

# FY-3D/MERSI-II 全球陆地气溶胶光学厚度精度检验和对比分析

牛小龙<sup>1</sup>, 司一丹<sup>2,3,4</sup>, 陈林<sup>2,3,4</sup>, 杨磊库<sup>1</sup>, 寿亦萱<sup>2,3,4</sup>, 裴鑫<sup>1</sup>,  
姬伟倩<sup>1</sup>, 薛肖霞<sup>1</sup>, 李孟南<sup>1</sup>, 于天雷<sup>2,3,4</sup>

1. 河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 焦作 454003;

2. 国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心), 北京 100081;

3. 许健民气象卫星创新中心, 北京 100081;

4. 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081

**摘要:** 风云三号D星(FY-3D)是中国新一代极轨气象卫星, 其搭载的中分辨率光谱成像仪-II型MERSI-II(Medium Resolution Spectral Imager-II)载荷实现了全球范围气溶胶光学厚度AOD(Aerosol Optical Depth)观测。为了全面评估MERSI-II AOD产品精度, 本文利用2019年—2023年MERSI-II AOD产品, 与全球气溶胶探测网AERONET(AEROSOL ROBOTIC NETWORK)地基观测结果及3个国际同类型载荷(Aqua/MODIS、NOAA-20/VIIRS和Suomi-NPP/VIIRS)AOD产品, 进行了精度检验和对比分析。结果表明, MERSI-II AOD与AERONET观测数据吻合较好, 相关系数( $R$ )为0.822, 平均偏差MB(Mean Bias)为0.048, 均方根误差RMSE(Root Mean Square Error)为0.169, 落入误差内样本数所占百分比为60.32%。与国际同类载荷AOD产品相比: 从时间尺度分析, 4个载荷AOD产品各项统计指标变化趋势一致性较好, 整体看来, MERSI-II AOD在2023年综合表现最好, 同时, 在冬季(11月至翌年2月)具有较好的指标表现( $R>0.83$ ,  $MB<0.045$ ); 从区域统计结果分析, 4个载荷AOD产品空间特征分布具有较高的相似性, 在植被茂密地区(如北美东部)相关系数( $R\geq 0.88$ )均有较高, 但在北非/中东等亮地表区域均表现较差; MERSI-II AOD的MB为0.048, 与Suomi-NPP/VIIRS AOD接近(0.056)。进一步偏差分析表明: MERSI-II AOD的MB与气溶胶负荷量、散射角呈负相关关系, 而与归一化植被指数NDVI<sub>swir</sub>(Normalized Differential Vegetation Index)、太阳天顶角、观测天顶角则呈正相关关系; MERSI-II AOD反演算法在城市、裸地等明亮地表及高污染背景下还需进一步优化。综上所述, MERSI-II AOD产品能够为全球陆地AOD的长时序观测提供重要补充, 有效完善全球气溶胶观测体系。

**关键词:** 风云三号, 中分辨率光谱成像仪-II型, 气溶胶光学厚度, 地基验证, 误差分析

**中图分类号:** P407/X513/TP79/P2

**引用格式:** 牛小龙, 司一丹, 陈林, 杨磊库, 寿亦萱, 裴鑫, 姬伟倩, 薛肖霞, 李孟南, 于天雷. 2026. FY-3D/MERSI-II 全球陆地气溶胶光学厚度精度检验和对比分析. 遥感学报, 30(7): 2211-2226

Niu X L, Si Y D, Chen L, Yang L K, Shou Y X, Pei X, Ji W Q, Xue X X, Li M N and Yu T L. 2026. Inspection and comparative analysis of the accuracy of FY-3D/MERSI-II global terrestrial aerosol optical depth. National Remote Sensing Bulletin, 30(7): 2211-2226 [DOI: 10.11834/jrs.20265116]

## 1 引言

气溶胶光学厚度AOD(Aerosol Optical Depth)作为表征气溶胶辐射传输影响的核心光学参数, 其精确测定是开展气候效应评估、环境健康分析及大气污染监测的基础, 具有重要的科学和应用

价值(Ramanathan等, 2001; Xu等, 2021)。自20世纪70年代末期起, 卫星遥感技术开启了观测AOD的新纪元, 早期以先进甚高分辨率辐射仪AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)为代表的卫星载荷, 通过单通道可见光反演技术, 首次实现了对全球海洋气溶胶的粗略监测(Husar

收稿日期: 2025-04-03; 预印本: 2026-05-08

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2023YFB3905804); 国家自然科学基金(编号: 42471424, 42201399)

第一作者简介: 牛小龙, 研究方向为气溶胶卫星遥感. E-mail: niuxl@home.hpu.edu.cn

通信作者简介: 司一丹, 研究方向为气溶胶及其组分定量遥感反演. E-mail: siyd@cma.gov.cn

等, 1997; Che 等, 2025)。20 世纪 90 年代以后, 随着海视宽视场传感器 SeaWiFS (sea-viewing wide field-of-view sensor) 和中分辨率成像光谱仪 MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer) 等载荷的升空, 多光谱观测显著提升了 AOD 反演精度, 尤其是 MODIS 的双星组网, 为全球气溶胶定量监测奠定了基础 (Levy 等, 2007)。进入 21 世纪, 国际卫星探测体系日趋多元: 美国航天局在 2011 年和 2017 年分别发射了苏奥米国家极轨伙伴卫星 Suomi NPP (Suomi National Polar-orbiting partnership) 和 NOAA-20 卫星, 其搭载的可见光红外成像辐射仪 VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) 载荷, 被视为 MODIS 的延续 (Jackson 等, 2013); 欧空局的 POLDER (polarization and directionality of the earth's reflectances) 卫星所搭载的 POLDER (polarization and directionality of the earth's reflectances) 载荷实现了多角度偏振观测 (Dubovik 等, 2019); 日本的 Himawari-8/9 静止卫星通过其搭载的 AHI (advanced Himawari imager) 载荷可以提供分钟级东亚区域监测 (Ge 等, 2019)。卫星探测技术与遥感理论方法的不断进步, 使卫星遥感成为气溶胶监测的有效手段 (李正强 等, 2018; 陈洪滨 等, 2018; Tao 等, 2023; Man 等, 2024)。

随着搭载不同载荷的卫星持续发射升空, 多种业务化 AOD 数据集也应运而生。例如, MODIS 前后发布了数个版本的暗目标 DT (dark target) 算法、深蓝 DB (deep blue) 算法及 MAIAC (multiangle implementation of atmospheric correction) 算法的 AOD 产品 (Remer 等, 2005; Levy 等, 2010, 2013; Lyapustin 等, 2012, 2018; VIIRS 作为 MODIS 的延续, 也发布了 DT、DB 相关产品 (Levy 等, 2015; Lee 等, 2017; Sayer 等, 2018; Sawyer 等, 2020)。近年来, 国内外学者围绕上述不同算法产品的精度验证、区域适应性及数据一致性等核心问题开展了相关研究。多种验证结果表明: AOD 反演算法的性能差异主要源于其物理机制与地表特性的适配程度, 具体而言: (1) DT 算法利用浓密植被在红光和蓝光波段地表反射率较低且易于确定的特点, 基于红光、蓝光及短波近红外波段的比值关系构建地表关系模型, 进而实现 AOD 信息反演 (Levy 等, 2013; Wei 等, 2017); (2) DB 算法利用蓝光波段大气反射信号较强、而地表反射较弱的特点, 结合历史数据构建地表反射率库, 并根

据待反演 AOD 值的大小, 选取蓝光波段或红光、蓝光波段协同反演的方法, 该方法有效补充了 DT 算法在亮目标像元上的定量反演能力 (Sayer 等, 2014; Su 等, 2024); (3) MAIAC 算法使用时间序列数据对气溶胶和地表贡献进行解耦, 该算法假设地表状态在短时间内稳定且具有空间异构性, 创新性地提出了气溶胶和地表反射率协同反演框架, 实现了  $1\text{ km}\times 1\text{ km}$  高空间分辨率的 AOD 反演 (Lyapustin 等, 2012; Tao 等, 2019; 李忠宾 等, 2020; Ji 等, 2024)。

风云三号系列气象卫星代表了中国自主开发的新一代极轨气象卫星系统。风云三号 D 星 (以下简称: FY-3D) 于 2017 年 11 月升空, 其搭载的中分辨率成像光谱仪 II 型 MERSI-II (medium resolution spectral imager-II), 配置了用于气溶胶探测的相关通道, 为 AOD 定量反演提供了坚实的数据基础 (徐娜, 2019; 胡秀清 等, 2023; 陈林 等, 2025)。目前, 已有众多学者针对 FY-3D/MERSI-II 载荷数据开展了 AOD 反演算法研究。例如, 杨磊库等 (2022) 借鉴了 MODIS DT 算法的思路, 开发了一种适用于 MERSI-II 载荷数据的陆地 AOD 反演算法, 并实现了全球陆地区域 AOD 反演。该算法反演的 AOD 与 MODIS AOD 产品之间的相关系数 ( $R$ ) 高达 0.93, 表明 MERSI-II 观测数据具有定量应用潜力。Jin 等 (2023) 通过光谱响应函数转换, 将 MODIS 地表估计模型根据 MERSI-II 载荷通道设计进行转换, 并基于 MERSI-II 载荷数据实现了亚洲区域陆地 AOD 反演。结果显示, 反演结果与地基测量对比的决定系数 ( $R^2$ ) 值达到 0.834, 以  $\pm(0.05+0.15\tau_{\text{AERONET}})$  为评价指标时, 落入期望误差 EE (Expected Error) 范围内的样本点占比 (简称为 Within EE) 为 66.38%, 与 MODIS AOD 精度接近。王庆鑫 (2023) 基于 MODIS 双向反射分布函数 BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) 产品构建了 BRDF 逐月数据库, 并通过波段转换将其应用于 MERSI-II 载荷, 为 MERSI-II 载荷 AOD 的精细化反演进行了探索。Si 等 (2024) 以 DT 算法为基础, 针对 MERSI-II 载荷特点, 构建了适用于暗像元和城市地表的非线性地表反射率关系模型, 并设计了霾判识算法, 实现了霾区、城市上空 AOD 反演。Pei 等 (2024) 将应用于 MERSI-II 载荷的 DT 算法扩展至海洋区域, 构建了海洋 AOD 反演算法。反演结果与全球气溶

胶探测网 AERONET (Aerosol Robotic Network)、MAN (Maritime Aerosol Network) 等地基观测结果相比,  $R$  均大于 0.86。

虽然上述 MERSI-II AOD 反演算法工作取得了显著进展, 但其 AOD 产品的全面评估还相对滞后。当前仅有 Yang 等 (2024) 针对其算法反演的 2019 年—2020 年 AOD 产品进行了精度评估, 结果表明, 其 AOD 产品与 AERONET 观测结果相关性较高, 以  $\pm(0.05+0.2\tau_{\text{AERONET}})$  为评价指标时, 落入误差范围内的样本点占比为 67.1%。与 MODIS AOD 产品相比, 两者均存在轻微高估现象, 且空间分布和误差特征也高度相似。本文基于 Si 等 (2024) 算法反演得到 FY-3D/MERSI-II 载荷 2019 年—2023 年 AOD 产品, 利用 AERONET 观测结果进行精度评价, 并与 Aqua/MODIS、Suomi-NPP/VIIRS、NOAA-20/VIIRS 等国际同类载荷的 AOD 产品进行交叉对比, 以分析评估其反演精度和可靠性, 从而为进一步优化算法提供依据。

## 2 研究数据及匹配方法和评估指标

### 2.1 研究数据

#### 2.1.1 MERSI-II AOD 数据

在 Si 等 (2024) 的研究中, 基于 DT 算法思路为 MERSI-II 载荷构建了一种新的陆地区域 AOD 反演方案, 即: 建立了随不同太阳天顶角、归一化植被指数  $\text{NDVI}_{\text{swir}}$  (Normalized Differential Vegetation Index) [具体计算过程如式 (1) 所示] 的非线性全球地表反射率模型, 详见附录 A 中表 1。

$$\text{NDVI}_{\text{swir}} = (\text{TOA}_{1.03} - \text{TOA}_{2.13}) / (\text{TOA}_{1.03} + \text{TOA}_{2.13}) \quad (1)$$
式中,  $\text{TOA}_{1.03}$  和  $\text{TOA}_{2.13}$  分别代表 1030 nm 和 2130 nm 波长处通道反射率。

根据该算法生产的 2019 年—2023 年 MERSI-II AOD 数据, 可供后续精度验证、比对分析与结果偏差分析使用。

#### 2.1.2 MODIS AOD 数据

MODIS C6.1 版本 L2 AOD 产品数据可以从美国国家航空航天局 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 官网 ([https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/\[2025-04-03\]](https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/[2025-04-03])) 进行免费下载。鉴于 FY-3D 卫星过境时间为下午, 选择观测时间与其接近的 Aqua 卫星的 MODIS DT L2 AOD 产

品 (MYD04\_L2) 进行对比验证。MYD04\_L2 AOD 产品空间分辨率为 10 km, 附录 A 中表 1 总结了 MODIS/VIIRS AOD 反演算法中的关键点作为对比。选取 2019 年—2023 年 MYD04\_L2 AOD 产品的 “Optical\_Depth\_Land\_And\_Ocean” 数据集, 并对陆地气溶胶数据采用质量保证置信度 QAC (Quality Assurance Confidence) 取值为 3 进行筛选, 以保证数据质量。

#### 2.1.3 VIIRS AOD 数据

NOAA-20/VIIRS 和 S-NPP/VIIRS L2 的 AOD 产品数据可从 NASA 官方网站免费获取, 包含基于 DT 算法和 DB 算法反演得到的 AOD 产品。本研究选择空间分辨率为 6 km 的 VIIRS DT 算法 AOD 产品。具体来说, 使用名为 XAERDT\_L2\_VIIRS\_x 的数据集 (其中 x 为 NOAA20, 表示 NOAA-20 卫星观测的产品; x 为 SNPP 代表 Suomi-NPP 卫星观测的产品), 针对 2019 年—2023 年的陆地气溶胶观测, 选择 “Corrected\_Optical\_Depth\_Land” 数据集, 并使用质量保证标志 (QAC=3) 进行筛选, 以确保所用数据的质量。为便于书写, 下文统一使用 N-VIIRS 代表 NOAA-20/VIIRS, S-VIIRS 代表 Suomi-NPP/VIIRS。

#### 2.1.4 AERONET AOD 数据

AERONET 是由 NASA 发起, 旨在支持 NASA、法国国家空间研究中心 CENS (Centre National d'Études Spatiales)、日本宇宙航空研究开发机构 JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) 等地球卫星观测的全球气溶胶观测网络。该网络通过各地面站点的 CE-318 (CIMEL Electronique 318) 太阳光度计等仪器进行数据采集, 数据可以通过 AERONET 官网 ([https://aeronet.gsfc.nasa.gov\[2025-04-03\]](https://aeronet.gsfc.nasa.gov[2025-04-03])) 免费下载。

表 1 2019 年—2023 年使用 AERONET 站点数量

Table 1 Number of AERONET sites from 2019 to 2023

| 年份     | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
|--------|------|------|------|------|------|
| 站点数量/个 | 390  | 360  | 396  | 350  | 287  |

AERONET 每 15 min 提供一次各个波长 (440 nm、675 nm、870 nm 和 1020 nm 等) 的观测信息, 在晴朗无云的条件下, 观测偏差为 0.01—0.02 (Holben 等, 1998)。AERONET 数据分为 3 个质量级别: Level 1.0 (未经过云筛选)、Level 1.5 (经过云筛

选)和 Level 2.0 (经过云筛选和质量保证)。本研究选择 Version 3 Level 2.0 数据,若站点 Level 2.0 数据缺失,则使用 Level 1.5 数据 (Sayer 等, 2014)。选取全球范围内的 AERONET 站点数据进行验证分析。参考 Wei 等 (2018)、Su 等 (2023)、Yang 等 (2024) 的研究,将本研究使用的全球陆地 AERONET 站点分为 10 个区域:北美东部 (ENA)、北美西部 (WNA)、南美 (SAM)、欧洲 (EUR)、北非/中东 (NAME)、南非 (SAF)、亚洲东北部 (NEA)、印度次大陆 (IND)、东南亚 (SEA) 及大洋洲 (OCE)。具体站点空间分布和分区可参考 Yang 等 (2024) 的图 1。

## 2.2 匹配方法和评估指标

### 2.2.1 匹配方法

为获取 550 nm 波长处的 AOD,本研究采用二次多项式拟合方法,使用 AERONET 4 个波长 (440 nm、675 nm、870 nm、1020 nm) 处 AOD 观测结果对 550 nm 波长处的 AOD 进行插值 (Lyapustin 等, 2012),如式 (2) 所示:

$$\ln \tau_{\lambda} = a_0 + a_1 \ln \lambda + a_2 (\ln \lambda)^2 \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  代表 AERONET 观测波长,  $\tau_{\lambda}$  代表目标波长处 AOD 值,  $a_1$  和  $a_2$  为二次多项式系数。

由于地基测量数据和卫星观测数据在时间和空间尺度上存在差异,验证前需对二者进行时空匹配。具体匹配规则如下: (1) 时间匹配,对卫星成像时间  $\pm 30$  min 内的地基测量结果取平均值; (2) 空间匹配,以地面站点为圆心,对半径 27.5 km 范围内的卫星观测反演结果 (QAC=3) 取平均值。当时间匹配窗口内有效像元数  $N \geq 2$ ,且空间匹配窗口内有效像元数  $N \geq 3$  时,则认为该时空匹配结果有效 (Levy 等, 2013)。

### 2.2.2 评估指标

本研究用于评估反演结果准确性的主要指标为:相关系数 ( $R$ )、平均偏差 MB (Mean Bias) 和均方根误差 RMSE (Root Mean Square Error),其定义如式 (3) — 式 (5) 所示。此外,以  $\pm (0.05 + 0.20\tau_{\text{AERONET}})$  为期望误差 EE (Expected Error) 指标,计算落入该 EE 包络线内的的匹配点、高于 EE 包络线的匹配点和低于 EE 包络线的匹配点分别占样本总数的百分比 (分别简称为 Within EE%、Above EE% 和 Below EE%),以此评估卫星反演

AOD 产品质量。通常,若落入 EE 包络线内的点数占比达到或超过 2/3,即认为产品满足 EE 要求 (Levy 等, 2010)。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{AOD}_s^i - \overline{\text{AOD}}_s) \times (\text{AOD}_g^i - \overline{\text{AOD}}_g)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{AOD}_s^i - \overline{\text{AOD}}_s)^2 \times (\text{AOD}_g^i - \overline{\text{AOD}}_g)^2}} \quad (3)$$

$$\text{MB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{AOD}_s^i - \text{AOD}_g^i) \quad (4)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{AOD}_s^i - \text{AOD}_g^i)^2} \quad (5)$$

式中,  $\text{AOD}_s$ 、 $\text{AOD}_g$  为匹配的卫星和地基气溶胶观测结果,  $\overline{\text{AOD}}_s$ 、 $\overline{\text{AOD}}_g$  分别是卫星和地基观测数据所有有效样本点的平均值,  $n$  代表验证点总数,  $i$  代表当前验证点。

## 3 验证结果分析

### 3.1 与 AERONET 结果对比分析

图 1 和附录 A 中表 2 分别展示了 2019 年—2023 年 FY-3D/MERSI-II (以下简称: MERSI-II)、Aqua/MODIS (以下简称: MODIS)、N-VIIRS 和 S-VIIRS 4 个卫星载荷 AOD 与全球 AERONET 站点匹配验证结果。由图 1 可知,4 个载荷 AOD 与 AEROENT 观测数据均有良好的相关性。具体来看, MERSI-II AOD 的  $R$  达到了 0.822, RMSE 为 0.169, Within EE% 为 60.32%, 接近 2/3 的指标要求。但是,其结果存在一定的正偏差, MB 值为 0.048、Above EE% 为 32.66%。相较于 MODIS AOD, MERSI-II AOD 具有更多的有效反演像元数 ( $N$ ), 这主要得益于 MERSI-II 成像幅宽较大,可以无缝隙覆盖全球区域;同时, Si 等 (2024) 对 MERSI-II AOD 反演算法中雾霾区域的判别进行了改进,释放了更多的有效像元。观察其他评估指标可以发现, MODIS AOD 在整体精度上表现更为优异:  $R$  为 0.911, RMSE 仅为 0.105, 同时 Within EE% 为 74.69%。与两种 VIIRS AOD 相比,由于载荷空间分辨率设置差异,导致两种 VIIRS AOD 的  $N$  值接近 MERSI-II 的两倍。对比而言, MERSI-II AOD 与 S-VIIRS AOD 的各项指标表现相似度较高 (MB=0.056, RMSE=0.141, Within EE% 为 64.05%), 两者均存在高估现象,但从 MB 来看, S-VIIRS AOD 的整体高估现象更为显著。

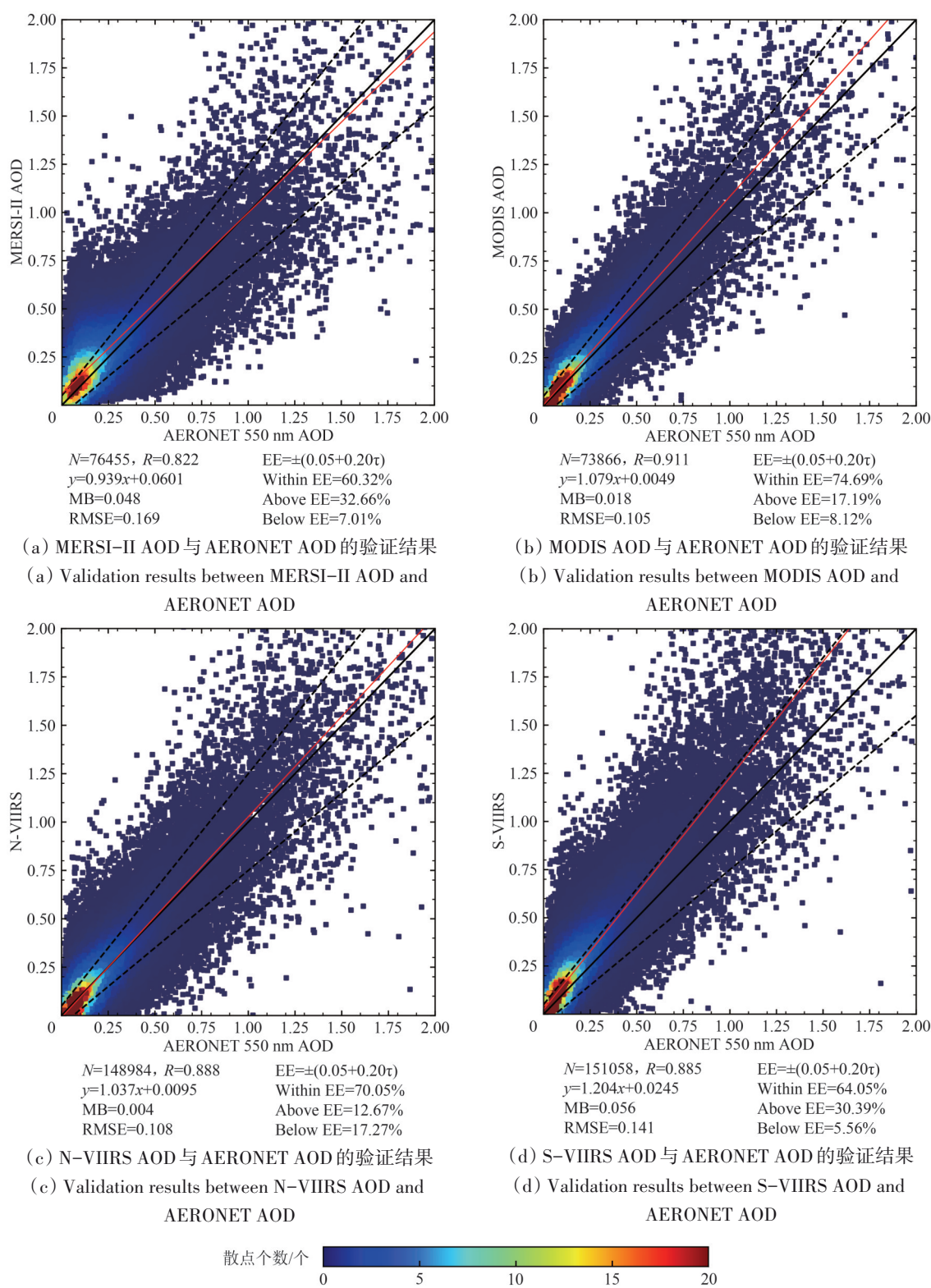


图1 2019年—2023年4个载荷AOD产品与AERONET站点数据验证结果散点图(反演波长为550 nm)  
Fig. 1 Scatter plots of validation results between AOD products from four loads and AERONET site data from 2019 to 2023  
(The inversion wavelength is 550 nm)

除气溶胶模型的影响外，附录A中表1还对比了4种不同载荷AOD算法对反演窗口、质量码分级的设置差异。由于各载荷算法的输入像元分辨率存在差异，MODIS与VIIRS因分辨率较高，有更多像元参与聚合和反演过程，有助于降低L1数据系统误差对反演结果的影响。相比之下，MERSI-II载荷的输入数据空间分辨率为1 km，反演窗口内样本数远低于MODIS，这可能导致其产生更大的误差。

### 3.2 时间尺度验证结果分析

图2和图3分别展示了4个载荷AOD产品在年度和月度尺度上的统计参数变化结果。如图2(a)所示,除2023年外,MERSI-II AOD的 $N$ 值均大于15000,略高于MODIS AOD,而两种VIIRS AOD表现相近;4个载荷AOD验证结果的 $N$ 值都在2021年达到最高值。图2(b)显示出MERSI-II AOD年际 $R$ 值变化幅度最大,从2020年起逐渐下降至2022年最低点。王玲等(2024)指出,MERSI-II载荷自2019年1月1日业务运行至2022年9月,其470 nm和2130 nm通道反射率的年衰减率分别为1.68%和1.6%;经过场地定标和伪不变目标定标校正后,用于气溶胶反演的关键通道定标偏差降低至 $\pm 5\%$ 以内,使2023年的 $R$ 值有所恢复。

由图2(c)可知,4个AOD产品的RMSE变化趋势均呈现以2021年为最高点、两边对称的特点;相比之下,MERSI-II和S-VIIRS AOD表现出更大的RMSE值。由图2(d)可知,仅有N-VIIRS AOD从负偏差逐渐稳定在0.000上下;另外3种AOD产品均表现出明显正偏差,MERSI-II AOD的MB在2019年达到最大(MB=0.067),变化趋势随年份增加呈现单调递减的特点。由图2(e)可知,4个卫星载荷AOD产品Within EE,指标呈现轻微逐年上升的趋势;同时,观察MERSI-II AOD的Above EE指标可知,其数值随年份变化不断减小,表明MERSI-II AOD的高估现象逐年减弱,这说明随着MERSI-II载荷数据的不断累积,定标系数等参数不断更新,其反演产品的稳定性和准确性逐步提高(王玲等,2024)。

由图3(a)可知,4个卫星载荷AOD产品的 $N$ 值均在夏季(6月—8月)达到峰值,这是由于夏季植被茂密,适合DT算法反演;相较于MODIS载荷,MERSI-II载荷AOD在 $N$ 值上的优势主要集中于11月至翌年4月,原因在于该时期东亚、印度、东南亚等区域雾霾事件频发(Thepnuan等,2019; Shim等,2022; Nirmalkar等,2023),而基于MERSI-II载荷改进的DT算法能够有效恢复部分霾区像元,从而释放了更多的有效像元。4个载荷AOD产品在月尺度上的统计参数对比情况与图2基本相似。

由图3(b)可见,MODIS AOD的 $R$ 值表现最优,两种VIIRS AOD产品表现相近,而MERSI-II

AOD的 $R$ 值则显示出较明显的月份间波动,在6月达到最低点,但总体均保持在0.80以上。由图3(c)可知,MERSI-II AOD的RMSE变化趋势与MODIS AOD相似,但是在多数月份均高出MODIS AOD 0.05以上,尤其在7月—9月达到峰值。由图3(d)和图3(e)可知,4个载荷AOD产品MB均呈现出先增加、在5月—8月达到最大值、随后又减小的特点;S-VIIRS AOD全年MB均大于0.025,其次为MERSI-II AOD,表明二者存在系统性高估问题;Within EE与MB呈现相反的月变化趋势。

### 3.3 空间区域验证结果分析

为揭示MERSI-II AOD在不同区域的性能表现及其与国际同类载荷AOD产品的差异,本研究针对AERONET划分的10个代表性区域,分别计算了4个载荷AOD产品的验证结果统计指标,如附录A中表3所示。由于OCE区域有效反演像元数较少,数据不具备代表性,故后文不再对其详细描述。

研究表明,DT算法在植被茂密区域表现出显著优势。在高植被覆盖区,如ENA区域,4个载荷AOD产品均呈现优异的相关性( $R \geq 0.881$ ),同时表现低偏差特征。其中,MODIS AOD和N-VIIRS AOD存在轻微系统低估,而MERSI-II AOD虽与S-VIIRS AOD精度相当(MB=0.039 vs 0.025, RMSE=0.138 vs 0.090),但呈现高估趋势,其Within EE(69.02%)达到2/3验证标准;在EUR区域MERSI-II AOD误差指标表现为其在全部10个区域内最优(MB=0.030, RMSE=0.096, Within EE为70.00%),但 $R$ 值(0.674)相对较低。

在沙漠、高原等亮地表区域,DT算法面临显著挑战。NAME区域尽管保持合理相关性( $R=0.778$ — $0.862$ ),但Within EE普遍偏低(S-VIIRS仅为38.34%)。值得注意的是,MERSI-II AOD在此区域呈现近中性偏差(MB=-0.001)。SAF高原区域受吸收型气溶胶主导及低植被覆盖影响,4个载荷AOD产品均呈现系统性低估(MB=-0.072—-0.015),但是MERSI-II AOD的Within EE为65.24%,仍满足验证精度指标标准,证明DT算法在该区域具有一定适应性。在城市等复杂地表类型区域,DT算法反演结果受到一定影响,4种AOD产品整体表现出正偏差现象。WNA区域4个载荷AOD产品均呈现高估(MB $\geq 0.029$ ),其中

MERSI-II AOD 偏差最大 ( $MB=0.105$ ,  $RMSE=0.222$ ) 且 Within EE (46.25%) 显著低于其他区域; 对于 SAM 区域, 4 个载荷 AOD 产品均呈现高相关性 ( $R=0.768—0.878$ ), 但仅 MERSI-II AOD 出现显著

正偏差 ( $MB=0.075$ )。在 NEA 地区, 4 个载荷 AOD 产品整体呈现较好相关性 ( $R\geq 0.847$ ), 但除 N-VIIRS AOD 外, 其他载荷 AOD 产品均出现较为明显的正偏差 ( $MB\geq 0.060$ )。

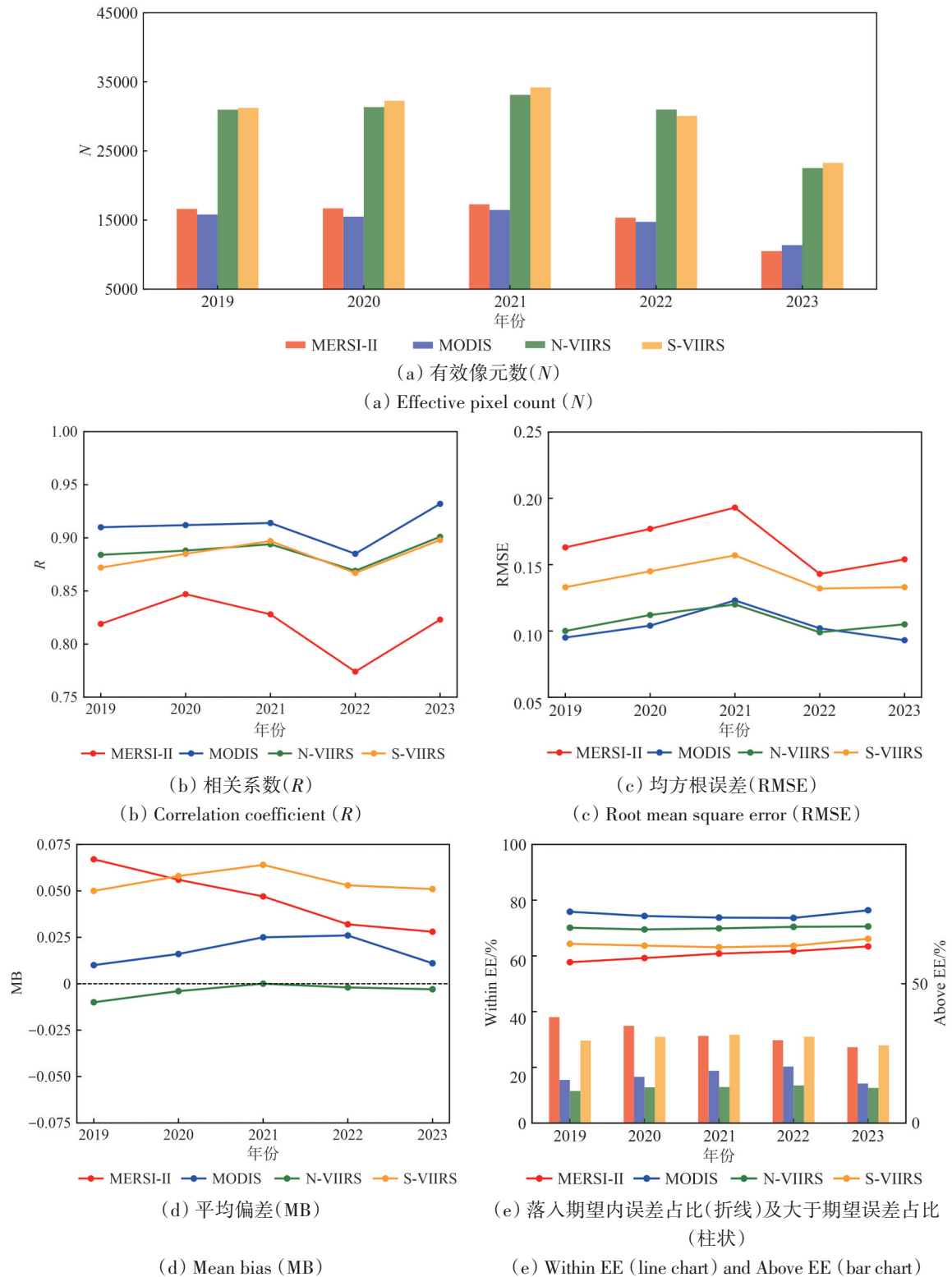


图2 年尺度结果分析组合图

Fig. 2 Multi-panel analysis plot of annual-scale results

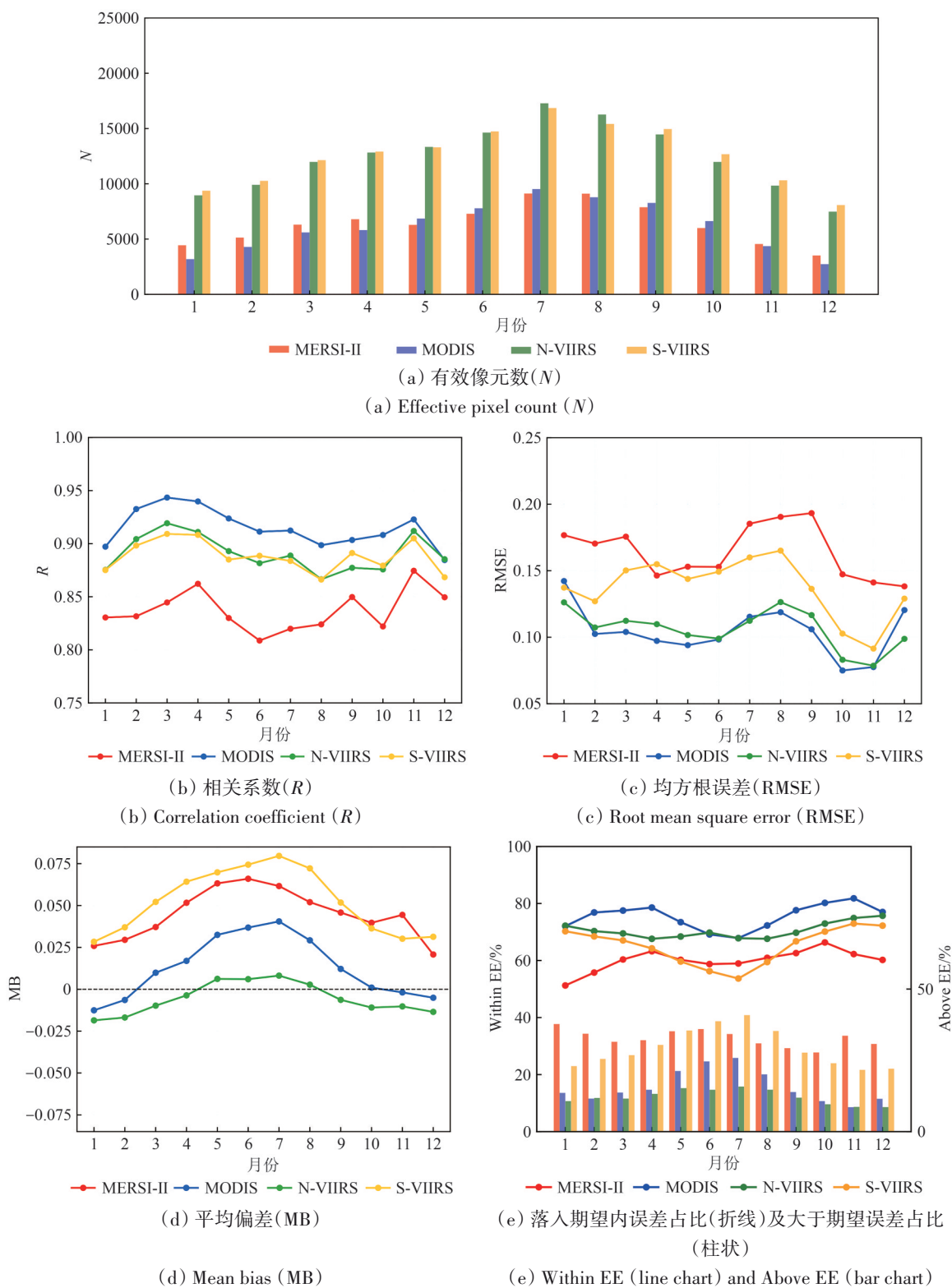


图3 月尺度结果分析组合图

Fig. 3 Multi-panel analysis plot of monthly-scale results

#### 4 MERSI-II AOD 影响因素分析

通过上文分析可知, MERSI-II AOD 各项精度指标评估结果已接近国际同类载荷的 AOD 产品,

但存在一定偏差。为进一步分析 MERSI-II AOD 的偏差特征, 本节以 AERONET 地基观测值为真值, 探讨其偏差与气溶胶负荷、观测几何参数、 $\text{NDVI}_{\text{swir}}$  及地表覆盖类型等因素之间的误差依赖性关系,

以期为后续算法改进提供依据。

#### 4.1 与气溶胶负荷的误差依赖性分析

通常情况下,随着 AOD 负荷的增加,DT 算法反演误差往往会逐渐增大(Aditi 等, 2023)。因

此,根据 AERONET 观测结果,将 AOD 负荷分为 13 个区间,区间间隔为 0.1(当 AOD>1.0 时,间隔调整为 0.5),如图 4 所示,以便更准确地评估 MERSI-II AOD 在低、中、高气溶胶负荷条件下反演精度的变化趋势及其偏差特征。

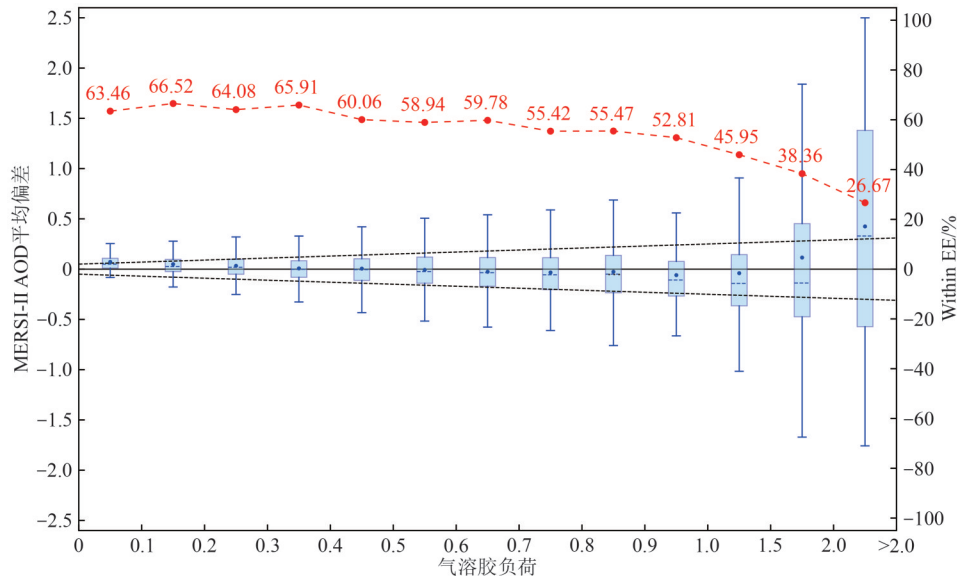


图4 MERSI-II AOD 平均偏差(箱状)与 Within EE(虚线)随气溶胶负荷的变化

Fig. 4 Variatio of MERSI-II AOD MB (box-shaped) and Within EE (dotted line) with aerosol loading

由图4可知,在不同 AOD 负荷条件下, MERSI-II AOD MB 表现呈现显著的变化趋势:在轻度污染情况 ( $AOD \leq 0.4$ ) 下, MERSI-II AOD 表现出色,仅出现轻微正偏差,且其 Within EE ( $\geq 63.46\%$ ) 接近 2/3 的指标要求;而在中度污染情况 ( $0.4 < AOD \leq 1.5$ ) 下, MERSI-II AOD 开始出现负偏差现象,同时 Within EE 随之降低,基本处于 50%—60%,这可能与大陆型气溶胶模型散射能力偏强导致反演 AOD 数值偏低有关;在严重污染情况 ( $AOD > 1.5$ ) 下,随着 AOD 负荷值进一步增大, MERSI-II AOD 又表现出明显的正偏差, Within EE 急剧下降,仅有约 40% 的样本点落入期望误差内。这些结果表明, MERSI-II AOD 在轻度污染条件下的表现较为理想,但在中度和重度污染情况下,尤其是当 AOD 负荷超过 1.0 时,存在 DT 算法的共性问题,需要针对高气溶胶负荷条件设计相应的气溶胶模型。

#### 4.2 与观测几何参数的误差依赖性分析

大气的散射和透射效应受太阳天顶角 SZA (Solar Zenith Angle)、观测天顶角 VZA (Viewing Zenith Angle)、散射角 SCA (scattering angle) 和相

对方位角 PHI (relative azimuth angle) 等观测几何参数的影响,这些因素同样会影响 AOD 反演的精度。因此,将 SZA 与 VZA 分别以  $6^\circ$  为间隔分为 11 个和 12 个区间, SCA 以  $10^\circ$  为间隔分为 10 个区间, PHI 以  $12^\circ$  为间隔分为 15 个区间。图 5 分别绘制了 MERSI-II AOD MB、Within EE 随 SZA、VZA、SCA、PHI 变化的箱线图或折线图。

MERSI-II AOD 反演算法在构建地表反射率模型时考虑了 SZA 变化,如图 5 (a) 所示,随着 SZA 增大, Within EE 稳步增加;当  $SZA > 42^\circ$  时, Within EE ( $\geq 65.07\%$ ) 满足 2/3 指标要求。此外,对于 VZA 而言, MERSI-II AOD 随着 VZA 变化 Within EE 明显高于与 SZA;当气溶胶粒子出现前向散射 ( $SCA < 90^\circ$ ) 时, MERSI-II AOD Within EE 最小为 78.14%,而在后向散射中,随着 SCA 增大,该指标逐渐下降至 50% 左右。总体而言,从多个观测角度分析, MERSI-II AOD 的 MB 呈现正偏差现象。具体而言, MB 与 SZA、VZA 数值的大小呈现一定正相关、与 SCA 呈负相关,而与 PHI 呈现以  $90^\circ$  附近最小、两端对称的特点。

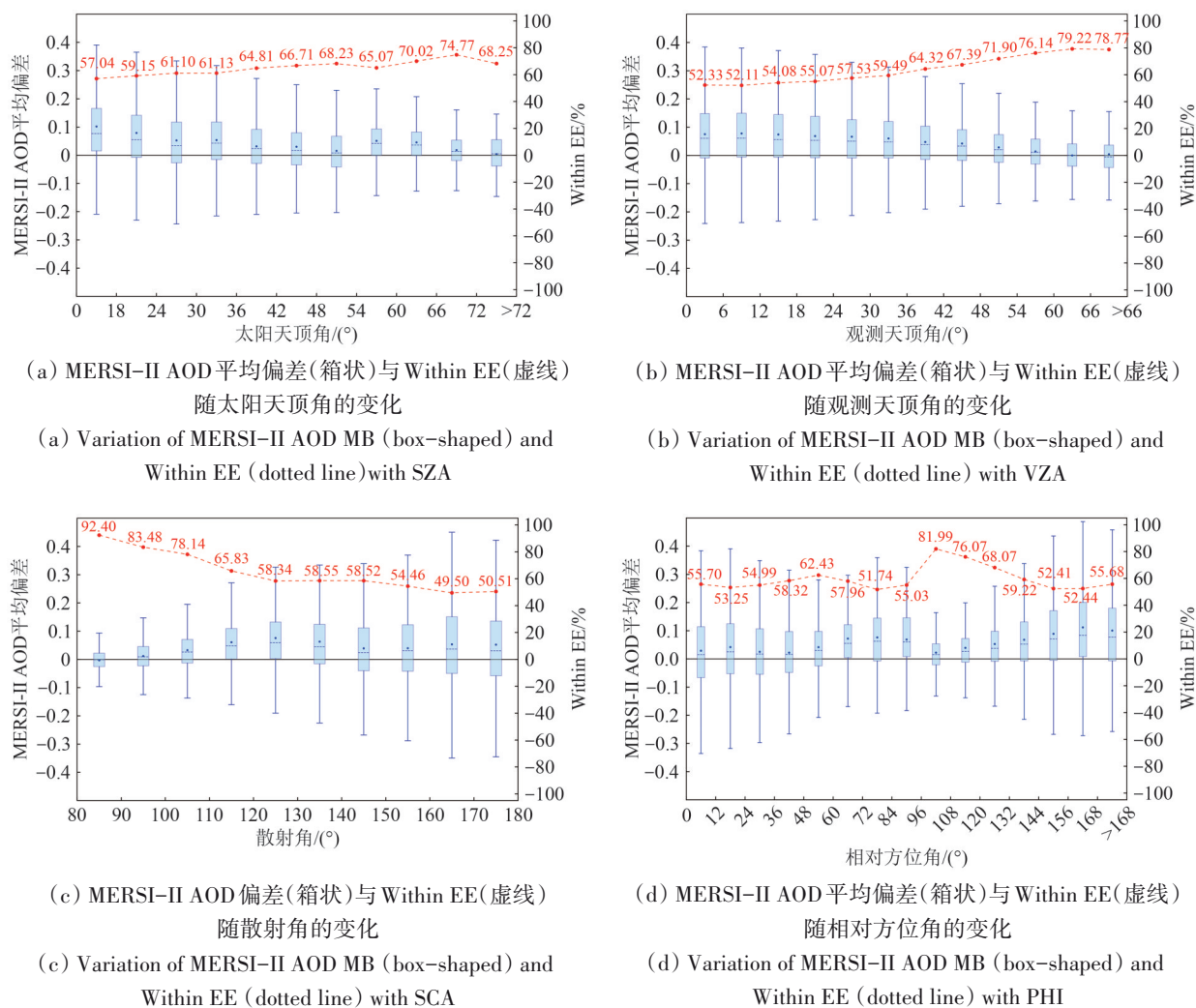


图5 MERSI-II AOD平均偏差(MB)与 Within EE随观测几何参数的变化

Fig. 5 Variation of MERSI-II AOD MB and Within EE with observation geometry parameters

### 4.3 与 $NDVI_{swir}$ 及地表覆盖类型的误差依赖性分析

$NDVI_{swir}$  可以有效反映地表植被覆盖度,并在一定程度上与地表覆盖类型相关联。本小节结合土地覆盖类型与  $NDVI_{swir}$  两种指标,开展 MERSI-II AOD MB 与地表变化的依赖性分析。采用 MCD12Q1 国际地圈—生物圈计划 IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) 5 种全球土地覆盖分类系统所划分的 17 种土地覆盖类型数据,并将其地表合并为森林、草地、农田、城市、裸地 5 种类型 (Yang 等, 2024); 同时,将  $NDVI_{swir}$  以 0.1 为间隔分为 9 个区间,如图 6 (b) 所示。

对比图 6 (a) 和图 6 (b) 可以看出, MERSI-

II AOD 整体呈现正偏差趋势,并且随着  $NDVI_{swir}$  值增大或者从裸土向森林地表过渡时, MB 逐渐减小。在森林、草原和农田区域, MERSI-II AOD 表现出色, MB 较小 ( $MB < 0.031$ ), Within EE 较高 ( $> 68.8\%$ )。当  $NDVI_{swir} > 0.3$  时,地表植被逐渐变得茂密,DT 算法的反演性能得到改善,MB 显著减小并逐渐趋近于 0,并且 Within EE 从 68.64% 增加到了 80.72%。然而,在城市和裸地区域 (此时  $NDVI_{swir} < 0.3$ ), MERSI-II AOD 表现出显著正偏差:城市区域的 MB 为 0.075,裸地区域的 MB 为 0.119,且这两个区域的 Within EE 均低于 60%,表明在明亮地表类型区域,算法仍需进一步优化。

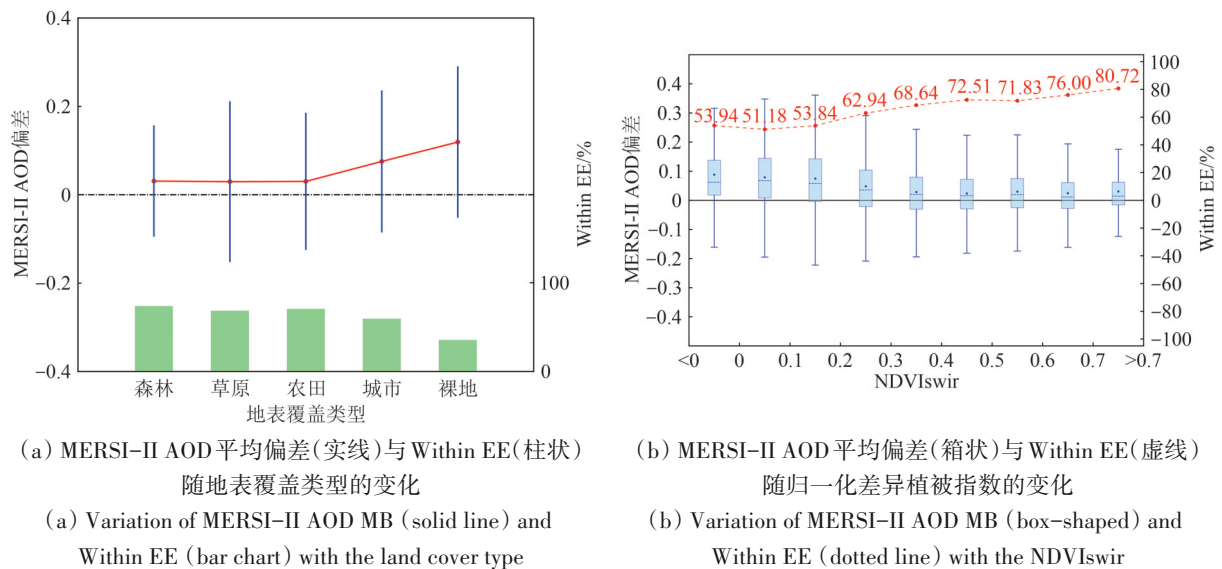


图6 MERSI-II AOD平均偏差(MB)与Within EE随地表变化组合图  
Fig. 6 Composite plots of MERSI-II AOD MB and Within EE variations with surface changes

## 5 结 论

FY-3D搭载的MERSI-II载荷与MODIS、VIIRS载荷在AOD反演通道上类似,且具备每日全球观测能力。前期研究基于DT算法构建了全球非线性地表反射率模型,实现了对雾霾区域和城市地表AOD的定量反演。为评估该算法的精度和全球适用性,本文利用2019年—2023年的MERSI-II AOD,与AERONET地基观测数据及3个国际同类载荷AOD产品进行精度检验和对比分析。

(1) MERSI-II AOD与AERONET数据对比中,相关系数达0.822, Within EE为60.32%,接近2/3指标要求,但发现其存在系统性高估现象(MB=0.048, RMSE=0.169);对标国际同类载荷AOD产品, MERSI-II AOD整体精度与S-VIIRS AOD接近,略逊于N-VIIRS和MODIS AOD。

(2) 在时间尺度上, MERSI-II AOD高估问题随年份变化而逐渐减弱;在月尺度变化趋势中, MERSI-II AOD在夏季(6月—8月)MB最大;区域结果统计分析发现, MERSI-II AOD在植被丰富区表现良好,但在植被稀疏或复杂地表区域效果较差,尤其是在南非地区出现低估现象。

(3) 偏差分析表明, MERSI-II AOD在高气溶胶负荷条件下出现明显正偏差,且与SZA、VZA大小呈一定正相关、与SCA呈负相关;此外,反演值在城市、裸地等明亮地表区域表现较差。

结合全球对比验证和偏差分析结果,未来将

从算法层面增加区域气溶胶模型,以适用于高污染大气背景,并重点优化较亮地表的地表反射率模型。同时发现,仪器自身光谱通道的辐射衰减和稳定性变化,使得定标系数的及时更新对AOD反演的准确性和离散度产生重要影响。后续研究将联合算法和数据持续改进产品精度,进一步发挥国产风云卫星在全球气溶胶观测体系中的应用效能。

**志 谢** 本研究使用了AERONET提供的全球地基站点数据用于结果验证,使用了美国国家航空航天局NASA提供的MODIS/VIIRS气溶胶产品用于结果对比分析;国家卫星气象中心王玲老师对于MERSI-II定标数据进行了耐心讲解。在此对以上组织和个人表示衷心的感谢!

## 参考文献(Reference)

- Aditi K, Singh A and Banerjee T. 2023. Retrieval uncertainty and consistency of Suomi-NPP VIIRS deep blue and dark target aerosol products under diverse aerosol loading scenarios over South Asia. *Environmental Pollution*, 331: 121913 [DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121913]
- Che Y H, Guang J, Xue Y, De Leeuw G, She L, Mei L L, He X W, Sun L and Li Z Q. 2025. A new generation aerosol optical depth dataset based on AVHRR data over China from 1981 to 2000. *Remote Sensing of Environment*, 328: 114899 [DOI: 10.1016/j.rse.2025.114899]
- Chen H B, Fan X H and Xia X A. 2018. Review of satellite remote

- sensing of atmospheric aerosols and its applications in climate and environment studies. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 42(3): 621-633 (陈洪滨, 范学花, 夏祥鳌. 2018. 大气气溶胶的卫星遥感及其在气候和环境研究中的应用. *大气科学*, 42(3): 621-633) [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17272]
- Chen L, Xu N, Wang J S, Shang J, Shou Y X, Li B, Xu R H, Wu S L, Wang X, Zheng W and Jia S Z. 2025. FengYun satellites: from observations to quantitative applications. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(6): 1462-1479 (陈林, 徐娜, 王劲松, 商建, 寿亦萱, 李博, 徐榕焱, 武胜利, 王新, 郑伟, 贾树泽. 2025. 风云卫星: 从观测到定量应用. *遥感学报*, 29(6): 1462-1479) [DOI: 10.11834/jrs.20254459]
- Dubovik O, Li Z Q, Mishchenko M I, Tanré D, Karol Y, Bojkov B, Cairns B, Diner D J, Espinosa W R, Goloub P, Gu X F, Hasekamp O, Hong J, Hou W Z, Knobelspiesse K D, Landgraf J, Li L, Litvinov P, Liu Y, Lopatin A, Marbach T, Maring H, Martins V, Meijer Y, Milinevsky G, Mukai S, Parol F, Qiao Y, Remer L, Rietjens J, Sano I, Stammes P, Stamnes S, Sun X B, Tabary P, Travis L D, Waquet F, Xu F, Yan C X and Yin D K. 2019. Polarimetric remote sensing of atmospheric aerosols: Instruments, methodologies, results, and perspectives. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 224: 474-511 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.11.024]
- Ge B Y, Li Z Q, Liu L, Yang L K, Chen X F, Hou W Z, Zhang Y, Li D H, Li L and Qie L. 2019. A dark target method for Himawari-8/AHI aerosol retrieval: application and validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(1): 381-394 [DOI: 10.1109/tgrs.2018.2854743]
- Holben B N, Eck T F, Slutsker I, Tanré D, Buis J P, Setzer A, Vermote E, Reagan J A, Kaufman Y J, Nakajima T, Lavenue F, Jankowiak I and Smirnov A. 1998. AERONET—a federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of Environment*, 66(1): 1-16 [DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00031-5]
- Hu X Q, Wang L, Zhang P, Xu N, Qi C L, Xu H L, He X W, He Y Q, Chen L, Sun L and Lu N M. 2023. Overview of historical data retrospective calibration for space-borne optical payloads. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(10): 2229-2251 (胡秀清, 王玲, 张鹏, 徐娜, 漆成莉, 徐寒列, 何兴伟, 何玉青, 陈林, 孙凌, 卢乃锰. 2023. 星载光学载荷历史数据再定标综述. *遥感学报*, 27(10): 2229-2251) [DOI: 10.11834/jrs.20233359]
- Husar R B, Prospero J M and Stowe L L. 1997. Characterization of tropospheric aerosols over the oceans with the NOAA advanced very high resolution radiometer optical thickness operational product. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14): 16889-16909 [DOI: 10.1029/96jd04009]
- Jackson J M, Liu H Q, Laszlo I, Kondragunta S, Remer L A, Huang J F and Huang H C. 2013. Suomi-NPP VIIRS aerosol algorithms and data products. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(22): 12673-12689 [DOI: 10.1002/2013jd020449]
- Ji W Q, Yang L K, Tian X Y, Bilal M, Pei X, Zheng Y, Lu X F and Cheng X Q. 2024. Long-term validation and error analysis of DB and MAIAC aerosol products over bright surface of China. *Atmospheric Research*, 297: 107106 [DOI: 10.1016/j.atmosres.2023.107106]
- Jin S K, Ma Y Y, Huang Z W, Huang J P, Gong W, Liu B M, Wang W Y, Fan R N and Li H. 2023. A comprehensive reappraisal of long-term aerosol characteristics, trends, and variability in Asia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(14): 8187-8210 [DOI: 10.5194/acp-23-8187-2023]
- Lee J, Hsu N C, Sayer A M, Bettenhausen C and Yang P. 2017. AERONET-based nonspherical dust optical models and effects on the VIIRS deep blue/SOAR over water aerosol product. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(19): 10384-10401 [DOI: 10.1002/2017jd027258]
- 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]
- Levy R C, Munchak L A, Mattoo S, Patadia F, Remer L A and Holz R E. 2015. Towards a long-term global aerosol optical depth record: applying a consistent aerosol retrieval algorithm to MODIS and VIIRS-observed reflectance. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(10): 4083-4110 [DOI: 10.5194/amt-8-4083-2015]
- Levy R C, Remer L A, Kleidman R G, Mattoo S, Ichoku C, Kahn R and Eck T F. 2010. Global evaluation of the Collection 5 MODIS dark-target aerosol products over land. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(21): 10399-10420 [DOI: 10.5194/acp-10-10399-2010]
- Levy R C, Remer L A, Mattoo S, Vermote E F and Kaufman Y J. 2007. Second-generation operational algorithm: retrieval of aerosol properties over land from inversion of moderate resolution imaging spectroradiometer spectral reflectance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D13): D13211 [DOI: 10.1029/2006jd007811]
- Li Z B, Wang N, Zhang Z L, Wang T T, Tao J H, Wang P, Ma S L, Xu B B and Fan M. 2020. Validation and analyzation of MODIS aerosol optical depth products over China. *China Environmental Science*, 40(10): 4190-4204 (李忠宾, 王楠, 张自力, 王甜甜, 陶金花, 王萍, 马双良, 徐奔奔, 范萌. 2020. 中国地区MODIS气溶胶光学厚度产品综合验证及分析. *中国环境科学*, 40(10): 4190-4204) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2020.10.002]
- Li Z Q, Chen X F, Ma L Y, Jia L L, Hou W Z and Qiao Y L. 2018. An overview of atmospheric correction for optical remote sensing satellites. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition)*, 10(1): 6-15 (李正强, 陈兴峰, 马龙天, 伽丽丽, 侯伟真, 乔延利. 2018. 光学遥感卫星大气校正研究综述. *南京信息工程大学学报*, 10(1): 6-15) [DOI: 10.13878/j.cnki.jnuist.2018.01.002]
- Lyapustin A, Wang Y J, Korkin S and Huang D. 2018. MODIS collection 6 MAIAC algorithm. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(10): 5741-5765 [DOI: 10.5194/amt-11-5741-2018]
- Lyapustin A I, Wang Y J, Laszlo I, Hilker T, Hall F G, Sellers P J, Tucker C J and Korkin S V. 2012. Multi-angle implementation of

- atmospheric correction for MODIS (MAIAC): 3. atmospheric correction. *Remote Sensing of Environment*, 127: 385-393 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.09.002]
- Man W J, Tao M H, Xu L N, Xu X G, Jiang J F, Wang J, Wang L C, Wang Y, Fan M and Chen L F. 2024. Improving aerosol retrieval from MISR with a physics-informed deep learning method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 4102911 [DOI: 10.1109/tgrs.2024.3376598]
- Nirmalkar J, Jung J, Han S B, Dong Z C, Xu Z J, Fu P Q and Pavuluri C M. 2023. Chemistry of  $PM_{2.5}$  in haze events in two East Asian cities during winter-spring 2019. *Atmospheric Environment*, 293: 119457 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2022.119457]
- Pei X, Yang L K, Ji W Q, Chen S, Cheng X Q, Lu X F and Wang H T. 2024. Applying the dark target aerosol algorithm to MERSI-II: retrieval and validation of aerosol optical depth over the ocean. *Advances in Atmospheric Sciences*, 41(12): 2446-2463 [DOI: 10.1007/s00376-024-4032-y]
- Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T and Rosenfeld D. 2001. Aerosols, climate, and the hydrological cycle. *Science*, 294(5549): 2119-2124 [DOI: 10.1126/science.1064034]
- Remer L A, Kaufman Y J, Tanré D, Mattoo S, Chu D A, Martins J V, Li R R, Ichoku C, Levy R C, Kleidman R G, Eck T F, Vermote E and Holben B N. 2005. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(4): 947-973 [DOI: 10.1175/JAS3385.1]
- Sawyer V, Levy R C, Mattoo S, Cureton G, Shi Y X and Remer L A. 2020. Continuing the MODIS dark target aerosol time series with VIIRS. *Remote Sensing*, 12(2): 308 [DOI: 10.3390/rs12020308]
- Sayer A M, Hsu N C, Lee J, Bettenhausen C, Kim W V and Smirnov A. 2018. Satellite ocean aerosol retrieval (SOAR) algorithm extension to S-NPP VIIRS as part of the "Deep Blue" aerosol project. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(1): 380-400 [DOI: 10.1002/2017jd027412]
- Sayer A M, Munchak L A, Hsu N C, Levy R C, Bettenhausen C and Jeong M J. 2014. MODIS collection 6 aerosol products: Comparison between Aqua's e-Deep Blue, Dark Target, and "merged" data sets, and usage recommendations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(24): 13965-13989 [DOI: 10.1002/2014jd022453]
- Shim K, Kim M H, Lee H J, Nishizawa T, Shimizu A, Kobayashi H, Kim C H and Kim S W. 2022. Exacerbation of  $PM_{2.5}$  concentration due to unpredictable weak Asian dust storm: a case study of an extraordinarily long-lasting spring haze episode in Seoul, Korea. *Atmospheric Environment*, 287: 119261 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2022.119261]
- Si Y D, Chen L, Wang Y Y, Xu N, Zhang X Y, Yang L K, Hu X Q and Shi S Y. 2024. An improved aerosol retrieval algorithm based on nonlinear surface model from FY-3D/MERSI-II remote sensing data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 4103017 [DOI: 10.1109/tgrs.2024.3367883]
- Su X, Cao M D, Wang L C, Gui X, Zhang M, Huang Y H and Zhao Y J. 2023. Validation, inter-comparison, and usage recommendation of six latest VIIRS and MODIS aerosol products over the ocean and land on the global and regional scales. *Science of the Total Environment*, 884: 163794 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163794]
- Su X, Huang G, Wang L, Wei Y F, Ma X Y, Wang L C and Feng L. 2024. Validation and comparison of long-term accuracy and stability of global reanalysis and satellite retrieval AOD. *Remote Sensing*, 16(17): 3304 [DOI: 10.3390/rs16173304]
- Tao M H, Chen J X, Xu X G, Man W J, Xu L N, Wang L C, Wang Y, Wang J, Fan M, Shahzad M I and Chen L F. 2023. A robust and flexible satellite aerosol retrieval algorithm for multi-angle polarimetric measurements with physics-informed deep learning method. *Remote Sensing of Environment*, 297: 113763 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113763]
- Tao M H, Wang J, Li R, Wang L L, Wang L C, Wang Z F, Tao J H, Che H Z and Chen L F. 2019. Performance of MODIS high-resolution MAIAC aerosol algorithm in China: characterization and limitation. *Atmospheric Environment*, 213: 159-169 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.06.004]
- Thepnuan D, Chantara S, Lee C T, Lin N H and Tsai Y I. 2019. Molecular markers for biomass burning associated with the characterization of  $PM_{2.5}$  and component sources during dry season haze episodes in Upper South East Asia. *Science of the Total Environment*, 658: 708-722 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.201]
- Wang L, Hu X Q, Zhang B, Xu H L, He X W, Qi C L, Zhang X H, Si Y D, Xu N and Chen L. 2024. Estimation and correction method of long-term radiometric degradation of FY-3D/MERSI-II reflective solar bands. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 44(7): 2045-2055 (王玲, 胡秀清, 张北, 徐寒列, 何兴伟, 漆成莉, 张晓涵, 司一丹, 徐娜, 陈林. 2024. FY-3D MERSI-II 反射太阳波段长期响应衰减估计及订正方法. *光谱学与光谱分析*, 44(07): 2045-2055) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2024)07-2045-11]
- Wang Q X. 2023. Remote Sensing Retrieval of Aerosol Optical Depth and Single Scattering Albedo Over China. Wuhan: Wuhan University (王庆鑫. 2023. 中国地区气溶胶光学厚度与单次散射反照率遥感反演研究. 武汉: 武汉大学) [DOI: 10.27379/d.cnki.gwhdu.2023.000640]
- Wei J and Sun L. 2017. Comparison and evaluation of different MODIS aerosol optical depth products over the Beijing-Tianjin-Hebei Region in China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(3): 835-844 [DOI: 10.1109/jstars.2016.2595624]
- Wei J, Sun L, Huang B, Bilal M, Zhang Z Y and Wang L C. 2018. Verification, improvement and application of aerosol optical depths in China Part 1: inter-comparison of NPP-VIIRS and Aqua-MODIS. *Atmospheric Environment*, 175: 221-233 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.11.048]
- Xu N. 2019. FY-3 (batch 02) meteorological satellite ground application system project: User guide for MERS-I. National Satellite Meteorological Center. [2026-6-15]. <http://data.nsmc.org.cn/Data-Portal/cn/support/document.html?TypeID=592&ItemID=616> (徐娜. 2019. 风云三号(02批)气象卫星地面应用系统工程D星中分辨率光谱成像仪数据使用指南. 国家卫星气象中心. [2026-6-15].

<http://data.nsmc.org.cn/DataPortal/cn/support/document.html?TypeID=592&ItemID=616>

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]

Yang L K, Hu X Q, Wang H, He X W, Liu P, Xu N, Yang Z D and Zhang P. 2022. Preliminary test of quantitative capability in aerosol retrieval over land from MERSI-II onboard FY-3D. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(5): 923-940 (杨磊库, 胡秀清, 王涵, 何兴伟, 刘培, 徐娜, 杨忠东, 张鹏. 2022. 风云三号D星MERSI-II陆地气溶胶反演定量能力评估. *遥感学报*, 26(5): 923-940) [DOI: 10.11834/jrs.20210286]

Yang L K, Ji W Q, Pei X, Si Y D, Liu H, Chen S, Zhang C, Cheng X Q, Lu X F and Wang H T. 2024. Global evaluation of Fengyun-3 MERSI dark target aerosol retrievals over land. *International Journal of Digital Earth*, 17(1): 1-24 [DOI: 10.1080/17538947.2024.2344580]

## Inspection and comparative analysis of the accuracy of FY-3D/MERSI-II global terrestrial aerosol optical depth

NIU Xiaolong<sup>1</sup>, SI Yidan<sup>2,3,4</sup>, CHEN Lin<sup>2,3,4</sup>, YANG Leiku<sup>1</sup>, SHOU Yixuan<sup>2,3,4</sup>, PEI Xin<sup>1</sup>,  
JI Weiqian<sup>1</sup>, XUE Xiaoxia<sup>1</sup>, LI Mengnan<sup>1</sup>, YU Tianlei<sup>2,3,4</sup>

1. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. National Satellite Meteorological Center (National Space Weather Monitoring and early warning center), Beijing 100081, China;

3. Xu Jianmin Meteorological Satellite Innovation Center, Beijing 100081, China;

4. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

**Abstract:** This study aimed to systematically evaluate the accuracy and consistency of the Aerosol Optical Depth (AOD) product from the medium resolution spectral imager-II (MERSI-II) onboard the FY-3D satellite. Cross-comparisons with global ground-based observations and international satellite products provided a scientific basis for algorithm optimization and product application.

The MERSI-II AOD product from 2019 to 2023 was compared with observations from 538 global AERONET sites and three international satellite AOD products: Aqua/MODIS, NOAA-20/VIIRS, and Suomi-NPP/VIIRS. Spatiotemporal matching was applied, and statistical metrics, including the correlation coefficient ( $R$ ), Mean Bias (MB), and Root Mean Square Error (RMSE), were used to analyze product accuracy and bias characteristics.

MERSI-II AOD showed good agreement with AERONET observations ( $R=0.822$ ,  $MB=0.048$ , and  $RMSE=0.169$ ), with 60.32% of samples falling within the expected error margin. Compared with other satellite products, all four exhibited similar temporal trends: MERSI-II AOD performed best overall in 2023 and achieved high accuracy in winter (November-February,  $R>0.83$ ,  $MB<0.045$ ). Spatially, all products showed highly similar distribution patterns, with high correlation over densely vegetated regions (e.g., eastern North America,  $R\geq 0.88$ ) but poor performance over bright surfaces such as North Africa and the Middle East. MERSI-II AOD exhibited an average positive bias of 0.048 relative to AERONET, similar to Suomi-NPP/VIIRS (0.056). Further bias analysis indicated that the MERSI-II AOD bias was negatively correlated with aerosol loading and scattering angle but positively correlated with shortwave infrared NDVI, solar zenith angle, and viewing zenith angle.

The overall accuracy of MERSI-II AOD was comparable to that of Suomi-NPP/VIIRS but slightly lower than those of NOAA-20/VIIRS and MODIS. Performance requires further improvement under high pollution conditions and over bright surfaces (e.g., urban and bare soil areas). Future algorithm enhancements will focus on incorporating regional aerosol models, optimizing the surface reflectance model for bright surfaces, and improving the timeliness of radiometric calibration updates. These coordinated efforts in algorithm and data processing will enhance product accuracy, thereby strengthening the contribution of the Fengyun satellite series to the global aerosol observation system.

**Key words:** Fengyun-3D (FY-3D), medium resolution spectral imager-II (MERSI-II), aerosol optical depth (AOD), ground-based validation, error analysis

**Supported by** National Key Research and Development Program of China (No. 2023FYB3905804); National Natural Science Foundation of China (No. 42471424, 42201399)

附录 A

表 1 4 个载荷 AOD 反演算法  
Table 1 AOD inversion algorithms of four loads

| 数据来源               | 像元空间<br>分辨率 | 算法输入数据<br>空间分辨率 | 算法                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 质控方案                                                                                                                                               |
|--------------------|-------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| FY-3D/<br>MERSI-II | 10 km×10 km | 1 km×1 km       | $\rho_{0.65}^s = f(\rho_{2.13}^s, \text{NDVI}_{\text{swir}}, \theta_s) = \text{slope}_{0.65/2.13} \times \rho_{2.13}^s + \text{yint}_{0.65/2.13}$<br>$\rho_{0.47}^s = f(\rho_{0.65}^s, \text{NDVI}_{\text{swir}}, \theta_s) = \text{slope}_{0.47/0.65} \times \rho_{0.65}^s + \text{yint}_{0.47/0.65}$<br>其中:<br>$\text{slope}_{0.65/2.13} = a_1 \times \text{NDVI}_{\text{swir}}^2 + b_1 \times \text{NDVI}_{\text{swir}} + c_1$<br>$\text{slope}_{0.47/65} = a_2 \times \text{NDVI}_{\text{swir}}^2 + b_2 \times \text{NDVI}_{\text{swir}} + c_2$<br>$\text{yint}_{0.65/2.13} = a_3 \times \text{NDVI}_{\text{swir}}^2 + b_3 \times \text{NDVI}_{\text{swir}} + c_3$<br>$\text{yint}_{0.47/0.65} = a_4 \times \text{NDVI}_{\text{swir}}^2 + b_4 \times \text{NDVI}_{\text{swir}} + c_4$<br>此处 $\text{NDVI}_{\text{swir}}$ 取值为: 0.05 或 0.25 或 0.75; $\theta_s$ 取值为 $30^\circ$ 或 $55^\circ$<br>(注: 具体算法细节可参见 Si 等人 (2024) 文章)<br>气溶胶类型: 大陆型 | 一个反演窗口内样本数:<br>100<br>有效像元数 $N$ :<br>$N > 12.5$ , QAC=3<br>$N > 7.5$ , QAC=2<br>$N > 5$ , QAC=1<br>否则 QAC=0<br>本文选择 QAC=3 的样本                      |
|                    |             |                 | $\rho_{0.65}^s = f(\rho_{2.12}^s) \times \text{slope}_{0.65/2.12} + \text{yint}_{0.65/2.12}$<br>$\rho_{0.47}^s = g(\rho_{0.65}^s) \times \text{slope}_{0.47/0.65} + \text{yint}_{0.47/0.65}$<br>其中:<br>$\text{slope}_{0.65/2.12} = a_1 \times \text{NDVI}_{\text{swir}} + 0.002\theta - 0.27$<br>$\text{yint}_{0.65/2.12} = -0.00025\theta + 0.033$<br>$\text{slope}_{0.47/0.65} = 0.49$<br>$\text{yint}_{0.47/0.65} = 0.005$<br>此处 $\text{NDVI}_{\text{swir}}$ 取值为 0.25 或 0.75<br>气溶胶类型: 大陆型、非吸收型、中等吸收型、<br>强吸收型、沙尘型                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 一个反演窗口内样本数:<br>400<br>有效像元数 $N$ :<br>$N > 50$ , QAC=3<br>$31 < N < 50$ , QAC=2<br>$21 < N < 30$ , QAC=1<br>$12 < N < 20$ , QAC=0<br>本文选择 QAC=3 的样本 |
| S-VIIRS            | 6 km×6 km   | 0.75 km×0.75 km | 算法与 Aqua/MODIS 相同                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 一个反演窗口内样本数: 64<br>有效像元数 $N$ :<br>$N > 50$ , QAC=3<br>$31 < N < 50$ , QAC=2<br>$21 < N < 30$ , QAC=1<br>$12 < N < 20$ , QAC=0<br>本文选择 QAC=3 的样本     |
| N-VIIRS            | 6 km×6 km   | 0.75 km×0.75 km | 算法与 Aqua/MODIS 相同                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 一个反演窗口内样本数: 64<br>有效像元数 $N$ :<br>$N > 50$ , QAC=3<br>$31 < N < 50$ , QAC=2<br>$21 < N < 30$ , QAC=1<br>$12 < N < 20$ , QAC=0<br>本文选择 QAC=3 的样本     |

注: 式中  $\rho_{2.13}^s$   $\rho_{0.65}^s$   $\rho_{0.47}^s$  分别为 0.47  $\mu\text{m}$  蓝光波段、0.65  $\mu\text{m}$  红光波段和 2.1  $\mu\text{m}$  短波红外波段的地表反射率 (MODIS 为 2.12, MERSI-II 为 2.13, 两者在短波红外波段不相同);

表 2 2019 年—2023 年 4 个载荷 AOD 产品与 AERONET 观测数据验证结果  
Table 2 Validation results of AOD products of four loads and AERONET observation data from 2019 to 2023

| 载荷       | $N$    | $R$   | MB     | RMSE  | Within EE% |
|----------|--------|-------|--------|-------|------------|
| MERSI-II | 76455  | 0.822 | 0.048  | 0.169 | 60.32      |
| MODIS    | 73866  | 0.911 | 0.018  | 0.105 | 74.69      |
| N-VIIRS  | 148984 | 0.888 | -0.004 | 0.108 | 70.05      |
| S-VIIRS  | 151058 | 0.885 | 0.056  | 0.141 | 64.05      |

表3 4个载荷反演AOD产品区域统计指标结果  
Table 3 Four loads invert the regional statistical index results of AOD products

| 区域   | N     |          |         |         | R     |          |         |         | MB     |          |         |         |
|------|-------|----------|---------|---------|-------|----------|---------|---------|--------|----------|---------|---------|
|      | MODIS | MERSI-II | S-VIIRS | N-VIIRS | MODIS | MERSI-II | S-VIIRS | N-VIIRS | MODIS  | MERSI-II | S-VIIRS | N-VIIRS |
| WNA  | 16343 | 15861    | 32446   | 32595   | 0.911 | 0.842    | 0.867   | 0.878   | 0.041  | 0.105    | 0.084   | 0.029   |
| ENA  | 12457 | 9931     | 26345   | 25055   | 0.955 | 0.881    | 0.931   | 0.924   | -0.005 | 0.039    | 0.025   | -0.023  |
| EUR  | 21768 | 22146    | 45723   | 45246   | 0.878 | 0.674    | 0.846   | 0.829   | 0.010  | 0.030    | 0.037   | -0.017  |
| OCE  | 1750  | 1080     | 3257    | 2944    | 0.789 | 0.846    | 0.761   | 0.796   | -0.031 | 0.032    | -0.011  | -0.048  |
| SAM  | 3712  | 4100     | 7406    | 7353    | 0.878 | 0.768    | 0.816   | 0.818   | -0.004 | 0.075    | 0.031   | -0.022  |
| NAME | 3584  | 5496     | 7177    | 7364    | 0.862 | 0.778    | 0.834   | 0.828   | 0.016  | -0.001   | 0.069   | -0.012  |
| SAF  | 3852  | 2750     | 6296    | 5939    | 0.849 | 0.693    | 0.833   | 0.814   | -0.024 | -0.056   | -0.015  | -0.072  |
| SEA  | 2282  | 2923     | 4120    | 4082    | 0.935 | 0.847    | 0.895   | 0.920   | 0.034  | 0.028    | 0.118   | -0.003  |
| IND  | 3082  | 3770     | 5067    | 5047    | 0.856 | 0.830    | 0.826   | 0.860   | 0.072  | -0.019   | 0.159   | 0.020   |
| NEA  | 4962  | 8393     | 13211   | 13344   | 0.905 | 0.848    | 0.883   | 0.889   | 0.062  | 0.086    | 0.109   | 0.042   |

| 区域   | RMSE  |          |         |         | Within EE% |          |         |         |
|------|-------|----------|---------|---------|------------|----------|---------|---------|
|      | MODIS | MERSI-II | S-VIIRS | N-VIIRS | MODIS      | MERSI-II | S-VIIRS | N-VIIRS |
| WNA  | 0.117 | 0.222    | 0.163   | 0.121   | 70.95      | 46.25    | 54.17   | 68.43   |
| ENA  | 0.072 | 0.138    | 0.090   | 0.077   | 81.36      | 69.02    | 72.80   | 69.03   |
| EUR  | 0.066 | 0.096    | 0.085   | 0.068   | 81.94      | 70.00    | 74.44   | 77.38   |
| OCE  | 0.067 | 0.110    | 0.075   | 0.084   | 68.40      | 69.35    | 69.82   | 56.62   |
| SAM  | 0.072 | 0.151    | 0.100   | 0.087   | 73.60      | 51.15    | 62.83   | 66.97   |
| NAME | 0.156 | 0.189    | 0.170   | 0.154   | 53.43      | 52.75    | 38.34   | 64.95   |
| SAF  | 0.083 | 0.147    | 0.092   | 0.116   | 70.96      | 65.24    | 66.87   | 54.89   |
| SEA  | 0.162 | 0.222    | 0.279   | 0.179   | 67.60      | 54.29    | 56.41   | 58.99   |
| IND  | 0.209 | 0.222    | 0.311   | 0.205   | 67.46      | 69.31    | 53.88   | 71.39   |
| NEA  | 0.135 | 0.190    | 0.183   | 0.130   | 67.05      | 55.90    | 53.05   | 68.20   |