暗目标区域的比值关系移植到 AGRI 的 0.47  $\mu\text{m}$ 、0.65  $\mu\text{m}$  和 2.23  $\mu\text{m}$  通道上, 认为在暗目标区域 AGRI 的 0.47  $\mu\text{m}$  通道的地表反射率为 2.23  $\mu\text{m}$  通道的地表反射率的四分之一, AGRI 的 0.64  $\mu\text{m}$  通道的地表反射率为 2.23  $\mu\text{m}$  通道的地表反射率的二分之一, 没有考虑 MODIS 和 AGRI 在波段设置上的显著差异, 这会不可避免的引入较大的 AOD 反演误差。初步的验证结果显示许梦婕等人开发的 FY-4A AOD 数据集存在明显的低估, 未来需要重新构建 FY-4A AGRI 的 0.47  $\mu\text{m}$ 、0.65  $\mu\text{m}$  和 2.23  $\mu\text{m}$  通道在暗目标区域的地表反射率的比值关系以提升反演结果的精度。祝善友等 (2020) 基于深蓝算法的原理开发的 FY-4A 气溶胶反演算法需要使用 AGRI 的深蓝波段, 而 AGRI 的深蓝波段是 AGRI 可

见光通道中信噪比最低的波段 (信噪比为 90) (张鹏等, 2016), 这会对反演结果的精度产生消极影响。使用 MODIS AOD 数据集对祝善友等人开发的 FY-4A AOD 数据集进行验证的结果显示近一半的天数的反演结果的均方根误差大于 0.4 (祝善友等, 2020)。总地来看, 目前针对 FY-4A 开发的气溶胶产品还比较少, 且精度要差于同样可以覆盖东亚地区的 Himawari-8 气溶胶产品的精度, 因此目前研究人员使用的中国及周边区域的静止卫星气溶胶产品基本都是 Himawari-8 的气溶胶产品, 而很少使用 FY-4A 的气溶胶产品 (Xu 等, 2021; Xue 等, 2020)。

由于 AGRI 的 0.47  $\mu\text{m}$  波段的信噪比较低, 且存在明显的条带现象, 为了保证气溶胶反演结果的质量, 应当避免使用该波段。而常用的暗目标算法 (Levy 等, 2013) 和深蓝算法 (Hsu 等, 2006) 都需要用到 AGRI 的 0.47  $\mu\text{m}$  波段, 因此本研究将结合 FY-4A AGRI 的特点, 开发一种面向 FY-4A AGRI 的基于地表反射率比值库的气溶胶反演算法。该算法的基本原理如下: 首先选取每个月的“次暗像元” (一个月内表观反射率第 2 小的像元), 使用背景 AOD 对“次暗像元”进行大气校正 (Prados 等, 2007), 以获取 AGRI 0.65  $\mu\text{m}$  和 0.83  $\mu\text{m}$  波段的地表反射率, 进而获取这两个波段的地表反射率的比值, 完成 0.65  $\mu\text{m}$  和 0.83  $\mu\text{m}$  波段的地表反射率比值库的构建, 最后便可以依据已构建的地表反射率比值库实现地气解耦, 完成气溶胶的遥感反演。与深蓝算法和暗目标算法相比, 该算法对于气溶胶反演的数据的波长没有特定要求, 能够在不使用 AGRI 质量较差的 0.47  $\mu\text{m}$  波段数据的情况下实现气溶胶反演, 可以保证气溶胶反演结果的质量。

## 2 数据及反演算法

### 2.1 数据介绍

#### 2.1.1 FY-4A AGRI 数据

FY-4A 是中国新一代的静止气象卫星, AGRI 是搭载在 FY-4A 上的主要光学载荷。AGRI 总共有 14 个光谱通道, 其在可见光至短波红外范围内的光谱通道一共有 6 个 (Min 等, 2017), 这些通道的空间分辨率及信噪比等参数见表 1, 光谱响应函数如图 1 所示。正常情况下, AGRI 每天全盘成

像40次,对东亚区域成像165次,能够给东亚区域的大气气溶胶的遥感反演提供充足的数据保障。但是由于太阳高度角的变化,并不是所有时刻的AGRI数据均可以用于气溶胶的反演,本研究使用的是UTC时间0时—8时的数据。尽管AGRI的0.65  $\mu\text{m}$ 和0.83  $\mu\text{m}$ 通道的星下点的空间分辨率为1 km,但是国家卫星气象中心只发布了星下点的空间分辨率为4 km的观测几何数据,不提供其他空间分辨率的观测几何数据,因此本研究选择的是星下点的空间分辨率为4 km的AGRI L1级数据。此外,本文还采用了国家卫星气象中心发布的云识别产品(Min等,2017)来剔除L1级数据中的云像元。上述所有AGRI数据均可以从国家卫星气象中心的网站免费获取。

表1 FY-4A AGRI的可见光、近红外及短波红外通道的参数设置

Table 1 Settings of visible, near-infrared and short-wave infrared channels of FY-4A AGRI

波段序号	波段简称	中心波长/ $\mu\text{m}$	波长范围/ $\mu\text{m}$	空间分辨率/ km	信噪比
1	VIS04	0.47	0.45—0.49	1	90
2	VIS06	0.65	0.55—0.75	0.5/1	150
3	NIR08	0.83	0.75—0.90	1	200
4	SWIR13	1.38	1.36—1.39	2	150
5	SWIR16	1.61	1.58—1.64	2	200
6	SWIR22	2.23	2.10—2.35	2/4	200

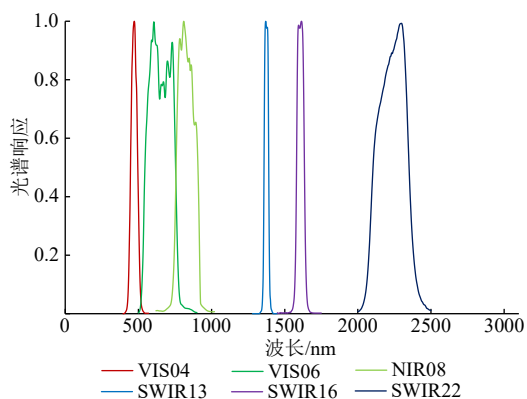


图1 FY-4A AGRI的可见光、近红外及短波红外通道的光谱响应函数

Fig.1 Spectral response functions of visible, near-infrared and short-wave infrared channels of FY-4A AGRI

### 2.1.2 AHI AOD数据

Himawari-8是日本Himawari系列静止卫星的第8颗,AHI(Advanced Himawari Imager)是搭载在Himawari-8上的光学载荷。由JMA(Japan

Meteorological Agency)发布的官方L2等级的AHI AOD数据集(Yoshida等,2018)的空间分辨率为5 km,时间分辨率为10 min。该产品的算法原理与深蓝算法的原理类似,都是基于提前计算的地表反射率库实现地气解耦(Fukuda等,2013)。已有的研究表明官方AHI AOD数据集和地基观测结果具有很高的相关性( $R>0.8$ )(Zhang等,2019)。AHI AOD数据集根据其精度被分为4个等级,分别是Very good, Good, Marginal和No confidence。本研究中我们将对比AGRI AOD数据集和最高质量等级的AHI AOD数据集的精度,以对本研究开发的AGRI AOD数据集的精度有一个更明确的认识。

### 2.1.3 MODIS AOD数据

MODIS是搭载在Aqua和Terra两颗卫星上的光学载荷。本文选用的是NASA最新发布的C61版本的MODIS气溶胶产品(MXD04),它的空间分辨率为10 km。MODIS气溶胶产品中包含了AOD和气溶胶类型等数据,其中AOD数据包括暗目标算法(Levy等,2013)和深蓝算法(Sayer等,2013)的反演结果,以及根据NDVI等参数对暗目标算法和深蓝算法的反演结果进行集成得到的AOD数据集。NASA发布的AOD数据集是目前精度最高的AOD数据集之一,我们将对比AGRI AOD数据集和MODIS AOD数据集的精度和空间分布,以更加全面的评估AGRI AOD数据集的质量。

### 2.1.4 ECMWF ERA5再分析数据

ERA5(ECMWF Reanalysis v5)是ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)开发的最新一代的再分析数据,ERA5中包含了云的空间覆盖,水汽含量,臭氧含量等多种数据(Hersbach等,2020)。其中,ECMWF发布的水汽和臭氧再分析数据的空间分辨率为 $0.25^\circ$ ,时间分辨率为1 h。由于用于气溶胶反演的AGRI 0.65  $\mu\text{m}$ 和0.83  $\mu\text{m}$ 通道的数据会受到水汽和臭氧吸收的影响,本研究需要在气溶胶反演之前依据ECMWF发布的水汽和臭氧再分析数据对AGRI数据进行气体吸收订正。

### 2.1.5 AERONET AOD数据

AERONET是由NASA参与建立的覆盖全球的地基气溶胶观测网,其已经连续工作超过25 a。由于AERONET AOD数据具有非常高的精度,其被

广泛的用于遥感 AOD 数据的验证。本研究中采用 AERONET 最新发布的 Version 3.0 版本的过去云处理和质控的 Level 1.5 等级的 AOD 数据 (Giles 等, 2019) 对遥感 AOD 数据集进行质量评估。由于本文反演的 FY-4A AOD 数据集的波长为 550 nm, 而 AERONET 提供的数据中不包含波长为 550 nm 的 AOD 数据, 因此本文将依据式 (1) 通过内插相邻波段 (440 nm 和 675 nm) 的 AOD 来获取 550 nm 处的 AOD (马小雨 等, 2020)。本文的研究区域为中国大气污染较为严重的京津冀地区, 一共 5 个 AERONET 站点被用于遥感 AOD 数据集的验证, 它们的信息如表 2 所示。

$$\tau_{\lambda} = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (1)$$

式中,  $\tau_{\lambda}$  表示波长为  $\lambda$  处的 AOD,  $\beta$  是大气的浑浊度系数,  $\alpha$  是表示 Ångström 指数。

表 2 京津冀地区 AERONET 站点的地理信息

Table 2 Geographic information of AERONET sites in Beijing-Tianjin-Hebei region

站点	经度/°E	纬度/°N	高程/m
Beijing-CAMS	116.32	39.93	106
Beijing_RADI	116.38	40.00	59
Beijing_PKU	116.31	39.99	53
XiangHe	116.96	39.75	36
Yanqihu	116.67	40.41	100

## 2.2 反演算法

### 2.2.1 AGRI 数据的预处理

本文使用的气溶胶反演算法只适用于无云的像元。如果不能有效的去除云像元, 将会出现严重偏离真实值的气溶胶反演结果。为了避免这种情况的出现, 本文在气溶胶反演之前将首先利用国家卫星气象中心发布的 AGRI 官方云识别产品剔除 L1 级 AGRI 数据中存在的云像元。另外, 本研究采用的星下点空间分辨率为 4 km 的 L1 级 AGRI 数据在不同位置处的空间分辨率是不一致的, 其在京津冀地区的空间分辨率约为 10 km, 为了方便 AOD 反演结果的后续使用, 将研究区内的 AGRI 数据统一重采样为空间分辨率为 10 km 的数据。

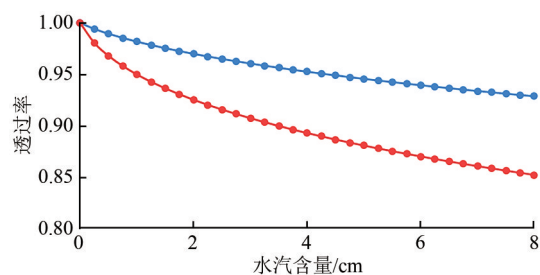
### 2.2.2 AGRI 数据的气体吸收订正

由于 AGRI 0.65  $\mu\text{m}$  和 0.83  $\mu\text{m}$  通道并不完全位于大气窗口内, 会受到大气的吸收影响, 尤其是

水汽和臭氧的吸收。0.65  $\mu\text{m}$  和 0.83  $\mu\text{m}$  通道在不同水汽和臭氧含量下的大气吸收透过率如图 2 所示。为了保证反演结果的精度, 需要在气溶胶反演之前对 AGRI L1 级数据进行气体吸收订正。本文采用的吸收订正方法如下, 利用 6SV 辐射传输模型 (Vermote 等, 1997, 2006) 构建一个用于水汽和臭氧吸收订正的 6 维查找表, 6 个纬度分别为: 波段 (0.65  $\mu\text{m}$  和 0.83  $\mu\text{m}$ ), 太阳天顶角 (0—70°, 间隔 10°), 卫星天顶角 (0—70°, 间隔 10°), 水汽含量 (0—8 cm, 间隔 0.25 cm), 臭氧含量 (0—0.8 cm-atm, 间隔 0.04 cm-atm) 和大气吸收透过率。在完成上述查找表的构建之后, 便可以逐像元的依据太阳天顶角、卫星天顶角, 水汽含量和臭氧含量通过插值计算出 0.65  $\mu\text{m}$  通道和 0.83  $\mu\text{m}$  通道的大气吸收透过率, 进而便可以根据式 (2) 计算出气体吸收订正之后的 AGRI 0.65  $\mu\text{m}$  和 0.83  $\mu\text{m}$  通道的 TOA 反射率。

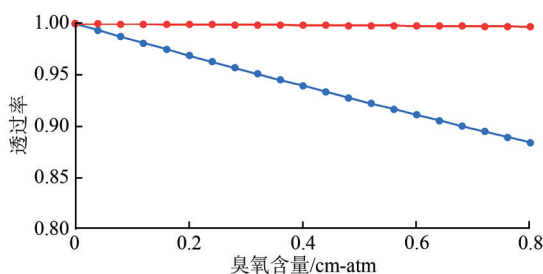
$$\text{TOA}_c^{\lambda} = \text{TOA}_w^{\lambda} / T_w^{\lambda} \quad (2)$$

式中,  $\text{TOA}_w^{\lambda}$  是中心波长为  $\lambda$  的通道气体吸收订正之前的 TOA 反射率,  $T_w^{\lambda}$  为对应的气体吸收透过率,  $\text{TOA}_c^{\lambda}$  是气体吸收订正之后的 TOA 反射率。



(a) 臭氧含量为 0 时的大气透过率

(a) Atmospheric transmittance when ozone content equals 0



(b) 水汽含量为 0 时的大气透过率

(b) Atmospheric transmittance when water vapor content equals 0

— VIS06 — NIR08

图 2 AGRI 的 VIS06 和 NIR08 通道在不同水汽和臭氧含量下的大气吸收透过率 ( $\theta_s=30^\circ$ ,  $\theta_v=30^\circ$ )

Fig.2 The atmospheric transmittance of VIS06 and NIR08 channels of FY-4A AGRI under different water vapor and ozone contents ( $\theta_s=30^\circ$ ,  $\theta_v=30^\circ$ )

### 2.2.3 地表反射率比值库的构建

已有研究表明对于气溶胶反演,可以假定卫星不同通道的地表反射率的比值在一个月內不发生变化(Knapp等,2005;Yoshida等,2018),且可以在一个月內的“次暗像元”受气溶胶影响极小的假设之下对“次暗像元”进行大气校正,以获取不同通道的地表反射率(Prados等,2007),进而获取不同通道的地表反射率的比值。Knapp等(2005)测试了利用不同的AOD对“次暗像元”进行大气校正的效果,发现将AOD设为0.02时对“次暗像元”进行大气校正得到的地表反射率与真实的地表反射率最为接近。因此,本文把用于“次暗像元”大气校正的AOD设为0.02。此处使用的“次暗像元”是指一个月內表观反射率次小的像元。例如可以通过下述的方法选取2019年5月M位置处(本文指任意位置)的“次暗像元”:首先利用ECMWF再分析数据对2019年5月M位置处的所有 $0.65\ \mu\text{m}$ 通道和 $0.83\ \mu\text{m}$ 通道的数据进行气体吸收订正,然后从气体吸收订正之后的数据中选取M位置处 $0.65\ \mu\text{m}$ 通道次小的表观反射率数据,被选择的AGRI  $0.65\ \mu\text{m}$ 通道的表观反射率数据及其同一观测时刻的 $0.83\ \mu\text{m}$ 通道的TOA数据即为2019年5月M位置处的“次暗像元”。其中,之所以要选择“次暗像元”而不是“最暗像元”来计算地表反射率是为了剔除可能存在的云的阴影的影响。

本研究中依据上述方法在每个月都利用当月的AGRI数据构建了一个 $0.65\ \mu\text{m}$ 通道和 $0.83\ \mu\text{m}$ 通道的地表反射率的比值文件,完整的比值库由所有月份的比值文件共同组成。现以构建2019年5月的比值文件为例介绍构建比值库的基本流程:(1)首先选出2019年5月的AGRI数据在研究区各个位置处的 $0.65\ \mu\text{m}$ 和 $0.83\ \mu\text{m}$ 波段的“次暗像元”;(2)在“次暗像元”受气溶胶影响极小( $550\ \text{nm}$ 处的AOD等于0.02)的假设之下对这些“次暗像元”进行大气校正,得到整个研究区的 $0.65\ \mu\text{m}$ 和 $0.83\ \mu\text{m}$ 通道的地表反射率;(3)将得到的 $0.65\ \mu\text{m}$ 通道的地表反射率除以 $0.83\ \mu\text{m}$ 通道的地表反射率便可以得到2019年5月的 $0.65\ \mu\text{m}$ 通道和 $0.83\ \mu\text{m}$ 通道的地表反射率的比值文件。本文构建的 $0.65\ \mu\text{m}$ 通道和 $0.83\ \mu\text{m}$ 通道的地表反射率的比值文件的示例如图3所示。

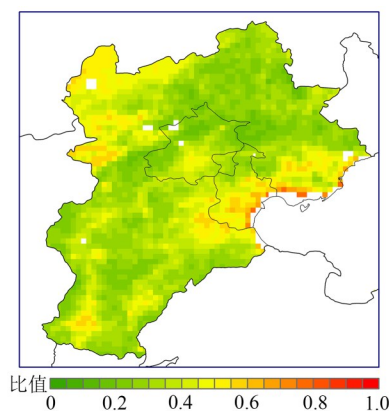


图3 2019年5月的AGRI VIS06和NIR08通道的地表反射率的比值

Fig.3 Ratio of the surface reflectance of the VIS06 channel of AGRI to that of the NIR08 channel of AGRI in May 2019

### 2.2.4 气溶胶反演

对于一个特定的像元,如果已知气溶胶类型、AOD和任意两个通道的地表反射率的比值,则可以根据式(3)—(4)使用一个通道的TOA反射率模拟出另外一个通道的TOA反射率。上述模拟过程的基本原理如下:如果已知某像元A通道的TOA反射率,想要模拟出该像元某种气溶胶类型和AOD情况下的B通道的TOA反射率,可以首先计算出这种气溶胶类型和AOD情况下的A通道和B通道的各个大气参数(透射率,程辐射和半球反射率),然后通过式(4)计算得到这种气溶胶类型和AOD情况下的A通道的地表反射率,进而可以依据A通道与B通道的地表反射率的比值计算得到B通道的地表反射率,然后通过式(3)模拟出这种气溶胶类型和AOD情况下B通道的TOA反射率。上述内容是开发的气溶胶反演算法在实现气溶胶反演之前所需的一些必备知识,即怎样在两个波段( $0.65\ \mu\text{m}$ 波段和 $0.83\ \mu\text{m}$ 波段)的地表反射率的比值和气溶胶信息已知的情况下,利用 $0.83\ \mu\text{m}$ 波段的TOA反射率模拟 $0.65\ \mu\text{m}$ 通道的TOA反射率。

本文假定气溶胶类型为大陆型气溶胶,在获取上述的必备知识之后我们便可以利用 $0.83\ \mu\text{m}$ 通道的实际观测的TOA反射率模拟出 $0.65\ \mu\text{m}$ 通道在不同AOD情况下(0—2,间隔0.001)的2001个TOA反射率。其中与实际观测的 $0.65\ \mu\text{m}$ 通道的TOA反射率最为接近的模拟TOA反射率所对应的AOD即为本算法的AOD反演结果。为了提升反演的效率,基于6SV模型提前创建了一个9维

的查找表,这9个维度分别为:波段(0.65  $\mu\text{m}$ , 0.83  $\mu\text{m}$ ),太阳天顶角(0—65°,间隔5°),卫星天顶角(0—65°,间隔5°),太阳和卫星的相对方位角(0—360°,间隔10°),高程(0—2000 m,间隔400 m),550 nm处的AOD(0—2,间隔0.1),程辐射,透射率和半球反射率。完成上述查找表的构建之后,实际反演时便可以通过插值的方法计算出0.65  $\mu\text{m}$ 和0.83  $\mu\text{m}$ 两个通道在不同AOD情况下(0—2,间隔0.001)的大气参数以提升反演效率。

$$\text{TOA}_c^\lambda = \rho_0^\lambda(\theta_v, \theta_s, \varphi) + \frac{T_\downarrow^\lambda(\theta_s)T_\uparrow^\lambda(\theta_v)\rho_{\text{surf}}^\lambda}{1 - \rho_{\text{surf}}^\lambda S_\lambda} \quad (3)$$

$$\rho_{\text{surf}}^\lambda = \frac{\text{TOA}_c^\lambda - \rho_0^\lambda(\theta_v, \theta_s, \varphi)}{T_\downarrow^\lambda(\theta_s)T_\uparrow^\lambda(\theta_v) + S_\lambda(\text{TOA}_c^\lambda - \rho_0^\lambda(\theta_v, \theta_s, \varphi))} \quad (4)$$

式中,  $\varphi$ 是相对方位角,  $\theta_v$ 是卫星天顶角,  $\theta_s$ 是太阳天顶角,  $\text{TOA}_c^\lambda$ 是经过气体吸收订正之后的波长为 $\lambda$ 的通道的TOA反射率,  $T_\uparrow^\lambda(\theta_v)$ 和 $T_\downarrow^\lambda(\theta_s)$ 分别是上行和下行的大气透射率,  $S_\lambda$ 是大气的半球反照率,  $\rho_{\text{surf}}^\lambda$ 是地表的反射率。

### 3 反演结果与分析

#### 3.1 AGRI AOD数据集与MODIS AOD数据集、AHI AOD数据集的空间分布对比

本研究开发的AGRI AOD数据集和AHI AOD数据集采用的投影均是等经纬度投影,而MODIS AOD数据集的投影不是等经纬度投影,为方便对比,将MODIS AOD数据集也重采样成了等经纬度投影的数据。AGRI AOD数据集、AHI AOD数据集、MODIS DB AOD数据集和MODIS集成AOD数据集在2019-09-27—2019-09-28的空间分布如图4所示。通过对图4进行分析可知,这4种AOD数据集在空间分布上均具备很好的连续性,几乎没有在空间上突变的异常值。总的来看,AGRI AOD数据集、AHI AOD数据集、MODIS DB AOD数据集和MODIS集成AOD数据集的空间分布趋势基本一致:9月27日的4种AOD数据集的空间分布都是河北的南部(邯郸,邢台)、北京及天津的AOD较高,其他区域的AOD较低;9月28日两种AOD数据集的空间分布都是京津冀的东南部高,西北部低。

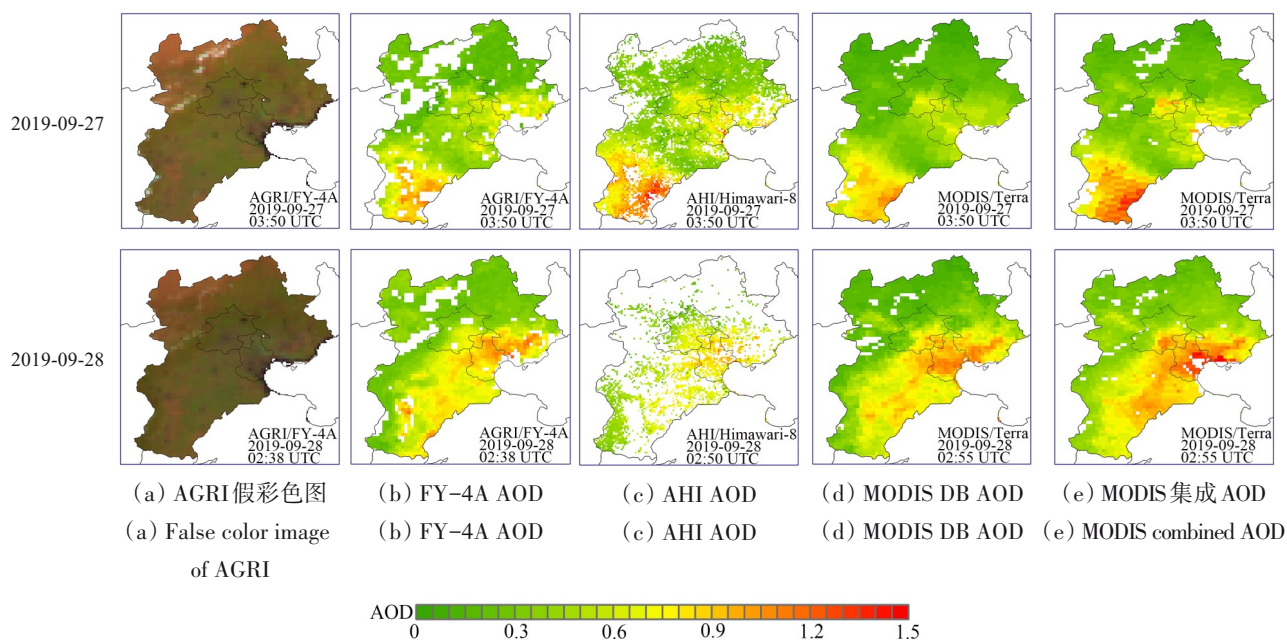


图4 FY-4A AOD、AHI AOD及MODIS AOD数据集2019-09-27—2019-09-28在京津冀地区的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of FY-4A AOD dataset, AHI AOD dataset and MODIS AOD datasets in Beijing-Tianjin-Hebei region on September 27-28, 2019

#### 3.2 AGRI AOD数据集的验证结果

本文将采用6个参数对遥感AOD数据集的精度进行评估,分别是平均绝对误差MAE (Mean Absolu-

te Error), 均方根误差RMSE (Root Mean Square Error), 相对误差RE (Relative Error), 误差落在期望误差 $\pm(0.05 + 0.15\text{AOD}_{\text{AERONET}})$ 范围内的反演结果

所占的比例 (EE15), 平均偏差 ME (Mean Error) 以及相关系数  $R$  (Jiang等, 2019)。MAE, RMSE, RE, ME 和  $R$  的具体计算原理见式(5)—(9)。

$$MAE = \sum_{i=1}^N |A_i - A'_i| / N \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N (A_i - A'_i)^2 / N} \quad (6)$$

$$RE = \sum_{i=1}^N |A_i - A'_i| / \sum_{i=1}^N |A'_i| \quad (7)$$

$$ME = \sum_{i=1}^N (A_i - A'_i) / N \quad (8)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (A_i - \bar{A})(A'_i - \bar{A}')}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (A_i - \bar{A})^2 \sum_{i=1}^N (A'_i - \bar{A}')^2}} \quad (9)$$

式中,  $A_i$  是遥感 AOD 反演结果,  $A'_i$  是对应的地基 AOD 数据,  $\bar{A}$  和  $\bar{A}'$  分别是遥感 AOD 反演结果的均值和地基 AOD 的均值,  $N$  是地基数据与遥感数据有效匹配结果的数量。

本研究开发的 AGRI AOD 数据集, AHI AOD 数据集和 MODIS 集成 AOD 数据集在 2019-05—2019-10 的验证结果的散点图如图 5 所示。首先来对比 AGRI AOD 数据集和 AHI AOD 数据集, 总地来看, AGRI AOD 数据集的 RMSE, MAE, RE, ME,  $R$  和 EE15 均要优于 AHI AOD 数据集。具体来看, RMSE

和 MAE 是用来表征遥感反演结果绝对误差的参数, AGRI AOD 数据集的 RMSE (0.12) 和 MAE (0.09) 要明显的小于 AHI AOD 数据集的 RMSE (0.16) 和 MAE (0.12), 这表明相比于 AHI AOD 数据集, AGRI AOD 数据集的绝对误差更小。ME 是用来表征遥感 AOD 数据集在整体上是存在高估或低估现象的参数, AGRI AOD 数据集和 AHI AOD 数据集的 ME 分别为 0 和 0.04, 这表明 AGRI AOD 数据集在整体上基本不存在高估或低估现象, 而 AHI AOD 数据集则存在一定的高估。RE 是用来表征遥感 AOD 数据集的相对误差的参数, AGRI AOD 数据集的 RE (0.24) 要明显的小于 AHI AOD 数据集的 RE (0.28), 这意味着 AGRI AOD 数据集的相对误差更小。AGRI AOD 数据集和 AHI AOD 数据集的 EE15 分别是 65.86% 和 58.14%, 这意味着相比于 AHI AOD 数据集, AGRI AOD 数据集的误差落在  $\pm(0.05 + 0.15AOD_{AERONET})$  范围内的数据所占的比例更高。相关系数  $R$  是用来表征遥感反演结果与地基反演结果相关性的参数, AGRI AOD 数据集和 AHI AOD 数据集都与地基数据具有很高的相关性, 但 AGRI AOD 数据集与地基数据的相关性 ( $R=0.91$ ) 要略高于 AHI AOD 数据集与地基数据的相关性 ( $R=0.89$ )。综上, 尽管 FY-4A AGRI 的信噪比要低于 Himawari-8 AHI 的信噪比 (张鹏等, 2016), 本研究开发的 AGRI AOD 数据集的绝对误差, 相对误差等参数却均优于 JMA 发布的官方 AHI AOD 数据集。

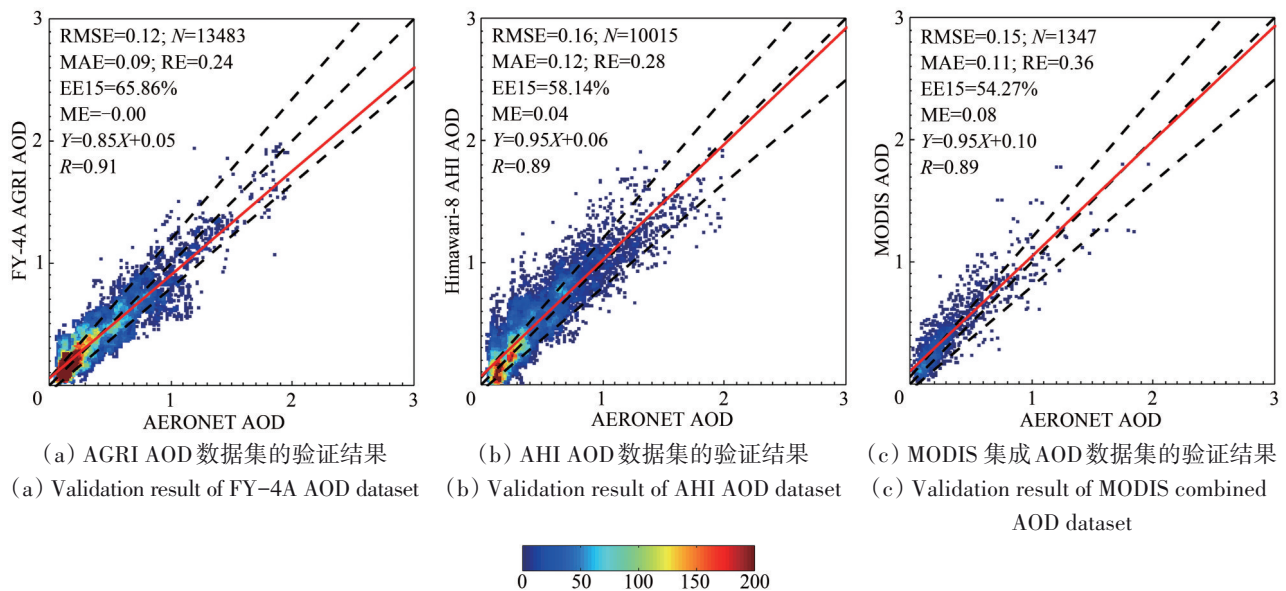


图5 AGRI AOD 数据集、AHI AOD 数据集及 MODIS 集成 AOD 数据集与地基数据的验证结果的散点图  
Fig.5 Scatter plot of AGRI AOD dataset, AHI AOD dataset, MODIS AOD dataset against ground-based data

为了对 AGRI AOD 数据集的精度有一个更加明确的认识, 还对比了 AGRI AOD 数据集和 MODIS

集成 AOD 数据集的精度。AGRI AOD 数据集的 RMSE、MAE、RE、ME、 $R$  和 EE15 分别是 0.12、

0.09、0.24、0、0.91和65.86%，MODIS集成AOD数据集的RMSE、MAE、RE、ME、 $R$ 和EE15分别是0.15、0.11、0.36、0.08、0.89和54.27%。总的来看，AGRI AOD数据集的绝对误差，相对误差和反演结果的误差落在 $\pm(0.05 + 0.15AOD_{AERONET})$ 范围内的数据所占比例均要优于MODIS集成AOD数据集，而MODIS AOD数据集是目前被广泛应用且具有较高精度的AOD数据集之一，因此可以认为本研究开发的AGRI AOD数据集具有较高的精度。

## 4 结论

搭载在静止卫星FY-4A上的AGRI具有极高的观测频率，可为大气气溶胶的持续监测提供充足的数据支持，但目前尚没有公开发布的AGRI AOD数据集可供使用。本文面向AGRI开发了一套基于地表反射率比值库的气溶胶反演算法以获取高精度的AGRI AOD数据集。反演算法由4部分构成：(1) AGRI L1级数据的预处理；(2) AGRI L1级数据的气体吸收订正；(3) AGRI 0.65  $\mu\text{m}$ 和0.83  $\mu\text{m}$ 通道的地表反射率比值库的构建；(4) 基于地表反射率比值库的气溶胶反演。该算法已被应用于京津冀地区的气溶胶反演。利用地基数据，AHI AOD数据和MODIS集成AOD数据评估AGRI AOD数据的质量，结果显示AGRI AOD数据具有较高的精度，且其精度要高于目前被广泛使用的AHI AOD数据集和MODIS AOD数据集的精度。这表明本文提出的基于地表反射率比值库的气溶胶反演算法可用于高精度AGRI AOD数据集的开发。

相比于已有的基于暗目标和深蓝算法原理开发的AGRI AOD反演算法（许梦婕等，2020；祝善友等，2020），本文提出的气溶胶反演算法的创新点主要体现在两个方面：(1) 该算法仅依靠AGRI数据来完成地表反射率比值库的构建，不需要借助额外的MODIS AOD数据、地表反射率数据或是AERONET AOD数据。(2) 该算法对参加反演的遥感数据的波长没有特定的要求，只需要两个通道（至少包含一个可见光通道）的数据即可实现气溶胶反演，适用于AHI、MODIS等目前在轨运行的大多数卫星传感器，具有较强的灵活性和可移植性。

尽管本文取得了一定的成果，但针对AGRI数据开发的气溶胶反演算法仍然有一定的改进空间，主要表现为本研究采用的气溶胶反演算法仅考虑

了大陆型一种气溶胶类型。事实上，仅利用大陆型一种气溶胶类型并不能完全表征京津冀地区所有的气溶胶情况，这会对气溶胶反演结果的精度造成负面影响。未来需要利用AERONET等地基观测数据构建更多贴近研究区实际情况的气溶胶模型，并将其引入到AGRI气溶胶反演算法中，以进一步提升气溶胶反演结果的精度。

**志 谢** 本研究使用的FY-4A数据，MODIS数据，Himawari-8数据和再分析数据分别是由中国国家卫星气象中心，NASA，JMA和ECMWF提供的，作者向上述机构表示感谢。此外，本研究使用了5个AERONET站点（Beijing-CAMS，Yanqihu，Beijing\_RADI，XiangHe，Beijing\_PKU）的数据用于遥感AOD数据的验证，感谢建立和维护上述站点的相关人员。

## 参考文献(References)

- Burton S P, Ferrare R A, Hostetler C A, Hair J W, Rogers R R, Obland M D, Butler C F, Cook A L, Harper D B and Froyd K D. 2012. Aerosol classification using airborne High Spectral Resolution Lidar measurements - methodology and examples. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(1): 73-98 [DOI: 10.5194/amt-5-73-2012]
- Fukuda S, Nakajima T, Takenaka H, Higurashi A, Kikuchi N, Nakajima T Y and Ishida H. 2013. New approaches to removing cloud shadows and evaluating the 380 nm surface reflectance for improved aerosol optical thickness retrievals from the GOSAT/TAN-SO-Cloud and Aerosol Imager. *Journal of Geophysical Research*, 118(24): 13520-13531 [DOI: 10.1002/2013jd020090]
- Giles D M, Sinyuk A, Sorokin M G, Schafer J S, Smirnov A, Slutsker I, Eck T F, Holben B N, Lewis J R, Campbell J R, Welton E J, Korokin S V and Lyapustin A I. 2019. Advancements in the Aerosol Robotic Network (AERONET) Version 3 database - automated near-real-time quality control algorithm with improved cloud screening for Sun photometer aerosol optical depth (AOD) measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(1): 169-209 [DOI: 10.5194/amt-12-169-2019]
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, Hirahara S, Horányi A, Muñoz-Sabater J, Nicolas J, Peubey C, Radu R, Schepers D, Simmons A, Soci C, Abdalla S, Abellan X, Balsamo G, Bechtold P, Biavati G, Bidlot J, Bonavita M, de Chiara G, Dahlgren P, Dee D, Diamantakis M, Dragani R, Flemming J, Forbes R, Fuentes M, Geer A, Haimberger L, Healy S, Hogan R J, Hólm E, Janisková M, Keeley S, Laloyaux P, Lopez P, Lupu C, Radnoti G, de Rosnay P, Rozum I, Vamborg F, Villaume S and Thépaut J N. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730): 1999-2049 [DOI: 10.1002/qj.3803]



- Hsu N C, Tsay S C, King M D and Herman J R. 2006. Deep blue retrievals of asian aerosol properties during ACE-Asia. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(11): 3180-3195 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.879540]
- Jiang T T, Chen B, Chan K K Y and Xu B. 2019. Himawari-8/AHI and MODIS aerosol optical depths in China: evaluation and comparison. *Remote Sensing*, 11(9): 1011 [DOI: 10.3390/rs11091011]
- Knapp K R, Frouin R, Kondragunta S and Prados A. 2005. Toward aerosol optical depth retrievals over land from GOES visible radiances: determining surface reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 26(18): 4097-4116 [DOI: 10.1080/01431160500099329]
- Kaufman, Y. J., D. Tanré, L. A. Remer, E. F. Vermote, A. Chu, and B. N. Holben. 1997. "Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 102 (D14): 17051-67. [DOI: <https://doi.org/10.1029/96JD03988>]
- Kolmonen P, Sogacheva L, Virtanen T H, de Leeuw G and Kulmala M. 2016. The ADV/ASV AATSR aerosol retrieval algorithm: current status and presentation of a full-mission AOD dataset. *International Journal of Digital Earth*, 9(6): 545-561 [DOI: 10.1080/17538947.2015.1111450]
- Levy R C, Mattoo S, Munchak L A, Remer L A, Sayer A M, Patadia F and Hsu N C. 2013. The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(11): 2989-3034 [DOI: 10.5194/amt-6-2989-2013]
- Li Y, Xue Y, Guang J, She L, Fan C and Chen G L. 2018. Ground-level PM<sub>2.5</sub> concentration estimation from satellite data in the Beijing area using a specific particle swarm extinction mass conversion algorithm. *Remote Sensing*, 10(12): 1906 [DOI: 10.3390/rs10121906]
- Liu X Y, Chen Q L, Che H Z, Zhang R J, Gui K, Zhang H and Zhao T L. 2016. Spatial distribution and temporal variation of aerosol optical depth in the Sichuan basin, China, the recent ten years. *Atmospheric Environment*, 147: 434-445 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.10.008]
- Ma X Y, Chen Z H, Su X, Yu H Y, Jia D D and Yao H M. 2020. GF-4 aerosol retrieval study of enhanced surface reflectance library support algorithm. *Journal of Remote Sensing*, 24(5): 578-595 (马小雨, 陈正华, 宿鑫, 于会泳, 贾丹丹, 姚焕玫. 2020. GF-4增强型地表反射率库支持法的气溶胶光学厚度反演. *遥感学报*, 24(5): 578-595) [DOI: 10.11834/jrs.20208341]
- Min M, Wu C Q, Li C, Liu H, Xu N, Wu X, Chen L, Wang F, Sun F L, Qin D Y, Wang X, Li B, Zheng Z J, Cao G Z and Dong L X. 2017. Developing the science product algorithm testbed for Chinese next-generation geostationary meteorological satellites: Fengyun-4 series. *Journal of Meteorological Research*, 31(4): 708-719 [DOI: 10.1007/s13351-017-6161-z]
- Mishra M K, Rathore P S, Misra A and Kumar R. 2020. Atmospheric correction of multispectral VNIR remote sensing data: algorithm and inter-sensor comparison of aerosol and surface reflectance products. *Earth and Space Science*, 7(9): e2019EA000710 [DOI: 10.1029/2019ea000710]
- Prados A I, Kondragunta S, Ciren P and Knapp K R. 2007. GOES Aerosol/Smoke Product (GASP) over North America: comparisons to AERONET and MODIS observations. *Journal of Geophysical Research*, 112(D15): D15201 [DOI: 10.1029/2006jd007968]
- Samset B H, Sand M, Smith C J, Bauer S E, Forster P M, Fuglestedt J S, Osprey S and Schleussner C F. 2018. Climate impacts from a removal of anthropogenic aerosol emissions. *Geophysical Research Letters*, 45(2): 1020-1029 [DOI: 10.1002/2017gl076079]
- Sayer A M, Hsu N C, Bettenhausen C and Jeong M J. 2013. Validation and uncertainty estimates for MODIS Collection 6 "Deep Blue" aerosol data. *Journal of Geophysical Research*, 118(14): 7864-7872 [DOI: 10.1002/jgrd.50600]
- Vermote E, Tanré D, Deuzé J, Herman M, Morcrette J J and Kotchenova S Y. 2006. Second simulation of a satellite signal in the solar spectrum-vector (6SV).
- Vermote E F, Tanre D, Deuze J L, Herman M and Morcrette J J. 1997. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(3): 675-686 [DOI: 10.1109/36.581987]
- Xie Y Q, Xue Y, Guang J, Mei L L, She L, Li Y, Che Y H and Fan C. 2020. Deriving a global and hourly data set of aerosol optical depth over land using data from four geostationary satellites: GOES-16, MSG-1, MSG-4, and Himawari-8. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(3): 1538-1549 [DOI: 10.1109/tgrs.2019.2944949]
- Xu M J, Bao Y S, Xu D, Lu Q F and Zhang X Y. 2020. Retrieval of aerosol optical depth based on FY-4A satellite data and its analysis and application. *China Environmental Science*, 40(12): 5162-5168 (许梦婕, 鲍艳松, 许丹, 陆其峰, 张兴赢. 2020. 基于FY-4A卫星数据反演气溶胶光学厚度及分析应用. *中国环境科学*, 40(12): 5162-5168)
- Xu Q Q, Chen X L, Yang S B, Tang L L and Dong J D. 2021. Spatio-temporal relationship between Himawari-8 hourly columnar aerosol optical depth (AOD) and ground-level PM<sub>2.5</sub> mass concentration in mainland China. *Science of the Total Environment*, 765: 144241 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144241]
- Xue Y, Li Y, Guang J, Tugui A, She L, Qin K, Fan C, Che Y H, Xie Y Q, Wen Y N and Wang Z X. 2020. Hourly PM<sub>2.5</sub> estimation over central and eastern China based on himawari-8 data. *Remote Sensing*, 12(5): 855 [DOI: 10.3390/rs12050855]
- Yang F K, Wang Y, Tao J H, Wang Z F, Fan M, de Leeuw G and Chen L F. 2018. Preliminary investigation of a new ahi Aerosol Optical Depth (AOD) retrieval algorithm and evaluation with multiple source AOD measurements in China. *Remote Sensing*, 10(5): 748 [DOI: 10.3390/rs10050748]
- Yang J, Zhang Z Q, Wei C Y, Lu F and Guo Q. 2017. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites, Fengyun-4. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8): 1637-1658 [DOI: 10.1175/bams-d-16-0065.1]
- Yoshida M, Kikuchi M, Nagao T M, Murakami H, Nomaki T and Higurashi A. 2018. Common retrieval of aerosol properties for imaging satellite sensors. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 96B: 193-209 [DOI: 10.2151/jmsj.2018-039]

Zhang P, Guo Q, Chen B Y and Feng X. 2016. The Chinese next-generation geostationary meteorological satellite FY-4 compared with the Japanese Himawari-8/9 satellites. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 6(1): 72-75 (张鹏, 郭强, 陈博洋, 冯绚). 2016. 我国风云四号气象卫星与日本 Himawari-8/9 卫星比较分析. *气象科技进展*, 6(1): 72-75

Zhang W H, Xu H and Zhang L L. 2019. Assessment of Himawari-8

AHI aerosol optical depth over land. *Remote Sensing*, 11(9): 1108 [DOI: 10.3390/rs11091108]

Zhu S Y, Li J M, Xiang J M and Wang S S. 2020. Research on aerosol optical depth inversion based on FY4A AGRI data. *Geography and Geo-information Science*, 36(4): 26-32 (祝善友, 李佳敏, 向嘉敏, 王诗圣). 2020. 基于 FY4A AGRI 数据的气溶胶光学厚度反演研究. *地理与地理信息科学*, 36(4): 26-32

## Aerosol optical depth retrieval over land using data from AGRI onboard FY-4A

XIE Yanqing, LI Zhengqiang, HOU Weizhen

1. State Environment Protection Key Laboratory of Satellite Remote Sensing, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** FY-4A, as the latest generation of China's geostationary meteorological satellite, has been launched on December 11, 2016. The Advanced Geosynchronous Radiation Imager (AGRI) is the primary payload onboard FY-4A, and it can image China and its surrounding areas 205 times per day. The AGRI with high-frequency observation capabilities can provide sufficient data support for aerosol monitoring, but few aerosol products are developed using AGRI. The accuracy of the available FY-4A AOD datasets is also inferior to that of the Himawari-8 aerosol product, which can also cover China. In this study, an aerosol optical depth (AOD) retrieval algorithm based on the database of ratio of surface reflectance of different channels is proposed to develop high-accuracy FY-4A AOD dataset.

This algorithm involves four steps: (1) detect and remove cloud pixels in FY-4A L1 data; (2) perform gas absorption correction on FY-4A L1 data using the reanalysis data released by European Center for Medium-Range Weather Forecasts; (3) select the sub-dark pixels for each month from FY-4A data after gas absorption correction, and perform atmospheric correction on these sub-dark pixels using the background AOD (i.e., AOD at 550 nm is 0.02) to obtain the surface reflectance of VIS06 and NIR08 channels, obtain the ratio of surface reflectance of these two channels, and perform the abovementioned operations for all the pixels in the study area to complete the construction of surface reflectance ratio database of VIS06 and NIR08 channels; (4) retrieve AOD using FY-4A L1 data after gas absorption correction based on the constructed surface reflectance ratio database.

The algorithm has been applied to aerosol retrieval over Beijing - Tianjin - Hebei region from May 2019 to October 2019. Comparison of FY-4A AOD retrieval results with MODIS AOD dataset released by NASA shows that the two AOD datasets have a consistent spatial distribution trend. Validation result of MODIS AOD dataset, the official Himawari-8 AOD dataset released by the Japan Meteorological Agency, and FY-4A AOD dataset against ground-based AOD data provided by Aerosol Robotic Network shows that the accuracy of FY-4A AOD dataset is better than that of Himawari-8 AOD dataset and MODIS AOD data. The root mean square error, mean absolute error, correlation coefficient with ground-based data, and percentage of retrieval results with error within  $\pm(0.05+0.15AOD_{AERONET})$  of FY-4A AOD dataset are 0.12, 0.09, 0.91, and 65.86%, respectively.

Although the signal-to-noise ratio of FY-4A/AGRI is lower than that of Himawari-8/AHI, the absolute and relative errors of FY-4A AOD dataset are better than those of Himawari-8 AOD dataset. The statistical parameters of FY-4A AOD dataset are also slightly better than those of MODIS AOD dataset, which is one of the widely used AOD datasets with high accuracy. Therefore, the FY-4A AOD dataset developed in this study has high accuracy.

**Key words:** aerosol optical depth, remote sensing retrieval, FY-4A, advanced geosynchronous radiation imager, geostationary satellite

**Supported by** The National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 41925019); National Natural Science Foundation of China (No. 41871269)