

DOI:10.3969/j.issn.1673-6141.2023.04.006

基于GF-5(02)卫星DPC数据的2022年春季陆表细粒子气溶胶光学厚度空间分布

董鉴韬^{1,2}, 李正强², 谢一淞^{2*}, 樊程², 洪津³,
戴刘新², 顾浩然^{2,4}, 郑杨²

(1 河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454003;

2 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;

3 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

4 安徽师范大学地理与旅游学院, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 大气细粒子气溶胶主要来源于人类生产生活排放, 可以反映人为活动对大气的影 响, 因此细粒子气溶胶光学厚度 (AOD_f) 是大气环境领域重要的基础大气参数之一。本研究基于查找表反演方法, 利用高光谱观测卫星 [GF-5 (02)] 多角度偏振成像仪 (DPC) 数据, 得到2022年春季 (3-5月) 的全球陆表 AOD_f, 并通过 AERONET 对反演结果进行了初步验证。对 AOD_f 的分析结果表明: 1) 全球陆表 AOD_f 分布呈现明显的南北差异, 南半球基本为低值, 北半球的高值区域主要集中在亚洲地区; 2) 中国地区陆表 AOD_f 在“胡焕庸线”两侧差别显著, 东南侧的高值主要集中在川渝腹地、华北平原和两广地区, 而西北侧基本表现为低值覆盖, 人为和自然因素均对 AOD_f 的分布有一定的影响; 3) 南亚地区和非洲中-北部的 AOD_f 分布与当地燃烧活动产生的烟尘以及季风环流等因素有一定的相关性。此外, DPC 的 AOD_f 数据与 MODIS 细粒子产品的对比结果表明二者的 AOD_f 高值区域分布基本一致, 而 DPC 在高亮地表有着更为完整的反演结果, 可以为全球和重点区域的大气环境监测提供支持。

关键词: 高分五号 02 星; 细粒子气溶胶光学厚度; 偏振反演; 空间分布; 人为活动

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)04-323-016

Spatial distribution of fine-mode aerosol optical depth over land in spring 2022 based on DPC/GF-5(02)

DONG Jiantao^{1,2}, LI Zhengqiang², XIE Yisong^{2*}, FAN Cheng², HONG Jin³,
DAI Liuxin², GU Haoran^{2,4}, ZHENG Yang²

(1 School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozhuo 454003, China;

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

3 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

4 College of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China)

基金项目: 国家自然科学基金 (42175147), 国家杰出青年科学基金 (41925019), 海南省重点研发计划 (ZDYF2020206)

作者简介: 董鉴韬 (1998-), 四川绵阳人, 硕士研究生, 主要从事大气气溶胶卫星偏振遥感方面的研究。E-mail: int8@foxmail.com

导师简介: 见本期 310 页

收稿日期: 2023-02-20; **修改日期:** 2023-03-27

***通信作者:** E-mail: xieys@radi.ac.cn

Abstract: Atmospheric fine-mode aerosols, which are mostly originated from anthropogenic emissions, can reflect human activity's impacts on the atmosphere. Therefore, the fine-mode aerosol optical depth (AOD_f) is one of the basic parameters in the field of atmospheric environment. Based on the remote sensing data of Directional Polarimetric Camera (DPC) onboard Gaofen-5(02) satellite, the AOD_f data over global land of spring 2022 (from March to May) were obtained using the look-up table retrieval method in this study, and then the AOD_f inversion results were verified using the ground-based observation of AERONET sites. Based on the analysis of AOD_f distribution, it is found that the distribution of global AOD_f shows an obvious north-south difference, with low values in the southern hemisphere and high values in the northern hemisphere mainly concentrated in the Asian region. In China, AOD_f distribution shows considerable differences between the two sides of the "Hu-Huanyong Line". On the south-east side, the high AOD_f values is mainly concentrated in the Sichuan-Chongqing region, North China Plain and the Guangdong-Guangxi region, while on the north-west side, AOD_f is generally low over Qinghai-Tibet Plateau and desert area. This kind of spatial distribution pattern of AOD_f reflects the influence from both anthropogenic factors and natural factors. As for South Asia and Central-North Africa, it is shown that AOD_f distribution is correlated with smoke and soot emissions from local burning combustion, and meteorological factors such as monsoon. In addition, the AOD_f retrieval data from DPC were compared with MODIS fine-mode aerosol products, and it is found that the spatial distribution of high AOD_f from the two datasets is basically consistent, while DPC data have a better coverage for bright surface than MODIS data, which makes it more suitable for providing data support for global and regional monitoring of atmospheric environment.

Key words: Gaofen-5(02); fine-mode aerosol optical depth; polarization-oriented inversion; spatial distribution; anthropogenic emission

0 引言

大气气溶胶是地球大气系统的重要组成部分,主要由空气动力学直径小于 $100\ \mu\text{m}$ 的颗粒物构成,这些颗粒物对人类健康和生态环境造成一定的影响^[1]。近十年来广受全球关注的 $\text{PM}_{2.5}$ 是典型的细粒子气溶胶,其空气动力学直径小于 $2.5\ \mu\text{m}$ 。由于其可入肺的特点,我国从2013年开始就在74个城市共496个监测点位开展 $\text{PM}_{2.5}$ 的原位监测^[2]。近期研究也表明,以 $\text{PM}_{2.5}$ 为代表的大气气溶胶可能对新型冠状病毒肺炎的流行程度起到促进效果^[3]。细粒子气溶胶光学厚度 (AOD_f) 定义为气溶胶光学厚度 (AOD) 与细粒子比例 (FMF) 的乘积,表征了整层大气细粒子气溶胶对于辐射的衰减作用。由于人为活动是细粒子气溶胶的主要来源, AOD_f 数值在一定程度上反映了人为活动的强度及对大气环境的影响。相关研究已经利用 AOD_f (或 AOD 与 FMF) 和其他大气参数对近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度进行了估算^[4-6]。因此, AOD_f 监测数据可以间接地评估大气环境质量,为生态文明建设提供基础性决策支持。

大气气溶胶的观测手段大致可以分为地基、航空、卫星观测三类。代表性的地基观测仪器是太阳-天空辐射计 (CE-318),气溶胶探测结果精度较高,例如,全球自动观测网 AERONET 的 AOD 探测精度可以达到

0.02^[7],但通常仅代表站点及周边较小范围的大气平均状况,其观测范围受限于站点布设密度,因此多用于卫星或航空载荷反演的验证或气溶胶参数统计建模。航空机载观测受飞行稳定性、成本等因素的影响,一般用于载荷航飞测试或短期试验观测,并且其探测空间范围也较为有限。卫星遥感观测具有高覆盖、空间连续以及客观性等特点,可以获得全球或区域范围的空间连续监测结果,静止卫星高频次观测也可支撑高时相数据的获取。因此,卫星遥感探测相比于地基和航空探测具有不可替代的优势。

大气气溶胶卫星观测信号包括强度和偏振观测。在暗地表条件下,特定探测波段的强度观测信号能够反映总气溶胶的信息,而从强度观测中反演细粒子气溶胶则需要较多的假设^[8],代表性的AOD_r数据集包括MODIS的C61/MOD04^[9]、MISR的V23数据集^[10]等。相比之下,偏振观测对细粒子气溶胶较为敏感,并且受地表信号的影响小于强度观测,因此常用于AOD_r的反演。星载多角度偏振探测结合了多角度、多波段的偏振和强度观测,是综合探测能力较优的细粒子气溶胶探测手段,代表性的观测仪器包括法国的POLDER-3/PARASOL以及中国近几年发射的大气气溶胶多角度偏振成像仪(DPC)系列[即DPC/GF-5、DPC/GF-5(02)、DPC/DQ-1、DPC/CM-1]。POLDER-3采用查找表(LUT)方法进行AOD_r反演^[11],通过Nadal和Breon^[12]建立的半经验地表双向偏振反射(BPDF)模型估算地表偏振贡献以实现地气解耦合,进而采用偏振辐射传输模型建立的不同气溶胶模型对应的大气层顶(TOA)偏振反射率与AOD_r的查找表实现反演。Wang等^[13]对LUT进行了拓展,对北京地区的AOD_r反演进行了实验。Zhang等^[14]通过结合POLDER-3的强度和偏振数据,改进了反演流程,同时反演出了AOD和AOD_r。Ge等^[15]提出了基于地表偏振反射率光谱不变性的SNOSPR反演算法,将该光谱不变特性作为约束条件优化了AOD_r反演。

本文采用POLDER-3反演算法,利用DPC/GF-5(02)的多角度偏振观测获得了2022年春季(3—5月)全球陆地上空的AOD_r数据集,并针对重点地区的逐月时相变化和春季平均值空间分布,结合野火燃烧、人为活动等因素进行了分析。

1 卫星与数据

1.1 高光谱观测卫星GF-5(02)

2021年9月7日,GF-5(02)在太原卫星发射中心搭载于长征四号丙运载火箭成功发射升空。GF-5(02)是一颗太阳同步极轨卫星,卫星倾角98.203°,标称轨道高度705 km,过境时间为当地10:30左右(降轨)。

与GF-5卫星载荷配置类似,GF-5(02)搭载了可见短波红外高光谱相机(AHSI)、全谱段光谱成像仪(VIMI)、大气主要温室气体监测仪(GMI)、大气痕量气体差分吸收光谱仪(EMI)、吸收性气溶胶探测仪(AAS)以及DPC,并额外装载了一台高精度偏振扫描仪(POSP)。其中,DPC和POSP两种不同探测机制的偏振传感器组成“偏振交火”星载探测方案,可用于PM_{2.5}近地面浓度的遥感探测^[16]。GF-5(02)在同一颗卫星上使用了高光谱、全谱段、偏振、多角度、临边等多种观测手段,服务于环境保护、气象、国土资源、防灾减灾、农业、林业等行业。

1.2 DPC数据

DPC/GF-5(02)兼具多角度观测与偏振观测能力,视场角为±50°,幅宽约为1850 km,可以实现两天内完成全球海陆范围的探测。DPC影像的星下点空间分辨率约为3.3 km,比国际上同类传感器POLDER-3高约1倍^[17],能够反映出更精细尺度的大气气溶胶空间分布^[18]。DPC具有8个波段,各波段中心波长分别为443、

490、565、670、763、765、865、910 nm。其中, 490、670、865 nm 三个波段为偏振波段, 通过 0° 、 60° 、 120° 三个偏振解析角度, 对斯托克斯分量 I 、 Q 与 U 进行解算。非偏振波段中, 763 nm 和 765 nm 位于 O_2 -A吸收带, 可用于估算地表压强; 910 nm 是典型的水汽吸收波段, 可用于柱水汽含量的探测。DPC沿轨飞行时快速成像形成多角度观测, 大多数像元的观测角度数达到17个, 显著高于GF-5上DPC的角度数(9~12个), 因此提供了更多的有效观测。DPC的辐射探测精度和偏振探测精度分别为5%和0.02, 满足环境、气象等领域的卫星探测精度需求。

采用的DPC数据是0级数据经过辐射校正、偏振解算、几何处理和多角度匹配等预处理流程之后的L1级数据, 以轨为单位, 全球完整的成像数据为14~15轨/天。单轨数据采用分波段形式存储, 包含8个HDF5格式文件, 其中包括每个有效像元的强度/偏振观测值、观测几何以及地理定位等数据。

本研究对GF-5(02)在轨测试期间部分时段的DPC观测进行处理和分析。首先经过云识别过程剔除掉云像元, 并对DPC图像中的陆地上空无云像元进行 AOD_r 反演。云识别数据来自侯梦雨等^[19]建立的一种改进的光谱特征云检测算法。DPC数据的时间跨度从2022年3月1日到5月31日, 即2022年春季, 共包括1323轨数据。

1.3 MODIS数据产品

(1) 地表分类数据

在地表偏振反射率估算(详见2.2节)中采用MODIS全球地表分类产品MCD12Q1^[20], 并通过拼接和重采样将其处理到与DPC一致的全球正弦投影格网(12168 × 6084)。MCD12Q1基于MODIS在2020年的所有观测数据, 依据国际地圈-生物圈计划(IGBP)提出的标准, 对全球进行了典型地表覆盖类型分类, 包括11种植被地表、3种人为地表以及3种非植被类型地表。

(2) 气溶胶产品

采用MODIS气溶胶产品MOD04^[9]与DPC反演获得的 AOD_r 数据进行对比分析。该产品通过暗目标算法反演得到, 空间分辨率为3 km, 包含了陆表AOD和FMF数据, 将AOD和FMF相乘即可获得 AOD_r 数据。MODIS的 AOD_r 数据通过拼接和重采样以及月均、季均等处理, 可以与本研究反演结果进行对比。

(3) 地表火点产品

为了深入分析重点地区的 AOD_r 高值原因, 本研究还使用了FIRMS (Fire information for resource management system) 火点产品。该产品对MOD14^[21]产品中的疑似火点进行提取, 形成了点状的矢量文件。除了对FIRMS数据作时间上的匹配, 还进行了置信度大于等于95%的筛选。

以上MODIS数据均来源于C61数据集^[8]。

1.4 地基验证数据

在反演验证方面, 采用全球自动观测网AERONET的地基观测获得的 AOD_r 与卫星反演结果进行对比。AERONET在全球范围布设了600多个观测站点, 通过多波段偏振和强度辐射观测获取大气气溶胶、水汽、云的光学、微物理、成分特性的数据, 是相关大气卫星产品精度验证的重要数据源。AERONET的 AOD_r (500 nm) 数据是基于光谱退卷积(SDA)算法获得的^[22,23], 本研究采用了1.5级 AOD_r 数据结合 AE_f (fine-mode Ångström Exponent) 指数进行验证。

2 方法

2.1 基本原理

光的偏振体现了波动的方向性,相关研究^[11,24]显示,在散射角 $80^\circ\sim 120^\circ$ 范围内,偏振观测仪对细粒子气溶胶敏感,粗粒子气溶胶的贡献较低,因此,本研究反演过程仅选择散射角符合该范围的数据进行 AOD_f 的反演。Waquet等^[25]对偏振辐射传输过程进行了比较系统的介绍,高度 z 处的传感器在入瞳处接收到的偏振辐射 L 可以表达为

$$L_\lambda^{\text{Meas}}(z, \theta_s, \theta_v, \varphi_r) = L_\lambda^{\text{Atm}}(z, \theta_s, \theta_v, \varphi_r) + \cos(\theta_s) R_\lambda^{\text{Surf}}(\theta_s, \theta_v, \varphi_r) T_\lambda^\downarrow(\theta_s) T_\lambda^\uparrow(z, \theta_v), \quad (1)$$

式中下标 λ 表示波长, θ_s 和 θ_v 分别表示太阳天顶角和观测天顶角, φ_r 表示相对方位角,上标 Atm 和 Surf 分别表示大气和地表, R 表示二向偏振反射因子, T^\downarrow 、 T^\uparrow 分别表示偏振信号从大气层顶(太阳)下行到地表、从地表上行到大气层顶(传感器)过程中的透射率,其表达式分别为

$$\begin{cases} T_\lambda^\downarrow(\theta_s) = \exp\left[-\left(\frac{\psi\delta_{0,\lambda}^m + \zeta\delta_{0,\lambda}^a}{\mu_s}\right)\right] \\ T_\lambda^\uparrow(z, \theta_v) = \exp\left\{-\left[\frac{\psi\delta_\lambda^m(z) + \zeta\delta_\lambda^a(z)}{\mu_v}\right]\right\} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 δ 表示大气成分的光学厚度,其上标 m 和 a 分别代表分子和气溶胶, $\delta_{0,\lambda}^x$ 和 δ_λ^x 分别为整层大气的光学厚度和载荷处的光学厚度(x 为 m 或 a),后者可以通过前者联合传感器高度 z_s (km)和标高 H 表示为

$$\delta_\lambda^x(z) = \delta_{0,\lambda}^x \left[1 - \exp\left(-\frac{z_s}{H_x}\right)\right], \quad (3)$$

式中,对于分子,标高 H_m 可取标准值8 km;对于气溶胶,标高 H_a 可取典型值2 km。

式(2)中的系数 ψ 和 ζ 反映了大气和地表之间的多次散射, ψ 取值0.9, ζ 可以表示为Ångström指数(670 nm和865 nm) α 的经验关系式^[26]:

$$\zeta = 0.3658 + 0.1023\alpha + 0.0080\alpha^2, \quad (4)$$

式中 α 由气溶胶模型决定。

对于式(2)中的大气分子光学厚度 $\delta_{0,\lambda}^m$,在标准大气情况下,可以通过波长 λ (μm)和海拔 z 表示为

$$\delta_{0,\lambda}^m = 0.0088\lambda^{(-4.15+0.2\lambda)} \exp(-0.1188z - 0.00116z^2). \quad (5)$$

综合式(1)–(5),给定一个DPC像元某个角度下的观测值(包括观测几何、高程),即可根据地表类型通过经验函数计算得到地表偏振反射率 R_λ^{Surf} (详见2.2节),并基于偏振辐射传输模型模拟大气偏振反射率(程辐射) L_λ^{Atm} (详见2.3节),进而建立TOA偏振表观反射率与细粒子气溶胶光学厚度及气溶胶模型的关系。上述过程即是 AOD_f 反演过程中正向模型的构建,最后通过多种模型的定量比较来实现对 AOD_f 的反演(详见2.4节)。

2.2 地表估算

地表偏振反射率 R^{Surf} 可以采用两种方式进行估算。一种方法是利用短波红外观测受气溶胶散射影响较

小的特点,采用线性关系将短波红外地表偏振反射传递到可见光波段^[27]。第二种是半经验模型^[12],可用于缺乏短波红外通道观测的传感器(例如DPC),即本研究采用的方法:

$$R^{\text{Surf}} = p \left\{ 1 - \exp \left[-q \frac{F(i, \eta)}{\cos \theta_s + \cos \theta_v} \right] \right\}, \quad (6)$$

式中 p 和 q 都是与地表类型和归一化差分植被指数(NDVI)相关的系数, F 为菲涅尔散射函数,与入射角 i 和介质折射率 η 有关,其表达式为

$$F(i, \eta) = \left[\left(\frac{\eta \cos \gamma - \cos i}{\eta \cos \gamma + \cos i} \right)^2 - \left(\frac{\eta \cos i - \cos \gamma}{\eta \cos i + \cos \gamma} \right)^2 \right] / 2, \quad (7)$$

式中入射角 i 可以通过入射光向量和散射光向量的夹角(即散射角 s)计算得出,两个角度的计算公式可以表示为如下与卫星的对地观测成像几何角度的关系:

$$\begin{cases} -\cos s = \cos \theta_s \cos \theta_v + \sin \theta_s \sin \theta_v \cos \varphi_r \\ i = (\pi - s) / 2 \end{cases}. \quad (8)$$

式(9)中,折射角 γ 亦可以通过介质折射率 η 和散射角 s 计算得出:

$$\sin i = \eta \sin \gamma. \quad (9)$$

2.3 建立查找表

在卫星遥感反演中,对每一个像元都进行辐射传输模拟计算是十分耗时的,因此大部分遥感反演算法都采用查找表方法作为替代。LUT方法的思路是提前将连续的变量线性划分为多个离散的值,并将这些离散值输入辐射传输模型,得到一系列模拟结果,并将模拟结果进行存储。反演时合理假设相邻离散变量的模拟结果之间也是线性变化的,即可通过线性内插实现卫星数据与查找参数的对应,从而提高反演效率。

本研究使用的矢量辐射传输模型为6SV^[28]。6SV是用于辐射传输模拟计算的程序,采用逐级散射法求解辐射传输方程,可以模拟不同地表和大气条件下不同观测仪器的测量值,覆盖了0.25~4 μm 的光谱范围,并能够考虑偏振效应。在模拟计算时,采用了DPC/GF-5(02)的实验室测量光谱响应函数,输入的参量包括气溶胶模型、AOD_r、卫星观测几何(θ_s 、 θ_v 、 φ_r)以及海拔高程,通过这些参数的循环遍历组合,可以得到多种情况下的模拟大气偏振反射率。

表1中,气溶胶模型是决定细粒子气溶胶反演精度的主要因素之一。一方面,本研究拓展了POLDER-3官方算法中的细粒子模型^[11],将中值半径从0.05~0.15 μm 的范围扩展至0.05~0.20 μm ;另一方面,基于先前研究建立的气溶胶基础模态模型,将其中细模态模型(5种)加入到查找表中,具体模型信息详见Li等^[29]的研究。

2.4 代价函数

根据查找表中每一组AOD_r,利用矢量辐射传输模拟TOA的偏振反射率(或偏振辐亮度),再通过与传感器对应观测值进行对比,构建代价函数,从而获得使模拟值与观测值最优匹配(即残差最小)的AOD_r。对于每一个查找表(气溶胶模型),均可以找到一组满足上述最优匹配的结果,即该模型下对应的AOD_r反演结果,因此还需进一步比较不同模型之间的反演结果,以确定最优的AOD_r与模型。

表1 6SV输入

Table 1 Inputs of 6SV

参数名称	参数设置
中心波长/nm	670, 865
细粒子气溶胶模型	典型的细粒子气溶胶模型 ^[11] 、基于SONET统计的典型模型 ^[29]
AOD _f	0.001, 0.25, 0.5, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00
地表海拔/km	0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 2.00, 5
太阳天顶角/(°)	0, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60, 66, 72, 78, 84, 88
观测天顶角/(°)	0, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60, 66, 72, 78, 84, 88
相对方位角/(°)	0, 12, 24, 36, 48, 60, 72, 84, 96, 108, 120, 132, 144, 156, 168, 180

与单角度传感器不同, DPC的代价函数构建还需考虑多个角度下累加的拟合残差 ε , ε 的计算公式为

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{2N} \sum_{\lambda=\lambda_0}^{\lambda_1} \sum_j [R_p^{\text{cal}}(\lambda, \theta_j) - R_p^{\text{meas}}(\lambda, \theta_j)]^2}, \quad (10)$$

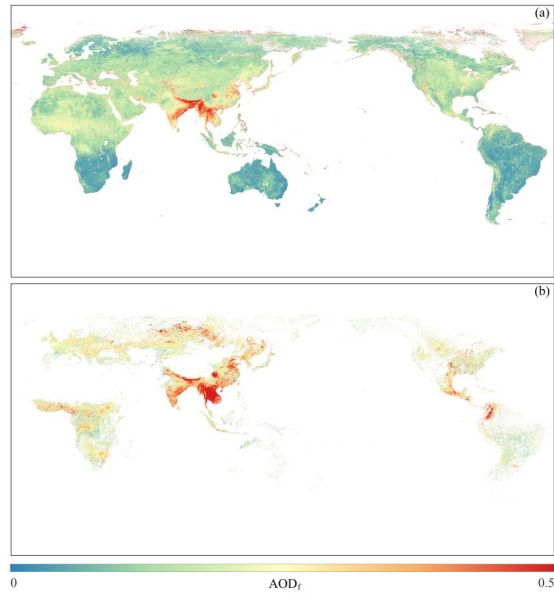
式中 N 为有效的观测角度数量, λ_0 和 λ_1 分别为反演用到的670 nm和865 nm波段, $R_p^{\text{cal}}(\lambda, \theta_j)$ 为第 j 个观测几何 θ_j 下 λ 波长处根据该气溶胶模型和AOD_f模拟出的大气层顶偏振反射率, $R_p^{\text{meas}}(\lambda, \theta_j)$ 为卫星在大气层顶实际观测的偏振反射率。当累加残差 ε 在某一气溶胶模型下达到多个模型中的最小值时, 对应的模型即是该像元的最优解, 多个角度下AOD_f的平均值即为该像元处的反演结果。

3 结果与讨论

3.1 2022年春季全球陆表AOD_f分布

由于细粒子气溶胶主要来源于人类活动排放和野火燃烧^[15], 因此AOD_f的空间分布主要与人类活动和大范围燃烧活动相关。图1显示了DPC/GF-5(02)反演获得的2022年春季(3—5月)的全球陆表AOD_f季平均值(空间分辨率3.3 km)及与MODIS产品的对比结果。从空间分布来看, 全球春季的AOD_f值主要呈现南半球远低于北半球的特点, 基本符合全球尺度上人为活动强度的分布特点。全球AOD_f高值区主要集中在印度北部等工农业发展、人类活动密集的南亚地区以及中国的人口主要聚集地区, 如西南腹地和冀-鲁-苏沿海一带(约0.5), 与Ge等^[15]的反演结果基本一致。非洲几内亚湾局部地区受生物质燃烧等火点影响, 其AOD_f值也略高于受沙尘影响的北非地区。而南美洲、非洲南部、大洋洲等地区的AOD_f数值普遍较低, 约为0~0.15。

将DPC的AOD_f数据与MODIS产品进行对比, 可以看出, 两个数据集的高值区的空间分布基本一致, 但MODIS产品数值更高, 特别是在哥伦比亚东科迪勒拉山系以东、俄罗斯高纬地区、美国中南部俄克拉何马州等地区。Zhang等^[14]关于POLDER-3和MODIS的中国地区东部AOD_f对比也表现出类似的结果, 可能是由于其FMF在0~1范围内以0.1为间隔的非连续值造成的, 且很多像元的FMF表现为0或1, 故而造成了部分地区AOD即代表了AOD_f。此外, 在北非、中东、澳大利亚、亚洲中部等大范围的亮地表区域, MODIS暗目标算法不适用, 因此存在较多的数据缺失。相比MODIS, DPC的反演数据在空间覆盖范围上提升了约65%。该对比结果也反映了MODIS-C61版本气溶胶产品对于陆地上空气溶胶粒子尺度相关参数获取能力有限^[8]。



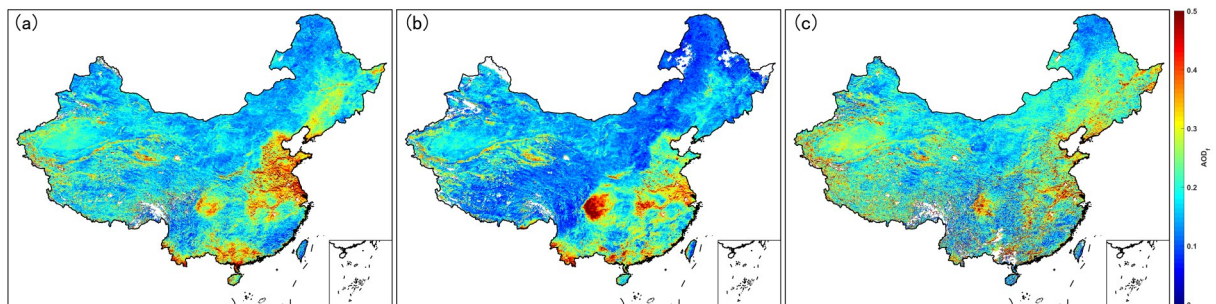
注: 此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图 [审图号: GS (2016) 1665 号] 绘制, 底图无修改

图 1 2022年春季全球陆表 AOD_f 平均值。(a) DPC; (b) MOD04

Fig. 1 Averaged AOD_f over land in spring 2022. (a) DPC; (b) MOD04

3.2 中国地区 3—5 月陆表 AOD_f 分布

图 2 为中国重点地区 2022 年春季逐月 AOD_f 分布结果。由图可知, 细粒子气溶胶在“胡焕庸线”两侧分布差异较大, 胡焕庸线的西北大部分为低值覆盖区, 而东南方向数值相对较高, 与中国 PM_{2.5} 的分布类似^[30,31]。其中, AOD_f 高值地区主要出现在川渝地带、两广周边、华东和华北, 这些地区的省、直辖市在中国第七次人口普查数据中占比超过了总人口数量的一半^[32]。2022 年 3 月中国的 AOD_f 均值约为 0.179, 高值主要集中在成渝地区双城经济圈 (以下简称成渝圈), 4 月的均值约为 0.206, 高值主要集中在华东地区, 5 月的均值约为 0.223, 高值区域较为分散。从逐月变化情况来看, 整体上春季的 AOD_f 显示出逐步上升的趋势, 说明随着天气转暖, 人为活动强度有所增加。



注: 此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图 [审图号: GS (2020) 4619 号] 绘制, 底图无修改

图 2 中国月均陆表 AOD_f 空间分布。(a) 三月; (b) 四月; (c) 五月

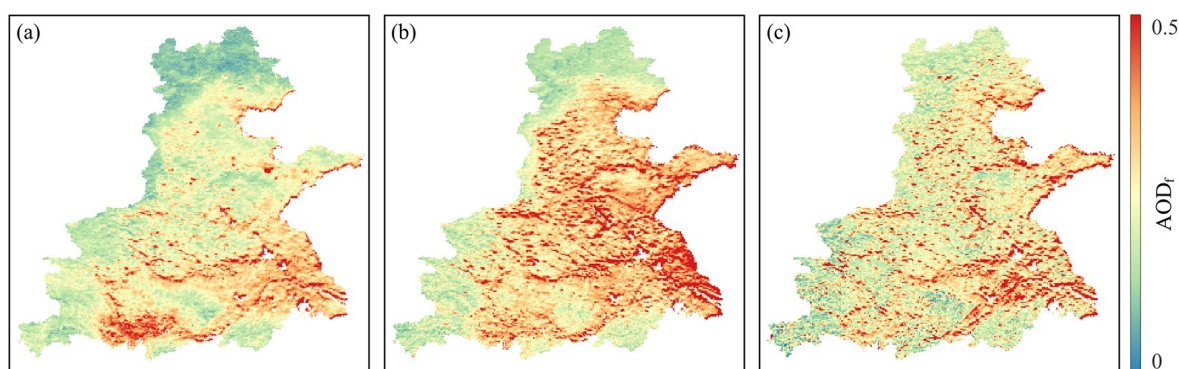
Fig. 2 Spatial distribution of monthly averaged AOD_f over land in China. (a) March; (b) April; (c) May

(1) 华东-华北地区

图 3 为华东-华北地区 (包括北京市、天津市、上海市、河北省、山东省、河南省、江苏省、湖北省和安徽省)

逐月的AOD_f空间分布。由图可以看出,AOD_f高值主要分布在河流(长江、汉江和淮河等)以及湖泊(太湖和洪泽湖等)流域附近,其中尤以长江流域的数值较高,反映了这些区域人口密集、人类生产和生活强度较高的特点。华东-华北地区的山地、丘陵地带(山东丘陵、太行山、秦岭东和大别山等)大多为低值,可能原因是山地丘陵地区人口分布相对稀疏,人为排放的细粒子气溶胶含量较低。华东-华北地区在3-5月的均值分别约为0.244、0.305和0.271,整体呈现先升后降的趋势。

华东-华北地区在3月的AOD_f高值主要集中在长江、淮河流域等人口分布密集的地区。河北省海河平原和靠近北京东侧平原的AOD_f值略高于省内其他地方,而京津地区的AOD_f呈现由天津向北京方向逐渐降低的辐射状。4月最显著的特征是山东、江苏以及安徽北部等地区出现AOD_f增加的现象,与MODIS产品结果的趋势一致。5月华东-华北地区的高值集中分布区域明显减少,而呈现零星状离散分布。这一月度变化特征可能与降水量密切关联,以山东省为例,其降水量数据显示,4月份为春季低值。



注:此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图[审图号:GS(2020)4619号]绘制,底图无修改

图3 华东-华北地区陆表月均AOD_f逐月空间分布变化。(a)三月;(b)四月;(c)五月

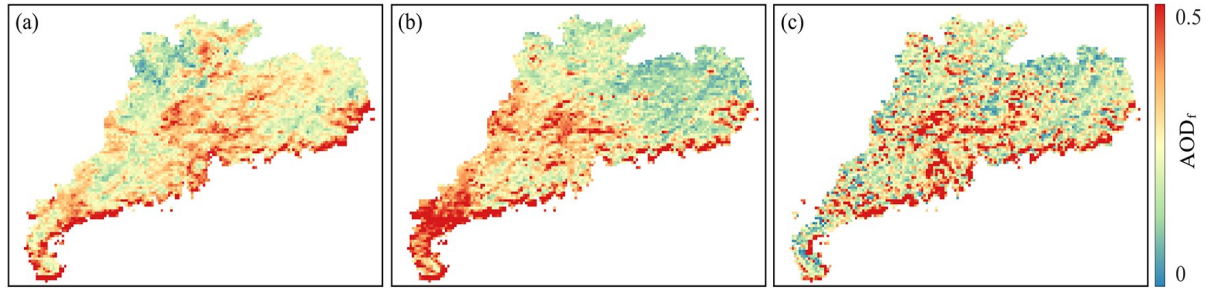
Fig. 3 Spatial distribution of monthly averaged AOD_f over land in Eastern and Northern China. (a) March; (b) April; (c) May

(2) 粤港澳地区

图4为粤港澳地区逐月的AOD_f空间分布。由图可以看出,该地区3月和4月的AOD_f均值相差不大,分别为0.283和0.284,但是空间分布差异显著。3月的高值主要分布在以广佛肇经济圈为高值中心的粤港澳大湾区(以下简称为大湾区),韶关主城区和部分潮汕地区也出现少量高值。4月份粤港澳地区的AOD_f整体呈现东低西高的形式,清远和惠州以东基本呈现低值,西部高值主要集中在雷州半岛和茂名局部地区。大湾区是4月的次高值地区,与3月相比,肇庆整体AOD_f有所升高。对于雷州半岛的高值,可能原因是4月南亚地区燃烧活动频繁^[33],加之春季季风下的传输作用(3.3节),导致细粒子气溶胶向我国两广地区扩散。5月出现省平均值的极小值,约为0.275,大湾区仍然是高值所在地区,相较4月而言,肇庆市靠近广西的区域AOD_f值出现回落。从春季平均AOD_f分布来看,与2001-2018年广东省春季平均AOD_f分布^[34]类似,高值主要分布在大湾区和雷州半岛及茂名局部地区。

(3) 成渝圈地区

图5显示了成渝圈地区的AOD_f逐月空间分布。该地区春季季均分布和逐月月均分布均呈现出中-西部高值的情况,主要原因是在此区域高密度的人口聚集和生产生活排放强度较高,加之成渝圈地处四川盆地,气溶胶等污染物易积聚而不易扩散,污染程度长期较高^[35]。Li等^[36]基于地基网SONET的长时间序列观测显



注: 此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图 [审图号: GS (2019) 3333 号] 绘制, 底图无修改

图 4 粤港澳地区陆表月均 AOD_r 逐月空间分布变化。(a) 三月; (b) 四月; (c) 五月

Fig. 4 Spatial distribution of monthly averaged AOD_r over land in Guangdong-Hong Kong-Macao Area.

(a) March; (b) April; (c) May

示, 春季成都站点气溶胶含量处于国内 16 个站点的峰值。

AOD_r 逐月分布结果显示, 成渝圈地区 3 月份 AOD_r 均值约为 0.371, 是中国境内该月高值分布最集中的地区。其中成都、德阳、眉山等多地出现大量高值; 而雅安西部靠近横断山脉, AOD_r 明显降低; 达州和渝东北三峡库区城镇群位于成渝圈东侧边缘, 地处巴山和巫山附近, AOD_r 数值也显著低于成都-德阳-眉山一带。4 月和 5 月的 AOD_r 均值大幅降低, 分别为 0.270 和 0.276, 造成这种现象的原因主要包括气象因素和交通因素两方面。4 月的高值区域较少, 整体呈现出以成都主城区和重庆主城区为高值中心、向四周降低的辐射状; 5 月也呈现出类似分布, 中心高值略高于 4 月份, 并且重庆的高值中心转移至主城区南部。

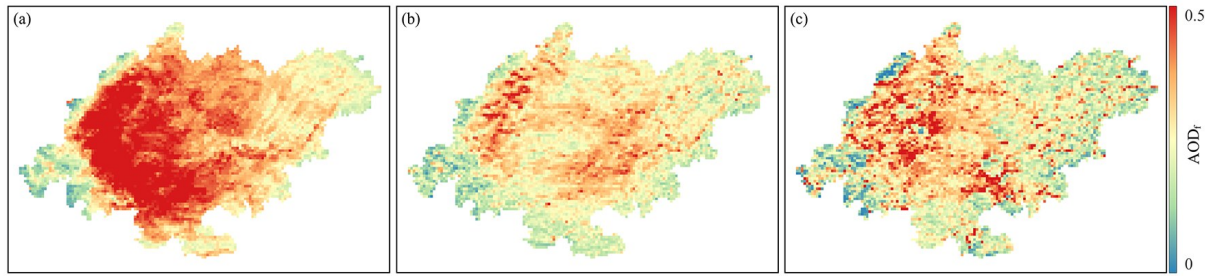
根据降水监测报告数据, 成都市城区 2022 年 3 月的总采样雨量为 60.2 mm, 而 4 月和 5 月分别达到了 574.6 mm 和 512.8 mm, 约为 3 月的 9 倍, 并且多年的数据均显示出 3 月降水量低于 4 月和 5 月。根据多年的公路旅客统计数据, 四川地区 4 月和 5 月的客运量相较于 3 月下降 5%~30%, 表明 3 月的人为活动强度略高于 4 月和 5 月。通过这两方面因素的叠加作用, 可以很好地解释成渝圈地带 3 月 AOD_r 分布出现大量高值的原因。再通过分析 2022 年 3 月的日均值可以得到, 该区域在 3 月 12—13 日达到全月 AOD_r 数值最高的时段, 结合 3 月 10 日成都解除疫情封控以及该周末天气晴好温度适宜的信息, 可知人为活动的增加可能对 AOD_r 的升高产生一定的推动作用。

基于中国环境监测总站 (CNEMC) 在成都地区 15 个主要监测站点的历史 $PM_{2.5}$ 数据, 统计了 2022 年 3—5 月的 $PM_{2.5}$ 周平均值, 并与这些站点的 AOD_r 反演周平均值进行对比, 结果如图 6 所示。由图可以看出, 二者在时序变化趋势上有较好的一致性, 特别是在第 2、6、10 周的 $PM_{2.5}$ 高浓度时段, AOD_r 同样显示出了较高的数值, 说明 AOD_r 卫星数据集可以清晰地反映细颗粒物污染的时空变化。

3.3 全球其他重点地区 2022 年 3—5 月陆表 AOD_r 分布

(1) 南亚地区

图 7 显示了南亚地区逐月的 AOD_r 空间分布。由图可以看出, 3 月出现 AOD_r 高值的区域较广, 其中印度北部的北方邦和比哈尔邦、东部的锡金邦和阿萨姆邦以及中南各邦, 尼泊尔和不丹南部平原地带均呈现较高的数值 (约 0.6)。该区域人口密集度超高、排放活动强烈是污染高值的主要原因, 同时, 受来自印度洋的季风和喜马拉雅山脉的阻隔作用, 在喜马拉雅山脉南麓及恒河平原地区出现持久稳定的污染带, 成为全球空气污染最严重的地区之一。缅甸西侧的低值覆盖区主要为若开山脉, 越南南部的多乐高原和柬埔寨境内也以低



注: 此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图 [审图号: GS (2020) 4619 号] 绘制, 底图无修改

图 5 成渝圈陆表月均 AOD_f 逐月空间分布变化。(a) 三月; (b) 四月; (c) 五月

Fig. 5 Spatial distribution of monthly averaged AOD_f over land in Chengdu-Chongqing economic circle. (a) March; (b) April; (c) May

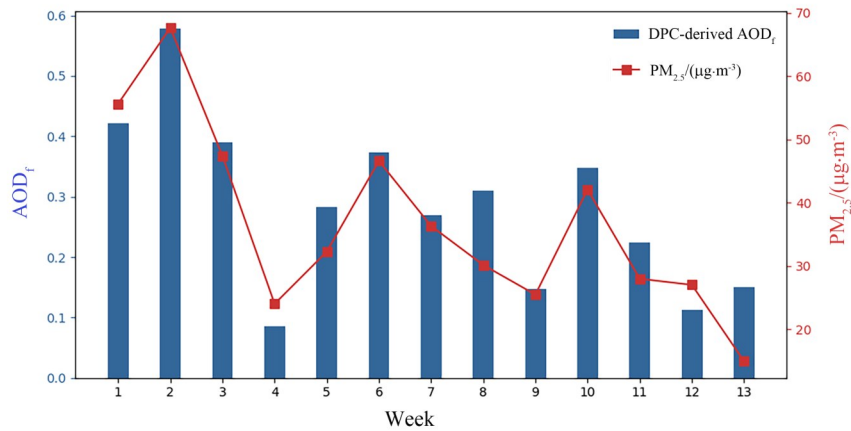
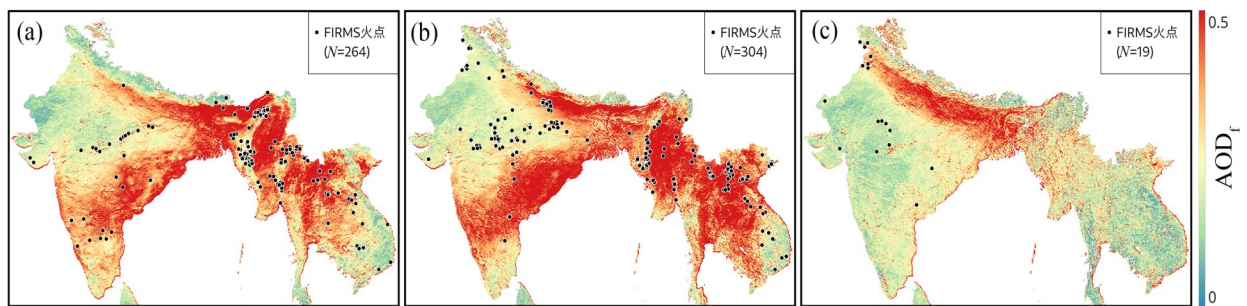


图 6 2022 年春季成都地区 AOD_f 和 PM_{2.5} 监测站点周平均值变化

Fig. 6 Weekly-averaged change of AOD_f and PM_{2.5} around monitoring sites in Chengdu in spring, 2022



注: 此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图 [审图号: GS (2016) 1665 号] 绘制, 底图无修改

图 7 南亚地区陆表月均 AOD_f 逐月空间分布变化。(a) 三月; (b) 四月; (c) 五月

Fig. 7 Spatial distribution of monthly averaged AOD_f over land in partially South Asia. (a) March; (b) April; (c) May

值分布为主, 其余区域则大多为高值区。结合 FIRMS 高置信度 ($\geq 95\%$) 火点数据, 发现大部分火点位于 AOD_f 的高值区, 反映了野火燃烧对 AOD_f 高值的贡献。另外还有一部分火点位于低值区, 可能是受春季季风影响, 在下风向处出现相应的高值, 例如印度中部地区 (春季季风为西北风) 和若开山地区 (春季季风为西南

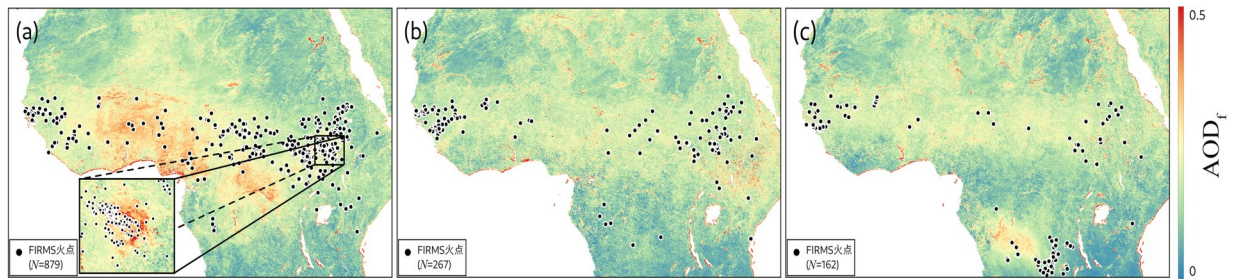
风), 春季季风数据来自 Yu 等^[37], 在印度中部地区火点的东南方向和若开山地区火点的东侧有大量的高值。

4月南亚地区的高值频率显著增加, 除不丹外, 各国的高值地带都有不同程度的扩大, 原因可能是火点数量较3月增加了15.15%, 并且在季风的传输作用下影响了更加广大的南亚地区。5月接近夏季, 秸秆焚烧等活动减少, 火点相较于4月大幅下降了93.75%, 该区域的 AOD_f 高值区域也出现了锐减。例如, 缅甸和老挝等地区在5月基本没有火点, AOD_f 也主要呈现为中低值。

(2) 非洲中-北部地区

图8显示了非洲中-北部地区的 AOD_f 逐月空间分布。在北非撒哈拉沙漠附近, 气溶胶以粗粒子沙尘为主, AOD_f 值主要处于低值范围。3月的高值主要集中于南苏丹和埃塞俄比亚的交界处以及几内亚湾以北的上几内亚高原, 其高值分布与火点分布有较好的一致性。在埃塞俄比亚其他地区, 虽然也出现了部分火点, 但由于稀树草原地区空气干燥, 火情地区中的大气通常没有足够的能量来产生对流, 排放物的信号可能不会被卫星探测到^[38]。非洲西海岸塞内加尔等地区出现大量火点, 但由于受到撒哈拉沙漠沙尘和季风的影响^[39], 导致西海岸的 AOD_f 呈现低值。

非洲中-北部的大面积生物质燃烧通常在4月结束, AOD_f 和火点数量也随之逐渐降低。刚果(金)南部在5月出现了明显的高置信度火点集中区, 细颗粒排放物伴随季风漂浮到西北方向^[40], 呈现条带状的 AOD_f 中-高值区。



注: 此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图 [审图号: GS (2016) 1665 号] 绘制, 底图无修改

图8 非洲北部陆表月均 AOD_f 逐月空间分布变化。(a) 三月; (b) 四月; (c) 五月

Fig. 8 Spatial distribution of monthly averaged AOD_f over land in partially Central-North Africa. (a) March; (b) April; (c) May

表2总结了各区域在2022年春季的 AOD_f 变化。由表可以看出, 春季的 AOD_f 高值主要集中在3月和4月; 南亚地区的燃烧季集中在4月, 而非洲中-北部则集中在3月; 南亚地区在春季是全球的高值集中地区。

3.4 讨论

为了验证DPC的 AOD_f 数据集, 采用AERONET的lev 1.5数据对本研究反演结果进行验证。时间-空间匹配方式为地面站点数据选取卫星过境前后半小时的数据, 卫星反演结果选取匹配站点周边 5×5 像元的空间范围的数据。通过上述规则共选取了2527组数据进行验证, 结果如图9所示。由图可以看出, DPC反演的 AOD_f 与地基观测一致性较高, 散点大部分分布在1:1黑色虚线附近, R^2 接近0.8, 满足 AOD_f 时空分析要求。

从图中可以看出, 有部分反演结果偏差较大, 特别是在低值区域出现了较明显的高估现象, 这可能是由于一些地表的偏振反射率估算不准造成的。例如, 反演采用的地表偏振反射半经验估算模型^[12]是基于

表 2 2022 年春季各区域陆表 AOD_f 变化

Table 2 Variation of AOD_f over land in certain regions in spring, 2022

地区	AOD _f			
	3 月月均	4 月月均	5 月月均	春季季均
成渝圈	0.371*	0.276	0.270	0.316
华东-华北	0.244	0.305*	0.271	0.278
粤港澳	0.283	0.284*	0.275	0.286
南亚地区	0.335	0.369*	0.253	0.327 [#]
非洲中-北部	0.182*	0.166	0.159	0.168

注: *表示春季中该地区在哪一月的 AOD_f 为最高值, [#]表示春季中南亚地区的 AOD_f 均值最高

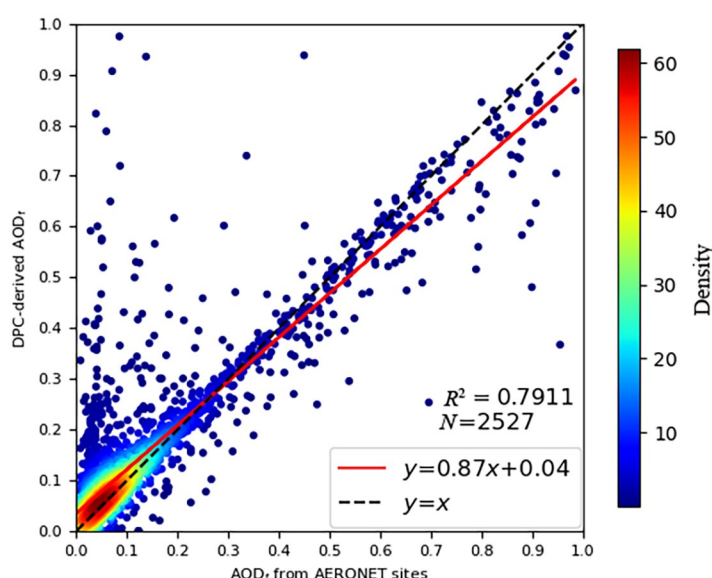


图 9 AERONET 与 DPC 的 AOD_f 对比

Fig. 9 AOD_f comparison between DPC and AERONET

POLDER-3 观测建立的, 其中的经验系数应用于 DPC 时, 可能影响其地表估算精度。未来将考虑结合平台搭载的高精度偏振扫描仪 POSP 的同步观测对地表估算模型进行校准, 以提高地表偏振反射估算精度。

4 结 论

基于 GF-5(02) 在轨测试期间 DPC 多角度偏振观测, 反演得到了 2022 年春季 (3—5 月) 的全球高空间分辨率 (3.3 km) 陆表 AOD_f, 并结合 MODIS 气溶胶产品和 FIRMS 火点数据对 AOD_f 空间分布进行了不同时空尺度的分析。结果表明:

1) 全球陆表 AOD_f 分布呈现北半球高于南半球的整体特征, 北半球的高值区集中在南亚地区以及中国成渝圈、华东-华北等地区, 而南半球基本没有高值集中地区。

2) 中国地区细粒子气溶胶沿“胡焕庸线”显示出清晰的空间分布差异, 典型的高值区域包括成渝圈地区、华东-华北大河流域地区以及两广地区。人口密度、人为活动、城市发展等因素是决定 AOD_f 分布的主因, 而地形 (盆地、山地等)、气候条件、外源传输等因素也对 AOD_f 有不可忽视的影响。

3) 南亚、非洲中-北部等地区的 AOD_f 变化趋势与 FIRMS 火情数据有较好的一致性, 但由于受到季风等因素的影响, 部分火点与 AOD_f 高值集中区域在空间分布上存在一定的偏差。

4) AERONET 地基观测验证显示 DPC 的 AOD_f 反演结果精度较高, 且其空间分布趋势与 MOD04 产品计算的 AOD_f 具有较好的一致性, 特别是全球重点的 AOD_f 高值区域。同时, DPC 反演结果具有更广的全球陆地覆盖能力, 说明 DPC/GF-5(02) 观测数据和反演能力能够有效支持大气环境污染监测。

致谢: 感谢 AERONET (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov>) 提供地基验证数据, LAADS DAAC 提供各种数据 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>), FIRMS 团队 (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>) 提供易于使用的火点数据, “中国空气质量历史数据”网站提供历史 $PM_{2.5}$ 数据 (<https://quotsoft.net/air>)。

参考文献:

- [1] Fuzzi S, Baltensperger U, Carslaw K, *et al.* Particulate matter, air quality and climate: Lessons learned and future needs [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(14): 8217-8299.
- [2] 中华人民共和国生态环境部. 我国环境保护的发展历程与成效 [EB/OL]. (2013-07-11) [2023-01-14]. https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201310/t20131009_261311.htm.
- [3] Sun W, Hu X D, Hu Y H, *et al.* Research progress on the influence of atmospheric environment on the spread of novel coronavirus [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(21): 2509-2521.
孙伟, 胡晓东, 胡耀豪, 等. 大气环境对新型冠状病毒传播影响的研究进展 [J]. *科学通报*, 2022, 67(21): 2509-2521.
- [4] Zhang Y, Li Z Q. Remote sensing of atmospheric fine particulate matter ($PM_{2.5}$) mass concentration near the ground from satellite observation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 160: 252-262.
- [5] Li Z Q, Zhang Y, Shao J, *et al.* Remote sensing of atmospheric particulate mass of dry $PM_{2.5}$ near the ground: Method validation using ground-based measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 173: 59-68.
- [6] Yan X, Shi W Z, Li Z Q, *et al.* Satellite-based $PM_{2.5}$ estimation using fine-mode aerosol optical thickness over China [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 170: 290-302.
- [7] Giles D M, Sinyuk A, Sorokin M G, *et al.* 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 [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019, 12(1): 169-209.
- [8] Levy R C, Mattoo S, Munchak L A, *et al.* The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(11): 2989-3034.
- [9] Levy R, Hsu C. MODIS atmosphere L2 aerosol product [DS/OL]. (2017-08-15) [2023-01-16]. https://modaps.modaps.eosdis.nasa.gov/services/about/products/c61/MOD04_3K.html.
- [10] Garay M J, Witek M L, Kahn R A, *et al.* Introducing the 4.4 km spatial resolution Multi-Angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) aerosol product [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, 13(2): 593-628.
- [11] Tanré D, Bréon F M, Deuzé J L, *et al.* Remote sensing of aerosols by using polarized, directional and spectral measurements within the A-Train: The PARASOL mission [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, 4(7): 1383-1395.
- [12] Nadal F, Breon F M. Parameterization of surface polarized reflectance derived from POLDER spaceborne measurements [J].

- IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(3): 1709-1718.
- [13] Wang S P, Fang L, Zhang X Y, *et al.* Retrieval of aerosol properties for fine/coarse mode aerosol mixtures over Beijing from PARASOL measurements [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(7): 9311-9324.
- [14] Zhang Y, Li Z Q, Qie L L, *et al.* Retrieval of aerosol fine-mode fraction from intensity and polarization measurements by PARASOL over east Asia [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(5): 417.
- [15] Ge B Y, Mei X D, Li Z Q, *et al.* An improved algorithm for retrieving high resolution fine-mode aerosol based on polarized satellite data: Application and validation for POLDER-3 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 247: 111894.
- [16] Li Z Q, Hou W Z, Hong J, *et al.* The polarization crossfire (PCF) sensor suite focusing on satellite remote sensing of fine particulate matter PM_{2.5} from space [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2022, 286: 108217.
- [17] Dubovik O, Li Z Q, Mishchenko M I, *et al.* Polarimetric remote sensing of atmospheric aerosols: Instruments, methodologies, results, and perspectives [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 224: 474-511.
- [18] Xie Y S, Li Z Q, Hou W Z, *et al.* Retrieval of fine-mode aerosol optical depth based on remote sensing measurements of directional polarimetric camera onboard GF-5 satellite [J]. *Aerospace Shanghai*, 2019, 36(S2): 220-229.
谢一淞, 李正强, 侯伟真, 等. 高分五号卫星多角度偏振成像仪细粒子气溶胶光学厚度遥感反演 [J]. 上海航天, 2019, 36(S2): 220-229.
- [19] Hou M Y, Li Z Q, Xie Y S, *et al.* Research on spectral feature cloud detection method of directional polarimetric camera on Chinese satellite [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2022, 17(6): 598-612.
侯梦雨, 李正强, 谢一淞, 等. 国产卫星多角度偏振传感器的光谱特征云检测方法研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2022, 17(6): 598-612.
- [20] Friedl M, Sulla M D. MODIS/Terra+Aqua land cover type yearly L3 global 500 m SIN grid V061 [DS/OL]. (2022-08-12) [2022-10-18]. <https://e4ftl01.cr.usgs.gov/MOTA/MCD12Q1.061>.
- [21] Giglio L, Justice C. MODIS/Terra thermal anomalies/fire 5-min L2 swath 1 km V061 [DS/OL]. (2022-06-01) [2023-01-25]. <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod14v061>.
- [22] O'Neill N T, Dubovik O, Eck T F. Modified angström exponent for the characterization of submicrometer aerosols [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(15): 2368-2375.
- [23] O'Neill N T, Eck T F, Smirnov A, *et al.* Spectral discrimination of coarse and fine mode optical depth [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D17): 4559.
- [24] Deuzé J L, Bréon F M, Devaux C, *et al.* Remote sensing of aerosols over land surfaces from POLDER-ADEOS-1 polarized measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D5): 4913-4926.
- [25] Waquet F, Léon J F, Cairns B, *et al.* Analysis of the spectral and angular response of the vegetated surface polarization for the purpose of aerosol remote sensing over land [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(6): 1228-1236.
- [26] Lafrance B. *Simplified Model of the Polarized Light Emerging from the Atmosphere. Correction of the Stratospheric Aerosol Impact on Polder Measurements* [D]. Lille: Université des Sciences et Techniques de Lille, 1997.
- [27] Waquet F, Goloub P, Deuzé J L, *et al.* Aerosol retrieval over land using a multiband polarimeter and comparison with path radiance method [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D11): D11214.
- [28] Vermote E F, Tanré D, Deuze J L, *et al.* Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(3): 675-686.
- [29] Li Z Q, Zhang Y, Xu H, *et al.* The fundamental aerosol models over China region: A cluster analysis of the ground-based remote sensing measurements of total columnar atmosphere [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(9): 4924-4932.
- [30] Xia X S, Wang J H, Song W D, *et al.* Spatio-temporal evolution of PM_{2.5} concentration during 2000-2019 in China [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(11): 4832-4843.

- 夏晓圣, 汪军红, 宋伟东, 等. 2000—2019年中国PM_{2.5}时空演化特征 [J]. 环境科学, 2020, 41(11): 4832-4843.
- [31] Feng Z Y, Shi R H. Spatio-temporal features and the association of ground-level PM_{2.5} concentration and its emission in China [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2021, 23(7): 1221-1230.
冯子钰, 施润和. 中国近地面PM_{2.5}浓度与排放的时空分布及其关联分析 [J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(7): 1221-1230.
- [32] 国家统计局. 第七次全国人口普查公报(第三号) [EB/OL]. (2021-05-11)[2023-06-30]. http://www.stats.gov.cn/sj/tjgb/rkpcgb/qgrkpcgb/202302/t20230206_1902003.html.
- [33] Zheng Y G, Chen J, Zhu P J, *et al.* Influence of biomass burning in south Asia on lower tropospheric ozone concentration over Kunming [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2007, 43(3): 330-337.
郑永光, 陈炯, 朱佩君, 等. 南亚地区生物体燃烧对昆明地区对流层中下层臭氧浓度的影响 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2007, 43(3): 330-337.
- [34] Liu Y Q, Zhang J, Pang G Q, *et al.* Spatial and temporal variation characteristics of aerosol parameters in Guangdong Province in the past 18 years [J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2020, 40(6): 77-88.
刘艳群, 张骥, 庞古乾, 等. 2001—2018年广东省气溶胶参数的时空变化特征 [J]. 广东海洋大学学报, 2020, 40(6): 77-88.
- [35] Zhang Y. *Retrieval of Aerosol Optical Parameters Based on Multi-angle Intensity and Polarization Satellite Data* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences), 2018.
张洋. 基于多角度标量和偏振卫星数据的气溶胶光学参数反演研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2018.
- [36] Li Z Q, Xu H, Li K T, *et al.* Comprehensive study of optical, physical, chemical, and radiative properties of total columnar atmospheric aerosols over China: An overview of sun-sky radiometer observation network (SONET) measurements [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2018, 99(4): 739-755.
- [37] Yu W, Liu Y M, Yang X Q, *et al.* Impact of North Atlantic SST and Tibetan Plateau forcing on seasonal transition of springtime South Asian monsoon circulation [J]. *Climate Dynamics*, 2021, 56(1/2): 559-579.
- [38] Duncan B N, Martin R V, Staudt A C, *et al.* Interannual and seasonal variability of biomass burning emissions constrained by satellite observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D2): ACH1-1.
- [39] Senghor H, Machu É, Hourdin F, *et al.* Seasonal cycle of desert aerosols in western Africa: Analysis of the coastal transition with passive and active sensors [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(13): 8395-8410.
- [40] Cook K H, Vizy E K. Contemporary climate change of the African monsoon systems [J]. *Current Climate Change Reports*, 2019, 5(3): 145-159.